

INSTITUTUL POLITEHNIC „TRAIAN VUIA”
TIMIȘOARA

Ing. Kărgărit Mehedințeanu

CONTRIBUȚII LA STUDIUL PRELUCRĂRII CU FASCICOL
LASER CONCENTRAT A ALEZAJELOR MICROMETRICE ÎN
MATERIALE LURE

- TEZĂ DE DOCTORAT -

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA „POLITEHNICA”
TIMIȘOARA

UNIVERSITATEA POLITEHNICA TIMIȘOARA BIBLIOTECA CENTRALĂ	
LOCUL DE	TD
NUMER	MEC/MEH
NUMER	676.327

Conducător științific

Profesor emerit, doctor inginer

Gheorghe Sevil

Timișoara - 1978

această interacțiune are loc datorită prezenței sarcinii electrice a elementului. În plus, modul în care se emite radiația (cuanta de energie), deci și mișcarea electronilor, nu a fost explicat de ipotezele incipiente privind structura atomului.

Sursele (generatoarele și amplificatoarele cuantice de radiații) sînt o creație a noilor metode fizice bazate pe fenomene cuantice unde, în locul electronilor liberi care se mișcă în vid, se folosesc electroni legați în materie (molecule, atomi sau ioni ai unui corp solid, lichid sau gazos).

Într-o primă etapă, E. Rutherford a conceput forma planetară a modelului atomic, dînd o imagine mai completă asupra structurii atomului. Însă, nu a putut explica proprietatea atomilor de a emite radiații ca urmare a rotirii electronilor în jurul nucleului pe orbite diferite.

În anul 1913 Bohr descoperă teoria structurii atomului, fondată pe modelul atomic planetar al lui Rutherford și pe teoria mecanicii cuantice a lui Planck prin care existența și absorbția de energie radiată se produc în mod continuu în "porții" (cuante) de energie.

Astfel, luînd ca model atomul de hidrogen, Bohr definește structura atomului planetar: singurul electron al acestuia se rotește în jurul nucleului numai pe o orbită staționară; dacă primește energie din afară, electronul face un salt pe o altă orbită mai îndepărtată de nucleu, cu nivelul energetic E_n mai mare ca E_1 din starea inițială; această stare excitată este instabilă și electronul caută să se întoarcă pe orbita staționară, eliberînd energia înmagazinată sub formă de radiație; cu cât energia de excitație este mai mare, cu atât saltul va fi pe o orbită mai îndepărtată și atomul va fi mai excitat; absorbția și emisia de energie are loc, deci, proporțional cu saltul realizat de electroni.

Din cele de mai sus rezulta că, pînă la această etapă, era cunoscută emisia de radiație spontană, adică sistemul emite în mod natural.

În anul 1917 A. Einstein descoperă fenomenul de emisie stimulată (emisie indusă) care stă la baza radiației cuantice, fiind fenomenul invers al procesului de absorbție al undelor electromagnetice de către substanțe.

Einstein, conform teoriei lui Bohr, precizează că la absorbția unui foton de un sistem atomic (atom, ion, moleculă), apare o stare excitată datorită creșterii energiei la nivelul E_n ; revenirea

În starea fundamentală E_1 se face cu eliberarea energiei acumulate sub formă de radiație (luminosă, în domeniul optic) de frecvență γ :

$$E_2 - E_1 = h \cdot \gamma \quad (1)$$

unde, h - constanta lui Planck ($h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Js). (10, 155).

În cazul corpurilor calde incandescente și a luminii reci, în care atomii sau moleculele radiază în mod independent și haotic (lumină incoerentă, cu bandă de frecvență foarte largă, moment puterice și randament scăzut), câmpul electromagnetic din starea superioară este nul iar procesul de trecere a sistemului în starea fundamentală este urmat de o emisie de radiație spontană.

Extinzând teoria lui Einstein de la un sistem atomic la o substanță (solid, lichid, gaz), în aceasta se creează o acumulare de sisteme atomice în stare energetică excitată, fenomen ușor realizabil prin diverse metode. Revenirea la starea fundamentală va avea loc datorită "ciocnirii" (interacțiunii câmpului electromagnetic) de exemplu a unuia dintre atomii excitați cu un foton de radiație, având lungimea de undă corespunzătoare radiației pe care o emite. Ca urmare, în loc de un singur foton (cel incident) vor rezulta doi fotoni care vor stimula alți doi atomi excitați în stare de excitație (fig. 1), (foto 34), rezultând patru fotoni ș.a.m.d. Procesul a fost denumit emisia stimulată sau inducere.

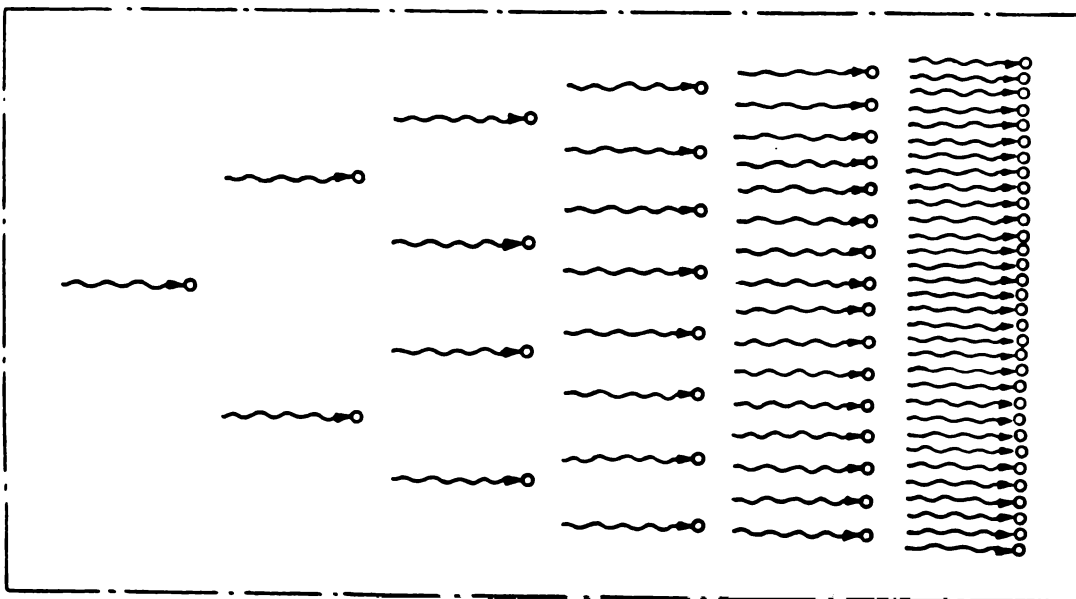


Fig.1

Intrecut un foton poate da o avalanșă de fotoni, emisia a fost

INSTITUTUL POLITEHNIC
PIM SORBA
BUCUREȘTI

numita radiație în lanț. Practic, această emisie are loc simultan, ceea ce amplifică unda incidentă, astfel că la ieșirea din mediul activ apare un semnal foarte intens, coerent, monocromatic și direcțional numit fascicul laser (fig.2 schema de principiu a instalației laser: 1 - mediu activ, 2 - oglindă total reflectatoare, 3 - oglindă parțial transparentă, 4 - fascicul laser, 5 - oglindă, 6 - lentila focalizatoare, 7 - fascicul concentrat, 8 - semifabricat, 9 - orificiu; a - foton supus pompajului optic, b - foton excitat (amplificat) orientat paralel cu axa rezonatorului, c - foton reflectat de cea. 10^8 ori, d - foton excitat orientat în afara rezonatorului (pierdere) (144).

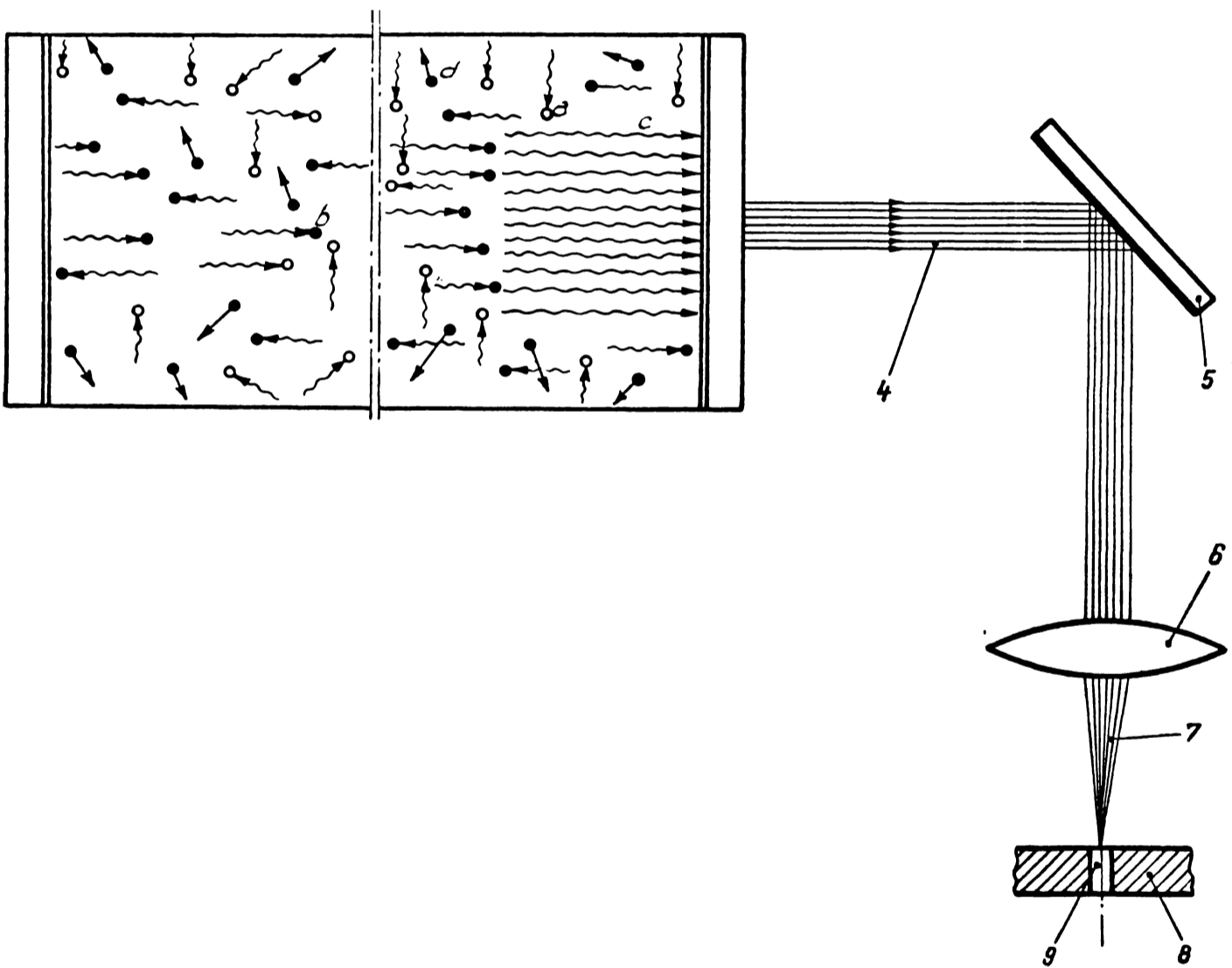


Fig.2

Am văzut ce privește radiația emisa în mod stimulată, această se va realiza și va depăși în intensitate pe cea absorbită, numai dacă numărul sistemelor atomice în stare excitată (N_2) din rezonator este mai mare decât cel în starea neexcitată (N_1)

$$N_2 > N_1$$

(2)

fenomenul fiind denumit amplificarea radiației luminoase sau inversiunea de populație între cele două niveluri energetice ale întregului sistem. Când ansamblul de sisteme este capabil să realizeze inversiunea de populație, poartă denumirea de mediu activ.

La temperaturi negative, inversiunea de populație are loc după distribuția sistemelor atomice în echilibrul termodinamic având la bază relația lui Boltzmann (155):

$$N_1 = A \cdot e^{-\frac{E_1}{K \cdot T}} \quad (3)$$

unde, A - constanta de normare; N_1 - numărul sistemelor atomice pe nivelul 1 ; E_1 - energia nivelului 1 ; $K = 1,37 \cdot 10^{23} \text{ J/kmol}$ - constanta lui Boltzmann; $T = -273^\circ \text{C}$ - temperatura absolută a ansamblului de sisteme considerat.

Raportul între numărul sistemelor excitate și neexcitate este (8)

$$\frac{N_1}{N_2} = e^{-\frac{E_1 - E_2}{K \cdot T}} \quad (4)$$

Rezultă că, la o valoare a temperaturii T , numărul N de sisteme atomice scade cu creșterea energiei sistemului; în ansamblu, majoritatea sistemelor atomice se găsesc la niveluri mai joase. Ca urmare, absorbția este mai mare decât emisia de energie iar sistemul, în acest caz, va fi instabil deși, pentru un anumit interval de timp, există un echilibru forțat. Din relația (4) rezultă (155) :

$$T = -\frac{E_1 - E_2}{K \cdot \ln \frac{N_1}{N_2}} \quad (5)$$

așadar, temperatura este negativă, adică sistemele atomice cu temperatura negativă (față de nivelurile energetice pe care le ocupă în starea excitată) sînt capabile de amplificarea radiației, deci a fenomenului laser.

1.1.3. Etape reprezentative ale realizării surselor cuantice de radiații

Purtînd denumiri diferite după domeniul spectral în care lucrează, tipurile reprezentative de generatoare și amplificator-

re cuantice de radiație au avut următoarea evoluție:

a) În domeniul microundelor (M.A.S.E.B. - microwave amplification by stimulated emission of radiation) (8, 45, 48, 66):

- 1954-1955: H.Z. Zeiger și C.H. Townes - generator cuantic molecular cu amoniac; frecvență 20000 Hz; $\lambda = 1,25$ cm; stabilitate foarte mare a frecvenței ($\sim 10^{-11}$); utilizat ca ceașă etalon și cel mai bun standard de frecvență;

- 1954-1955: N.G. Basov și A.M. Prohorov - generator și amplificator molecular, bazat pe fenomenul emisiei induse;

- apoi, H.M. Golombberg - generator cuantic cu fascicul atomic de hidrogen; frecvență 1420,405 MHz; stabilitate mare; utilizat ca spectroscop de microunde și la determinarea structurii hiperfine a stării fundamentale a atomilor de hidrogen, cu o foarte mare precizie;

- mai târziu, G. Feher și alții, P.P. Chester și alții, Al.M. Khorther și J.W. Meier - generatoare cuantice, folosind ca mediu activ substanțele solide de tipul paramagnetice; s-au construit; aplicare în radiolocație; azi sînt fabricate pe scară industrială;

b) În domeniul optic (L.A.S.E.R. - light amplification by stimulated emission of radiation), ca rezultat al extinderii principiilor și tehnicii generatoarelor și amplificatoarelor din domeniul microundelor (39, 22, 20, 91) :

- 1958: A.L. Schawlow și C.H. Townes au extins principiul maserilor în domeniul optic;

- 1960: T.H. Maiman - observa fenomenul de amplificare prin emisie stimulată în cristelul de rubin a radiației invizibile roșii cu $\lambda = 6943 \text{ \AA}$;

- câteva luni mai târziu: R.J. Collins și alții - comunică rezultate cu privire la coerența, monocromaticitatea și direcționalitatea luminii cu lungimea de undă $\lambda = 6493 \text{ \AA}$ emisa de rubin în urma emisiei stimulate;

- 1961: A.Jawa, W.R. Bennet și D.R. Herriott - generatorul cu gaze (amestec de heliu și neon); performanțe superioare față de generatorul cu rubin în special monocromaticitatea semnalului; $\lambda = 11530 \text{ \AA}$; lărgimea de bandă foarte îngustă (de cca. 1000 ori mai mică decît a luminii roșii de 6493 \AA emisa de laserul cu rubin),

fiind o deosebită realizare datorită acestui fapt.

1.1.4. Unele considerații privind calitățile semnalului laser

O fracțiune din radiație, generată în cavitatea de rezonanță a unui excitator cuantic optic și care iese prin oglinda parțial reflectatoare, constituie semnalul laser, cu următoarele calități:

Coerența (113) se referă la lipsa fluctuațiilor în valorile câmpului electromagnetic ca urmare a suprapunerii mai multor componente Fourier. Când undele provenite din două surse produc fenomenul de interferență, acestea sînt coerente. În acest caz, timpul de observație a franjurilor este mai mare în comparație cu rațiunea generată de atomi. În experiența clasică cu două fante a lui Fresnel, prezența franjurilor de interferență indică o mărime a coerenței între fasciculele de lumină ale celor două fante, exprimată prin vizibilitatea V :

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (6)$$

cînd: $V = 1$ - coerență perfectă; $V = 0$ - incoerență.

Într-un câmp magnetic, o perturbație electromagnetică este funcție de coordonatele spațiu-timp. Pentru a defini coerența temporală se considera o sursă ideal monocromatică lucrînd continuu. Perturbația de la un punct dat în spațiu la timpul t este corelată cu perturbația la momentele anterior și posterior. Fiind dată lungimea spectrală $\Delta\nu$ a radiației, se poate defini cu aproximație o caracteristică de timp, numită coerență, prin relația $\Delta t \approx \frac{1}{\Delta\nu}$. Acest timp este intervalul în care schimbarea fazei relative a două componente Fourier oarecare este mai mică decît 2π și suma unor astfel de componente reprezintă o perturbație care, în acest interval de timp, se comportă asemănător unei unde monocromatice de frecvență medie.

Apeșind o sursă de dimensiuni mici în focarul unei lentile convergente, radiația transmisă prin lentilă este compusă din unde aproape plane. La un moment dat, în diferite puncte din planele perpendiculare pe axul lentilei, perturbațiile vor fi puternic corelate. În acest caz, se produc franje de interferență cu undele provenite de la diferite porțiuni ale unui astfel de front de undă, definind coerența spațială.

Dirigionalitatea (113, 122). Datorită dimensiunilor, sursele obișnuite de lumină au o divergență foarte mare. Un punct al unei surse situate pe axul unui sistem optic oarecare va produce un fascicol de lumină paralel cu axul, în timp ce diferitele puncte ale sursei din afara axului optic emit fascicole înclinate. Divergența acestor fascicole este funcție de dimensiunea sursei și distanța focală a obiectivului.

În cazul laserului, semnalul este extrem de direcțional datorită specificului procesului de amplificare din rezonator. În cavitățile de rezonanță de tip etalon Fabry-Perot, numai undele care se propagă de-a lungul axei se reflectă de un număr foarte mare de ori între suprafețele reflectătoare. Undele care formează un unghi oarecare cu axa cavității se vor reflecta de un număr de ori foarte mic, după care vor ieși din cavitățile de rezonanță prin pereții laterali ai mediului activ, fără să participe la efectul de amplificare. Până în prezent, s-au realizat semnale laser cu unghiul de divergență maximă de un minut arc pentru laserii cu mediu activ solid și sub un minut pentru laserii cu mediu activ gazos.

Monocromaticitatea (finetea liniei spectrale) (113, 122), extrem de pronunțată la acest semnal, este determinată de a) modurile de oscilație ale rezonatorului, b) lățimea naturală și Doppler a tranziției atomice și c) procesul de emisie stimulată care se produce în interiorul rezonatorului.

Într-o cavitate de rezonanță mai mare decât lungimea de undă utilizată (cavitate multimodală) îi revine un foarte mare număr de moduri de oscilație, fiecare corespunzându-i o anumită frecvență a vibrației. În cazul modurilor axiale, aceste vibrații se produc (dacă este satisfăcută condiția Fabry-Perot a unei unde plane ce se propagă perpendicular pe suprafața lentilei reflectoare) cu lungimea de undă:

$$2L = q \cdot \lambda \quad (7)$$

unde: L - distanța între lentilele reflectoare; λ - lungimea de undă; q - un număr întreg.

De obicei, numărul q este foarte mare așa încât rezonanțele Fabry-Perot sînt foarte apropiate. Din relația (7) rezulta că frecvența între două astfel de rezonanțe succesive este:

$$\Delta \nu_r = \frac{c}{2L} \quad (8)$$

unde: c - viteza de propagare a radiației luminoase.

Pe de altă parte, semilărgimea acestor rezonanțe Fabry-Perot este determinată de pierderea prin reflexie a undei care parcurge distanța L egală cu lungimea cavității, adică:

$$\Delta\nu_c = \frac{L}{t_c} = \frac{c(1-\alpha)}{L} \quad (9)$$

unde: α - coeficientul de reflexie al urdelor de la capetele rezonatorului.

De asemenea, semilărgimea Doppler a radiației emise de sistemele atomice ale mediului activ aflat între lentilele rezonatorului (considerând un mediu activ gazos) este dată de relația:

$$\Delta\nu_D = (\ln 2)^{\frac{1}{2}} \nu_0 \frac{v}{c} \quad (10)$$

În cazul radiației emise de sistemele atomice prin efect laser, semilărgimea liniei spectrale se poate exprima prin relația:

$$\Delta\nu_{osc} = \frac{2\pi h\nu (\Delta\nu_c)^2}{P} \quad (11)$$

unde: P - puterea modului de oscilație.

Pentru un laser cu lungimea de 100 cm, ale cărui suprafețe reflectoare au coeficient de reflexie $\alpha = 90\%$, rezultă că $\Delta\nu_h \approx 150$ kHz, $\Delta\nu_c \approx 3$ kHz și $\Delta\nu_D \approx 1000$ kHz. În aceste condiții și considerând $P = 10^{-3}$ W, rezultă $\Delta\nu_{osc} \approx 10^{-2}$ Hz. Este, deci, evidentă monocromaticitatea deosebit de pronunțată (de ordinul 10^{-2} Hz) a semnalului laser față de lărgimea foarte mare (1000 kHz) a surselor de radiații care prezintă efectul Doppler, cum și față de lărgimea naturală (16 kHz) a liniei spectrale.

Această monocromaticitate se datorește faptului că efectul laser se produce în special în centrul unui mod de oscilație, între ele acestuia rămânând neamplificate. În fig. 3 (113) s-a considerat că a fost separat un mod de oscilație. Existând mai multe moduri, reprezentarea grafică se schimbă iar monocromaticitatea se va înrăutăți. Adică, proprietatea de monocromaticitate a semnalului emis depinde, în principal, de selecția moduri-

lor de oscilație, deci, de calitățile cavității de rezonanță utilizate. În acest scop este necesară perfecționarea tehnologiilor de fabricație a mediilor active la nivel de monocristale, pentru a evita fluctuații ale modului de oscilație (102).

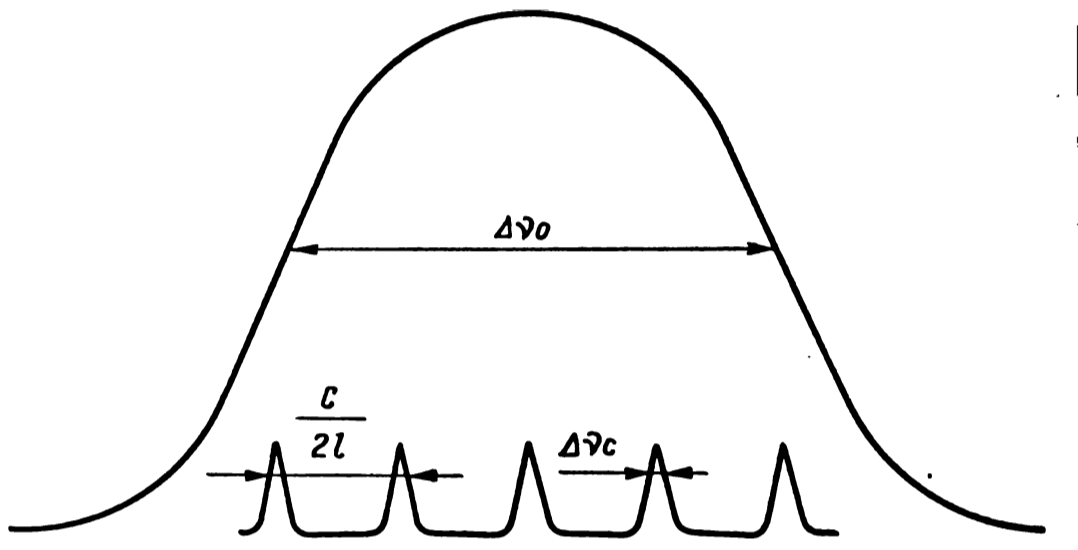


Fig. 3

Intensitatea (110, 113). Sursele de lumină obișnuite, datorită luminozității reduse, nu pot fi utilizate ca stare. În ceea ce privește temperatura acestora, oricât de mare ar fi, ele nu pot emite mai multă energie decât emițătorul perfect - corpul negru.

Emisia stimulată, care stă la baza efectului laser, alungeste sistemele atomice excitate să emita mai rapid decât acestea ar putea să o facă în mod natural, fenomen care, corelat cu proprietatea de direcționalitate, realizează densități foarte mari ale radiației generate de dispozitivele laser.

Chiar puterea radiației totale a suprafeței solare pentru întregul spectru emis este de numai 7 kW/cm^2 . La prima vedere, aceasta reprezintă o cantitate substanțială de energie. Însă, ținând cont de lărgimea uriașă a spectrului solar, această cantitate de energie este extrem de mică în comparație cu energia concentrată emisa de laser.

De exemplu, semnalul unui laser cu rubin, lucrând prin impulsuri, dă o putere de ordinul unui W pe un interval de timp de 10^{-3} s, iar aceasta este conținută în interiorul unei lărgimi

de bandă de $0,07 \text{ \AA}$ și provine de la o arie de $0,2 \text{ cm}^2$. Pentru comparație, puterea emisă de un corp negru aflat la temperatura de 6000° K , pentru aceeași arie și interval de lungime de undă, este de numai $0,01 \text{ W}$. Este cunoscut că radiația suprafeței corpului negru este distribuită din interiorul unei emisfere, adică în interiorul unui con de 2 steradiani, în timp ce divergența fasciculului laser este mai mică de o jumătate de grad, adică 10^{-2} radiani, sau, considerat în volum, 10^{-4} steradiani. Pe baza acestui raționament, în interiorul acestui con și în intervalul de lungime de undă de $0,07 \text{ \AA}$, soarele, considerat chiar un emițător perfect (corp negru), emite o putere de numai $2 \cdot 10^{-7} \text{ W}$. Rezultă că semnalul laser, de exemplu cel cu rubin pulsat, este de aproximativ $5 \cdot 10^9$ ori mai intens decât o arie echivalentă a suprafeței solare. Acest raport este cu atât mai remarcabil în cazul laserului cu CO_2 , ale cărui semnale sînt mai direcționale și mai monocromatice.

1.1.5. Principii constructive și funcționale ale instalațiilor laser

1.1.5.1. Cavitățile de rezonanță

Spațiul în care se produce amplificarea este mediul activ de forma cilindrică sau prizmatică și de mică secțiune, prevăzut la capete cu două oglinzi în care una parțial reflectatoare. Rolul acestora este ca, în procesul inversiunii de populație în care are loc stimularea unui număr foarte mare de sisteme atomice, să reflecte de câteva mii de ori fotonii ce se propagă în lungul mediului activ. Dintre acestea, numai cei cu dispersie zero și în proporție de pînă la 40% ($102, 144$) ies prin oglinda parțial reflectatoare, formînd semnalul laser. O parte din emisiunea amplificată a fotonilor, care nu cad perpendicular pe oglinzi, iese afară din rezonator micșorînd randamentul instalației.

Deoarece faptul că lungimile de undă în domeniul optic sînt cu trei ordine de mărime mai mici decît în domeniul micro-undelor, precum și imperfecțiunii tehnologiilor actuale și reflexiei reduse a pereților acestora, nu pot fi construite cavități de rezonanță de ordinul micronilor. Problema a fost soluționată prin utilizarea de cavități de rezonanță multimodale.

În ceea ce privește selectarea modurilor de vibrație, s-a considerat ca etalon interferometrul Fabry-Perot în care, prin reflexii repetate ale undei luminoase între două oglinzi

reflectătoare, pot fi selecționate numai câteva din numărul enorm de moduri de vibrație posibile. Prin excitarea mediului activ (iradiere luminoasă, descarcare electrică în gaz, ciocniri de neutroni), pentru unul sau mai multe moduri selectate, poate fi îndeplinită condiția de autooscilație, creînd în cavitatea de rezonanță unda staționară, iar în afara rezonatorului emisia unei unde laser (64, 155).

1.1.5.2. Soluții de principia ale cavităților de rezonanță

Prima realizare constructivă a unei cavități de rezonanță multimodale, este cunoscută în 1958 și aparține sevenților A.L. Schawlow și C.H. Townes (144). Datorită numărului mare de moduri de oscilație, fie chiar într-un interval de frecvență dorit, avînd ca rezultat cantități mari de radiație spontană, nu s fost posibilă realizarea curselor cuantice din domeniul optic. Pornind de la faptul că aportul de radiație al majorității modurilor de vibrație poate fi aproape complet eliminat folosind proprietatea de direcționalitate a undei, Schawlow și Townes au construit, în acest scop, o cavitate cu pereții opuși puternic reflectatori din oglinzi paralele, dreptunghiulare sau circulare.

Fox și Li, ca și Boyd și Gordon (144) au utilizat oglinzi sferice, cofocale unde pierderile de putere, datorită dispersării radiațiilor, sînt cu aproape două ordine de mărime (10^2) mai mici față de cele plane circulare și, respectiv cu trei ordine față de cele plane patrate. În plus, pot fi prelucrate cu o precizie ridicată, reglare cofocală simplă față de reglarea paralelismului, putere de pompaj mică.

Suprafețele reflectatoare de la capetele cavității de rezonanță sînt de tipul pături dielectrice armonizate optic sau straturi de argint; acestea din urmă au coeficient de reflexie scăzut, pierderi relativ mari de putere, se încălzesc și se degradează mai ales la laserii cu rubin (82).

E. Snitzer (144) sugerează o cavitate de rezonanță radical deosebită pentru laserii cu mediu activ solid, pe bază de ghiduri de unde dielectrice. Avînd un diametru de cîtiva microni, aceste poate propaga un număr foarte mic de moduri de vibrație. Însă, o asemenea fibră neavînd o cantitate suficientă de mediu de lucru, nu asigură o putere convenabilă decît dacă se utilizează în fascicol de ghiduri. Prin acoperire cu o peliculă fină transparentă a

fiecărei fibre se poate realiza legătura între câmpurile diferitelor fibre dielectrice. Față de cavitățile de rezonanță precedente, ar prezenta unele avantaje deosebite privind selectarea mai bună a modurilor de vibrație, emisia spontană neglijabilă, putere de pompaj redusă, cât și dezavantaje referitor la dificultatea introducerii luminii în fiecare fibră datorită reflexiei peliculei periferice și a fabricării ghidurilor din materiale active cunoscute (155, 142).

1.1.5.3. Procedee de pompaj optic (36, 42)

Pompajul optic, prin care se înțelege realizarea unui surplus de populație în nivelul superior de tranziție laser pentru care $N_m > N_n$, prin absorbția de energie de către atomii din starea fundamentală pompați în starea excitată, se poate realiza prin:

a) iradiere optică a mediului activ, cu o frecvență corespunzătoare; puterea izvorului de pompaj trebuie să fie suficient de mare, deoarece numai o mică parte contribuie la inversiunea de populație, restul fiind consumată la încălzirea mediului activ și instalației; prin descărcările în gaze cu impulsuri (flash) se sporește eficiența pompajului și se diminuează încălzirea;

b) ciocniri neelastice, procedeu utilizat pentru medii active gazease (heliu, neon, xenon), prin descărcări electrice în gaz sau cu un "tun" electronic;

c) inducție magnetică, procedeu nou utilizat pentru medii active gazease;

d) prin asociație, combinând reacțiile chimice și mecanismul de transfer al energiei, instalația purtând denumirea de laseri chimici, deosebit de puternici în ultimii ani (105, 111, 152).

1.1.5.4. Procedee de selectare a modurilor de vibrație

Cavitățile de rezonanță enunțate pînă acum sînt de tipul multinodale și selectează modurile de vibrație numai pe proprietatea de direcționalitate a razelor. Aceasta selectare este insuficientă deoarece semnalele laser rezultate au o monocromaticitate slabă, agoniție mare și stabilitate redusă.

Pentru o mai accentuată selectare a modurilor de vibrație, pe cît posibil a unui singur, se utilizează următoarele

procedee (144):

a) scurțarea cavității de rezonanță (fig.4 a) : conforma relației $\Delta\nu = \frac{c}{2L\eta}$, separarea în frecvență între cele două moduri crește odată cu micșorarea lungimii cavității de rezonanță; soluția nu este satisfăcătoare deoarece, odată cu sporirea selecției, scade capacitatea rezonatorului de a produce oscilații;

b) separarea celor două moduri față de cel preferat, se poate realiza prin interferometrul Fabry-Perot modificat, capabil să obțină un singur mod de vibrație (fig.4 b), prin alegerea convenabilă a lungimii cavității secundare BC ;

c) cavitățile de rezonanță formate dintr-o serie de interferometre Fabry-Perot, cu interstiții de aer între acestea, realizează o selecție mai intensă a modurilor de vibrație și o calitate mai bună a semnalului față de un mediu activ de lungime egală (fig. 4 c).

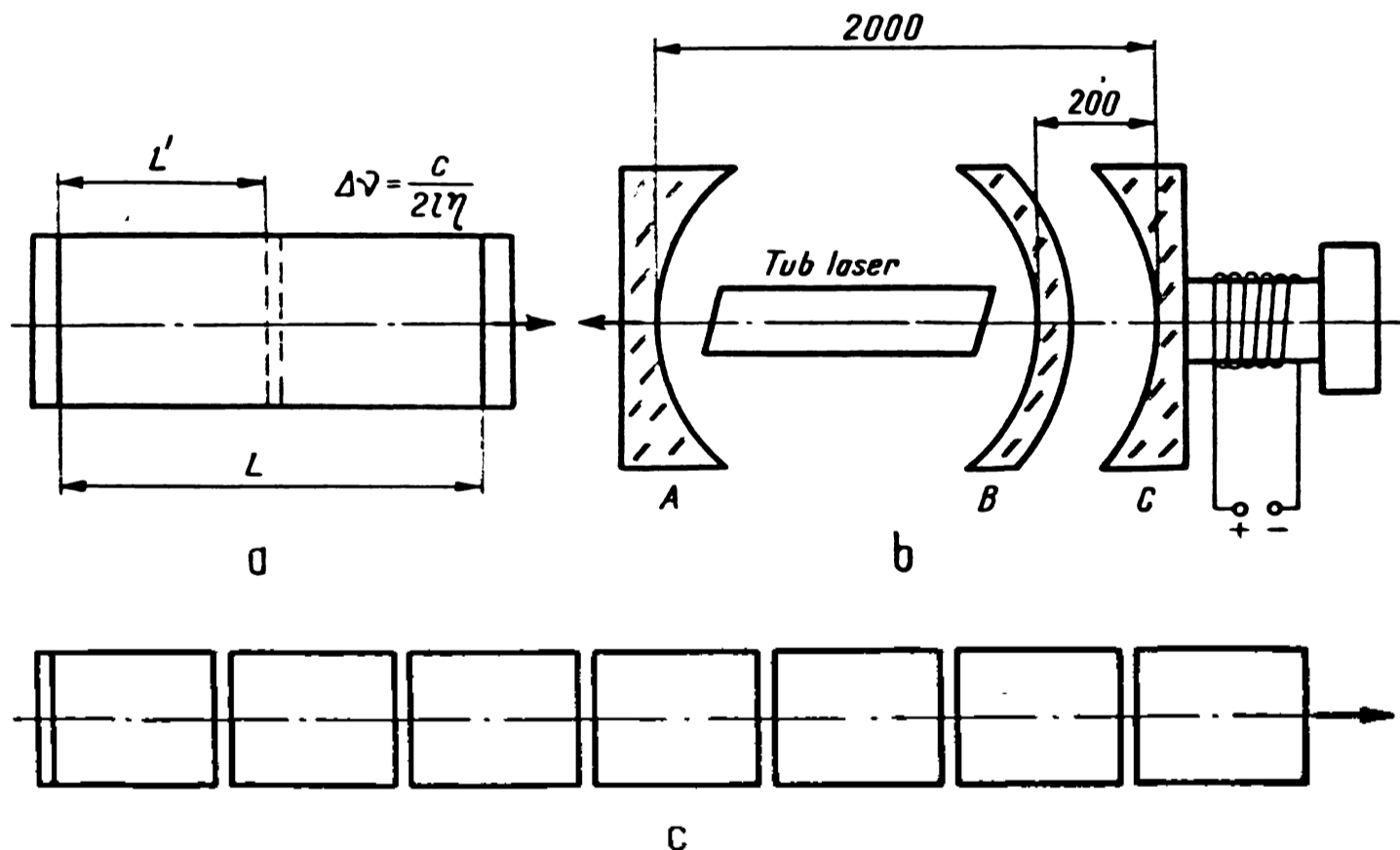


fig.4

1.1.5.5. Laseri generatori și laseri amplificatori

Sursele cuantice de radiații în domeniul optic, având la baza fenomenul de emisie stimulată realizat pe baza inversiunii de populație, pot fi clasificate după realizarea condiției de prag, astfel (25, 35, 146) :

a) Laseri oscilatori (generatori de radiații)

Ca să aibe loc efectul laser este necesară realizarea inversiunii de populație între cele două niveluri energetice. Însă, nu orice surplus de populație creat pe nivelul superior este capabil să conducă la efectul laser. Este necesară o a doua condiție, cea de autooscilație realizabilă numai dacă puterea radiației obținute prin amplificare depășește puterea radiației pierdute în cavitățile de rezonanță. Așadar, realizarea autooscilației este posibilă dacă surplusul de populație, creat pe nivelul superior, depășește o anumită valoare, adică un prag al puterii radiației excitatoare. Numai peste acest prag, lumina emisă prin oglinda semitransparentă este un semnal laser, dispozitivul fiind numit oscilator sau generator de radiații.

În plus, condiția de autooscilație presupune existența a cel puțin două niveluri energetice între care să aibe loc inversiunea de populație, deși sistemele atomice ale mediului activ au un număr mai mare. Însă, numai între două dintre acestea are loc procesul inversiunii de populație, care face parte dintr-un sistem de trei niveluri (sistemul lui Bloembergen), de patru sau dintr-o altă combinație ca de exemplu în cazul mediului activ format din neob-heliu (fig.5) (40, 155).

În fig. 5 a este reprezentat sistemul cu trei niveluri. În acest caz, fenomenele se petrec astfel: printr-un procedeu de excitație, sistemele optice vor fi transferate de pe nivelul fundamental (1) la cel excitat (3), ajungând la saturație când numărul sistemelor de tranziție (1) \rightarrow (3) este egal cu cel în sensul (3) \rightarrow (1). În acest caz $N_3 = N_1$. Pornind de la echilibrul termic, când are satisfăcută condiția $N_1 > N_2 > N_3$, la saturație va fi îndeplinită condiția $N_3 > N_2$, adică inversiunea de populație a fost realizată între nivelurile (2) și (3). Dacă puterea excitației aplicată a fost suficientă pentru a crea nivelul (3), deci un surplus de populație care să satisfacă condiția de autooscilație ($\Delta N = N_3 - N_1$), sistemul poate funcționa

ca generator pentru o undă de frecvență γ_{32} .

Sînt și cazuri cînd sistemele atomice excitate pe nivelul (3) au tranziții fără radiații (sageata ondulată, în cazul din fig. 5 b) pînă la nivelul instabil (2) cu un timp de viață mediu foarte lung. Atomi acumulîndu-se pe nivelul (2), se va realiza inversiunea de populație între acesta și starea fundamentală, iar acțiunea laser va avea loc cu frecvența γ_{21} .

Mecanismul de funcționare a sistemului cu patru niveluri, reprezentat în fig. 5 c, este diferit de precedentul prin faptul că ultima stare în care ajung sistemele atomice în urma tranziției laser (este vorba de nivelul inferior din cele două între care se produce inversiunea de populație) nu este o stare fundamentală ci, tot o stare excitată, suficient de apropiată de cea fundamentală (intervalul dintre 1 și 4 este între 100^{-1} și 1000^{-1} cm). În acest caz, inversiunea de populație se realizează mult mai ușor față de cazul precedent, deoarece numărul de sisteme atomice aflate pe nivelul (4) este mult mai mare decît cel din starea fundamentală ($N_4 \gg N_1$); în plus, nivelul (4) poate fi golit prin radire.

În afară de aceste două sisteme tipice cu 3 și 4 niveluri, pot fi și altele cu energii convenabile. Astfel, în domeniul infraroșu al spectrului electromagnetic, liniile spectrului sînt emise prin tranziții între nivelurile de vibrație ale moleculelor; în domeniul invizibil, liniile spectrale sînt emise prin tranziții între nivelurile electronice ale atomilor. Care dintre aceste niveluri pot fi utilizate pentru producerea efectului laser se poate afla numai printr-un studiu detaliat al spectrelor acestor sisteme atomice. Astfel de studii au fost făcute (57), pînă acum descoperindu-se că, pentru obținerea unui efect laser la o putere de excitație convenabilă, nivelurile de absorbție (de exemplu nivelul 3 din fig. 5 a și fig. 5 c) ale substanțelor, trebuie să fie suficient de distanțate pentru ca puterea absorbită să fie distribuită pe un domeniu de frecvență destul de larg, putînd astfel să transporte un număr mare de sisteme atomice în stare de excitație. Totodată, nivelurile superioare ale tranzițiilor laser (nivelurile 2 din figure 5 c și 5 d, e) trebuie să fie foarte înguste.

Pe lângă aceste cerințe, este necesar ca substanțele utilizate la realizarea laserilor să aibe o concentrație de particule active suficient de mare, deoarece puterea emisă de dispozitivul laser crește odată cu aceasta. Înșă, o concentrație prea mare cor-

duce la lărgirea liniilor spectrale emise de substanță (61).

Substanțele solide, care îndeplinesc toate aceste condiții, sînt cele de tipul pamînturi rare în care ioni sînt înglobați în anumite cristale, ca de exemplu ioni de Cr^{XXX} în corindon (rubin), ioni de U^{XXX} , Sm^{XX} , Tm^{XX} , Dy^{XX} etc., în CaF_2 , ioni de Nd^{XXX} , Tm^{XXX} , Er^{XXX} etc., în CaWO_4 și altele admit una sau mai multe benzi largi de absorbție (fig.5 e). Atomi acestor substanțe excitați în aceste benzi vor reveni, prin emisia neradiativă (emisie de fotoni), la nivelurile înguste (2) de unde, efectuînd tranziții laser, vor reveni în starea (4) situată puțin deasupra stării fundamentale (155).

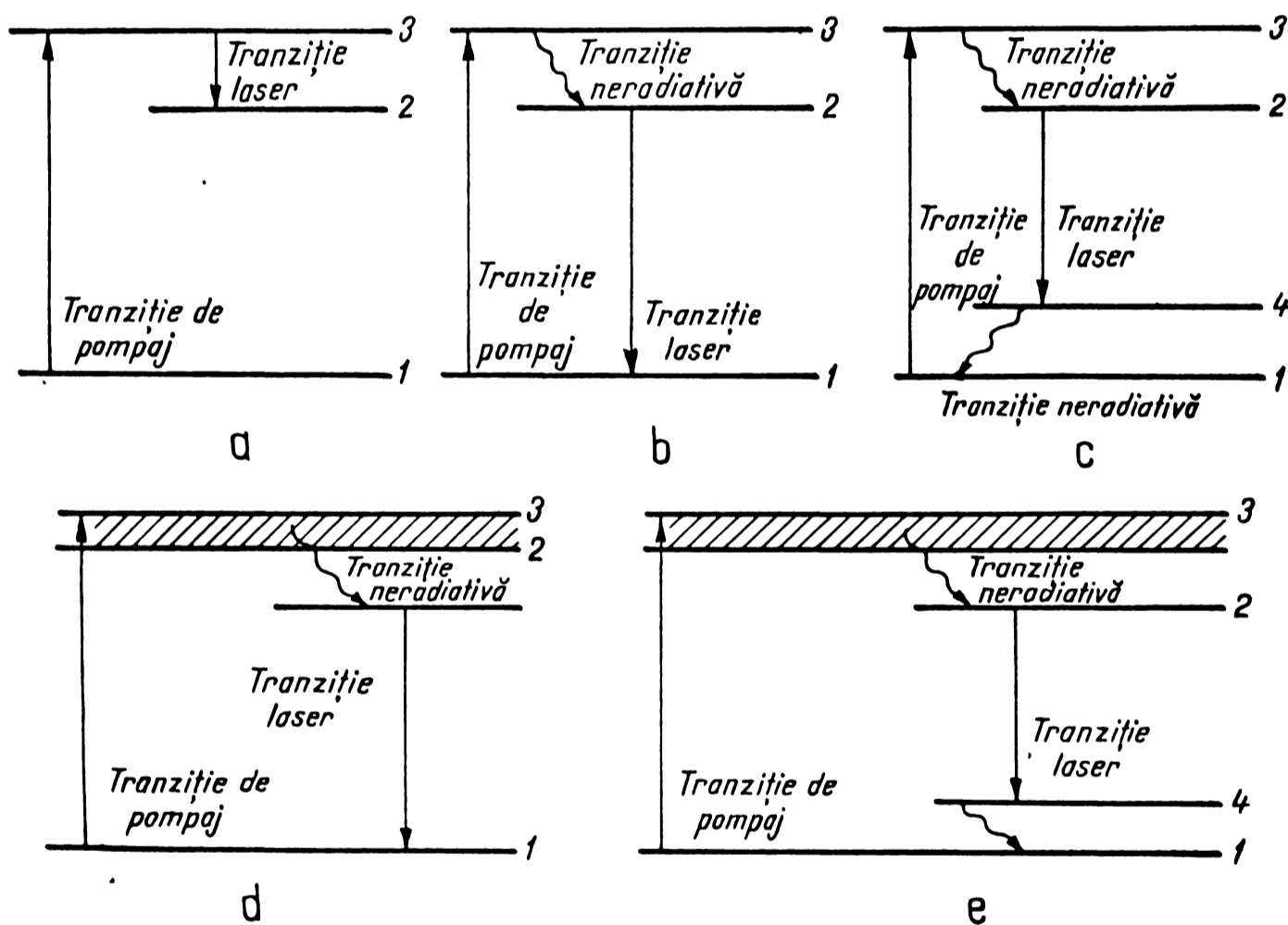


Fig.5

b) Laseri amplificatori

Sub prag, efectul autoexcitației nu poate să apară (deși o inversare de populație poate fi realizată), iar lu-

676.327

INSTITUTUL POLITEHNIC
TIMIȘOARA
CUTRE BENTRAL

luna emisă este normală, incoerentă. În acest caz nu există o diferență între calitățile luminii emise prin oglinda semitransparentă a rezonatorului și cea emisă prin pereții laterali ai acestuia.

Dacă, în aceste condiții sub prag, asupra mediului activ este trimisă o radiație având o frecvență egală cu frecvența corespunzătoare tranziției laser, dispozitivul va funcționa ca amplificator de radiație.

Considerând o cavitate de rezonanță multimodală, în care G - câștigul de putere pe un singur parcurs între suprafața de capăt de reflexie și r - coeficientul de reflexie al puterii la fiecare capăt, amplificatorul va fi stabil dacă este îndeplinită condiția (25, 73, 155):

$$G \cdot r < 1 \quad (12)$$

Pentru un laser cu rubin, cu interferențe de ser, $r \approx 0,07$. Rezulta că un astfel de aparat va furniza un spor stabil dacă $G < 14$. Cu cât câștigul va fi mai mare, cut atât coeficientul de reflexie trebuie să fie mai mic. Dacă sînt necesare sporuri foarte mari, se ajunge la situația în care "r" este neglijabil.

Pentru a ieși din impas, a fost conceput laserul cu undă călătorească, capabil să realizeze câștiguri stabile extrem de înalte. Aparatul constă dintr-o succesiune de secțiuni amplificatoare, separate prin medii izolatoare care permit ca puterea să fie ușor transmisă într-un sens și puternic atenuată în sens contrar.

Construcția unui astfel de izolator este reprezentată schematic în figură a, unde semnalul traversează izolatorul de la stînga la dreapta. Planul de polarizare, definit de polaroidul P_1 , este rotit cu 45° în sensul acelor de ceasornic de către mediul Faraday^{x)}, iar polaroidul P_2 , orientat în mod convenabil, lasă unda să treacă neperturbată. În sens invers, de la dreapta spre stînga, o undă analogă nu poate să treacă decît extrem de slab și sau complet absorbită. În acest mod, undele parcurg sistemul izolator într-un singur sens.

x) Materialele diamagnetice, în special, rotesc planul de polarizare a luminii ce le traversează, dacă sînt situate într-un câmp magnetic dirijat, în direcții paralele cu direcția de propagare a luminii. Unghiul de rotație este dependent de densitatea "H" a cîmpului și de lungimea "l" a mediului, prin relația $\theta = V \cdot H \cdot l$, unde, constanta de proporționalitate "V" este cunoscută sub numele de constanta Verdet și depinde de materialul și de lungimea de undă λ a luminii utilizate. De exemplu, pentru SZn avînd constanta $V=0,22$ min/cm.Gs, $l=4$ cm și $\theta=45^\circ$, rezultă $H = 3100$ Gs. (155).

In fig.6 b este reprezentat un amplificator laser cu undă calatoare, la care pot fi adăugate oricâte secțiuni amplificatoare

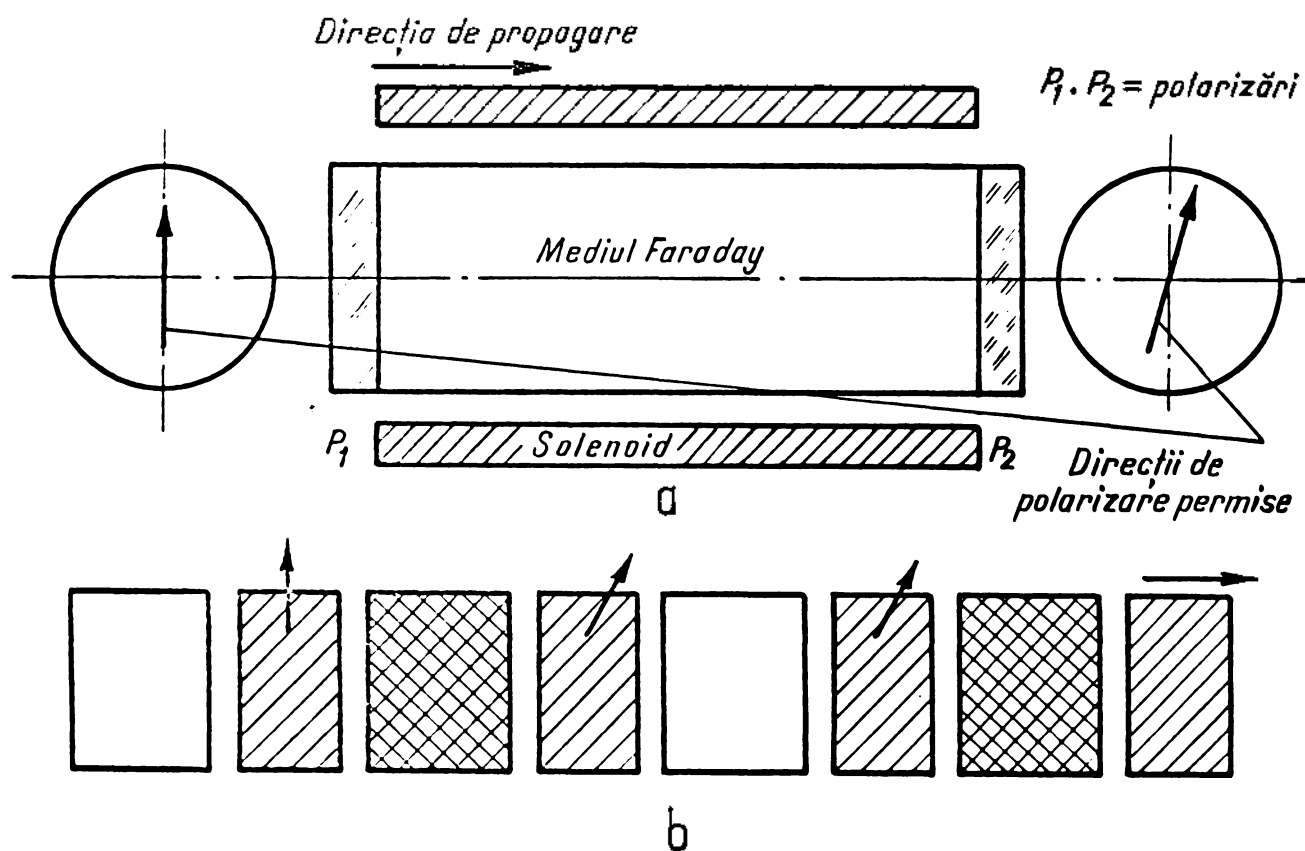


Fig.6

1.1.5.6. Alte aspecte

Din punct de vedere al modului de funcționare, laserii pot fi cu acțiune intermitentă la care emisia stimulată se face cu impulsuri la intervale de timp foarte scurte (10^{-6} - 10^{-8} s), corespunzătoare stărilor energetice pe care le au sistemele atomice și cu acțiune continuă, ca urmare a trecerii sistemelor atomice dintr-o stare energetică superioară în starea fundamentală.

După mediul activ folosit, laserii sînt cu mediu activ solid, lichid, gazos, chimici sau cu semiconductori.

Pîna în prezent, numărul substanțelor active cunoscute este de peste 50, iar numărul lungimilor de undă în care funcționează laserii este de aproximativ 300. Puterile realizate, de exemplu la unele instalații prin impulsuri, depășesc 50 MW cu o densitate de energie de peste 100 MJ/cm^2 (100).

În tabelul 1 sînt prezentate caracteristici ale unor

sursa de energie concentrată (99, 107, 145, 151, 155), iar în tabelul 2 este dată lista lucrurilor de concepție și fabricație sovietice.

1.2. Ca să cunoaștem de ce și utilizarea lucrurilor în construcția de mașini

Înța de posibilitățile largi de aplicație a instalațiilor electronice în construcția de mașini și de rezultatele deosebite obținute și în alte domenii, utilizarea fascicoului laser este încă puțin cunoscută (dată de necesitățile la realizarea altor administrații), cu restricție utilizării în țara noastră, încă cu un început permisiv.

Din literatură de specialitate (22, 24, 32, 47, 48, 49, 60, 64, 65, 72, 81) știm, cu descriere în conținut, sînt cunoscute următoarele utilizări:

- prelucrarea alezajelor individuale și a sistemelor de alezaje cu diametre de la câțiva microni pînă la 1,5 mm, practicate pe diafragme electronice, aparate optice, inele de ferită, cristale sintetice, carouri metalice, lagare din rubin pentru ceasuri, filiere pentru conductori electrici și fibre sintetice, catalizatori celulari și filiere micrometrice etc.;

- prelucrarea de canale, trasarea diviziunilor pe scale și caștranele aparatelor optice;

- debitarea de înaltă precizie și cu pierderi minime a oțelurilor speciale, materialelor sinterizate, țesăturilor și a altor materiale metalice și nemetalice;

- realizarea și asamblarea circuitelor imprimate și a celor între rate pentru calculatoare, tehnice spațiale etc., precum și a rezistențelor electrice cu o precizie de 0,1 - 0,5%;

- echilibrarea statică și dinamică la suprafețe, fără aplicarea unor forțe exterioare;

- măsurări de precizie realizate în repaus sau în funcțiune ale instalațiilor din construcția de mașini, siderurgie, topografie, astronomie etc.

1.2.1. Privind obținerea alezajelor micrometrice

În acest domeniu o importanță mare o reprezintă filierele micrometrice din diamant industrial sau materiale metalice și nemetalice sinterizate, lagarele pentru ceasuri din corindon sintetic

Tabela 1

CARACTERISTICI ALE LICHURILOR DE ENERGIE CONCENTRATA

Sursa de excitație	Densitatea emisieii, în W/cm^2	Unghiul de deschidere a emisieii	Puterea impulsului maxim. Densitatea puterii de impuls focalizat	Puterea maximă	Lungimea de undă, λ
Cristalul și laserul cu sticlă, cu funcționare continuă.	$10^6 - 10^8$	$10^\circ - 30^\circ$	$10^3 - 10^5$ W $10^3 - 0,5$ ms $10^3 - 2 \cdot 10^5$ W/cm ²	$0,5 - 5$ W $300^\circ - 7^\circ$ K $0,5 - 5$ W/cm ²	$0,59 - 2,6$
Idem, cu impuls	$10^8 - 10^{12}$	$10^\circ - 30^\circ$	$10^6 - 10^9$ W $100 - 10$ ms $10^6 - 10^9$ W/cm ²	-	$0,31$
Laseri cu semiconductori sau laseri cu injectie	$10^4 - 10^7$	$1^\circ - 10^\circ$ $5^\circ - 20^\circ$	$5 - 100$ W $10 - 0,1$ ms $10^4 - 10^7$ W/cm ²	$1 - 2$ W 4° K	$0,6 - 5$
Laser cu gaz	$10^4 - 10^6$	$0,5^\circ - 3^\circ$	$1 - 50$ W $0,5 - 5$ ms $10 - 500$ W/cm ²	$10^{-4} - 1$ W $0,01 - 2$ W/cm ²	$0,30 - 13$
Soare	10^3	2 steradiani	-	$0,135$ W/cm ² la suprafața pământului	$0,23 - 2,3$
Flux de electroni	$10^8 - 10^{10}$	$10^{-2} - 5 \cdot 10^{-3}$ grade	$10^3 - 10^4$ W $10^{-6} - 1$ s	$4 \cdot 10^4$ W	-

Tabelul 2**LISTA BASERILOR ROMANESE
(CARACTERISTICI)****I. LASERI CU HELIU-NEON**

1. tipul a: continuu; $\lambda = 6328 \text{ \AA}$; putere $P_z = 1-5 \text{ mW}$; 220 V, 50 Hz; timp de viață 2000 ore; dispersie $\theta \approx 1$ miliradian; IFA (IFTAR), fabricat din 1962.

2. tipul b: continuu; $\lambda = 6328 \text{ \AA}$; $P_z = 50-60 \text{ mW}$; 2000 ore; $\theta \approx 1$ miliradian; 220 V, 50 Hz; IFA (IFTAR) din 1963.

3. tipul c: continuu; monomodali; $\lambda = 6328 \text{ \AA}$; $P_z = 50-100 \text{ W}$; 2000 ore; $\theta \approx 1$ miliradian; IFA (IFTAR) din 1962.

II. LASERI CU CO₂

1. tipul a: închis; continuu; un singur mod de oscilație $\lambda = 10,6$ micrometri; TEM₀₀; $P_z = 30 \text{ W}$; diametru fascicol $d = 5 \text{ mm}$; $\theta \approx 2$ miliradiani; 500 ore; IFA (IFTAR) din 1966/1967.

2. tipul b: deschis; continuu; $\lambda = 10,6$ micrometri; $P_z = 100-200 \text{ W}$; $\theta \approx 2$ miliradiani; utilizare permanentă (în afară de elementele optice); IFA (IFTAR) din 1975/1976.

3. tipul c: deschis; circulație transversală de pxz ; $\lambda = 10,6$ micrometri; $P_z = 1000 \text{ W}$; $\theta \approx 5$ miliradiani; IFA (IFTAR) din 1976.

4. tipul d: model TFA; cu impulsuri la presiune comparabilă cu presiunea atmosferică; circuit deschis; $\lambda = 10,6$ micrometri; energie de ieșire $E_{\text{max}} = 30 \text{ J}$; $\tau = 10^{-7} - 10^{-9} \text{ s}$; $\theta = 5-10$ miliradiani; IFA (IFTAR) din 1970.

III. LASERI CU STICLA DOPATA CU NEODIM: impulsuri; $\lambda = 1,6$ microni; $\tau = 10^{-7} - 10^{-9} \text{ s}$; $E_{\text{max}} = 5 \text{ kJ}$; $\theta = 10-20$ miliradiani; IFA (IFTAR) din 1963.

IV. LASERI CU COCIORANTI: în special în domeniul lungimilor de undă din galben $\lambda = 5700-6100 \text{ \AA}$, dependentă de concentrația coloranților; impulsuri; $P_z = 5-20 \text{ mW}$; $\tau = 10^{-6} - 10^{-8} \text{ s}$ fabricat din 1973 de IFA (IFTAR) și cel continuu de $P_z = 0,1 \text{ W}$ de IFB din 1974; în ambele $\theta \approx 10$ miliradiani.

V. LASERI CU HELIU-CADMIU: continuu; $\lambda = 4000 \text{ \AA}$; $P_z = 50-60 \text{ mW}$; $\theta \approx 1$ miliradian; 500-600 ore; IFA (IFTAR) din 1971.

VI. LASERI CU AZOT (AZOT-HELIU): fabricat de IFB în 1973/1974.

ș.a. La aceste piese, caracterizate prin duritate foarte înaltă, faza cea mai importantă este perforarea semifabricatului (degroșarea). Dificultățile prelucrării cresc cu micșorarea diametrului, începând cu 0,3 mm. Dacă în cazul prelucrărilor convenționale, pentru unele materiale, timpul tehnologic este de 7 și chiar 25 minute, prin folosirea fascicolului laser concentrat, timpul de bază al operației se reduce la o fracțiune de secundă, iar la rubin întregul proces tehnologic scade de la mai multe ore la 1-2 secunde.

În alte state s-a folosit fascicolul laser concentrat la fabricația de serie mare și la recondiționarea filierelor din diamant pentru trefilat conductori din cupru sau pentru extrudat fibre sintetice (78, 79). Rezultatele obținute au fost deosebite datorită faptului că productivitatea a fost mult mai ridicată în comparație cu metoda de găurire prin așchiere, iar consumul de energie electrică mult mai redus. Reducerea energiei și a frecvenței impulsurilor (până la 1 Hz) au fost măsuri necesare pentru evitarea fisurilor în diamant sub efectul supraîncălzirii locale. La prelucrarea acestor alezaje s-au folosit instalații laser cu impulsuri, cu putere de ieșire de 10 W, energia de 10 J, diametrul petei focale de 5 micrometri, iar durata impulsului mai mică decât o milisecundă. Această prelucrare a adus economii de 200000 dolari anual la fabricarea a 4000 filiere și recondiționarea altor 30000.

Așadar, sînt necesare energii relativ mici. De altfel, literatura de specialitate menționează efectul negativ în cazul excesului de energie. Astfel (109, 110), energia concentrată obținută cu ajutorul unui fascicol laser cu rubin și a unei lentile cu distanța focală de 40 mm, a fost de $(2,5 - 2,75) \cdot 10^6$ kcal/cm². Concentrarea unei asemenea energii, pe o suprafață mică, crează o temperatură extrem de ridicată care, practic, vaporizează orice material existent în natură sau fabricat sintetic. Prin concentrarea fascicolului laser pe o suprafață de 10 microni, s-a realizat o temperatură cuprinsă între 8000 și 18000°C, care a determinat o vaporizare locală instantanee, însoțită de numeroase microexplodii (fig.7) (111), iar alezajul a căpătat un aspect specific, rugos.

Este cunoscut faptul că poziția diferită a petei focale față de suprafața semifabricatului dă forme geometrice distincte ale orificiilor (fig.8, a - conicitate dublă, b - conicitate simplă, c - conicitate cu carbură) (130).



Fig. 7

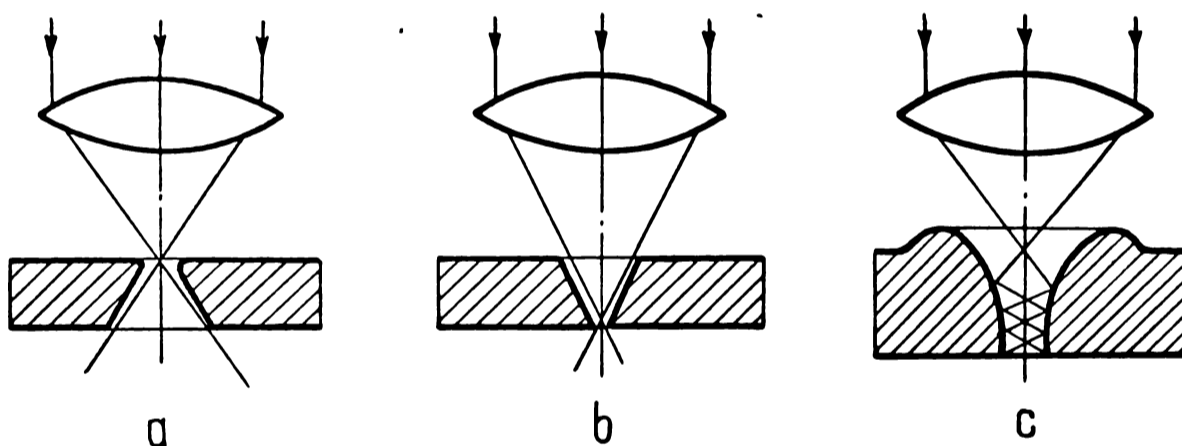


Fig. 8

De asemenea, temperatura de prelucrare influențează negativ structura din zona influențată termic, aspect ce nu poate fi neglijat la materialele fragile (103). În acest scop, și la ministerul EBMS din URSS, s-au făcut cercetări amănunțite, pe filiere din rubin, care au permis stabilirea unei tehnologii de prelucrare, fără apariția fisurilor (97, 43).

Dinamica proceselor care au loc la prelucrarea alezajelor micrometrice cu fascicul laser concentrat, este în fază de studiu. Anticipându-se ca fiind deosebit de complexă, în URSS a fost construit un aparat tip VSKS-5 în vederea filmării, cu o frecvență de 6 milioane imagini pe secundă, a procesului de găurire și studierii fenomenelor care au loc în timpul prelucrării (46).

În tehnologia fabricării taburilor electronice (clistroanelor), pe placă care formează grila s-a realizat, cu ajutorul fascicolului laser concentrat, sute de găuri de precizie și finețe ridicate (58).

De asemenea, s-a realizat o gamă foarte largă de filtre de mare finețe, necesare industriei textile sau filtre moleculare pentru industria chimică (55).

Laserii au început să găsească o largă întrebuințare la prelucrarea rezistențelor peliculare. Astfel, pentru obținerea unei precizii de 0,05%, suprafața a fost erodată cu ajutorul fascicolului concentrat, ca operație finală, după ermetizarea și îmbătrânirea peliculei (62).

1.2.2. Privind debitarea și sudarea

La debitare, se folosesc instalații laser cu funcționare continuă, de regulă, sau cu impulsuri, de puteri mari și cu pete focală mică, fără a lua în considerație efectele din zona influențată termic. Au fost realizate debitări de metale dure ca wolfram, molibden, titan, oțeluri dure și alte materiale metalice și nemetalice, în diverse profile, dar fără să fie depășită grosimea de 1,5 mm (78).

Pentru sudură, a fost necesară asigurarea unor condiții tehnice și tehnologice specifice procesului, ca de exemplu manevrabilitatea sistemului optic în vederea deplasării petei focale în pozițiile cerute de lucrări, sistemul adecvat de răcire pentru asigurarea calității sudurii ș.a. (80).

Din cercetările recente (108) rezultă că există o anumită temperatură superficială maximă admisibilă a piesei, o durată limită de iradiere și un raport optim între diametrul petei focalizate și grosimea semifabricatului (întotdeauna mai mare ca 1/1, cel optim fiind 2/1); de asemenea, raportul dintre temperatura suprafeței incidente și cea a suprafeței opuse nu trebuie să fie mai mare de 3/1.

S-au efectuat sudări de mare finețe pe sârme cu un diametru de 0,03 mm și folii de 0,06 mm din oțel, cupru și alte metale și aliaje. S-au constatat următoarele (104):

- calitatea cea mai bună a sudurii s-a obținut cu instalații laser prin impulsuri;

- adâncimea de pătrundere la un impuls a fost între 0,04 și 0,2 mm;

- cantitatea de metal topit este dependentă de caracteristicile acestuia, în primul rând de capacitatea de reflexie, cât și de caracteristicile semnalului; spre exemplu, pentru sudarea unei folii de oțel inoxidabil de 0,25 mm, a fost necesar un diametru de 0,2 mm al petei focale și o energie de 0,067 J, prin care s-a realizat topirea pe un diametru de 0,1 mm;

- densitatea de energie este apropiată de cea de la sudarea cu fascicul de electroni; astfel la o energie de 1 J, cu durata de 1 ns și cu diametrul petei focale de 0,12 mm, ajunge la $9 \cdot 10^6$ W/cm² iar, dacă este stricționat diametrul fasciculului focalizat, pînă la 10^8 W/cm²;

- rezultate bune s-au obținut la sudarea tablelor din oțel-nichel de 1,25 mm și a foliilor din wolfram de 0,14 mm, precum și la sudarea firelor din aur și aluminiu de 0,05 mm fără a influența caracteristicile semiconductorilor;

- la sudarea cu instalații laser cu regim continuu, sudura și zona influențată termic au devenit fragile și deseori cu microfisuri.

1.2.3. Privind folosirea laserilor în tehnica măsurărilor

În tot mai multe țări se folosesc sursele cuantice de radiații, atât maserii cât și laserii, ca aparate de măsură pentru dimensiuni de toate ordinele de mărime, începînd de la piese de înaltă precizie (calibre, etaloane etc.) pînă la distanțe interplanetare, precum și pentru măsurarea rugozității, timpului, frecvenței, vitezei, potențialului etc.

Unele laboratoare care au în dotare etaloane ce se bazează pe lungimea de undă a criptonului (cripton - 86 light source standard), folosesc un nou etalon de măsură bazat pe lungimea de undă a radiației laser (114).

x

x x

În tabelul 3 (93, 96) sînt prezentate schemele operațiilor tehnologice de prelucrare a alezajelor, canalelor și suprafețelor profilate etc., posibile și în cazul unghiului minim de incidență de 50 - 60° dacă suprafața semifabricatului este netă.

TABELUL 3.

POSSIBILITATI TEHNOLOGICE DE PRELUCRARE PRIN PAZA LASER			
NUMERUL OPERATIEI	SCHEMA PRELUCRARI	TIPURI DE PIESE	REZERVATI
1	Orificii infundate		Dimensiunile D_2 și L sînt determinate de parametrii constructivi și energetici ai generatorului.
2	Orificii străpunse		Idem
3	Tăierea pieselor plane		Idem
4	Prelucrarea canalelor		Idem
5	Prelucrarea unui sistem de orificii		Idem
6	Tăierea pieselor cilindrice		Dimensiunile D , h , și L sînt condiționate de durata impulsurilor și de durata piesei prelucrate
7	Tăierea canalelor		
8	Tăierea sanfrenelor cilindrice		
9	Prelucrarea de profile		Dimensiunile H , D , și L sînt determinate de parametrii constructivi și energetici ai generatorului
10	Prelucrarea orificiilor sub un unghi față de suprafața exterioară a piesei		Idem
11	Prelucrarea cu acțiune inversă a canalului de reșire		Dimensiunile D_2 , L_1 și L_2 sînt determinate de parametrii constructivi și energetici ai generatorului.

2. CADRUL DE ABORDARE A PROBLEMEI

2.1. Justificarea

Din cele prezentate în capitolul precedent, ca sinteză a bibliografiei utilizate, se constată că realizările cunoscute în domeniul prelucrării așezajelor micrometrice cu fascicul laser sînt restrînse, unele chiar nerevendicabile, dar, în același timp, rezultă că fenomenele caracteristice, fundamentarea teoretică și influența parametrilor regimului de lucru sînt elemente necesare, puțin cunoscute sau neidentificate.

Existența unor instalații laser în țara noastră, utilizate în cercetarea aplicativă și, de început, în economie, a generat ideea cunoașterii mai întinse a fenomenelor procesului tehnologic în domeniul prelucrării.

Încădererea căpatată în urma unor rezultate satisfăcătoare obținute în faza incipientă a preocupărilor, datele destul de sumare ale altor cercetări oferite de literatura de specialitate sau obținute în țara noastră, precum și dorința de a confirma și înăunătăți aceste rezultate, au creat cadrul de abordare, aprofundare și orientare a aplicațiilor într-un domeniu restrîns al construcțiilor de mașini: prelucrarea așezajelor micrometrice și, pe cît este posibil, a așezajelor submicrometrice cu fascicul laser.

2.2. Domeniul abordat

Cercetarea teoretică și aplicativă, prezentată în această lucrare, este orientată spre următoarele aspecte ale prelucrării cu fascicul laser: fenomenul tehnologic, formele geometrice ale așezajelor micrometrice, regimul optic și cauzele principale ale erorilor de prelucrare.

2.3. Materialul prelucrat, instalațiile și aparatura

Pentru cercetarea aplicativă au fost prelucrate următoarele grupe de materiale (tabelul 4):

- titan tehnologic pur, pentru catalizatori, industrie chimică, fibre sintetice;

- oțeluri inoxidabile, pentru industria electrotehnică și chimică, pentru filiere de conductori și filamente lămpi incandescente; filiere fibre sintetice;

- duraluminiu, pentru industria de aparatură de măsură și control, domeniile aviație, aerospațial, centrale atomoelectrice etc.;

- cupru, pentru industria catalizatorilor complecși electronici;

- ceramice, pentru filtre la temperaturi ridicate, piro-metre în industria metalurgică și filiere pentru fibre sintetice.

La efectuarea cercetării experimentale au fost utilizate:

- instalația Quant - 9, fabricație U.S.S.R., 1973, tip 1968, din dotarea Institutului politehnic București, catedra Tehnologie metalelor; 1 kW, cu impulsuri, (foto 1);

- instalația laser cu CO₂, fabricație Institutul de fizică atomică - București, 1971, din dotarea Institutului politehnic București, catedra Tehnologie metalelor; 0,1 kW, continuu;

- instalația laser cu CO₂, din dotarea Institutului politehnic Timișoara, catedra Tehnologie construcțiilor de mașini; 0,1 kW, continuu;

- instalația laser cu CO₂, fabricație Institutul de fizică atomică București, 1972, din dotarea Institutului politehnic București, catedra Tehnologie metalelor; 0,750 kW, continuu;

- instalația laser cu sticlă dopată cu neodim, fabricație Institutul de fizică București, 1974, din dotarea acestuia; 0,15 kW, cu impulsuri;

- instalația laser "Magique" -10, 25 kW, cu rubin, impulsuri, din dotarea Centrului nuclear, Campus UBAZA, Kinshasa, Zaïre.

Pentru reglarea instalației și măsurarea alezajelor au fost utilizate:

- autocolimatorul, din dotarea Institutului politehnic București, catedra de Fizică;

- instalația laser, tip H 23 pentru aliniament, din dotarea Institutului politehnic București, catedra Rezistențe materialelor;

Tabelul 4

LISTA MATERIALELOR PRELUCRATE

Denumirea instalației	Instituția de care aparține	Numărul orificiilor prelucrate				Materiaul prelucrat
Quant - 9 cu impulsuri (URSS)	ICPTCM	$\frac{80}{13 \text{ CM } 35}$	$\frac{5}{V_2A}$	$\frac{10}{Ti \text{ tehnic}}$	$\frac{10}{pur}$	
Lasr cu CO ₂ con- tinuu (IPA)	Catedra Tehnologia metalelor - IPB	$\frac{25}{13 \text{ CM } 35}$	$\frac{55}{Cesaron 10}$	$\frac{50}{Dural}$	$\frac{20}{D 16 T}$	cupru
Quant-9 cu impulsuri (URSS)	Catedra Tehnologia metalelor IPB	$\frac{35}{Ti \text{ tehnic}}$	$\frac{20}{1 \times 18 \text{ MT}}$	$\frac{20}{30 \times GSA}$	$\frac{10}{Dural}$	D 16 T
Magique-10 (France)	UNAZA - Zaire	$\frac{10}{Alame}$	$\frac{12}{Oțel inox}$	$\frac{8}{Rubin}$	$\frac{60}{Sticlă}$	spe- cială optică

Grosimea acestor materiale:

- Ti tehnic pur	= 0,2	-	1,5 mm
- Oțel inoxidabil 13 CM 35	= 0,5	-	1,0 mm
- Oțel inoxidabil V ₂ A	= 0,1	-	1,2 mm
- Dural D 16 T	= 0,5	-	2,5 mm
- Cupru	= 0,05	-	1,2 mm
- Ceramica Cesaron 10	= 1,5		mm
- Oțel inoxidabil 1 X 18 MT; 30 X GSA	= 0,1	-	1,6 mm
- Rubin	= 1,5		mm
- Sticlă specială optică	= 1,0	-	1,5 mm

- instalația LACKROM, din dotarea catedrei de Tehnologie metalelor, Institutul politehnic București, (fig.2);
- energometrul din dotarea Institutului de fizică atomică București;

- instalația optică auxiliară, pentru măsurare și reglare a instalației Quant-9, din dotarea Institutului politehnic București, catedra de Tehnologia metalelor;
- microscopul electronic, din dotarea Institutului politehnic București, catedra de Fizică;
- microscopul electronic din dotarea Întreprinderii de aparate electrice de măsură - Târgoara;
- calculatorul electronic al Laboratoarelor de cibernetică economică - Academia de Studii Economice - București.

În tabelul 5 sînt prezentate rezultatele înregistrate la prelucrarea orificiilor micrometrice cu fascicul laser.

2.4. Principiile care au stat la baza metodologiei de cercetare

Interpretarea teoretică a diverselor cercetări experimentale, efectuate de noi pe baza cunoașterii fenomenelor intime ale procesului de prelucrare și a informațiilor oferite de literatura de specialitate și centrele de cercetare de profil din țara noastră.

Colaborarea cu centrele de cercetare și specialiștii din domeniul utilizării energiilor concentrate, în special în ceea ce privește comunicarea imediată a rezultatelor concludente și chiar a celor negative, colaborarea directă în vederea realizării de teze de cercetare pe bază de contract cu unitățile economice socialiste, organizarea și participarea la sesiuni științifice, antrenarea unui număr însemnat de studenți în vederea asigurării unei continuități a cercetării în acest domeniu, publicarea unor aspecte ale aplicațiilor laserului și a perspectivelor de utilizare în vederea informării unui număr larg de specialiști.

Selectarea tipurilor reprezentative de materiale greu prelucrabile prin metodele convenționale.

Alegerea, adaptarea și perfecționarea instalațiilor laser existente în țara noastră, în vederea prelucrării alezajelor micrometrice.

2.5. Obiectivele urmărite

In prezenta lucrare s-a urmarit abordarea de prelucrări dificile (din care unele încă nerealizabile cu actualele posibilități ale tehnologiilor convenționale), stabilirea tehnologiilor adecvate de prelucrare pentru fiecare material în parte, sporirea preciziei instalațiilor laser utilizate, fundamentarea teoretică a fenomenelor intime ale procesului tehnologic și stabilirea de recomandări privind utilizarea optimă a acestor fenomene în vederea evitării rebuturilor (toate irecuperabile) sau a traumelor specifice și iremediabile pentru operatorul (omul) instalației laser.

3. CONTRIBUTIA TEORETICA SI EXPERIMENTALA A CERCETARII

3.1. Contributie privind identificarea fenomenului tehnologic de prelucrare cu fascicul laser concentrat a alesajelor micrometrice

Interacțiunea fascicolului laser concentrat cu materialul semifabricatului constituie fenomenul de bază al procesului prin care poate fi identificat mecanismul de prelucrare (116, 122). Cunoașterea acestuia, cât și a celorlalte fenomene conexe care au loc, asigură condiția de prim ordin necesară stabilirii regimului optim de prelucrare și obținerii calității dorite a alesajelor micrometrice (149, 153).

Față de procedeele convenționale și celelalte procedee neconvenționale cunoscute, dificultățile de identificare a fenomenului tehnologic sînt, însă, deosebite: durata prelucrării este de ordinul câtorva mii de secundă (1 - 5 ms); interacțiunea razei laser cu semifabricatul are loc în cadrul unor procese termodinamice complexe, cu temperaturi și presiuni gigantice, urmate de evacuarea supersonică a gazelor și materialului topit, adică acele fenomene despre care în momentul de față nu știm în ce măsură sînt cunoscute; prelucrarea are loc în profunzimea materialului unde studiarea fenomenelor este deosebit de dificilă. În plus, bibliografia studiată se referă la identificarea efectelor fizice și nu reflectă esența procesului tehnologic (47, 116, 131).

Cercetările experimentale realizate de noi, conjugate cu rezultate ale altor cercetători, au creat o bază pentru formarea unei imagini în ceea ce privește mecanismul de prelucrare în totalitatea lui și, în special, a acelor procese care au loc în timpul apariției și formării erificiilor.

3.1.1. Utilajul și metodologia de lucru

S-a utilizat o instalație dotată cu emițătoare de rază, care permit utilizarea elementelor active de tipuri și dimensiuni diferite precum și oglinzi interschimbabile cu coeficientul de trecere 0,25, 0,50 și 0,75.

Ca element activ în procesul cercetării s-au folosit rubinul și sticla de neodim cu dimensiunile 12 x 240 mm și respectiv 15 x 240 mm.

Pompejul optic al elementului activ s-a obținut prin două lămpi spirale de tip IEC 15000. Energia de iradiere a generatorului cuantic în cazul utilizării elementelor de rubin este în medie 40 joule, în cazul utilizării sticlei de neodim 100 joule. Răcirea elementului activ și a lămpilor de pompare s-a realizat printr-un circuit adecvat, cu apă curentă.

Instalația a fost dotată cu un sistem de comandă semiautomat care funcționează în regim periodic cu frecvență maximă a impulsurilor de 2 imp/s, precum și cu un microscop de măsurare a petei focale și orificiilor cu suficientă precizie pentru scopuri tehnologice (0,5 micrometri).

Stabilirea energiei de radiație a generatorului cuantic s-a efectuat cu ajutorul unui fotometru special, din dotarea atelierului de laser al Institutului de Fizică Atomică București.

Pentru determinarea duratei impulsurilor s-a utilizat un dispozitiv din dotarea Institutului de fizică București, care a permis într-o măsură suficient de exactă determinarea duratei de iradiere. Baza de lumină a fost focalizată pe suprafața unei hîrtii electrotactice, fixată pe un cilindru cu o turație ridicată. Viteza de rotație în momentul iradierii de către generatorul cuantic s-a determinat cu ajutorul unui tachometru electronic.

Durata impulsului de generare τ_{imp} s-a calculat după formula (80):

$$\tau_{imp} = \frac{60 L_0}{2\pi R_s \omega_1} \quad (13)$$

unde: L_0 - lungimea impresiunii;
 R_s - raza corpului rotitor;
 ω_1 - viteză unghiulară de rotație.

Evaluarea marimii tuturor parametrilor experimentali, s-au realizat pe baza a zece de experiențe, prin care s-a determinat valoarea medie a celor puși sub observație. Parametrii geometrii și alezajelor obținute s-au determinat cu un microscop instrumental din dotarea laboratorului facultății de Metalurgie din București, de tip BAI-1, cu cadran circular cu diviziuni de 1 micrometru.

3.1.2. Mecanismul interacțiunii razei focalizate cu materialul semifabricatului

În esență, dacă pornim de la interpretarea electromagnetice a luminii și definirea substanței ca sisteme ale sarcinilor electrice, procesul interacțiunii luminii cu materialul prelucrat poate fi studiat ca o influență a sarcinii electromagnetice a undei asupra atomilor sau moleculelor substanței.

În cazul interacțiunii razei de lumină cu metalele, unda electromagnetică are o influență asupra electronilor, care în cazul dat se consideră ca fiind liberi. Electronii liberi se caracterizează printr-o legătură slabă cu rețeaua cristalină și, sub influența undei de lumină, execută oscilații obligatorii. Aceste oscilații creează o capacitate înaltă de reflectare a metalelor. Însă, la o incidență normală a undei electromagnetice, o parte din energia ei pătrunde totuși în profunzimea metalului, exercitând o absorbție internă. Electronii liberi ai metalului, la acțiunea părții amintite a energiei, trec la interacțiune cu ioni și atomii rețelei cristaline și, ca urmare, o parte din energia undei se transformă în căldură. Dacă sursele de lumină dispune de o densitate înaltă, care se repartizează pe o suprafață infinită a metalului, atunci căldura emanată în punctul dat, sub influența razei de lumină, devine suficientă pentru topirea și vaporizarea metalului în zona interacțiunii.

Aspectele de bază ale fenomenului de interacțiune a undelor electromagnetice cu metalele se calculează din ecuațiile lui Maxwell, care corelează constantele de bază ale opticii metalelor cu natura electromagnetică a luminii.

Ecuația câmpului în metale are aspectul următor (116):

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \frac{\epsilon}{c} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j} \cdot \vec{E} ; \quad (14)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\mu}{c} \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} ; \quad (15)$$

$$\operatorname{div} \vec{H} = 0 ; \quad (16)$$

$$\operatorname{div} \vec{E} = 0 ; \quad (17)$$

unde: \vec{H} - vectorul tensiunii câmpului magnetic în vid;

\vec{E} - vectorul tensiunii câmpului electromagnetic în vid;

ϵ - permeabilitatea dielectrică;

c - viteza luminii;

σ - conductibilitatea electrică specifică a substanței;

μ - permeabilitatea magnetică.

Din ecuația (14), după transformare, se poate obține legea variației amplitudinii undei de lumină, care se propagă în metal. Această lege are un caracter exponențial și se exprimă în relația (18):

$$J = J_0 e^{-\frac{1}{\alpha} t} \quad (18)$$

unde: J_0 - densitatea sarcinii electrice;

α - coeficientul care caracterizează schimbarea densității în timpul t .

Valorile, de care depinde adâncimea de pătrundere a undei de lumină, se determină prin coeficienții de refracție și absorbție.

Conform teoriei electromagnetice a lui Maxwell pentru metale, coeficientul de refracție se exprimă printr-o valoare complexă și poate fi stabilit din relația următoare (19):

$$\epsilon'' = (n - jk)^2 = (n'')^2 \quad (19)$$

unde:

n și k - coeficienți de refracție și, respectiv, de absorbție în vid;

n'' - coeficientul complex de refracție.

Înlocuind ϵ'' cu ϵ' , iar n'' cu n , se obțin în optica metalelor aceleași relații, care există și în medii transparente, adică $\epsilon' = n^2$.

Coeficientul de absorbție de către mediu al undelor electromagnetice poate fi determinat în modul următor (116):

$$\eta = -\frac{1}{W_{ep}} \cdot \frac{J_{\text{nep}}}{J_x} \quad (20)$$

unde

$$W_{ep} = \frac{\epsilon' \cdot I^2}{4\pi} \quad (21)$$

W_{ep} - caracterizează diminuarea energiei medii de către straturile de material ce urmare a absorbției.

Substituind în ecuația (20) ecuația (21) după câteva reduceri obținem:

$$\eta = \frac{4\pi I}{c n} \quad (22)$$

Valoarea pătrunderii undei de lumină în metale (X) este invers proporțională cu η , adică $\eta = \frac{1}{X}$, de unde:

$$X = \frac{cn}{4\pi I} \quad (23)$$

Expresia lui X ne arată că în condiții reale metalele se prezintă opace pentru undele lumii albe.

Însă, în practică, valoarea de pătrundere a undei de lumină în metale poate fi stabilită prin metoda lui Kundt (59) sau Brude (157).

Teoria interacțiunii luminii cu metalele permite cercetarea procesului interacțiunii razelor cu înaltă densitate ale generatorului cuantic cu semifabricatul, care urmează a se prelucra. În general, după cum s-a arătat, procesul interacțiunii luminii cu materialul are loc la suprafața piesei de prelucrat. Stingerca undei de lumină se realizează în stratul superficial al materialului de o grosime stabilită care se măsoară în Angstrămi. Concomitent cu fenomenul dat are loc o degajare enormă de energie, după un scurt interval de timp.

Dacă admitem că pe suprafața piesei brute de prelucrat, dintr-un material care posedă parametri fizico-termici constanți, se focalizează o rază de lumină cu o densitate a energiei luminoase constantă și cu undă lungă, atunci, conform teoriei electromagnetice a difuzării luminii, energia totală emanată de generatorul cuantic W_{Σ} la suprafața materialului se va stabili după formula (116):

$$W_{\Sigma} = W_R + W_A + W_T \quad (24)$$

unde: W_R - energia reflectată de suprafață;
 W_A - energia absorbită;
 W_T - energia care trece prin material.

Stratul de material pentru cursa de lumină poate fi considerat practic infinit și de aceea termenul $W_T = 0$.

Termenul W_R , în condițiuni normale, când suprafața materialului este netă sau este acoperită cu un strat special absorbant al luminii, de asemenea nu este prea mare. De aici pentru

fluxuri dense de iradiere putem admite:

$$W_{\Sigma} = W_{\Sigma} \quad (25)$$

Dacă se calculează dimensiunea petei focarului după formula (116) :

$$r = \sqrt{\Phi F} \quad (26)$$

unde F - distanța focală, atunci este evident că, în momentul incipient, pe suprafața delimitată prin aria πr^2 (unde r - raza petei de lumină) se formează o zonă plană în timpul de $1 - 2 \mu s$ și care dispune de o energie importantă ($10^7 - 10^{14} \text{ W/cm}^2$) sub influența căreia practic în mod instantaneu începe procesul de evaporare a materialului.

În problema mecanismului dezvoltării acestui proces în prezent există două puncte de vedere.

Unii cercetători presupun că efectul termic care ia naștere la suprafața piesei, ca urmare a frînării fotonilor în stratul superficial, este provocat de o sursă exterioară de căldură, a cărei intensitate se difuzează treptat spre profunzimea materialului în funcție de durata procesului radiației (95, 106, 113, 116, 157).

După părerea altor cercetători, în masa materialului ia naștere o sursă importantă de căldură, care duce în continuare la explozie și expulzarea materialului din zona radiațiilor cu mare viteză (67, 69, 94, 101).

Însă, după cum au arătat unele cercetări experimentale întreprinse de noi (116, 126, 131, 150, 151, 152), fenomenele date pot fi considerate ca niște cazuri particulare ale mecanismului global de prelucrare.

După opinia noastră, caracterul procesului care decurge și intensitatea dezvoltării lui sînt condiționate în mare măsură de trei factori de bază: poziția focarului lentilei în raport de suprafața exterioară a piesei de prelucrat; caracteristicile termo-fizice și optice ale materialului de prelucrat; parametrii energetici ai razei laser.

Să examinăm influența factorilor menționați asupra mecanismului prelucrării.

3.1.3. Influența poziției focarului, în raport de suprafața semifabricatului, asupra mecanismului prelucrării.

În procesul prelucrării focarul lentilei poate ocupa, în raport de suprafața piesei brute, una din aceste trei poziții convenționale: deasupra suprafeței (fig. 9 a), pe suprafață (fig. 9 b) și în interiorul materialului (fig. 9 c). Pentru fiecare caz, s-au constatat aspecte diferite ale fenomenului tehnologic.

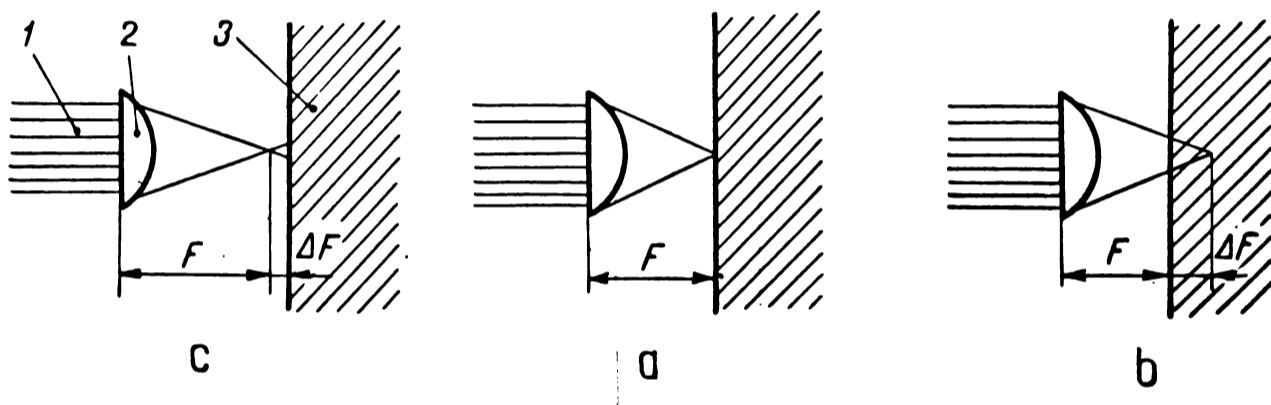


Fig. 9

Procesul de interacțiune a razei de lumină cu materialul prelucrat constă din două faze (126): a fază evazistetică, în care se produce încălzirea materialului și micșorarea rezistenței legăturilor unor elemente de aliere cu metalul de bază și b fază dinamică, în care are loc îndepărtarea intensivă a produselor interacțiunii din zona prelucrării sub influența proceselor explozive.

a) În cazul fixării focarului pe suprafața semifabricatului, raze laser, acționând asupra materialului sub formă de efect al frînării fotonilor concentrați pe o suprafață mică a petei focarului, provoacă fază evazistetică, în care caz apar suprafețe izoterme corespunzătoare temperaturilor de topire T_{top} și fierbere T_{fierb} ale materialului.

În regim de staționare a generării, echilibrul termodinamic la suprafața piesei brute poate fi exprimat prin ecuația următoare (18):

$$\frac{d W_{\Sigma}}{dt} - \frac{d Q_{\Sigma}}{dt} = \frac{d Q}{dt} \quad (27)$$

unde:

$\frac{d W_{\Sigma}}{dt}$ - viteza de deplasare a energiei luminoase a iradierii, care se determină prin pata focarului pe suprafața piesei;

$\frac{d Q}{dt}$ - viteza de absorbție a energiei cheltuită pentru încălzirea substanței de la temperatura inițială până la schimbările fazice;

$\frac{d Q_{\Sigma}}{dt}$ - viteza de cedare a căldurii prin iradiere.

În condițiile date, poziția izotermelor se determină prin viteza degajării căldurii și prin urzare și prin mărirea sursei termice q .

După cum rezulta din alte prelucrări efectuate (18), suprafața izotermică în cazul interacțiunii razei de lumină cu materialul prelucrat are forma unui orificiu superficial, a cărei precizie dimensională depinde de precizia determinării parametrilor funcțiilor densității energiei, adică $q = f(\alpha, t)$, unde t - timpul interacțiunii, r_{λ} - raza scobiturii.

În cazul creșterii lui Q crește și gradientul temperaturii izoterme a topirii și fierberii materialului, în urma cărui fapt crește grosimea straturilor materialului lichid supraîncălzit, de pe suprafața căruia se produce procesul evaporării. Fenomenul este însoțit și de sporirea vitezei de evacuare a căldurii prin cedarea acesteia în masa materialului care se evaporază. Procesul analizat, în cazul acesta, poate fi exprimat prin ecuația următoare din termodinamică:

$$\frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} - \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = - \frac{A''(x, t)}{K} \quad (28)$$

unde T - temperatura la suprafața materialului în centrul petei de lumină;

α - coeficientul, care caracterizează conductibilitatea termică a materialului;

K - coeficientul care caracterizează termoconductibilitatea căldurii materialului;

A'' - mărirea puterii de iradiere.

INSTITUTUL POLITEHNIC
TIMIȘOARA
BIBLIOTECA CENTRALĂ

Dacă presupunem că fluxul de lumină este absorbit în totalitate de suprafața prelucrată, având coeficientul de absorbție η la o adâncime de permeabilitate x_0 atunci, pentru condițiile date, intensitatea iradierii se va schimba după legea exponențială (22).

În cazul acesta:

$$A''(x, t) \approx P(t) \eta \cdot e^{-\frac{x}{x_0}} \quad (29)$$

unde $P(t)$ - mărimea intensității iradierii.

În cazul impulsurilor normale:

$$P(t) = P_0 = \text{constant}$$

Valoarea $T(x, t)$ după rezolvarea ecuației (29) în cazurile limită $t \geq 0$ ($x(t) = 0$) are aspectul:

$$\begin{aligned} T(x, t) = & (2P_0 \eta \cdot x_0 \cdot K) \sqrt{\alpha t} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x}{2} \sqrt{\alpha t}\right) - \left(P_0 \frac{\eta \cdot x_0^2}{K} \cdot e^{-\frac{x}{x_0}}\right) + \\ & + \left(P_0 \frac{\eta \cdot x_0^2}{2K}\right) \cdot e^{\frac{\alpha t}{x_0^2} - \frac{x}{x_0}} \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{\alpha t}}{x_0} - \left(\frac{x}{2} \sqrt{\alpha t}\right)\right) + \\ & + \left(P_0 \frac{\eta \cdot x_0^2}{2K}\right) \cdot e^{\frac{\alpha t}{x_0^2} + \frac{x}{x_0}} \operatorname{ierfc}\left(\frac{\sqrt{\alpha t}}{x_0} + \left(\frac{x}{2} \sqrt{\alpha t}\right)\right) \quad (30) \end{aligned}$$

Aici erfc și ierfc indică integrala erorilor lui Gauss.

Dacă se calculează oricare formă a impulsului generatului cunoscând atunci ecuația (29) se poate exprima în felul următor (74):

$$T(x, t) = \int_0^t \frac{P(t')}{P_0} \cdot \frac{\partial}{\partial t'} \cdot \frac{\int_0^x T'(x'; t - \zeta_{\text{imp}}) dx'}{\int_0^x dx'} \cdot \zeta_{\text{imp}} \quad (31)$$

unde ζ_{imp} - durata impulsului.

Ecuația dată caracterizează condițiile difuzării căldurii în profunzimea materialului în cazul impulsului normal al energiei și la densitatea fluxului de lumină de ordinul 10^4 - 10^6 W/cm².

În cazul creșterii densității până la 10^9 W/cm² temperatura suprafeței materialului în zona iradierii crește rapid până la temperatura de evaporare T_{ev} în cazul absorbției energiei luminoase.

Stratul subțire de deasupra începe să se evaporeze, iar cel din imediata vecinătate tinde spre ceaștă temperatură. Produsele aparute, ca rezultat al interacțiunii energiei luminoase cu suprafața prelucrată, se deplasează în direcția acțiunii razei de lumină, în timp ce microzona interacțiunii coboară spre interiorul materialului, iar t atinge poziția $x_0(t)$.

În felul acesta procesul de evaporare se poate considera ca o deplasare a zonei subțiri, care absoarbe fluxul luminos.

Ecuația care redă acest proces are aspectul (74) :

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = \left(\frac{1}{\alpha}\right) \frac{\partial T(x,t)}{\partial t}$$

$$x > x_0(t) \text{ și } t > 0 \quad (32)$$

Viteza de deplasare a suprafeței de variație fizică a materialului poate fi exprimată ca:

$$S = \frac{q_1}{\rho(\phi + c T_{ev})} \quad (33)$$

unde c - căldura specifică a materialului;

q_1 - fluxul căldurii;

ρ - densitatea materialului;

T_{ev} - căldura specifică latentă a materialului evaporat.

Dacă viteza $S = f(t)$ este dependentă de fluxul variabil al căldurii $q_1(t)$, atunci adâncimea deplasării suprafeței variabilității fizice a materialului poate fi lasit astfel:

$$e \approx \int_0^z S(t) dt = \frac{1}{\rho(\phi + c T_{ev})} \int_0^z q_1(t) dt \quad (34)$$

Condiții particulare apar pentru regimul variabil de iradiere al generatorului cuantic. În cazul acesta sau naștere densități extrem de mari ale fluxului căldurii iar viteza degajării căldurii poate să devină cu mult mai mare ca viteza de absorbție.

Ecuația în acest caz are aspectul următor:

$$\frac{d w}{d t} = \frac{d q_1}{d t} \gg \frac{d q}{d t} \quad (35)$$

Apresia dată explică apariția linga suprafețe încălșită

a unei cantități de metal lichid supraîncălzit, limitată de suprafețele izotermice T_{top} și T_{fierb} . Această stare poate fi denumită stare metastabilă. Metalul lichid se menține într-o astfel de stare, pînă cînd parametri descriși în ecuația (29) se stabilizează. La cele mai mici variații ale acestor parametri cantitatea de metal poate să se evaporeze intens (sub formă de explozie). Momentul începerii unui astfel de fenomen poate să apară ca un moment de vîrf al amplificării densității iradierii, ca urmare a variabilității regimului maxim al radiației generatorului cuantic. Ca rezultat al microexploziei din faza lichidă, pe suprafața materialului va apare o microumă. Seria unor astfel de explozii are loc pe întreaga secțiune a petei focale cu o rază r și continuă pînă cînd densitatea fluxului de căldură va coborî sub cea critică, în care caz, în raport de regimul de lucru al lampilor, se va produce o coborîre bruscă a intensității iradierii din generatorul cuantic.

În cursul procesului de iradiere, totalitatea microumnelor independente formează un orificiu care în acest mod însumează efectele interacțiunii (foto 8).

În cazul evaporării explozive se produce cedarea, orientată contrar presiunii razei de lumină. Cedarea se produce în cazul evaporării instantanee a materialului. Presiunea contra cedării, determinată de forțele dinamice ce acționează asupra conținutului scobiturii, depășește cu mult presiunea razei de lumină. În cazul stabilizării regimului de evaporare, presiunea cedării P_{ced} se calculează astfel (17):

$$P_{ced} = \frac{\alpha_1 \rho V_1}{W_{vap}} \quad (36)$$

unde α_1 - coeficientul proporționalității, care ia în considerare partea de energie iradiată, consumată pentru evaporare (pentru densități mai mari de energie $\alpha_1=1$);

V_1 - viteza de evacuare a vaporilor;

W_{vap} - cedarea energiei datorită evaporării și îndepărtării vaporilor. În acest caz:

$$W_{vap} \approx h_0 + \frac{1}{2} v_1^2 \quad (37)$$

Presiunea P_{ced} este deosebit de mare în momentul interacțiunii de vîrf cu materialul.

În condițiuni reale în cazul $V_1 \gg 10^6$ cm/sec și $W_{vap} = 4 \times 10^{10}$ erg/grad, raportul de contrapresiune P_{ced} față de raza de lumină P_1 reprezintă $10^5 - 10^7$. Această mărime a raportului arată că, la baza fazei dinamice a interacțiunii, stă un fenomen gazo-dinamic (17).

Sub acțiunea P_{ced} , o parte din materialul lichid este îndepărtată din zona radiației iar flecărea gazului i se imprimă o accelerație, care depinde de intensitatea generării.

Masa substanței m , expulzată din microurmă la fiecare acțiune a maximeleor de iradiere, este egală cu suma substanței în izzele de vapori și lichid, adică:

$$m = \Delta m_v + \Delta m_l$$

Pentru întreaga masă a materialului expulzat din zona de lucru a procesului de interacțiune, în intervalul unui impuls de iradiere optică a generatorului, rezultă:

$$M = \sum_{v=1}^{v=v_{max}} (\Delta m_v + \Delta m_l) \quad (38)$$

Stabilirea valorii lui M prezintă o dificultate din cauza neestabilității regimului de vîrf al generatorului. Însă, rezolvarea ecuației date în unele condițiuni limitate este posibilă.

În cazul stabilirii procesului interacțiunii, ca un moment important se prezintă asigurarea unui echilibru dinamic în zona radiației între presiunea de cedare și suma presiunilor hidrostactice și capilare, care are loc în procesul prelucrării.

Consecința a faptului ca presiunea hidrostactică este o funcție a densității metalului lichid și a înălțimii coloanei lui, valoarea presiunii date crește invariabil. Ca urmare a acestui fapt, echilibrul enunțat mai sus se distruge. El se menține numai în cazul cînd se mărește presiunea de cedare adică în situația creșterii neîncetate a temperaturii la suprafața metalului.

În caz că această condiție nu se îndeplinește, se produce o ecranare treptată a razei laser de către metalul lichid și în consecință o variație a parametrilor energetici ai acesteia, iar în final și a parametrilor geometrici ai piesajelor prelucrate.

Așadar, interacțiunea razei laser cu materialul prelucrat, în cazul fixării focarului la suprafața piesei, constă

În următoarele:

Baza laser acționează asupra materialului cu efect al frînării fotonilor concentrați pe o suprafață mică (pata focarului). Aceasta creează în stratul materialului, pe o adâncime de câteva secimi de microni, o zonă de radiație cu o temperatură înaltă. Inițial se dezvoltă o fază cvasistatică, care se termină prin trecerea unei părți a materialului în fază de lichid supraîncălzit. Concomitent, legăturile mecanice ale părții supraîncălzite a materialului cu restul masei slăbesc în mod vizibil și se produce un proces intens de vaporizare.

Într-un regim variabil de generare a radiației, durata fazei cvasistatice se reduce în contul unei densități de frecvență ridicată a maximele la începutul procesului. Faza cvasistatică a interacțiunii trece în fază dinamică. Concomitent se produce expulzarea produselor lichide și a gazelor din zona iradierii în mediul exterior sub acțiunea contrapresiunii, care are loc în contul proceselor gase dinamice din timpul exploziei materialului lichid supraîncălzit. Undele de șoc favorizează durificarea și, uneori, netezirea peretelui alezajului prelucrat.

Terminarea procesului interacțiunii în timpul unui singur impuls al generării se caracterizează printr-o slăbire importantă a fenomenelor dinamice, datorată procesului variabil al acțiunii generatorului cuantic. În această perioadă ia naștere din nou faza cvasistatică. Însă încălzirea materialului se produce la un nivel mai scăzut, pentru că energia maximele devine neînsemnată, iar intensitatea generării scade brusc. Când maximele nu se produce, materialul din zona indicată tinde să se răcească până la temperatura critică.

Incheierea procesului se caracterizează prin apariția neregularităților în materialul supraîncălzit de pe suprafața alezajelor (depuneri, microdepresiuni) (foto 6).

Analiza aspectelor reprezentative ale interacțiunii razei focalizate cu semifabricatul (126) a evidențiat că, în momentul inițial, are loc faza cvasistatică, care este însoțită de încălzirea materialului și de evaporarea lui intensă de pe suprafața iradiată. În această perioadă nu se observă nici un transfer din zona exterioară topită spre masa materialului. Realizarea unui orificiu vizibil are loc numai în momentul creșterii intensive a adâncimii orificiului prelucrat, când procesul este însoțit de fenomene dinamice cu expulzarea materialului topit.

b) Prin deplasarea focarului spre interiorul materialului de prelucrat, mecanismul interacțiunii razei de lumină cu suprafața semifabricatului devine similar cu procesul studiat mai sus. În cazul acesta, după cum ne arată cercetările experimentale (126), în momentul inițial apare faza cvasistatică a carei durată crește în funcție de mărimea deplasării focarului.

Prelungirea duratei fazei cvasistatice este condiționată de formarea pe suprafața piesei prelucrate a petei de lumină, care posedă o intensitate de energie diminuată, totuși suficientă pentru încălzirea și evaporarea materialului din zona interacțiunii. Fenomenul termodinamic, în acest caz, este analog cu fenomenele analizate pentru situația în care focarul lentilei focalizatoare se plasează pe suprafața semifabricatului.

Având în vedere că punctul de energie maximă a razei laser concentrate, este plasat în profunzimea materialului, ia naștere o sursă importantă de căldură, sub formă de metal topit, care crește pe măsura creșterii fluxului de lumină. Crearea orificiului are loc prin formarea unui culoar în sens invers, prin care materialul topit sub acțiunea exploziei termodinamice este expulzat. În continuare, procesul trece din nou în faza cvasistatică însoțită de slabă topire a pereților.

Procesul interacțiunii este urmat de o răcire lentă și, din când în când, de expulzări neregulate de material lichid, datorită numeroaselor puncte de immagazinare a energiei pe suprafața alezajului.

În figura 10 (116) este arătată dependența intensității proceselor prelucrării față de mărimea deplasării focarului, în condițiile: material - D16T; elementul activ - sticlă dopată cu neodim 15 x 240 mm; 20 J; F = 45 mm. Pe axa verticală sînt plase valorile relative ale intensității încălzirii materialului sub acțiunea iradierii, pe axa orizontală - momentele încălzirii materialului, care caracterizează dezvoltarea fazelor cvasistatică și dinamică. Exploziile produse în profunzimea materialului sub acțiunea zonelor locale de temperatură înaltă, sînt marcate prin virfurile de intensitate ridicată.

În cazul analizei desfășurării procesului legat de poziția focarului lentilei focalizatoare în profunzimea semifabricatului, ca moment important se prezintă identificarea fenomenului transmiterii căldurii în zona de formare a locașului viitoareii explozii.

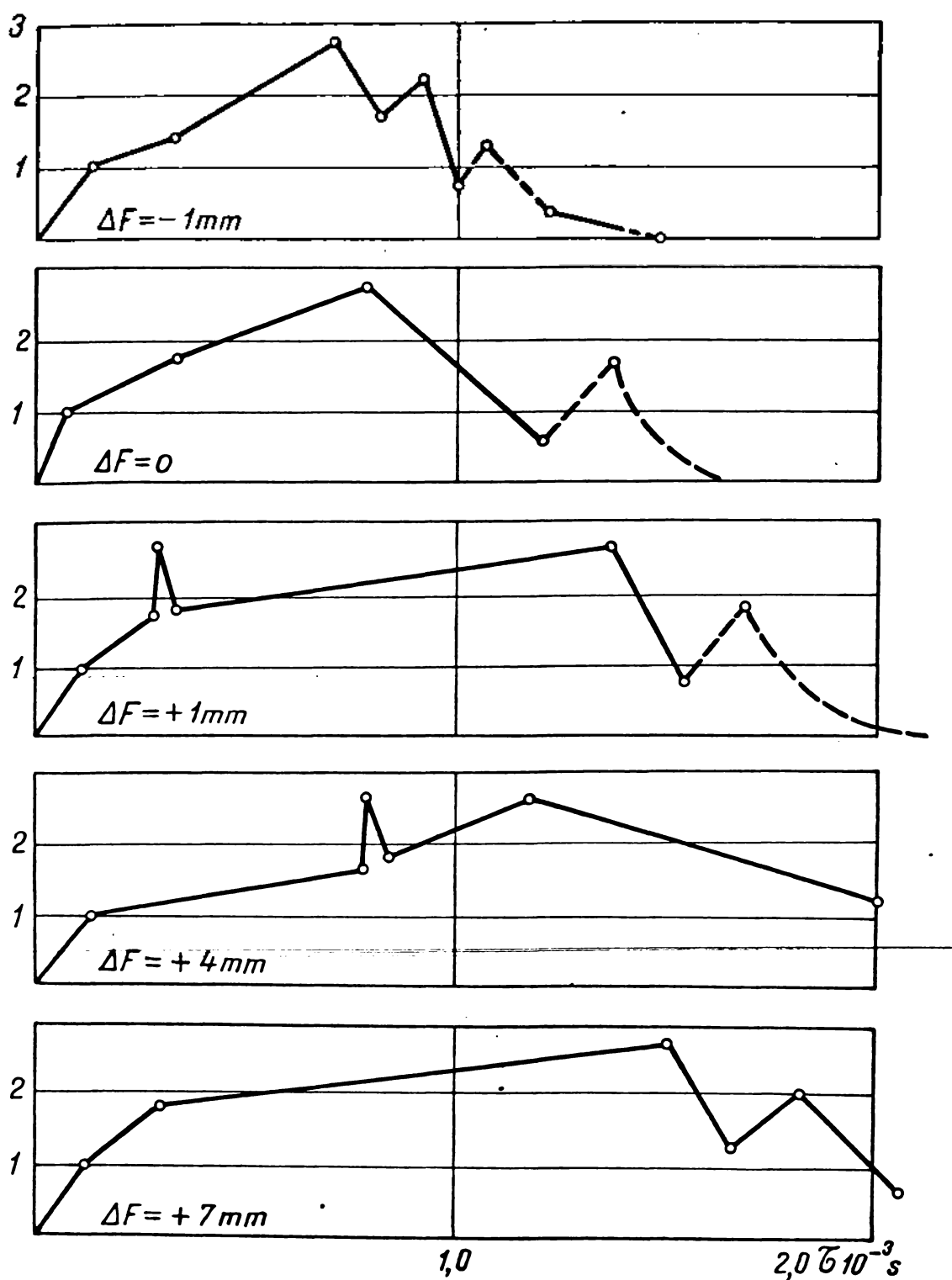


Fig.10

Cum energia sursei radiației în esență se compune din însumarea energiilor maxime ale impulsurilor radiațiilor, se presupune că este posibil a se rezolva problema dată ca o problemă specifică termodinamicii.

Însă rezolvarea ei se complica prin folosirea metodei transformării a lui Laplace și de asemenea prin transformarea inversă (42).

Rezolvarea simplificată a acestei probleme este posibilă

prin ecuația diferențială a conductibilității căldurii pentru coordonata X (116):

$$\frac{\partial T(X_0, \tau_{imp})}{\partial \tau_{imp}} = \frac{\alpha_1 \partial^2 T(X_0, \tau_{imp})}{\partial X_0^2} + \frac{1}{k_p} \omega_1(X_0, \tau_{imp}) \quad (39)$$

unde: $\omega_1(X_0, \tau_{imp})$ - productivitatea sursei (cantitatea de căldură, evidențiată în unitatea de timp, în unitate de volum, într-un punct al corpului în momentul τ_{imp}).

Prezintă interes analiza a două regiuni ale deplasării lui X :

$$0 \leq X \leq X_0 \quad \text{și} \quad X_0 \leq X \leq \infty$$

Dupa rezolvarea ecuației (39) prin metodele de transformare ale lui Laplace, în condițiunile incipiente $\tau = 0$ și $T(X, 0) = 0$ vom obține următoarea lege a variației temperaturii T în sectoarele $0, \tau$ și X_0, τ , în situația unor valori extreme de mici ale timpului de acționare a razei:

$$T(0, \tau) = b\tau \left(1 + \frac{2\eta\sqrt{\alpha_1\tau}}{\sqrt{\pi}}\right) = \frac{k_p}{k_p} \tau \left(1 + \frac{2\eta\sqrt{\alpha_1\tau}}{\sqrt{\pi}}\right) \quad (40)$$

Temperatura în punctul $X = X_0$ poate fi dedusă din expresia:

$$T(X_0, \tau) = \frac{b\tau}{2} \left(1 - \frac{2\eta\sqrt{\alpha_1\tau}}{\sqrt{\pi}}\right) = \frac{k_p}{2k_p} \tau \left(1 - \frac{2\eta\sqrt{\alpha_1\tau}}{\sqrt{\pi}}\right) \quad (41)$$

Analiza expresiilor obținute ne da posibilitatea să deducem caracterul variației temperaturii atât la suprafața, cât și profunzimea materialului. Să înlocuim fluxul de căldură dirijat spre sectorul $X < X_0$ prin Q'_1 , iar fluxul de căldură dirijat spre sectorul $X > X_0$ prin Q''_1 . Temperatura la suprafața materialului se stabilește prin cantitatea de căldură degajată de raze de lumină în punctul $X = 0$. Acesta îi corespunde primului termen al expresiei (40). Temperatura de pe suprafața materialului în punctul $X = 0$ se stabilește, de asemenea, și prin cea cantitate de căldură, care parvine din sectoarele interioare ale materialului. În ecuația (40) aceasta se exprimă prin cel de al

doilea termen. La o durată minimă a impulsului generării, cel de al doilea termen al expresiei (40) poate fi considerat egal cu zero. El scade odată cu diminuarea conductibilității termice a materialului.

În punctul $X = X_0$, temperatura se exprimă de asemenea prin doi termeni ai ecuației (41).

Prinul termen al ecuației (41) $\frac{\tau \cdot X_0}{2} \tau$, caracterizează încălzirea pentru sursa de căldură Q_1^0 și răcirea grație cedării caldurii prin fluxul Q_2^0 . Cel de al doilea termen

de $\tau \cdot X_0 \cdot \frac{\tau \cdot \sqrt{\alpha_1 \tau}}{\sqrt{\tau}}$ caracterizează scderea temperaturii în punctul $X = X_0$ grație fluxului de căldură Q_2^0 .

Din datele funcțiilor se vede cum creșterea temperaturii în centrul sursei Q_1^0 se produce mai lent, întrucât mai există și o cedare a căldurii în centrul sursei Q_2^0 .

Astfel, în orice moment de la încălzirea materialului, în cazul focalului deplasat spre profunzimea semifabricatului, începe să se accelereze deplasarea temperaturii maxime din punctul $X = X_0$ pînă la $X = 0$. Dacă trecerea căldurii de la punctul $X = X_0$ este împiedicată, se produce o explozie care degradează suprafața piesei.

c) Să analizăm fenomenele care au loc în cazul localizării petei focale deasupra suprafeței semifabricatului.

Specific, în acest caz, este acțiunea plasmă (care se formează imediat după pata focală) asupra materialului de prelucrat și existența obstacolului format din gazele returnate (42, 126). Aceasta împiedică și diminuează simțitor posibilitatea de utilizare maximă a energiei luminoase pe suprafața semifabricatului. Procesul prelucrării în acest caz se desfășoară astfel. În stadiul inițial, în planul focal al lentilei ia naștere plasma cu temperatura foarte înaltă, care se deplasează cu viteză mare spre suprafața piesei. Pe de altă parte, în cazul densității ridicate a energiei, se poate observa întoarcerea gazelor, a căror front se răspândește spre lentilă (126). Datorită acestui fapt se pierde o cantitate importantă de energie a irradiației. Însă, partea de energie rămasă interacționează cu straturile superioare ale semifabricatului, avînd drept consecință apariția fazei crasistatice, care în

anumite condițiuni poate trece în faza dinamică.

Dacă valoarea deplasării focarului nu este prea mare (0,5 - 1,5 mm) atunci durata de generare a plasmăi diferă de timpul străpungerii în gaze. În cazul acesta, maxima densității energiei grăbește apariția fazei dinamice. Dacă mărimea deplasării focarului este mai mare de 1,5 mm atunci străpungerea frontului de gaze consumă o mare parte din energie, iar faza dinamică poate să dureze un timp foarte scurt sau nu se produce. În aceste condiții se dezvoltă cu precădere faza cvasi-statică, având ca rezultat numai o prelucrare superficială a piesei. Dacă mărimea deplasării e mai mică de 0,5 mm, atunci procesele care se produc în zona prelucrării sînt aproape identice cu cele ale interacțiunii razei în cazul suprapunerii petei focale pe suprafața semifabricatului (126).

3.1.4. Influența parametrilor termofizici și optici ai materialului semifabricatului asupra mecanismului prelucrării

Mecanismul interacțiunii razei laser cu materialul de prelucrat este condiționat, în multe privințe, și de calitățile termofizice și optice ale materialului de prelucrat: temperatura de topire, conductibilitatea termică, capacitatea calorică, indicele de refracție, indicele de absorbție (47).

În funcție de acești parametri se produce o variație diferențiată a intensității fazelor de bază ale procesului care decurge, a formei și caracterului scurgerii materialului vaporizat, a evacuării materialului topit etc. (116).

Cercetarea mecanismului interacțiunii razei laser cu materialul semifabricatului, în funcție de calitățile termofizice și optice ale acestuia, s-au realizat cu ajutorul generatorului cuantic avînd elementul activ din sticlă purificată cu neodim cu dimensiunile 15 x 240 mm, energie furnizată 20 Kjoule, distanța focală 45 mm. Focarul lentilei a fost poziționat la suprafața piesei. S-a constatat că procesele sînt foarte diferite în ce privește caracterul dezvoltării lor și a fazelor de formare a flăcării materialului care se vaporizează. Spre exemplu, la prelucrarea aliajelor de cupru (alame), procesul interacțiunii razei de lumină are o durată foarte scurtă. Ca o caracteristică specifică acestui proces de interacțiune este și faptul că flacăra

posedă suficientă densitate și direcționalitate (126). Parametrii geometrici ai flacării sînt neînsemnați. Lungimea ei maximă ajunge la 25-30 mm.

La prelucrarea pieselor din alamă AmX4 la început apare faza quasistatică, apoi se deașoară faza dinamică iar la urmă începe răcirea treptată a zonei prelucrate. Procesul prelucrării se caracterizează prin expulzarea unei cantități importante de material topit, care sedimentează în chip de picături mari pe lentilă sau ecranele protectoare.

Deosebit se prezintă procesul de prelucrare a aliajelor de aluminiu, caracterizat printr-o durată ceva mai prelungită și o creștere sensibilă a flacării materialului vaporizat. Prin forma sa flacăra are un aspect de ciupercă, iar după ce atinge planul geamului protector se deformează. Norul materialului care se vaporizează este foarte persistent și rămîne pînă la terminarea procesului. La prelucrarea aliajelor de aluminiu predominantă este faza quasistatică și numai la sfîrșitul procesului se dezvoltă faza dinamică, care este însoțită de expulzări consistente de metal topit.

Fenomenul interacțiunii razei laser cu aliajele dure are aspecte specifice. În cazul acestora, procesul depășește, ca durată, toate cazurile analizate anterior. De asemenea, la străpungera semifabricatului, flacăra are o formă cilindrică și sensibil alungită. Faza quasistatică în procesul prelucrării pieselor brute din aliajul $T_{14} K_9$ are o durată scurtă. Faza dinamică are durată mai mare, se dezvoltă intens și este caracterizată prin expulzarea din zona prelucrării a particulelor de material care se imprimă pe suprafața ecranelor protectoare (126). Dacă micșorăm intensitatea radiației generatorului cuantic, dimensiunile flacării se micșorează sensibil. Însă flacăra își păstrează forma inițială ascuțită la vîrf și cilindrică (116).

În cazul prelucrării semifabricatelor din materialul ceramic de tipul Cesarom 10 și TM 332 procesul nu se deosebește prea mult sub aspectul duratei de procesul anterior (116, 126). Forma flacării, care la naștere sub influența razei laser are un aspect foarte caracteristic pentru întreaga grupă a materialelor date. Din momentul începerii vaporizării materialului, flacăra ia un aspect de ciupercă, cu partea de sus dezvoltată puternic. Pe mă-

sura dezvoltării procesului, flacăra se lungeste în prima zonă și se îngroașe intens în ultima zonă. Sub acest aspect flacăra amintește prin formă de o explozie atomică în miniatură. Dezvoltarea fazei dinamice se caracterizează prin expulzarea atât a particulelor materialului topit, cât și a particulelor consistente.

Prelucrarea pieselor din oțel 13CN35 este legată de o durată mai mare a procesului. Interacțiunea razei laser cu materialul are loc în două faze: în momentul inițial - ca la prelucrarea ceramicii, la sfârșitul procesului - ca la prelucrarea aliajelor de aluminiu. În perioada inițială flacăra are o formă de ciupercă, cu partea finală puternic dezvoltată. Pe măsură ce intensitatea radiației generatorului cuantic scade, forma ascuțită a flăcării se pierde. Flacăra își pierde forma sa inițială, se alungește și rămâne pînă la sfârșitul procesului ca un nor persistent de o formă nedefinită. Faza dinamică a procesului studiat apare aproximativ la jumătatea dezvoltării ei și este însoțită de expulzarea unei cantități neînsemnate de material topit. În majoritatea cazurilor, metalul topit sub formă de guler se depune simetric, în jurul alezajului prelucrat, pe fața opusă a semifabricatului.

În baza studiilor unei serii de procese (116), s-a evaluat viteza de scurgere a materialului vaporizat din zona de acțiune a razei laser în funcție de termoconductibilitatea și capacitatea calorică a materialului prelucrat. Din cercetările experimentale întreprinse (47, 116, 126), rezulta că viteza maximă de scurgere a gazelor variază în limitele 150-350 m/s (fig.11). Aceasta crește pe măsura creșterii termoconductibilității materialului

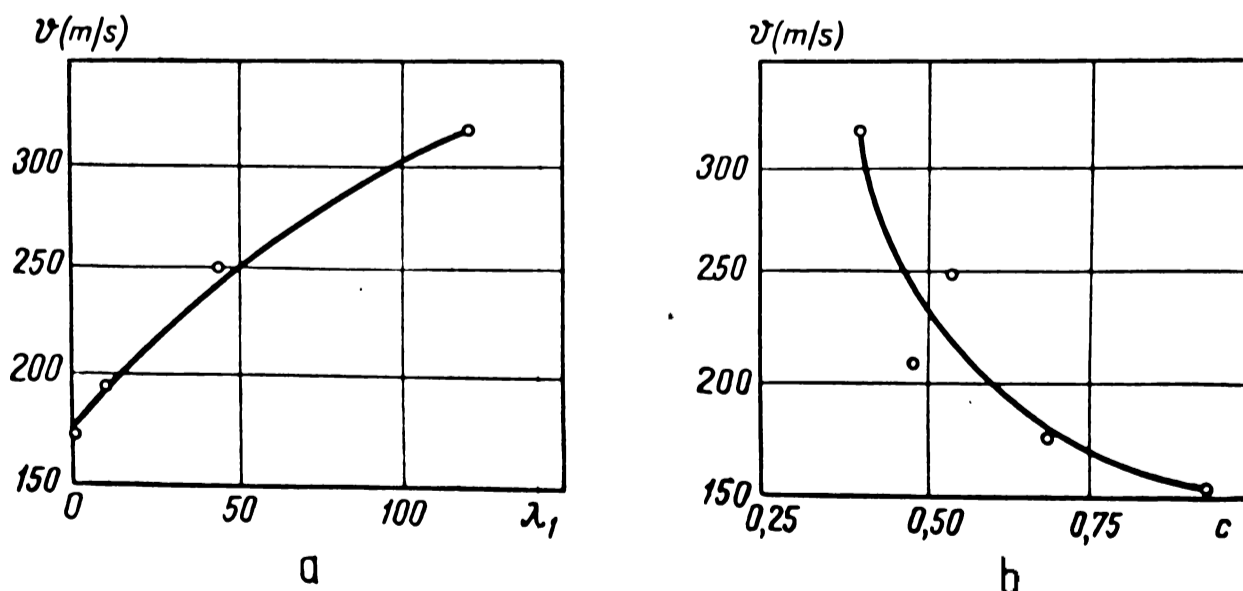
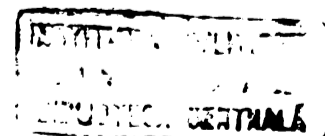


Fig.11



(α_1) și descrește în raport de mărimea capacității lui termice (c). În plus viteza maximă de scurgere a gazelor apare la prelucrarea alamei și aliajelor din aluminiu, iar cea minimă la prelucrarea oțelului, a aliajelor dure și a altor materiale similare.

3.2. Contribuția privind identificarea formelor geometrice ale alezajelor micrometrice prelucrate cu fascicol laser

Alezajele cilindrice micrometrice realizate experimental au fost înfundate și străpuse. Forma și profunzimea acestora este dependentă de volumul de energie al procesului (prin care se înțelege volumul de material prelucrat la un singur impuls al generatorului) raportat la unitatea de lungime a alezajului. La valori mici ale volumului de energie, de regulă, se formează alezaje înfundate. Cele străpuse pot fi realizate numai la o energie critică (W_{2cr}) a radiației generatorului (14).

Din prelucrările efectuate, am putut constata că formarea alezajelor, la baza cărora stau procese termodinamice (15), depinde în principal de următorii factori: poziția focarului față de suprafața semifabricatului, parametrii energetici ai fascicolului laser și caracteristicile termofizice și optice ale materialului prelucrat.

3.2.1. Formarea alezajelor înfundate

În funcție de poziția focarului, se poate obține una din cele patru alezaje reprezentative înfundate (fig.12).

La poziția focarului pe suprafața semifabricatului se obține alezajul din fig.12 a, care se compune dintr-un con mic de intrare cu parametri D_1 și l_1 , o parte cilindrică cu D_2 și l_2 și o altă conică cu l_4 . În unele cazuri poate să lipsească partea cilindrică și în locul acesteia poate să apară un alezaj de conicitate mică (foto 24, 25 și 30).

În timpul procesului formării alezajului, în prima fază a acestuia - faza cvasistatică, materialul topit începe să se deplaseze spre interiorul semifabricatului. În continuare, în baza presiunii hidrostatice și capilare care apar în zona prelucrării, pe măsura patrunderii razei laser în grosimea materialului, se

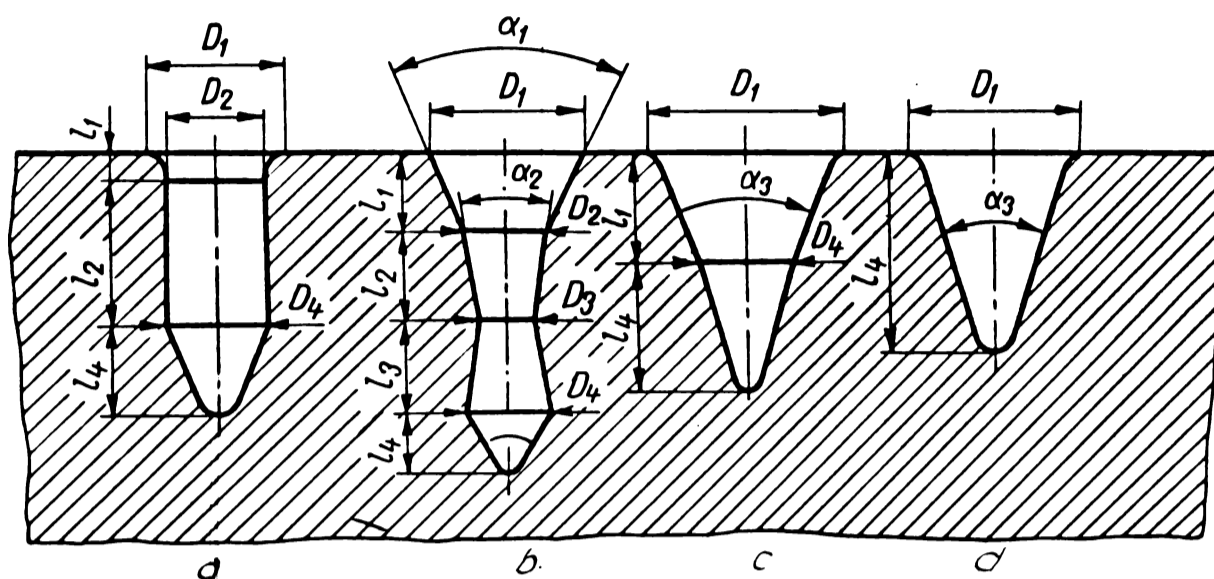


Fig. 12

loc ecranarea peretelui cu material lichid. Această ecranare, de regulă cu depunere masivă de metal lichid, constituie una din principalele cauze de formare conică a alezajelor. Întrucât mărimile presiunii hidrostatice și capilare este funcție de densitatea materialului lichid, de înălțimea coloanei de metal lichid și de temperatura din zona prelucrării, numai în anumite condiții pot fi realizate și alezaje cilindrice.

La trecerea în faza dinamică, materialul supraîncălzit este aruncat din cavitate. Însă, din cauza densității mari a fascicolului laser, curgerea are loc în sens invers fascicolului laser. Între acesta și peretele alezajului (fig. 13). La ieșire, metalul este împingut sau se depune în jurul intrării. Volumul ridicării sonde odată cu energia semnalului. În această fază, forțele dinamice rup și apoi teșesc, formând corul de intrare. Partea conică din profunzimea alezajului se datorește distribuției inegale a densității de energie în secțiunea fascicolului laser (mai redusă către periferie).

La deplasarea focarului spre interiorul semifabricatului, alezajul capătă forma din fig. 12 b, cu parametri D_1 , l_1 - partea conică, D_2 , l_2 partea cilindrică și o porțiune caracteristică de butoi. Această formă se datorește încălzirii inegale a materialului pe toată lungimea alezajului, în urma căreia în interiorul materialului se formează o cursă puternică de căldură.

La poziția focarului deasupra semifabricatului se obține un alezaj conic cu unul sau două elemente de suprafață

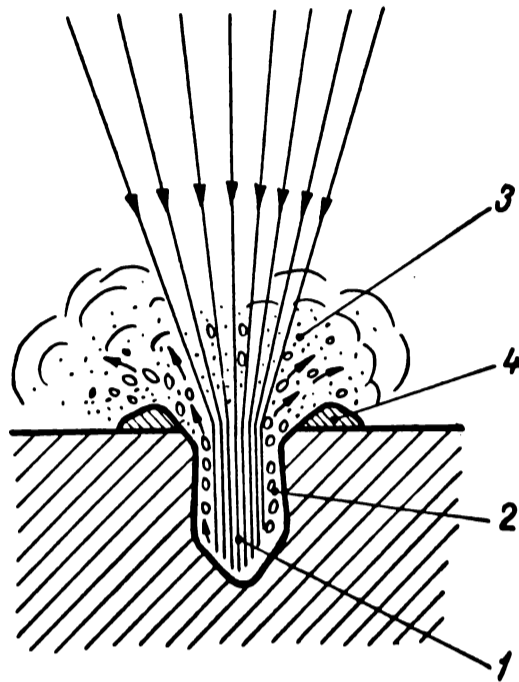


Fig.13

avînd parametrii D_1 , l_1 și D_4 , l_4 sau numai D_1 , l_4 (fig.12^c d) (foto 23). Forma specifică este datorată absorbției energiei razei de către plasma care se formează în planul focal al lentilei, în acest caz. Calitativ, procesul depinde de raportul între timpul t_{pl} corespunzător acțiunii plasmă asupra materialului și timpul t_{pr} pentru patrunderea aerului sub acțiunea plasmă formate. Dacă $t_{pl} > t_{pr}$ interacțiunea se desfășoară în cele două faze (cuasistatică și dinamică), formîndu-se un alezaj de formă conică ca în fig.12 c. Dacă $t_{pl} < t_{pr}$, preponderentă este faza cuasistatică și se formează o mică adîncitură de formă conică (126).

În urma experimenturilor efectuate, s-a constatat că profilul orificiilor infundate (D_2 , D_1 și D) este dependent de energia semnalului emis W_n . Astfel (fig.14 titan tehnic pur, sticlă dopată cu neodim) (153), la micșorarea energiei de radiație profilul se schimbă avînd ca și în cazurile reprezentative (fig. 12) un con de intrare, o parte cilindrică și un con în fund. În fig. 15 este reprezentată dependența formei găurilor funcție de energia semnalului emis (a - 20 k J; b - 15 k J; c - 12 k J; d - 10 k J; e - 8 k J, titan tehnic pur, sticlă dopată cu neodim). La micșorarea continuă a energiei emise (pînă la 12 k J) orificiul capătă la vîrf o formă

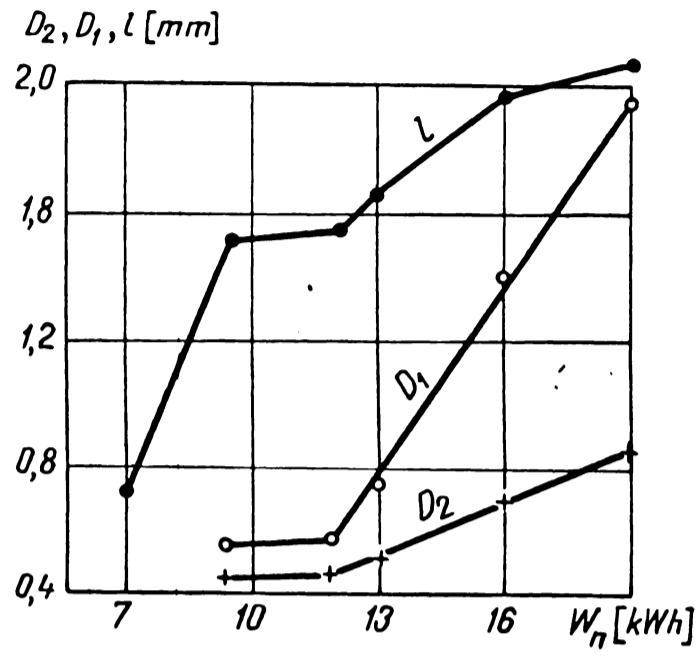


Fig. 14

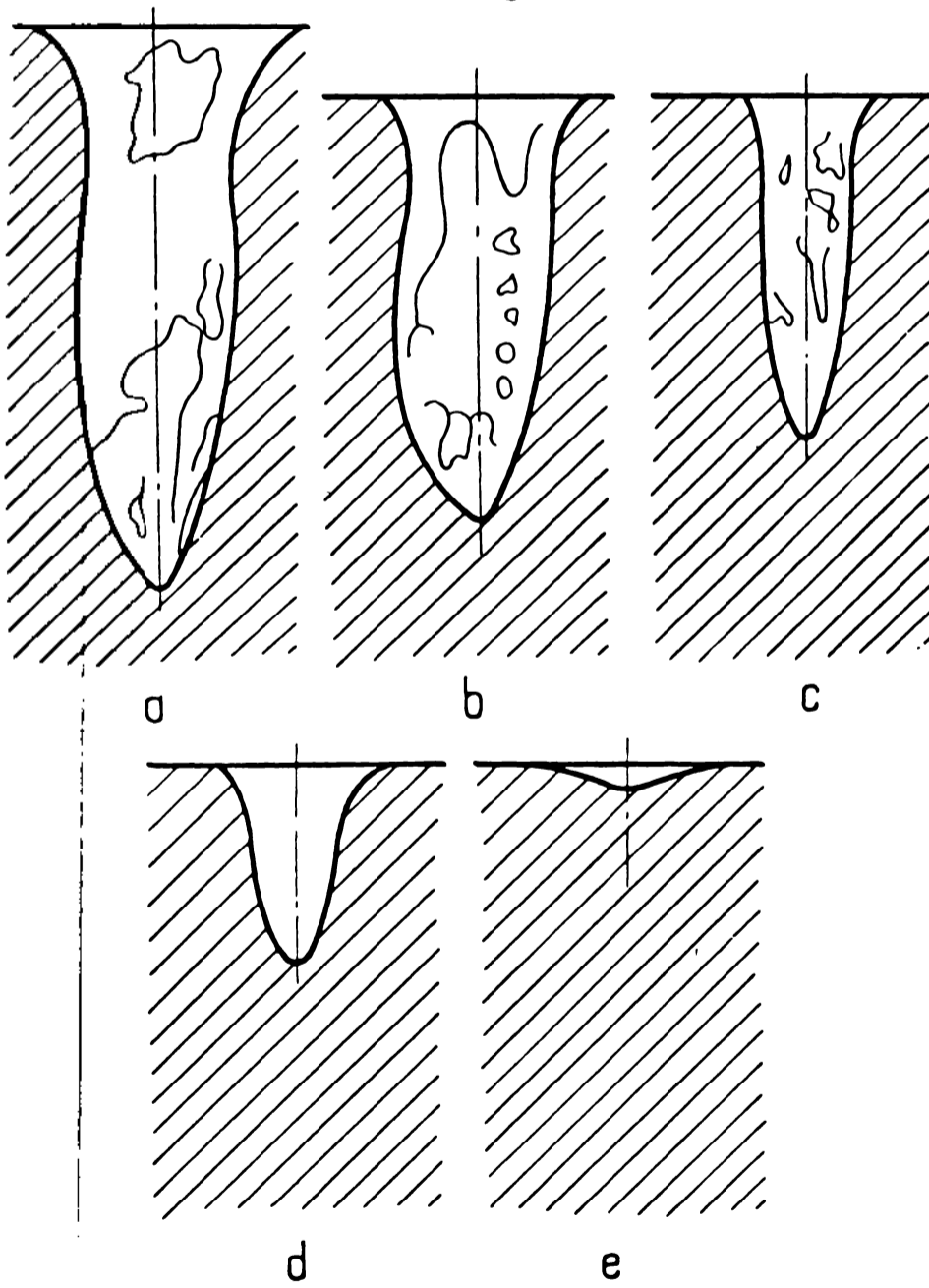


Fig. 15

conică (fig. 15 d) iar în cadrul energiei emise de 8 k J, orificiul este o mică acîncitură (fig. 15 e). În baza acestei interdependențe, la micșorarea energiei emise, diametrul conului de intrare D_1 , în comparație cu diametrul alezajului D_2 , se micșorează mai mult. Schimbarea importantă a diametrului conului de intrare D_1 este o dovadă în plus că o influență semnificativă asupra formării acestui element al alezajului o exercită forțele dinamice a căror acțiune slăbește pe măsura micșorării energiei de radiație a generatorului cuantic. Adîncimea alezajului, la schimbarea energiei emise de la 20 la 8 k J variază lent și se schimbă brusc sub limita acestui domeniu.

Această interdependență este valabilă pentru un anumit fel de material care are caracteristici termofizice și optice asemănătoare cu cel experimentat. Schimbarea acestor constante ale materialului modifică intensificarea fazelor procesului de prelucrare și, ca urmare, se modifică valoarea parametrilor geometrici ai alezajelor prelucrate.

Valori efective ale parametrilor geometrici ale alezajelor prelucrate cu fascicul laser, sînt reprezentate în tabelul 6 (pentru materialul titan tehnic pur).

3.2.2. Formarea alezajelor străpunse (131, 126)

Constă în principal, din aceleași procese termodinamice ce le formarea alezajelor înfundate, însă prezintă o particularitate. După terminarea fazei cvasistatice, la trecerea în fază dinamică, eliminarea materialului topit are loc și în sensul contracțiunii fascicolului laser. În final, rezultanta mișcării materialului topit are sensul spre interiorul semifabricatului, generînd astfel orificiul perforat. Însă, înainte de ieșirea fascicolului și apoi a metalului topit, se observă apariția unui punct luminos pe fața opusă a semifabricatului. Zona luminoasă se lărgeste repede și apare o flacără de metal volatilizat de formă asemănătoare cu flacără care se dezvoltă la conul de intrare, însă mai intensă și de același sens cu fascicolul.

Din experimentările efectuate (tabelul 6) pe benzi și plăcuțe din titan tehnic pur, rezultă că intensitatea procesului termic în zona de ieșire a orificiului depinde de poziția focarului față de cea mai apropiată suprafață a semifabricatului.

Astfel, la poziția focarului la suprafața semifabricatului,

faza dinamică are loc cu precădere spre fața opusă, cu durată și intensitate redusă. Momentul ieșirii fascicolului din semifabricat este însoțit de un nor șos, puternic luminat și format, de regulă, din materialul prelucrat care, pînă la terminarea procesului de formare a alezajului (avînd o durată egală cu cea a semnalului emis), înconjoară zona din jurul fascicolului. Forma acestui tip de alezaj este reprezentată în fig. 16 a, (foto 10,12,13).

La deplasarea focarului spre interiorul semifabricatului au loc procese deosebite față de cele arătate mai sus. Astfel, intensitatea cu care se dezvoltă flacăra pe partea opusă a semifabricatului este proporțională cu intensitatea fascicolului. În acest caz, intensitatea maximă a flăcării se obține la o distanță de 1,5 - 1,8 mm a focarului față de suprafața semifabricatului, pentru $F = 50$ mm. În această situație are loc o eliminare mult mai abundentă a materialului topit cu orientarea foarte direcțională a flăcării (în sensul semnalului laser) și cu o durată marită a procesului de formare. Alezajul obținut prezintă un con de intrare, o parte de trecere, un element în formă de butoi și un con de ieșire (fig. 16 c), (foto 32).

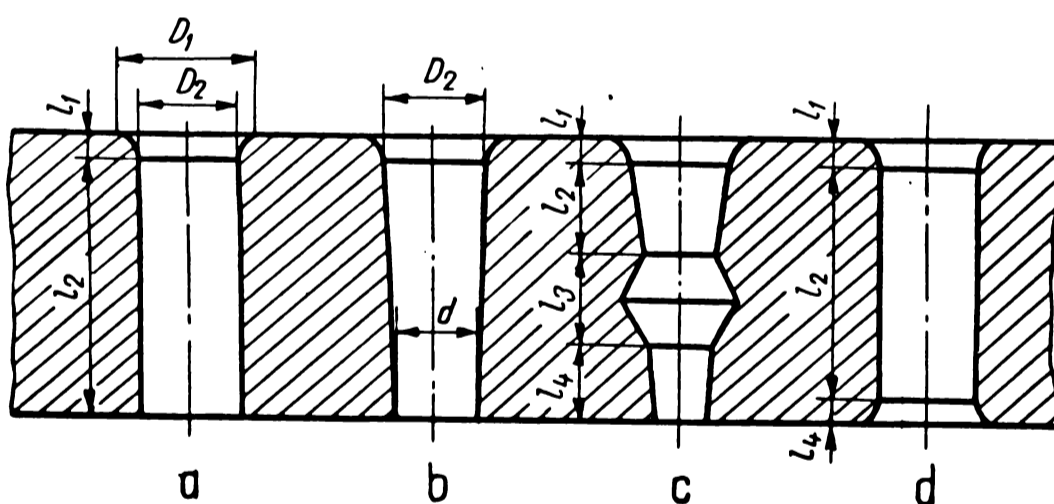


Fig.16

La deplasarea focarului peste limita 1,8 mm spre interiorul semifabricatului, intensitatea procesului scade din nou și este asemănător celui din poziția focarului pe suprafața semifabricatului. În acest caz, partea cea mai mare a alezajului este cilindrică cu un mic con de ieșire (fig. 16 d).

Din datele obținute, apreciem că schimbarea caracterului dezvoltării procesului de perforare în diverse condiții se datorează

rează variației cantității de căldură concentrată în interiorul materialului. Astfel, pentru Titan tehnic pur, punctul maxim de căldură apare la deplasarea focarului la 1,5 - 1,8 mm. În această poziție, sursa de căldură acționează asupra materialului, inițial într-un sens și apoi în celălalt, favorizează dezvoltarea intensă a fazei termodinamice, adică eliminarea intensă a metalului topit. La deplasarea spre interiorul semifabricatului, maximele concentrații de căldură se diminuează și, ca urmare, se reduce intensitatea întregului proces.

Tabelul 6

Dimensiunile suprafețelor elementare D_2 , D_1 și l ale alexajelor infundate și străpunse, funcție de energia semnalului emis W_s (semifabricatul - Titan tehnic pur).

W_s (kJ)	D_2 (mm)		D_1 (mm)		l (mm)		
	infundate	străpunse	infundate	străpunse	infundate	Străpunse	
7	9	-	0,38	-	0,52	0,72	1,5 - 2,0
8	10	-	0,40	-	0,53	0,93	1,5 - 2,0
9	11	0,45	0,42	0,6	0,55	1,65	1,5 - 2,0
10	12,2	0,46	0,43	0,62	0,56	1,68	2,0 - 2,5
11	13,4	0,47	0,44	0,65	0,57	1,71	2,0 - 2,5
12	14,5	0,48	0,46	0,68	0,58	1,72	2,0 - 2,5
13	15,7	0,55	0,47	0,8	0,62	1,84	2,5 - 3,0
14	16,8	0,61	0,54	1,0	0,75	1,92	2,5 - 3,0
15	18,2	0,67	0,60	1,2	0,86	1,96	2,5 - 3,0
16	19,1	0,72	0,62	1,4	1,10	1,98	3,0 - 4,0
17	20,5	0,77	0,65	1,58	1,30	2,01	3,0 - 4,0
18	22,5	0,83	0,70	1,76	1,42	2,03	3,0 - 4,0
19	24,9	0,88	0,73	1,95	1,51	2,06	3,0 - 4,0
20	26,7	0,95	0,80	2,13	1,62	2,08	3,0 - 4,0

Obs. La alexajele micrometrice străpunse diametrele sînt sensibil mai reduse, datorită particularității din faza dinamică: în principal, eliminarea materialului topit are loc în sensul fasciculului laser fără o erodare suplimentară datorată curgerii metalului în sens contrar. Tot pentru acest motiv crește lărgimea găurilor.

3.3. Contribuție privind alegerea regimului optim de prelucrare cu fascicul laser a alezajelor micro-metrice (întocmirea tabelelor)

La stabilirea tehnologiei de prelucrare a alezajelor micro-metrice, în vederea asigurării preciziei dimensionale a diametrului și lungimii, este necesară, ca o primă condiție, utilizarea corectă a caracteristicilor constructive și funcțional-tehnologice ale instalației, precizarea parametrilor optimi ai regimului de funcționare ș.a. Însă, datorită proceselor termodinamice complexe, nu pot fi controlate marimile acestor doi parametri (D , l) ai orificiului pe baza unor relații simple. Este adevărat că unele materiale bibliografice (56, 58, 149) recomandă ca parametru de bază mărimea petei de lumină pentru diametru, iar adâncimea orificiului să fie apreciată doar pe baza constantelor termofizice ale semifabricatului. Având numai caracter orientativ, nu pot servi ca parametri inițiali ai unui regim optim de prelucrare.

Din cercetările efectuate (149) rezultă că următorii factori principali influențează parametrii geometrici (D_2 și l) ai alezajelor: energia de pompare - dependentă de tensiunea immagazinată în condensatori (V) (fig. 17), coeficientul de trecere al oglinzii rezonatorului optic ($\bar{\sigma}_2$), diametrul diafragmei (d_p) și distanța focală a lentilei (F)

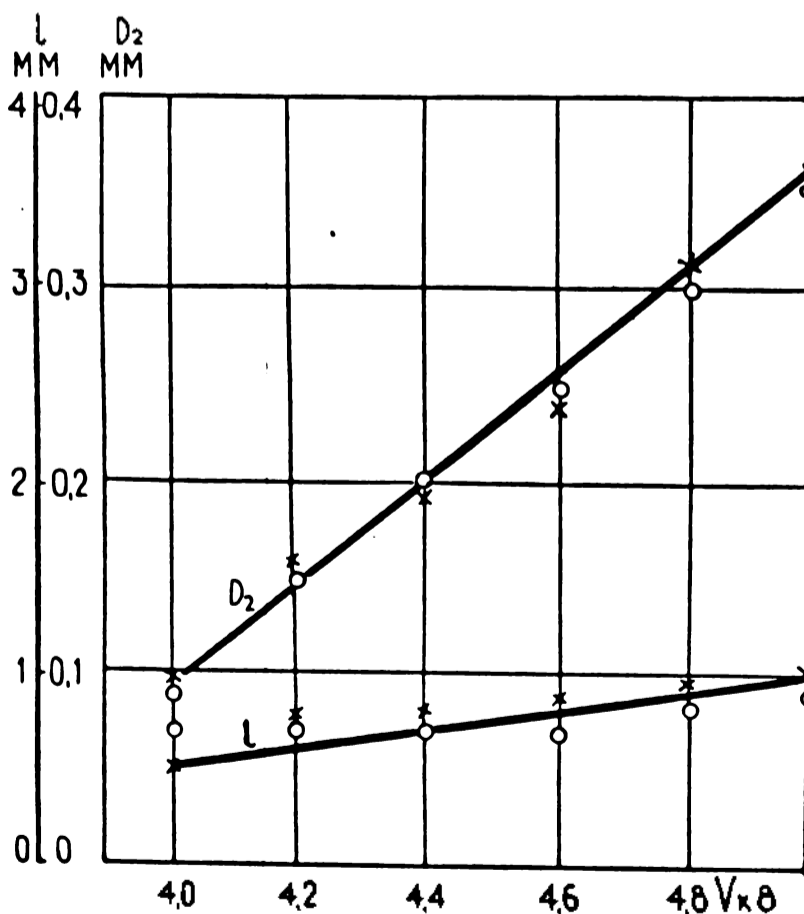


Fig.17

3.3.1. Stabilirea ecuației inițiale pentru parametrul D_2 și a coeficienților acesteia

Dependența parametrului D_2 de parametrii fundamentali ai generatorului cuantic, poate fi exprimată funcție de

$$D_2 = f(V; \bar{\epsilon}_2; d_b; F) \quad (42)$$

Dînd valori ultimilor parametri (în limitele performanțelor generatorului cuantic), s-a stabilit experimental funcția $D_2 = f(V)$ - fig.17 care, pentru valori constante ale lui $\bar{\epsilon}_2$, d_b și F , poate fi exprimată analitic (149):

$$D_2 = K_1 V + b_1 \quad (43)$$

unde K_1 și b_1 - coeficienți dependenți de $\bar{\epsilon}_2$, d_b și F , adică b_1 și K_1 ; $b_1 = \varphi(\bar{\epsilon}_2; d_b; F)$, unde φ - o funcție oarecare a mărimilor variabilelor indicate.

Funcțiile experimentale ale parametrului D_2 față de coeficientul $\bar{\epsilon}_2$ de trecere a oglinzii de ieșire a rezonatorului (fig.18), cît și l față de $\bar{\epsilon}_2$ (fig. 19) sînt reprezentate prin curbe, realizate pe baza valorilor experimentale din tabelul 7.

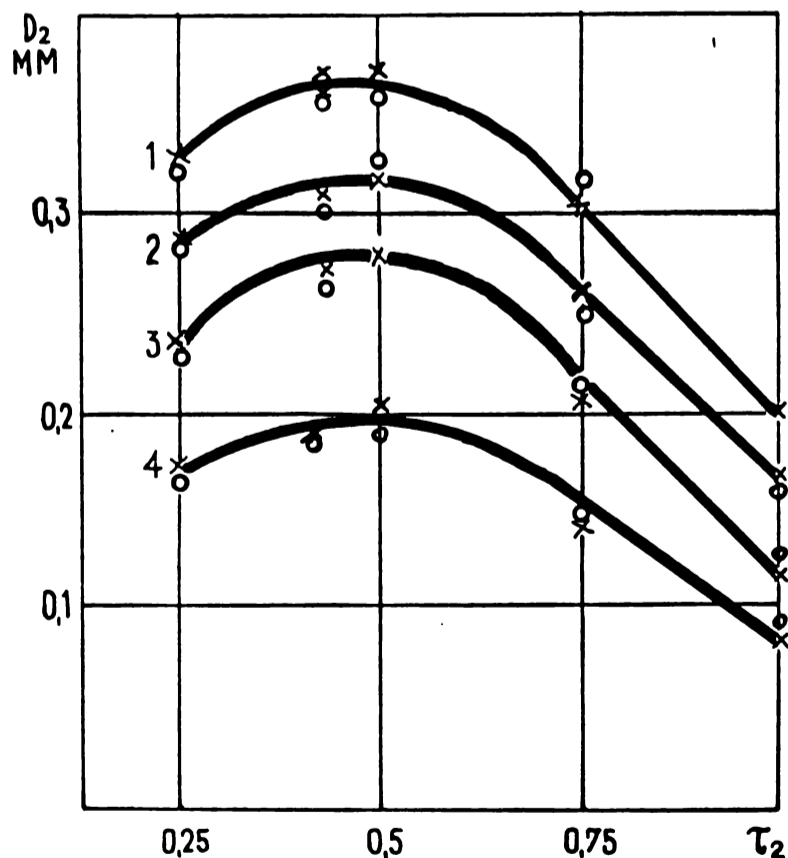


Fig.18

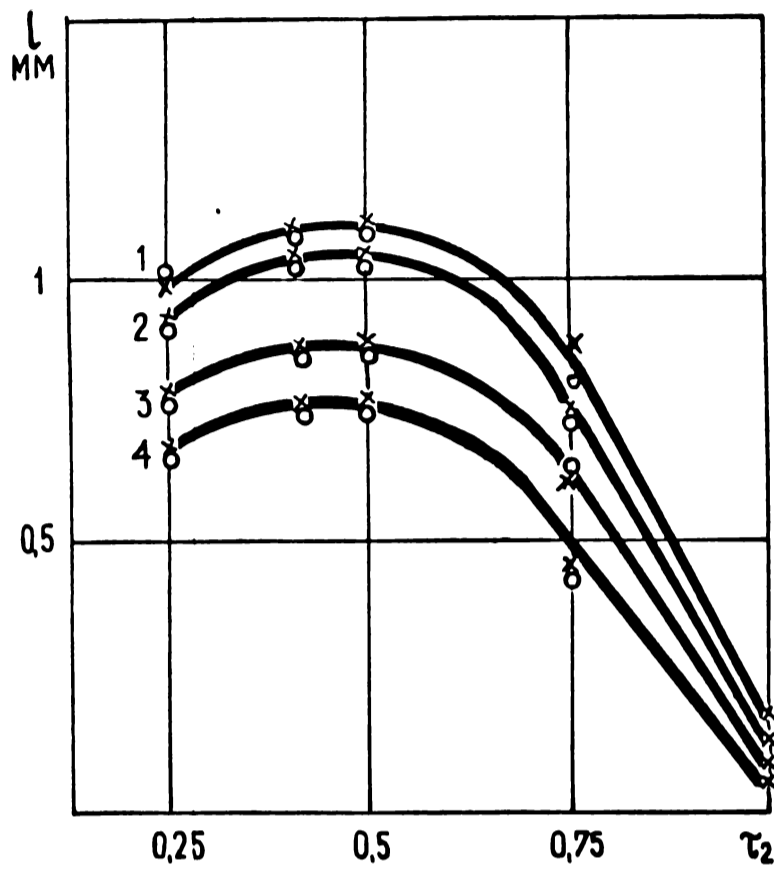


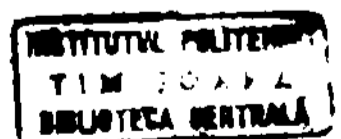
Fig.19

Tabelul 7

Figura	curbe	d_0 (mm)	F (mm)	U (kV)
a $D_2 = f(\zeta_2)$	1	12,5	40	5
	2	12,5	40	4,5
	3	12,5	20	5
	4	12,5	20	4,5
b $l = f(\zeta_2)$	1	12,5	20	5
	2	12,5	20	4,5
	3	12,5	40	5
	4	12,5	40	4,5

Analic, funcția $D_2 = f(\zeta_2)$ se exprima prin relația

(149):



$$D_2 = \mu_1 \bar{\sigma}_2^2 + \gamma_1 \bar{\sigma}_2 + \bar{F} \quad (44)$$

unde μ_1 , γ_1 și \bar{F}_1 - coeficienți ce depind de parametrii instalației (d_b , F , V).

Funcția $D_2 = f(d_b)$ (fig.20), pentru valori constante ale lui F , V și $\bar{\sigma}$ are expresia

$$D_2 = a_2 (1 - e^{-K' d_b}) \quad (45)$$

unde a_2 și K' - coeficienți dependenți de caracterul schimbării parametrului D_2 .

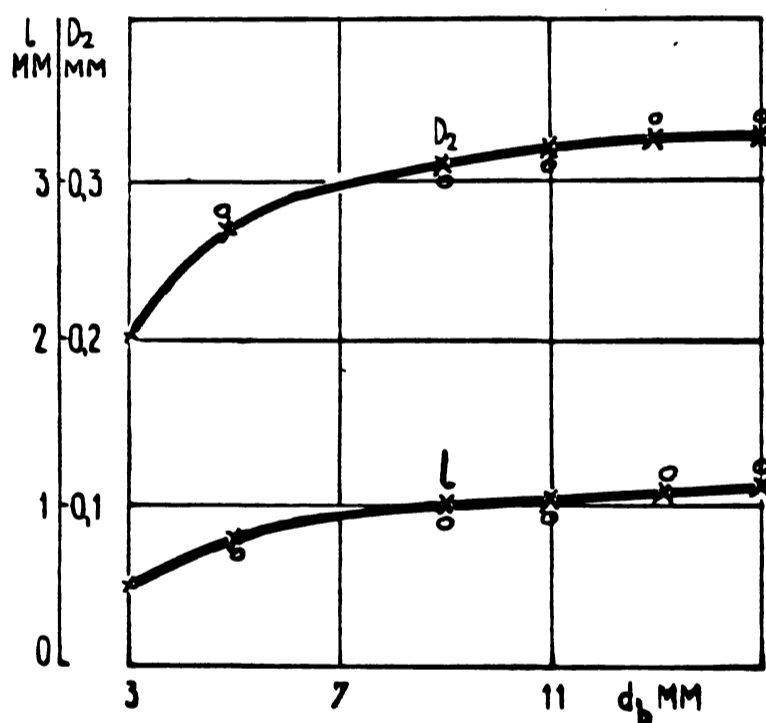


Fig.20

Funcția $D_2 = f(F)$ este liniară (fig.21) și, la valori constante ale lui V , $\bar{\sigma}_2$ și d_b , are expresia

$$D_2 = K_2 F + b_2 \quad (46)$$

unde K_2 și b_2 - coeficienți dependenți de V , d_b , $\bar{\sigma}_2$.

Ecuația inițială rezultă din ecuațiile 42 - 46, în virtutea caracterului liniar al funcției D_2 față de V :

$$D_2 = \bar{F}_4(\bar{\sigma}_2; d_b; F) V + \bar{F}_5(\bar{\sigma}_2; d_b; F) \quad (47)$$

unde φ_4 și φ_5 - funcțiile celor trei mari variabile, dependente de parametrii constructivi și instalației.

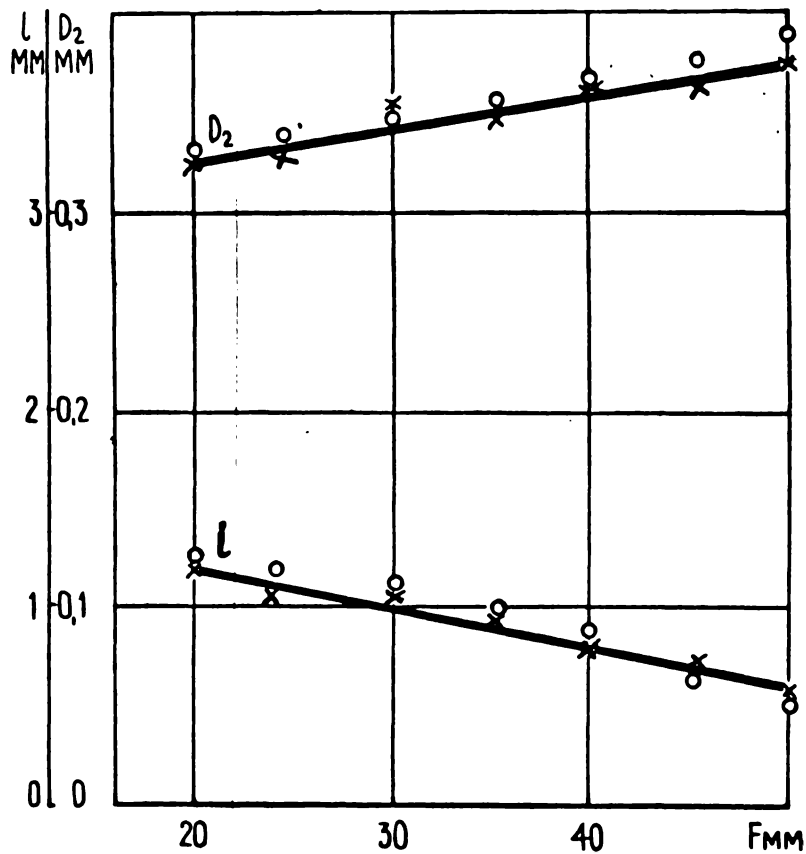


Fig. 21

Transformând ecuația (47), rezultă

$$D_2 = \left[\mu_1(d_b; F) \tau_2^2 + \gamma_1(d_b; F) \tau_2 + \xi_1(d_b; F) \right] V + \mu_2(d_b; F) \tau_2^2 + \gamma_2(d_b; F) \tau_2 + \xi_2(d_b; F), \quad (48)$$

unde μ_2 , γ_2 și ξ_2 - coeficienți dependenți de două mari variabile obținute prin rezolvarea ecuațiilor (42), (43) și (44).

Rezolvând ecuațiile (48) și (45) și efectuând câteva transformări, rezultă

$$D_2 = (1 - e^{-k' \cdot d_b}) \left\{ \left[\mu_1(F) \tau_2^2 + \gamma_1(F) \tau_2 + \xi_1(F) \right] V + \mu_2(F) \tau_2^2 + \gamma_2(F) \tau_2 + \xi_2(F) \right\} \quad (49)$$

Dezvoltând ultima ecuație și având în vedere parametrul F , rezultă:

$$D_2 = (1 - e^{-K' \cdot d_b}) \left\{ \begin{aligned} & (K_1 F + b_1) \tau_2^2 + (K_2 F + b_2) \tau_2 + K_3 F + \\ & + b_3 \end{aligned} \right. V + \left. \begin{aligned} & (K_4 F + b_4) \tau_2^2 + (K_5 F + b_5) \tau_2 + K_6 F + \\ & + b_6 \end{aligned} \right\}, \quad (50)$$

unde K' , K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , K_5 , K_6 și b_1 , b_2 , b_3 , b_4 , b_5 , b_6 - coeficienți de calcul ai parametrilor constructivi și tehnologici ai instalației.

Coeficienții rezultați pot fi determinați prin rezolvarea unui număr corespunzător de ecuații, luând în considerare influența parametrilor constructivi și tehnologici ai instalației folosite. Pe baza rezultatelor experimentale (fig.17), ecuația pentru funcția $D_2 = f(V)$ are expresia

$$D_2 = 0,18 V - 0,55 \quad (51)$$

unde $d_b = 12,5$ mm; $F = 40$ mm; $\tau_2 = 0,4$ mm.

Totodată tensiunea în armăturile condensatorilor a variat într-un domeniu de 4,0 - 5 kV și chiar 0,2 kV. Limita inferioară a variației tensiunii s-a determinat prin valoarea pragului generării elementului activ, iar limita superioară prin posibilitățile energetice ale instalației.

Pentru obținerea unui număr suficient de ecuații, în vederea determinării celor 13 coeficienți, au fost construite curbe experimentale $D_2 = f(\tau_2)$ pentru câteva regiuni de funcționare ale generatorului cuantic. Totodată, a fost folosit un set de oglinzi cu coeficienți de trecere 0,25; 0,4; 0,5; 0,75. Ecuațiile rezolvate, în aceste condiții, au căpătat următoarele expresii:

$$D_2 = -0,72 \tau_2^2 + 0,74 \tau_2 + 0,18 \quad (52)$$

pentru $d_b = 12,5$ mm; $F = 40$ mm și $V = 5$ kV.

$$D_2 = -0,64 \tau_2^2 + 0,64 \tau_2 + 0,16 \quad (53)$$

pentru $d_b = 12,5$ mm; $F = 40$ mm; $V = 4,5$ kV.

$$D_2 = -0,64 \tau_2^2 + 0,68 \tau_2 + 0,1 \quad (54)$$

pentru $d_b = 12,5$ mm; $F = 20$ mm; $V = 5$ kV.

$$D_2 = -0,426 \tau_2^2 + 0,44 \tau_2 + 0,086 \quad (55)$$

pentru $d_b = 12,5$ mm; $F = 20$ mm; $V = 4,5$ kV.

Dependența funcțională $D_2 = f(d_0)$ pentru osul (fig.20) are expresia

$$D_2 = 0,35 (1 - e^{-0,2485 \cdot d_0}) \quad (56)$$

Influența diametrului diagramei d_0 asupra lui D_2 a fost determinată la tensiunea $V = 5$ kV, coeficientul de permeabilitate a oglinzii de ieșire $\epsilon_2 = 0,4$; $F = 40$ mm și la o variație a lui d_0 de la 1 la 30 mm.

Dependența parametrului D_2 față de distanța focală (fig.21) are expresia:

$$D_2 = 0,003 F + 0,23 \quad (57)$$

pentru $d_0 = 12,5$ mm; $\epsilon_2 = 0,4$; $V = 5$ kV.

În cursul experimentărilor au fost utilizate lentile cu distanțele focale 20, 30, 40 și 50 mm.

Rezolvând ecuațiile (52) - (57) și ecuația (50) se obține un sistem de 12 ecuații

$$\begin{aligned} 200 K_1 + 5 b_1 + 40 K_4 + b_4 &= -0,754 \\ 200 K_2 + 5 b_2 + 40 K_5 + b_5 &= 0,775 \\ 200 K_3 + 5 b_3 + 40 K_6 + b_6 &= 0,1885 \\ 100 K_1 + 5 b_1 + 20 K_4 + b_4 &= -0,67 \\ 100 K_2 + 5 b_2 + 20 K_5 + b_5 &= 0,67 \\ 100 K_3 + 5 b_3 + 20 K_6 + b_6 &= 0,1675 \\ 180 K_1 + 4,5 b_1 + 40 K_4 + b_4 &= -0,67 \\ 180 K_2 + 4,5 b_2 + 40 K_5 + b_5 &= 0,712 \\ 180 K_3 + 4,5 b_3 + 40 K_6 + b_6 &= 0,104 \\ 90 K_1 + 4,5 b_1 + 20 K_4 + b_4 &= -0,446 \\ 90 K_2 + 4,5 b_2 + 20 K_5 + b_5 &= 0,461 \\ 90 K_3 + 4,5 b_3 + 20 K_6 + b_6 &= 0,09 \end{aligned} \quad (58)$$

Rezolvând sistemul de ecuații pe calculatorul electronic al Laboratoarelor de cibernetică economică - Academia de Studii Economice, rezultă valorile coeficienților:

$$\begin{aligned} K_1 &= 0,014 & b_1 &= -0,728 \\ K_2 &= -0,0146 & b_2 &= 0,71 \\ K_3 &= 0,0007 & b_3 &= 0,141 \\ K_4 &= -0,0742 & b_4 &= 3,054 \\ K_5 &= -0,0782 & b_5 &= -3,035 \\ K_6 &= -0,00245 & b_6 &= -0,558 \end{aligned}$$

Introducând valorile acestor coeficienți în ecuația (50), se obține expresia ecuației inițiale pentru parametrul D_2 :

$$D_2 = 0,9553 \left\{ \left[(0,014F - 0,728) \zeta_2^2 + (-0,0146F + 0,71) \zeta_2 + 0,0007F + 0,141 \right] V + (-0,0742F + 3,054) \zeta_2^2 + (0,0728F - 3,035) \zeta_2 - 0,00245F - 0,558 \right\}. \quad (59)$$

Valorile lui D_2 pentru $\zeta_2 = 0,4$, $d_b = 12,5$ mm și diverse valori ale lui F și V , în cazul prelunerării ceramicii Ceramax 10 sînt date în tabelul 8 (determinate pe calculatorul electronic al Laboratoarelor de cibernetică economică - Academiă de Studii Economice).

Tabelul 8

ζ_2	d_b (mm)	V (kV)	D_2 față de F						
			50	45	40	35	30	25	20
0,4	12,5	5,0	0,366	0,354	0,342	0,331	0,319	0,307	0,295
		4,8	0,335	0,320	0,306	0,291	0,276	0,262	0,247
		4,6	0,304	0,286	0,269	0,251	0,234	0,217	0,199
		4,5	0,288	0,269	0,250	0,232	0,213	0,194	0,175
		4,4	0,272	0,252	0,232	0,212	0,192	0,172	0,151
		4,2	0,241	0,218	0,195	0,172	0,149	0,126	0,104
		4,0	0,210	0,184	0,158	0,133	0,107	0,081	0,056

3.3.2. Stabilirea ecuației inițiale pentru parametrul 1 și a coeficienților acesteia

Dependența adîncimii alezajului (1) de parametrii mai sus enumerați, se exprimă prin funcția citorva variabile

$$1 = f(V; \zeta_2; d_b; F) \quad (60)$$

Funcțiile obținute experimental pentru parametrul 1 (fig.17, 19, 20, 21) se exprimă analitic prin ecuațiile (149):

$$1 = K_7 V + b_7 \quad (61)$$

$$1 = \mu_3 \zeta_2^2 + \nu_3 \zeta_2 + \rho_3 \quad (62)$$

$$1 = a_3 (1 - e^{-K^{\nu_3} d_b}) \quad (63)$$

$$1 = K_8 F + b_8 \quad (64)$$

unde $K_7, K_8, b_7, b_8, \mu_3, \nu_3, \xi_3, \epsilon_3$ și K^* - coeficienți care depind de parametrii instalației ($V, \bar{\epsilon}_2, F, d_b$).

Rezolvând ecuațiile (60) - (64), după metodologia paragrafului anterior, se obține forma finală a ecuației inițiale pentru parametrul l :

$$l = (1 - e^{-K^* \cdot d_b}) \left\{ \left((K_7 F + b_7) \bar{\epsilon}_2^2 + (K_8 F + b_8) \bar{\epsilon}_2 + K_9 F + b_9 \right) V + (K_{10} F + b_{10}) \bar{\epsilon}_2^2 + (K_{11} F + b_{11}) \bar{\epsilon}_2 + K_{12} F + b_{12} \right\} \quad (65)$$

unde $K^*, K_7, K_8, K_9, K_{10}, K_{11}, K_{12}, b_7, b_8, b_9, b_{10}, b_{11}, b_{12}$ - coeficienți dependenți de parametrii constructivi și tehnologici ai instalației.

Determinarea coeficienților ecuației inițiale (65) este dată pentru cazul prelucrării materialului ceramic Cesarom 10.

Atât pentru $d_b = 12,5 \text{ mm}, \bar{\epsilon}_2 = 0,4, F = 40 \text{ mm}$, cât și în cazul precedent, pe baza caracteristicilor experimentale, au fost obținute următoarele expresii ale dependenței adâncimii așezării (l) de principalii parametri ai instalației ($V, \bar{\epsilon}_2, d_b, F$):

$$l = 0,06 V + 0,8 \quad (66)$$

$$l = -3,34 \bar{\epsilon}_2^2 + 3,1 \bar{\epsilon}_2 + 0,39 \quad (67)$$

pentru $d_b = 12,5 \text{ mm}, F = 20 \text{ mm}, V = 5 \text{ kV}$

$$l = -2,94 \bar{\epsilon}_2^2 + 2,8 \bar{\epsilon}_2 + 0,24 \quad (68)$$

pentru $d_b = 12,5 \text{ mm}, F = 20 \text{ mm}, V = 4,5 \text{ kV}$

$$l = -3,41 \bar{\epsilon}_2^2 + 3,2 \bar{\epsilon}_2 + 0,3 \quad (69)$$

pentru $d_b = 12,5 \text{ mm}, F = 40 \text{ mm}, V = 5 \text{ kV}$

$$l = -2,72 \bar{\epsilon}_2^2 + 2,64 \bar{\epsilon}_2 + 0,16 \quad (70)$$

pentru $d_b = 12,5 \text{ mm}, F = 40 \text{ mm}, V = 4,5 \text{ kV}$

$$l = 1,2 (1 - e^{-0,1755 d_b}) \quad (71)$$

pentru $\bar{\epsilon}_2 = 0,4, V = 5 \text{ kV}, F = 40 \text{ mm}$

$$l = 0,01 F + 1,3 \quad (72)$$

pentru $d_b = 12,5 \text{ mm}, \bar{\epsilon}_2 = 0,4, V = 5 \text{ kV}$

Rezolvând ecuațiile (66) - (72) și ținând seama de ecuația inițială (65), rezultă următoarea expresie a ecuației func-

elementale pentru parametrul 1:

$$l = 0,888 \cdot (-0,0256 F - 0,13) \bar{\epsilon}_2^2 + (0,033 F + 0,02) \bar{\epsilon}_2 - 0,0011 F + 0,36 V + (0,122 F - 2,97) \bar{\epsilon}_2^2 + (-0,157 F + 3,23) \bar{\epsilon}_2 + 0,0004 F - 1,258 \quad (73)$$

Valorile lui l , pentru $\bar{\epsilon}_2 = 0,4$; $d_b = 12,5$ mm și pentru alte diverse valori ale lui F și V , în cazul prelucrării ceramicii Cosaram 10, sînt date în tabelul 9. Datele obținute sînt valabile pentru orificii infundate și pentru orificii străpunsă (determinate pe calculatorul electronic al Laboratoarelor de cibernetică economică - Academia de Studii Economice).

Tabelul 9

$\bar{\epsilon}_2$	d_b (mm)	V (kV)	l față de F						
			50	45	40	35	30	25	20
0,4	12,5	5,0	1,023	1,035	1,048	1,061	1,074	1,086	1,099
		4,8	0,890	0,910	0,930	0,949	0,969	0,989	1,008
		4,6	0,757	0,784	0,811	0,838	<u>0,865</u>	0,892	0,919
		4,5	0,691	0,721	0,752	0,782	<u>0,813</u>	0,843	0,874
		4,4	0,625	0,659	0,693	0,727	0,761	0,795	0,829
		4,2	0,492	0,533	0,574	0,615	0,656	0,697	0,739
		4,0	0,359	0,407	0,456	0,504	0,552	0,600	0,649

3.3.3. Alegerea parametrilor regimului optim de prelucrare

Problema se reduce, astfel, la alegerea regimului optim de funcționare a generatorului cuantic, pentru diametrul D_2 și adîncimea l . Spre exemplu:

Din tabelul 8, pentru $D_2 = 0,213$ mm, în condițiile oferite de instalația laser, adică $\bar{\epsilon}_2 = 0,4$ și $d_b = 12,5$ mm, sînt necesare $F = 30$ mm și $V = 4,5$ kV.

Din tabelul 9, pentru aceleași condiții $l = 0,813$ mm.

În mod similar au fost determinate valori ale lui D_2 și l pentru Titan tehnic pur (tabelurile 10 și 11) și oțel inoxidabil 13CH35 (tabelurile 12 și 13), prezentat în continuare.

Asemenes tabeluri pot fi elaborate și pentru alte materiale sau valori ale lui $\bar{\epsilon}_2$ și d_b .

Tabelul 10

Dependența lui D_2 față de F
(Materialul prelucrat - Titan tehnic pur)

τ_2	d_b (mm)	V	D_2 față de F						
			50	45	40	35	30	25	20
		6,3	0,320	0,315	0,312	0,302	0,286	0,275	0,266
		5,9	0,312	0,297	0,293	0,283	0,257	0,245	0,230
		5,6	0,295	0,275	0,271	0,257	0,232	0,209	0,199
0,4	12,5	5,4	0,281	0,250	0,243	0,231	0,177	0,170	0,157
		5,1	0,273	0,222	0,219	0,175	0,143	0,139	0,109
		4,9	0,242	0,207	0,189	0,143	0,125	0,101	0,083
		4,7	0,220	0,182	0,163	0,120	0,102	0,078	0,039

Tabelul 11

Dependența lui l față de F
(Materialul prelucrat - Titan tehnic pur)

τ_2	d_b (mm)	V	l față de F						
			50	45	40	35	30	25	20
		6,3	0,45	0,54	0,67	0,69	0,78	0,85	0,91
		5,9	0,37	0,48	0,63	0,64	0,73	0,79	0,85
		5,6	0,31	0,43	0,56	0,60	0,68	0,74	0,80
0,4	12,5	5,4	0,27	0,38	0,51	0,56	0,62	0,69	0,77
		5,1	0,22	0,33	0,48	0,52	0,58	0,61	0,73
		4,9	0,19	0,30	0,45	0,48	0,51	0,56	0,65
		4,7	0,10	0,17	0,37	0,42	0,45	0,48	0,58

Tabelul 12

Dependența lui D_2 față de F
(Materialul prelucrat - oțel 13CH35)

τ_2	d_b (mm)	V (kV)	D_2 față de F						
			50	45	40	35	30	25	20
0,4	12,5	5,7	0,292	0,285	0,271	0,269	0,267	0,262	0,251
		5,3	0,273	0,269	0,263	0,262	0,259	0,254	0,234
		4,9	0,265	0,258	0,259	0,251	0,243	0,231	0,220
		4,7	0,250	0,251	0,242	0,233	0,222	0,217	0,202
		4,6	0,247	0,237	0,227	0,215	0,197	0,182	0,169
		4,5	0,229	0,220	0,205	0,189	0,180	0,172	0,142
		4,4	0,218	0,202	0,183	0,162	0,159	0,138	0,129

Tabelul 13

Dependența lui l față de F
(Materialul prelucrat - oțel 13CH35)

τ_2	d_b (mm)	V (kV)	l față de F						
			50	45	40	35	30	25	20
0,4	12,5	5,7	0,55	0,67	0,78	0,82	0,89	0,96	0,98
		5,3	0,48	0,59	0,74	0,77	0,82	0,88	0,95
		4,9	0,42	0,54	0,67	0,71	0,77	0,83	0,91
		4,7	0,38	0,48	0,64	0,68	0,73	0,78	0,88
		4,6	0,33	0,42	0,58	0,64	0,67	0,73	0,85
		4,5	0,28	0,40	0,55	0,58	0,62	0,77	0,79
		4,4	0,25	0,38	0,47	0,49	0,55	0,69	0,77

3.4. Contribuția privind identificarea cauzelor principale ale erorilor de prelucrare cu fascicul laser a alezajelor micrometrice

În cazul procedurii de prelucrare cu fascicul laser, cauzele principale ale erorilor, dependente de caracteristicile generatorului cuantic, pot fi: imperfecțiunea geometrică, îmbătrânirea, reglarea imprecisă și montarea incorectă a elementelor sistemului optic; fenomenele termice; instabilitatea pompatului optic; fixarea incorectă a semifabricatului; regimul nestaționar al radiației generatorului cuantic etc.

Identificând și analizând aceste cauze, pot fi găsite soluții de realizare a preciziei alezajelor prelucrate.

3.4.1. Imperfecțiunea geometrică și structurală a elementelor sistemului optic

Dintre toate componentele sistemului optic, cel mai important este elementul activ. În cazul celui solid, caracteristicile depind nu numai de erorile geometrice datorate procedurilor de prelucrare, cât și de imperfecțiunile rețelei cristaline (maxime concentrației atomilor activi, repartizarea neuniformă a acestora în rețeaua cristalină, incluziuni etc.).

Ca abateri limită ale principalilor parametri geometrici ai elementului activ, inevitabile încă în procesul de prelucrare, se enumeră: toleranța la lungimea elementului activ ($\pm 0,13 \mu m$); toleranța la diametru ($\pm 0,25 \mu m$); abaterea limită de la paralelismul suprafețelor ($3''$); abaterea limită de la planicitate (max. $0,1$ din lungimea de undă a luminii de natriu); perpendicularitatea suprafețelor frontale față de axa cilindrului ($\pm 1''$); coaxialitatea monocristalului ($10''$) (163).

Deși exercită cea mai mică influență asupra parametrilor energetici, experiențele au arătat că rectilitatea și coaxialitatea determină totuși o anumită schimbare a unor parametri ai generatorului (energia de pompare, pragul de generare, energia de radiație).

Din fig. 22 a (dependența energiei de radiație W_g și a pragului de generare $W_{n.prag}$ față de diametrul elementului activ) rezultă că, micșorînd diametrul, crește densitatea ener-

gici de pompare în mediul activ, diminuând astfel energia de prag. La esență, mășind lungimea elementului activ, crește și puterea finală a generatorului (fig. 22 b), însă numai pînă la o anumită limită dependentă de nivelul pragului, cînd se micșorează randamentul sistemului optic datorită pierderilor interne (60, 153).

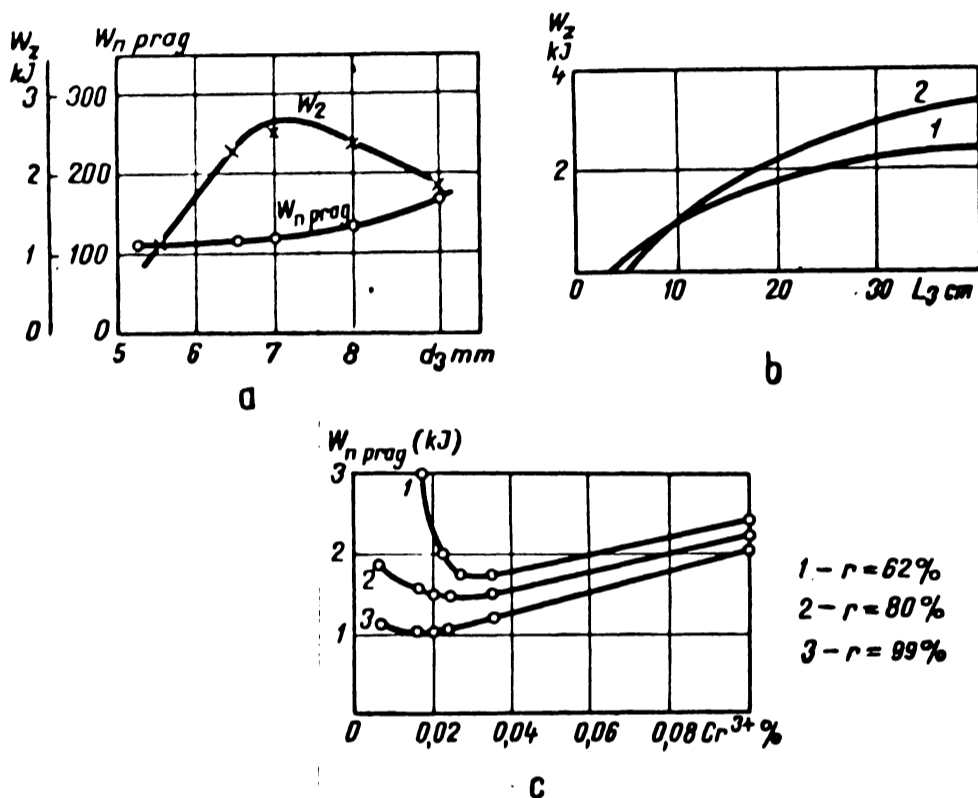


Fig. 22

Inclinarea suprafețelor frontale ale elementului activ față de axa de simetrie creează o eroare asemănătoare cu eroarea dată de dereglarea oglinzilor rezonatorului. În plus rugozitatea acestor suprafețe provoacă oscilații parazitare, care impun sporirea energiei de pompare a generatorului (116).

Mășimea concentrației atomilor activi în bară, constituie capacitatea de amplificare pe unitatea de lungime și determină pragul de generare și mărimea radiației. Concentrația atomilor activi determină mărimea densității de energie, contribuind la micșorarea transparenței elementului activ și, deci, la reducerea energiei de pompare. În diagrama din fig. 22 c, stabilită experimental, este dată dependența pragului de generare a rubinului față de concentrația de crom, pentru diferiți coeficienți de reflexie ai oglinzilor (80, 153).

Această variație a parametrilor energetici influențează asupra dimensiunilor geometrice ale alezajelor. În urma prelucrărilor efectuate pe plăcuțe din titan tennic pur, folosind 3 elemente active din rubin de dimensiunile 15 x 240 mm, dar cu neomogenități în structură (fig. 23 a și b) (153) s-a constatat o sensibilă împrăștiere atât a diametrelor cât și a adâncimii alezajelor prelucrate. Astfel, pentru energia de pompaj 20 kJ, lățimea domeniului de variație pentru adâncimea și diametrul alezajelor este de 1 mm și respectiv de 0,2 mm. Când scade energia de pompaj, această lățime a domeniului de variație crește, atingând adâncimi 1,6 mm și pentru diametre 0,3 mm.

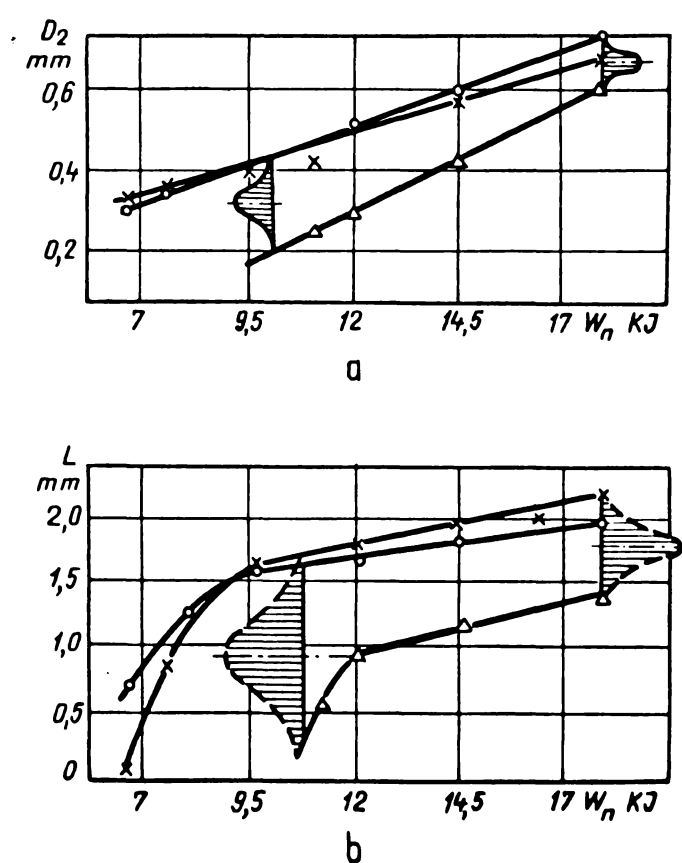


Fig. 23

3.4.2. Îmbătrânirea elementelor sistemului optic

Acest fenomen de modificare în timp a proprietăților fizice, electrice și structurale apar la elementul activ, oglinzile rezonatorului, lentilele focalizatoare, lampile de pompaj și sistemul de reflectare, având ca efect apariția erorilor sistematice ale parametrilor geometrici ai alezajelor prelucrate cu fascicul laser.

Elementul activ (83) își schimbă proprietățile datorită îmbătrânirii provocate de lămpile de pompaj și de factorii termici.

Îmbătrânirea datorită lămpilor de pompaj constă în apariția unui proces fotochimic care determină o acțiune ultravioletă asupra elementului activ, avînd ca rezultat diminuarea capacității de absorbție a acestuia.

În funcție de structură, procesul fotochimic de îmbătrânire se desfășoară cu intensități diferite. Astfel, din experimentările efectuate (153), s-a constatat în acest sens că generatoarele cuantice cu rubin monocristal au o stabilitate mai mare în timp decât cele cu elementul activ din sticlă dopată cu neodim. Experimentele efectuate pe bare de 13 x 240 mm, la o energie de pompaj de 20 kJ, arată că intervalul de îmbătrânire este între 800 și 2000 impulsuri ($\tau_{imp} = 1 \mu s$), avînd ca efect micșorarea adîncimii alezajelor cu 25% față de cea inițială. În schimb, barele din rubin nu au suferit schimbări apreciable.

Îmbătrânirea datorată factorilor termici apare sub influența caldurii emise de lămpile de pompaj. Acțiunea termică de supraîncălzire se manifestă prin distrugerea straturilor de la suprafața elementului activ, în urma căreia apar pierderi în absorbția luminii.

Pe suprafețele frontale ale barei de rubin apare o rețea de fisuri. Uneori aceste fisuri apar și în interiorul barei, a căror direcție este, de regulă, paralelă cu axa cristalului. Cauzele acestei supraîncălziri pot fi: funcționarea îndelungată sau puternice acțiuni termice periodice. S-a constatat, din cercetările efectuate ca temperatura critică pentru barele din rubin este de 80-100°C. Măsură lăstă a fost micșorarea energiei finale a radiației cu 60%.

Fenomenul de îmbătrânire, pe baza acțiunii termice, apare în mod special la sticle dopate cu neodim. Pe suprafața barei apare o depunere albă, după 100-200 impulsuri (82), care scade calitatea elementului activ. Fiind rău conductoare de căldură, sticla dopată cu neodim este supusă și mai mult influenței negative a caldurii, avînd ca efect o mai mică stabilitate a dimensiunilor alezajelor prelucrate.

Oglizile rezonatorului îmbătrînesc datorită deteriorării stratului dielectric de acoperire, prin apariția unor fisuri sau pete; în plus granulele de praaf inerente care ard provoacă pete pe oglinzi (82, 153).

Parametrul de apreciere a durabilității oglinzilor este numărul de impulsuri laser n_{imp} la care poate rezista stratul dielectric, funcție de energia W_1 a fluxului de lumină (23). Matematic, această dependență poate fi exprimată prin relația

$$n = \left(\frac{W_1}{W_n} \right)^K \quad (74)$$

unde W_1 densitatea energiei limită; W_n - densitatea energiei la care suprafața de acoperire rezistă pînă la un număr de n impulsuri; K - coeficientul experimental determinat de capacitatea de reflexie a oglinzilor și de calitatea de fabricație.

Deci, rezistența stratului dielectric (compus din mai multe pelicule) este determinată de factori care privesc funcționalitatea (capacitatea de reflexie, rezistența termică), cît și de aplicarea corectă a tehnologiei de realizare a straturilor dielectrice.

Lentilele focalizatoare sînt intens supuse fenomenului de îmbătrînire datorită faptului că una din suprafețe se află spre zona de acțiune a metalului topit și a gazelor împrăscate de forțele termodinamice care apar în timpul prelucrării. Aspectele de deteriorare pot fi: crapături, topiri, implantarea unor particule de metal, depuneri de cenură, care depind de natura materialului de prelucrare. Experiențele au arătat că la distanța focală de 15 mm fiabilitatea lentilei a fost de 5 impulsuri, iar pentru 50 de mm de 30 pînă la 50 impulsuri (24, 153).

Pentru eliminarea erorilor sistematice ale parametrilor geometrici ai elementelor prelucrate, din acest punct de vedere, este necesară schimbarea lentilelor sau coraxului din sticlă deteriorate, după un anumit număr de impulsuri, la regim greu de lucru etc.

Soluția obișnuită de protejare a lentilelor focalizatoare este amplasarea unui ecran din sticlă de 20 x 20 mm între semisferic și lentilă, care după deteriorare poate fi schimbat, uneori la fiecare impuls.

Oglinzile de poznaș (153) îmbătrînesc datorită următoarelor fenomene: oxidarea suprafeței exterioare, formarea precipitațiilor și depunerilor în cazul folosirii racirii cu apă, carbonizarea diferitelor particule care intră în zona de lucru a capului optic. În aceste cazuri, pe suprafața reflectorului apar puncte mate sau întreaga suprafață se întuneacă. După experien-

țele efectuate, coeficientul de reflexie scade cu 10% iar energia pompată crește de 1,5 ori.

Pentru sporirea duratei de exploatare, sînt necesare: filtrarea aerului și apei necesare răcirii spațiului de lucru al capului optic, precum și o întreținere periodică deosebit de riguroasă.

Lămpile de pompaj îmbătrînesc datorită opacizării și microfisurării de pe suprafața peretelui de sticlă. În vederea menținerii energiei de pompaj sau evitării exploziei lămpilor, în toate aceste cazuri se recomandă înlocuirea acestora, conform certificatului de garanție în care se prevede numărul maxim de impulsuri (161).

3.4.3. Imprecizia reglării sistemului optic privind dimensiunile

De la o anumită dimensiune minimă a alezajelor micrometrice, reglarea sistemului optic este determinată în realizarea preciziei prelucrării. În funcție de scopul prelucrării (alezaj singular pe o piesă sau pe un lot de piese), erorile pot avea valori diferite.

În cazul alezajelor singulare, prelucrarea constă în realizarea dimensiunii finale prin impulsuri repetate de mică intensitate pentru fiecare l_1 ($l = \sum_1^n l_1$), funcție de puterea generatorului. O serie de firme străine de prestigiu (79) recomandă această metodă, care este foarte economică și de perspectivă, deoarece permite folosirea acestuia într-un larg domeniu de prelucrare cu generatoare cuantice de mică putere, cu păstrarea în timp a constantei regimului de lucru.

Prelucrarea automată se aplică la piesele multiorificii de tipul filiere, site catalizatoare, celule de memorie etc. (57), unde este impusă o precizie maximă a fiecărui alezaj, cât și a preciziei reciproce a acestora. În acest caz trebuie asigurate: poziția constantă a lentilei focalizatoare, dispozitive de centrare și poziționare, omogenitatea materialului de prelucrat, stabilitatea regimului de funcționare a generatorului cuantic.

La prelucrarea automată, precizia de prelucrare s-a realizat prin măsurarea unui număr de 5-6 piese de la începutul lotului. Erorile Δ măs, corecțiile necesare reglării instalației

Δ_{reg} și erorile medii ale alezajelor de probă Δ_{op} , stabilesc câmpul de reglare Δ_n prin relația următoare (care precizează în ce măsură mărimea fiecărei erori și eroarea totală se supun legii normale a distribuției erorilor Gauss-Laplace) (116, 153):

$$\Delta_n = \sqrt{\Delta_{op}^2 + \Delta_{m\acute{e}s}^2 + \Delta_{reg}^2} \quad (75)$$

în care Δ_{op} se exprimă prin relația

$$\Delta_{op} = \frac{\Delta_1}{\sqrt{n}}$$

unde Δ_1 - erorile datorate unor factori întâmplători, iar n - nr. piese din lot. Mărimea erorilor $\Delta_{m\acute{e}s}$ se stabilește în funcție de precizia instrumentelor de măsurare (162).

Mărimea dimensiunii de reglare, care indică și câmpul de împrăștiere a tuturor parametrilor alezajelor în raport cu câmpul de toleranță, se obține pe baza totalității acțiunii și caracterului schimbărilor erorilor de bază (vezi capitolul privind precizia de prelucrare cu fascicul laser) (154).

Dacă lipsesc erorile sistematice, mărimea diametrului de reglare corespunde mijlocului câmpului de toleranță (fig.24), aceasta mărime este notată cu M (116):

$$D_{nr} = D_M = \frac{D_{max} + D_{min}}{2}$$

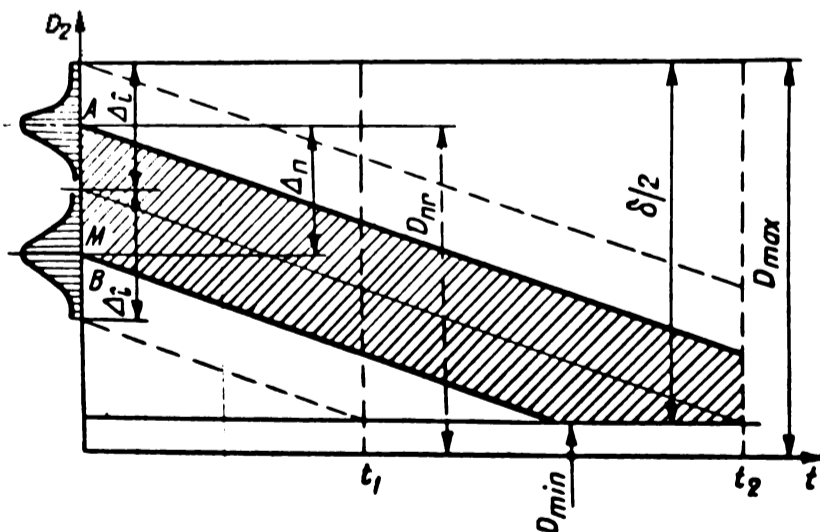
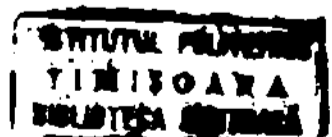


FIG.24



Însă, asupra preciziei influențează o serie de erori sistematice și întâmplătoare, a cărei poziție de grupare se stabilește prin mărimea câmpului de împrăștiere Δ_n , a căror limite sînt notate A și B. În baza analizei poziției reciproce a câmpurilor, repartizarea maximii dimensiunilor de reglare are expresia (116):

$$D_{nr} = D_{\min} + \frac{\Delta}{2} \quad (76)$$

$$\text{unde } \Delta = \sqrt{\Delta_i^2 + \Delta_n^2}.$$

Variația maximii dimensiunii de reglare D_{nr} sau a câmpului de împrăștiere a reglajului Δ_n influențează sensibil dimensiunea medie. Dacă poziția inițială corespunde lui A, timpul de prelucrare va fi t_2 , iar în punctul B va fi t_1 (mai mic) și trebuie corectată poziția focarului față de suprafața semifabricatului.

Independent de poziția petei focalizate, reglajul se mai poate realiza după mărimea petei focale față de sursa suplimentară de lumină și după mărimea petei de lumină față de semnal, în baza diferenței lungimilor de undă între semnal și pată. Această diferență determină poziții variabile ale petei focale, avînd ca efect modificarea parametrilor orificiilor (153).

În vederea stabilirii preciziei acestor metode, este necesară stabilirea neconcordanței poziției punctelor focale. Planul focal al lentilei este dat de relația (77):

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

unde n - indicele de refracție al lentilei față de cel al aerului; R_1 și R_2 - razele suprafețelor sferice ale lentilei.

Se cunoaște că lungimea de undă a radiației este pentru rubin $\lambda = 6943 \text{ \AA}$, iar pentru sticlă activată cu neodim $\lambda = 10600 \text{ \AA}$. Avînd în vedere că raza de lumină trece prin oglinzile rezonatorului, lungimea de undă a acestuia va fi de 5100 \AA la rubin și de 6700 \AA la sticlă activată cu neodim; diferența de lungime de undă este de 1843 \AA și respectiv 3900 \AA ; aceste diferențe sensibile ale lungimilor de undă modifică coeficientul de refracție sau mărimea dispersiei la $\Delta_{nr_b} = 0,0083$ și respectiv $\Delta_{nr_d} = 0,0078$ (28, 52).

Astfel, poziția focarului lentilei focalizatoare se află în O_1 (la suprafața semifabricatului), iar poziția focarului rezei de lumina în O_2 , la distanța Δf . Deci, pentru corectarea poziției este necesară deplasarea cu distanța Δf , astfel ca O_2 să cadă pe suprafața piesei (fig. 25) (153).

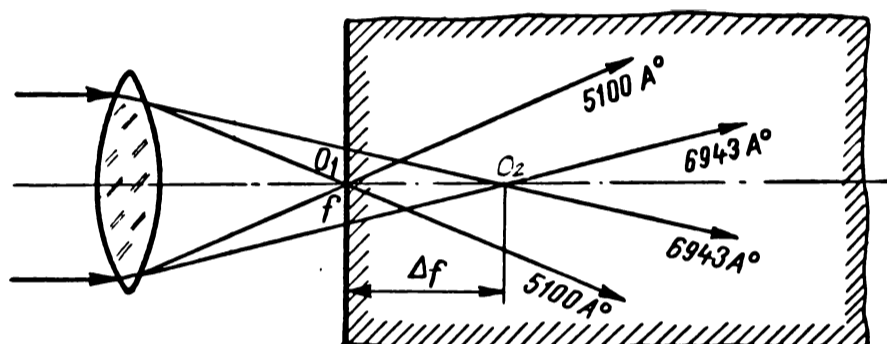


Fig.25

Din cele două metode de reglare, mai simplă este metoda sursei suplimentare de lumina, realizabilă cu o instalație optică ajutătoare de măsurare. Acest reglaj vizual constă în fixarea pe suprafața piesei a unei pete luminoase cu diametrul minim, funcție de sensibilitatea aparatului. Din datele experimentale rezultă că la materialele ceramica albă (1), ceramica cu înveliș negru (2), oțel inoxidabil cu suprafață rectificată (3) și nerecificată (4), mărimea cîmpului de dispersare a poziției focarului față de reglajul inițial este de $\pm 0,3$ mm, pentru $F = 15,5$ mm (fig.26) (116, 153). Influența acestor erori asupra adîncinii alezajelor se traduce prin scăderea acestui parametru cu 80% la ceramica albă și cu 40% la ceramica cu înveliș negru.

Metoda reglării vizuale se recomandă în cazul în care nu se pretinde o precizie foarte mare.

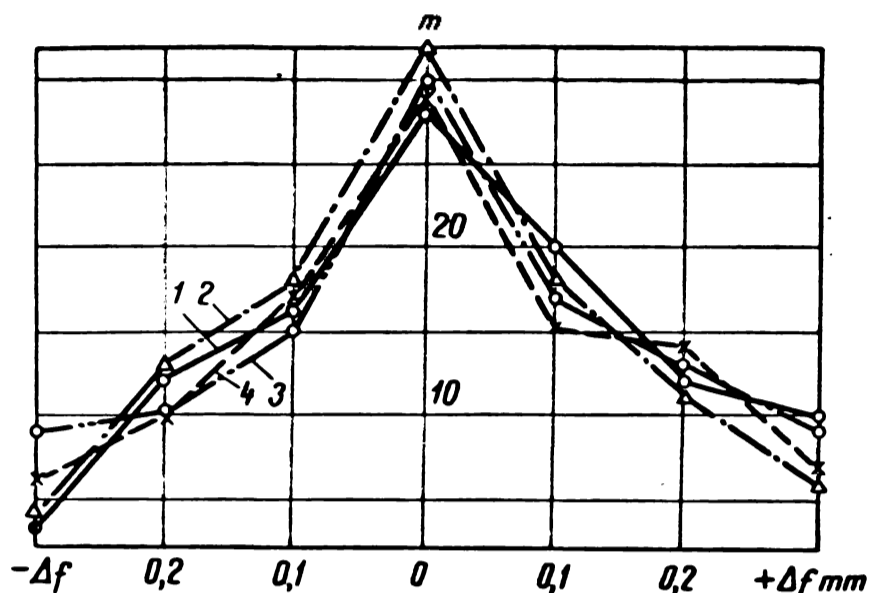


Fig. 26

3.4.4. Montarea inexactă a elementelor sistemului optic

În acest caz, erorile se referă la lungimea necesară a rezonatorului, simetria poziției rezonatorului față de axa elementului activ, paralelismul planului oglinzilor rezonatorului, paralelismul oglinzilor rezonatorului față de suprafețele frontale ale elementului activ, poziția perpendiculară a piesei față de axa optică principală a lentilei focalizatoare, putând fi împărțite în următoarele trei grupe:

3.4.4.1. Erorile datorate abaterilor de la o dimensiune a lungimii rezonatorului

Poziția oglinzilor 1 și 2 față de elementul activ este dată de marimile L , l_{p1} și l_{p2} (fig. 27 a). Din datele experimentale (19, 163), se constată că, prin mărirea lungimii L a rezonatorului, la prelucrarea oțelului inoxidabil 1X1889T (fig. 27 b și c), diametrul și adâncimeaalezajului se micșorează. Fiecare oglindă a avut o poziție optimă, astfel $l_{p1} = 120$ mm și $l_{p2} = 370$ mm. Devierea oglinzilor cu $\Delta l_{p1} = \Delta l_{p2} = 100 \mu\text{m}$ a modificat diametrulalezajului cu $0,02 \mu\text{m}$ față de dimensiunea lui nominală de 0,2 mm.

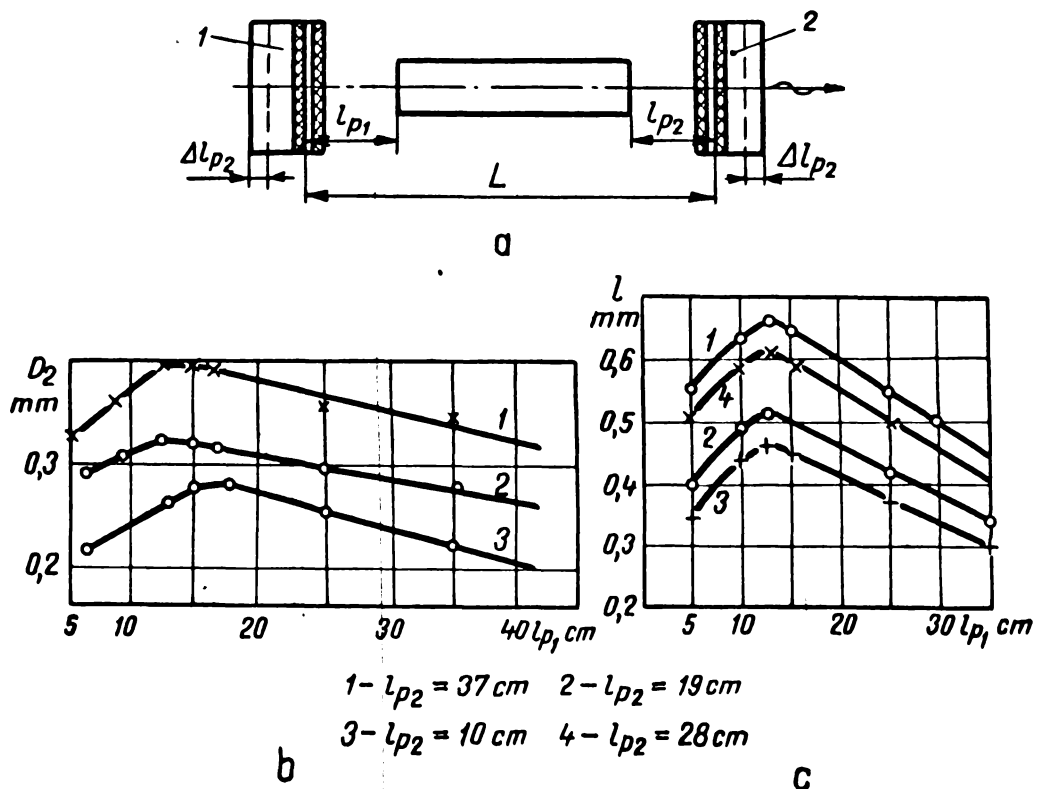


Fig. 27

Poziția optimă a oglinzilor rezonatorului, pentru fiecare sistem optic, se poate determina prin încercări repetate sau poate fi calculată pe baza condițiilor de lucru și a parametrilor constructivi, cu relația (116):

$$L = \frac{\frac{T^2 v_r \lambda}{4 \sqrt{2}} \cdot A - 1}{\frac{v_r}{s} \cdot \frac{1}{l_g}} \quad (77)$$

unde $A = \left[K_2 v^2 f(t) - p_{21} \right] - \frac{K_{opt}}{\lambda} \left[K_L v^2 f(\bar{\epsilon}_{imp}) + p_{21} \right]$;

v_r și s - viteza luminii în rubin și respectiv în vid; l_g - lungimea barei de rubin; v - tensiunea lampii de impuls; K_L - coeficientul de proporționalitate; p_{21} - posibilitatea de trecere; $f(t)$ - forma maximă normală a impulsului pomperii; $f(\bar{\epsilon}_{imp})$ - durata maximă a impulsului; λ - coeficientul de absorbție al rubinului.

3.4.4.2. Erorile datorate abaterilor de poziție ale elementelor sistemului optic față de axa elementului activ

Erorile provocate de asimetria oglinzilor sînt neglijeabile, deoarece dimensiunile oglinzilor sînt mult mai mari ca diametrul rezonatorului.

○ influența mult mai mare asupra preciziei de prelucrare a orificiilor o are devierea lentilei focalizatoare față de elementul activ, pentru care pot să apară trei situații (fig.28 a):

- axa optică principală deplasată paralel cu axa mediului activ (a_1);
- lentila se găsește sub un unghi față de axa elementului activ (a_2);
- lentila deplasează și sub un unghi (a_3).

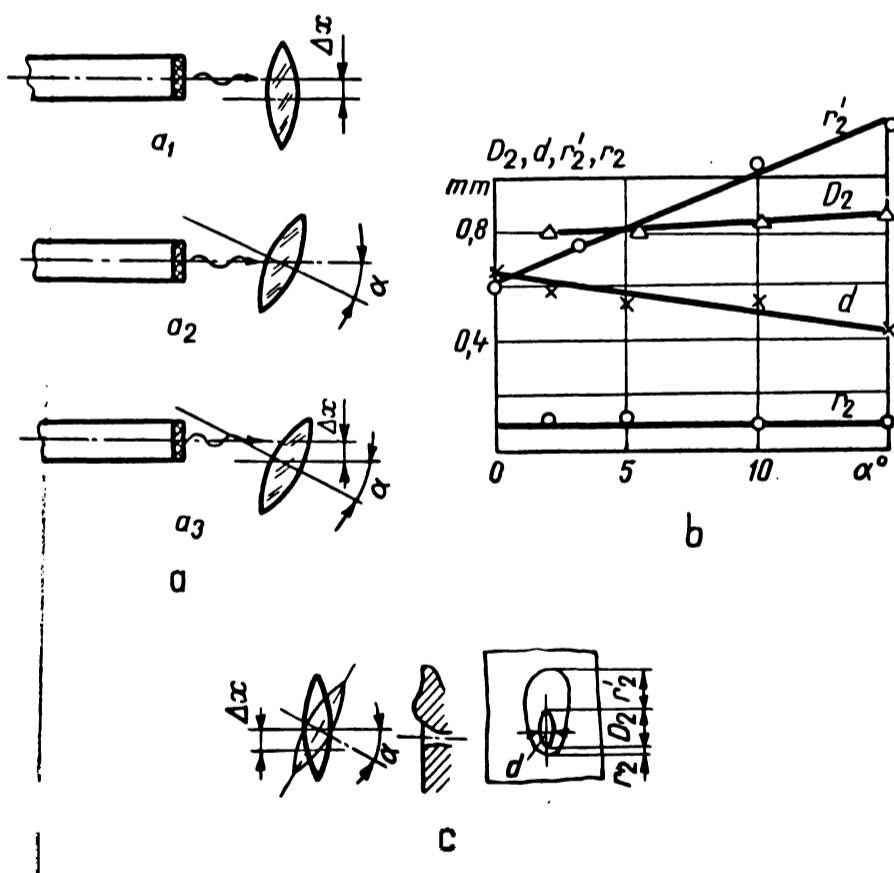


Fig.28

Aceste devieri au influențe puternice asupra formei alezajului, dîndu-i un contur eliptic în sensul deplasării. În fig. 28 b și c este reprezentată dependența parametrilor geometrici ai

orificiului față de deplasarea axei optice a lentilei (piesa - oțel 13CK35, sticlă acoperită cu neodim 15 x 240 mm, F = 45 mm). Figura exemplifică cazul cel mai nefavorabil: axa optică a lentilei este deplasată $\Delta_x = 4$ mm și sub unghi α (163), (foto 11).

Din datele obținute experimental, rezultă că mărind α de la 0 la 15° , se micșorează axa mică a orificiului eliptic (d) cu 0,2 mm și axa mare (D_2) crește cu 0,1 mm, precum și o redistribuire inegală a volumului metalului și zgurii topite de la suprafața semifabricatului (r_1 și r_2) (116), (foto 14, 15).

3.4.4.3. Erorile datorate abaterilor elementelor sistemului optic față de poziția lor reciprocă

Cauza principală este lipsa de paralelism între oglinzile rezonatorului, precum și între acestea și suprafețele frontale ale elementului activ (fig. 29 a).

Analiza detelor, în urma cercetărilor efectuate pe plăcuțe de titan tehnic pur de grosime 1,5 - 3 mm (elementul activ din sticlă dopată cu neodim 12 x 240 mm, F = 55 mm), arată că în toate cazurile posibile (fig. 29 b), odată cu mărirea unghiului de deviație a oglinzilor se schimbă cantitatea de metal scos.

În lucrarea (153) este prezentat pe larg acest aspect al erorilor de prelucrare, din care rezultă: în urma devierii oglinzilor 1 și 2 apare o importantă diminuare a adâncimii și formei orificiului; valorile optime ale parametrilor orificiului au loc nu la o poziționare perfectă a oglinzilor, ci la o oarecare deviere față de suprafețele frontale ale elementului activ; cea mai favorabilă poziție este când oglinzile sînt orientate în aceeași direcție și deviate sub același unghi; devierea oglinzilor față de poziția normală nu trebuie să fie mai mare de $30''$ (163).

La reglarea poziției reciproce a elementelor generatoarelor cuantice cu care s-au efectuat cercetările, s-a utilizat autocolimatorul AKT - 40 fără filtru de lumină (în anul 1973) precum și instalația optică suplimentară de reglare a laserului fabricat în China, de la întreprinderea de aparate electrice de măsură (IAEK) din Timișoara (în anul 1978).

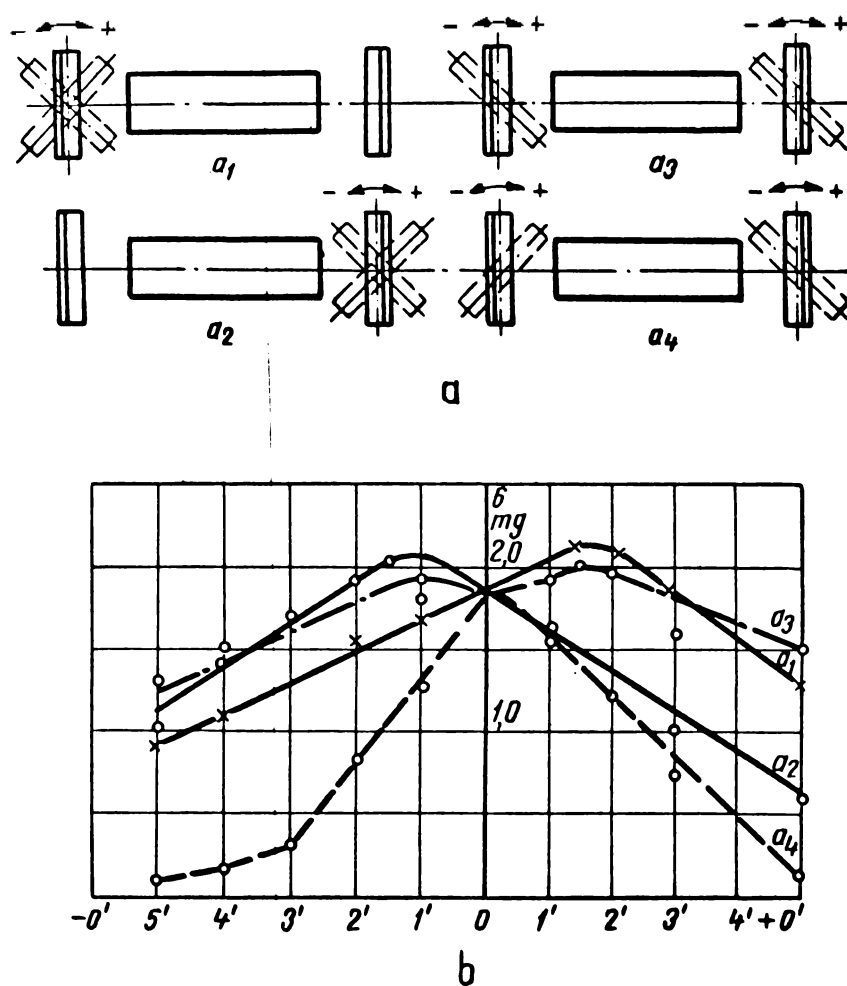


Fig.29

3.4.5. Fenomenele termice

În timpul funcționării, elementul activ este partea cea mai solicitată la acțiunile termice din partea lampii de pompaj. Regimul termic al elementului activ depinde de parametrii constructivi: sistemul de răcire, viteza agentului de răcire, puterea de pompaj etc.

În vederea stabilirii erorilor create de acțiunea termică - erori ce au un caracter sistematic - s-a făcut următoarea analiză a variației parametrilor energetici ai generatorului cuantic. Se cunoaște (44) că temperatura T_E în cristale poate fi exprimată prin parametri termici:

$$T_E = T_C + \Delta T_n + \Delta T_p \quad (78)$$

unde T_c - temperatura mediului ambiant; $\Delta T_n = \frac{q_1 r_E}{2q_2}$ - creșterea temperaturii pe suprafața cristalului; $\Delta T_p = q_1 \frac{r_E - r'_E}{4}$ - creșterea temperaturii pe secțiunea coaxială cu raza r'_E ; q_1 - coeficientul de degajare de căldură al cristalului; q_2 - coeficientul de cedare de căldură al cristalului.

Din relația de mai sus rezultă că ΔT_n este dependent de q_1 și q_2 , adică de parametrii constructivi, de sistemele de răcire și de pompaj, de calitatea reflectorului.

Mărimile proceselor termice din interiorul elementului activ este determinată de regimul de lucru al generatorului. Sursele cuantice din industrie, utilizate la găurire, lucrează prin impulsuri sau periodic.

La regimul prin impuls, frecvența impulsurilor este determinată de intervalele de timp t_1 , t_2 etc. în acest caz, la anumite valori ale lui t , poate fi menținută o temperatură constantă a elementului activ (fig. 30 a) sau primește o ușoară creștere ΔT_E , după fiecare impuls (fig. 30 b) (116, 153).

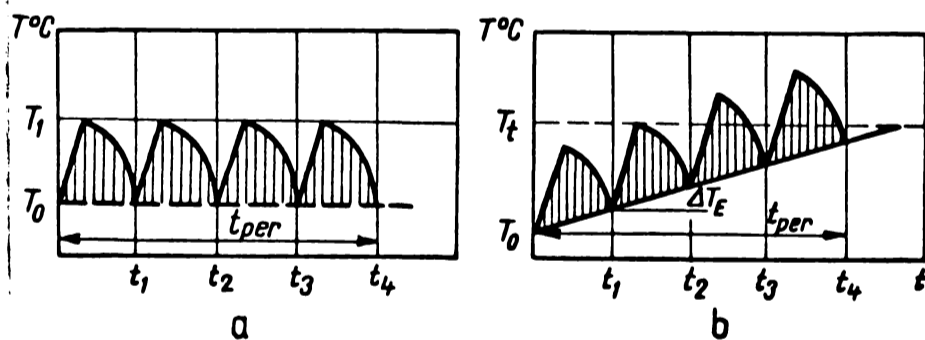


Fig. 30

În cazul regimului periodic al generatorului, regimul termic al elementului activ se stabilește pe durata perioadei de lucru (t_{per}) a generatorului și frecvența impulsurilor. La o mare frecvență, temperatura în cristal se schimbă brusc de la un impuls la altul (fig. 30 b). Diferența de temperatură în cristal $T_t - T_0$ se stabilește în funcție de diametrul elementului activ, eficiența sistemului de pompaj și degajarea de căldură în timpul pompajului. Dacă frecvența impulsurilor nu este mare, putem folosi un sistem de răcire la care temperatura ele-

mentului activ se va menține la temperatura agentului de răcire (fig. 30 a).

În cazul tuturor celorlalte regimuri de lucru, radiație termică a lămpilor de pompaj determină scăderea eficienței energetice a generatorului cuantic.

În fig. 31 a sînt date dependențele schimbării energiei finale a radiației față de maximele pompajului, funcție de temperatura rubinului (44).

Datele experimentale obținute, în cazul folosirii sticlei dopată cu neodim, au arătat că la creșterea temperaturii, ca și în cristalele de rubin, se produc schimbări mari ale energiei finale de radiație și ale procesului de generare (fig. 31 b).

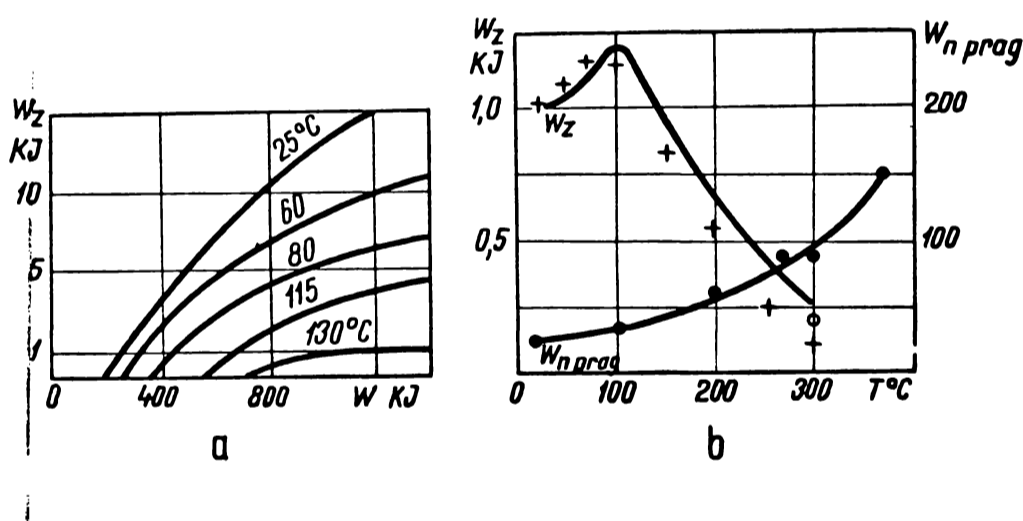


Fig. 31

Din cercetările experimentale rezultă că regimul termic influențează parametrii geometrici, dependent de felul materialului prelucrat. În cazul oțelului schimbările sînt mai mici decît în cazul ceramicii. Acest lucru se explică, eventual, prin diferența caracteristicilor termofizice ale acestor materiale. În fig. 32 a, se poate urmări caracterul variației dimensiunilor alezajelor, dependent de temperatură, pe baza diagramei de precizie.

În cazul în care regimul termic al elementului activ este stabil, dimensiunile parametrilor alezajelor sînt plasate paralel cu axa abscisei. Marimea cîmpului de dispersare la începutul prelucrării (ΔP_n) și la sfîrșit (ΔP_k) rămîne constantă.

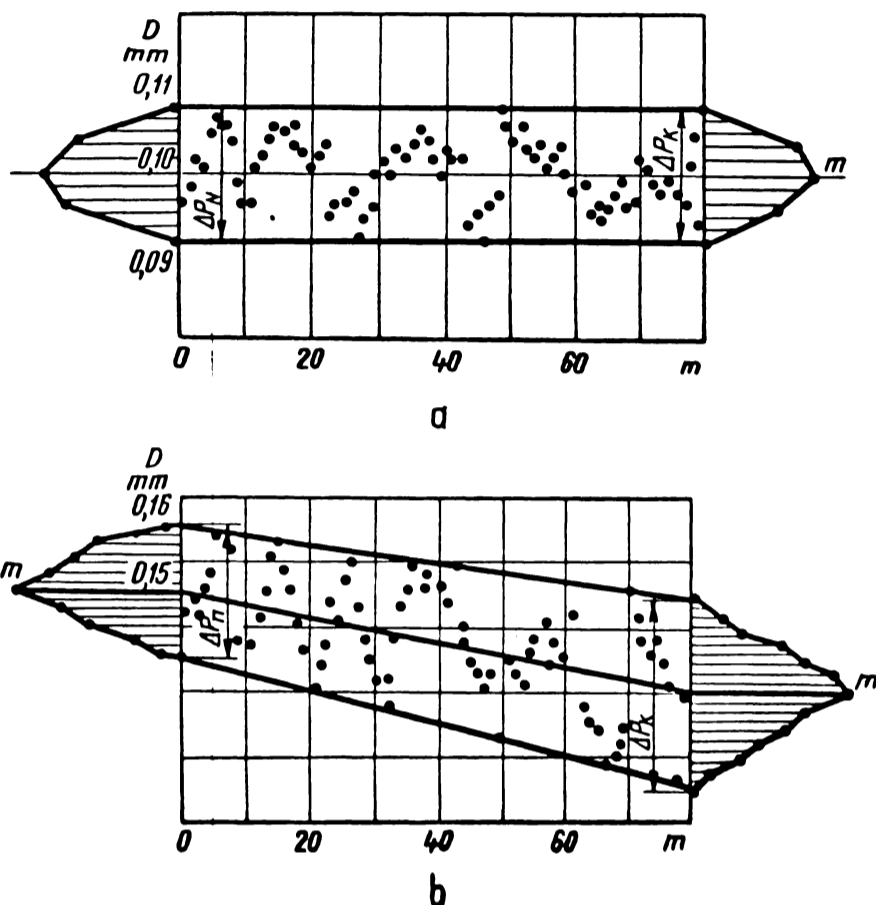


Fig. 32

Când temperatura elementului activ crește, linia care urește dimensiunile diametrelor formează un unghi cu axa absciselor (fig. 32 b), unghi care depinde de materialul elementului activ și al semifabricatului. Panta cea mai mică o au semifabricatele cu coeficient mare de conductibilitate, iar cea mai mare pantă, cele cu coeficient mic de conductibilitate termică.

În plus, acțiunea termică a lampilor de încălzire, asupra elementului activ, determină și schimbarea câmpului de dispersare a dimensiunilor. Intervalul dispersării este mai mic la începutul prelucrării decât la sfârșit ($\Delta P_N \neq \Delta P_K$ - fig. 32 b). La oțelul inoxidabil 13Cr35, diferența $\Delta P_K - \Delta P_N = 10 \mu m$, pentru diametrul nominal de $150 \mu m$ (116, 153).

3.4.6. Instabilitatea pompajului optic

Această cauză a erorilor de prelucrare este dependentă de o serie de parametri ai generatorului cuantic (valoarea energiei electronilor lămpilor, caracteristicile acestora, eficiența reflectoarelor). Marimea pompajului optic este un parametru de bază în vederea determinării energiei semnalului și parametrilor geometrici ai orificiilor prelucrate.

Acupra preciziei de prelucrare o mare influență o exercită și menținerea la valoare constantă a tensiunii de alimentare. În majoritatea cazurilor, s-a făcut vizual cu un voltmetru de tipul C-96, cu o precizie de măsurare de 2%.

Din experiențele efectuate pe Titan tehnic pur, a rezultat că marimea câmpului de dispersare a diametrului orificiului D_2 , pentru dimensiunea nominală de 0,1 mm este de $3\mu\text{m}$, iar pentru adâncimea la dimensiunea nominală de 3 mm, este de $10\mu\text{m}$ (153).

3.4.7. Fixarea incorectă a semifabricatului

Instalațiile utilizate sînt prevăzute cu un dispozitiv care permite centrarea exactă a suprafeței de bazare. Însă, uneori aceste poste au o poziție incorectă, datorită următoarelor cauze: forma neregulată a suprafețelor de bazare, departarea suprafeței de bazare de suprafața de reazem a dispozitivului cauzată de acționare incorectă a sistemului de strîngere, neparalelismul între suprafața de bazare și suprafața în contact cu fascicoul laser.

Descentrarea piesei, la fixarea în dispozitiv, poate avea loc cu păstrarea perpendicularității suprafeței piesei față de axa optică a lentilei focalizatoare (fig. 33 a₁) sau cu înclinarea piesei (fig. 33 a₂).

Înclinarea pieselor în dispozitive față de poziția nominală este cauzată, de obicei, de fixarea incorectă a acestora sau de abaterea de la poziția reciprocă a suprafeței de prelucrat în raport cu cea de bazare.

În funcție de translația piesei, focarul lentilei poate ocupa una din cele trei poziții (fig. 33 b).

Marimea deviației piesei în raport cu poziția de reglare poate amplifica modificările parametrilor geometrici ai orificiilor prelucrate, în funcție de distanța focală, calitatea învelișului și natura semifabricatului.

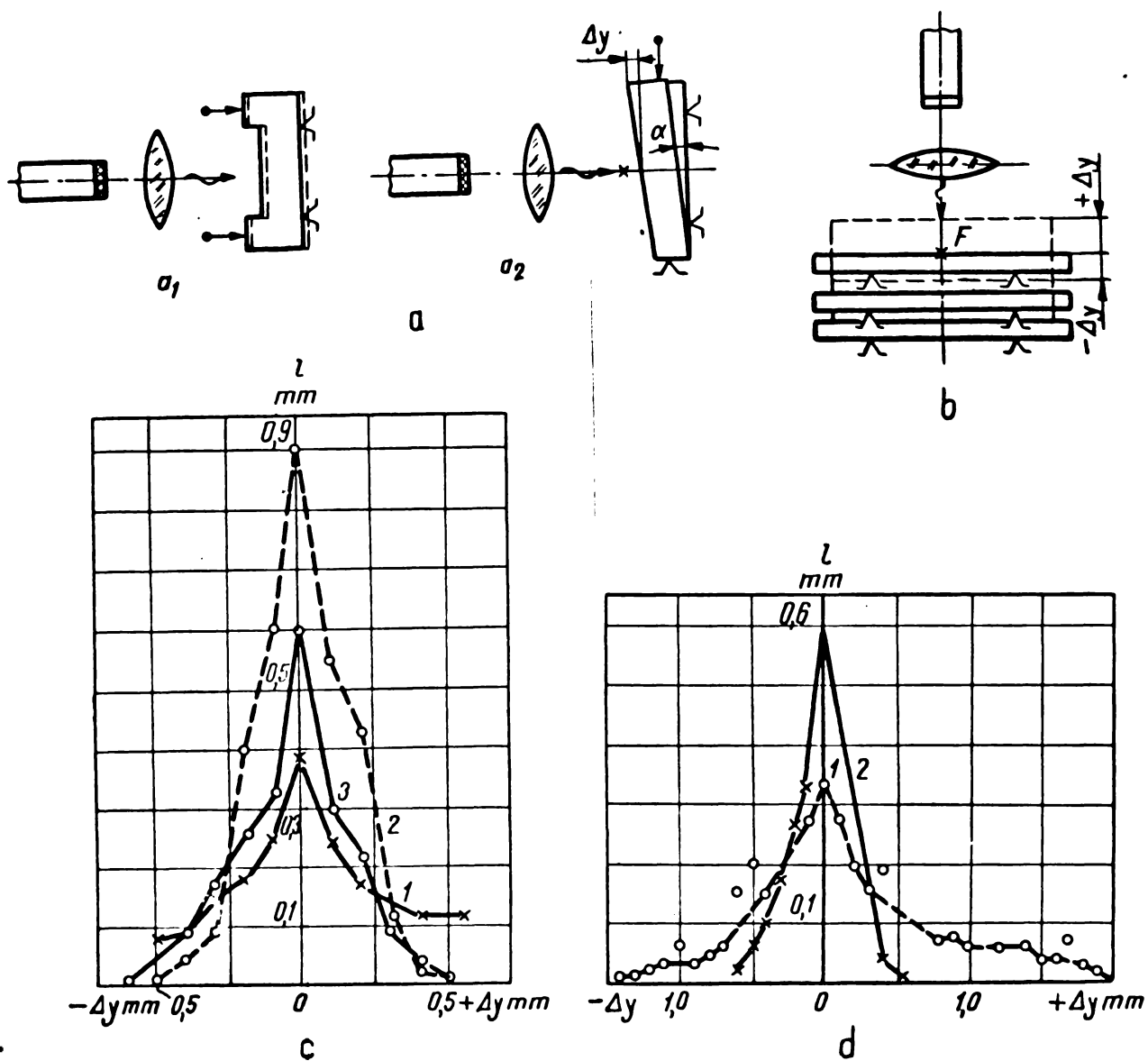


Fig. 33

In fig. 33 c, este reprezentată dependența schimbării adâncimii alezajului (oțel inoxidabil 13Cr35), față de translația piesei în sens pozitiv sau negativ, la distanțe diferite de focalizare (1 - $F = 15,5$ mm; 2 - $F = 36$ mm; 3 - $F = 20$ mm; rubin 12×240 mm). S-a constatat că, pentru distanțe focale mari, adâncimea este sensibil influențată. Astfel, la translația piesei cu $0,2$ mm, la $F = 36$ mm, se schimbă adâncimea alezajului cu 50%, în timp ce pentru $F = 15,5$ mm, alezajul nu se formează de loc (153). De asemenea, calitatea și natura învelișului semifabricatului (fig. 33 d) influențează astfel: la translația

piesei cu 0,2 mm (la ceramica Cezarom 10 fara înveliș ajutător) se micșorează adâncimea cu 50%; cu înveliș grafitat (2), numai cu 25%. Acest lucru se explica prin schimbările în capacitățile de reflexie și absorbție a suprafeței piesei. Rezultă că este necesar un înveliș ajutător cu o capacitate mică de reflexie (153).

În cazul în care piesa este rotită față de axa principală a lentilei sub un unghi α , eroarea de bază va fi forma eliptică a alezajului, cu axa mare orientată în direcția devierii piesei. În fig. 34, este prezentată dependența parametrilor orificiului față de unghiul de deviere al lentilei (oțel inoxidabil 13Cr35, sticlă dopată cu neodim 13 x 240 mm, $F = 45$ mm, energia de pompaj 20 kJ (116, 153). Se constată că la devierea piesei, axa mică a orificiului eliptic rămâne practic constantă, în schimb variază axa mare. În plus, apare o ușoară micșorare a adâncinii alezajului și o redistribuire inegală, la suprafața, a materialului (foto 6,17) evacuat.

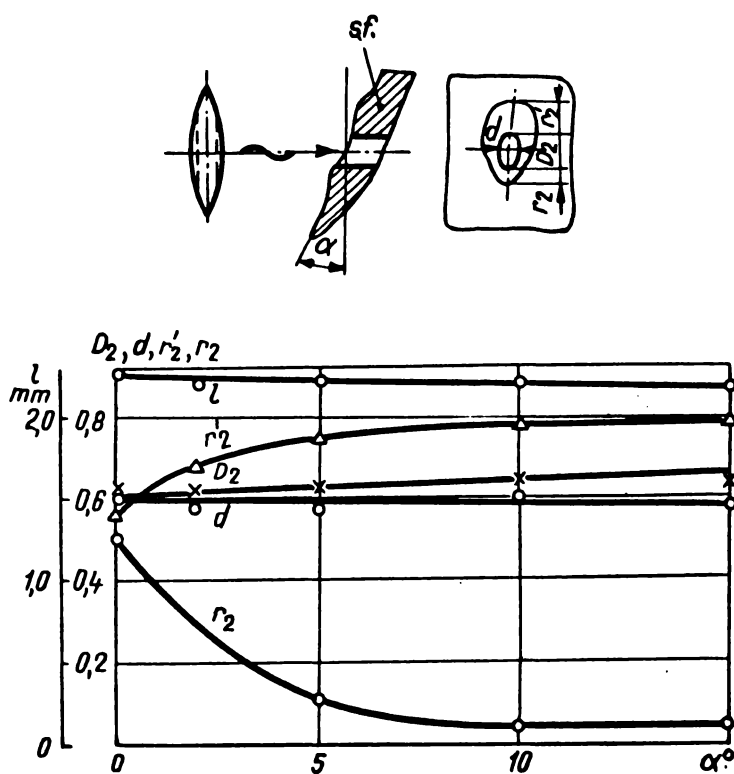


Fig. 34

3.4.8. Regimul nestaționar al radiației generatorului cuantic

Erorile de prelucrare a orificiilor, cauzate de regimul nestaționar al radiației generatorului cuantic, sînt determinate

de regimul de saturație al funcționării generatorului, precum și de caracterul nestaționar al pompezului optic.

Regimul nestaționar al generării se referă asupra intensității dezvoltării fazelor procesului de interacțiune, cu efecte negative asupra parametrilor geometrici ai alezajelor prelucrate. Volumul total al materialului scos printr-un singur impuls al generatorului, depinde de mărimea energiei de radiație W_g . Mărimea energiei generatorului se compune din totalul energiilor dezvoltate în fiecare moment de vîrf (saturație) $W_g \approx \sum W_{\text{mom. vîrf}}$

Avînd în vedere că fiecare moment de vîrf (la care are loc impulsul) posedă o oarecare energie luminosă, capabilă să topescă și să îndepărteze un anumit volum de material, într-o primă aproximație putem spune că adîncimea totală a orificiului se compune din suma adîncimilor separate obținute sub acțiunea fiecărui moment de vîrf.

Caracterul schimbător al regimului lampilor de pompaj optic este demonstrat în fig. 35 a, unde, pe axa verticală sînt date valorile intensității radiației lampilor în unitați relative, iar pe axa orizontală - durata radiației în μs . Parametrii orificiilor vor avea cea mai mare valoare în perioada egală cu $0,6 - 0,8 \mu s$. Înă schimbarea parametrilor geometrici ai alezajului are loc în mod inegal. În unele momente, adîncimea și diametrul orificiilor scad, apoi cresc din nou. Acest lucru se vede clar în fig. 35 b (24), unde este redată secțiunea longitudinală a urmei obținute prin interacțiunea razei laser cu piess în mișcare (aleză L62, neodim 15 x 240 mm, 20 kJ, $v=30$ m/s).

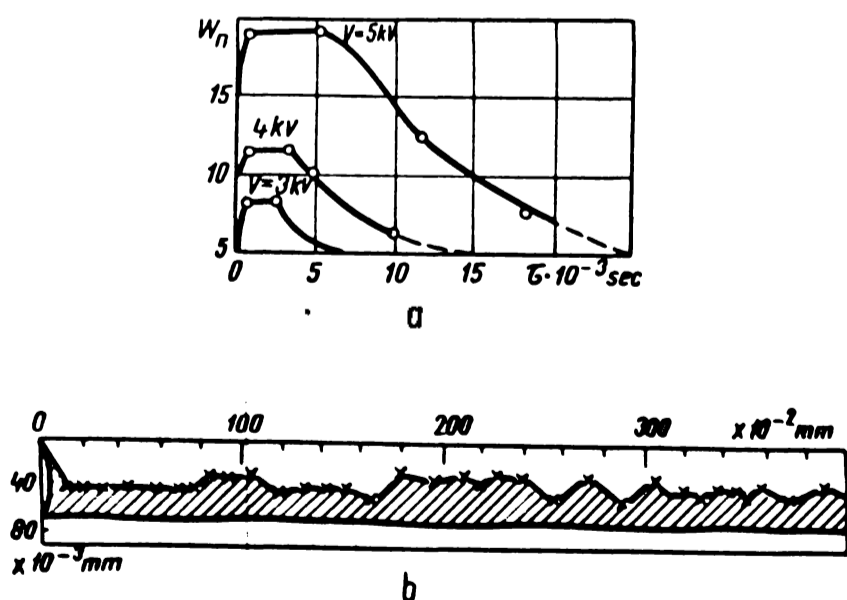
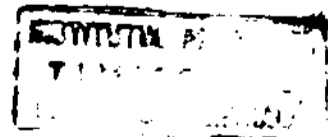


Fig. 35



Curba repartiției adâncimii orificiului, în procesul de reglare a generatorului cuantic, este arată în fig. 36 a. Valoarea medie a adâncimii scobiturii este egală cu $29,7 \cdot 10^{-3}$ mm, la numărul total al momentelor de vîrf (saturație) $n = 310$. Heterogenitatea parametrilor scobiturilor poate fi explicată prin neregularitatea duratei momentului de vîrf. Curba de repartiție a duratei momentelor de vîrf pentru rubin este dată în fig. 36 b. Valoarea medie a duratei momentelor de vîrf, într-un singur impuls de generare, este $6,66 \cdot 10^{-6}$ s, numărul total al momentelor de vîrf fiind $n=86$.

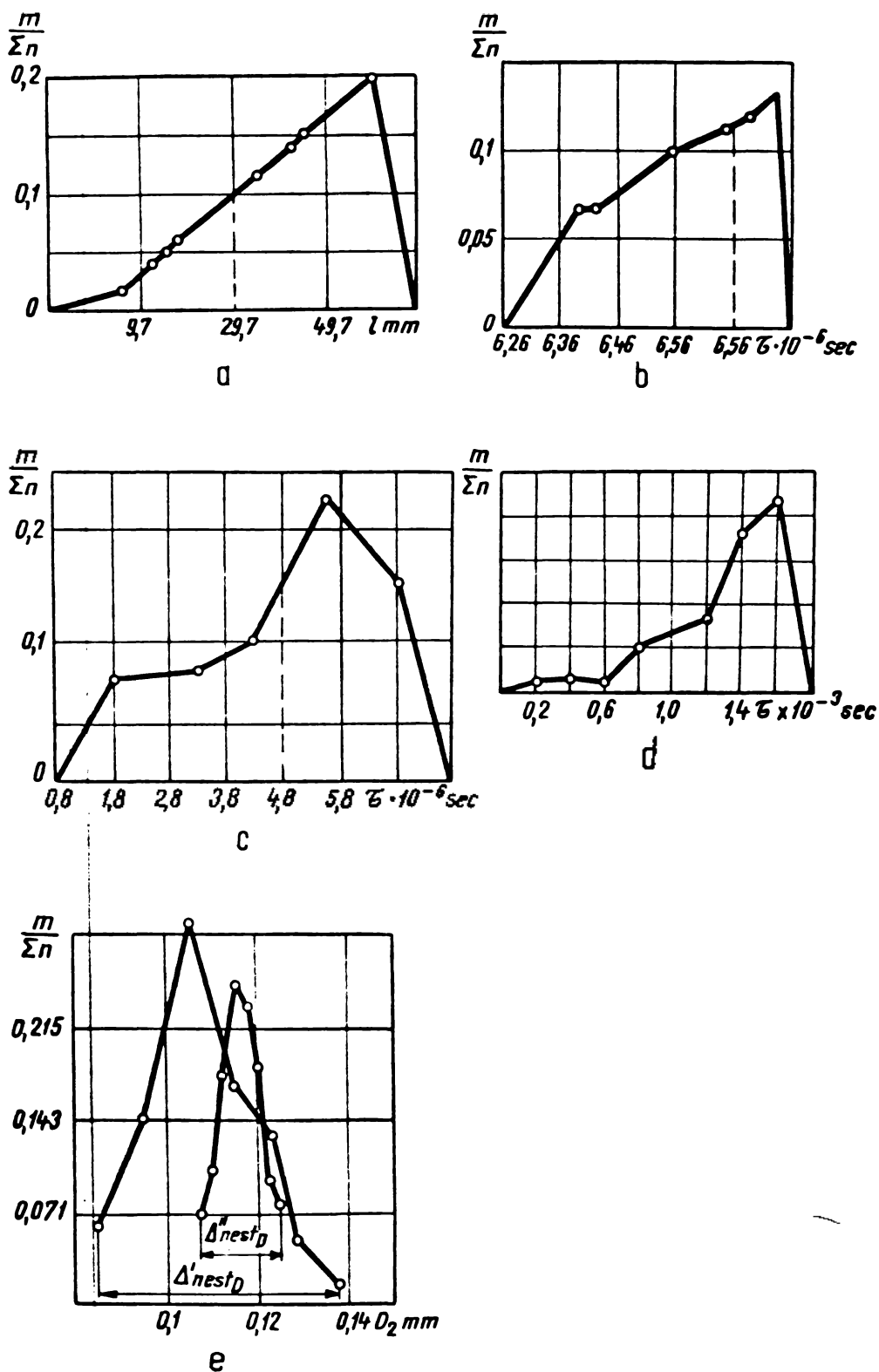


Fig. 36

Fiindcă pompezul nu este staționar, intensitatea momentelor de vîrf scade, intervalul între momentele de vîrf începe să crească, ceea ce se caracterizează prin încetarea scosterii materialului din semifabricat. Curba repartizării duratei intervalelor este dată în fig. 36 c. Valoarea medie a duratei intervalelor este $4,8 \cdot 10^{-6}$ s, numărul total al intervalelor fiind $n = 58$. Diagrama repartizării intervalelor, în cazul rubinului (fig. 36 d), arată că durata intervalului a crescut brusc în perioade 1,2 - 1,6 μ s după începutul radiației (116).

La baza cauzelor apariției momentelor de vîrf stau fenomene fizice complexe ce au loc în elementul activ și în rezonator sub acțiunea pompezului optic (27). Numărul momentelor de vîrf este o mărime variabilă fiind subordonată legii repartizării normale a erozilor. În consecință, tot acestei legi trebuie să-i fie subordonați și parametrii geometrici ai orificiilor prelucrate, determinați de caracteristicile energetice ale momentelor de vîrf și de caracterul nestaționar al pompezului optic. Caracterul repartizării în fiecare impuls luminos se definește prin totalitatea acțiunii factorilor suplimentari, cum sînt: neomogenitatea elementului activ, temperatura mediului ambiant etc.

Fig. 36 e prezintă curbele de variație ale repartizării diametrelor alezajelor la oțel inoxidabil. Rezultă că mărimea cimpului de dispersare a diametrelor orificiilor, determinată de regimul nestaționar al prelucrării, poate să se schimbe de la 20 pînă la 50 μ m, dependent de elementul activ folosit (163).

Avînd în vedere ca această eroare, dependentă de regimul nestaționar al pompezului, este mai complexă decît se pare, valorii ei poate fi stabilită numai pe baza unor cercetări experimentale laborioase.

3.5. Contribuția la stabilirea limitelor preciziei dimensionale a alezajelor micrometrice prelucrate cu fascicul laser

La stabilirea eficienței procesului tehnologic, factorul de bază îl reprezintă precizia de prelucrare pentru care în prezentul capitol, din lipsa de rezultate concludente, ne rezumăm doar la precizia dimensională a alezajelor realizate cu fascicul laser.

Din cercetarile experimentale efectuate s-a constatat că precizia obținută, față de precizia impusă prelucrării, este determinată de caracteristicile, starea și interdependența elementelor componente ale generatorului cuantic, precum și de metoda tehnologică utilizată (153).

În cazul prelucrării alezajelor izolate, unde criteriul de bază este cantitatea de metal eliminată la un singur impuls, am constatat că, alezînd un regim corespunzător, se obține o clasă de precizie (după ISO) între IT6 și IT9 (tabelul 14). Aceasta este posibilă în cazul cînd la fiecare orificiu se reglează instalația în vederea eliminării erorilor de bază.

La prelucrarea automată, criteriul de bază este suma marimilor erorilor $\Delta\Sigma$ cauzate de factori tehnologici.

În ambele cazuri, condiția de bază, pentru obținerea preciziei programate, este inegalitatea între cîmpul de toleranță realizat ($\Delta\Sigma$) și cel programat (δ): $\Delta\Sigma < \delta$.

3.5.1. Precizia dimensională a diametrelor

Cîmpul de dispersare a erorilor diametrelor se determină cu relația (116).

$$\Delta\Sigma_D = \Delta T_D + \Delta \text{îmb}_D + \sqrt{\Delta_{\text{nest}_D}^2} + \Delta n_D \quad (79)$$

unde termenii reprezintă cîmpul de dispersare a erorilor datorate: ΔT - fenomenelor termice; $\Delta \text{îmb}$ - îmbătrînirii elementului activ; Δ_{nest} - regimului nestabil al generatorului; Δn - ne-reglarea dimensiunilor sistemului optic.

ΔT_D - stabilit cu ajutorul "diagramelor punctate", este diferența între diametrele maxime și minime $\Delta T = D_{\text{max}} - D_{\text{min}} = A_s - A_i$. (În fig. 37, este reprezentată variația diametrului funcție de numărul de piese punctate). În urma experimentarilor pe oțel inoxidabil 13Cr35, elementul activ - sticlă dopată cu neodim, la 20-25° C $\Delta T_D = 0$, la 30-50° C $\Delta T_D = 80 \mu\text{m}$, la 50-70° C $\Delta T_D = 20 \mu\text{m}$ (fig. 38). Și în cazul elementului activ cu rubin $\Delta T_D = 0$, dacă se asigură o temperatură constantă, iar la regimuri ridicate de temperatură $\Delta T_D = 150 \mu\text{m}$ (154).

$\Delta \text{îmb}_D$ - este stabilit de asemenea prin diagramele punctate; dacă se schimbă coeficientul de reflexie al oglinzii datorită îmbătrînirii de la 100% la 25%, $\Delta \text{îmb}_D = 300 \mu\text{m}$ la prelucrarea materialului CeSaron 10. La aceeași piesă, însă, fără schimb-

barea ecranului de protecție $\Delta \text{imb}_D = 20 \mu\text{m}$. Odată cu apariția crăpăturilor $\Delta \text{imb}_D = 350 \mu\text{m}$ (154).

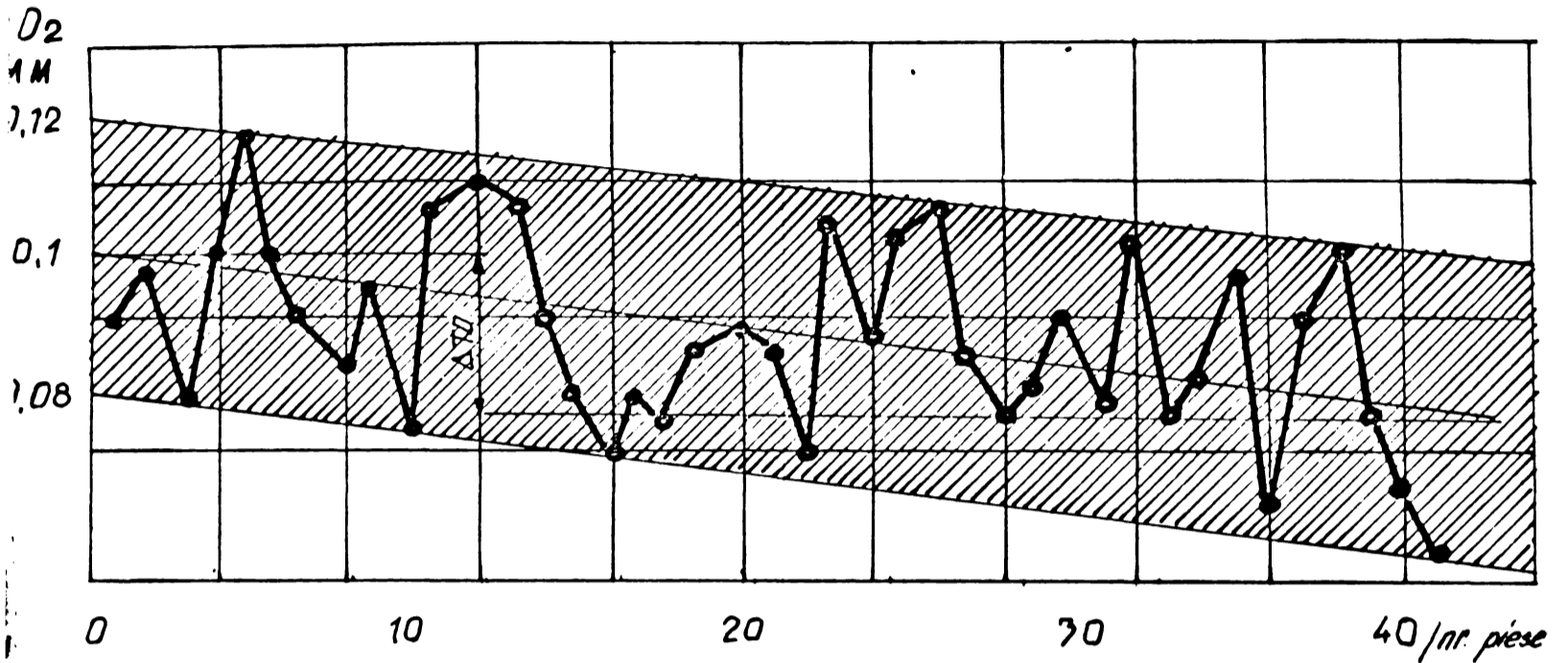


Fig. 37

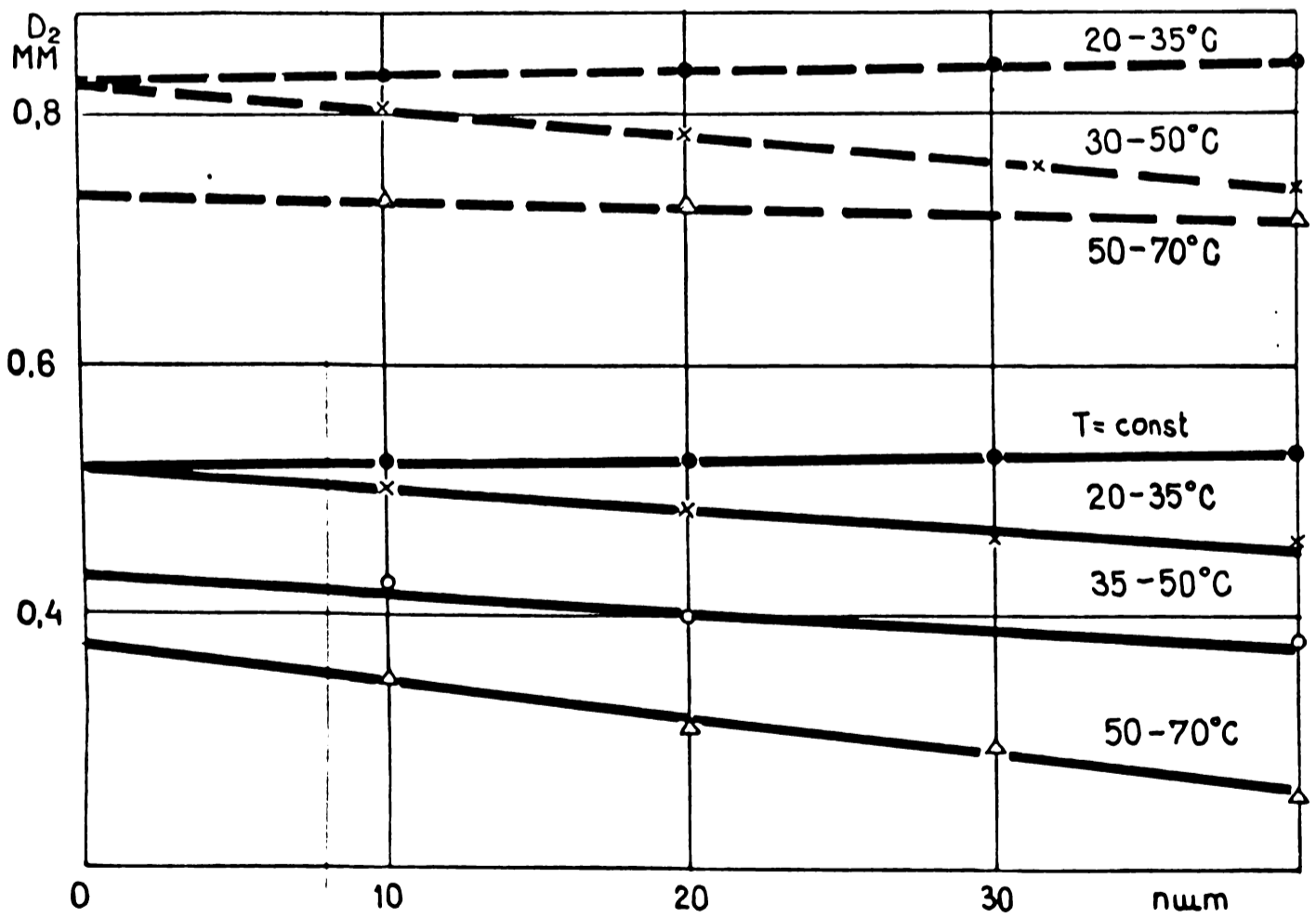


Fig. 38

Δ_{nest_D} - este datorat fenomenelor fizice complexe din elementul activ; erorile sînt subordonate legii repartișării normale Gauss-Laplace (116):

$$J = f(x) = \frac{1}{\sqrt{\sqrt{2\pi}}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (80)$$

unde: J - ordonate, x - devierea de la axa de grupare; σ - devierea medie patratice.

Din încercările efectuate pe diverse materiale, cîmpul de dispersare $\Delta_{nest_D} = 5 - 30 \mu m$ (154).

Δ_{n_D} - este reprezentat în fig.24 pe ordonata iar pe abscisă caracteristicile de timp. Analizînd diagramele 32 a și b, constatăm că $\Delta_{n_D} = 45 \mu m$ și corespunde clasei de precizie IT10.

3.5.2. Precizia dimensională a adîncimilor

Cîmpul de dispersare a erorilor adîncimii orificiilor se determină cu o relație identică (79), unde (tabelul 15):

ΔT_1 - variază dependent de natura elementului activ (fig.39); la sticla dopată cu neodim, oțel 13CE35, temperatură 20-32°C, $\Delta T_1 = 0$; la 30-40°C, $\Delta T_1 = 200 \mu m$; la 40-50°C și 50-70°C, ΔT_1 scade la 100 μm și, respectiv, la 50 μm . În cazul rubinului, la temperatură constantă $\Delta T_1 = 0$, iar la schimbări de temperatură sensibile ΔT_1 poate să atingă valoarea de 1000 μm .

Δ_{imb_1} - din datele experimentale rezultă că, la prelucrarea ceramicii, $\Delta_{imb_1} = 800 \mu m$. Pe același material, fără ecran de protecție, $\Delta_{imb_1} = 100 \mu m$. La apariția crăpaturilor, $\Delta_{imb_1} = 630 \mu m$.

Δ_{nest_1} - stabilit prin diagrama punctată, are valori cuprinse între 5 și 25 μm .

Δ_{n_1} - e o mărime cuprinsă între 5 și 40 μm .

Din tabelurile 14, 15 și 16, stabilite în mod experimental, rezultă:

- la prelucrarea individuală, cu reglarea la fiecare impuls pentru același alezaj, cîmpurile de dispersare a erorilor se află între limitele enunțate de literatura de specialitate (32, 78, 98, 116), adică IT6 și IT8 pentru diametre și IT7 și IT9 pentru adîncimi;

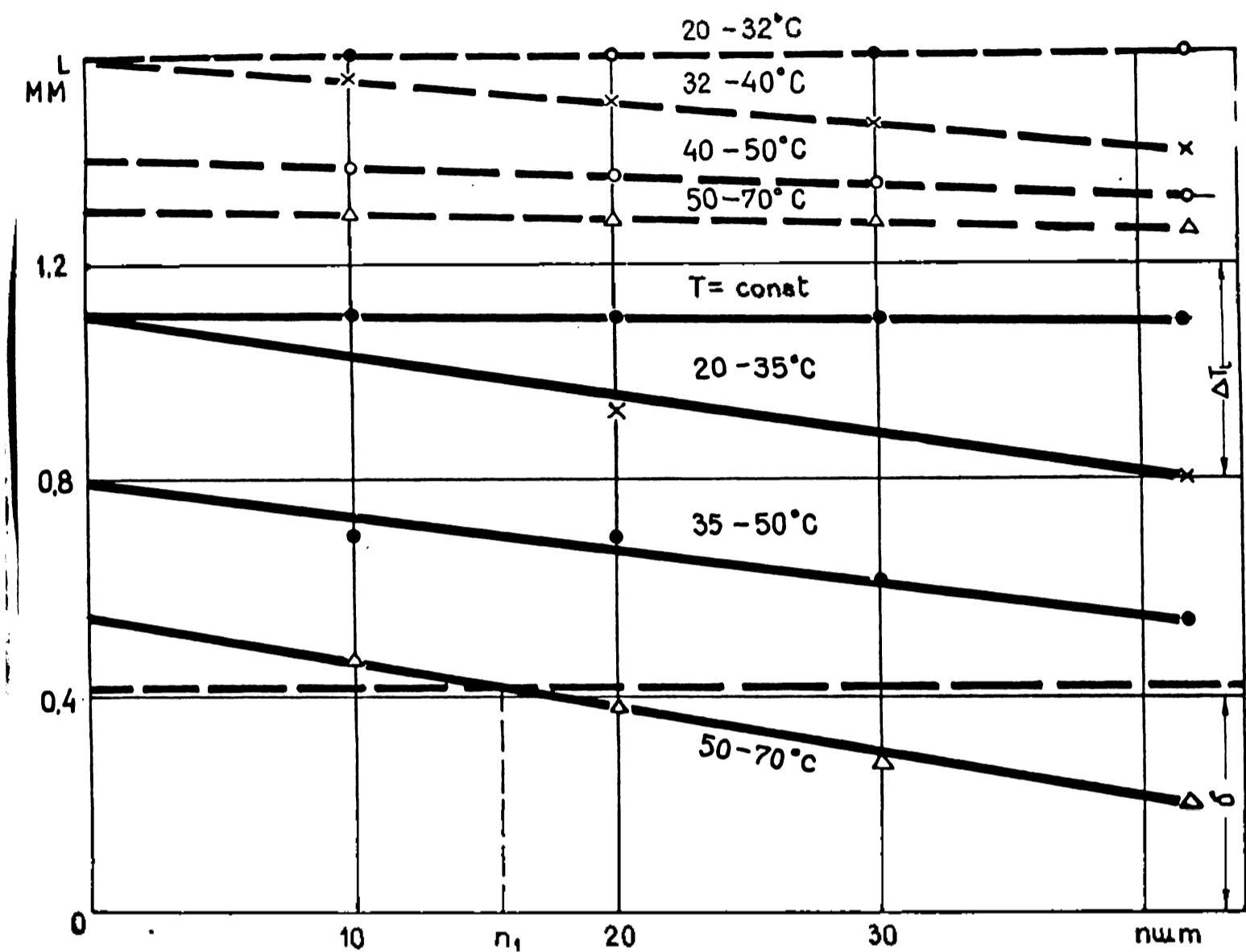


Fig. 39

- la prelucrarea automată (cazurile experimentate: un singur impuls și energie sporită a semnalului sau mai multe impulsuri pe același alezaj și fără reglarea la fiecare impuls), precizia dimensională este diminuată, pentru diametre între IT8 și IT12, iar pentru lungimi între IT9 și IT12;

- pentru titan tehnic pur, s-a obținut un câmp, relativ îngust, al dispersării erorilor de prelucrare IT6 - IT7, datorită repartițiilor termofizice adecvate aceluia procedeu, pe de o parte, iar pe de alta parte, datorită acumulării unei anumite experiențe în prelucrarea acestui metal, (foto 30).

Pe baza de rezultatele obținute până acum, în ceea ce privește precizia dimensională, fasciculul laser concentrat poate fi utilizat numai la perforarea (degrozarea) alezajelor.

Prin finisarea cu abraziv adecvat (praf de diamant, carbura metalică etc.) sau folosind alte căi de epurare a preciziei dimensionale, pot fi obținute clase de precizie cuprinse între IT3 și IT4 sau chiar mai înalte în cazul finisării cu ultrasunete (116, 148, 154).

Tabelul 14

**Prelucrarea individuală a alezajelor
cu fascicul laser**

Materialul prelucrat	diametru		adâncime	
	ΔD (μm)	clase de precizie (după ISO)	Δ_1 (μm)	clase de precizie (după ISO)
Cesaron 10	16	8	29	9
13C35	12	7	16	8
Titan teacă pur	7	6	11	7
Cupru	17	8	28	9

Tabela 15

Preluarea automată a alezajelor cu fascicul laser

Materialul prelucrat	ΔT		Δ_{imb}		Δ_{nest}		ΔD		$\Delta \Sigma$		Clasa de precizie după ISO	
	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I
Ceară 10	10-20	10-20	30-40	30-50	20	10-20	20	20-30	20	60-100	60-100	IT11-IT12
13GN35	5-10	10 ¹⁾	5-10	8-15	5-10	8-10	5	5-10	5	17-34	24-36	IT8 -IT10 IT9 -IT10
Titan tehn.pur	5	8-10	5-8	5-10	5	5	6	5-8	5-8	18-21	21-30	IT8 -IT9 IT9 -IT10
Curpu	10	15	20-30	30-50	20-30	15-25	20-30	20-40	58-82	70-112	IT11-IT12	IT11-IT12

1) oripatură $\Delta T_1 = 1000$

Tabelul 16

Toleranțele furcamentale, până la ϕ 3 mm

Clase de precizie	IT01	IT02	IT03	IT04	IT05	IT06	IT07	IT08	IT09	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16			
	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	100	140	250	400	600	
După ISO																			
Cesărom 10	μm																		
	Individuală	Δ						X											
Cesărom 10	Auto-metă	$\Sigma\Delta$											0	0					
		$\Sigma\Delta$											0	0					
13CN35	Individuală	Δ							X										
	Auto-metă	$\Sigma\Delta$																	
Litentehnpuz	Individuală	Δ																	
	Auto-metă	$\Sigma\Delta$																	
Cupru	Individuală	Δ																	
	Auto-metă	$\Sigma\Delta$																	
		$\Sigma\Delta$																	

3.6. Relativ la caracteristicile fizico-mecanice ale stratului de pe suprafața peretelui alezajului prelucrat cu fasciculul laser

Menționăm că acest aspect nu a fost aprofundat datorită largimii deosebite a domeniului abordat, dar că acest capitol poate fi considerat ca o modestă contribuție prin culegerea, sistematizarea și interpretarea datelor bibliografice în concordanță cu aspectele conexe ale experimenturilor consemnate în capitolele precedente.

Cu ocazia studierii procesului interacțiunii dintre fasciculul laser concentrat și o serie de materiale, a rezultat că eliminarea metalului topit și a gazelor, din zona prelucrării, are loc sub acțiunea forțelor termodinamice (capit. 3.1) unde temperatura atinge valori deosebite ($6000 - 18000^{\circ} \text{C}$), depășind cu mult temperatura de topire a materialelor greu fuzibile; de esențenă, durata de acțiune a fasciculului laser prin 1. puls este foarte mică ($1 - 2 \mu\text{s}$). În aceste condiții, au loc fenomene complexe în urma cărora straturile de pe suprafața alezajelor sînt supuse unor modificări structurale și chimice foarte profunde.

Una din cerințele actuale în construcția de mașini este sporirea durității și rezistenței la uzură și coroziune a suprafețelor, pentru care cercetătorii caută să stabilească tehnologii adecvate fiecărui material. În cazul prelucrării cu fasciculul laser, pe lângă procesul de formare a alezajului, are loc și sporirea considerabilă a durității în stratul superficial de pe peretele acestuia. Caracterul și profunzimea modificării sînt condiționate de performanțele termofizice ale materialului prelucrat, parametrii energetici ai fasciculului laser, poziția petei focale față de suprafața semifabricatului, precum și de atmosfera înconjurătoare (142).

Pentru cercetarea durității materialului, au fost făcute încercări pe probe cu diverse adîncimi ale alezajelor. Piesele au fost secționate pe un strung-freza pînă în apropiere de cîteva secimi de milimetru de marginea alezajului, după care au fost glefuite cu hîrtie specială metalografică pe o mașină cu discuri interschimbabile. Pentru înlăturarea eventualelor vibrații sau alunecări ale materialului spre interiorul alezajului,

șlifurile au fost fixate cu șuruburi între două plăcuțe din lemn sau material plastic. Operația s-a efectuat cu deosebită atenție pînă la deschiderea totală a alezajului. Prelucrarea de finisare a robelor s-a făcut pe o mașină special de șlefuit, cu ajutorul unor discuri din postav sau fetru, udete cu o soluție de apă și oxid de aluminiu sau oxid de eron (116).

În vederea delimitării zonei influențată termic, șlifurile au fost supuse corodării cu soluții corespunzătoare fiecărui material prelucrat. (foto 24, 25).

Pentru probele din oțel, șlefuirea s-a făcut pe discuri abrazive de granulație fină la o turație de 30 rot/min, iar finisarea pe discuri cu pulbere de diamant.

Determinarea durității în zona modificărilor structurale s-a efectuat cu ajutorul instalației de tipul PHT-3, prevăzută cu o piramidă tetraedrică din diamant cu unghiul la vîrf de 136° . Viteza microdurității a fost calculată în funcție de mărimea diagonalei șprentei obținute pe suprafața materialului încercat sub acțiunea unei sarcini determinată cu relația:

$$H = \frac{1,85 P}{d_{diag}^2}$$

unde, P - sarcina în kg, d_{diag} - lățimea diagonalei șprentei în mm.

Măsurările s-au făcut de-a lungul marginii alezajelor la intervale de 0,015 - 0,2 mm. Pentru determinarea variației microdurității în direcția radială, încercările au fost la distanțe variind între 0,01 și 0,03 mm de marginea alezajului, inclusiv în zona neafectată de acțiunea fascicolului laser. Această metodă de măsurare a fost utilizată pentru întreaga grupă de probe încercate. Diferențe a constat în mărimea sarcinii pe piramide de diamant, care a fost aleasă în funcție de caracteristicile fizico-mecanice ale materialelor prelucrate. Astfel, la încercarea durabilității marce M6-F și a oțelului 162, sarcina a fost de 50 g, oțelului 18 1889T - 100 g și ceramicii - 200 g (116).

În urma unor numeroase încercări pe robele din oțel 30H GSA, a rezultat că, după acțiunea fascicolului laser, au apărut modificări în microduritatea materialului pe toată lățimea alezajului prelucrat. Grosimea acestui strat, în majoritatea cazurilor, se modifică în funcție de profunzimea alezajului, variind de la câțiva microni pînă la secini de milimetru.

Analizele metalografice ale pieselor din oțel au permis identificarea a trei zone distincte prin caracteristicile lor fizico-mecanice: zona alba necorodabilă, zona de trecere și zona materialului de bază.

Probele afectate pe zonele respective au scos în evidență caracterul brusc schimbător al microdurității la trecerea dintr-o zonă în alta. De exemplu, dacă microduritatea materialului de bază a fost 200 kgf/mm^2 , zona de trecere a avut 600 kgf/mm^2 iar în zona albă a crescut la 1000 kgf/mm^2 . Cu toate acestea creșterea sensibilă (de circa 5 ori) a durității în stratul alb, întreaga zonă influențată termic nu depășește în medie profunzimea de $0,1 \text{ mm}$, din care cea de trecere este de numai $0,03 \text{ mm}$ (165).

Existența unor granii atât de trasecate în zona influențată termic, nu este o caracteristică a cunoscutelor procedee mecanice și termice utilizate la sporirea durității metalelor. Aceasta ne permite, încă o dată, să remarcăm că, la prelucrarea cu impulsuri de energii concentrate, metalele au o comportare deosebit de complexă.

Cercetările efectuate au arătat, de esența, că zone cu duritate sporită se amplasează, de regula, în mod simetric față de axul alezajului și respectă fidel conturul acestuia (fig.40, element activ din rubin, $12 \times 240 \text{ mm}$, 20 kJ , oțel 30HGSA) (116).

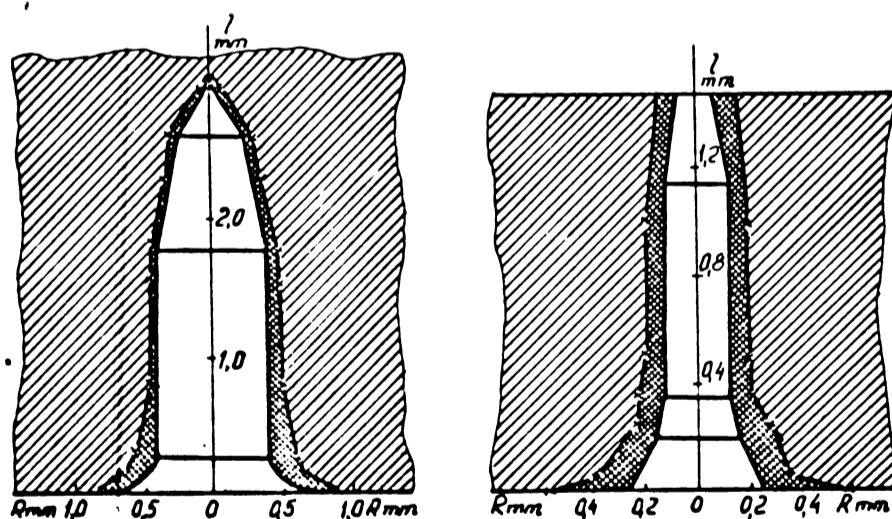


Fig.40

Analiza microdurității, în funcție de profunzimea alezajului prelucrat, a permis să se releve că la cele străpuse în

piesele din oțel 30H8A cu grosimea de 1,5 mm, cea mai mare valoare a microdurității există în punctele de interacție a suprafeței incidente cu corul de intrare a alezajului. În zona respectivă valoarea microdurității a atins 1100 kgf/mm^2 (fig. 41 b, rubin, $12 \times 240 \text{ mm}$; 20 kJ). Pe măsura patrunderii în profunzimea alezajului, microduritatea stratului de suprafață se micșorează treptat iar la ieșire a avut 300 kgf/mm^2 , adică de circa 3,5 ori mai mică. O regulă analogă s-a constatat și la cele infundate (fig. 41 a) (116), însă diferența a fost numai de 600 kgf/mm^2 . Această neconcordanță se poate explica prin acțiunea mai îndelungată a fascicolului laser asupra materialului de la intrarea în alezaj, zonă în care s-au observat cele mai profunde transformări structurale și fizico-chimice.

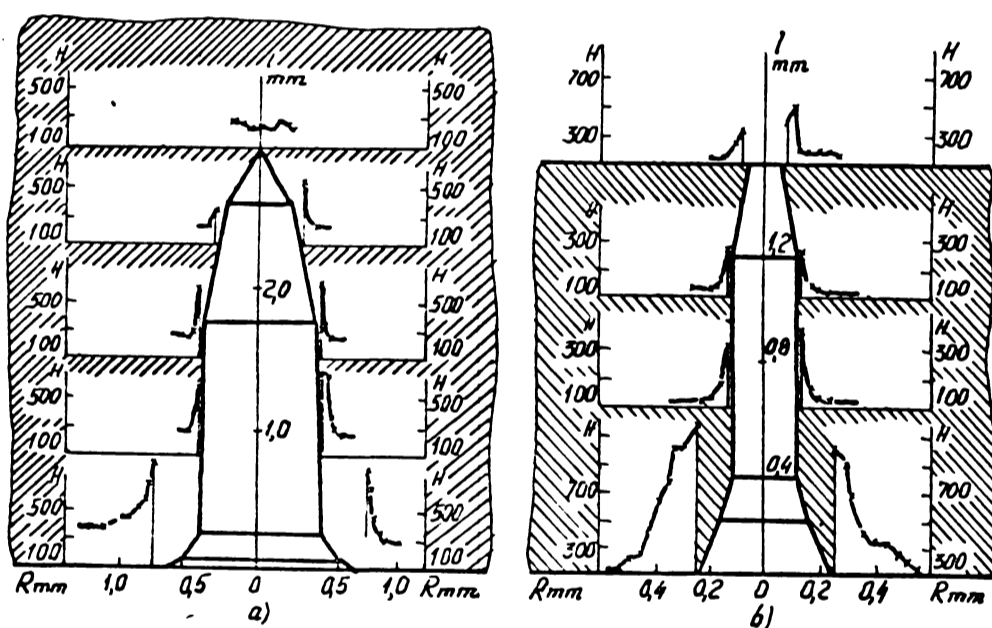


Fig. 41

Cu ocazia prelucrării pieselor din alama de calitate 162, ale cărei proprietăți termo-fizice sînt deosebite de ale oțelurilor de construcție și inoxidabile, s-a constatat, de asemenea, o apariție a microdurității în zona inițială de contact a fascicolului laser cu semifabricatul (116). Analizele metalografice efectuate au demonstrat că, la alezajele în alama, se formează o singură zonă cu duritate sporită. În acest caz, spre deosebire de stratul alb care a apărut la prelucrarea cu fascicol laser a oțelului, această zonă prezintă o structură macrogranulară cu aspect de material corodat, fiind reartizată aproape uniform pe toată lungimea

alezajului și mai puțin profundă decât la oțeluri. Măsurarea microdurității în direcția radială a demonstrat că, în zone influențată termic, valoarea acesteia ($120-150 \text{ kgf/mm}^2$) diferă foarte puțin de microduritatea materialului de bază neinfluențat termic (100 kgf/mm^2) (fig.42; rubin, $12 \times 240 \text{ mm}$; 20 kJ ; linia întreruptă - microduritatea materialului de bază). Și în acest caz, din motive similare cu la oțeluri, microduritatea atinge valori maxime la intrare. De asemenea, zona influențată termic se repartizează simetric, indiferent de tipul alezajului (perforat sau infundat) (116).

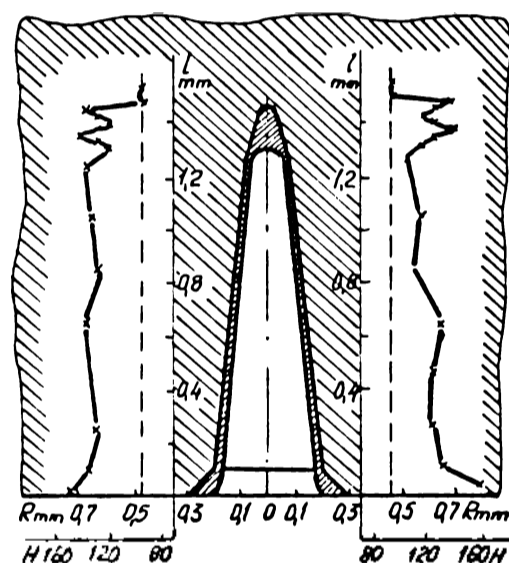


Fig.42

Un fenomen similar se observă și în cazul prelucrării aliajului de aluminiu calitatea D16T. Zona influențată, a cărei profunzime este relativ mică ($0,05 \text{ mm}$), apare ca un strat cu o ușoară sporire a durității (110 kgf/mm^2) față de cea a materialului de bază ($90 - 100 \text{ kgf/mm}^2$) (fig.43; a) orificiu infundat; b) orificiu străpun; rubin $12 \times 240 \text{ mm}$; 20 kJ). În funcție de profunzimea alezajului prelucrat, s-a constatat că valoarea microdurității rămâne practic constantă și nu apar, în zona celui de intrare, creșterile specifice altor metale. La alezajele perforate situația este analogă (116).

Cu ocazia cercetării structurii materialelor ceramice, s-a descoperit că, pe suprafața alezajelor prelucrate, se formează un strat sticlous, provenit din materialul de bază topit,

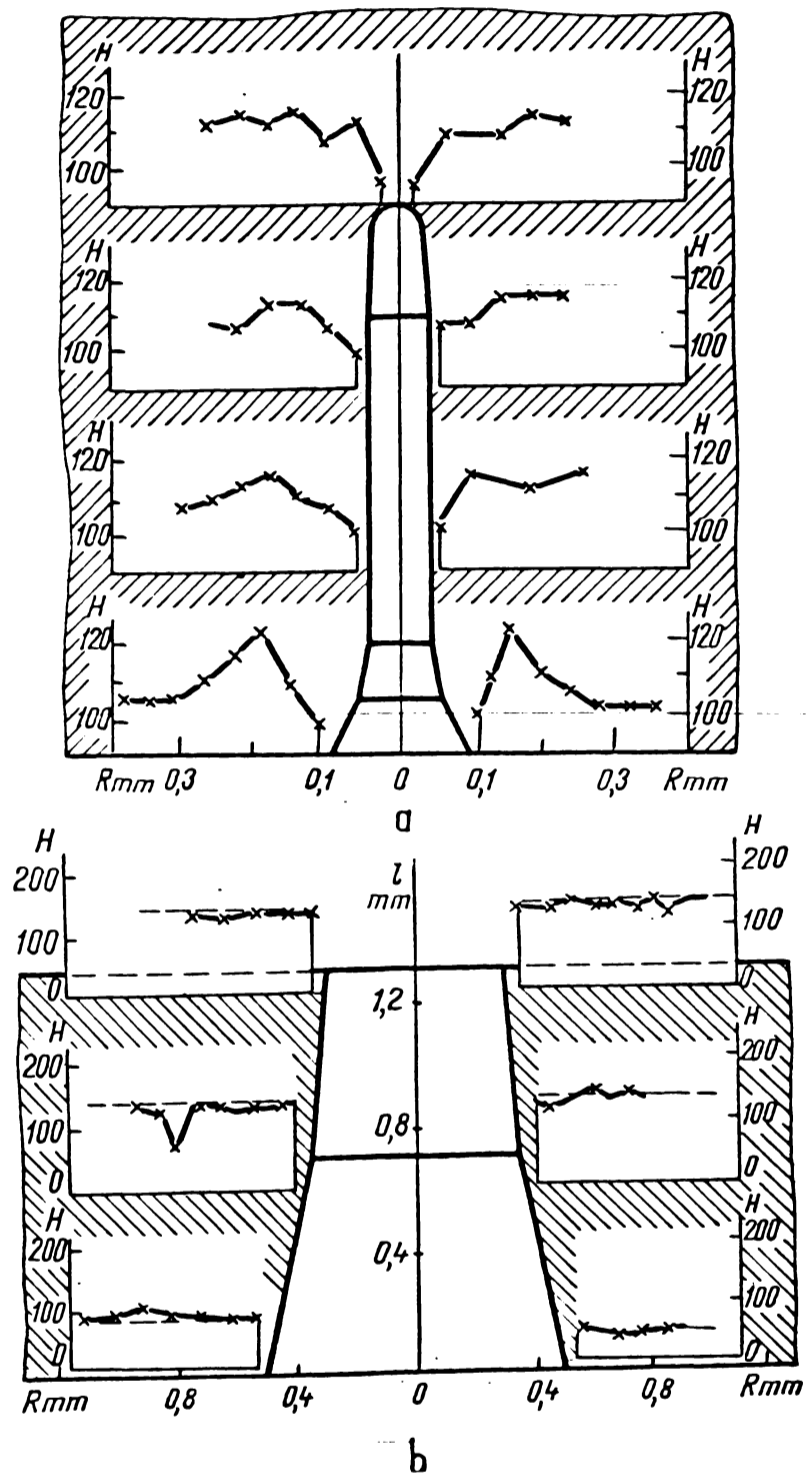


Fig.43

cu o grosime de cîțiva microni, ușor de îndepărtat. Măsurarea microdureității pe peretele dezvelit, în direcțiile radială și longitudinală, nu a scos în evidență modificări esențiale. Această rețea din graficele radiale (fig.44; a) microlit $\mu\text{M}-332$, b) steetă SK-1) (116).

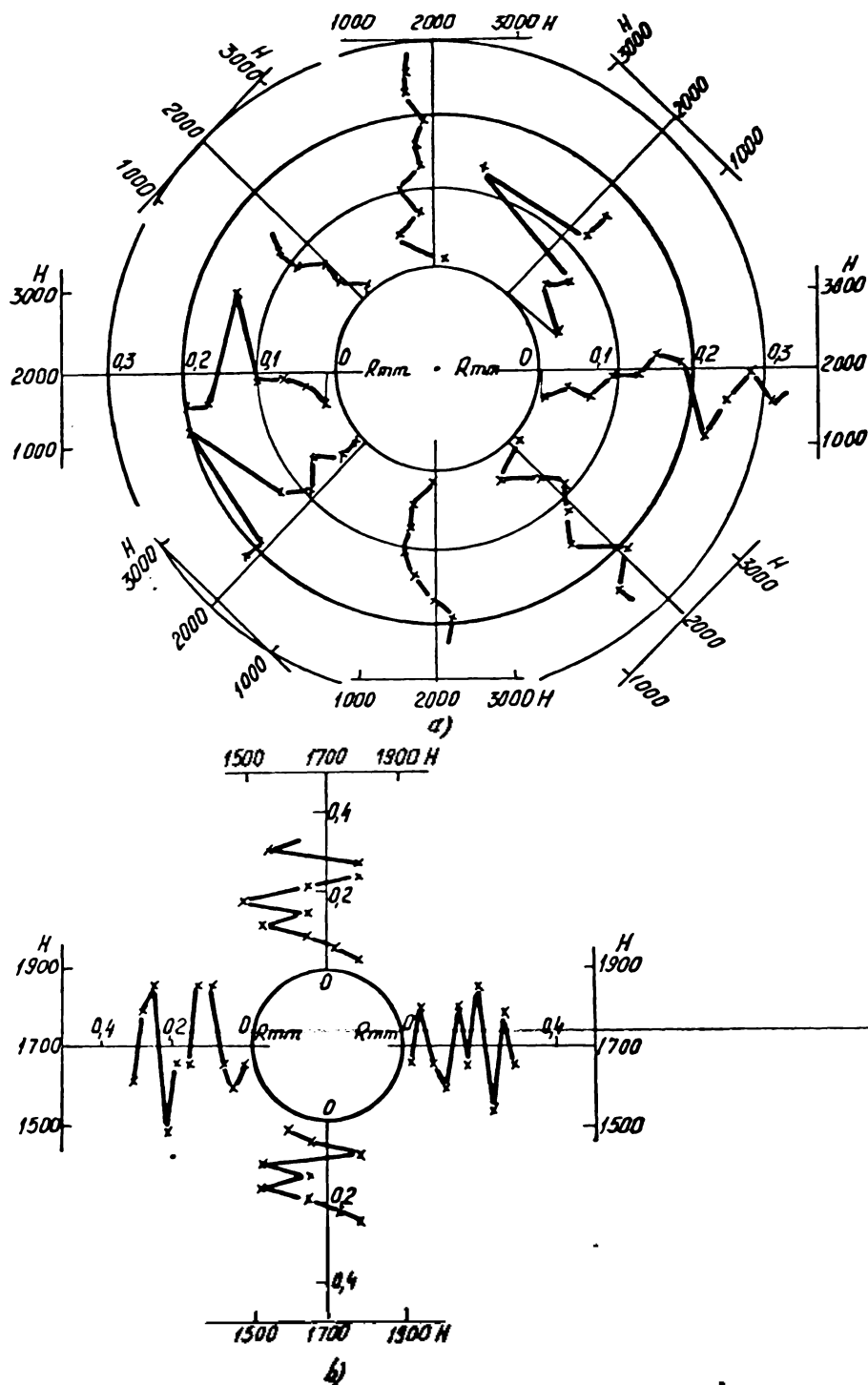


Fig.44

Aceste rezultate ale cercetărilor menționate mai sus au confirmat premisa că, modificările structurale în zona influențată termic sînt determinate, în special, de caracteristicile termice ale materialului de bază: conductibilitatea termică, temperatura de topire etc. Într-adevăr, lățimea zonei influențate termic, la materialele metalice se micșorează treptat pe măsură scaderii temperaturii lor de topire, iar la materialele

nenetlice aceasta este practic nulă.

Cercetările experimentale ulterioare (74, 116), au dat posibilitatea analizării caracterului modificării microdurității în zone de prelucrare, în funcție de intensitatea fascicolului laser. Pentru aceasta, materialele supuse cercetării au fost prelucrate la valori diferite ale energiei semnalului laser (7-20 kJ). Rezultatele măsurării microdurității au arătat că, la micșorarea energiei, lățimea zonei modificărilor structurale se micșorează în cazul tuturor materialelor prelucrate și aproape că dispare la energia în intervalul 7 - 5 kJ. Valoarea microdurității în zona prelucrării, pentru diferite energii ale semnalului, este de asemenea variabilă și se micșorează pe măsură diminuării acesteia (fig. 45; a) 20 kJ; b) 12 kJ; c) 7 kJ; oțel 30HGSa; rubin 12 x 240 mm). Se constată că sub 12 kJ, zona de trecere la oțeluri dispare și se formează un strat alb necorodabil. La prelucrarea aliajelor din aluminiu și alama, valoarea minimă a energiei, la care apar modificările structurale, este de 6-8 kJ. Diminuarea în continuare a acestuia determină dispariția aproape totală a zonei modificărilor structurale.

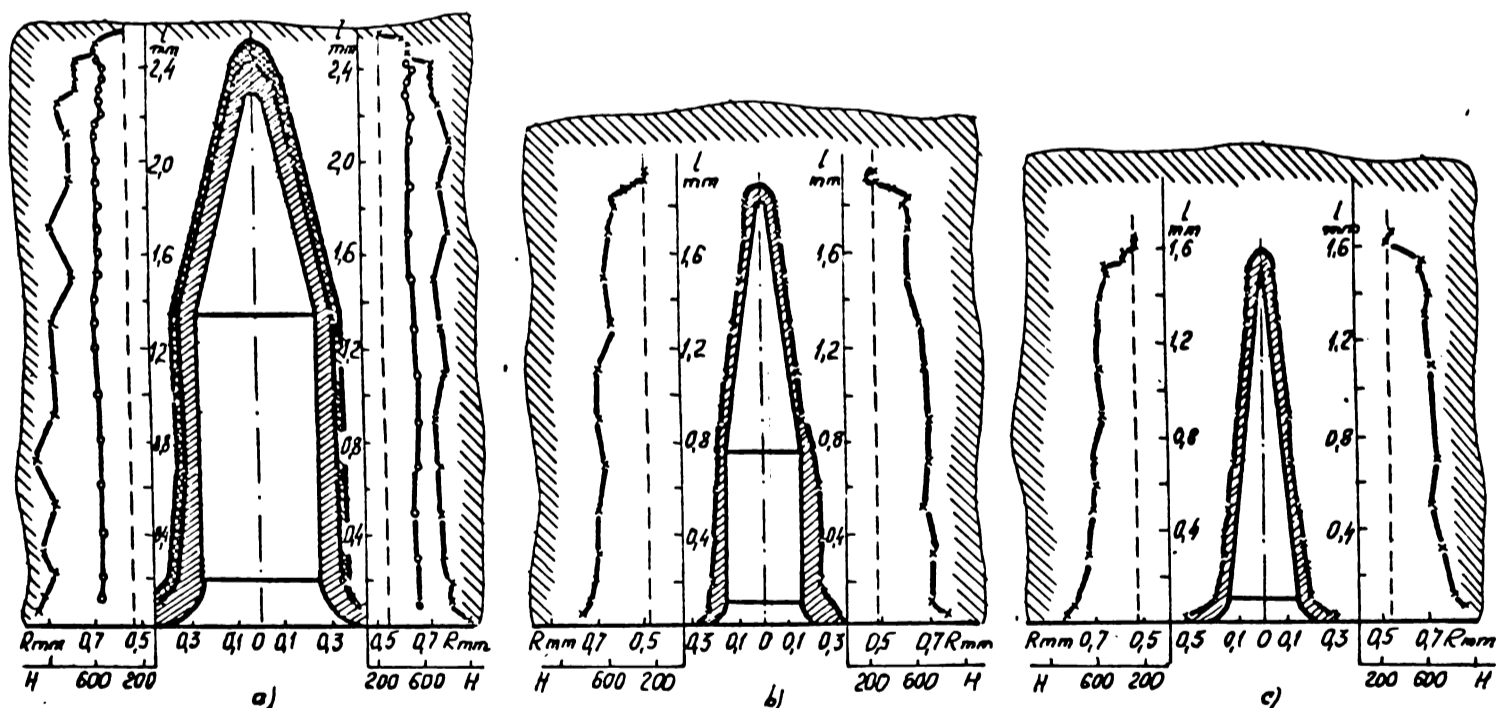


Fig.45

Valoarea microdurității în zona influențată termic, este dependentă, de regulă, de poziția focarului față de suprafața semifabricatului. Dacă în cazurile prelucrarilor menționate anterior,

focarul se află la suprafața piesei, la deplasarea acestuia spre interiorul semifabricatului, procesul de formare a alezajului este însoțit de fenomene termodinamice mai intense care determină mărirea zonei influențată termic. Astfel, de exemplu, la poziția focarului în interiorul metalului, lățimea zonei modificată crește de 1,5 ori pentru piesele din oțel. Se constată o modificare importantă și a formei zonei respective, fiind mai mare la intrarea alezajului și micșoratăⁱⁿ/profundimea acestuia. Acest aspect este caracteristic și în cazul prelucrării în alte materiale.

Deplasarea focarului în poziții negative (deasupra suprafeței) determină micșorarea adâncimii alezajelor prelucrate, precum și a zonei modificărilor structurale. De exemplu, în cazul mutării focarului la 1,5 - 2 mm și $F = 15$ mm, de suprafața piesei din oțel calitatea 30HGSA se formează o adâncitură cu diametrul de 0,3 - 0,4 mm cu o profundime, practic, egală cu zero. Cercetarea acestor adâncituri a demonstrat că valoarea medie a microdurității în limitele zonei influențate termic, rămâne invariabilă și nu depinde de mărimea deplasării focarului. În acest caz, valoarea maximă a microdurității se afla în punctele din zona centrală a adânciturii și se micșorează brusc peste limitele acestora. Rezultatul experimentărilor, privind poziții diferite ale focarului, sînt redată în fig.46 (116).

Valorile privind duritatea și profundimea acestor adâncituri, permit să se anticipeze o eventuală utilizare a fascicolului laser, în mod asemănător cu calirea superficială, în vederea sporirii durității stratului de suprafață al pieselor prelucrate prin alte procedee tehnologice. În acest scop, calitatea stratului durificat va fi dependent de trei parametri: energia emisă de generatorul cuantic W_g , distanța focală a lentilei F și valoarea deplasării petei focale față de suprafața semifabricatului $\pm \Delta F$.

Cercetările mai sus-menționate și efectuate în vederea studierii efectului razei laser asupra modificării microdurității în zona influențată termic, s-au referit și la prelucrările care au loc în condiții deosebite (vacuum, mediu fluid, presiune, jet de aer etc.). S-a constatat că, în aceste condiții, nu au avut loc modificări substanțiale în valorile microdurității din zona prelucrării.

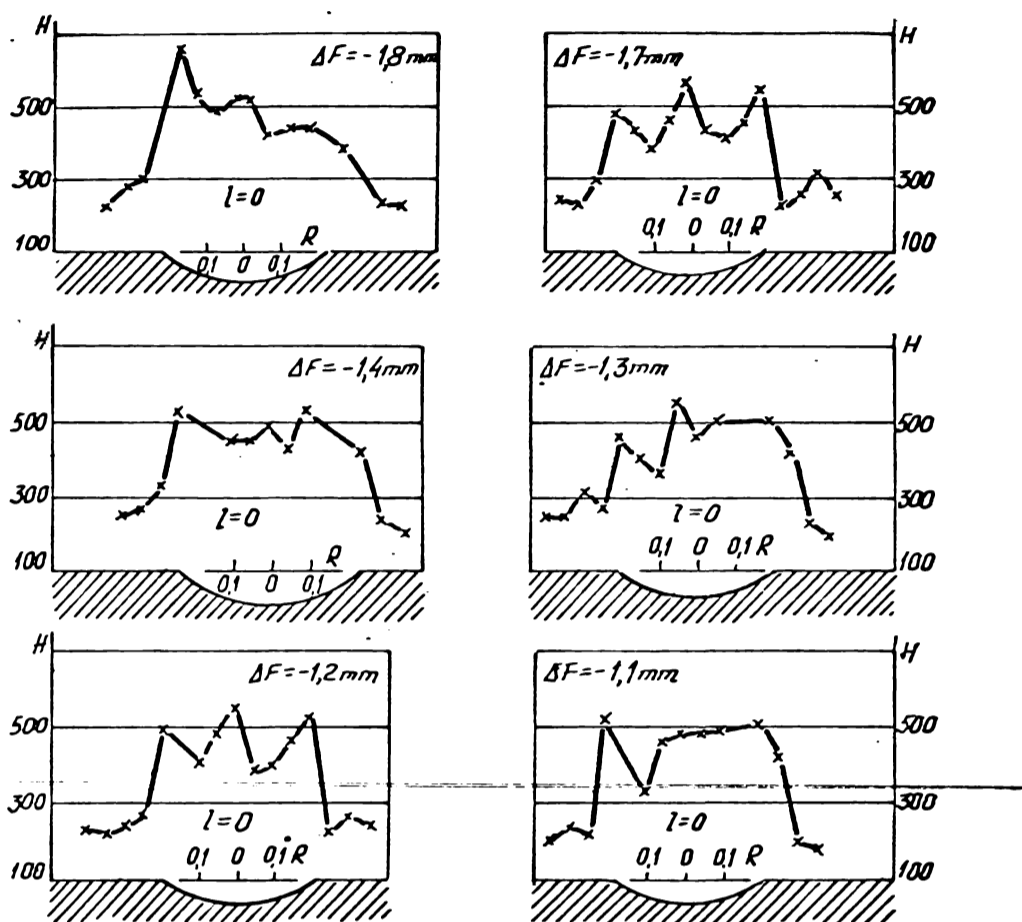


Fig. 46

fenomene interesante, în privința modificărilor din zona de acțiune a fascicolului laser, au fost constatate la prelucrarea simultană a alezajelor în două plăci strâns suprapuse, din același material. În acest caz, în placa inferioară, caracterul modificării zonei influențată termic este asemănător cu cel obținut prin metodele obișnuite de prelucrare cu fascicol laser. În placa superioară, însă, se observă o lărgire substanțială (4 mm) a acestei zone pentru un alezaj al cărui diametru nominal este de 0,2 mm. Această zonă, deseori cu crăpături radiale, apare atât la un capăt cât și la celălalt al alezajului, simetrică față de axa acestuia (116).

Experimentările efectuate au demonstrat că, în cazul prelucrării cu fascicol laser a pieselor din oțel, pe perețele alezajului se formează un strat monolit de protecție (împotriva acțiunii razei laser) care, în unele cazuri poate fi cu fisuri, crăpături circulare și alte defecte (foto 7 și 8). Un fenomen analog se observă și la prelucrarea alezajelor în titan tehnic pur (foto 3 și 5).

La prelucrarea pieselor din duraluminiu, în partea de intrare a alezajului se formează microfisuri (14) înăă după (116), în urma încercărilor pe eceleș material, în stratul depus nu se observă asemenea defecte. Aceasta neconcordanță se explică prin regimurile diferite folosite la prelucrare.

Apariția unor defecte evidente pe stratul de la suprafața materialului prelucrat se observă la prelucrarea pieselor din materiale metaloceramice din celitatea T154K6, T14K8, T30K4, VK6, ceramice și sticlă (166). Astfel, la prelucrarea plăcuțelor din aliaje de titancobalt și wolframcobalt, suprafațe acestora se acopera cu o rețea de microfisuri. Din cercetările efectuate rezultă că numărul microfisurilor poate fi redus prin modificarea duratei impulsului și diminuarea energiei radiației.

La prelucrarea pieselor din materiale ceramice de tipul TM 332 și steatită SK-1, se formează un strat sticlos, rezultat din topirea materialului de bază, în grosime de câțiva microni, uniform pe toată suprafața alezajului prelucrat, înăă acoperit cu o rețea de microfisuri. Rezistența acestei pelicule sticlose și fisurată este relativ mică și poate fi înlăturată printr-o acțiune mecanică de forțe neînsemnate.

Procesul formării alezajelor la piesele din sticlă este însoțit de o oarecare topire a zonei de acțiune a razei laser, care după răcire se prezintă ca o pelicula intens fisurată.

Toste aceste defecte de la suprafața pieselor prelucrate, pot fi înlăturate prin alegerea unui regim de prelucrare corespunzător proprietăților termofizice și mecanice ale semifabricatului, a unui mediu înconjurător adecvat fiecărui material (142), pregătirea corespunzătoare a suprafeței piesei și corectarea periodică a abaterilor privind poziția reciprocă a elementelor componente ale instalației laser, precum și respectarea riguroasă a indicațiilor tehnologice privind poziția petei focale. (153).

3.7. Contribuția la stabilirea clasei de calitate privind macrogeometria și microgeometria suprafeței alezajelor micrometrice prelucrate cu fascicul laser

O mare parte a alezajelor micrometrice sînt practicate în piese din materiale dure (filiere, lagăre, diuze etc.) a că-

roz precizie macrogeometrică și microgeometrică constituie principala caracteristică funcțională.

Aspectul suprafeței peretelui alezajului, în cazul prelucrării cu fascicol laser, este striot specific și nu poate fi comparat cu cel rezultat prin alte procedee sau metode tehnologice cunoscute, (foto 7, 8, 18).

Referindu-ne la întreaga lungime a alezajului, macrogeometria este caracterizată, în funcție de regimul de lucru ales, prin onduleții date de nestabilitatea parametrilor energetici ai razei laser, scobituri provocate de microexplozii și de jetul returnat din metal, topitură și gaze, (foto 6, 26).

În ceea ce privește microgeometria, ca medie a microdenivelurilor pe o anumită lungime, se poate afirma că aceasta este rezultatul centrelor de cristalizare inițiale de la suprafață ca efect al modificărilor fizice și chimice în soluția lichidă, precum și de ruperile inter și intracristaline provocate de forțele termodinamice, (foto 22, 32).

Aspectul suprafeței alezajelor realizate cu fascicol laser, parte componentă a calității suprafeței prelucrate, este dependent, ca și caracteristicile fizico-mecanice ale stratului superficial al peretelui (capit. 3.6), de aceeași parametri: materialul semifabricatului, parametri energetici ai fascicolului concentrat, poziția petei focale, mediul înconjurător (142).

Prelucrarea s-a efectuat pe instalația Quant - 9, cu elementul activ din rubin 12 x 240 mm, 20 kJ, $\lambda = 55$ nm.

Pentru măsurarea neregularităților suprafeței prelucrate au fost pregătite piesele găurite în vederea deschiderii alezajelor, astfel: tăierea s-a realizat pe o mașină de frezat specială de înaltă precizie, iar polizarea pe o mașină clasică de pregătire șlifuri.

La înregistrarea profilului neregularităților, șliful a fost fixat într-un dispozitiv adecvat, astfel ca axa alezajului să fie orientată paralel cu direcția de deplasare a palpatorului. Măsurarea s-a făcut cu ajutorul unui polarograf-profilometru de tipul bloc, model 201, din dotarea catedrei de Mecanică fină a Institutului politehnic București. Acul din diamant al palpatorului a fost apropiat și poziționat, pe peretele alezajului deschis, cu ajutorul șuruburilor micrometrice; controlul asupra poziției acestuia s-a făcut cu ajutorul microscopului MBS-2 din dotarea

instalației. La înregistrarea neregularităților s-a folosit hirtie electrotehnică ETB-1, separat pentru intrarea, mijlocul și ieșirea alezajului. Viteza de deplasare a palpatorului a fost de 0,2 mm/min.

Înregistrarea profilogramelor în cazul determinării macronegularităților, s-a făcut la o mărire de 500 ori pe ordonată și de 50 ori pe abscisă, din care s-a determinat R_z pentru fiecare din porțiunile suprafeței alezajului (tabelul 17).

Determinarea micronegularităților suprafeței alezajului s-a făcut, de asemenea, după parametrul R_z , conform profilogramelor respective înregistrate, la o mărire de 2500 pe ordonată și de 200 ori pe abscisă.

Macrogeometria. În procesul de formare a alezajelor prelucrate cu fascicul laser, abaterile macrogeometrice ale suprafeței acestora sînt extrem de mari în cazul celor infundate, mai ales în adîncime. La prelucrarea alezajelor perforate, cînd procesul de formare este însoțit de ejectarea metalului topit și gazelor în două direcții diferite, volumul abaterilor se reduce simțitor. Cercetările efectuate (116, 148) au mai demonstrat că în cazul modificării energiei și a duratei impulsului, macronegularitățile sînt supuse unor importante abateri. Cu alte cuvinte, cu cît crește energia fascicolului concentrat și durata impulsului este mai mică cu atît calitatea suprafeței alezajului este mai bună.

În fig.47 (a - 20 kJ, b - 17 kJ, c - 12 kJ, d - 10 kJ; oțel; abscisa x 50, ordonata x 500; intervalul de măsurare - aproximativ lungimea alezajului, max. 2,5 mm) serie de profilograme, precum și tabelul 17 arată că macrogeometria suprafețelor alezajelor străpuse este în limitele 6,3 - 40 micrometri, iar pentru cele infundate 20-80 micrometri. De remarcă că, pentru intrări și ieșiri, calitatea suprafeței scade cu 3-4 clase de precizie atît pentru cele străpuse cît și pentru cele infundate, ajungînd la macronegularități deosebit de mari (160-320 micrometri). De asemenea, rezultă că suprafața de cea mai bună calitate (6,3 micrometri) se obține în zone centrale a alezajului, la o energie a fascicolului laser concentrat de 20 kJ. La micșorarea energiei, pentru diametre și profunzimi egale are loc o trecere de la forma relativ cilindrică la o formă ondulată și apoi la un artificiu complet deformat, fapt menționat și de alți cercetători (116) ca și (114) și (106).

Tabloul 27

Macrogeometria elementelor prelucrate cu fascicul laser pentru diverse energii

OPTELURI

Energia semnalului laser (kJ)	Intriere		Iegire		Zona centrală a orificiului		OBSERVAȚII
	Denive- lare medie	Clase de precizie GOST STAS	Denive- lare medie	Clase de precizie GOST STAS	Denive- lare medie	Clase de precizie GOST STAS	
	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	
20	perf. 80 inf. 160	V3 3 V2 2	40 -	V4 4 -	6,3 20	V7 7 V5 5	
17	perf. 80 inf. 160	V3 3 V2 2	40 -	V4 4 -	10 40	V6 6 V4 4	
12	perf. 220 inf. 220	V1 1 V1 1	80 -	V3 3 -	20 80	V5 5 V3 3	
10	perf. 220 inf. 220	V1 1 V1 1	80 -	V3 3 -	40 80	V4 4 V3 3	

Obs.: Denivelarea medie poate fi admisibilă și determinată cu R_z GOST 2273-70 STAS 5730-75

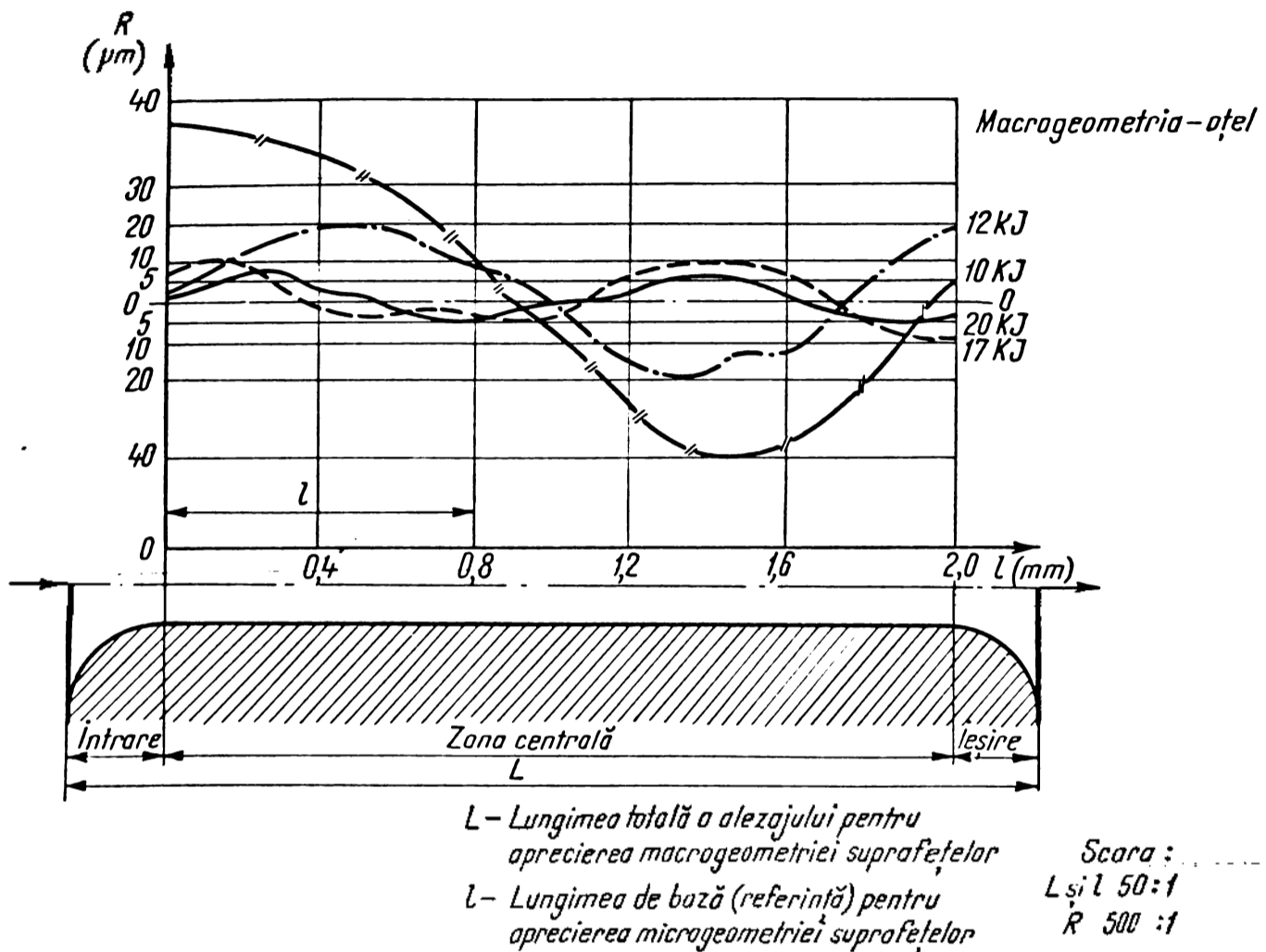


Fig.47

Cercetările experimentale au scos în evidență, de asemenea, și faptul că neregularitățile macrogeometrice cresc pe măsura amplasării focarului în interiorul semifabricatului. În acest caz, procesul de formare a alezajului este însoțit de fenomene termodinamice foarte intense în urma cărora, după toate probabilitățile, apar prelucrări suplimentare (sculgeri) ale stratului de suprafață. În poziția petei focale pe suprafața piesei, procesul de formare decurge relativ liniștit din lipsa fenomenelor dinamice puternice (Capit.3.2).

Mecanismul apariției abaterilor macrogeometrice a putut fi explicat pe baza analizei dinamicii proceselor care au loc cu ocazia formării alezajelor străpunee și înregistrarea cu o cameră de luat vederi (165), din care rezultă că interacțiunea dintre fasciculul laser și semifabricat este foarte intensă în prima perioadă. Apoi, procesul se stinge treptat dar, din când în

când, se observă o reîncalzire, urzată de microexplozii cauzate de immagazinările locale locale de energie concentrată (Capit. 3.1). Aceste salturi de energie smulg porțiuni de pe peretele alezajului creînd microcrăsterele specifice. Neregularitățile sînt cu atît mai însemnate cît cît este mai mare saltul de energie al microexploziilor de la sfîrșitul interacțiunii și cu cît sînt mai mari intervalele între focentele apariției acestor salturi.

Dinamica procesului formării alezajelor străpunsă, prezentată mai sus, ar putea da un răspuns și asupra cauzelor înrîntăririi neregularităților suprafeței alezajelor infundate.

Microgeometria peretelui alezajului, realizat cu fasciculul laser concentrat, are o particularitate strict specifică, condiționată de calitățile metalurgice ale materialului prelucrat și mărimea energiei fasciculului laser.

Astfel, la prelucrarea oțelurilor de diverse calități, în condiții normale de lucru, suprafața peretelui alezajului este netedă, lustruită chiar, cu reflexele unui spectru de culori. Abaterile microgeometrice, în acest caz, au avut în medie 3,2 microni pentru zona centrală și între 40 și 20 microni pentru intrarea și ieșirea alezajului (fig. 48; a - oțeluri, b - alame, c - duralumin, d - ceramica; ordonată $\times 2500$, abscisa $\times 200$; lungimea de măsurare 0,8 mm și tabelul 18). O formă asemănătoare o au alezajele în alame (b), numai că, în acest caz, suprafața este strălucitoare. Gradul de finețe al acestora corespunde unei rugozități de 10 microni pentru zona centrală, 20 și 40 microni pentru ieșire și, respectiv, pentru intrare. În aluminiu, netezimea obținută este de 10 microni în zona centrală, 40 la ieșire și 20 la intrare, iar suprafața este mată. (foto 9, 10, 16, 31).

Un aspect deosebit s-a constatat la examinarea microgeometriei suprafeței alezajelor practicate în materiale ceramice. În capitoul 3.6 s-a menționat că, în timpul procesului de prelucrare, peretele alezajului se acoperă cu o peliculă lichidă din materialul de bază. După răcire, valoarea medie a microneregularităților suprafeței acestei pelicule (străbătută de nemărate fisuri și crăpături, cu slabă rezistență mecanică și ușor de înlăturat) se estimează la 160 microni în zona centrală și la peste 320 la intrarea și ieșirea alezajului. Microgeometria peretelui, dezvelit de această peliculă slab aderentă, este de valoarea medie 20 microni pentru zona centrală, 80 pentru ieșire și 40 pentru intrare.

Microgeometria - 20 kJ

117

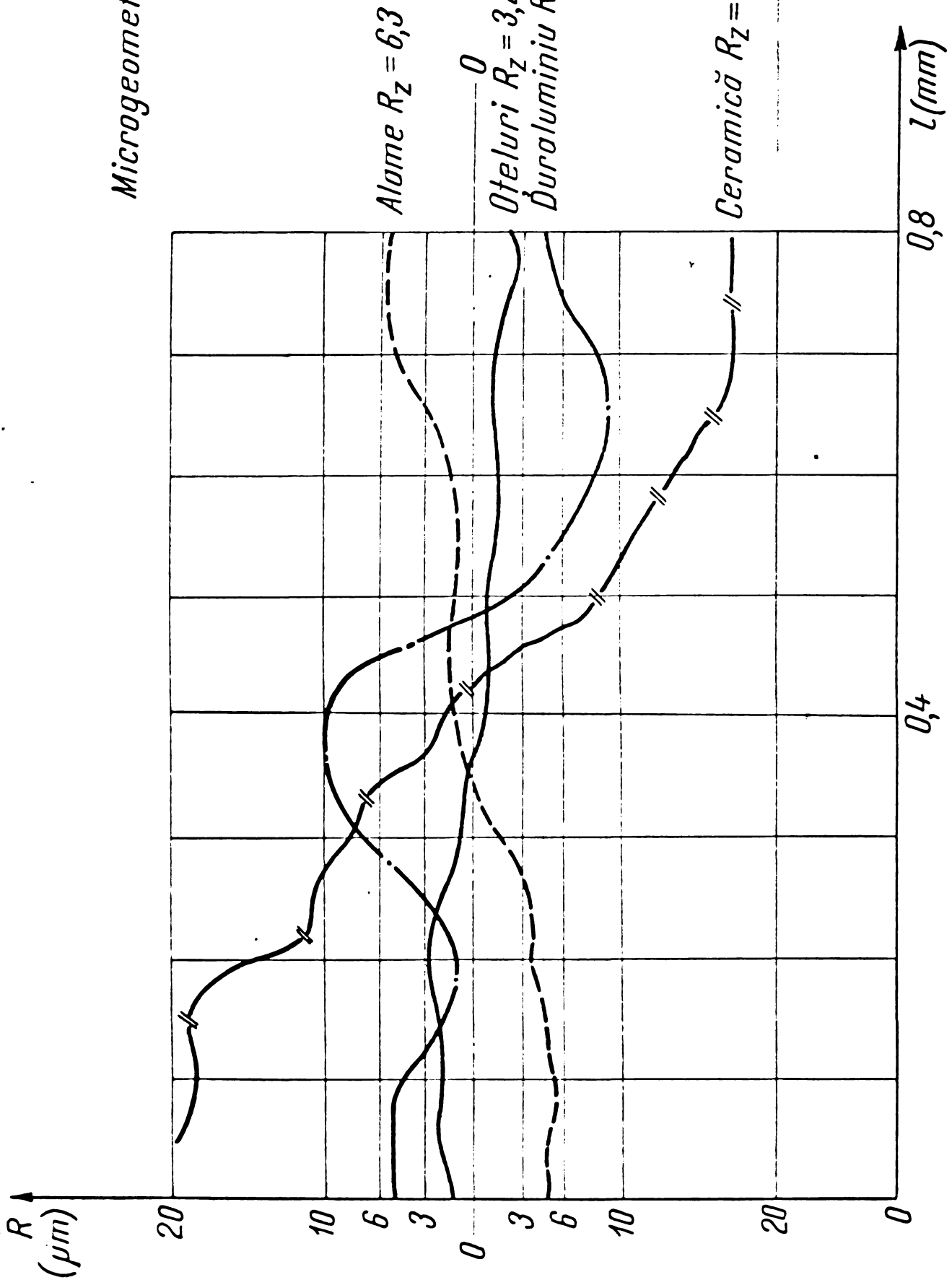
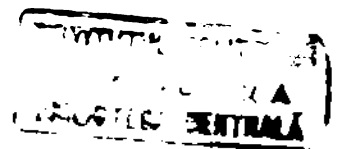


Fig. 48

Scara: L 200:1
R 2500:1



Tabellul 18

**Microgeometria alezajelor prelucrate cu fascicul laser în diverse materiale
(orificii strapune)**

(20 kJ^x)

Materialul semifabricatului	Stratul	Intrere		Iegire		Zone centrale e orificiului	
		Rugozitate absolută R _s (μm)	Clasa de precizie GOST STAS	Rugozitate absolută R _s (μm)	Clasa de precizie GOST STAS	Rugozitate absolută R _s (μm)	Clasa de precizie GOST STAS
Oteluri	influențat tat termic	40	▽4 4	20	▽5 5	3,2	▽8 8
Alame	idem	40	▽4 4	20	▽5 5	6,3	▽5 5
Duraluminia	idem	20	▽5 5	40	▽4 4	10	▽6 6
Ceramide	osent	220	▽1 1	220	▽1 1	160	▽2 2
	material de bază	40	▽4 4	80	▽3 3	20	▽5 5

x) Valoarea energiei, estimată ca optimă pe baza prelucrarilor anterioare.

Dependența dintre micronegularitățile suprafeței și energia semnalului laser, pentru prelucrarea pieselor din oțel (tabelul 19), este reprezentată în fig.49 (154). Din profilogramă rezultă că, pentru zona centrală a alezajului, microgeometria se înrăutățește cu 3 clase de precizie (de la 3,2 la 20 micrometri) (tabelul 20), atunci când energia scade de la 20 la 10 kJ.

x

x x

Cercetările efectuate, privind studierea abaterilor macro și microgeometrice pentru anumite zone ale suprafeței alezajelor prelucrate cu fascicol laser concentrat, au demonstrat că cea mai înaltă finețe, la toate grupele de materiale, se afla în partea centrală și se înrăutățește cu 3 - 4 clase de precizie la intrarea și ieșirea alezajului (tabelurile 17, 18 și 19).

Față de abaterile macrogeometrice și microgeometrice deosebit de mari, rezultate la prelucrarea alezajelor perforate stit în cadrul experimentarilor noastre cât și ale Institutului de cercetari pentru tehnologia construcțiilor de mașini - București, întreprinderii pentru aparatură electrică de măsură Timișoara, Institutului de fizică atomică - București și ale altora, (foto 3, 4, 11, 20, 21, 22, 26, 27, 28, 29, 32), se poate afirma, în această fază a cercetărilor, că alezajele obținute cu fascicol laser concentrat necesită o prelucrare suplimentară pentru finisare, ca de exemplu: cu praf de diamant și fir de nylon - firma americană Comodore (165), cu pulbere de carbură metalică și fir de cupru progresiv corodat - întreprinderea de aparatură electrică de măsură din Timișoara (foto 19), prin ultrasunete - în faza de laborator la Institutul politehnic din Timișoara ș.a.

Folosind procedee ajutatoare (calibrarea pneumatică sau prin acțiune inversă a fascicolului laser la alezajele străpunse, utilizarea ecranelor pentru stricționarea fascicolului concentrat etc.), au fost obținute alezaje cu următoarele calități ale suprafețelor: pentru macrogeometrie, la alezaje străpunse, $\nabla 8 - \nabla 11$ adică $R_z = 3,2 - 0,4$ microni și la cele înfundate $\nabla 6 - \nabla 9$ ($R_z = 10 - 1,6$ microni); pentru microgeometrie $\nabla 9 - \nabla 12$ ($R_z = 1,6 - 0,2$ microni) la alezaje străpunse și $\nabla 7 - \nabla 10$ ($R_z = 6,3 - 0,8$ microni) la cele înfundate, conform GOST 2273-70 (116).

Tabela 19

Microgeometria așezărilor prelucrate cu fascicol laser pentru diverse energii

OPILURI

Energia semnalului laser	Intrare			Ieșire			Zona centrală a orificiului			OBS.
	Rugozitate abs. R _s (μm)	Clasa de precizie GOST CTAS	Rugozitate abs. R _s (μm)	Clasa de precizie GOST CTAS	Rugozitate abs. R _s (μm)	Clasa de precizie GOST CTAS	Rugozitate abs. R _s (μm)	Clasa de precizie GOST CTAS		
20 perf.	40	V4	4	20	V5	5	3,2	V8	8	
20 inf.	40	V4	4	-	-	-	10	V6	6	
17 perf.	40	V4	4	20	V5	5	6,3	V7	7	
17 inf.	80	V3	3	-	-	-	20	V5	5	
12 perf.	40	V4	4	40	V4	4	10	V6	6	
12 inf.	80	V3	3	-	-	-	40	V4	4	
10 perf.	80	V3	3	80	V3	3	20	V5	5	
10 inf.	80	V3	3	-	-	-	40	V4	4	

Microgeometria - otel

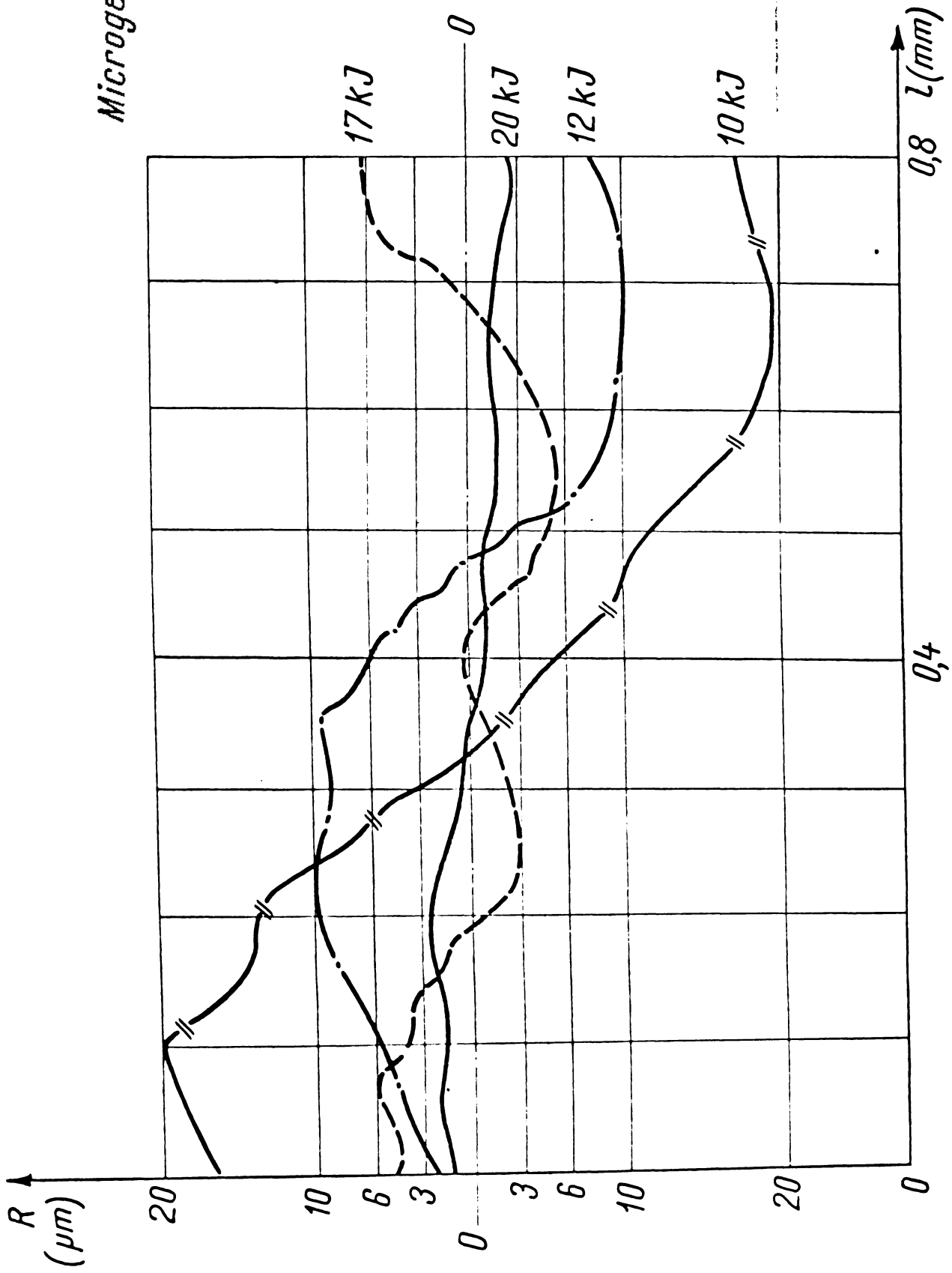


Fig. 49

Scara: L 200:1
R 2500:1

Tabela nr. 20

Corepondența între clasele și criteriile de rugozitate

Clase de rugozitate (STAS vechi)	Criterii de rugozitate (STAS actual) ²⁾				Raportul Hmax/Hmp (mm)
	Hmp (μm)	Hmax (μm)	Re (μm)	Ra (μm)	
▽1	100	200	100	320	2
▽2	50	125	50	160	2,5
▽3	25	62,5	25	80	2,5
▽4	12,5	37,5	12,5	40	2,7
▽5	6,3	18,7	6,5	20	2,96
▽6	3,2	10	3,2	10	3,12
▽7	1,6	6,3	1,6	6,3	3,93
▽8	0,8	3,2	0,8	3,2	4
▽9	0,4	1,6	0,4	1,6	4
▽10	0,2	0,8	0,2	0,8	4
▽11	0,1	0,5	0,1	0,4	5
▽12	0,05	0,25	0,05	0,2	5
▽13	0,025	0,125	0,025	0,1	5
▽14	0,012	0,062	0,012	0,05	5,16

2) STAS 5730-75: Termeni, generalități, principii de alegere

Hmp ≈ Ra ; Ra ≈ 4,5 Re ; Hmax ≈ (2 - 6) Re ; Ra : valorile minime pentru degroșări
 Hmax ≈ (2 - 6) Re : valorile maxime pentru finisări

Menționăm că profilogramele obținute sînt netede, fără proeminente ascuțite, chiar cu luciu metalic (datorită, printre altele, fazei lichide din momentul interacțiunii), neavînd conturul celor obținute prin aşchiere.

Ținînd cont de acest aspect, de faptul că prelucrările au fost realizate în folii de diverse materiale cu grosime nu mai mare de 2,5 mm, că alezajele nu au depășit lungimea de referință prevăzută de STAS 5730-75 privind măsurarea rugozității, că valorile macro și microneregularităților sînt aproape identice, în urma acestor prime măsurări pe lungimi distincte (a alezajului și apoi cea corespunzătoare fiecărui R_z) estimăm că macrogeometria și microgeometria se confundă la alezajele micrometrice, de mică profunzime, prelucrate cu fascicul laser.

4. PRIVIND ESTIMAREA PRODUCTIVITĂȚII PRELUCRĂRII CU FASCICOL LASER A ALIAZAJILOR MICROMETRICE

Intrucât procesul de prelucrare cu fascicol laser are unele particularități specifice, productivitatea ar putea fi exprimată pe baza altor considerente decât în cazul procedeelor convenționale.

Din recomandările literaturii de specialitate, mai apropiată de aplicativitatea practică, în acest caz, este exprimarea productivității (Q_{pr}) în funcție de caracteristicile energetice ale razei laser, caracteristicile termofizice ale semifabricatului și frecvența impulsurilor (116):

$$Q_{pr} = \eta_{pr} \frac{W_s \cdot k_{mat} \cdot n_{imp}}{\rho (T_{top} - T_0) L_{top}} \quad (31)$$

unde: η_{pr} - coeficientul de proporționalitate dependent de constantele fizice ale mediului, durata impulsului și modul de reglare optică a fascicolului; k_{mat} - coeficientul de absorbție al materialului; n_{imp} - frecvența impulsurilor; ρ - greutatea specifică a materialului prelucrat; T_{top} - temperatură de topire a materialului în $^{\circ}C$; T_0 - temperatură inițială a materialului în $^{\circ}C$; L_{top} - căldura specifică de topire a materialului.

Din relația 31 rezultă că productivitatea este direct proporțională cu energia de radiație, coeficientul de absorbție al materialului și frecvența impulsurilor.

Mărimea energiei, în acest caz, este o funcție de mai mulți parametri independenți și variabili a căror valoare și influență sînt cunoscute (Capit.3.1).

În ceea ce privește frecvența impulsurilor, pentru generatorul cuantic, se cunoaște că (116):

$$n_{imp} = \frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} \quad (32)$$

unde: t_1 - intervalul de timp dintre impulsuri, determinat de regimul termic al elementului activ; t_2 - durata acțiunii unui singur impuls, exprimat prin:

$$t_2 = t_g + t_1 + t_e \quad (83)$$

unde: t_g - timpul în care sistemul scurtează energia; t_1 - timpul creării descărcării inițiale; t_e - timpul efectiv de lucru al unui impuls.

În baza analizei rezultatelor obținute, în urma prelucrării cu instalațiile menționate (Capit.2) de generatori cuantici, rezultă că cea mai mare influență o au t_1 și t_g .

Mărimea t_1 , pentru sistemul de răcire cu aer a rezonatorului și pentru energia de pompare de 20 kJ, are valoarea 40-100 μ s, iar la sistemul de răcire cu apă scade la 50 și chiar 20 μ s.

Mărimea t_g , determinată de capacitatea de încărcare totală a condensatorilor și de mărimea curentului, are valori între câteva secunde de secundă și pînă la câteva minute.

Mărimile t_1 și t_g corespund unor valori cuprinse între câteva secunde și mii de secundă.

În vederea folosirii eficiente a duratei unui ciclu al procesului de prelucrare, s-a introdus coeficientul de corecție

$$\eta = \frac{t_g}{t_1 + t_2} 100\% \quad (84)$$

a cărui valoare, pentru instalațiile laser cu impulsuri, este în limitele 1 - 0,001.

În prelucrările efectuate în acest scop înca, s-a estimat că productivitatea poate fi exprimată cu suficientă exactitate practică prin capacitatea de prelucrare, adică volumul de material îndepărtat la unul sau la mai multe impulsuri în unitatea de timp.

Încercările experimentale efectuate în vederea determinării productivității, au demonstrat că aceasta corespunde următoarelor valori: 50 mm³/min pentru oțel, 70 mm³/min pentru aluminiu și 30 mm³/min pentru ceramică (116).

Valoarea acestor rezultate experimentale poate să varieze în funcție de caracteristicile constructive și tehnologice ale generatorului cuantic.

5. ASUPRA CALCULULUI ECONOMIC AL PRELUCRĂRII CU FASCICOL LASER A ALEZAJELOR MICROMETRICE

5.1. Considerații privind elementele de calcul economic

5.1.1. Condițiile actuale ale economicității aplicării unei noi tehnologii

În vederea introducerii unei noi tehnologii în industrie, este necesară o analiză atentă a întregului proces de fabricație privind în special, a următoarelor aspecte:

- Sporirea vitezelor și puterilor la care sînt solicitate elementele componente ale diverselor ansambluri, extinderea temperaturilor de lucru - pozitive sau negative - pe o scară tot mai largă, în condiții de siguranță și durabilitate în exploatare. Acești factori reclamă materiale de construcții cu caracteristici superioare celor folosite pînă în prezent. Astfel, pentru prelucrarea oțelurilor bogat aliate, oțelurilor refractare, plăcuțelor din carburi sau plăcuțelor mineralo-ceramice, materialelor semiconductoare (germaniu, siliciu, cuarț, rubin, ferite etc.) sau titanul tehnic pur tot mai frecvent utilizat în tehnică, se caută continuu metode noi prin care să se atingă o mare finețe dimensională, să se evite schimoșurile structurale în profunzime, să se realizeze o mai mare productivitate și să se ajungă la prețuri de cost minime.

- Dimensiunile de gabarit ale ansamblurilor evoluează către două extreme bine cunoscute: miniaturizarea și ultraminiaturizarea (în special a aparatelor) și construcția unor agregate sau instalații de mari dimensiuni (în industriile metalurgică, construcțiilor de mașini, chimică, în construcția autostrăzilor etc.). Este evident că este vorba de piese cu o mare varietate de forme, cu un grad de complexitate sporit, cu dimensiuni submilimetrice și cu toleranțe foarte strînse, sau de piese cu dimensiuni de ordinul zecilor de metri, asamblate, de exemplu, prin sudare.

Realizarea de alezaje, canale, fante etc. de ordinul micronilor sau chiar de ordinul submicronilor, sudările de piese mici etc., sînt cerințe curente ale industriei care pretind perfecționarea vechilor metode și găsirea altora mai eficiente din punct de vedere tehnic-economic.

- Asimilarea de către industrie a unei metode de prelucrare este determinată și de o grupă de factori cu caracter economic. Prețul de cost al mașinilor, instalațiilor și agregatelor cu ajutorul cărora se prelucreză piesele de serie (un număr redus de piese speciale, în unele cazuri), productivitatea care se poate realiza cu aceste mijloace de producție, și, implicit, amortizarea lor sînt factori care uneori, independent de spectaculozitatea performanțelor obținute, poate promova, sau nu, aplicarea în industrie a metodei experimentată în laborator.

5.1.2. Comparație cu prelucrarea prin așchiere

La realizarea filierelor, necesare trefilării diverselor tipuri de fibre sintetice, se folosea metoda străpungerii alezajelor cu ajutorul unor poansonuri speciale. În ultimul timp, numărul acestora (pentru producția fibrelor din viscoză) a crescut pînă la 1500 pentru o filieră, iar materialul acestora fiind greu așchiabil; în acest caz, scula (de tipul poansonuri multiple) are o fiabilitate redusă. În acest scop, pentru sporirea rezistenței la uzură și coroziune a filierelor, acestea se execută dintr-o ceramică specială, care este mai ieftină și are o fiabilitate de 10-12 ori mai mare, asigurînd o calitate superioară a fibrelor. Străpungerea unor asemenea materiale, cu mijloacele mecanice ale tehnologiei clasice, nu este posibilă. Această prelucrare a putut fi realizată numai cu ajutorul fascicolului laser concentrat. Totuși și aici au fost întîmpinate o serie de greutăți legate de abaterile prea mari de la forma geometrică și dimensională a alezajului (impuse într-un câmp de toleranță nu mai mare de ± 5 micrometri), datorită instabilității emisiunii laser.

Este cunoscut că, la prelucrarea alezajelor, cu cît diametrul scade cu atît tehnologia de prelucrare a acestora este mai dificilă. Prelucrarea cu burghie se poate realiza pînă la diametre de 0,05 mm, pentru care burghiu trebuie să fie executat din oțeluri dure și de construcție specială. Viteza de găurire cu aceste scule este mică ($v_g = 2$ m/min), ca urmare și productivitatea este scăzută, deși turația este foarte ridicată (10000 - 50000 rot/min). Eliminarea așchiilor se face în condiții foarte dificile, aparînd ca urmare o mare frecvență de ruperi de burghie.

5.2. Calculul economiei

Firma americană Comodore, menționează în prospectele sale de specialitate (78, 79) realizarea unei economii de 30000 dolari, ca urmare a folosirii fascicolului laser la perforarea și recon-ditionarea unei game variate de filiere și lagare de cese din rubin.

În țară, la unitățile socialiste unde se utilizează perforarea cu fascicol laser (I.A.E.M. - Timișoara, Întreprinderea de aparatură electronică din Zalău, I.C.P.T.C.M. etc.), documentația existentă nu cuprinde aspectul economic; este în curs de elaborare un calcul tehnico-economic după încheierea seriei zero.

În prezenta lucrare a fost ales, pentru comparație, procedeul de prelucrare prin aşchiere, fiind cel frecvent aplicat în industrie, ca în cazul prelucrării alezajelor înfundate din rubin și safir la I.A.E.M. - Timișoara.

Pretul de cost a fost calculat cu relația (170):

$$C_x = A \cdot x + B \quad (85)$$

unde: A - cheltuieli curente pentru o piesă (lei)

$$A = a + b + c + d + e$$

a - costul materialului; b - costul manoperei $T_{buc} \times sal/oră$;
c - cheltuieli indirecte (regie industrială) : 240 - 700% din manopere pentru ateliere mecanice; 600% pentru mecanică fină;
d - cheltuieli indirecte generale (regie administrativă) 20-25% din cheltuielile a + b + c; e - costul exploatarei instalației timp de un minut, înmulțit cu timpul de bază T_b în minute

$$C_{E.inst} = 2,3 \cdot 10^{-7} \times 1,4 \times C_{inst} \times T_b \quad (86)$$

unde: C_{inst} - costul instalației; $2,3 \cdot 10^{-7}$ - ține cont de amortizarea instalației în circa 12 ani; 1,4 - ține seama de cheltuielile pentru întreținere și reparații.

I) pentru prelucrarea prin aşchiere

a = 20 lei, valoare estimată după datele primite de la IAPM - Timișoara, reprezentând media costului semifabricatului unei pastile din rubin sau safir, $2,5 \times 1,5$;

b = 25 lei, 2500 lei/lună - salariul operatorului; 8,50 lei/oră; s-a considerat 3 ore/piesă (limitile fiind 1,5-8 ore/piesă);

$c = 0,24 \times 25 \approx 58$ lei, 240-350% din manoperă, pentru
stelierele mecanice;

$d = 0,25 (20 + 25 + 58) \approx 25$ lei;

$e = C_{E.inst} = 2,3 \cdot 10^{-7} \times 1,4 \times 70000 \times 180 = 4,0$ lei

$C_{inst} \approx 70000$ lei

$T_b = 3$ ore

$A_I = 20 + 25 + 58 + 25 + 4$ lei = 132 lei

II) pentru prelucrarea cu fascicul laser

$a = 20$ lei, constant, fiind acelaș material;

$b = 1,20$ lei, conținând prelucrarea, verificarea și măsurarea piesei la microscop, centrarea și reglarea patii focale etc., executate de operator; după IAEI - Timișoara: salariu 2500 lei/lună; 2000 piese/lună;

$c = 6,00 \times 1,20 = 7,2$ lei,

600% din manoperă, pentru mecanică fină;

$d = 0,25 (20 + 1,2 + 7,2) = 7,10$ lei,

25% din $a + b + c$;

$e = C_{E.inst} = 2,3 \cdot 10^{-7} \times 1,4 \times 75000 \times 0,5 = 47,5$ lei

$T_b = 0,5$ min

$e = 25-100$, coeficient de corecție al utilizării și recuperării investiției (170)

$A_{II} = 20 + 1,2 + 7,2 + 7,10 + 47,5 = 83$ lei.

B - cheltuieli speciale: costul amortizării și întreținerii dispozitivelor speciale de lucru, a verificatoarelor și sculelor speciale (lei)

$$B = C_{a.i.disp} = C_{disp} \frac{a+i}{100} \quad (87)$$

C_{disp} - costul dispozitivelor și a celorlalte necesarii; se consideră ca dispozitiv complex de centrare, fixare, alimentare, avans micrometric; valoarea sculelor, înlocuirea frecventă și ascuțirea acestora etc.;

$a = 100\%$, cota anuală de amortizare a dispozitive-
lor și celorlalte;

$i = 50\%$, cota anuală pentru întreținerea dispozi-
tivelor.

I) pentru prelucrarea prin aşchiere

$$B_I = 30000 \frac{100 + 5}{100} = 45000 \text{ lei}$$

$$C_{disp} = 30000 \text{ lei}$$

II) pentru prelucrarea cu fascicul laser

$$B_{II} = 190000 \frac{100 + 50}{100} = 285000 \text{ lei}$$

$$C_{disp} = 0,25 \quad C_{inst} = 0,25 \times 750000 = 190000 \text{ lei}$$

Eficiența economică, la 10^4 piese

$$E_{ec_{10^4}} = C_I X - C_{II} X = 1365000 - 1115000 = 250000 \text{ lei}$$

iar pentru 10^5 piese

$$E_{ec_{10^5}} = C_I X - C_{II} X = 13245000 - 8585000 = 4660000 \text{ lei}$$

Producția de la care procedul de prelucrare cu fascicul laser începe să aibă eficiență economică:

$$E_{ec} = C_I X - C_{II} X = 0; \quad C_I X = C_{II} X$$

$$A_I X + B_I = A_{II} X + B_{II}$$

$$X = \frac{B_{II} - B_I}{A_I - A_{II}} = \frac{285000 - 45000}{132 - 83} = \frac{240000}{49} = 4900 \text{ piese}$$

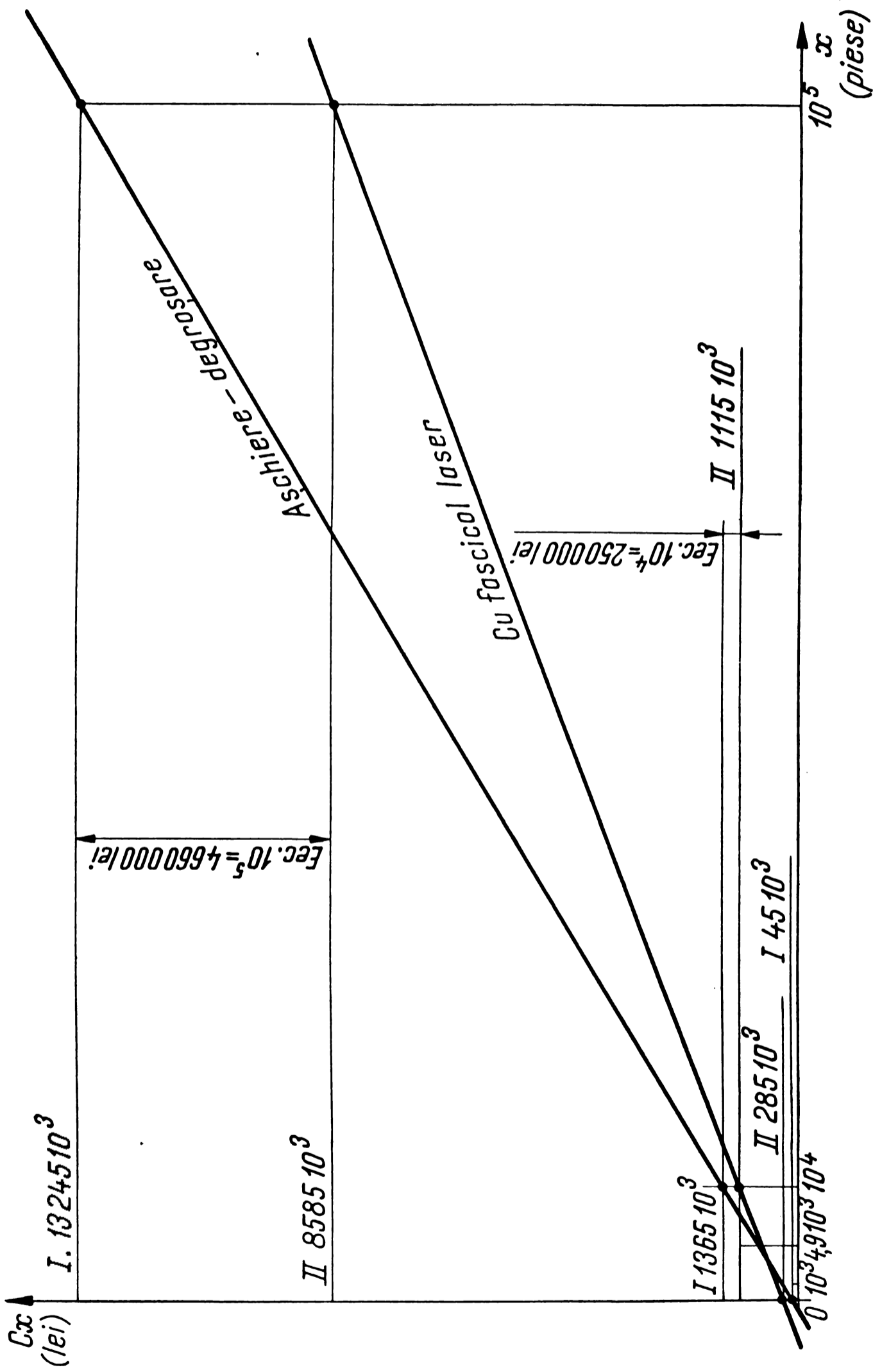
Valorile prețului de cost pentru cele două procedee sînt prezentate în tabelul 21 și fig. 50, din care rezultă eficiența economică a prelucrării cu fascicul laser și producția de eficiență nulă.

Tabolu 21

Tabel comparativ al costului prelucrării pentru X piese

X (număr de piese pre- lucrate)	A (lei/buc)		A · X (lei)		B (lei)		C _I = A · X + B (lei)		OBS.
	I	II	I	II	I	II	I	II	
0			0	0			45000	285000	Preluoraze cu fascicul laser începe să aibă efie- ciență de la
10			1320	830			46320	285830	
10 ²	132	83	13200	8300	45000	285000	58200	293300	
10 ³			132000	83000			178000	368000	4900 piese
10 ⁴			1320000	830000			1365000	1115000	
10 ⁵			13200000	8300000			13245000	8585000	

INSTITUTUL POLITENEI
TIMIȘOARA
SECȚIA CENTRALĂ



110.50

Perioada de recuperare a investiției, în ani (170):

$$P_{an} = \frac{\sum I_s}{E_{ec}/buc \cdot N} \quad (87)$$

unde, $\sum I_s$ - suma investițiilor speciale în lei pentru procedeul de referință

$$\sum I_s = C_{inst} + C_{disp} = 750000 + 190000 = 940000 \text{ lei.}$$

E_{ec}/buc - eficiența economică pe bucată, în cazul unei producții 10^4 și, respectiv 10^5 piese:

$$E_{ec} \cdot 10^4 / buc = \frac{250000}{10^4} = 25,0 \text{ lei/buc}$$

$$E_{ec} \cdot 10^5 / buc = \frac{4660000}{10^5} = 46,6 \text{ lei/buc.}$$

N - producția anuală (piese/an), rezultând:

Tabelul 22

N (piese/an)	$\sum I_s$ (lei)	E_{ec}/buc (lei/buc)		P_{an} (ani)	
		10^4 (piese)	10^5 (piese)	10^4 (piese)	10^5 (piese)
10^5				0,375	0,2
10^4				3,75 ^x	2
$5 \cdot 10^3$	940000	25,0	46,6	7,5	4
$2,5 \cdot 10^3$				15	8
$1,25 \cdot 10^3$				30	16
$0,625 \cdot 10^3$				60	32

Preluarea cu fascicoul laser, în comparație cu burghierea - procedeu frecvent în industria de profil, începe să aibă eficiență economică începând de la o producție minimă de 4900 piese. Pentru o producție lunară de circa 2000 piese (estimată de întreprinderea de aparate electrice de măsură din Timișoara) adică în jur de 10000 piese anual, rezultă că recuperarea investiției poate avea loc în circa 4 ani (tabelul 22).

6. C O N C L U Z I I

6.1. Concluzii generale

Abordarea studiului privind prelucrarea cu fascicul laser concentrat a alezajelor micrometrice în materiale metalice și nemetalice greu așchiable, a permis formularea unor considerații generale asupra întregii problematice, din care se desprind unele contribuții originale aduse în cadrul prezentei lucrări.

Prin tratarea diverselor aspecte teoretice și experimentale, s-a urmărit, printre altele, identificarea fenomenului tehnologic, a mecanismului prelucrării și a formelor geometrice ale alezajelor micrometrice, alegerea regimului optim de prelucrare, identificarea cauzelor principale ale erorilor de prelucrare, stabilirea limitelor preciziei dimensionale și a clasei de calitate a suprafeței, obiective care, într-o anumită măsură, au fost elucidate teoretic și prin încercări practice.

În cadrul cercetărilor experimentale, au fost prelucrate următoarele calități de semifabricate: titan tehnic pur de fabricație USA și URSS, în plăcuțe de 1,0-1,5 mm și folii de 0,02-0,08 mm; alte materiale metalice ca oțel aliat cu crom și nichel, dur-aluminiu, alamă, plăcuțe dure sinterizate din cobalt și titan de fabricație RSR și URSS; materiale nemetalice ca ceramică, sticlă.

Numărul prelucrărilor a fost de 182 pentru titan tehnic pur și 97 pentru alte materiale.

Predominante au fost alezajele străpunse ca fiind frecvent solicitate de economie (circa 70%), în semifabricate cu grosime între 0,02 și 1,5 mm, cu profilurile reprezentative "a" și "b", mai puțin "c" și întâmplător "d".

Au fost utilizate instalațiile laser cu impulsuri din dotarea Catedrei de tehnologia metalelor a Institutului politehnic din București, Institutului de cercetări și proiectări pentru tehnologia construcțiilor de mașini (ICPTCM - MICM) - Compartimentul prelucrări neconvenționale, Secției de laseri a Institutului de fizică atomică din București, Centrului de cercetări nucleare al URASA, Kinshasa, Republica Zaire și Catedrei de fizică a Institutului de fizică din București, cu energii ale semnalului laser între 4 și 25 kJ și durate impulsurilor de la 5 la 25 microsecunde.

Pentru conturarea rezultatelor, obținute în cadrul experimentarilor noastre, s-a considerat necesară compararea acestora cu datele oferite de literatura de specialitate sau alte centre de cercetare de profil. În acest context pot fi rezumate următoarele aspecte și concluzii:

a) Concentrarea unor energii mari prin focalizarea fasciculului laser, poate crea o uriașă energie calorică în pate focală de $2,5-2,75 \cdot 10^6$ cal/cm², care în cazul repartizării pe suprafețe foarte mici (de exemplu 10 micrometri) realizează o temperatură de 8000-18000° C, având ca efect vaporizarea, prin micro-explozii, a materialului din zona prelucrării.

b) Prelucrarea alezajelor cu fascicul laser prin impulsuri este posibilă în domenii foarte variate, putând răspunde unui șir de cerințe actuale ale tehnicii și tehnologiei.

c) Parametrii determinanți ai procesului tehnologic, în vederea obținerii de alezaje cu precizia și calitatea impuse, sînt: energia semnalului, durata impulsului, poziția focarului, caracteristicile fizico-mecanice ale semifabricatului ș.a., astfel:

- forma și profunzimea alezajelor depind de volumul de energie al procesului (echivalent cu volumul de material eliminat la un singur impuls), raportat la unitatea de lungime a penetrării; cele str-punse pot fi realizate numai la o energie critică de radiație a generatorului cuantic; la cele infundate adîncimea alezajului crește odată cu energia semnalului;

- diametrele alezajelor sînt variate, în cadrul unui grup de încercări, funcție de temperatura elementului activ care a modificat energia radiației laser;

- la grosimi reduse ale semifabricatelor (folii), diametrele de intrare și ieșire sînt aproximativ egale;

- sînt fost obținute diametre micrometrice (menționate și de literatura de specialitate) de minimum 0,001 mm și maximum 2,0 mm;

- la energii mari de radiație, pe pereții alezajelor sînt rîmăș derivelări și proeminențe, ca efect al interacțiunii fasciculului laser cu materialul semifabricatului.

d) La baza formării alezajelor micrometrice stau procese termodinamice complexe (avînd ca fenomen principal interacțiunea razei laser cu materialul semifabricatului) care realizează două faze distincte:

- faza evasistatică: materialul este topit și sub acțiunea presiunii hidrostatice și fenomenului de capilaritate este împins în profunzimea și pe pereții alezajului; ecranarea pereților (de regulă cu depunere masivă de metal topit), constituie principala cauză de formare conică a orificiilor;

- faza dinamică: materialul supraîncălzit este aruncat din cavitate printru fasciculul laser și peretele alezajului, care erodează și dă forma teșită a intrării; o parte din metalul lichid este depusă sub formă de guler; partea conică de la fundul alezajului este cauzată și de distribuția inegală a densității energiei în secțiunea fasciculului laser.

Fenomenul tehnologic este comun alezajelor infundate sau strapunse, numai că, la cele strapunse la finele fazei termodinamice, materialul supraîncălzit se deplasează în același sens cu raza laser.

e) Prezenta lucrare facilitează introducerea unei noi tehnologii de fabricație în industria noastră constructoare de mașini, cu deosebire în domeniul prelucrării pieselor din instalațiile miniaturizate.

Prelucrarea cu fascicul laser, în comparație cu burghierea, începe să aibă eficiență economică începînd cu producția de aproximativ 5000 piese. Recuperarea investiției poate avea loc pentru o producție anuală de circa 10000 piese.

6.2. Contribuția originală

Lucrarea conține șase capitole (total 140 pag.), din care capitolul trei (total 92 pag.) reprezintă o modestă contribuție prin obiectivele problemei abordate și aspectele desprinse, precum și prin maniera metodologică de a da o interpretare fenomenologică a procesului tehnologic și un caracter practic tuturor experimentărilor, iar, de la caz la caz, intenția noastră a fost să căutăm și o justificare teoretică a acestora.

Din contribuțiile originale, menționăm:

- Interpretarea matematică, prin ecuațiile lui Maxwell, a mecanismului interacțiunii dintre raza laser și semifabricat, considerînd cazul particular că metalele sînt opace și mate.

- Confirmarea, prin încercări, că numai la energii critice ale semnalului laser are loc străpungerea semifabricatului.

- Caracterul procesului interacțiunii și intensitatea acestuia, precum și durata de desfășurare a fazelor quasistatică și dinamică, depind, în principal, de poziția pteii focale, ca și de caracteristicile termofizice și optice ale semifabricatului, parametri energetici ai razei laser etc. (Capitolul 3.1).

- Identificarea formelor geometrice reprezentative ale alezajelor infundate și strapunse, pe baza culegerii unui număr considerabil de date ale prelucrărilor cu fascicol laser, rezultînd că acestea depind, în principal de poziția focarului, la aceeași energie a semnalului laser (Capitolul 3.2).

- Stabilirea ecuațiilor inițiale ale parametrilor L_2 și l_2 precum și a coeficienților acestor ecuații, rezultînd, în final, tabeluri - abace pentru determinare a regimului optim de prelucrare necesar realizării unor anumite diametre și adîncimi ale alezajelor (Capitolul 3.3).

- Concretizarea cauzelor principale ale erorilor de prelucrare privind diametrul și lungimea alezajelor, pe baza corelării și sistematizării unui număr însemnat de date referitor la dimensiunile alezajelor prelucrate, coroborate cu parametrii regimului de lucru, starea elementelor componente ale instalației cuantice, condițiile de lucru etc. (Capitolul 3.4).

- Stabilirea limitelor preciziei dimensionale a alezajelor micrometrice, pornind de la un studiu analitic al parametrilor (fenomenele termice, îmbatrînirea elementelor optice componente, regimul nestaționar al generatorului, abaterile dimensiunilor sistemului optic) determinanți ai cîmpului de dispersare a erorilor, pentru diametre și adîncimi (Capitolul 3.5).

- În ceea ce privește proprietățile fizico-mecanice ale stratului influențat termic, contribuția personală constă numai în culegerea și sistematizarea, precum și interpretarea datelor în concordanță cu aspectele conexe ale experimentarilor noastre (Capitolul 3.6).

- Localizarea celei mai înalte finete a suprafeței, în zona centrală a alezajelor micrometrice prelucrate cu fascicol laser, pe baza analizei profileogramelor ridicate.

- Constatarea existenței unei suprapunerii a noțiunilor de macrogeometrie și microgeometrie, pentru alezajele micrometrice în folii care nu depășesc 2,5 mm (cazul experimentărilor noastre) (Capitolul 3.7).

x

x x

- Prelucrările din literatura de specialitate au fost prelucrate în vederea adaptării, confruntării sau confirmării rezultatelor obținute de noi; au existat unele cazuri, menționate în cuprinsul lucrării, în care concluziile noastre, bazate pe experimentare, au fost în contradicție cu cele semnalate de alți autori.

- Semnalăm volumul mare de experimentări executate de noi (peste 270), în etape și țări diferite, cu instalații cuantice ale caror performanțe și regimuri de lucru au fost diferențiate.

6.3. Privind aplicarea în industrie

Participarea la realizarea Contractului de cercetare nr. 76 din 10.02.1975 I.P.B., între Institutul politehnic București ca executant și Centrala Industriei Confecțiilor din București ca beneficiar, anexat în copie.

Asistență tehnică și schimb de experiență reciprocă, în faza incipientă cu întreprinderea de aparate electrice de măsură din Timișoara, privind prelucrarea alezajelor micrometrice cu fascicol laser concentrat, în lagăre de safir și rubin sintetice.

Participarea prin consultare și asistență tehnică, în anul 1974, la realizarea filierei din diamant industrial de către Institutul de cercetări și proiectări pentru tehnologia construcțiilor de mașini, cu ajutorul cărora au fost trezilate 25 tone conductori din cupru de 0,05 mm, în cadrul întreprinderii de cabluri și materiale electro-izolante din București.

Aspectele și rezultatele cercetărilor au fost transmise celor interesați (prin comunicări la sesiuni, fascicole multiplicat, contact direct cu specialiștii în domeniu, participare la punere în funcțiune a instalațiilor cuantice și la încercări), per

tru a fi luate în considerație sau aplicate în unitățile economice de profil, ca de exemplu: întreprinderea de aparate electrice de măsură din Timișoara, întreprinderea de elemente componente și circuite electrice din Curtea de Argeș, întreprinderea de aparatură electronică din Zalău, Atelierul de prototipuri din cadrul Institutului de cercetări și proiectări pentru tehnologia construcțiilor de mașini din București.

X

X X

În ceea ce privește perspectiva utilizării fascicolului laser la prelucrarea alezajelor micrometrice, am menționa :

- din punct de vedere teoretic și practic, estimăm că aplicarea tehnologiei de prelucrare cu fascicol laser concentrat, prezentată în această lucrare, se va dezvolta, concretiza și extinde în industrie, atât în domeniul alezajelor micrometrice, cât și al tăierii, sudării etc.;

- pentru cei care folosesc sau vor aborda acest domeniu al prelucrării, estimăm ca prezenta lucrare constituie o bază de plecare, un pas realizat pe un drum mai puțin umblat, la care se pot face inerentele adaptări, îmbunătățiri sau chiar infirmări ale rezultatelor teoretice și experimentale obținute în timpul cercetărilor noastre;

- în intenția noastră, se conturează pentru viitorul apropiat: participarea la asistența tehnică și la cercetarea teoretică și experimentală din întreprinderile care aplică și care urmează să utilizeze prelucrarea cu fascicol laser; aprofundarea, în acest context, a cercetării privind: proprietățile fizico-mecanice ale stratului superficial de pe peretele alezajului; îmbunătățirea calității suprafeței și parametrilor dimensionali ai alezajelor; perfecționarea tehnologiei de prelucrare cu fascicol laser concentrat și utilizarea altor procedee ajutătoare, conexe și suplimentare; abordarea cercetării experimentale și teoretice, privind tratamentul termic de calire superficială prin laser etc.;

- pentru obținerea unor eficiențe, privind principalele rezultate experimentale și teoretice obținute, se considera necesară o colaborare între toate unitățile cu profil de cercetare sau producție din țară.

x

x x

Rezultatele obținute, constituind principalele contribuții experimentale și teoretice privind prelucrarea cu fascicol laser a alezajelor micrometrice, precum și unele investigații în domeniul utilizării instalațiilor cuantice, au fost comunicate sau publicate, în perioada 1974-1977, prin următoarele căi:

- Sesiunea științifică "Tehnologii și metode moderne de calcul în industria constructoare de mașini", 16-17 noiembrie 1974, Institutul politehnic București, 4 comunicări multiplicat și cuprinse în fascicola secției a IV-a - Tehnologii neconvenționale;

- "Forum" - Revista învățământului superior, nr.3, 1974, p.6-22, Unele sugestii privind patrunderea nouității științifice în procesul de învățământ;

- "Ateneu" - Revista social-culturală, nr.4 (117), 1974, p.8, Domeniile de graniță - o caracteristică a științelor actuale.

- În cadrul sesiunilor științifice ale cadrelor didactice din aprilie 1975 și decembrie 1976 organizate de Universitatea Națională din Zaïre, Campus de Kinshasa, cu 2 comunicări;

- Conferința "Lezvoltarea industrială a tehnologiilor neconvenționale: din 22-25 noiembrie 1977, organizată de Consiliul Național pentru Știință și Tehnologie și Ministerul Educației și Învățământului, cu 2 comunicări.

x

x x

Adresez, pe aceasta cale, sincere mulțumiri tovarășului profesor emerit, Doctor inginer Gheorghe Savii, pentru bunăvoința, deosebita competență și înaltul spirit de muncă angajată și responsabilă în calitatea Dorniei sale de conducător științific.

Totodată, îmi exprim recunoștința față de toți cei care m-au sprijinit la asigurarea condițiilor în timpul documentării, experimentărilor și justificării teoretice, precum și pentru finalizarea prezentei lucrări.

BIBLIOGRAPHIE

1. Maerke, Horst und Blankenberg; Einführung in die Laser, Leipzig, Geest und Portig 1966, 182 p.
2. Chirulescu T.; Electronics nr.6, 1972, Progresele științei 8 și 7, iulie 1972, p.354, Bibl.Centrală.
3. Lattland A.; Lasers Physics, North-Holland, 1972, Bibl.IFB.
4. Moskovich V.S.; Laser Kinetics, American Elsevier Publishing Comp. Inc., 1967, Bibl.IFB.
5. Popescu Nicolae; Laser-laser, București, Ed.Militară, 1966, 175 p.
6. Häs D.; Laser (Lichtverstärker und Oszillatoren), Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main, 1970; Bibl.IFB.
7. Masera; Gordon Group., London, Methuen et. Co Ltd., 1967; Bibl.IFB.
8. Siegman A.E.; Microwave Solid-state Masers Mc.Graw-Hill, Book Comp., 1969; Bibl. IFB.
9. Quantenelektronik-Einführung in die Grundlagen der Laser und Lasertechnik, Friedr., Vieweg und Sons, 1968, Bibl.IFB.
10. Pantell H.H. and Ruffhoff H.E.; Fundamentals of Quantum Electronics, John Wiley and. sons Inc., 1969, Bibl. IFB.
11. Klein W. and Müller H.; Laser, Spring Verlag, 1969, Bibl. IFB.
12. Cucurezeanu Ilie, Lăzărescu Dan; Laserii, București, Ed. T.intă, 1966.
13. Häs Dieter; Laser Leckverstärker und Oszillatoren, Frankfurt am Main, 1966, XVII, 722 p.
14. Averianov G.L., Litkin L.J., Filipițki L.F., PLFT, nr.6, 1965.
15. Abartmanjan B.V., Basov A.G. ș.a.; J.E.T.P., V.48, nr.6, p.1583-1587; 1965.

16. Askarjan G.A., Moroz A.M.; J.E.T.P., 1962, 43, nr.6, p.2319-2321.
17. Askarjan G.A., Prohorov A.M., g.a.; J.E.T.P., 1963, nr.6, pag.2180-2182.
18. Afanasev M.Y.; I.S.S., T V, nr.2 august 1966, p.138-144.
19. Basov M.G., Prohorov A.M.; Astura" 1958, nr.7.
20. Basov M.G., Zuev V.S.; J.E.T.P., 1962, V.43, nr.1 (7), p.353.
21. Basov M.G.; Zuev V.S. g.a.; J.E.T.P., 1965, V.48, nr.6, p.1962.
22. Bennet V., Hivers S.; Laseri cu gaze, utilizare pe corpuri solide, MIZ, 1964.
23. Bonci - Bruevici g.a.; J.P.S., V.1, nr.3, 1964, p.11.
24. Borecneev M.A.; Analiza calității și preciziei la prelucrarea cu laseri, Maspin, 1976.
25. Vejlsteke A. ; Bazele teoriei amplificatoarelor și generatoarelor cuantice, Vaxsovia, 1972.
26. Guter R.S.; Elementele analizei numerice și prelucrării matematice a experiențelor, Kfln, P.A.Z., 1969.
27. Danzmayr B.; Teoria oscilațiilor de relaxare în lasere optice, 1970.
28. Ditcibern R.; Optica fizică, Nauka, 1965.
29. Igorov V.A.; Aparate optice de control și măsurarea rugozității, Maşinostreene 1971.
30. Schöchner A.; Conversări pe reze laser, rev. Flacăra 21, nr.30, 22 iul.1972, p.10-11, Bibl.Centrală.
31. Zelăevici Ja. B., Rajzer Jv.P.; Fizica undelor de șoc și secțiunilor termo-hidrodinamice, Nauka, 1972.
32. Zelotyk B.L.; Bazele fizice de prelucrare a energiei concentrate, a metalelor, Gostehizdat, 1973.
33. Brotverton M.; Laser und laser, Frankfurt am Main, Umschau Verlag, 1966, 164 p.
34. Landiel B.; Laseri, Kir, 1972.
35. Iragănescu V., Radiațiile laser și proprietățile sale, Rev.de fizică și chimie, serie A 8 nr.9, sept.1971, p.321-329.

36. Kargos I.S.; Surse ale impulsurilor de lumină, Gosenergizdat, 1969.
37. Klinger H.; Laser, Stuttgart, Telekosmos-Verlag, 1964, 124 p.
38. Lagkevič V.S.; Bazele cineticii de radiație a laserilor, Belgrad, 1970.
39. Schawlow A.; Optical masers, 1969, Moskva, 116 p.
40. Micaeljan A.Z.; Generatoare optice cu mediu activ solid, Sovetskoe Radio, 1969.
41. Prochorov A.M.; J.E.T.P., 1969, V.34, nr.6, p.288-290.
42. Titova T.A.; Cercetarea descărcării cu impulsuri la tensiuni joase, teză de doctorat 1968.
43. Pabelinskij I.J.; Dispersarea moleculelor luminii, Nauka, 1968.
44. Hromov A.V.; Probleme radioelectronice, 1969, V.10; 1970, V.15.
45. Șevalov A., Koghel S.; Generatoare cuantice optice-lasere, 1968.
46. Dicționar englez-rus despre laseri și tehnica razelor infraroșii, Moskva, Izd. Ministerstia Oboronii, 1968.
47. Tazhov G.A.; Prelucrarea metalelor cu raze de lumină focalizate, din culegere de articole despre experiența folosirii metodelor electrofizice și electrochimice la prelucrarea metalelor în industrie, Moskva, GOSIBTI, 1971.
48. Popescu I.K.; Laserii și aplicațiile lor, Tribuna școlii 2 nr.70, 18 nov.1972.
49. Bogoran A.B.; O sută de utilizări ale laserului, ziarul Moskva seara, 22 sept.1967.
50. Lucrările Conferinței Naționale de Electronica, 1968, vol. XVIII, p.929.
51. Catalogul firmei Carl Zeiss - I.D.B., 1971.
52. Catalogul firmei Compania telegrafică generală, Franța, 1969.
53. Bobulescu B.; Laseri cu frecvență variabilă, comunicare la Sesiunea 1973, I.F.A.

54. Progrese din semiconductori și tehnologia solidelor - starea solidă, 1972, Roma, Ed. Min. Telecomunicații.
55. Catalogul firmei BRADLY Limited, Anglia, 1971.
56. Revista Inginerului american, 1971, nr. 7, p. 77-81.
57. Lucrările Conferinței Naționale de Electronică, 1969, XII, p. 607-619, Paris, sinteza comunicărilor.
58. Lucrările Conferinței Naționale de Electronică, 1970, XVI, p. 554-573.
59. Kurdt A.G.-p.; 1969, Haga, p. 34.
60. Rezultate experimentale în industrie, Ed. Wiley și fii, Chapman and Hall, London 1971.
61. D'Hinens L.I.; Cuantuz electronic, Paris - N.-York, 1970, p. 1131.
62. Detşain M.O., Anzel L.I.; Cuantuzul electronic, A 3-a Conferință Internațională, Paris, I, Paris - New York, 1964, p. 831.
63. Beeson, R.C.; I.E.E.E., in Transporturilor, 1970, E.T.F.-8, nr. 1, p. 18.
64. Dragomirescu V., Popescu Ion M., Vasiliu V.; Laserii și unele aplicații în știință și tehnică, Ed. Tehnică, București, 1969.
65. Masters J.I., Wood J.K.; Procese I.E.E.E., 1969, v. 51, nr. 1, p. 221.
66. Kendall J.W.; Optical Coherence Computers, Boston, 1972, Bibl. I.F.A.
67. Karlsons O., Falveg T.J.; Fizică aplicată, 1969, New-York, nr. 11, p. 3407.
68. Longaker P.R., Kuff K.J.; Experiințe cu raza laser concentrat asupra corpului solid, Institutul tehnic Lincoln, Stat Massachusetts, 1971, VII nr. 1, p. 698.
69. Mc.Clung. F.J., Hellvert R.V.J.; Fizică aplicată, 1968, nr. 3, p. 828.
70. Alexandrescu R., Velculescu V.; Asupra temperaturilor locale obținute prin iradiere cu fasciul laser, Studii cercetări de fizică 23, nov., 1971, p. 593-602.

71. Vent J.J.; Proc.I.E.E.E.,1971, nr.6, p.716.
72. Dragomirescu V.; Laserul - unecultă de mare finețe a tehnologiei moderne, Știință și tehnică 22, nr.8, august 1971, p.10-11.
73. Helfrich J.J.J.; Fizica aplicată, 1971, nr.4, p.1000.
74. Medi I.F.; Efectele absorbției radiației laser, Revista fizica aplicata, 1969, nr.2, p.462-468.
75. Georgescu Mircea; Miraculosul laser, rev. Știința pură, nr.4, ianuarie 1972, p.22-24, Biblioteca Centrală.
76. Camp E.M.; Handbook of Lasers, 1974, Boston, Bibl.ICPET.
77. American Machinist, Laser welding simplified, nr.20, p.70, 1973.
78. ICDT; Culegeri de traduceri privind "Utilizarea laserilor", Cz 621375. 9. 535.2., 1973, C.L.S.T.
79. ICDT; Culegeri de traduceri, Laserul și aplicațiile sale, București, 1971, 59 p., Bibl.Centrală.
80. Dala R., Fernie C.; Laseri cu corp solid și aplicații, Revista de fizică și chimie, seria A 8, nr.10, oct.1971, p.388-400, Bibl.Centrală.
81. Popescu Ovidiu I.; Considerații asupra utilizării instalațiilor cu laser interferometric la controlul lungimilor, Construcția de mașini 25, nr.1, ian.1973, p.33-38, Bibl.Centrală.
82. Georgescu Claudine; Structurile subțiri, Componente ai laserilor, Revista de fizică și chimie, seria A 9, nr.9 sept.1972, p.321-324, Bibl.Centrală.
83. Hesso Arvin; A lasersului la laseris, Cluj, "Dacia" -1972, 119 p, Biol. Centrală.
84. Agafitei A., Fernie C., Izbănescu M.; A Switched Ld.glass laser, revue roumain de physique, 17 nr.8, 1972, p.1001-1004, Bibl.Centrală.
85. Dragănescu, Axente, Comănicu; Laser cu biclid de carbon de mare putere, studii și cercetări de fizică 24 nr.4, 1972, p.339-400, Bibl.Centrală.

86. Duțu C.A.; Stabilizarea în frecvență prin control de fază a unui laser cu CO_2 monocod-monolin; Studii și cercetări de fizică, 24 nr.5, 1972, p.335-344, Bibl.Centrală.
87. CO_2 laser, Roumainien Engineering 7 nr.3 iulie-sept.1972, p.32, Bibl.Centrală.
88. Cătuneanu M., Stănescu Vlad Valentin; Sistem acustic-optic de diflexie a fascicolului laser și telecomunicații, 2 nr.5, 1972, p.217-220, Bibl.Centrală.
89. Cojocaru A., Velculescu V.G.; Plasma obținută cu ajutorul fascicolului laser, Progresele științei 8 nr.1 ian.1972, p.1-8, Bibl.Centrală.
90. Dorobanțu I.A.; Laseri în regim declanșat - unele aspecte teoretice, studii și cercetări de fizică, 24 nr.10, 1972, p.159-1269, Bibl.Centrală.
91. Prohorov A.; Laserul în avangarda tehnologiei moderne, Știința 40 nr.8639, 16 dec.1970, p.6.
92. Acțiunea iradiațiilor laserului (L.rusă), Moscva, 1968.
93. Măzilu Petre, Ioan V.; Laserii și aplicațiile lor în industrie, București, 1968.
94. Laser technology and application, New York, 1968.
95. Laser Sistem and application, Oxford, 1967.
96. Engineering proceedings P-46; Laser tehnology: welding, machining and safety, 1969.
97. I.D.T.; Culegere de traduceri, Laserul și aplicațiile sale, 1971.
98. Condrea Sergiu; Utilizarea laserului, București, 1971, ICDF.
99. Laser Handbook, Edited F.F. Arecchi and E.J. Schults-Dubois, vol: 1,2. 1974.
100. Laser application, Edited by Monte Ros, vol.I, New-York, Academic Press, 1975.
101. Lytel Allan; Abo's of lasers and masers, New-York, 1975.
102. Orzag A.; Les lasers. Principes, réalisations, applications, Paris, 1968.

103. Charaban S.S.; **Laser in Industry**, Western Electric Ser., 1974, Boston.
104. Marshall S.L.; **Laser Technology and Application**, 1972, New-York.
105. Goldman Leon, Hockwel James; **Application of the laser**, new ed. (A "Uniscience" Tr. Ser), 1972, New-York.
106. Brown Ronald; **Laser: Tools of Modern Technology**, 1973, Larousse, collection tehnic d'hojoud'hui, traduction de Th. de Galiane.
107. Carroll John m.; **Story of the laser**, rev.ed. (illus) 1974, rev. ed. illus, Dutton, p-525-532, New-York.
108. Flion H.A.; **Laser Systems and Application**, 1972, Pergamon.
109. Kallard Thomas; **Exploring Laser Light, Experiments and Demonstrations (illus)**, 1974, Optosonic.
110. Society of Photo-Optical; **Development in LASER TECHNOLOGY Instrumentation Engineers, Seminar Proceedings vol.20, rd. Boss Norte, 1976.**
111. Beeley M.J.; **Laser and Their Application (Illustr)**, 1974, New-York, ISNE, pag.288-292.
112. **Journal of Applied Physics**, march 1973, v.44, nr.3; p-1168: Heating of plasmas by pulsed CO₂ lasers; p-1380: Observation of a core in an exploded lithium wire plasma by reflection of laser light. Parametric heating of a dense arc plasma with 0,337 μ m laser radiation.
113. Call of write free color brochure, **COHERENT RADIATION**, p.1, 3210 Porter Drive, Palo Alto California, febr. 1973.
114. Call of write free color brochure, **Why a Metrologic Laser**, Bulletin S.301, p.21, febr.1973.
115. Mehedințeanu Margărit; **Investigații și unele rezultate asupra sudării prin puncte a tablelor galvanizate, precum și a tablelor din aluminiu, oțel inoxidabil etc.**; Uzina de utilaj chimic "Reviză Roșie" 1971.

116. Halasz Daniel; Experiments with solar energy, rev. New-York, 1975, p.18-21.
117. Ing. Anghel Iulian și Ing. Mehedințeanu Mărgărit; Studiu, experimentare și realizare practică (proiectarea tehnologiei și standardii) pentru sudarea în baie de zgură a recipientilor din oțel refractar, 1971, Uzina de Utilaj chimic "Grivița Roșie".
118. Cătinoc Măscan; Primul lase românesc cu coloranți, "România liberă", 27.12.1973.
119. Mehedințeanu Mărgărit; Un mod de alegere a tehnologiei optime de sudare a titanului tehnic pur și a aliajelor sale, Rev. Construcția de mașini, august 1971.
120. Mehedințeanu Mărgărit; Titanul în construcția de mașini, Comunicare în buletinul Institutului Politehnic Iași, februarie 1972.
121. Mehedințeanu Mărgărit; O peliculă de separație fragilă, inevitabilă încă la sudarea cu arc a placajului titan-oțel, Rev. Construcția de mașini, oct. 1972.
122. Mehedințeanu Mărgărit; Anticipări privind prelucrarea orificiilor cu fascicul laser, Comunicare la Sesiunea științifică de la Universitatea din Galați, mai 1972.
123. Mehedințeanu Mărgărit; Stocarea și redarea informațiilor prin laseri; referat prezentat în catedra Tehnologie metalelor a Institutului Politehnic București, 03.01.1974.
124. Mehedințeanu Mărgărit, Teușan Maria, Bătaru A.; Contribuții privind protecția muncii și tehnica securității la utilizarea instalațiilor laser; Comunicare la Sesiunea științifică a Institutului Politehnic - București, 1974.
125. Mehedințeanu Mărgărit; Prezența ale laserului în medicină, referat prezentat în catedra Tehnologie metalelor a Institutului Politehnic București, 03.01.1974.

126. Mehedinteanu Mărgărit; Unele aspecte privind evoluția procesului de formare a orificiilor micrometrice prelucrate cu fascicul laser în materiale dure (titan tehnic pur, diamant industrial); Comunicare la Sesiunea științifică a Institutului politehnic-București, 1974.
127. Mehedinteanu Mărgărit; Privind randamentul prelucrării orificiilor cu raza laser prin impulsuri; Comunicare la Sesiunea științifică a Institutului politehnic-București, 1974.
128. Mehedinteanu Mărgărit, Cioglanan M.; Dotări și amenajări necesare spațiilor de utilizare a instalațiilor laser; comunicare în cadrul colectivului din compartimentul Prelucrări neconvenționale din Institutul de cercetări și proiectări pentru tehnologia construcțiilor de mașini (ICPICA), mai 1974.
129. Mehedinteanu Mărgărit; Realizări și perspective ale integrării învățământului superior cu cercetarea și producția, Revista "horum" nr.3 martie 1973.
130. Mehedinteanu Mărgărit; Unele perspective privind utilizarea laserului, Comunicare la Sesiunea științifică a Institutului politehnic-București, 1973.
131. Mehedinteanu Mărgărit; Prelucrarea cu laser a clezajelor micrometrice în folii de Ti tehnic pur, Buletinul Institutului politehnic-București, nr.6, 1973.
132. Mehedinteanu Mărgărit; Tehnologia materialelor și mașinării, 1971, curs litografiat, pentru studenții facultății de Electrotehnică, Institutul politehnic-București, 192, pag.70 figuri; tiraj 560.
133. Mehedinteanu Mărgărit; Indrumător pentru laboratorul de sudare, 1969, Institutul politehnic-București, 150 pag., 80 figuri.

134. Mehedinteanu Mărgărit; Technologie des matériaux et machines-outils; cours lithographié, pour les étudiants de la faculté Polytechnique du Campus de Kinshasa, Université Nationale du Zaïre, 1976.
135. Mehedinteanu Mărgărit; La métrologie; cours lithographié, pour les étudiants de la faculté Polytechnique du Campus de Kinshasa, Université Nationale du Zaïre, 1977.
136. Mehedinteanu Mărgărit, Kabamba Mupapi; Quelques considérations au sujet de l'usinage à laser des plaques minces de matériaux durs; Communication à la Session Scientifique de la faculté Polytechnique, Campus de Kinshasa, ZAIRE, 1977.
137. Mehedinteanu Mărgărit; Kabeya Kanene; Les laser dans la construction de machines, Revue de l'Enseignement nr.5, p.12-14, 1976, ULAZA, Zaïre.
138. Mehedinteanu Mărgărit, Băloiu L.; Unele sugestii privind pătrunderea noutăților științifice în procesul de învățămînt, Revista "Forum" nr.3, anul XVI, martie 1974, p.16-22 (laserul aplicat în stocarea informațiilor și în medicină).
139. Mehedinteanu Mărgărit; Măsurî preconizate pentru îmbunătățirea conținutului activităților practice ale studenților, Revista "Forum" nr.6, anul XVI, iunie 1974, p.6-12 (cu referire la abordarea tehnicii moderne în programele de practică - accesul studenților la utilizarea laserilor).
140. Mihai Dragoman; Practica în producție a studenților, "Era Socialistă" nr.15, 1974, LIV august; Opinii asupra articolului din "Forum" nr.6, iunie 1974 privind practica studenților, de inspector în M.E.I., Mehedinteanu Mărgărit.
141. Mehedinteanu Mărgărit; Imperative ale cooperării între științe - "Lozenile de graniță, o caracteristică a științelor moderne", Revista "Ateneu" anul 11, nr.4 (117), aprilie 1974.

142. Mehedințeanu Mărgărit; Contribuție privind identificarea principalele efecte distructive ale atmosferei asupra semnalului laser, Sesiunea științifică a Institutului politehnic-București, secția Tehnologii neconvenționale, noiembrie 1974.
143. Mehedințeanu Mărgărit; Vibrațiile în procesul de prelucrare, influența acestora asupra preciziei de prelucrare, comunicare în colectivul de catedră - Tehnologia metalelor, Institutul politehnic - București, 16 februarie 1972.
144. Mehedințeanu Mărgărit; Principii constructive ale generatorilor cuantice cu laseri, comunicare în colectivul de catedră - Tehnologia metalelor, Institutul politehnic-București, mai 1972.
145. Mehedințeanu Mărgărit; Laserul în tehnologia construcției de mașini, comunicare în colectivul de catedră - Tehnologia metalelor, Institutul politehnic - București, noiembrie 1972.
146. Mehedințeanu Mărgărit; Laserul instrument al tehnicii moderne, comunicare în colectivul de catedră - Tehnologia metalelor, Institutul politehnic - București, 1973.
147. Mehedințeanu Mărgărit; Indicații tehnologice privind tratamentul termic și duritatea obținută la oțelurile de calitate OLC35 și OLC45 (STAS 880-61). Lucrare întocmită, cu finalizarea practică în fabricarea ciocanelor pneumatice, conform contract de colaborare cu U.M.G.B.-nr.989 din 08.10.1971.
148. Mehedințeanu Mărgărit; Contribuție și unele constatari privind cauzele de sporire a preciziei dimensionale a orificiilor prelucrate cu fascicul laser, Sesiunea științifică a Institutului politehnic - București, secția Tehnologii neconvenționale, noiembrie 1974.
149. Mehedințeanu Mărgărit; Contribuție privind stabilirea regimului optim de prelucrare a orificiilor cu fascicul laser; Cea de a IV-a Conferința re-

publicană, Universitatea - Braşov, 1973.

150. Mehedinteanu Margărit; Realizări în domeniul tehnologiei prelucrării cu fascicul laser, privind fenomenul specific orificiilor micrometrice, Referat doctorat, septembrie 1975, Institutul politehnic - Timişoara.
151. Mehedinteanu Margărit; Stadiul actual în domeniul prelucrării cu fascicul laser a orificiilor micrometrice în titan tehnic pur şi alte materiale metalice şi nemetalice, Referat doctorat, Septembrie 1975, Institutul politehnic - Timişoara.
152. Mehedinteanu Margărit; Studiu comparativ între procedeul de prelucrare cu fascicul laser şi celelalte procedee convenţionale şi neconvenţionale a alezajelor micrometrice, Referat doctorat, septembrie 1975, Institutul politehnic - Timişoara.
153. Mehedinteanu Margărit, Contribuţii privind identificarea cauzelor principale ale erorilor de prelucrare a alezajelor micrometrice cu fascicul laser, Comunicare la Conferinţa pentru dezvoltarea industrială a tehnologiilor neconvenţionale, noiembrie 1977, Institutul politehnic - Bucureşti.
154. Mehedinteanu Margărit; Contribuţii privind stabilirea limitelor preciziei dimensionale a alezajelor prelucrate cu fascicul laser concentrat, comunicare la Conferinţa pentru dezvoltarea industrială a tehnologiilor neconvenţionale, noiembrie 1977, Institutul politehnic-Bucureşti.
155. Găbrileş I., Gărlăanu L.; Prelucrări electrice în construcţia de maşini, Ed. tehnică, 1962.
156. Suminov V.M., Promislov A.V., Sevarevski A.K., Kuzin B.G.; Obrabotka detalai lucimn lazera, Izdatelctvo Maşinostroenie, Moskva, 1969.
157. Drude P.; Optica, "Moskva", Moskva, 1965.
- 158.

159. Aurel Manu; Tehnologie materialelor, E.D.P. - București, 1977.
160. Gheorghe Savii, Gheorghe Cojocaru; Flexibilitatea în fabricația de mașini, Editura "Eclat"-Timișoara, 1977.
161. Landsberg G.S.; "Optica", Gos., ind.-va., Moskva, 1973.
162. Drăgan C.; Toleranțe și măsurări mecanice, Ed. tehnică, 1971.
163. Metode de calculul generatoarelor cuantice optice. T₁, redactor Stepanov A.L., (Acad. de științe URSS), "Nauka i tehnika", Minsk, 1966.
164. Enache Ștefănuță; La qualité des surfaces usinées, Ed. LOROD, Paris, 1972.
165. Proceedings of the National Electric Conference, 1976, XIX, p.554-573.
166. Bogores A.B.; O cută de posibilități ale laserului, "Nauka", Moskva 1972.
167. Tarhov G.L.; Prelucrarea metalelor cu rază de lumină focalizată. Din culegerea de articole despre "Experiența folosirii metodelor electrofizice și electrochimice la prelucrarea metalelor în industrie", Moskva, GOSINTI, 1974.
167. Manu A., Drăgan O., Ieșarie I.; Elemente de calcul al eficienței tehnico-economice la prelucrarea metalelor prin eroziune electrică, Construcția de mașini, 21(4), 232-235, 1969.
168. Giegloman M.; "Construcția de mașini", nr.2-3, 1977.
169. Manu Aurel; Tehnologie materialelor, Ediția II, E.D.P., pag.349-354.
170. Sturzu Aurel; Indrumari pentru întocmirea proiectului de an la specialitatea "Tehnologia construcției de mașini", Institutul politehnic - București, 1967.
171. x x x La recherche industrielle en France; Lettre de Paris nr.42; Juillet 1978.

C U P R I N S

	<u>Page</u>
1. STADIUL ACTUAL AL PROBLEMEI	1
1.1. Ce se cunoaște despre laseri	1
1.1.1. Un nou domeniu al științelor aplicate folosit în tehnica modernă	1
1.1.2. Evoluția cercetărilor pentru descoperirea fenomenului de amplificare a radiației lu- minoase (inversiunea de populație)	1
1.1.3. Etape reprezentative ale realizării surse- lor cuantice de radiații	5
1.1.4. Unele considerații privind calitățile semnalului laser	7
1.1.5. Principii constructive și funcționale ale instalațiilor laser	11
1.1.5.1. Cavitates de rezonanță	11
1.1.5.2. Soluții de principiu ale cavită- ților de rezonanță	12
1.1.5.3. Procedee de pompaj optic	13
1.1.5.4. Procedee de selectare a modurilor vibrației	13
1.1.5.5. Laseri, generatori și laseri amplificatori	15
1.1.5.6. Alte aspecte	19
1.2. Ce se cunoaște despre utilizarea laserilor în construcția de mașini	20
1.2.1. Privind obținerea elementelor micrometrice	20
1.2.2. Privind debitarea și sudarea	25
1.2.3. Privind folosirea laserilor în tehnica măsurărilor	26
2. CALBUL DE ABORDARE A PROBLEMEI	27
2.1. Motivație	27
2.2. Domeniul abordat	27



	<u>Page</u>
2.3. Materialele prelucrate, instalațiile și aparatura	27
2.4. Principiile care au stat la baza metodologiei de cercetare	30
2.5. Obiectivele urmărite	31
3. CONTRIBUTIA TEORETICA SI EXPERIMENTALA A CERCETARII	32
3.1. Contribuție privind identificarea fenomenului tehnologic de prelucrare cu fascicul laser concentrat a alezajelor micrometrice	32
3.1.1. Utilajul și metodologia de lucru	32
3.1.2. Mecanismul interacțiunii razei focalizate cu materialul semifabricatului	34
3.1.3. Influența poziției focarului, în raport cu suprafața semifabricatului, asupra mecanismului prelucrării	38
3.1.4. Influența parametrilor termofizici și optici ai materialului semifabricatului asupra mecanismului prelucrării	49
3.2. Contribuție privind identificarea formelor geometrice ale alezajelor micrometrice prelucrate cu fascicul laser	52
3.2.1. Formarea alezajelor infundate	52
3.2.2. Formarea alezajelor străpunse	56
3.3. Contribuție privind alegerea regimului optim de prelucrare cu fascicul laser a alezajelor micrometrice (întocmirea tabelelor)	59
3.3.1. Stabilirea ecuației inițiale pentru parametrul D_2 și a coeficienților acesteia	60
3.3.2. Stabilirea ecuației inițiale pentru parametrul l și a coeficienților acesteia	66
3.3.3. Alegerea parametrilor regimului optim de prelucrare	68
3.4. Contribuție privind identificarea cauzelor principale ale erorilor de prelucrare cu fascicul laser a alezajelor micrometrice	71

3.4.1. Imperfecțiunea geometrică și structurală a elementelor sistemului optic	71
3.4.2. Îmbătrânirea elementelor sistemului optic	73
3.4.3. Imprecizia reglării sistemului optic privind dimensiunile	76
3.4.4. Montarea incorectă a elementelor sistemului optic	80
3.4.4.1. Erorile datorate abaterilor de la dimensiune a lungimii rezonatorului	80
3.4.4.2. Erorile datorate abaterilor de poziție ale elementelor sistemului optic față de axa elementului activ	82
3.4.4.3. Erorile datorate abaterilor elementelor sistemului optic față de pozițiile lor reciproca	83
3.4.5. Fenomenele termice	84
3.4.6. Instabilitatea pompașului optic	88
3.4.7. Fixarea incorectă a semifabricatului	88
3.4.8. Regimul nestaționar al radiației generatorului cuantic	90
3.5. Contribuție la stabilirea limitelor preciziei dimensionale a alezajelor micrometrice prelucrate cu fascicul laser	93
3.5.1. Precizia dimensională a diametrelor	94
3.5.2. Precizia dimensională a adâncimilor	96
3.6. Relativ la caracteristicile fizico-mecanice ale stratului de pe suprafața peretelui alezajului prelucrat cu fascicul laser	101
3.7. Contribuție la stabilirea clasei de calitate privind macrogeometria și microgeometria suprafeței alezajelor micrometrice prelucrate cu fascicul laser	111
4. PRIVIND ESTIMAREA PRODUCTIVITĂȚII PRELUCRĂRII CU FASCICOL LASER A ALEZAJELOR MICROMETRICE	124

	Pag.
5. ASUPRA CALCULULUI ECONOMIC AL PRELUCRĂRII CU FASCICOL LASER A ALBAZAJELOR MICROMETRICE	126
5.1. Considerații privind elementele de calcul economic	126
5.1.1. Condiții actuale ale economicității aplica- cării unei noi tehnologii	126
5.1.2. Comparație cu prelucrarea prin aşchiere	127
5.2. Calculul economic	128
- Prețul de cost	128
- Eficiența economică	130
- Perioada de recuperare a investiției	133
6. CONCLUZII	134
6.1. Concluzii generale	134
6.2. Contribuția originală	136
6.3. Privind aplicarea în industrie	138
BIBLIOGRAFIE	141

STRUCTURA CONȚINUTULUI
SI
PONDIA SA CONTRIBUTIEI

Capitolul		Pagine	Nr. de pagini	% față de total pagini	
Introducere	1. Stadiul actual al problemei	1-26	26	22%	
	2. Cadru de abordare	27-31	5		
Partea origi- nală	3. Contribuție teoretică și experimentală a lucrării	32-124	92,5	66%	
	4. Estimarea productivității lucrării	124-125	2,5	2%	
	5. Calculul economic	126-133	7	5%	
	6. Concluzii	133-140	7	5%	
	T o t a l			109	78%
	Total general			140	100%
Bibliografie		141-153	13	-	
Caprins		-	4	-	

A L E X E

1. Imprimante cu determinarea parametrilor
geometrici D_2 și l ai olezajelor prelu-
crate și a coeficienților K_1 și b_1 ai
ecuației inițiale, pe calculatorul Labo-
ratoarelor de cibernetică economică -
Academia de Studii Economice.

TAU 2 DB V L FATA DE F

	50	45	40	35	30	25	20
5.0	0.366	0.354	0.342	0.331	0.319	0.307	0.295
4.8	0.335	0.320	0.306	0.291	0.276	0.262	0.247
4.6	0.304	0.286	0.269	0.251	0.234	0.217	0.199
4.5	0.288	0.269	0.250	0.232	0.213	0.194	0.175
4.4	0.272	0.252	0.232	0.212	0.192	0.172	0.151
4.2	0.241	0.218	0.195	0.172	0.149	0.126	0.104
4.0	0.210	0.184	0.158	0.133	0.107	0.081	0.056

TABELUL 9

TAU 2 DB V L FATA DE F

	50	45	40	35	30	25	20
5.0	1.023	1.035	1.044	1.061	1.074	1.096	1.099
4.8	0.990	0.910	0.930	0.949	0.969	0.989	1.009
4.6	0.757	0.794	0.811	0.838	0.865	0.892	0.919
4.5	0.691	0.721	0.752	0.782	0.813	0.843	0.874
4.4	0.625	0.659	0.693	0.727	0.761	0.795	0.829
4.2	0.492	0.533	0.574	0.615	0.656	0.697	0.739
4.0	0.359	0.407	0.456	0.504	0.552	0.600	0.649

**II. Contract de cercetare cu întreprinderea
de confecții București, nr.76/10.11.1975
Institutul Politehnic București.**

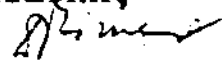
CATEDRA TEHNOLOGIA METALELOR

C ă t r e

Tov.ing. Mărgărit Mehedințeanu

In conformitate cu sarcinile de integrare ale învățămîntului cu cercetarea și producția vă comunicăm prin prezenta că a-ți fost numit în colectivul cercetarea posibilităților de introducere a laserului de putere medie în tehnologie, lucrare ce face obiectul contractului de cercetare I.P.B. nr.76/10.02.1975.

5 martie 1975

SEF CATEDRA,

Conf.dr.ing.D.Drimer

Se anexează o copie după contractul de cercetare..

CONTRACT DE CERCETARE

Nr. 76/15 II. 1975-3/CB.

Intre Institutul Politehnic Bucuresti, in calitate de executant, cu sediul in str. Splaiul Independentei nr. 313, sectorul 7, reprezentat prin Acad. Radu Voinea rector, Conf. dr. ing. D. Drimer șef catedra Tehnologia metalelor și C. Drughean contabil șef, pe de o parte și Centrala Industrii Confețiilor, în calitate de beneficiar, cu sediul în București B-dul Armata Poporului nr. 7, sectorul 7, reprezentat prin Dir. gen. Steinbach Iosif și Colgiu Eduard contabil șef, pe de altă parte a intervenit următorul contract:

1. Obiectul contractului îl constituie lucrarea "Cercetări privind tehnologia și realizarea de prototipuri de utilaje pentru prelucrarea materialelor textile".

Tema program de lucru, fazele de execuție și termenele sînt prevăzute în anexa nr. 1.

Obligațiile executantului și ale beneficiarului pentru realizarea prevederilor prezentului contract sînt cuprinse în anexa nr. 2. Ambele anexe fac parte integrată din contract.

2. Termenul final de predare a lucrării este 10 decembrie 1976. Locul de predare-primire a lucrării care face obiectul prezentului contract este la sediul beneficiarului.

Executantul este obligat să comunice beneficiarului, cu 15 zile înainte, data terminării lucrării ce constituie obiectul contractului, pentru ca beneficiarul să poată lua măsurile necesare în vederea recepționării.

Predarea lucrării se face pe bază de proces verbal de recepție semnat de ambele părți.

3. Valoarea lucrărilor care fac obiectul prezentului contract este de 750.000 lei; conform devizelor estimative anexate (anexa 3). Cheltuielile referitoare la prototipuri se vor deconta pe bază de postcalcul. În decembrie 1975 se va deconta suma de 300.000 lei conform anexei nr. 4.

4. Părțile contractante sînt de acord ca plata temei program să se facă la predarea efectelor lucrării, pe faze, conform temei program anexate (anexa nr. 1 și anexa nr. 3).

5. În aplicarea prevederilor art. 3, alineatul final din Legea nr. 22/1969, privind organizarea activității de cercetare științifică în Republica Socialistă Română, executantul are obligația să acorde

beneficiarului care va fi prezentat în termen de 15 zile de la
încheierea proiectării prevăzute în prezentul contract.

În cazul în care neobținerea rezultatelor prevăzute
în contract se datorează executantului, acesta are obligația
să aducă toate îmbunătățirile necesare.

5. Plata se face potrivit normelor de decontare în vigoare
prin conturile: a) beneficiarului 30078000 EM. RSR

b) executantului 64.51, 8.04.34. BNR SR *fl. sect. 7* pentru
cercetare.

64.51, 8.04.34. BNR SR *fl. sect. 7* pentru
proiectare și execuție prototip.

7. Intocmit la București, la data de 10 febr. 1975 în 4 (patru)
exemplare.

EXECUTANT,

Acad. Mihai Voinea

SEF CATEDRĂ TM,

Conf. dr. ing. Dolphi Drimer

CONTABIL SEF;

C. Drughean

OFICIUL JURIDIC,

C. Mihut

BENEFICIAR,

DIRECTOR GENERAL,
Ing. Steier Iosif

CONTABIL SEF,
Colgiu Eduard

OFICIUL JURIDIC,

III. f o t o g r a f i i

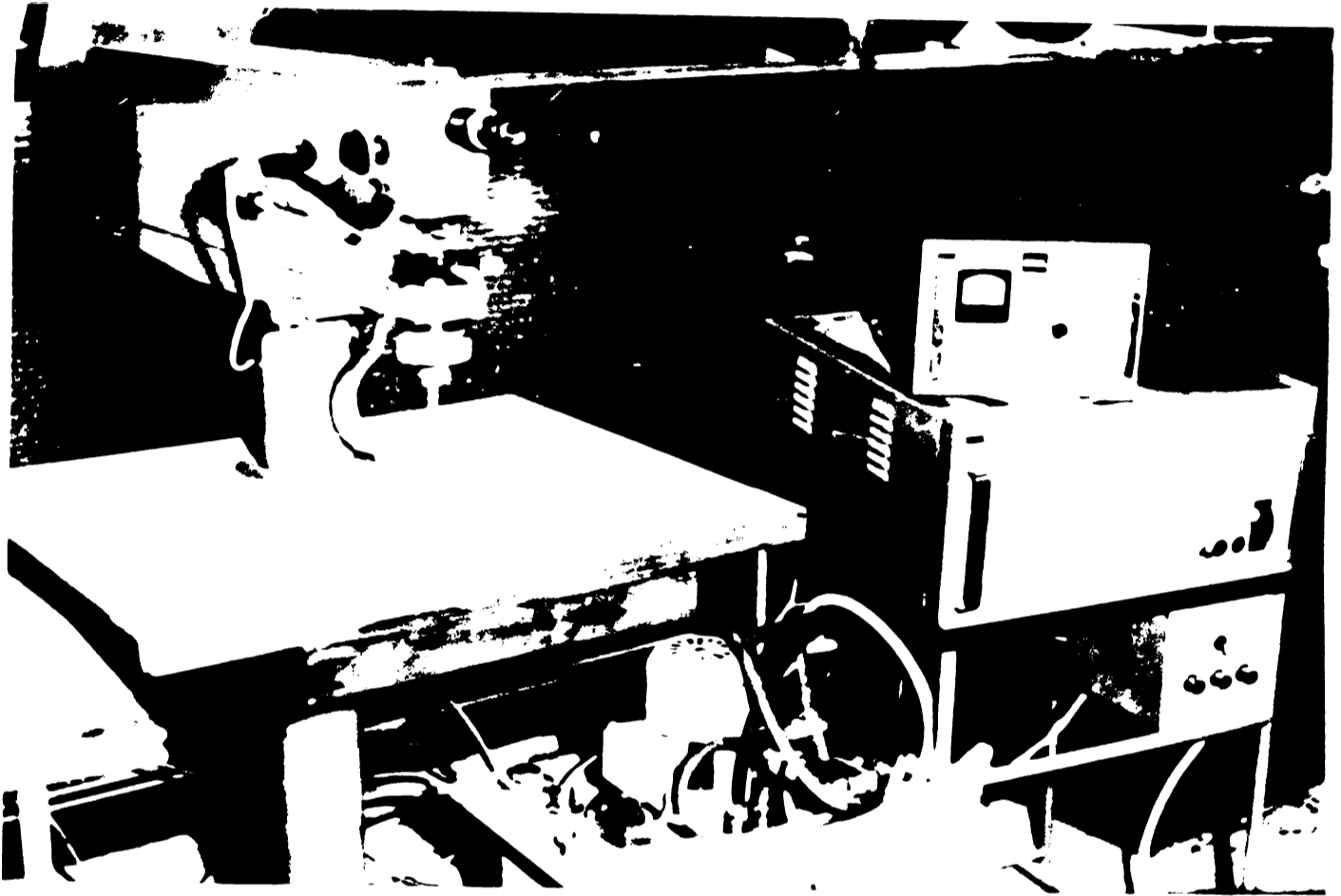


Fig. 1. Control room of the "Quart-9", air force center for
development of the aircraft, Ministry of Defense -
Moscow.

1 to 2. ... "L. ...", din care ...
... ..

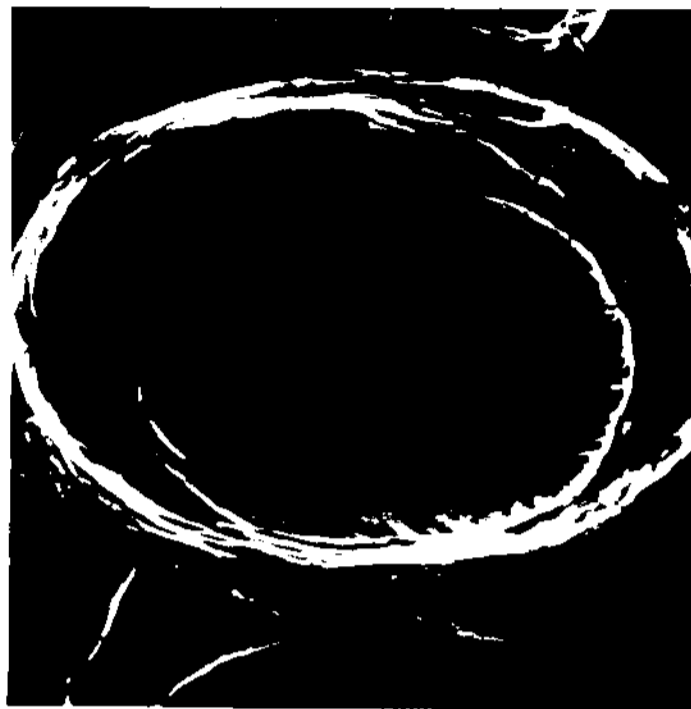


Foto 3. ALZAZĂ STRĂPUȘ ÎN TRĂNK LĂMÎIC PUN; $s = 0,5$ mm;
 $W_g = 4$ k J; $\zeta = 6 \cdot 10^{-5}$ s; 2 impulsuri; $F = 35$
 mm; conic; cu fisuri radiale în zona conului de
 intrare; $D_2 = 0,375$ mm, $d = 0,215$ mm.

x 180



Foto 4. ALZAZĂ STRĂPUȘ ÎN TRĂNK LĂMÎIC PUN; $s = 0,5$ mm;
 $W_g = 2$ k J; $\zeta = 6 \cdot 10^{-5}$ s; 5 impulsuri; $F = 30$ mm;
 conicitate mare, puțin străpuș; fără fisuri ra-
 diale în zona conului de intrare; $D_2 = 0,425$ mm;
 $d = 0,035$ mm.

x 100

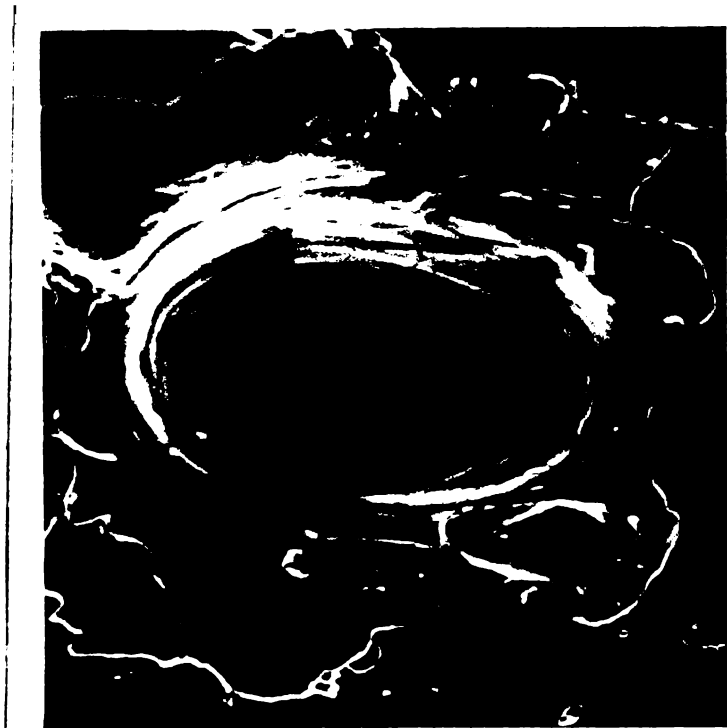


Foto 5. ALBAZAJ STRAPULS II. TITAN LEMNIC PUR; $s = 1,0$ mm;
 $W_g = 4$ k J; $\tilde{\sigma} = 6 \cdot 10^{-5}$ s; 6 impulsuri; $F = 35$ mm;
 conicitate mică; cu fisuri radiale în zona conului
 de intrare; în stare topita foarte fluid; $D_2 = 0,32$,
 mm, $d = 0,220$ mm. x 130



Foto 6. ALBAZAJ STRAPULS II. OTEL ALIAT 13CN35 - INOXIDABIL;
 $s = 1,4$ mm; $W_g = 1,5$ k J; $\tilde{\sigma} = 9 \cdot 10^{-2}$ s; 18 impulsuri;
 $F = 40$ mm; eliptic la intrare și ieșire; fara fisuri
 radiale în zona intrării; ruptura la ieșire; $D_2 = 0,45/$
 $0,30$ mm, $d = 0,30/0,20$ mm. x 100



Foto 7. ALEZAJ STRĂPUNS ÎN OTEL ALIAT 18.8 CM; $s = 0,75$ mm;
 $W_z = 5$ kJ; $\tau = 6 \cdot 10^{-6}$ s; 9 impulsuri; $F = 50$ mm;
alezaj conic, teșit la intrare; fara fisuri radiale
în zona intrării; $D_2 = 0,230$ mm, $d = 0,075$ mm.

x 130

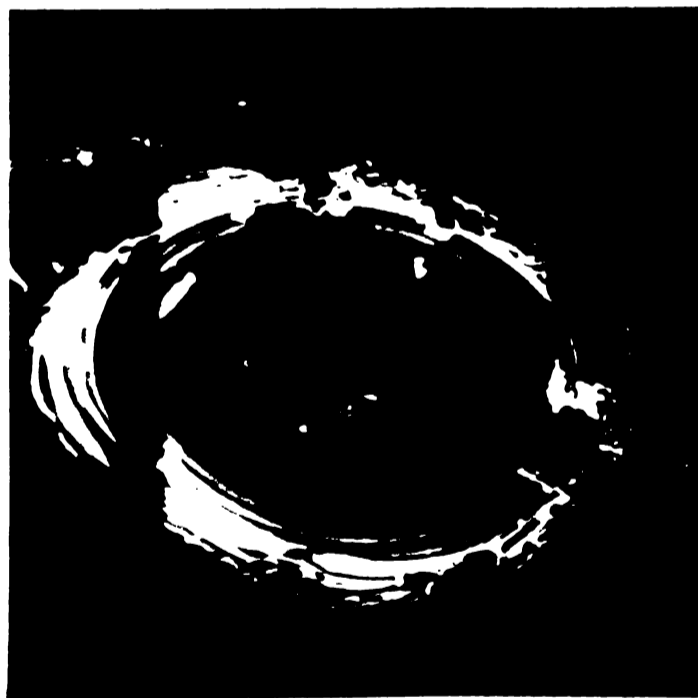


Foto 8. ALEZAJ ÎNFUNDAT ÎN OTEL ALIAT 18.8 CM; $s = 0,75$ mm;
 $W_z = 5$ kJ; $\tau = 6 \cdot 10^{-6}$ s; 14 impulsuri; $F = 50$ mm;
alezaj conic; fara fisuri radiale în zona intrării;
 $D_2 = 0,250$ mm, $d = 0,040$ mm.

x 130



Foto 9. ALEZAJ CILINDRIC ÎN OTEL ALIAJ 18.8 Cr - INCHILABIL;
 $s = 0,75 \text{ mm}$; $W_g = 5,0 \text{ k J}$; $\tau = 6 \cdot 10^{-6} \text{ s}$; 10 impulsuri;
 $F = 40 \text{ mm}$; alezaj conic; fara fisuri radiale în zona
 intrării; $D_2 = 0,230 \text{ mm}$, $d = 0,08 \text{ mm}$. x 180



Foto 10. ALEZAJ CILINDRIC ÎN OTEL; $s = 1,0 \text{ mm}$; $W_g = 7 \text{ k J}$;
 $\tau = 6 \cdot 10^{-6} \text{ s}$; 8 impulsuri; $r = 35 \text{ mm}$; conic la
 intrare, în rest cilindric; fara fisuri radiale în
 zona conului de intrare; $D_2 = 0,085 \text{ mm}$, $d = 0,010 \text{ mm}$.
 x 180

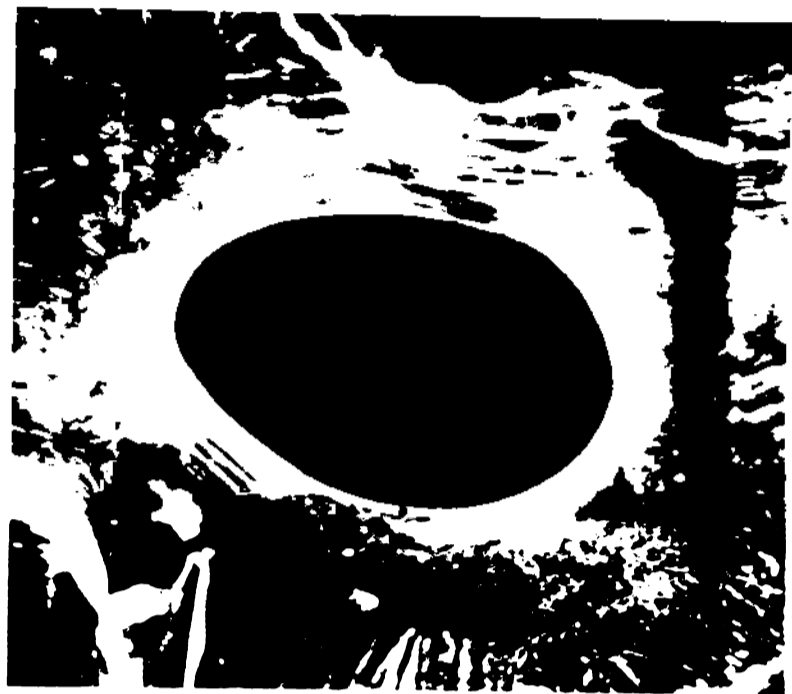


Foto 11. ALIEMAJ SIMPLU IN ALUMINIU; $s = 0,75$ mm; $W_2 = 7$ k J;
 $\tau = 6 \cdot 10^{-6}$ s; 7 impulsuri; $r = 30$ mm; cilindric;
 fara fisuri radiale in zona conului de intrare;
 $D_2 = 0,095$ mm, $d = 0,090$ mm.

x 300



Foto 12. ALIEMAJ MICROTIP IN ALUMINIU; $s = 0,75$ mm; $W_2 = 6$ k J;
 $\tau = 6 \cdot 10^{-6}$ s; 3 impulsuri; $r = 35$ mm; conicitate mica;
 fara fisuri radiale in zona conului de intrare; neted;
 $D_2 = 0,320$ mm; $d = 0,270$ mm.

x 180

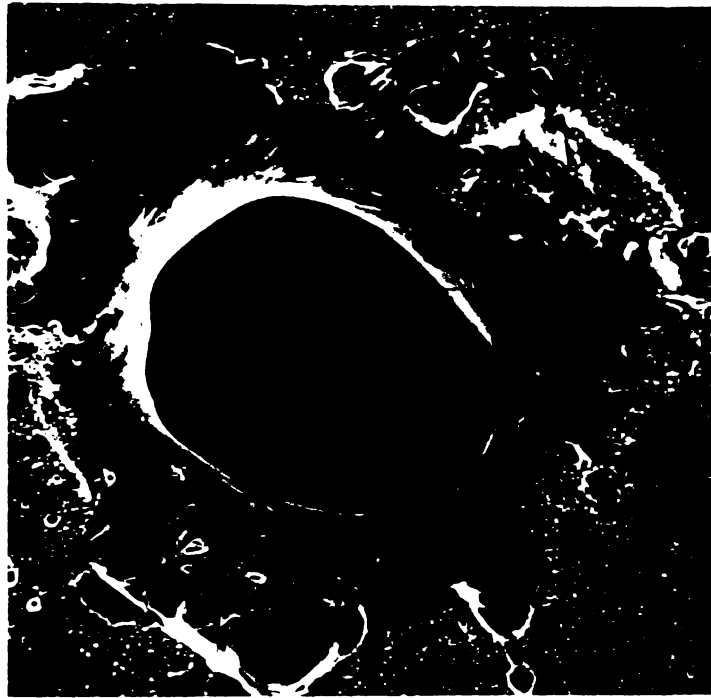


Foto 13. ALIZAJ SIMPLUȘ ÎN ALAMA; $\sigma = 0,15 \text{ mm}$; $E_2 = 2 \text{ k J}$;
 $\zeta = 2 \cdot 10^{-9} \text{ s}$; un impuls; $F = 50 \text{ mm}$; fără conicitate;
 fără fisuri radiale în zona conului de intrare; contur
 neted; $D_2 = d = 0,186 \text{ mm}$.

x 180

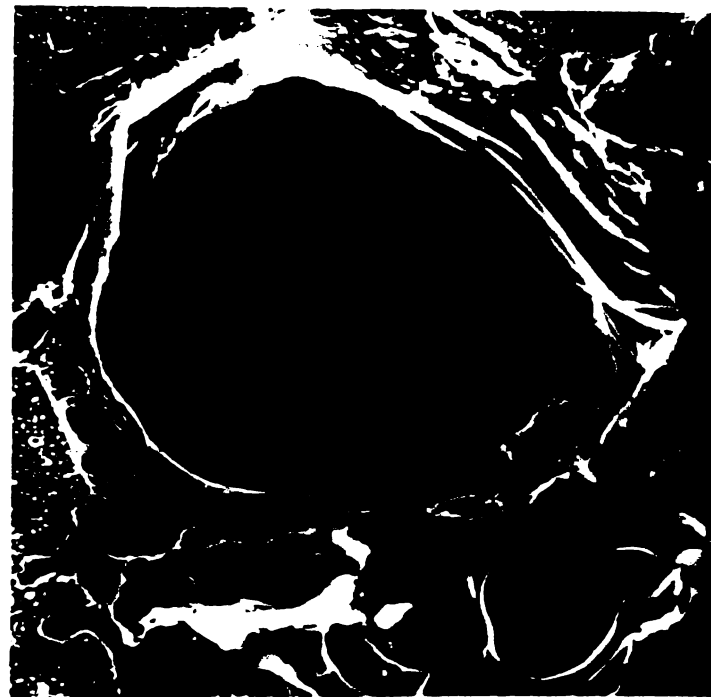


Foto 14. ALIZAJ SIMPLUȘ ÎN ALAMA; $\sigma = 0,15 \text{ mm}$; $E_2 = 2 \text{ k J}$;
 $\zeta = 2 \cdot 10^{-9} \text{ s}$; două impulsuri; $F = 35 \text{ mm}$; fără conicitate;
 fără fisuri radiale în zona conului de intrare;
 $D_2 = d = 0,260 \text{ mm}$.

x 180

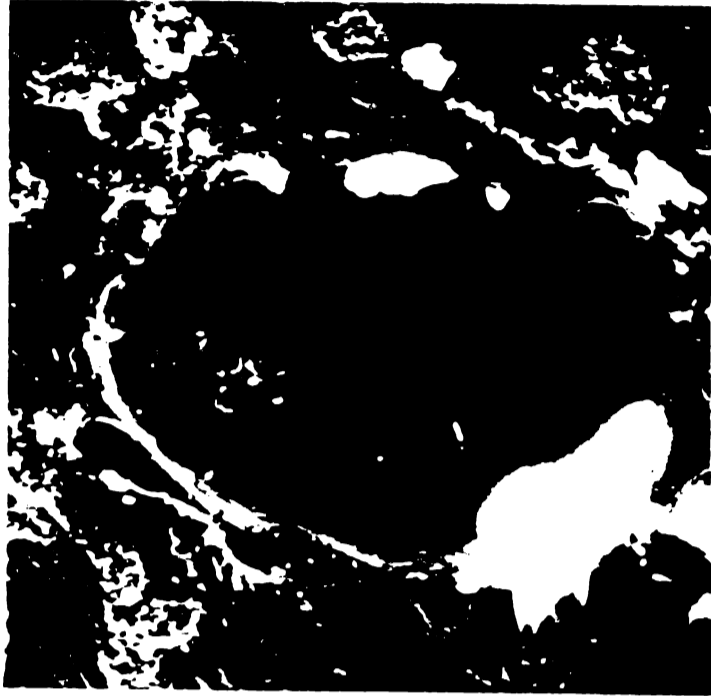


Foto 15. ALAZAJ STANARDIE IN ALUMINIU; $s = 0,015$ mm; $W_2 = 0,5$ k J; $\tau = 6,5 \cdot 10^{-6}$ s; un impuls; $r = 35$ mm; fara conicitate; fara fisuri radiale in zona conului de intrare, cu metal expulzat depus; $L_2 = 0,270$ mm.

x 180



Foto 16. ALAZAJ STANARDIE IN ALUMINIU; $s = 0,015$; $W_2 = 0,5$ k J; $\tau = 6,5 \cdot 10^{-6}$ s; un impuls; $r = 45$ mm; fara conicitate; fara fisuri radiale in zona conului de intrare; $L_2 = 0,180$ mm.

x 180

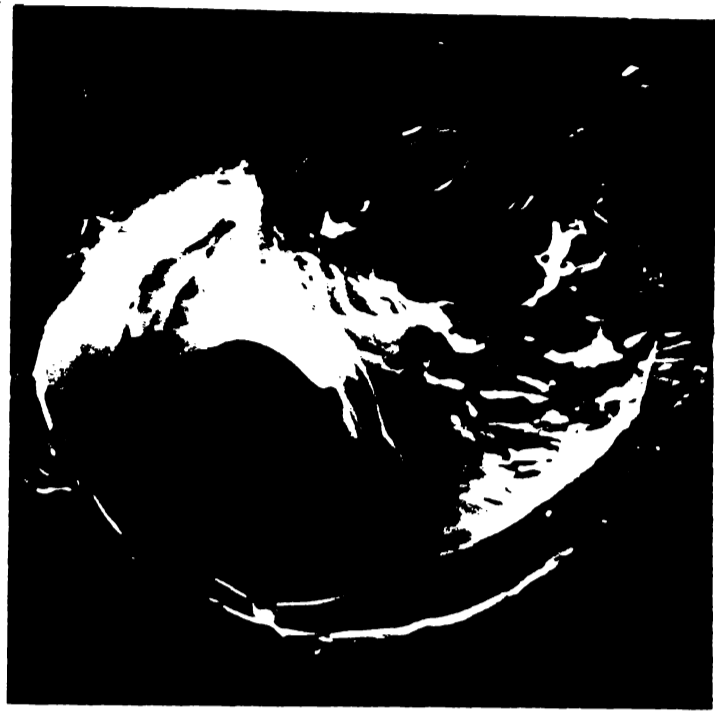


Foto 17. ALUMINIU CUMPLAT - în corbul 99,99%; $s = 0,015$ mm;
 $w_2 = 0,5$ k J; $\delta = 6,5 \cdot 10^{-6}$ s; un impuls; $l = 35$
 mm; fara conicitate; fara fisuri radiale în zona
 corului de intrare; depunere masiva de material
 fluid expulzat; $D_2 = 0,125$ mm. x 180

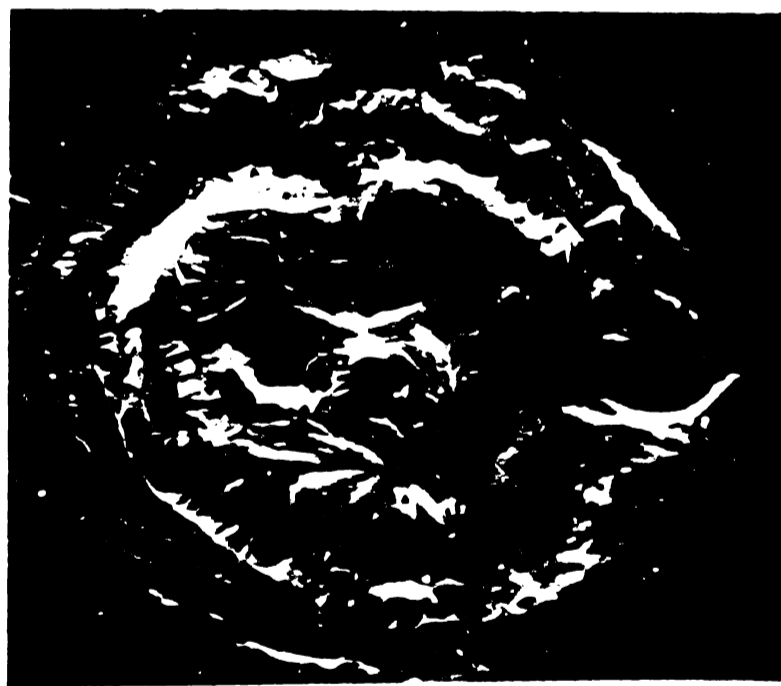


Foto 18. ALUMINIU IMPURIFICAT în corbul; $s = 0,10$ mm; $w_2 = 3$ k J;
 $\delta = 4 \cdot 10^{-6}$ s; 4 impulsuri, cu urme vizibile;
 $l = 30$ mm; fara fisuri; conic; $D_2 = 0,350$ mm; x 180



Foto 19. ALIPIAŞ CINDRUPĂ ÎN RUBIN CILINDRIC; $s = 1,6$ mm; $w_2 = 9$ kJ; $\tau = 6 \cdot 10^{-6}$ s; 3 impulsuri; $r = 55$ mm; finisat cu prof de clemant; i.r. - fisuri radiale în zona corului de intrare; $L_2 = 0,352$ mm; unghi de incidență 65° .

x 180



Foto 20. ALIPIAŞ CINDRUPĂ ÎN RUBIN CILINDRIC; $s = 1,2$ mm; $w_2 = 4$ kJ; $\tau = 6 \cdot 10^{-6}$ s; 3 impulsuri; $r = 55$ mm; degroazare; conicitate mica; fara fisuri în zona corului de intrare; $L_2 = 0,155$ mm; $d = 0,155$ mm; incidență 65° .

x 180

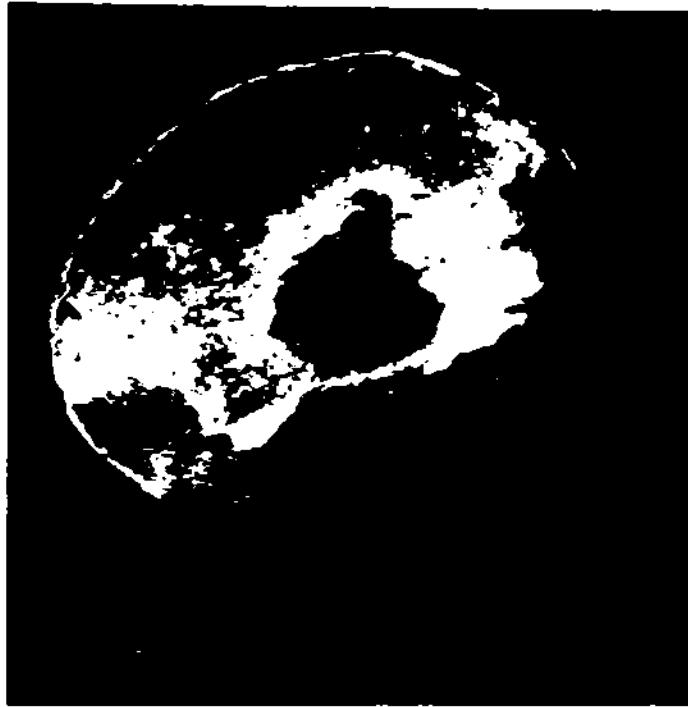


Foto 21. ALIZAJ SI. AFUIS II. SUBIA SILICIU; $s = 1,2 \text{ mm}$; $W_2 = 6 \text{ k J}$; $\tau = 6 \cdot 10^{-6} \text{ s}$; 2 impulsuri; $F = 55 \text{ mm}$; degroșare; conicitate mică; cu fisuri în conul de intrare; $D_2 = 0,250 \text{ mm}$; $d = 0,200 \text{ mm}$; incidență 90° .

x 60

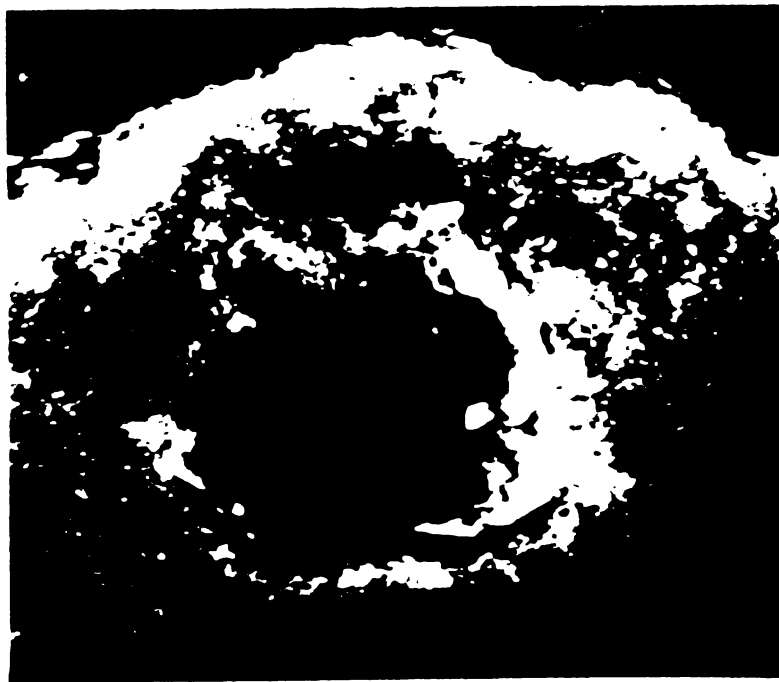


Foto 22. ALIZAJ SI. AFUIS II. SUBIA SILICIU; $s = 1,8 \text{ mm}$; $W_2 = 6 \text{ k J}$; $\tau = 6 \cdot 10^{-6} \text{ s}$; 5 impulsuri; $F = 55 \text{ mm}$; degroșare; puțin conic pe toată lungimea alezajului; concentric; cu fisuri la intrare; $D_2 = 0,150 \text{ mm}$; $d = 0,120 \text{ mm}$.

x 130



Foto 23. ALEZAJE INFUNDATE IN TITAN TERMIC PUR; $\phi = 1,8$ mm; fascicul cu energie mare, peste $9 \times J$; $F = 64$ mm; $D_2 = 0,166$ mm; $l_1 = 0,160$, $l_2 = 0,200$, $l_3 = 0,220$ și $l_4 = 0,250$ mm; un singur impuls.

x 15

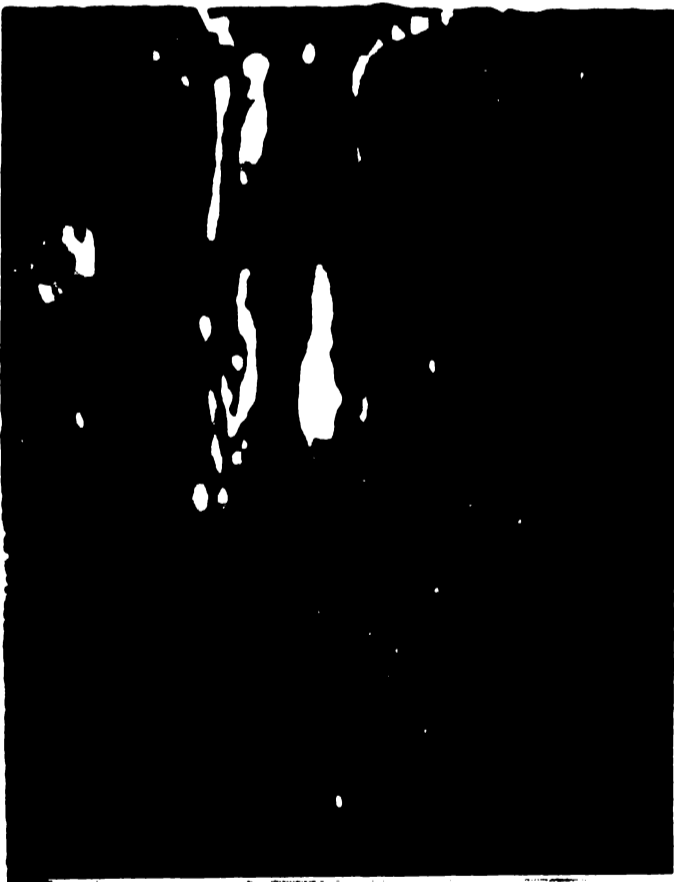


Foto 24. ALEZAJ INFUNDAT IN OTEL ALIAT 13 CR 35; simetrie perfectă; vizibil stratal influențat termic.

x 180



**Foto 25. ALAZAJ INFUNDAT
 IN TITAN TERMIC PUR;**
 $s = 2,5 \text{ mm}$; $W_2 = 1,5 \text{ k J}$;
 $\tau = 2 \cdot 10^{-7} \text{ s}$; 2 impulsuri;
 pată focală pe suprafață,
 cu diametrul de $0,080 \text{ mm}$;
 depunere masivă asime-
 trică la intrare.

x 180

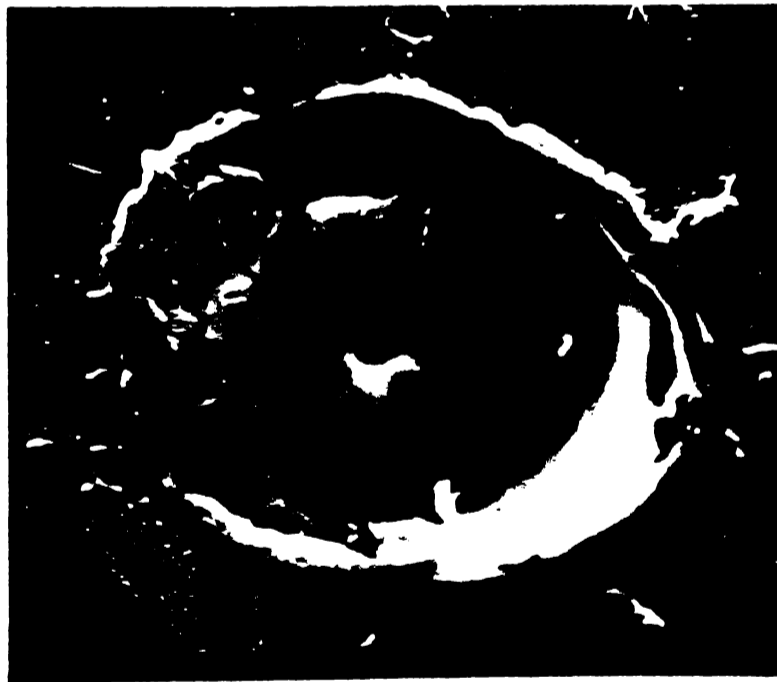


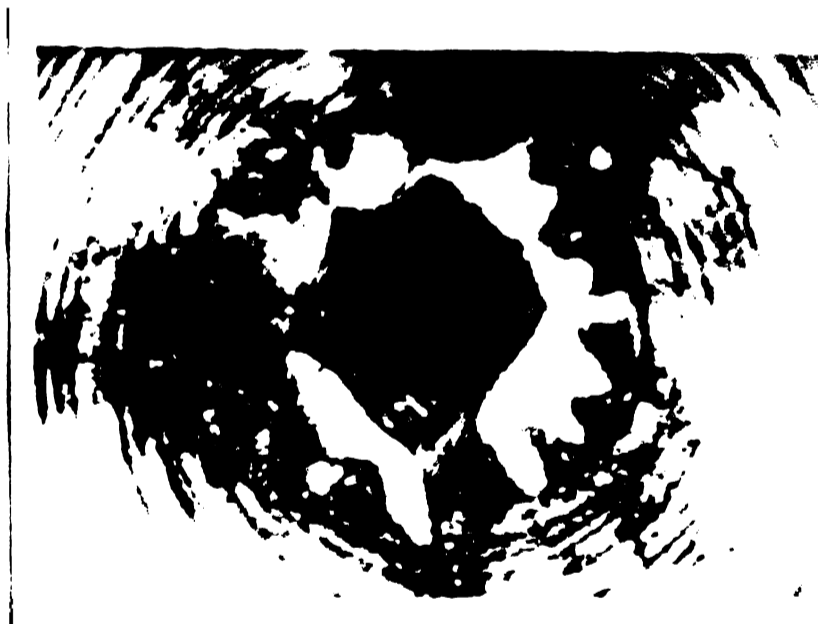
Foto 26. ALAZAJ INFUNDAT IN CUPRU; $s = 0,10 \text{ mm}$; $W_2 = 3 \text{ k J}$;
 $\tau = 4 \cdot 10^{-7} \text{ s}$; 5 impulsuri, cu urme vizibile;
 $F = 30 \text{ mm}$; fara fisuri; conic; $D_2 = 0,220 \text{ mm}$; foarte
 fluid in stare topita.

x 180



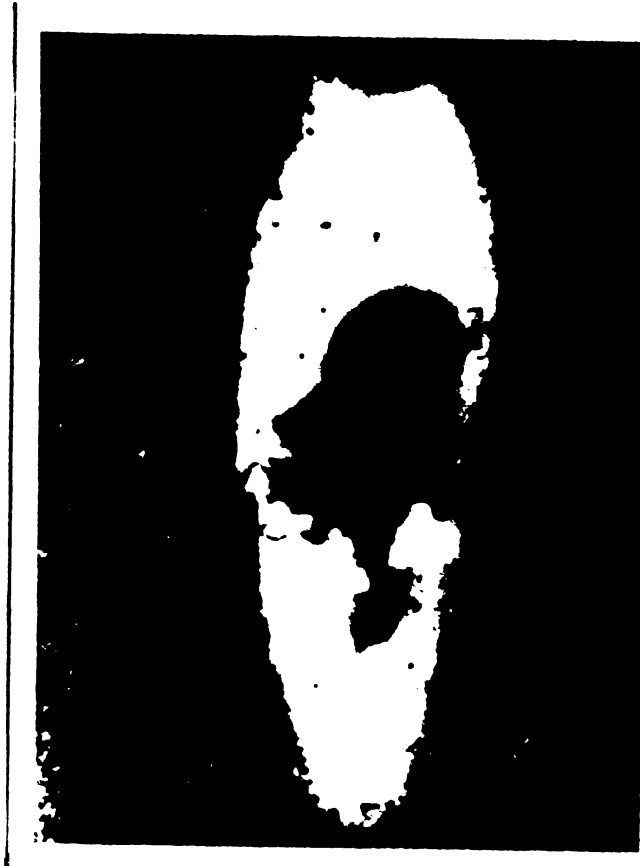
**Foto 27. CONTURUL ALBAZAJULUI STRAPUIS IN CARBURA METALICA DE
WOLFRAM SINTERIZATA; $s = 1,2$ mm; $W_p = 7$ k J; $\tau = 6 \cdot 10^{-6}$ s;
2 impulsuri; conic; $D_2 = 0,110$ mm; $d = 0,066$ mm.**

x 180



**Foto 28. CONTURUL ALBAZAJULUI STRAPUIS IN SAHIE SIMETIC; pro-
lucrat cu $W_p = 7$ k J; $\tau = 10^{-5}$ s; 6 impulsuri; $F = 45$
mm; cu fisuri radiale in canal de intrare și partea
cilindrică; $D_2 = 0,166$ mm, $d = 0,090$ mm; $s = 1,8$ mm.**

x 200



**Foto 29. PROFILUL ALEZAJULUI ÎNFUNDAT ÎN 18.8 CH; $e = 2,5$ mm;
 $E_p = 8$ k J; $\tau = 6 \cdot 10^{-6}$ s; 3 impulsuri; pete focală pe
 suprafața semifabricatului, cu diametrul de 0,080 mm;
 $D_2 = 0,160$ mm; $l = 0,60$ mm.**

x 150



**Foto 30. PROFILUL ALEZAJELOR ÎNFUNDATE ÎN TIPIAL TERMIC PUR;
 $E_p = 8$ k J; $\tau = 6,5 \cdot 10^{-6}$ s; de la stînga la dreapta
 3, 4, 5, 6, 7 impulsuri; D_2/l : 0,100/0,35; 0,110/0,40;
 0,120/0,50; 0,140/0,55; 0,150/0,60.**

x 40



Foto 31. CONTURUL ALEZAJULUI ÎNFIURAT ÎN CERAMICĂ; $s = 5 \text{ mm}$;
 $W_s = 6 \text{ kJ}$; $\bar{\sigma} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ s}$; 4 impulsuri; depuneri gra-
 nulare în jurul alezajului; $D_2 = 24 \text{ microni}$, $l = 1,20$
 mm ; $\theta = 2,5 \text{ mm}$.

x 100

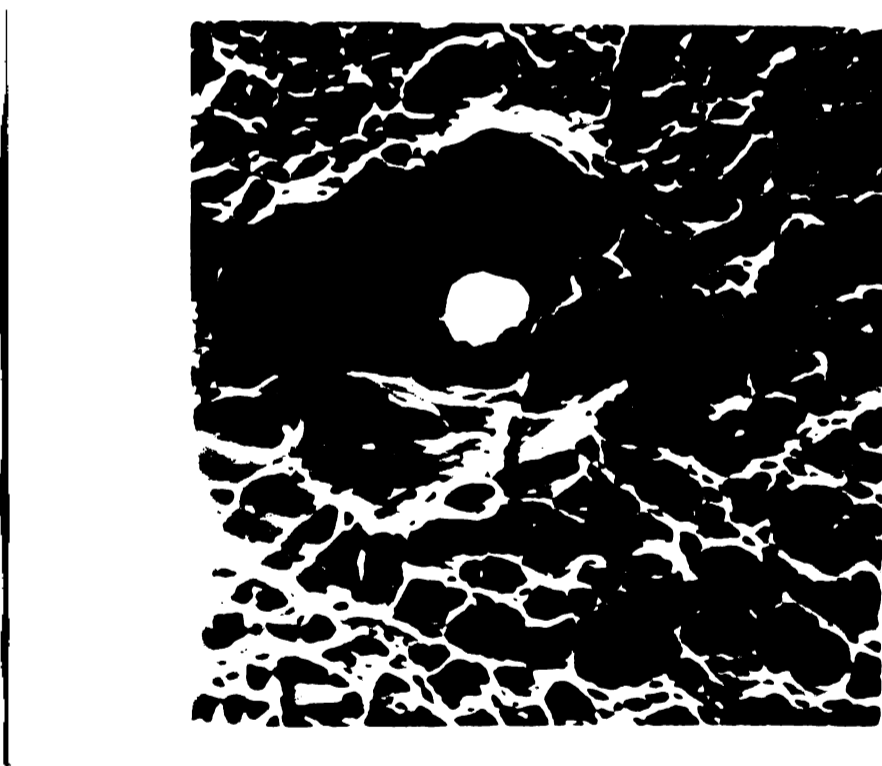


Foto 32. ALEZAJ STRĂPUNS ÎN ÎNAL. TERIBIL PUR; $s = 0,5 \text{ mm}$;
 $W_s = 10 \text{ kJ}$; $\bar{\sigma} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ s}$; pată focală cu diametrul
 de 10 microni ; $F = 35 \text{ mm}$; ruptură caracteristică
 metalelor ductile, cu neregularități specifice;
 $D_2 = 0,63 \text{ mm}$; $d = 0,020 \text{ mm}$.

x 500

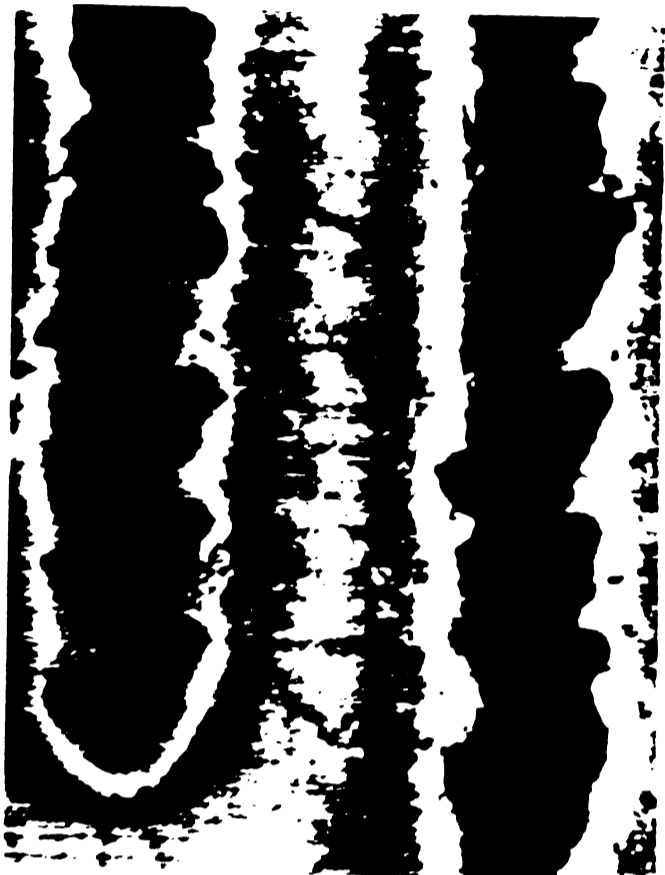


Foto 33. ALAZAJ INFILAT
 SI SINARUL IL ALTAI TER-
 LIC PUR; $E_p = 40 \text{ k J}$;
 $\epsilon = 9 \cdot 10^{-8} \text{ s}$; pata fo-
 cală - 0,010 mm; profun-
 zimea zonei influențata
 termic - 0,005 mm; nere-
 gularitățile sînt coto-
 rste curgerilor plastice
 din timpul pregătirii
 glifului; $D_2 = d = 0,015$
 mm.

x 1000

(La recherche industrielle
 en France, Juillet 1978).



Foto 34. INVENCIUNIA DE FOTOMIE - BIACIJA DE LINA A FOTOMILOR,
 PENTRU DISCIPLINA CU SISTEMUL FOTONIC PENTRU LUCRUL (P. Jaégle,
 Faculté des sciences - Orsay)(171).

Nr. alese- jelor prelu- crate si analizate	Caracterul alezeajului	Gro- sime- mate- rialei lui	Ene- gie com- puls- ului	Lors- ta in- pul- sului	Forma alezeajului	Dimensiunile alezeajului			Observatii							
						D2 (mm)	L (mm)	l (mm)								
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	Plăcuțe titan tehnic pur (U.S.A.)	15	X	X	1,5	7-20	10	X	X	X	X	0,125	1,5	0,100-1,000	15	Puritatea maximă în conul de intrare, minimă în cel de ieșire (Mat. bază HRV-200) Dif. între cele două limite: 600 μm
2	Plăcuțe titan tehnic pur (U.S.A.)	18	X	X	1,5	7-20	20	X	X	X	X	0,120	0,70			
3	Folii titan tehnic pur (U.S.A.)	25	X	X	0,10	5	10	X	X	X	X	0,05	0,10			
4	Folii titan tehnic pur (U.S.A.)	25	X	X	0,05	4	5	X	X	X	X	0,03	0,05			
5	Plăcuțe titan tehnic pur (U.R.S.S.)	10	X	X	1,2	10	15	X	X	X	X	0,09	0,75			
6	Plăcuțe titan tehnic pur (U.R.S.S.)	15	X	X	1,4	10	15	X	X	X	X	0,10	0,8			
7	Plăcuțe titan tehnic pur (U.R.S.S.)	20	X	X	1,0	5	15	X	X	X	X	0,09	1,0			
8	Folii titan tehnic pur (U.R.S.S.)	26	X	X	0,08	5	10	X	X	X	X	0,08	0,08			
9	Folii titan tehnic pur (U.R.S.S.)	28	X	X	0,02	5	5	X	X	X	X	0,05	0,02			
10	Duraluminu D 16 T	12	X	X	1,4	20	5	X	X	X	X	0,2	0,8	0,10-0,15	15	secesei pe toată suprafața (Mat. bază)
11	Oțel 13 CH 35	10	X	X	0,08	5	5	X	X	X	X	0,3	0,08			
12	Ceramică Caseron 10	15	X	X	0,10	20	20	X	X	X	X	0,5	0,10	0,08-0,12	15	secesei cu apă
13	Alamă AmX-4	15	X	X	0,025	20	5	X	X	X	X	0,3	0,025	0,02-0,05	15	In locul zonei albe de la intrare: structura de material corodat
14	T 154 K6	10	X	X	0,5	10	10	X	X	X	X	0,2-0,4	0,5			
15	T 14 K8	10	X	X	0,5	10	10	X	X	X	X	0,3-0,6	0,5			
16	T 30 K4	10	X	X	0,5	10	10	X	X	X	X	0,1-0,3	0,5			
17	V K 6	5	X	X	0,5	5	10	X	X	X	X	0,5-0,7	0,5			
18	Sticlă	10	X	X	1,0	20	20	X	X	X	X	0,8-1,8	0,1			

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
19	Folii otel Firma RAYTHEON (U.S.A.) Firma			X	0,050			X				0,013	0,050			Datorită excesului de energie, pe
20	Plăcuțe titan tehnic pur Firma RAYTHEON		X	X	0,107			X				0,027	0,100			peretii alesejelor
21	Plăcuțe alame Firma RAYTHEON(U.S.A.)		X	X	0,050				X			0,04-	0,050			su apărut dezinven-
22	Folii preepen Firma RAYTHEON(U.S.A.)		X	X	0,125			X				0,025	0,125			lări și profemin-
23	Otel carbon obișnuit Firma RAYTHEON(U.S.A.)		X		16,0	0,350		X				0,05-	12,700			te din metal topit.
24	Plăcuțe cupru deoxidat		X	X	0,1200,012							0,015	0,120			
25	Plăcuțe titan tehnic pur ENINSE (U.R.C.S.)		X		1,2							0,020-				
26	Plăcuțe otel 30X G S A ENINSE (U.R.C.S.)		X		1,0							0,015				
27	Plăcuțe duraluciniu D 16 T			X	0,10							0,010				
28	Plăcuțe ceramică T M 332		X	X	0,25							0,065				
29	Folii din otel înalt aliate -medii corozive (U.R.S.S.)		X	X								8,889-				
30	Plăcuțe aluminiu WESTINGHOUSE		X		1,0							0,2				
31	Plăcuțe nichel WESTINGHOUSE		X		0,8							0,125				
32	Folii magneziu AMERICAN AVIATION INC.		X		1,0	0,4.10 ⁻³						0,090				Serii de impuleuri succesive de mică
33	Plăcuțe otel GENERAL ELECTRIC		X		2-4.10 ⁻³							0,40				
34	Plăcuțe nichel GENERAL ELECTRIC		X		2-4.10 ⁻³							0,50				
35	Plăcuțe cupru GENERAL ELECTRIC		X		2-4.10 ⁻³							0,75				
36	Otel tres le rece GENERAL ELECTRIC		X	X	11,54				X			0,75-				Depuneri abunden-
37	Monoxid de aluminiu GENERAL ELECTRIC		X	X	0,63	5.10 ⁻³						0,25				te pe pereții ale 20aj. cu chit. seriile
38	Piese Pb și Al AMERICAN AVIATION INC.		X		0,7.10 ⁻³							0,4-	0,008			50 impuleuri a 5 J microscopare prin difracționare cu câșeu negativ