

MINISTERUL EDUCATIEI SI INVATAMINTULUI  
INSTITUTUL POLITEHNIC "TRAIAN VOIA" TIMISOARA  
FACULTATEA DE MECANICA

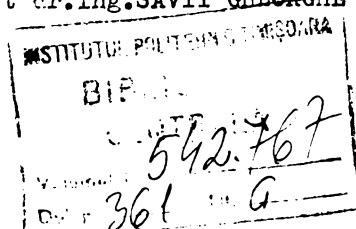
Ing. Iulia-Zamfira Voia

CERCETARI ANALITICE SI EXPERIMENTALE  
ASUPRA PRECIZIEI GEOMETRICE LA RECTIFICAREA  
CILINDRICA EXTERIOARA

- Teză de doctorat -

BIBLIOTECA CENTRALĂ  
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"  
TIMIȘOARA

Conducător științific  
Prof. emerit dr. ing. SAVII GHEORGHE



- 1987 -

## PREFATA

Dezvoltarea impetuoasă a științei și ritmul rapid al progresului tehnic aduc transformări esențiale în procesul producției materiale, cu consecințe directe în toate domeniile vieții sociale. Studiile privind revoluția tehnico-științifică din zilele noastre scot în relief cele trei direcții principale în care acționează aceasta și anume: tehnologia, pregătirea profesională a cadrelor și calitatea produselor.

Pentru societatea socialistă al cărei țel este satisfacerea cât mai deplină a nevoilor materiale și spirituale ale membrilor săi, ridicarea permanentă a calității produselor devine o necesitate obiectivă, o sarcină centrală în procesul amplu de dezvoltare a tuturor ramurilor economiei naționale și, în special a industriei. Abordând problema calității în contextul eficienței economice, tovarășul Nicolae Ceaușescu sublinia cu claritate în Raportul la Congresul al XIII-lea al P.C.R., că ridicarea calității produselor, realizarea de produse cu caracteristici tehnico-economice superioare trebuie să constituie o preocupare de prim ordin: "Potrivit prevederilor Programului de cercetare științifică, dezvoltare tehnologică și introducere a progresului tehnic pe perioada 1986-1990, activitatea de cercetare va trebui să asigure creșterea substanțială a nivelului tehnic și calitativ al produselor, îmbunătățirea structurii producției și valorificarea tot mai eficientă a resurselor economice, sporirea gradului de competitivitate a produselor românești. Până în 1990, circa 95 la sută din produsele românești trebuie să fie din punct de vedere tehnic și calitativ la nivelul celor existente pe plan mondial, iar cel puțin într-un procent de 2-5 la sută să realizăm produse cu asemenea parametri tehnici și calitativi care să situeze România pe primul loc în lume".

Trecerea la o nouă calitate în construcția de mașini impune perfecționarea tehnologiilor de fabricație, care trebuie să asigure produselor o precizie ridicată, siguranță în exploatare și costuri de fabricație minime.

Precizia, siguranța în funcționare și durabilitatea produselor sînt determinate în mare măsură de calitatea stratului superficial al pieselor componente, format la operațiile de finisare,

care se realizează actualmente în proporție de 80% prin rectificare.

Calitatea suprafețelor rectificate depinde de mulți factori constructivi și tehnologici. Cunoașterea influenței acestora favorizează realizarea unei prelucrări finale optime și obținerea unor caracteristici de exploatare bune a pieselor respective. În legătură cu aceasta, studierea factorilor tehnologici principali în interacțiunea lor, incluzând mașina-unealtă, scula de rectificare, piesa, mediul de răcire-ungere, condițiile de temperatură-forțe și găsirea unor noi căi de rezolvare a problemelor de îmbunătățire a calității stratului superficial este o problemă care are mare importanță practică.

În literatura de specialitate sînt prezentate o serie de considerații privind calitatea stratului superficial al pieselor rectificate, dar acestea au în vedere numai influența unui număr limitat de factori tehnologici și constructivi.

Obiectul cercetărilor din cadrul prezentei lucrări, în care s-a studiat influența tuturor factorilor constructivi și tehnologici, a rezultat din necesitatea găsirii unor metode de prognozarea a calității suprafețelor rectificate cilindric.

Pe linia aplicării practice a rezultatelor cercetării se propune o metodă de construire a diagramelor de prelucrabilitate, pentru determinarea regimului de rectificare și a caracteristicilor sculei abrazive, care să asigure o calitate impusă a suprafețelor rectificate. Aceste diagrame permit să se anticipeze mărimile forțelor de așchiere și a puterii necesare pentru condiții concrete de rectificare. Diagramele permit și calculul energiei specifice de rectificare, caracteristică de primă importanță a procesului care poate caracteriza alegerea sculei și felul prelucrării.

S-a considerat că absența arsurilor este, alături de rugozitate, principalul indicator al calității suprafețelor rectificate. Programul de calcul a temperaturilor la suprafață și în stratul superficial, în funcție de parametrii regimului de lucru, elaborat în cadrul lucrării a permis construirea unor diagrame de calitate, cu ajutorul cărora se pot determina condițiile de rectificare care asigură simultan atât rugozitatea necesară a suprafeței, cît și absența arsurilor.

Numeroasele măsurători, efectuate cu aparatură de înaltă precizie, au confirmat corectitudinea cercetărilor teoretico-

experimentale efectuate în prezenta lucrare.

În legătură cu cele expuse, autoarea consideră că și-a adus o modestă contribuție la aprofundarea cunoașterii procesului de rectificare cilindrică exterioară și, prin aceasta, la îmbunătățirea calității pieselor rectificate.

Autoarea ține să exprime recunoștință deosebită cadrelor didactice de la Catedra Tehnologia construcțiilor de mașini din Facultatea de Mecanică pentru pasiunea insuflată față de profesie pentru care a fost formată.

Țin să exprim mulțumiri deosebite și întreaga recunoștință conducătorului științific, Profesor emerit doctor Inginer Gheorghe Savii pentru deosebita răbdare și deosebita competență cu care am fost îndrumată pentru orientarea cercetărilor și realizarea obiectivelor propuse.

Mulțumesc, de asemenea, tuturor celor care m-au ajutat la realizarea acestei lucrări.

T i m i ș o a r a , august 1987.



NOTATIILE

- $D_s$  - diametrul sculei abrazive, [mm]  
 $D_p$  - diametrul piesei, [mm]  
 $D_e$  - diametrul echivalent,  $D_e = \frac{D_p \times D_s}{D_p \pm D_s}$ , [mm]  
 unde semnul + se ia la rectificarea exterioară,  
 iar semnul - la rectificarea interioară  
 $B$  - lățimea activă a sculei, [mm]  
 $E$  - modulul de elasticitate al sculei, [KN/mm<sup>3</sup>]  
 $v_s$  - viteza sculei (viteza principală de aşchiere), [m/s]  
 $v_p$  - viteza piesei, [m/min; m/s]  
 $v_l$  - viteza avansului longitudinal, [m/min], [mm/min];  
 $s_l$  - avansul longitudinal, [mm/rot piesă]  
 $s_l = v_l/n_p$ , unde  $n_p$  - rotația piesei, [rot/min]  
 $s_t$  - avans transversal (avans de pătrundere) [mm/cursă];  
 [mm/cursă dublă]  
 $s_d$  - avansul de îndreptare al sculei [mm/rot]  
 $t$  - adâncimea de aşchiere, [mm]  
 $t$  - timp, [s] (în capitolul 3)  
 $t_1$  - adâncimea de îndreptare, [mm]  
 $F_n$  - forța normală de rectificare, [N]  
 $F_t$  - forța tangențială de rectificare, [N]  
 $F_{no}$  - forța normală de referință, [N]  
 $F_{to}$  - forța tangențială de referință, [N]  
 $f_n$  - efortul specific normal, [N/mm<sup>2</sup>]  
 $f_t$  - efortul specific tangențial [N/mm<sup>2</sup>]  
 $u = F_n/F_t$  - raportul dintre forța normală și tangențială  
 $F'_n = F_n/B$  - forța normală de rectificare corespunzătoare 1 mm  
 de lățime activă a sculei, [N/mm]  
 $F'_t = F_t/B$  - forța tangențială de rectificare corespunzătoare 1 mm  
 de lățime activă a sculei, [N/mm]  
 $F_f$  - forța de frecare, [N]

- $F_e$  - forța elastică, [N]  
 $P_o$  - puterea la mers în gol (pierderi prin frecări în lagăre, transmisii, etc.), [Watt]  
 $P$  - putere electrică absorbită, [Watt]  
 $Q_1$  - debitul lichidului de răcire, [l/min]  
 $P_1$  - presiunea lichidului de răcire, [Pa]  
 $H_{RC}$  - duritate Rockwell C  
 $e_{o.1}$  - energia specifică pentru o adâncime de așchiere raportată la sculă egală cu  $0,1 \cdot 10^{-3}$  [mm]  
 $R_a$  - abaterea medie aritmetică a rugozității, [ $\mu$ m]  
 $r_d$  - creșterea specifică a rugozității [ $\mu$ m/mm]  
 $R_y$  - înălțimea maximă a profilului, [ $\mu$ m]  
 $R_z$  - înălțimea neregularităților profilului în zece puncte, [ $\mu$ m]  
 $R_q$  - abaterea medie pătratică a profilului, [ $\mu$ m]  
 $s_m$  - pasul mediu al neregularităților profilului, [mm]  
 $s$  - pasul mediu al proeminențelor locale, [mm]  
 $\eta_p$  - lungimea portantă a profilului [mm]  
 $t_p$  - procentajul lungimii portante:  $t_p = \frac{\eta_p \cdot P}{l}$ , unde  
 $l$  - lungimea de bază, [mm]  
 $t_e$  - adâncimea de așchiere raportată la lățimea sculei, [mm]  
 $t_e = \frac{Z'}{v_s \times 10^3}$   
 $Z'$  - volumul specific de așchii (volumul de material rectificat raportat la 1 mm lățime activă a sculei), [ $\text{mm}^3/\text{mm} \cdot \text{s}$ ]  
 $Z$  - productivitatea prelucrării, egală cu volumul de material rectificat în unitatea de timp, [ $\text{mm}^3/\text{s}$ ]  
 $Z_s$  - uzura sculei, egală cu volumul de material abraziv pierdut prin uzură, în unitatea de timp, [ $\text{mm}^3/\text{s}$ ]  
 $\varphi = \frac{Z}{Z_s}$  - productivitatea specifică  
 $\varphi_d$  - productivitatea specifică la rectificarea cu diamant  
 $\varphi_d = \frac{M_p}{M_g}$ , [g/mg]

- $M_p$  - masa materialului rectificat, [g]  
 $M_g$  - masa grăunților de diamant pierduți, prin uzură, [mg]  
 $u_d$  - uzura specifică a sculelor cu diamant  

$$u_d = \frac{M_g}{M_p} \quad [\text{mg/g}]$$
 $T$  - durabilitatea sculei de rectificat, [min]  
 $T$  - temperatura de rectificare, [K], [°C] (în capitolul 3)  
 $\Theta$  - temperatura adimensională  
 $\lambda = \frac{dZ}{dF_n}$  - coeficientul capacității aşchietoare a sculei, egal cu volumul de material îndepărtat sub acțiunea forței  $F_n$   
 $\propto \frac{v/v_0}{P \cdot R_a}$  - coeficient complex care caracterizează eficiența rectificării  
 $a_n$  - secțiunea nominală a aşchiei, [mm<sup>2</sup>]  
 $N_{g,n}$  - numărul de treceri de netezire  
 $L$  - lungimea curbei de contact sculă-piesă, [mm]  
 $L''$  - lungimea arcului de contact sculă-piesă, [mm]  
 $\epsilon$  - deformație specifică, [µm/m]  
 $\nu$  - frecvența oscilației, [Hz]  
 $c$  - coeficient de conductibilitate termică, [watt/(m<sup>2</sup>·K)] (în sistemul S.I.)  
 $q$  - densitatea fluxului termic, [watt/m<sup>2</sup>] (în S.I.)  

$$[\text{cal/cm}^2 \cdot \text{s}] \text{ (în MKS)}$$
 $\lambda$  - coeficientul de transmitere de căldură, [watt/m<sup>2</sup>·K] (S.I.)  
 $\delta$  - greutatea specifică, [kg/m<sup>3</sup>]

## Capitolul 1

### PROBLEME GENERALE

#### 1.1. Scurt istoric. Stadiul actual și perspectivele rectificării

Rectificarea este cel mai vechi procedeu de prelucrare a materialelor. Din cele mai vechi timpuri omul a folosit materialele abrazive naturale (nisipul, gresia, ș.a.) pentru ascuțirea uneltelor sale (topoare din piatră, cuțite, săgeți, ș.a.).

Descoperirea metalelor - a cuprului, bronzului și mai ales fierului - deprinderea topirii și prelucrării acestora au determinat perfecționarea uneltelor. Muchiile ascuțite ale acestora s-au obținut tot prin rectificare. Au trecut multe secole pînă ce omul a inventat scula, cu acționare manuală și apoi prima mașină de rectificat.

Dezvoltarea intensivă a rectificării a început cu a doua jumătate a secolului al XIX-lea cînd în fața constructorilor de mașini s-a pus problema executării unui număr mare de piese cu suprafețe prelucrate precis, cu productivitate și economicitate bună.

Dezvoltarea rectificării a fost favorizată în mare măsură de inventarea sculei abrazive sintetice (în anul 1859) și construirea primelor mașini universale de rectificat (în anul 1860). Perfecționarea continuă a mașinilor de rectificat și îmbunătățirea calității sculelor abrazive a făcut din rectificare un procedeu de mare productivitate pentru prelucrarea precisă a pieselor din diferite materiale.

Perfecționarea sculelor abrazive a fost impulsionată și de inventarea - la începutul secolului nostru - a carburilor metalice. Utilizarea acestora, sub formă de plăcuțe lipite pe sculele așchietoare, a determinat creșterea însemnată a productivității așchierii, iar a pus și probleme dificile în legătură cu ascuțirea sculelor.

Obținerea unor tăișuri foarte netede a fost posibilă prin utilizarea sculelor diamantate (discuri, bare, etc.). Sculele diamantate, la rîndul lor, au perfecționat procedeele de rectificare.

Crescut simțitor precizia de prelucrare a pieselor - toleranțe de micrometri și rugozitatea suprafețelor  $R_a = 0,1 \dots 0,02 \mu\text{m}$ , realizate prin rectificare cu diamant și procedee derivate: hounuire, suprafinisare, lustruire.

Inventarea nitrurii cubice de bor (elbor, borazon, ș.a.) și fabricarea sculelor de rectificat din acest material au determinat succese la rectificarea pieselor din oțeluri călite și înalt aliate, din fonte de mare rezistență.

În același timp folosirea oțelurilor și fontelor obișnuite ca materiale de bază în construcția de mașini și necesitatea obținerii unor piese de înaltă precizie și cu o bună productivitate, a determinat perfecționarea sculelor abrazive din materiale convenționale: corindon natural, electrocorindon, carbură de siliciu și carbură de bor. Perfecționarea acestor materiale, de largă utilizare, în practica rectificării, se face pe calea creșterii rezistențelor mecanice și a capacității de așchiere prin alierea cu crom, tantal, zirconiu. Prin alierea complexă a corindonului s-au obținut scule abrazive care permit, spre exemplu, degroșarea lingourilor și bramelor din oțel 7TNC180 cu o productivitate a rectificării de 150-180 Kg/oră.

Prezentăm în continuare succint principalele direcții de preocupări în domeniul rectificării metalelor. Acestea sînt:

- 1) Perfecționarea construcției mașinilor de rectificat;
- 2) Perfecționarea materialelor abrazive și construcției sculelor de rectificat;
- 3) Creșterea preciziei pieselor rectificate.

În ceea ce privește prima direcție se arată următoarele. Mașinile de rectificat ocupă o pondere însemnată în parcul de mașini-unelte al întreprinderilor: în construcția de mașini obișnuită 10-12 %, în industria de automobile pînă la 25 %, iar în industria de rulmenți pînă la 55-60 %. Calitatea mașinilor de rectificat determină în bună parte calitatea producției, motiv pentru care se acționează în direcția perfecționării continue a mașinilor de rectificat. Aceasta se realizează prin: a) creșterea productivității, pe seama creșterii vitezelor de așchiere și a avansurilor; b) creșterea preciziei, rigidității și stabilității la vibrații a mașinilor de rectificat, în scopul asigurării unei precizii ridicate a prelucrării la regimurile înalte de lucru.

La ora actuală, în țările cu industrie dezvoltată se construiesc mașini de rectificat și scule abrazive pentru rectificări de degroșare și finisare cu viteze de așchiere  $v_g = 60 \dots 90$  m/s, iar pentru debitări cu viteze  $v_g = 100$  m/s. După date de prognoză deduse din literatură, se poate aprecia că pînă în anul 2000 vitezele de așchiere la rectificarea vor crește pînă la  $v_g = 300$  m/s,

ceea ce a permis concluzia că circa 25 % din volumul prelucrărilor care actualmente se realizează cu scule cu tăişuri se vor executa prin rectificare.

Maşinile moderne de rectificat prezintă particularităţi distincte: putere instalată mare, între 60-250 Kw, rigiditate statică şi dinamică ridicată, o foarte bună stabilitate la vibraţii, dispozitive încorporate pentru echilibrarea dinamică a sculei la viteza de lucru a acestora, apărători speciale pentru scula abrazivă, dispozitive de control activ pentru măsurarea pieselor, sisteme perfecţionate de administrare şi curăţire a lichidului de răcire-ungere. Maşinile de rectificat moderne lucrează cu cicluri automate sau semiautomate.

O tendinţă distinctă este şi creşterea productivităţii maşinilor de rectificat existente pe seama creşterii vitezei sculei până la 50 m/s, în condiţiile modernizării acestora.

Efecte maxime de creştere a productivităţii prelucrării pe maşinile noi sau modernizate, se pot obţine numai cu scule abrazive de calitate.

Cercetările efectuate în ultimii 10-15 ani privind sculele de rectificat au avut în vedere următoarele aspecte: îmbunătăţirea calităţii sculelor abrazive din materiale tradiţionale în paralel cu crearea unor scule din materiale de rectificat noi, de calitate superioară celor existente, în special materialele extradure cu o formă geometrică determinată a grăunţilor.

Creşterea calităţii sculelor abrazive din materiale tradiţionale se face pe mai multe căi. Creşterea rezistenţei mecanice, a capacităţii de aşchiere şi a stabilităţii chimice la temperaturi ridicate se face prin alierea materialelor abrazive cu crom, titan, zirconiu. Creşterea rezilienţei materialelor abrazive se face pe calea cristalizării fine a grăunţilor. Sortarea grăunţilor abrazivi se face simultan după mărime şi formă. Acoperirea metalică a grăunţilor abrazivi este, de asemenea, o cale de îmbunătăţire a calităţii sculelor de rectificat.

Creşterea rezistenţei sculelor de rectificat, conform cercetărilor efectuate în RFG şi URSS, [39] se poate realiza prin: 1) mărirea rezistenţei ansamblului abraziv-liant; 2) construirea de scule armate; 3) construirea sculelor cu părţi metalice centrite; 4) execuţia sculelor abrazive fără alezaj; 5) mărirea

rezistenței părții centrale a sculei în zona alezajului, de unde pornesc, obișnuit, amorsele de rupere.

Mărirea rezistenței mecanice a ansamblului abraziv-liant se face mai ales prin perfecționarea lianților. Prin adăugarea în liantul ceramic a unor compuși de bor, litiu și fosfor viteza periferică a sculelor a crescut pînă la 60 m/s. Pentru obținerea discurilor cu liant de bachelită se folosește metoda presării la temperaturi ridicate și introducerea unor adaosuri în liant, care conferă sculei o rezistență mecanică ridicată.

Creșterea rezistenței sculelor cu liant de bachelită se realizează și pe calea armării acestora.

În Japonia s-au obținut progrese remarcabile privind armarea sculelor cu liant ceramic, în porțiunea din jurul alezajului cu fibre din materiale anorganice de mare rezistență.

Pentru mărirea rezistenței discurilor abrazive se recomandă și fixarea, prin lipire în jurul alezajului, a unei bucșe din oțel sau carburi metalice. Modulul de elasticitate al bucșei este superior celui al discului abraziv. La rotația discului bucșa prezintă o parte a tensiunilor tangențiale, iar stratul de clei o parte a tensiunilor radiale care apar prin deformarea bucșei, descărcînd, în acest fel, materialul abraziv mai puțin rezistent.

S-a dovedit eficientă și lipirea unor inele metalice pe suprafețele frontale ale sculei, în jurul alezajului.

Rezistența sculelor care nu prezintă alezaj crește substanțial. La sculele de rectificat fără alezaj eforturile tangențiale și radiale în centrul sculei sînt egale între ele. Varianta folosită a sculelor fără alezaj sînt discurile din segmenti.

Marele avantaj al discurilor din segmenti este posibilitatea obținerii unei omogenități ridicate a segmentilor, obiectiv care se realizează greu la discurile continue de diametru mare.

Rezistența porțiunii centrale a sculelor de rectificat, poate mări și prin executarea sculelor cu granulație și duritate diferită la centrul și periferia acestora.

Se cunoaște că rezistența sculelor de rectificat depinde în mare măsură de granulație și duritate: rezistența sculei este cu atât mai mare cu cît granulația acesteia este mai mică și duritatea mai ridicată. Din acest considerent, partea centrală a sculei,

dispusă în jurul alezajului se execută din abraziv cu granulația fină și duritate mai ridicată, iar partea periferică, activă, se execută cu caracteristicile necesare condițiilor concrete de lucru.

O atenție deosebită se acordă perfecționării construcției sculelor din diamant și nitrură cubică de bor (NCB). Ridicarea calității acestor scule se realizează actualmente și pe calea metalizării inițiale a grăunților, chimic sau prin pulverizare în vid. Prin această operație se urmărește realizarea a trei obiective. În primul rând, acoperirea metalică protejează mecanic grăunții, formînd o "cămașă metalică", care le permite să lucreze bine la sarcini dinamice mari și în cazul în care sînt fisurați. În al doilea rînd, acoperirea metalică a grăunților servește ca receptor de căldură, pe care o transmite la grăunții de diamant, care, la rîndul său este unul din cei mai buni conducători de căldură. În acest fel, în zona de contact a liantului organic cu metalul se stabilizează o temperatură mai scăzută ca cea din zona de contact al liantului organic cu diamantul, liantul organic al sculei fiind, în acest fel, protejat contra carbonizării sau altor forme de distrugere termică, păstrînd grăunții în mod rezistent și îndelungat. În al treilea rînd, existența stratului metalic mărește forța de coeziune dintre grăunte și liant.

Grosimea stratului metalic de acoperire influențează productivitatea rectificării și prețul de cost al prelucrării. Din aceste puncte de vedere o grosime a stratului metalic de 55 % din masa totală a grăunților s-a dovedit optimă.

Grăunții de diamant se metalizează cu titan, sau cu titan și zirconiu, iar cei din NCB și carbură de siliciu cu cupru, sau cu aliaje de nichel, cobalt, fier și crom.

La majoritatea sculelor abrazive, diamantate sau cu NCB grăunții sînt dispuși haotic, ceea ce nu permite să se realizeze în întregime proprietățile lor așchietoare. Din această cauză dispunerea orientată și ordonată a grăunților este una din metodele ridicării capacității de așchiere a sculelor de rectificat [52]. Orientarea grăunților de diamant față de planele de așchiere, permite considerarea procesului de rectificare ca un proces de microașchiere cu grăunți-cuțite, care au unghiuri de degajare cu valori apropiate.

Lianții folosiți pentru confecționarea sculelor cu grăunți de diamant orientați trebuie să aibe o serie de proprietăți speci-



fice, legate de tehnologia orientării. Intrucît grăunții metalizați sînt orientați în cîmpuri magnetice, liantul, într-o stare anumită trebuie să asigure rotirea liberă a grăunților de-a lungul liniilor de forță magnetică, iar apoi să-i rețină sigur, fără folosirea altor forțe exterioare.

Acțiunea cîmpului electric asupra grăunților dispuși la armătura inferioară a unui condensator constă în imprimarea unor mișcări ordonate în direcția armăturai superioare. Transportul grăunților este posibil în condensatoare de diferite construcții și dimensiuni.

Disponerea corectă a grăunților permite să se creeze condiții optime de aşchiere pentru fiecare grăunte și îndepărtarea corespunzătoare a produşilor de uzură din zona de rectificare.

Cercetări actuale privind perfecționarea procesului de rectificare au ca obiect și realizarea procedeelor de introducere a substanțelor active în zona de aşchiere prin intermediul liantului. Este cazul sculelor de rectificat cu lianți organici, în compoziția liantului cărora se adaugă adausuri ușor fuzibile, care se topesc la rectificare. Astfel de adausuri sînt mai ales săruri: sulfuri, cloruri, ș.a.. Acțiunea acestora la rectifiicare poate fi identificată cu prezența lor în lichidul de aşchiere. Efectul lor în direcția creșterii eficienței rectificării se referă la micșorarea temperaturii în zona de lucru, sau favorizarea desfășurării anumitor procese pe suprafața metalului de prelucrat (chimice, de absorbție, etc.) care au ca rezultat o scădere locală a rezistenței metalului și, în consecință, ușurarea prelucrării acestuia.

Folosirea adausurilor ușor fuzibile în discurile diamantate cu liant B 156 (Б 156 - URSS) a permis creșterea productivității rectificării și a durabilității sculelor de șapte ori [39].

În cele prezentate pînă aici am evidențiat principalele direcții de perfecționare a sculelor abrazive. Trebuie să mai subliniem și următorul aspect. Chiar folosirea unor scule abrazive de calitate poate duce la rezultate nesatisfăcătoare, dacă acestea nu sînt pregătite și nu sînt exploatate corespunzător. Din acest punct de vedere are mare importanță montarea sculelor, echilibrarea și ascuțirea (corectarea) acestora.

Este încă frecvent folosită metoda echilibrării statice a sculelor de rectificat, dar în ultimul deceniu s-a impus cu necesi-

tate și echilibrarea dinamică a acestora. O serie de mașini de rectificat rapid sînt prevăzute cu instalații pentru echilibrarea dinamică automată a sculei pe mașină.

Ascuțirea sculelor de rectificat se face cu creioane diamantate, cu grăunți de diamant fixați în suportți metalici, cu role și bare diamantate, cu scule metalice sau abrazive (carbură de siliciu verde). Operația de ascuțire se realizează la mașinile moderne în timpul schimbării semifabricatului.

Sculele de rectificat sînt de o foarte mare varietate constructivă: discuri plane, cilindrice și conice, pietre taler, pietre oală, pietre cilindrice cu scobituri, pietre cilindrice cu degajare, segmenti, pietre bitronconice, pietre cilindrice cu dublă degajare conică, pietre cilindrice cu tăieturi, pietre cu tijă, pietre pilă, scule profilate, etc. O formă constructivă nouă, de perspectivă este cea a discurilor cu suprafața activă discontinuă. O construcție tipică a unei astfel de scule este prezentată în fig.1.1

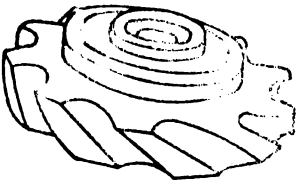


FIG. 1.1

În cazul folosirii unor astfel de scule condițiile de formare și îndepărtare a așchilor sînt mai bune, temperatura de așchiere este mai scăzută, dar rugozitatea suprafețelor prelucrate este mai mare. Folosirea discurilor discontinue este eficientă mai ales la rectificarea plană frontală, întrucît în acest caz arcul de contact are o lungime mare și degajarea de căldură în zona de contact

al discului cu piesa este mai intensă.

La rectificarea cilindrică și plană cu avans longitudinal se folosesc tot mai mult sculele abrazive - discuri - compuse. În acest caz primul disc se execută cu granulație mare și îndepărtează cea mai mare parte a adaosului de prelucrare, iar al doilea, cu granulație mică, îmbunătățește rugozitatea suprafeței.

Se folosesc și discuri din segmenti abrazivi. În acest caz se intensifică disiparea căldurii formate și crește vibrația, ceea ce face posibilă curățirea discului de particulele metalice, asigurîndu-se autoascuțirea.

În ceea ce privește a treia direcție majoră de preocupări în domeniul rectificării arătăm pe scurt următoarele: Calitatea pie-

selor rectificatice se caracterizează prin precizie geometrică: precizia dimensiunilor, precizie de formă și poziție a suprafețelor, rugozitate și simultan absența arsurilor, fisurilor și microfisurilor în stratul superficial, tensiuni interne favorabile.

Calitatea suprafețelor rectificatice este rezultatul unui proces fizic complex, în care interacționează piesa, scula de rectificat, lichidul de răcire-ungere (LRU) și mașina-unealtă. Rectificarea fiind, în cele mai multe cazuri, o operație de finisare, calitatea suprafețelor rectificatice influențează esențial comportarea în exploatare a pieselor. Rugozitatea suprafețelor piesei finite determină în mare măsură uzura inițială a acesteia, păstrarea ajustajelor iar starea fizico-chimică a stratului superficial uzura în exploatare. Acestea sînt numai cîteva aspecte care explică importanța cercetărilor teoretice și experimentale vîzînd gîsirea unor metode de îmbunătățire a calității suprafețelor rectificatice, respectiv de stabilirea condițiilor de prelucrare - sculă abrazivă, regim de lucru, LRU, etc. - în vederea obținerii unei calități impușe a suprafeței rectificatice. Astfel de cercetări fac și obiectul lucrării de față.

Apreciez că multitudinea de aspecte relevate succint în acest subcapitol motivează locul important pe care cercetările în domeniul rectificării îl ocupă în construcția de mașini actuală în condițiile creșterii cerințelor față de calitatea pieselor prelucrate.

## 1.2. Particularități ale procesului de rectificare

Rectificarea este un proces de microașchiere masivă a stratului superficial al pieselor, realizat de un număr mare de grăunți abrazivi fixați de liant în corpul sculei, procesul desfășurîndu-se la viteze mari: obișnuit pînă la 30-35 m/s, dar în ultimul deceniu și pînă la 60-90 m/s pentru degroșare și finisare, iar pentru debitare 100 m/s.

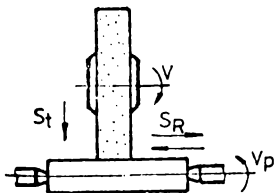


FIG. 1.2

Principalul procedeu de rectificare este rectificarea cilindrică exterioară cu avans de trecere (longitudinal) - fig.1.2. În acest caz traiectoria de așchiere a grăuntelui abraziv este o elică hipocicloidală  $\gamma$ , iar suprafața de așchiere este o familie de elici hipocicloide.

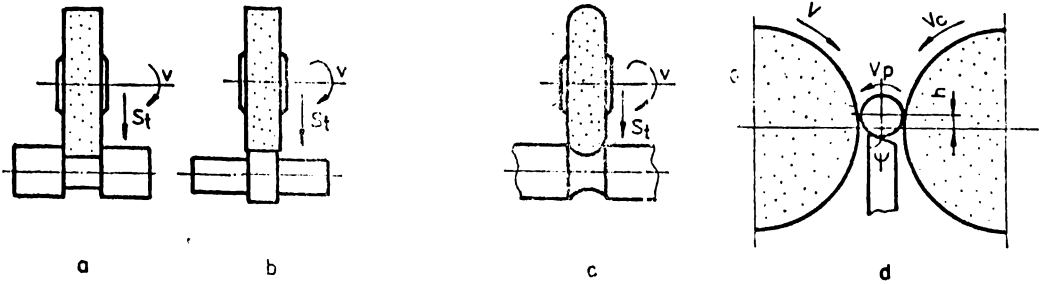
542 767  
361 G

FIG. 1.3

Alte variante ale procedurii de rectificarea cilindrică exterioră se prezintă în Fig.1.3: cu avans de pătrundere (a), (b), cu avans de pătrundere pentru suprafețe profilate (c) și fără centre (d).

Rectificarea, ca metodă de finisare a materialelor asigurate: 1) productivitate ridicată, exprimată prin volumul mare de material aşchiat în unitatea de timp, sau prin dimensiunile mari ale suprafeței prelucrate; 2) precizie dimensională ridicată a pieselor, în limitele a 2-3  $\mu\text{m}$  și mai puțin; 3) precizie ridicată a formei pieselor - abaterea de la cilindricitate 0,4 - 0,5  $\mu\text{m}$ ; 4) rugozitate mică a suprafeței prelucrate - obișnuit 1,6-0,8  $\mu\text{m}$ , dar și 0,4-0,2  $\mu\text{m}$ ; 5) calitate avansată a stratului superficial al pieselor; 6) posibilitatea prelucrării materialelor foarte dure - oțeluri călite, carburi metalice, materiale ceramice, ș.a., datorită durității și termostabilității foarte ridicate a grăunților abrazivi și sculelor.

Rectificarea, ca proces de aşchiere, nu prezintă diferențe principale față de celelalte procedee de aşchiere, întrucât procesul de formare al aşchii, pentru oricare procedeu, decurge după aceeași schemă. În toate cazurile aşchiera este o forfecare succesivă a elementelor aşchii cu ajutorul unei pene - dintele sculei, grăunțele abraziv - asupra căreia se aplică o anumită forță...

Față de aşchiera cu scule cu tăguri, rectificarea prezintă însă o serie de particularități: 1) distribuția neuniformă a numărului mare de grăunți abrazivi pe suprafața activă a sculei; 2) înălțime aşchietoare discontinuă a sculei de rectificat; 3) înălțime diferită a grăunților abrazivi; 4) formă geometrică variată a grăunților abrazivi, cu vîrfuri rotunjite, care determină, de regulă, înghițuri de degajare negative; 5) proprietăți deosebite ale grăunților aşchietori: duritate ridicată, termostabilitate, tăguri as-

cuțite, fragilitate, posibilitatea că să se distrugă după planele de  
 lipire, ș.a.; 6) viteze periferice mari și adâncimi mici de așchie-  
 re, care permit ridicarea instantanee a unui număr foarte mare de  
 așchii în unitatea de timp și o frecare intensă a grăunților abra-  
 zivi cu materialul prelucrat în momentul premergător pătrunderii a-  
 cestora în piesă și începerii microașchierii; 7) procesul de rectifi-  
 ficare poate fi condus numai prin modificarea regimurilor de așchie-  
 re, întrucât modificarea geometriei grăuntelui abraziv, având ace-  
 lași rol ca și cuțitul sau dintele frezei este, practic, greu realiza-  
 bilă. Discurile diamantate, datorită unei tehnologii speciale de fa-  
 bricație, pot avea o orientare favorabilă a grăunților așchietori în  
 corpul sculei, ceea ce asigură condiții mai bune de așchiere; 8) scu-  
 lele de rectificat se pot autoascuți în procesul de așchiere. Ca re-  
 zultat al uzării muchiilor grăunților abrazivi forțele de așchiere și  
 prin urmare și forțele care acționează asupra grăunților cresc, gră-  
 unții sînt smulși sau se desprind din liant și la suprafața sculei  
 apar grăunți noi, ascuțiți; 9) suprafața rectificată se formează ca  
 rezultat al acțiunii simultane a factorilor geometrici, caracteris-  
 tici pentru procesul de așchiere și a deformațiilor plastice care în-  
 soțesc acest proces; 10) acțiunea dinamică a fiecărui grăunte abra-  
 ziv pe suprafața prelucrată determină creșterea temperaturii instantanee  
 în procesul de microașchiere. Din această cauză fenomenele termice  
 și frecarea influențează mult rezultatul prelucrării prin rectifica-  
 re.

Rectificarea este considerată un proces de microașchiere  
 cu viteze foarte ridicate, dacă se consideră grosimile foarte mici  
 ale așchilor ridicate și viteza mare de rotație a sculei. La rec-  
 tificarea materialelor tenace (n metalelor) are loc o deformare vo-  
 lumatică complexă a stratului superficial, iar la prelucrarea materia-  
 lelor fragile (carburi metalice, materiale ceramice) în principal o  
 rupere fragilă.

Fiecare grăunte abraziv așchiază un timp foarte scurt, de  
 $10^{-4} \dots 10^{-5}$  s, adică, practic instantaneu.

În cazul general, timpul de ridicare a așchii este:

$$T = \frac{L}{1000 v_g}, [s] \quad (1.1)$$

în care L - lungimea arcului de contact în mm, iar  $v_g$  - viteza de  
 așchiere (viteza sculei) în m/s.

Cantitatea totală de așchii ridicată de scula de rectifi-  
 cat în unitatea de timp este foarte mare.

La rectificare, datorită acțiunii masive a grăunților abrazivi asupra stratului superficial, în zona de contact a sculei cu piesa se dezvoltă temperaturi instantanee ridicate, în multe cazuri aproape de temperatura de topire a materialului prelucrat. Această temperatură ridicată determină creșterea plasticității materialelor metalice, aspect care influențează favorabil prelucrarea.

Procesul de rectificare este influențat de mulți parametri. În cazul general, dacă notăm cu  $A$  parametrul cercetat, care poate fi  $F_n$ ,  $F_t$  - forța de așchiere normală, respectiv tangențială,  $R_a$  - rugozitatea suprafeței rectificate,  $O_1$  - temperatura instantanee de rectificare,  $T$  - durabilitatea sculei de rectificat, ș.a., se obține:

$$A = f(C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, l, D_p, R_s, B, n_s, n_p, t, s, C_6, C_7, C_8) \quad (1.2)$$

în care  $C_1 \dots C_8$  sînt coeficienți care caracterizează respectiv materialul prelucrat, materialul grăunților abrazivi, liantul, duritatea și structura sculei, lichidul de răcire-ungere, precizia și rigiditatea mașinii de rectificat, calitatea ascuțirii sculei.

Stabilirea dependenței parametrului  $A$  de fiecare din factorii menționați, pe cale experimentală, este complicată de neuniformitatea caracteristicilor sculei abrazive.

Din analiza acțiunii de așchiere a grăunților abrazivi se remarcă că aceștia au forma unor poligoane neregulate cu vîrf rotunjit (fig. 1.4). În valoare absolută această rotunjire este mică, dar trebuie luată în considerare întotdeauna, întrucît la microașchiere grosimea așchii ridicate este comparabilă cu raza de rotunjire la vîrfurile grăunțului ( $\rho, \mu\text{m}$ ). În

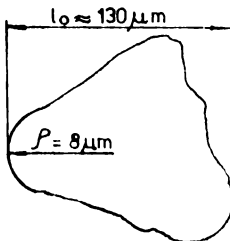


FIG. 1.4

fig.14 se prezintă forma unui grăunte de electrocorindon cu granulația 80 ascuțit (nou) la o mărire de 500 de ori. Pornind de la particularitatea menționată a formei geometrice a grăunțului s-au stabilit legile principale ale procesului de microașchiere. Ca rezultat al rotunjirii vîrfurilor grăunțului rezistența dinamică a acestuia crește, unghiurile de degajare sînt negative (unghiurile efective de așchiere sînt mai mari de  $90^\circ$ ) iar între forțele de așchiere se stabilește relația  $F_n > F_t$ .

Flecarea grăunte abraziv prezintă o suprafață de degajare (ECB în fig. 1.5) și o suprafață de așezare ( $BC_1E_1$  în fig.1.5). Suprafața grăuntelui are întotdeauna o rugozitate, datorită imperfecțiunii interne sau condițiilor de generare. Microasperitățile M și submicroasperitățile N ale grăunților au importanța unor elemente active independente care ridică așchii de 10 și chiar 100 ori mai mici, în comparație cu elementul activ principal.

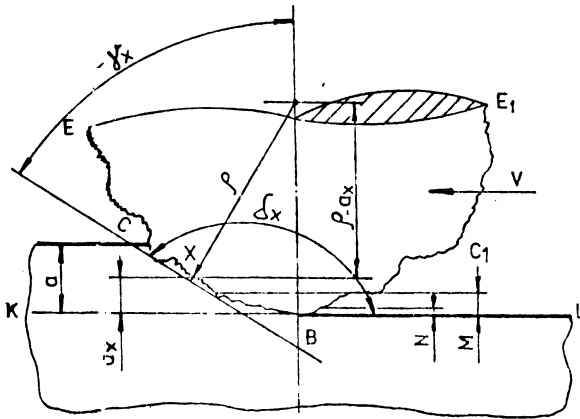


FIG. 1.5

Datorită rotunjirii grăuntelui, la degajarea așchilor subțiri se formează unghiuri de așchiere cu atât mai mari cu cât este mai mică grosimea așchiei ridicate, adică

cu cât stratul de material deformat este mai aproape de elementul așchiei (de linia de așchiere KL).

Unghiul de degajare efectiv, într-un punct oarecare  $x$  va fi:

$$\gamma_x^e = \arcsin \frac{\rho - a_x}{\rho} \quad (1.3)$$

în care  $a_x$  - grosimea stratului așchiat în punctul  $x$

$\rho$  - raza de rotunjire a grăuntelui abraziv

Unghiul de așchiere efectiv, în punctul  $x$  va fi, în mod corespunzător

$$\delta_x = \frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{\rho - a_x}{\rho} \quad (1.4)$$

Din formula (1.4) rezultă că la  $a_x \rightarrow 0$   $\delta_x \rightarrow 180^\circ$ , adică, pentru straturile de material care se află nemijlocit pe linia de așchiere, unghiul de așchiere are valori pentru care așchiera nu mai este posibilă și are loc strivirea (tasarea) materialului.

Prin mărirea grosimii stratului așchiat adică pe măsură îndepărtării de linia de așchiere, unghiul de așchiere efectiv se micșorează, iar la  $a_x = \rho$   $\delta_x = 90^\circ$ ; pentru  $a_x > \rho$   $\delta_x < 90^\circ$ .

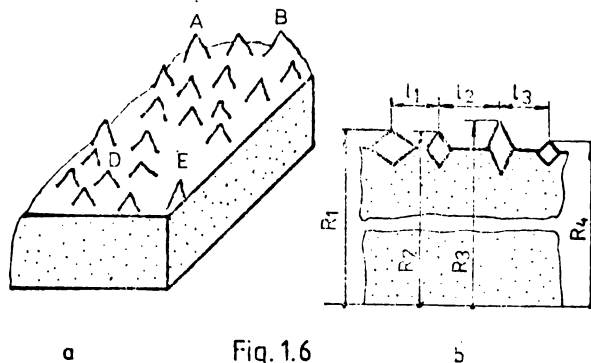
În stratul aşchiat se dezvoltă tensiuni de compresiune importante. Dacă grosimea stratului aşchiat este mare, iar unghiul de aşchiere este mic, în apropierea grăuntelui abraziv (elementului de aşchiere) tensiunile de compresiune se transformă în tensiuni de întindere.

Dacă raza de rotunjire a grăuntelui este mai mare decât grosimea stratului de material aşchiat ( $\rho > a_x$ ) începutul aşchierii este precedat de o alunecare mare între grăuntele abraziv și materialul prelucrat.

Prin creșterea grosimii aşchii lucrul mecanic de deformare crește atunci cînd  $\delta_x < 90^\circ$  și rămîne, practic, constant atunci cînd  $\delta_x > 90^\circ$ . Așa se explică, faptul că, la grosimi mari ale aşchii, apăsarea specifică de aşchiere depinde puțin de grosimea stratului aşchiat.

Lățimea aşchii, care se determină prin lungimea stratului de material supus deformării, nu influențează mărimea unghiului efectiv de aşchiere. Din această cauză apăsarea specifică de aşchiere nu depinde, practic, de lățimea aşchii.

Particularitatea principală a sculelor de rectificat - discuri, bare, segmenti - este dispunerea dezordonată a grăunților aşchietori pe suprafața activă (fig.16 a).



a

Fig. 16

b

Datorită dispunerii dezordonate a grăunților aşchietori, la diferitele și distanțe diferite unul față de celălalt (fig.16 b)  $R_1 \neq R_2 \neq R_3 \neq R_4 \neq \dots R_n$  și  $l_1 \neq l_2 \neq l_3 \neq l_4 \neq \dots l_n$

în procesul de rectificare vor fi diferite:

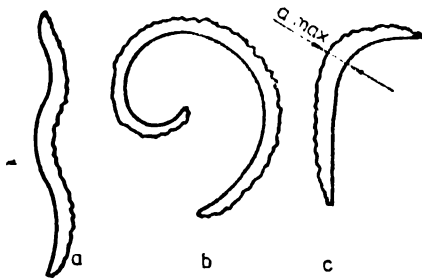
- 1) avansurile pe grăunte abraziv:  $s_{d1} \neq s_{d2} \neq \dots s_{dn}$ ;
- 2) adâncimile efective de aşchiere ale fiecărui grăunte abraziv:  $t_{d1} \neq t_{d2} \neq \dots t_{dn}$ ;



- 3) grosimea așchiilor ridicate de fiecare grăunte abraziv:  
 $a_{d1} \neq a_{d2} \neq a_{d3} \neq \dots a_{dn}$

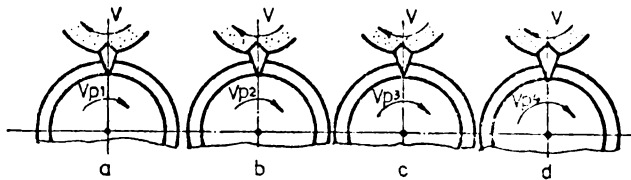
Disponerea dezordonată a grăunților abrazivi pe suprafața activă a sculei, realizează configurații și dimensiuni diferite ale așchiilor ridicate de diferiții grăunți. Pentru o sculă de rectificat dată, forma și dimensiunile așchiilor depind de regimul de așchiere și mai ales de raportul dintre vitezele periferice ale sculei și piesei ( $v_g/v_q$ ).

La rectificarea metalelor de tenacitate medie și ridicată se formează așchii de trei forme tipice: de curgere, de forfecare și în formă de virgulă (fig.17) [52].



Așchiile de curgere se întâlnesc cel mai frecvent. Mai rar se întâlnesc așchiile în formă de virgulă; la rectificarea de degroșare a pieselor din oțeluri tenace astfel de așchii pot atinge dimensiuni mari.

În anumite condiții de așchiere se formează așchii de forfecare, în formă de segment, cu grosimea maximă în partea centrală. La o viteză periferică constantă a sculei, creșterea vitezei periferice a piesei îi corespunde creșterea avansului pe grăunte și în acest caz așchia ia forma unui segment (fig.18) [52]



a)  $Vp_1 = \text{valoare minimă}$  b)  $Vp_2 > Vp_1$  c)  $Vp_3 > Vp_2$

FIG. 1.8

În procesul de microașchiere așchiile se contractă, din care cauză forma reală a așchiei diferă întotdeauna de cea teoretică.

Forma stratului așchiat este unul din parametrii principali care caracterizează legile de bază ale procesului de așchiere la rectificare, legile încălzirii sculei și temperatura în zona de contact a piesei cu scula de rectificat.

În legătură cu procesul de ridicare a așchilor și formarea suprafeței prelucrate la rectificarea cilindrică se menționează succint următoarele. Dacă se lucrează cu avans longitudinal, microzgărirea stratului superficial al piesei este realizat de grăunții care se află pe porțiunea din lățimea sculei egală cu avansul longitudinal (fig. 1.9).

Discul de rectificat nu prezintă o muchie aschietoare continuă pe generatoare. Din această cauză după o rotație a piesei pe suprafața acesteia rămân microasperități care se înlătură la contactele următoare ale sculei cu porțiunea determinată a piesei. Aceste microasperități pot fi reduse în înălțime prin mărirea numărului de contacte ale sculei cu porțiunea considerată a piesei, ceea ce se realizează:

1) prin micșorarea avansului longitudinal; 2) prin treceri suplimentare fără avans de pătrundere - netezire.

Prin micșorarea avansului longitudinal scade și încărcarea pe fiecare grăunte abraziv.

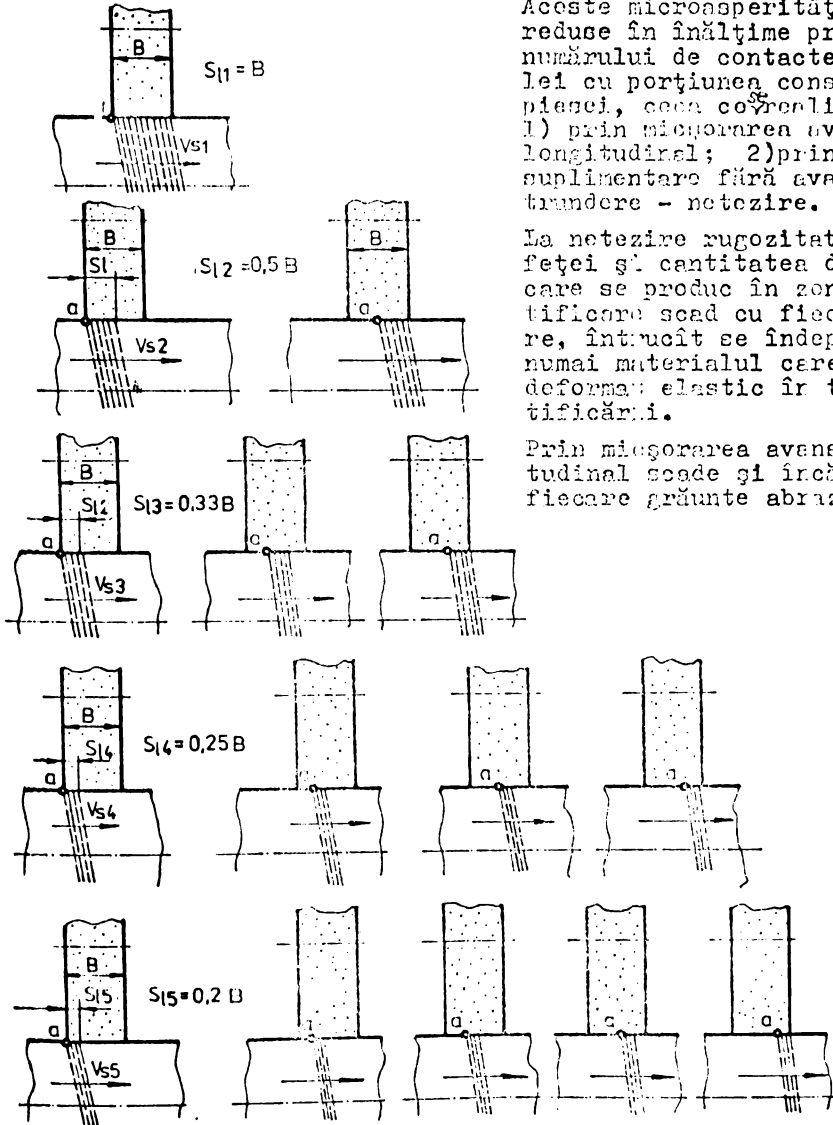


FIG. 1.9

### 1.3. Indicatori de eficiență a rectificării

Pentru aprecierea eficienței procesului de rectificare și a capacității aşchietoare a sculelor de rectificat se folosesc indicatori de bază și indicatori suplimentari. Indicatorii de bază ai eficienței rectificării sînt: 1) productivitatea prelucrării, determinată prin volumul de material rectificat,  $Z$ , [ $\text{mm}^3/\text{s}$ ]; 2) uzura sculei abrazive,  $Z_s$  [ $\text{mm}^3/\text{s}$ ]; 3) productivitatea specifică:

$$\varphi = \frac{Z}{Z_s} \quad (1.5)$$

4) durabilitatea sculei, exprimată prin timpul de rectificare  $T$  în minute; 5) rugozitatea  $R_{a1}$   $\mu\text{m}$  a suprafeței prelucrate.

6) Pentru rectificarea cu scule diamantate și din nitrură cubică de bor, materialele foarte scumpe în comparație cu abrazivii obișnuți, productivitățile specifice se exprimă prin masa sau volumul de material prelucrat raportate la 1 mg de grăunți pierduți prin uzură:

$$\varphi_d = \frac{M_p}{M_g} \quad [\text{g}/\text{mg}] \quad \text{sau} \quad \varphi_v = \frac{V_p}{M_g} \quad [\text{mm}^3/\text{mg}] \quad (1.6)$$

unde  $M_p$  și  $V_p$  sînt masa, respectiv volumul materialului prelucrat, iar  $M_g$  - masa grăunților de diamant sau NCB pierduți prin uzură.

7) Pentru determinarea uzurii sculelor diamantate sau din NCB se folosesc indicatori de uzură specifică, adică cantitatea de grăunți necesară pentru îndepărtarea a 1g sau 1  $\text{mm}^3$  de material:

$$u_d = \frac{M_g}{M_p} \quad [\text{mg}/\text{g}] \quad \text{și} \quad u_v = \frac{M_g}{V_p} \quad \text{mg}/\text{mm}^3 \quad (1.7)$$

Productivitatea specifică și uzura specifică sînt indicatori importanți ai eficienței procesului, deși nu reflectă în întregime condițiile de prelucrare.

8) Condițiile de prelucrare sînt reflectate eficient de alți indicatori ca: durabilitatea sculei  $T$ , rugozitatea suprafeței prelucrate  $R_a$ , forțele și puterea de aşchiere, temperatura de aşchiere ș.a.

9) În anumite cazuri se folosește drept indicator al eficienței rectificării, volumul de material îndepărtat sub acțiunea forței  $F_n$ :

$$\lambda = \frac{dZ}{dF_n} \quad (1.8)$$

unde  $\lambda$  - coeficientul capacității aghiatoare a sculei.

10) In alte cazuri se folosește drept indicator al eficienței rectificării caracteristica energetică a procesului, adică lucrul mecanic consumat pentru îndepărtarea masei  $\Delta M_p$  de material:

$$E_p = \frac{L}{\Delta M_p} = \frac{\int F_t \cdot v_s \cdot dZ}{\Delta M_p} \quad (19)$$

11) S-a propus și coeficientul complex:

$$\alpha = \frac{Z/Z_s}{P_e \cdot R_a} \quad (1.10)$$

în care  $P_e$  - puterea acționării;  $R_a$  - rugozitatea suprafeței prelucrate.

12) Eficiența rectificării se poate aprecia și prin costul specific al prelucrării:

$$C = \frac{C_p}{Z} + \frac{C_s}{\varphi} + \frac{C_a}{\Delta Z} \quad [\text{lei/mm}^3] \quad (1.11)$$

în care -  $C_p = \frac{S + R + E}{60}$  este costul unui minut de exploatare al mașinii, lei/min, S - fiind retribuția orară a muncitorului, R - costuri legate de întreținerea mașinii, lei/oră; E - costul orar al energiei electrice lei/oră;

-  $C_s$  - costul unui  $\text{mm}^3$  din volumul util al sculei, lei/ $\text{cm}^3$ ,  $\varphi$  - productivitatea specifică  $\varphi = \frac{Z}{Z_s}$

-  $C_a$  - costul ascuțirii sculei, [lei], cuprinzînd:

- costul propriu-zis al operației de ascuțire;
- cota parte a costului sculei de ascuțit;
- timpul de ascuțire și timpul auxiliar pentru retrăgerea dispozitivului de ascuțire

$\Delta Z$  - volumul de material prelucrat între două reascuțiri succesive

Din analiza formulei (1.11) rezultă căile pentru scăderea costului rectificării. Cele mai importante sînt următoarele: creșterea productivității rectificării și creșterea productivității specifice. Este importantă și micșorarea uzurii sculei și timpului de ascuțire a acesteia.

În toate procesele de rectificare eficiența prelucrării depinde de calitatea sculei și de alegerea sa corectă pentru cazul de prelucrare dat.

S-a arătat mai sus că eficiența rectificării se apreciază frecvent prin rugozitatea,  $R_a, [\mu m]$ , a suprafeței prelucrate. Obținerea unei rugozități impuse a suprafeței prelucrate este un obiectiv important al rectificării.

Acest parametru, însă, trebuie corelat cu precizia formei geometrice, absența fisurilor și arsurilor pe suprafața prelucrată, ansamblul acestor indicatori definind o calitate avansată a suprafeței rectificate.

În cadrul cercetărilor complexe de laborator vizînd studiul capacității așchietoare a sculelor de rectificat și eficiența rectificării se analizează și următorii indicatori suplimentari: componenta normală (radială) a forței de așchiere -  $F_n$ , componenta tangențială a forței de așchiere -  $F_t$ ; forța normală specifică  $F'_n = \frac{F_n}{B}$  și forța tangențială specifică  $F'_t = \frac{F_t}{B}$ , în care  $B$  - lățimea sculei abrazive; efortul specific de rectificare  $\sigma = \frac{F_t}{f}$  în care  $f$  - secțiunea nominală a stratului așchiat. Se analizează puterea efectivă de așchiere  $P_a = F_t \cdot v_s$ ,  $[kW]$ , și puterea de așchiere specifică  $P'_a = \frac{P_a}{B}$ , consumul specific de energie pentru îndepărtarea materialului  $E_m = \frac{P_a \cdot 60}{v_p}$ ,  $[KJ/mm^3]$  și consumul specific de energie raportat la uzura sculei abrazive  $E_a = \frac{P_a \cdot 60}{v_s}$ ,  $[KJ/mm^3]$ .

13) În unele cazuri se studiază și următorii indicatori suplimentari - coeficientul capacității așchietoare a sculei abrazive  $k_g = \frac{Z}{F_n}$   $[mm^3/N \cdot min]$ , coeficientul de autoașchiere a sculei  $k_g = \frac{Z_g}{F_n}$   $[mm^3/N \cdot min]$ ;

14) Coeficientul de rectificare  $\mu = \frac{F_t}{F_n}$ , care caracterizează eficiența funcționării sculei de rectificat. Prin creșterea coeficientului de rectificare în comparație cu coeficientul de frecare, eficiența așchierii cu scula respectivă crește.

#### 1.4. Concluzii

În acest capitol au fost prezentate succint stadiul actual și unele perspective ale rectificării, particularitățile procesului de rectificare și indicatorii de eficiență și calitate ai acestuia.

Din această multitudinea de aspecte, cercetările teoretice și experimentale care fac obiectul prezentei lucrări au fost orien-

tate pe probleme privind prognozarea și îmbunătățirea calității suprafețelor rectificatice ale pieselor - obiectiv esențial al prelucrării.

## Capitolul 2

### CALITATEA SUPRAFETELOR PRELUCRATE

#### 2.1. Indici de calitate ai suprafețelor rectificatice

După cum se cunoaște, calitatea suprafețelor prelucrate se definește prin indici care exprimă starea geometrică și starea fizico-chimică a suprafețelor respective.

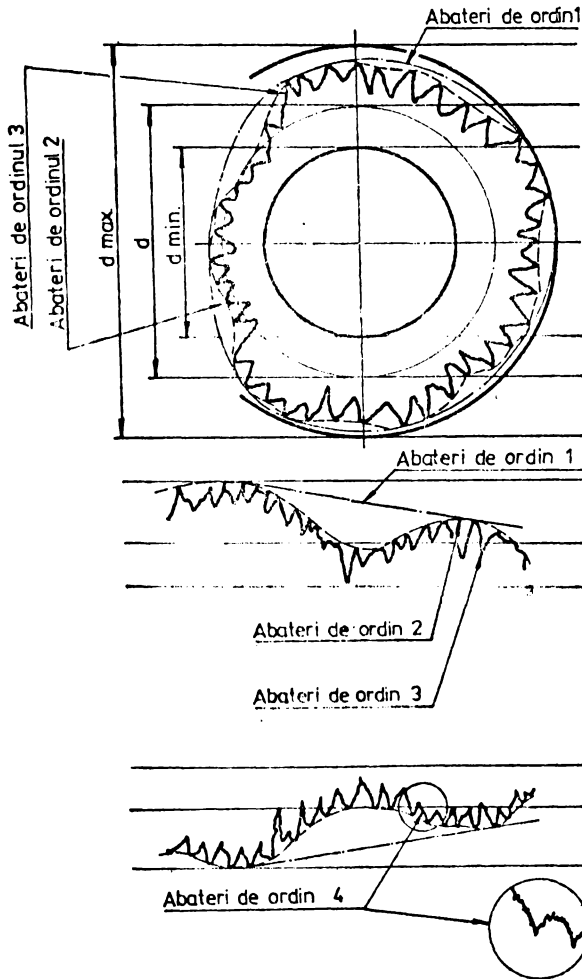
Starea geometrică a suprafeței este caracterizată de abaterile geometrice ale suprafeței reale a piesei în raport cu cea definită geometric prin documentația tehnică de execuție.

Starea fizico-chimică a suprafeței este definită de caracteristicile fizico-chimice ale stratului superficial al piesei respective.

Standardele românești STAS 5730/1-85, 5730/2-85 și 5730/3-75 definesc numai parametri care caracterizează starea geometrică a suprafețelor.

Abaterile geometrice ale suprafețelor sînt clasificate în abateri de ordinul 1, 2, 3 și 4 reprezentînd abateri de formă (ordinul 1), ondulații (ordinul 2) și rugozitate (ordinul 3 și 4). Aceste abateri sînt prezentate în fig. 2.1. STAS 5730-82 nu prezintă un criteriu fundamentat științific pentru delimitarea acestora. După părerea unui șir de autori, drept criteriu de delimitare a acestor aspecte ale abaterilor geometrice poate servi raportul dintre pasul ( $s$ ) și înălțimea ( $h$ ) neregularităților. Pentru abaterile de formă  $s/h \geq 1000$ , pentru ondulație  $s/h = 51-1000$ , iar pentru rugozitate  $s/h = 0-50$ . Pentru delimitarea ondulației de rugozitate se acceptă și precizarea că rugozitatea suprafeței este limita exterioară a corpului solid, care servește ca suprafață de separație între corpul solid și mediul înconjurător, ondulațiile fiind baza elastică care poartă microneregularitățile.

STAS 5730/1-85 definește parametrii de rugozitate care se referă la caracteristicile înălțimilor neregularităților profilului, cei care se referă la caracteristicile neregularităților considerate în direcția longitudinală a profilului precum și parametrii relativi de rugozitate și cei referitori la forma neregularităților profilului.



Parametrii de rugozitate care se referă la caracteristicile înălțimilor neregularităților profilului sînt:

- înălțimea proeminenței profilului -  $y_p$ ;
- adîncimea golului profilului -  $y_v$ ;
- înălțimea maximă a proeminenței profilului -  $y_p \max$ ;
- adîncimea maximă a golului profilului -  $y_v \max$ ;
- înălțimea maximă a profilului -  $R_y = |y_p \max| + |y_v \max|$ ;
- adîncimea de nivelare -

$$R_p = \frac{1}{l} \int_0^l y(x) dx;$$

- înălțimea neregularităților profilului în zece puncte  $R_z$

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}|}{5}$$

FIG. 2.1

- abaterea medie aritmetică a profilului :  $R_a$

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx, \text{ sau aproximativ}$$

$$R_a \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|;$$

- abaterea medie pătratică a profilului :  $R_q$

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^2(x) dx} ;$$

Parametrii de rugozitate care se referă la caracteristicile neregularităților considerate în direcția longitudinală a profilului sînt:

- pasul neregularităților profilului;
- pasul mediu al neregularităților profilului:  $s_m$ ;
- pasul mediu al proeminențelor locale:  $s$ ;
- lungimea desfășurată a profilului:  $l_0$ ;
- lungimea relativă a profilului:  $l_0 = l_0/l$ , unde  
 $l$  - lungimea de bază

Parametrii relativi de rugozitate și parametrii referitori la forma neregularităților profilului sînt:

- lungimea portantă a profilului:  $\eta_p$
- procentajul lunginii portante:  $t_p = \eta_p/l$

Față de STAS 5730/1-75, standardul revizuit nu definește parametrii undulației. În prezenta lucrare am adoptat notațiile:  $W$  - înălțimea undulației;  $W_{max}$  - înălțimea maximă a undulației;  $s_w$  - pasul undulației. Pentru undulația transversală notațiile sînt afectate de indicele "t".

Starea fizico-chimică a suprafețelor rectificate se caracterizează prin următorii indici: tensiuni interne, duritate, microstructura stratului superficial, arsuri, fisuri și microfisuri, transformări structurale, ș.a.. La rectificare starea fizico-chimică a suprafeței prelucrate este determinată de temperaturile ridicate care se dezvoltă în zona de lucru. Din acest punct de vedere are importanță nu numai temperatura de contact ci întreg cîmpul spațial de temperatură și mai ales gradientul de temperatură și viteza de modificare a temperaturii.

Calitatea suprafețelor rectificate, sub aspect geometric și fizico-chimic este determinată de parametrii cinematici și dinamici ai regimului de lucru, de proprietățile materialului piesei, de caracteristicile sculei abrazive, de calitatea și modul de administrare a lichidului de răcire-ungere și de mulți alți factori, motiv pentru care obținerea unei calități necesare a suprafețelor recti-



ificate se poate realiza numai prin optimizarea acestor parametri.

## 2.2. Ondulația suprafețelor rectificate

Ondulația pieselor rectificate este determinată de cinematica procesului de lucru, de vibrațiile forțate ale piesei prelucrate, ale păpușii port-platră, precum și de abaterile de formă ale sculei (ovalitate, poligonalitate). O influență mare asupra formării ondulației o are și raportul vitezelor piesei și sculei ( $v_p/v_s$ ). Creșterea vitezei periferice a sculei în limite determinate este însoțită de creșterea intensității vibrațiilor relative ale sistemului tehnologic MDSP.

La rectificare se produc frecări între grăunții abrazivi și metalul prelucrat. Se cunoaște că frecarea a două suprafețe are întotdeauna un caracter discret; datorită forțelor moleculare de coeziune apar și un timp periodic "pauze de colabare", rezultatul fiind acela că particule foarte fine de metal adărate de grăunții abrazivi se îndepărtează cu aceștia. Această periodicitate a solidificării moleculare provoacă autovibrațiile (vibrațiile auto-excite). Frecvența acestora se află obișnuit în limitele 300-900 Hz și nu depinde de regimul de rectificare. Autovibrațiile sînt de asemenea o cauză a generării ondulației suprafețelor rectificate.

Studierea mecanismului general de formare a ondulației la rectificare a fost efectuată de P.D. Hoțeva în lucrarea [26].

Dacă linia generatoare a discului abraziv este considerată "linia așchietoare" atunci ondulația care se formează, reprezintă traiectoria mișcării acestei linii în raport cu suprafața prelucrată (fig. 2.2 a, b, c). Dar discul abraziv real are un volum determinat și din această cauză în locul "liniei așchietoare" la rectificare participă o "suprafață de așchiere". Prin urmare, ondulația reală va avea în secțiunea transversală a piesei  $Y_A$ , care reprezintă înfășurătoarea șirului de poziții spațiale succesive ale sculei abrazive de diametru  $D_s$ .

Discul abraziv, avînd un diametru determinat, nu se înscrie în golul ondulației și taie porțiunile laterale ale creștelor învecinate. Prin urmare, micșorarea înălțimii ondulației este influențată de dimensiunea discului abraziv.

Admitem că suprafața cilindrică a piesei este desfășurată după dreptunghiul cu laturile  $\overline{D} \times H$  (fig. 2.2 b), iar avansul lon-

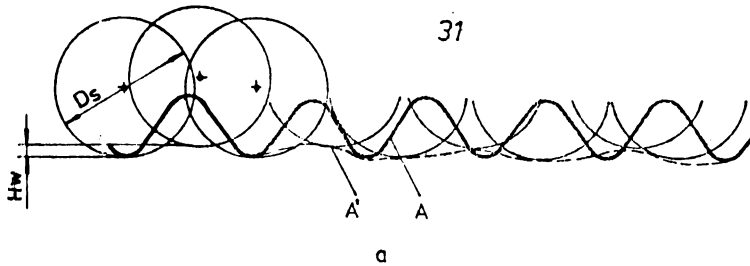
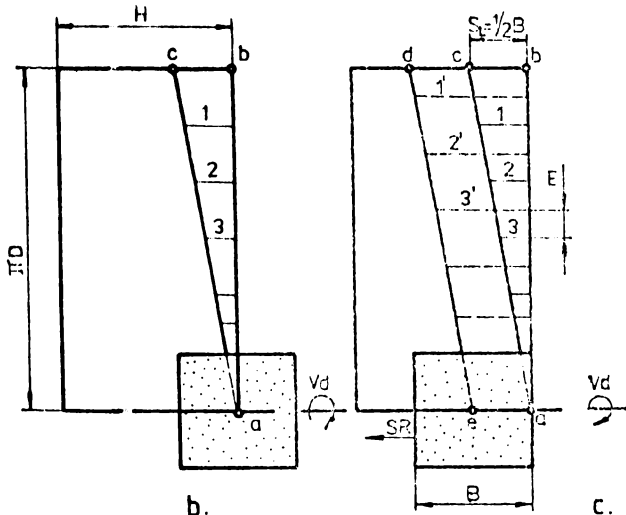


Fig. 2.2



a) influența diametrului (volumului) sculei abrazive asupra formării undulației

b,c) influența avansului longitudinal asupra înălțimii undulațiilor

1,2,3 și 1',2',3' – poziția vîrtului undulației formată în cursul primei rotații a piesei și după a doua rotație

gitudinal  $s_1 = B/2$ ,  $B$  fiind lățimea sculei. La prima rotație a piesei se va rectifica porțiunea  $a b c$  și pe aceasta se formează undulații, creștele cărora sînt notate cu cifrele 1, 2, 3. Intrucît pasul undulației nu este un divisor al lungimii circumferinței piesei rectificate, la fiecare rotație următoare a piesei dispunerea creștelor noi nu coincide cu cele formate anterior. La o a doua rotație a piesei va fi rectificată porțiunea  $a c d e$  (fig.2.2 c). Noile creste sînt notate aici cu cifrele 1', 2', 3'. Se observă că s-a produs o deplasare circulară a acestora cu mărimea  $m$ . În timpul rotației următoare a piesei jumătatea din dreapta a discului lucrează pe prima porțiune  $a b c$  (similar celei deja rectificate). Prin aceasta creștele formate anterior pe suprafață vor fi tăiate parțial datorită deplasării  $m$ , ceea ce micșorează înălțimea undulațiilor rezultate.

Procesul se continuă în acest mod.

Dacă avansul longitudinal se micșorează la  $s_1 = B/3$ , atunci fiecare porțiune a suprafeței prelucrate apare ca fiind supusă nu unei aşchier duble, ci triple; prin urmare în cazul undulațiilor triplu suprapuse înălțimea undelor va fi și mai mică.

În concluzie, cu cît valoarea avansului longitudinal este mai mică, cu atît suprapunerea undelor se va produce de un număr mai mare de ori, iar ca rezultat înălțimea efectivă a undelor se micșorează.

Pentru micșorarea undulației trebuie să se creeze astfel de condiții ale rectificării ca și cum la fiecare nouă rotație a piesei ar avea loc un "defazaj", adică s-ar crea o perturbare și suprapunere reciprocă a diferitelor unde. Aceasta duce la micșorarea înălțimii undelor rezultate.

Dacă în timpul ciclului de lucru piesa se rotește cu turație mai mare, undulația suprafeței rectificate scade, întrucît, în acest caz, are loc o deplasare multiplă repetată a creștelor undulațiilor.

Prin cercetări s-a stabilit că, în condiții asemănătoare, prin majorarea rigidității sistemului MDSP, oscilațiile devin de frecvență ridicată și amplitudine mică, ceea ce, de asemenea, determină micșorarea undulației.

În multe cazuri este rațional ca într-un sistem MDSP rigid să se introducă lanțuri elastice care să îndeplinească rolul de amortizoare. Acestea divizează conturul general al oscilațiilor, determinînd creșterea numărului sistemelor oscilatorii. Are loc o decalare a fazelor diferitelor unde și o oarecare amortizare a oscilațiilor (fenomen asemănător interferenței undelor). În calitate de verigi amortizoare pot servi, de exemplu, adăsurile elastice dintre șaibele de strîngere și părțile frontale ale discului abraziv, liantul din vulcanită al sculei, ș.a.

Materialul liantului sculei, îndeplinește un rol deosebit în calitate de amortizor de vibrații. Au capacitate bună de amortizare a vibrațiilor, în ordine descrescătoare: vulcanita, bachelita, liantul ceramic și cel metalic.

O frînare a formării undulației, adică realizarea unei suprapuneri reciproc multiple se poate realiza și pe seama modificării continue a vitezei de rotație a piesei, mai ales la sfîrșitul rectificării, cînd se încheie generarea formei suprafeței, adică în perioada scîntelierii. În acest sens este rațional ca, în anumite cazuri, să se construiască o nouă acționare, care să permită schimbarea vitezei de rotație a piesei, periodic sau continuu.

Se obțin rezultate pozitive și prin modificarea intensivă a tensionării sistemului și, prin urmare, a rigidității acestuia.

Aceasta duce la modificarea frecvenței și amplitudinii oscilațiilor sistemului. Un astfel de fenomen se observă la scintelire (rectificarea fără avans de pătrundere), când componenta radială a forței de așchiere,  $F_n$ , scade destul de mult.

Ondulația se poate forma în două direcții reciproc perpendiculare. Din această cauză trebuie distinsă ondulația longitudinală de cea transversală. Considerațiile făcute anterior s-au referit la ondulația longitudinală, care apare obișnuit ca rezultat al vibrațiilor sistemului MDSP. Ondulația transversală se datorește neuniformității avansului, ascuțirii necorespunzătoare a discului abraziv, uzurii neuniforme a acestuia, ș.a., adică condițiilor în care se realizează procesul tehnologic.

Ondulația longitudinală și transversală pot fi caracterizate prin aceiași parametri fizici și statistici.

Cîteva date asupra valorii acestor parametri, obținute pe baza studierii înregistrării undulațiilor unor suprafețe reale sînt prezentate în tabelele 2.1 și 2.2. [34]

Față de notațiile menționate anterior în tabele mai apar următoarele:  $r_w$  ( $r_{wt}$ ) - raza de rotunjire a ondulației longitudinale, respectiv transversale.

Tabelul 2.1

Parametrii geometrici ai ondulației longitudinale

Metoda de prelucrare și rugozitatea $R_a$ [ $\mu m$ ]	Materiaiulul piesei	$W$ [ $\mu m$ ]	$S_w$ [ $\mu m$ ]	$\frac{S_w}{W}$	$\frac{S_m}{R_y}$	$r_w$ [ $\mu m$ ]
Rectificare cilindrică exterioară (3,2-0,4 $\mu m$ )	Oțel	0,8÷ 9	1,8÷ 3,2	360÷ 2500	55÷ 620	30÷ 280
		1,2÷ 12	2,4÷ 3,5	280÷ 2900	60÷ 800	30÷ 350
Rectificare cilindrică exterioară (3,2-0,4 $\mu m$ )	Fontă	1,2÷ 8	1,8÷ 2,2	180÷ 1600	40÷ 280	38÷ 180
		1,3÷ 9	1,8÷ 2,3	200÷ 1800	40÷ 340	40÷ 200

Tabelul 2.2

Parametrii geometrici ai undulației  
transversale

Metoda de prelucrare și rugozitatea, $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Mate- rialul piesei	$W_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\frac{S_{Wt}}{W_t}$ mm	$\frac{S_{Wt}}{W_t}$	$\frac{S_{mt}}{R_{yt}}$	$W_t$ [ $\mu\text{m}$ ]
Rectificare cilindrică exterioară (1,6-0,2 $\mu\text{m}$ )	Oțel	0,75÷ 3	0,25÷ 0,5	165÷ 400	4,8÷ 24	10÷ 25
Rectificare cilindrică interioară (3,2-0,2 $\mu\text{m}$ )		0,6÷ 4,5	0,5÷ 1,4	100÷ 1350	3,4÷ 24	10÷ 80
Rectificare plană (3,2-0,2 $\mu\text{m}$ )		1,25÷ 13	0,75÷ 1,4	100÷ 700	3÷ 20	15÷ 20
Rectificare cilindrică extericară (3,2-0,4 $\mu\text{m}$ )	Fontă	0,5÷ 7,5	0,55÷ 1	100÷ 1850	6,5÷ 22	10÷ 100
Rectificare cilindrică intericară (3,2-0,8 $\mu\text{m}$ )		1÷3	0,45÷ 1,4	120÷ 450	3,5÷ 18	5÷ 400
Rectificare plană (3,2-0,4 $\mu\text{m}$ )		0,8÷ 4	0,5÷ 0,8	200÷ 800	4,5÷ 35	20÷ 80

Compararea datelor obținute pentru diferitele metode de prelucrare arată că pentru undulația longitudinală valorile lui  $W$ ,  $S_W$  și  $r_W$  sînt mai mari decît pentru undulația transversală:  $W_t$ ,  $S_{Wt}$ ,  $r_{Wt}$ .

În toate cazurile valoarea  $S_{Wt}/W_t$  depășește esențial valoarea raportului  $S_{Rt}/R_{yt}$ . Dacă se are în vedere și faptul că  $W_t$  reprezintă (0,25-0,7)  $R_{yt}$  atunci diferența între aceste rapoarte crește încă și mai mult. În ceea ce privește undulațiile longitudinale și în acest caz valoarea raportului  $S_W/W$  a depășit valoarea raportului  $S_R/R_y$ .

### 2.3 Rugozitatea suprafețelor rectificate

Rugozitatea suprafețelor rectificate se formează ca rezultat al suprapunerii unui număr foarte mare de rizuri (șanțuri, microzgîrieturi) rezultate prin deplasarea grăunțiilor abrazivi ai sculei de-a lungul suprafeței prelucrate. Acest proces este reprezentat schematic în fig. 2.3 .

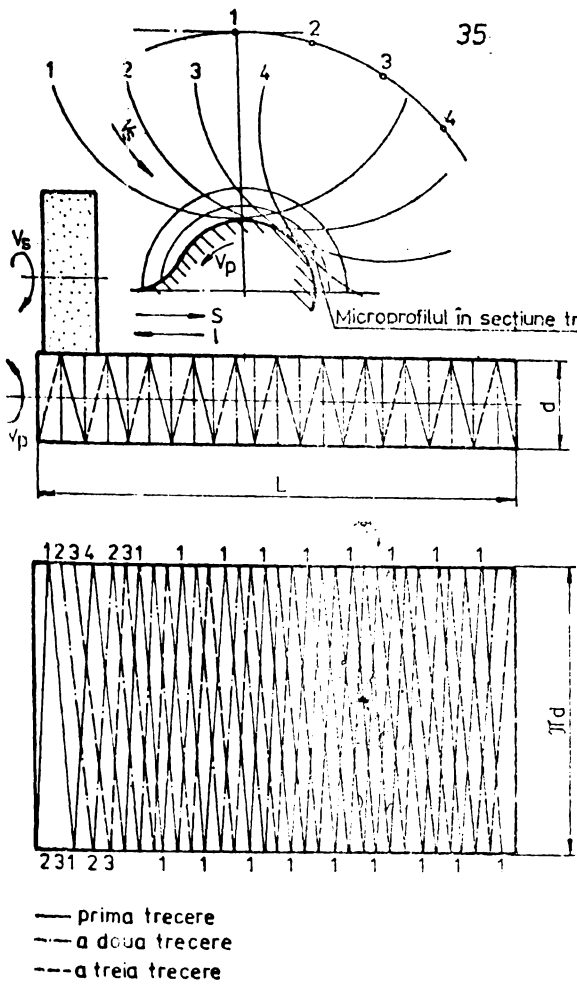
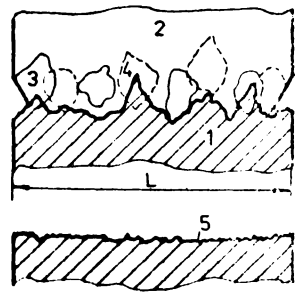


FIG. 2.3



- 1-piesc
- 2-scula abrazivă
- 3,4-grăunți abrazivi
- 5-profilul piesei după rectificare

FIG. 2.4

Influența parametrilor regimului de lucru asupra rugozității suprafețelor rectificate poate fi evidențiată sub aspect teoretic plecând de la relația de calcul a grosimii stratului așchiat, egală cu grosimea însumată a așchilor ridicate de toți grăunții abrazivi aflați în așchiere.

Trecerea de la rugozitatea inițială la cea finală poate fi reprezentată condiționat, [29], ca o deplasare într-un plan a grăunților conturului sculei de rectificat, care trec succesiv de-a lungul suprafeței prelucrate a piesei în timpul contactului acesteia cu scula (fig.2.4). Formarea rugozității depinde de geometria și proprietățile grăunților abrazivi, de presiunea specifică a sculei pe piesă, care determină gradul de deformare plastică, de rigiditatea sistemului MDSP, regimul de rectificare, ș.a.

În literatura de specialitate [52], [17], [29], [54], ș.a. se prezintă mai ales influența parametrilor regimului de lucru și a caracteristicilor sculei asupra generării rugozității suprafețelor rectificate.

Pentru rectificarea cilindrică exterioră cu avans de trecere (longitudinal) această relație este [52] :

$$a_{\max} = \frac{2 v_p \cdot t}{60 v_s \sqrt{\left(1 \pm \frac{v_p}{60 v_s}\right)^2 + \left(\frac{v_l}{60 v_s}\right)^2}} \cdot \frac{s_1}{B}, [\text{mm}^2] \quad (21)$$

în care  $v_l = s_1 \cdot n_p$  este viteza avansului longitudinal.

Cînd  $v_l = 0$ , adică în cazul rectificării cu avans de pătrundere, relația devine:

$$a'_{\max} = \frac{2 v_p \cdot t}{60 v_s \pm v_p} \cdot \frac{s_1}{B}, [\text{mm}^2] \quad (22)$$

Toți factorii care determină creșterea lui  $a_{\max}$ , respectiv  $a'_{\max}$ , determină implicit și creșterea rugozității.

### 2.3.1. Influența avansului longitudinal

În [52] se acceptă că microprofilul suprafeței rectificate (rugozitatea finală este triunghiulară (fig.2.5) La fiecare nou

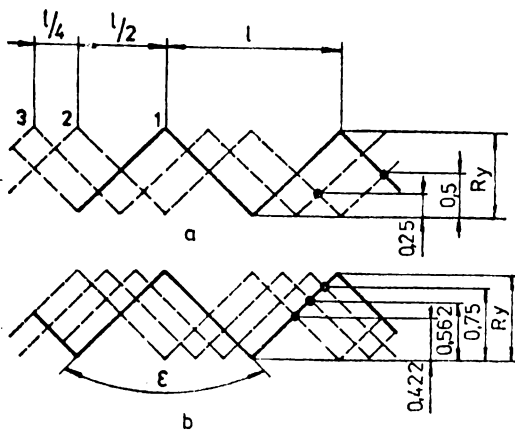


FIG.2.5

contact a discului abraziv cu porțiunea prelucrată a piesei, datorită existenței avansului longitudinal, grăunții abrazivi nu nimeresc, de regulă, în ganțurile executate de grăunți anteriori.

Posibilitățile limită extreme ale grăunților abrazivi față de rugozitățile care au rămas datorită contactului anterior al sculci cu porțiunea considerată a piesei va fi: a) suprapunerea completă a mijlocului grăunților abrazivi cu mijlocul golurilor (fig.2.5a)

și b) suprapunerea completă a mijlocului grăunților abrazivi cu mijlocul proeminențelor (fig.2.5b).

În prima poziție limită adâncimea maximă a rugozității finale va fi  $R_1$   $R_y$ ; în al doilea caz, rugozitatea finală, indi-

ferent de unghiul al profilului șanțurilor va fi  $R_z = R_y/2$ , datorită intersecțiilor la jumătate a diagonalelor paralelogramului format de punctele de intersecție.

Considerând un număr nelimitat de suprapuneri ale șanțurilor (microzgîrieturilor) se poate stabili că cea mai probabilă valoare a mărimii rugozității va fi media aritmetică a valorilor determinate, și anume:

$$R_z = \frac{R_y + 0,5 R_y}{2} = 0,75 R_y$$

Raționînd la fel, se obține în continuare pentru:

- 1)  $\frac{B}{s_1} = 1$ , un contact al sculei cu piesa,  $R_1 = R_y$ ;
- 2)  $\frac{B}{s_1} = 2$ , două contacte,  $R_2 = \frac{1 + 0,5}{2} R_y = 0,75 R_y$
- 3)  $\frac{B}{s_1} = 3$ , trei contacte,  $R_3 = \frac{0,75 + 0,375}{2} R_y = 0,5625 R_y$
- .....
- n)  $\frac{B}{s_1} = n$ , n contacte,  $R_n = R_y \cdot \xi \left( \frac{B}{s_1} - 1 \right)$ , unde  $\xi = 0,75$

În acest mod, datorită existenței avansului longitudinal, adîncimea maximă a rugozității finale se micșorează după o progresie geometrică descrescătoare, conform cu relația:

$$R_n = R_y \cdot \xi \left( \frac{B}{s_1} - 1 \right) \quad (2.3)$$

Se poate admite că și în cazul profilului sinusoidal al microneregularităților suprafeței rectificate, datorită existenței avansului longitudinal, adîncimea maximă a rugozității finale se micșorează după o progresie geometrică descrescătoare, conform cu relația (2.3), dar în acest caz  $\xi = 0,78$ .

La rectificarea cu avans de pătrundere, la o rotație a piesei, scula întâlnește porțiunea prelucrată a piesei numai o dată. În acest caz  $B = s_1$ ,  $\frac{B}{s_1} - 1 = 0$  și  $\xi \left( \frac{B}{s_1} - 1 \right) = 1$

Procesul real este mult mai complex decît cel redat prin această schemă și relația (2.3) are numai valoare principală. Pentru condiții asemănătoare, adîncimea posibilă minimă a microneregularităților suprafeței rectificate, obținută ca rezultat al micșorării avansului longitudinal, depinde de precizia și rigiditatea



sistemului MDSP, calitatea îndreptării și ascuțirii sculei și altor condiții.

În [17] se arată că influența avansului longitudinal asupra procesului de rectificare și asupra rugozității suprafeței prelucrate trebuie privită din două puncte de vedere. Pe de o parte, mărirea avansului longitudinal duce la mărirea grosimii stratului aşchiat și a sarcinii pe o granulă abrazivă, la mărirea pătrunderii granulelor abrazive în materialul de prelucrat și, prin urmare, la creșterea rugozității. Pe de altă parte, mărirea avansului longitudinal (la acelaș număr de treceri) duce la micșorarea duratei rectificării și deci la micșorarea duratei acțiunii termice a sculei, asupra suprafeței prelucrate și la diminuarea efectului de înmuiere a stratului superficial și netezirea microasperităților suprafeței prelucrate.

În fig. 2.6 este arătată dependența dintre înălțimea asperităților suprafeței rectificate și mărirea avansului longitudinal pe o rotație a piesei (în mm/rot) pentru OSCB călit [17].

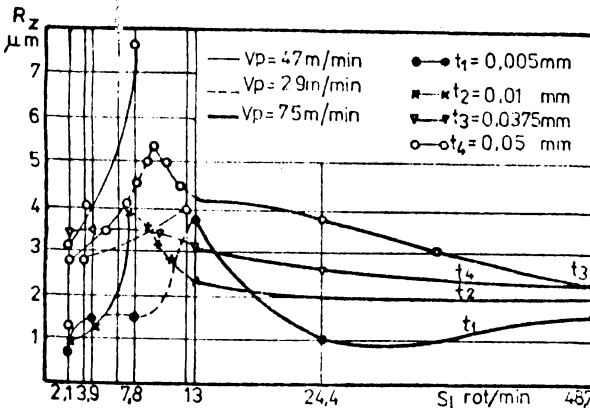


FIG. 2.6 [17]

Valorile avansului 2,1, 3,9 și 7,8 mm/rot sînt obținute la viteza cea mai mare de rotație a piesei (47 m/min), adică la cea mai mică durată a contactului dintre diferitele puncte ale suprafeței rectificate cu scula abrazivă. Avansurile 6,3 și 12,5 mm/rot sînt obținute la o valoare medie a vitezei de rotație a piesei (29 m/min), iar avansurile 13, 24,4 și 48,7 mm/rot sînt obținute la viteza

cea mai mică a piesei (7,5 m/min), adică la durata cea mai mare a contactului dintre suprafața piesei cu scula abrazivă.

La vitezele de rotație mari ale piesei (29 și 47 m/min) curbele rugozității urcă brusc odată cu creșterea avansului longitudinal, iar mărirea rugozității cu creșterea avansului este cu atît mai rapidă, cu cît este mai mare adîncimea de rectificare, respectiv grosimea aşchiei.

Creșterea avansului de la 12,5 pînă la 24,4 mm/rot. în cazul micșorării vitezei de rotație a piesei de la 29 pînă la 7,5 m/min duce la scăderea rugozității la rectificarea cu adîncimi mari. Aceasta se explică prin faptul că, la micșorarea vitezei de rotație a piesei, se micșorează în mod corespunzător grosimea așchii, forța de așchiere, adîncimea de pătrundere a granulelor abrazive în suprafața de prelucrat și deci și înălțimea microasperităților. Mărirea în continuare a avansului duce la micșorarea lentă a înălțimii asperităților ca urmare a ameliorării deformării metalului stratului superficial.

### 2.3.2. Influența vitezei de rotație a piesei asupra rugozității suprafeței prelucrate

Prin creșterea vitezei de rotație a piesei  $v_p$  - la valori constante ale adîncimii de așchiere,  $t$ , și avansului longitudinal  $s_1$  - se produce o creștere a rugozității suprafeței rectificate

(mai mult sau mai puțin intensă). Aceasta se explică prin creșterea grosimii stratului așchiat și prin reducerea numărului de contacte ale sculei abrazive cu porțiunea prelucrată a piesei. În fig. 2.7 [17] se exemplifică afirmațiile de mai sus pentru cazul rectificării cilindrice exterioare a oțelului OSC 10 normalizat. Curba 1 este construită pentru  $s_1 = 4000$  mm/min, cu răcire, curba 2, pentru  $s_1 = 1600$  mm/min, cu răcire, iar curba 3, pentru  $s_1 = 1600$  mm/min, fără răcire.

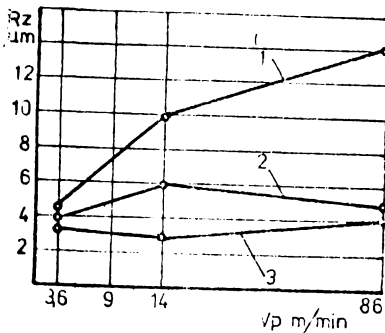


FIG 2.7 [17]

### 2.3.3. Influența adîncimii de rectificarea, $t$ egală cu avansul transversal

Teoretic și experimental s-a stabilit că prin mărirea adîncimii de așchiere se produce creșterea înălțimii rugozității

(v.fig.2.8). Aceasta se datorește mării grosimii stratului de metal aşchiat, forţelor de aşchiere şi frecării în zona de lucru. Ca

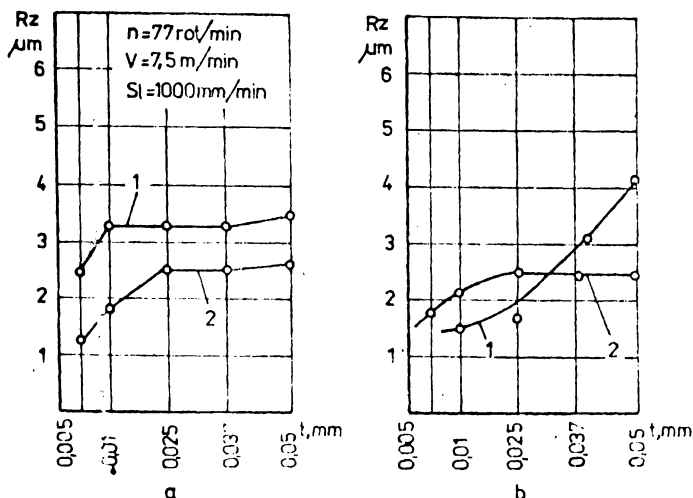


FIG.2.8 [17]

- a) OLC 15      b) OSC 10 normalizat  
 1 - rectificare obisnuita (  $V_s=30$  m/s)  
 2 - rectificare rapida (  $V_s=50$  m/s)

rezultat al acestui fapt, procesul de detagare a aşchilor decurge mai greu, stratul superficial rectificat este supus la deformații importante, care determină deformarea rizurilor de pe suprafața prelucrată, apariția de rupturi transversale și acumulări de material deformat plastic, ceea ce determină creșterea rugozității suprafeței prelucrate.

În fig.2.8 curbele 1 corespund rectifi-

cării obișnuite (  $v_s = 30$  m/s) iar curbele 2 rectificării rapide (  $v_s = 50$  m/s).

Din cercetările efectuate în prezenta lucrare a rezultat și următorul aspect. Odată cu mărirea adâncimii de rectificare și respectiv cu creșterea deformațiilor plastice ale stratului superficial se produce și schimbarea formei rugozității. Se produce o însemnată creștere a pasului și adâncimii asperităților.

#### 2.3.4. Influența vitezei de aşchiere, $v_s$

Viteza de aşchiere, adică viteza de rotație a sculei de rectificat, influențează esențial rugozitatea suprafeței rectificate. Conform datelor din literatura [45], [17] prin creșterea vitezei de aşchiere de la 35 la 55 m/s, rugozitatea suprafeței rectificate se micșorează de 2-3 ori (v.și fig.2.8). Influența vitezei de aşchiere este mai pronunțată la rectificarea oțelurilor călite în comparație cu cele necălite. Aceasta, pentru că în primul caz în

zona de acțiune a grăunților abrazivi se îndepărtează o cantitate mai mare de căldură, care determină creșterea mai accentuată a plasticității materialului rectificat și implicit un efect de întindere (mizgălire) mai intens a metalului stratului superficial.

### 2.3.5 Influența caracteristicilor sculei de rectificat

Rugozitatea suprafețelor rectificate este influențată de granulația și dimensiunile sculei abrazive.

Pentru o valoare constantă a vitezei de aşchiere creșterea sensibilă a diametrului și lățimii sculei influențează favorabil scăderea rugozității suprafeței prelucrate. Influența favorabilă a creșterii diametrului sculei se explică prin creșterea lungimii arcului de contact al sculei cu piesa și micșorării grosimii aşchii ridicată de un grăunte abraziv.

Pentru o valoare constantă a avansului longitudinal, creșterea lățimii discului abraziv determină scăderea ușoară a rugozității suprafeței rectificate.

Granulația sculei influențează mult rugozitatea. Un disc cu granulație mai mică, în condiții identice de rectificare, asigură întotdeauna o rugozitate mai mică. De exemplu, pentru  $v_g = 8$  m/s și  $t = 0,005$  mm, rectificând oțel OLC45 îmbunătățit, discul E40KC asigură  $R_a = 1,12 \mu\text{m}$  iar E25LC  $R_a = 0,64 \mu\text{m}$ .

La rectificarea cu viteze mari diferența de granulație influențează rugozitatea mai puțin, datorită faptului că în acest caz numărul întâlnirilor discului cu porțiunea determinată din piesă este mare.

Condițiile de ascuțire și îndreptare a sculei influențează de asemenea, rugozitatea suprafețelor rectificate. La îndreptarea sculei cu un creion cu diamant fixat în suport, pe periferia sculei se transpune un canal elicoidal cu pasul egal cu avansul longitudinal al diamantului la o rotație a sculei. La rectificarea piesei neuniformitățile sculei se copiază pe suprafața prelucrată, contribuind la creșterea rugozității.

În fig. 2.9 se prezintă influența avansului creionului cu diamant la îndreptarea discurilor de rectificat din E40LC și En80NC asupra rugozității unor piese din OLC60 N și OLC60-I rectificate cilindric exterior.

Din diagramele prezentate în fig.2.9 se vede că rugozitatea pieselor rectificate crește, când prelucrarea se face cu scule care au fost îndreptate cu avans mare.

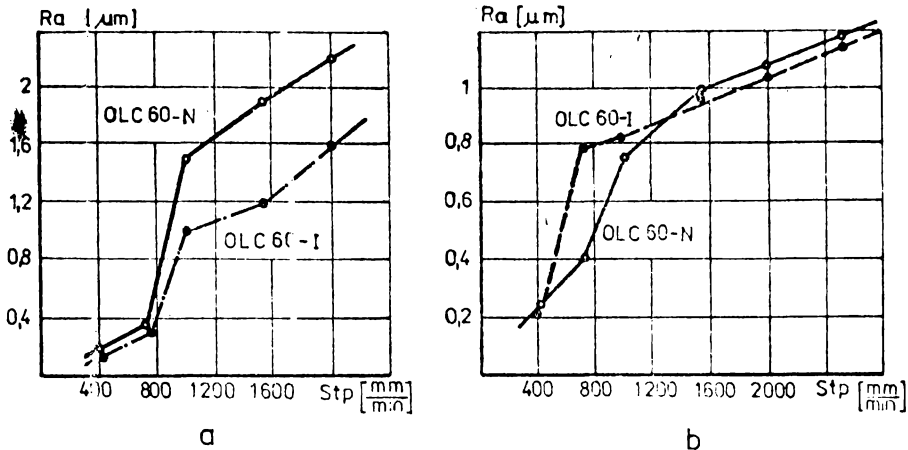


FIG. 2.9

Variația rugozității cu avansul de îndreptare a discului abraziv

Regim de lucru:  $V_d=32\text{ m/s}$ ;  $V_p=15\text{ m/min}$

$St=0,01\text{ mm/c}$ ;  $Sl=410\text{ mm/min}$

a) disc  $500\times 200\times 80\text{ E } 40\text{ L}$

b) disc  $500\times 200\times 80\text{ En}$

Folosirea trecerilor de netezire (fără avans transversal) permite să se micșoreze rugozitatea suprafeței rectificată. Stabilizarea rugozității se produce după 5-8 treceri de netezire (v.fig. 2.10).

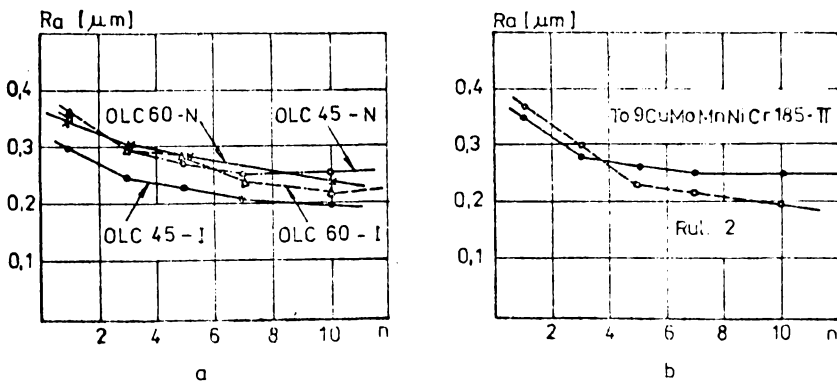


FIG. 2.10

Modificarea rugozității cu numărul de treceri fără avans de pătrundere (nr. de treceri de scintiere)

Regimul de lucru:  $V_d=32\text{ m/s}$ ;  $V_p=20\text{ m/min}$ ;  $Sl=410\text{ mm/min}$

$St=0,01\text{ mm/c}$ . Piatra abrazivă  $500\times 200\times 80\text{ E } 40\text{ L}$

Reunind influența factorilor menționați, în literatura de specialitate se propun formule de calcul a rugozității suprafețelor rectificate. O astfel de formulă este prezentată în [52] sub forma:

$$R_a = \frac{C_R \cdot V_p^p \cdot t^Z \cdot s_1^q \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3}{V_s^n \cdot d^w \cdot B^n} \text{ , } \mu\text{m} \quad (2.4)$$

în care:  $C_R$  - constantă, cu valori în funcție de proprietățile fizico-mecanice ale materialului prelucrat;

$V_p$  - viteza periferică a piesei, m/min ;

$t$  - adâncimea de așchiere, mm ;

$s_1$  - avansul longitudinal, mm/rot a piesei ;

$V_s$  - viteza de așchiere, m/s ;

$d$  - diametrul piesei, mm ;

$B$  - lățimea sculei abrazive, mm ;

$K_1$  - coeficient, a cărui valoare depinde de granulația sculei;

$K_2$  - coeficient, care ia în considerare compoziția lichidului de răcire-ungere;

$K_3$  - coeficient, care ia în considerare numărul de treceri de finisare;

$p, q, Z, w, \mu, n$  - exponenți.

Formula (2.4) poate fi folosită pentru determinarea rugozității probabile, în anumite condiții de prelucrare.

Problema de actualitate, însă, este determinarea simplă, expeditivă a condițiilor de prelucrare în care să se obțină calitatea impusă (necesară) a suprafeței rectificate. Rezolvarea unor astfel de probleme face obiectul lucrării de față.

#### 2.4 Tensiuni remanente

Procesul de rectificare al metalelor este însoțit de deformări plastice ale stratului superficial și formarea în zona de așchiere a unei cantități mari de căldură. Starea de tensiune a metalului depinde în principal de preponderența factorilor termici sau de forță. Formarea tensiunilor remanente în stratul superficial al piesei, după cum se cunoaște din literatură, 57, 66, are următoarele cauze:

1. La rectificarea metalelor sensibile la modificări structurale, factorul determinant al formării tensiunilor remanente este cel termic. Sub acțiunea temperaturilor înalte din zona de lucru, în stratul superficial se produc transformări structurale, care determină modificări volumice ale metalului. Structura martensitică care se formează obișnuit la călire, are volum specific maxim și structură cubică ca volum centrat. Structura austenitică este mai compactă, are volum specific minim și rețea cubică cu fețe centrate.

Dacă admitem că după călire piesa a avut structură martensitică, atunci după rectificare, datorită temperaturilor ridicate din stratul superficial, martensita trece în structură troostito-sorbitică rezultând și un anumit procent de austenită reziduală. În aceste condiții stratul superficial, micșorându-se în volum tinde să se comprime. Acestei compresiuni însă i se opune metalul de sub stratul superficial, care are volum specific mare. Din această cauză în stratul superficial se dezvoltă tensiuni de întindere mari care pot depăși uneori ca valoare rezistența la rupere a metalului respectiv.

2. Cantitatea mare de căldură care se dezvoltă în zona de contact a sculei cu piesa, determină încălzirea aproape instantanee a stratului superficial al piesei, ceea ce duce la scăderea la valoare minimă a modulului de elasticitate a metalului respectiv. Răcirea rapidă care urmează determină comprimarea stratului superficial. Materialul de bază, mai rece se opune comprimării stratului superficial. Ca rezultat, în stratul superficial apar tensiuni remanente de întindere, iar în straturile de sub acesta, tensiuni de compresiune care tind să le compenseze.

3. Deformațiile plastice la rectificare determină durificarea stratului superficial (mai ales la prelucrarea oțelurilor tenace). Durificarea mărește volumul specific al metalului. În aceste condiții stratul superficial al metalului, deformat plastic, tinde să se "dilata", mărindu-și volumul. Această "dilatare" este frînată de straturile inferioare. Ca rezultat al acestei acțiuni în stratul superior se vor dezvolta tensiuni de compresiune iar, în cele inferioare tensiuni de întindere.

La rectificare toți factorii menționați determină simultan formarea tensiunilor remanente. Ca rezultat al acțiunii lor distribuția finală a tensiunilor remanente pe grosimea stratului superficial este complicată. Mărimea, semnul, felul și adâncimea de pă-

trundere a tensiunilor remanente depinde de calitatea oțelului, de structura acestuia după tratamentul termic și de regimurile de rectificare.

Aspectele prezentate se referă la tensiunile remanente la nivel macroscopic. În afara acestora la rectificare se generează tensiuni în interiorul grăunților și chiar întraatomic.

În acest fel, după rectificare piesele se află într-o stare complexă de tensionare (sub aspectul tensiunilor remanente și durificării stratului superficial). În lucrarea [57] se propune o formulă aproximativă pentru calcularea tensiunilor remanente termice:

$$\sigma = 0,5 (\theta_2 - \theta_1) \alpha E \quad (2.5)$$

în care  $\theta_2$  - temperatura de încălzire a stratului superficial;

$\theta_1$  - temperatura inițială;

$\alpha$  - coeficientul de dilatare termică liniară;

$E$  - modulul de elasticitate longitudinal.

O formulă asemănătoare, din care rezultă, de asemenea, că încălzirea locală la temperaturi ridicate a stratului superficial al pieselor rectificate este cauza tensiunilor remanente se propune în [66]:

$$\sigma = E_c (\theta_c \alpha_c - \frac{\sigma_c}{E_c}) \quad (2.6)$$

în care  $\theta_c$  - temperatura în zona de contact,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\alpha_c$  - coeficientul de dilatare termică liniară la temperatura  $\theta_c$ , în  $1/^{\circ}\text{C}$ ;

$E_c$  - modulul de elasticitate la temperatura  $\theta_c$ , în  $\text{Kgf/mm}^2$ ;

$\sigma_c$  - rezistența la curgere a metalului stratului superficial durificat, în  $\text{Kgf/mm}^2$ .

Două diagrame, reprezentând distribuția tensiunilor interne pe adâncimea stratului superficial la piese rectificate cilindric sînt prezentate în fig. 2.11 și fig. 2.12.

În situația prezentată în fig. 2.11 a fost rectificat oțelul 2 cu disc E40L cu regimul  $v_s = 32 \text{ m/s}$ ,  $v_p = 10 \text{ m/min}$   $t = 0,05 \text{ mm}$ . Tensiunile maxime de  $60 \text{ daN/mm}^2$  sînt dispuse la cca  $20 \mu\text{m}$  de la suprafață. În fig. 2.12 este prezentată variația tensiunilor interne la rectificarea unor epruvete din 12C 130 cu regimul:  $v_H =$



$v = 32 \text{ m/s}$   $v_p = 5 \text{ m/min}$  și  $t = 0,05 \text{ mm}$  pentru curba 1 și  $v_B = 26 \text{ m/s}$ ,  $v_p = 10 \text{ m/min}$  și  $t = 0,02 \text{ mm}$  pentru curba 2.

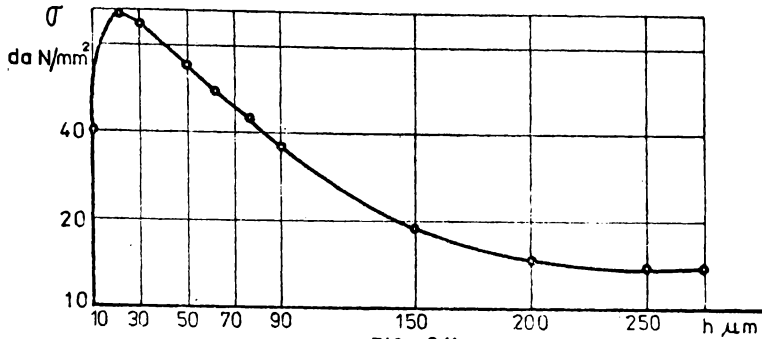


FIG. 2.11

## 2.5 Arsuri

Se numesc arsuri de rectificare modificările locale ale structurii stratului superficial al pieselor, care se produc datorită temperaturilor ridicate din zona de contact a sculei de rectificat cu piesa. Arsurile apar sub forma unor pete întunecate pe suprafața prelucrată a piesei. Arsurile determină modificarea proprietăților fizico-mecanice ale stratului superficial: microstructură, microduritate și tensiuni remanente.

Arsurile se clasifică după aspect, după caracterul și după adâncimea modificărilor microstructurii stratului superficial.

După aspect arsurile pot fi: continui - întreaga suprafață a piesei este acoperită de arsuri; sub formă de pete, sub formă de benzi uniforme și sub formă de benzi care se repetă ciclic pe suprafața piesei.

După caracterul modificării microstructurii stratului superficial se disting: arsuri de revenire - pe suprafața piesei, în locurile cu arsuri, metalul este în stare revenită, microstructura acestuia constând din sorbită sau troostită de revenire, sau structuri mixte sorbito-troostitice sau troostito-martensitice; arsuri de călire cu revenire - stratul superficial călit secundar se află dispus peste un strat de metal revenit, care trece apoi în structura de bază, adică structura stratului superficial este martensită, iar structurile stratului al doilea sînt cele enumerate anterior; arsuri de revenire cu călire și revenire - în stratul superficial metalul este în stare de revenire, în cel de al doilea metalul este călit secundar, iar în cel de-al treilea materialul este în stare de revenire, trecînd spre structura de bază.

În funcție de adâncimea modificării microstructurii stratului superficial arsurile se clasifică în: superficiale (adâncime pînă la 0,005 mm), mijlocii (adâncime pînă la 0,01 mm) și profunde (adâncime mai mare de 0,01 mm).

Pentru caracterizarea mai completă a arsurilor de rectificare propun clasificarea acestora în 8 clase, numerotate de la 0 la 8. Suprafața cu arsuri de clasă 0 este suprafața fără arsuri, iar cea de clasă 8 este suprafața acoperită în întregime cu arsuri.

Pentru fundamentarea acestei clasificări s-au făcut determinări metalografice ale structurii și s-a măsurat microdurețata în secțiune, cu microdurimetrul PMT-3.

Tabelul 2.3

Modificarea microstructurii și microdureții stratului superficial în funcție de concentrația arsurilor

Clasa arsurii	Structura metalului		Adâncimea stratului și secundară [μm]	Microdurețata				
	Stratului superficial	de bază		Metalului de bază H <sub>B</sub>	Stratului superficial		metalului de bază	
					H <sub>S</sub>	$\frac{H_S}{H_B}$	H <sub>B2</sub>	$\frac{H_{B2}}{H_B}$
0	Martensită	Martensită	-	760	720	0,95	734	0,97
1	Martensită	Martensită	-	740	665	0,90	680	0,92
2	Martensită	Martensită	-	700	630	0,90	633	0,91
3	Troostită	Troostită	26,2	820	630	0,77	800	0,97
4	Troostită	Troostită	36,7	790	620	0,79	765	0,97
5	Troostită	Martensită cu porțiuni de troostită	44,6	810	630	0,78	800	0,98
6	Troostită	Martensită cu porțiuni de troostită	52,4	760	540	0,71	663	0,88
7	Sorbită	Troostită	78,6	800	560	0,70	703	0,88
8	Sorbită	Troostită	83,6	720	460	0,64	616	0,85

Grosimea stratului superficial cu microstructura modificată se poate calcula, aproximativ, în funcție de clasa C a arsurii cu formula:

$$h = 14,5 C - 27, [\mu\text{m}]$$

Pentru arsuri de clasa 1 și 2 structura metalului nu se schimbă, deși, microduritatea stratului superficial scade puțin. La suprafața pieselor fără arsuri și cu arsuri de clasa 1 și 2, structura stratului superficial este martensită, din clasele 3, 4, 5 și 6 - troostită, iar din clasele 7 și 8 - sorbită.

Structura metalului bazei și lifului se schimbă începând cu clasa 5.

Analizând modificările microstructurii stratului superficial al pieselor rectificată, în comparație cu microstructura înainte de rectificare, se poate aprecia valoarea temperaturii din timpul procesului de lucru. Se are în vedere că martensita se transformă în troostită prin încălzire la  $200-400^{\circ}\text{C}$ , iar în sorbită la  $400-600^{\circ}\text{C}$ . Temperatura de încălzire la suprafața pieselor se poate considera  $T \approx 75^{\circ}\text{C}$  unde,  $C$  - clasa arsurilor <sup>studierea datelor din tabelul 2.3</sup> pune în vedere și următoarele particularități. Prin mărirea clasei arsurilor crește și adâncimea stratului călit secundar, se micșorează microduritatea metalului, crește adâncimea și gradul de modificare al microstructurii.

În concluzie, clasificarea propusă caracterizează nu numai aspectul exterior al arsurilor, ci și caracteristicile lor fizice: structura, microduritatea, adâncimea stratului cu structura modificată și temperatura de încălzire a stratului superficial la rectificare.

Arsurile sînt condiționate de toți parametrii rectificării. Se poate afirma că arsuri continue se formează atunci cînd parametrii regimului de rectificare au valori prea mari față de caracteristicile sculei abrazive sau scula folosită este prea dură.

Arsurile sub formă de pete sînt provocate în principal de vibrațiile piesei sau ale sculei, datorită avansului neuniform sau prea mare, adausului neuniform de material, structură și duritate neuniformă a sculei, ș.a.

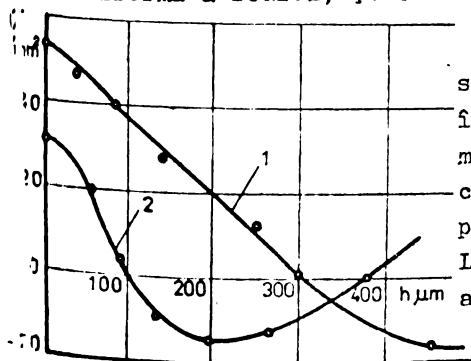


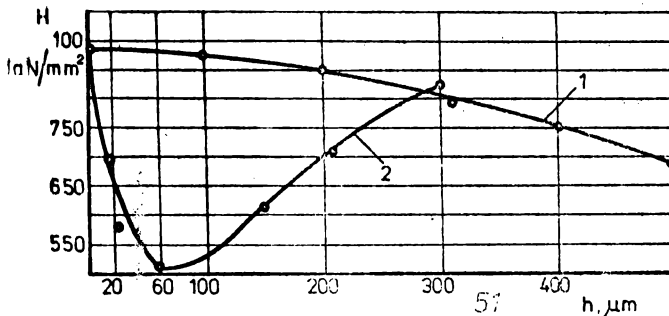
FIG. 2.12

Arsurile sub formă de benzi, uniform sau ciclic distribuite sînt provocate în principal de proprietățile neuniforme ale sculei, porozitate insuficientă care provoacă "îmbîcsirea", avansuri prea mari, cantitatea insuficientă a LRU sau gradul de murdărie pronunțat al acestuia .

În fig.2.13 se prezintă variația microdurității stratului superficial al unei piese din 12CN130 rectificată cu regimul  $t=0,03$  mm;  $v_g=35$  m/s;  $v_p=10$  m/min;  $\varphi=30$  m/s (fără răcire).

### 2.6 Fisuri și microfisuri

Fisurile și microfisurile sînt ruperi ale stratului superficial sub influența tensiunilor interne și apar atunci cînd acestea



1-înainte de rectificare

2-după rectificare cu disc abraziv

500×200/80 dnE 40L

FIG. 2.13

depășesc valoarea rezistenței la rupere a materialului respectiv. Se va folosi în continuare numai termenul fisuri.

Pînă în prezent nu este standardizată o clasificare a fisurilor. În funcție de cauza apariției, fisurile din stratul superficial sînt:

- fisuri termice, determinate de tratament termic greșit;
- fisuri de rectificare, determinate de prelucrarea necorespunzătoare prin rectificare;
- fisuri cauzate de tratament termic și rectificare necorespunzătoare;
- fisuri în exploatare, cauzate de suprapunerea tensiunilor din exploatare peste cele rezultate din tratament termic și rectificare;
- fisuri datorită unor defecte constructive, respectiv concentrarea tensiunilor interne în anumite zone ale piesei datorită formei necorespunzătoare și alogoriei greșite a materialului.

După adîncimea de pătrundere fisurile sînt: microfisuri, cu adîncime  $\leq 0,01$  mm și fisuri cu adîncime  $> 0,01$  mm. După formă fisurile sînt liniare sau în rețea.

Sînt susceptibile la fisurare piesele din oțel. Piesele din fontă se fisurează rar sub acțiunea tensiunilor interne, întrucît modificarea volumului stratului superficial provocată de tensiunile interne se compensează prin deformația incluziunilor de grafit.

La rectificarea fisurile sînt produse de presiunile de contact mari ale grăunților abrazivi precum și de frecarea acestora și liantului cu suprafața prelucrată a piesei. Apariția fisurilor este favorizată de existența în stratul superficial al piesei a unor tensiuni interne datorită tratamentului termic. Asocierea celor două categorii de cauze la generarea fisurilor se prezintă în fig.2.14.

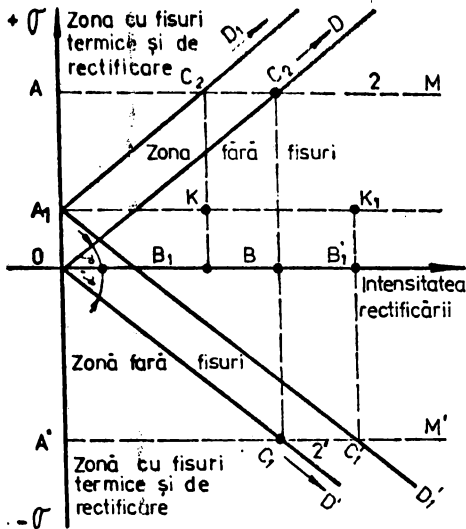


FIG. 2.14

Pe abscisă este reprezentată intensitatea procesului de rectificare considerată în funcție de unul sau mai mulți parametri variabili ai procesului (parametri regimului de așchiere sau caracteristicile sculei abrazive, care determină o anumită valoare a temperaturii). Pe ordonată se reprezintă mărimea tensiunilor interne; deasupra originii cele de întindere, sub origină cele de compresiune, sînt notate cu A respectiv. A' rezistențele la rupere la tracțiune, respectiv compresiune pentru materialul respectiv.

Se are în vedere situația după tratamentul termic și după rectificare. Dacă după tratamentul termic lipsesc tensiunile interne (situația care poate fi acceptată numai teoretic), atunci tensiunile interne de întindere care se produc în timpul rectificării se dezvoltă după dreapta  $OC_2$ , iar cele de compresiune după dreapta  $OC_1$ . Punctele B,  $B_1$  și  $B'_1$  de pe axa absciselor corespund intensităților de rectificare limită, pentru care se produc fisuri. În schemă este figurat cazul particular cînd intensitatea limită B a rectificării este aceeași pentru tensiunile de întindere și compresiune; în acest caz  $OA=OA'$  și  $\alpha=\alpha'$ . Practic unghiurile  $\alpha$  și  $\alpha'$  care definesc intensitatea creșterii tensiunilor interne, respectiv de întindere și compresiune, sînt diferite, de aceea și intensitățile limită ale rectificării vor fi, de asemenea, diferite. Pentru această situație particulară, în stratul superficial al piesei apar numai tensiuni de rectificare, corespunzătoare zonelor  $DC_2M$ , respectiv  $D'C_1M'$ . Zonle limitate de axa absciselor și liniile  $AM$  și  $A'M'$  sînt zone fără fisuri.

Dacă după tratamentul termic în stratul superficial se dezvoltă tensiuni interne de mărime reprezentată prin punctul  $A_1$  pe axa ordonatelor, atunci după rectificare sînt posibile două variante:

1. Dacă la rectificare se formează tensiuni interne de întindere, acestea, suprapunîndu-se peste tensiunile interne datorită tratamentului termic, intensifică starea de tensiune din stratul

superficial. Este evident că, în acest caz, pentru a nu apare fisuri, regimul de rectificare trebuie să fie mai puțin intens; punctul  $B_1$  are abscisa mai mică decât punctul B și se micșorează zona fără fisuri cu o mărime proporțională cu aria dreptunghiurilor  $OA_1KB_1$  și  $C_2B_1BC_2$ . Zona cu fisuri de rectificare este  $D_1C_2M$ , iar zonele mărginite de axa ordonatelor și unghiurile  $AC_2D_1$  și  $A'C_1D'$  sînt zone cu fisuri datorită tratamentului termic și rectificării.

2. Dacă la rectificare se formează tensiuni interne de compresiune, acestea, compunîndu-se cu cele de întindere existente în piesă, reduc starea de tensionare din piesă; variația mărimei tensiunilor rezultante cu intensitatea rectificării este reprezentată prin dreapta  $A_1C_1'$ . Punctul  $C_1'$  corespunde unei limite a intensității rectificării  $OB_1'$ , mai mare decât  $OB$  ( $OB_1' > OB$ ), adică zona fără fisuri se mărește cu o mărime corespunzătoare sumei dreptunghiurilor  $A_1K_1B_1'O$  și  $BB_1'C_1'$ . Zona  $C_1'C_1'D'$  corespunde situației în care în stratul superficial apar numai fisuri de rectificare.

Schema reprezentată în fig. 2.14 permite să se determine intensitatea optimă a rectificării pentru care probabilitatea apariției fisurilor poate fi redusă la minimum.

Apariția fisurilor la rectificare este însoțită întotdeauna de arsuri; fisurile apar în zonele în care rezistența este slăbită ca urmare a modificărilor structurale din metal, iar tensiunile interne depășesc rezistența la rupere a metalului rectificat.

Mulți factori favorizează apariția fisurilor; sînt factori care depind și care nu depind de operația de rectificare. Din prima categorie fac parte: forma necorespunzătoare a piesei, material incorect ales, succesiune sau mod necorespunzător de execuție al operațiilor anterioare rectificării, tratamentul termic, condiții de încercare sau funcționare defectuoase.

A doua categorie de factori care cauzează apariția fisurilor la rectificare sînt: regimuri de lucru prea intense sau neuniformitatea procesului de prelucrare; neuniformitatea structurii și durității sculei, duritatea sau desimea prea mare a sculei; răcire insuficientă sau neuniformă.

Trebuie făcută și precizarea că arsurile nu sînt însoțite întotdeauna de apariția fisurilor.

Existența fisurilor în stratul superficial al pieselor determină scăderea intensă a rezistenței la uzură și a rezistenței

la oboseală, întrucât distrug integritatea suprafeței.

### Concluzii

Calitatea stratului superficial al pieselor rectificate, caracterizată sub aspect al stării geometrice și al stării fizico-chimice se deosebește de calitatea suprafețelor obținute prin alte procedee de prelucrare. Cunoșcând influența esențială a calității stratului superficial obținută la operațiile de finisare asupra comportării în exploatare a pieselor, este evidentă importanța care trebuie acordată cunoașterii și influenței tuturor factorilor care concurează la realizarea stării finale a suprafețelor rectificate. Acești factori sînt legați de piesă, de mașina-unealtă, de LRU, regimurile de rectificare și caracteristicile sculei abrazive (v.fig. 2.15 ).

Studierea influenței factorilor menționați în fig. 2.15 asupra calității suprafețelor rectificate face obiectul lucrării de față și are importanță esențială asupra determinării și prognozării calității suprafețelor rectificate.

## CAPITOLUL 3

### DETERMINAREA CIMPULUI TERMIC LA RECTIFICARE

#### 3.1. Modelarea matematică a proceselor termice la rectificare

Starea fizico-chimică a stratului superficial al piesei rectificate este determinată în mod hotărîtor de procesele termice ce au loc în timpul prelucrării. Acționarea asupra calității stratului superficial al pieselor rectificate înseamnă de fapt acționarea asupra regimului termic. Iată de ce o optimizare a procesului de rectificare impune neapărat și analiza cîmpului termic. În prezenta lucrare determinarea cîmpului termic se face în mod teoretic.

În acest mod problema constă în găsirea variației temperaturii în timp și spațiu, adică a funcției de forma:

$$T = f(x, y, z, t) . \quad (3.1)$$

unde  $x, y, z, t$  reprezintă coordonatele punctului considerat al piesei.

Rezolvarea problemei se face pornind de la ecuația conductibilității termice fără surse interne de căldură sub forma:

Indicii de calitate ai stratului superficial al piesei rectificată

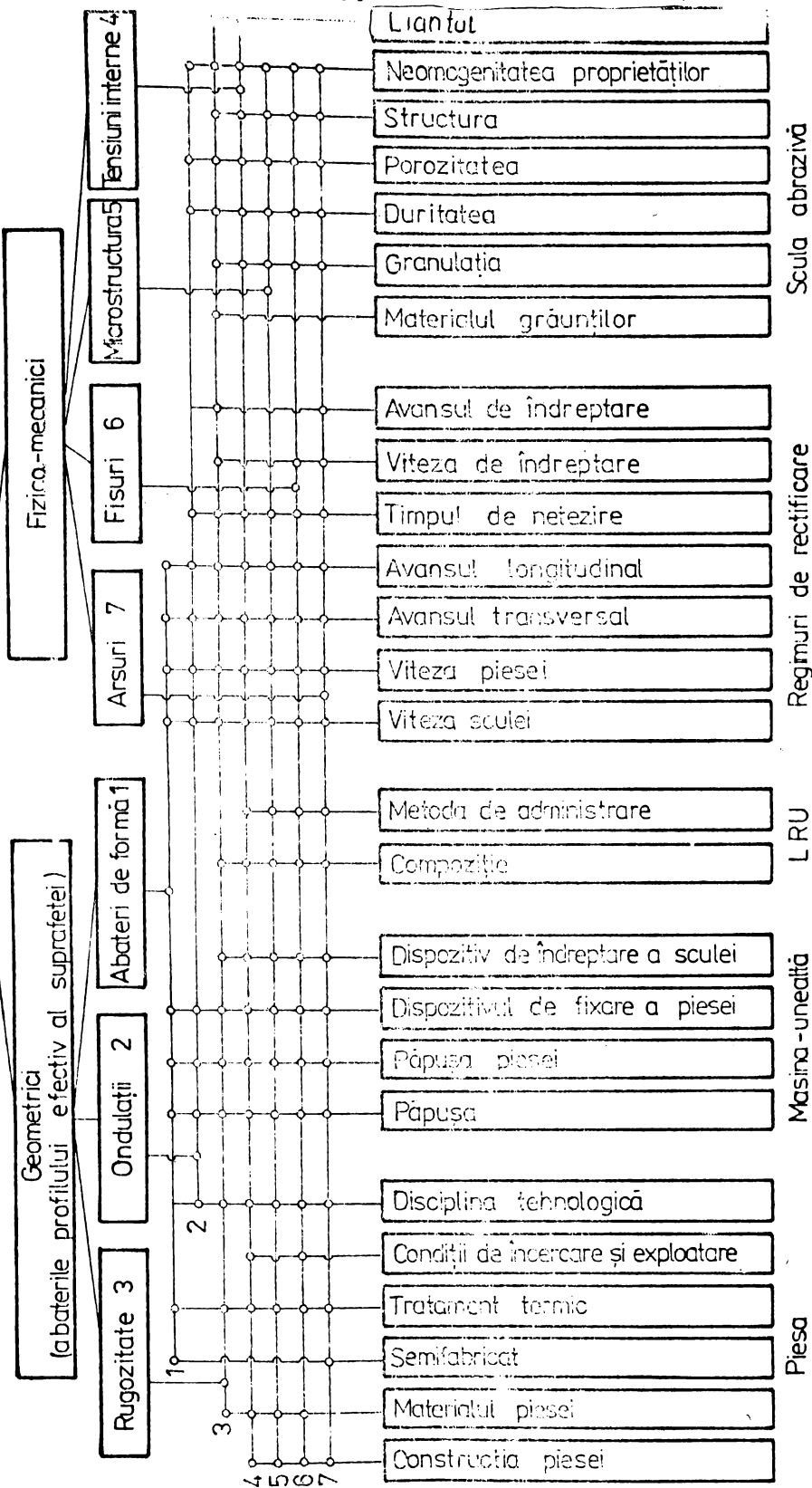


FIG 2.15



$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \gamma} \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (3.2)$$

valabilă pentru un corp solid în stare de repaus și în ipotezele:

- corp omogen și izotrop
- lipsesc sursele interioare de căldură
- parametrii termofizici constanți

În relația (3.2)  $c$  este căldura specifică,  $\gamma$  - densitatea materialului iar  $\lambda$  coeficientul de transmitere a căldurii.

În relația (3.2) nu se ia în considerare transmiterea de căldură prin convecție. La rectificarea datorită mișcării piesei schimbul de căldură se realizează și datorită mișcării mediului înconjurător încălzit. În acest mod se realizează un caz particular de convecție la care toate elementele mediului încălzit se mișcă cu aceeași viteză.

Dacă sistemul de coordonate se ia astfel încît una din axe - de exemplu axa  $z$  - să coincidă cu direcția de mișcare a masei de căldură atunci ecuația se scrie:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \gamma} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + v \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.3)$$

În relația de mai sus se notează  $a = \lambda/c \cdot \gamma$ , "a" fiind numit coeficient de conductibilitate termică, iar dimensiunea sa în S.I. este  $m^2/s$ .

Problema determinării cîmpului termic se reduce la rezolvarea ecuației (3.3) cu condiții inițiale și respectiv la limită.

Condiția inițială care se impune este distribuția temperaturii în piesă în momentul inițial, deci este o funcție de forma:

$$T = T(x, y, z, t_0) = \theta(x, y, z) \quad (3.4)$$

Condițiile limită pot fi clasificate astfel:

- a) Se dă distribuția temperaturii la limita domeniului în orice moment de timp

$$T(x_s, y_s, z_s, t) = \theta(t, S) \quad (3.5)$$

în particular dacă toate punctele suprafeței au aceeași temperatură

$$T(x_s, y_s, z_s, t) = \varphi(t) \quad (3.5')$$

- b) Se cunoaște densitatea fluxului termic prin suprafață în orice moment:  $q(x_s, y_s, z_s, t)$

ceea ce este echivalent cu:

$$\frac{\partial T}{\partial n} \Big|_S = -\frac{\lambda}{\gamma} q(s, t) \quad (3.6)$$

unde  $\frac{\partial T}{\partial n} \Big|_S$  este derivata temperaturii după normala la suprafața  $S$ .

- c) Se dă cantitatea de căldură schimbată la limita cu mediul înconjurător. În acest caz se aplică legea:

$$q = \alpha(T_0 - T_m) \quad (3.7)$$

unde  $T_0$  - temperatura corpului,  $T_m$  - temperatura mediului înconjurător,  $\alpha$  - coeficientul schimbului de căldură.

Dacă la limita suprafeței nu există surse suplimentare de căldură atunci cantitatea de căldură cedată de suprafață trebuie să fie egală cu cantitatea de căldură ajunsă la suprafață datorită conductibilității, adică:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_S = \alpha(T_0 - T_m)$$

sau:

$$\alpha(T_0 - T_m) + \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_S = 0 \quad (3.8)$$

- d) Fluxurile termice la limita de separație a două medii bune conducătoare de căldură

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_S = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \quad (3.9)$$

Pentru determinarea cîmpului temperaturilor la rectificarea se apelează la rezolvarea ecuației (3.3) utilizînd metoda sursoarelor [80]. Această metodă este folosită în mod frecvent în teoria cîmpurilor (termodinamică și hidrodinamică) datorită accesibilității ei alături de rigurozitate matematică acceptabilă.

Metoda, cunoscută din fizica matematică ca metoda Green, constă în aceea că dacă este cunoscută legea variației potențialului unor sarcini punctiforme atunci se poate construi o hartă a potențialului întregului corp, sau a unui sistem de corpuri.

Pentru cazul rectificării se consideră că sursa de căldură este o bandă de lățime "2h" și infinit lungă după axa  $y$ , de intensitate  $q$  și care se deplasează după axa  $+z$  cu viteza  $v$  (v.fig.3.1).

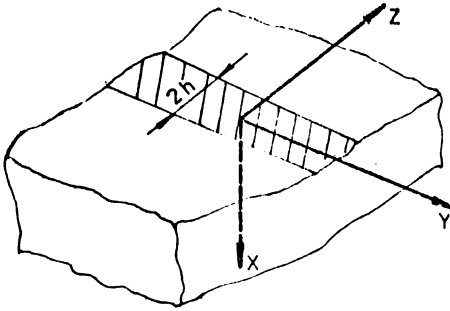


FIG. 3.1

Soluția ecuației (3.3) deci câmpul de temperatură în corp, datorită sursei termice sub formă de bandă este dat de relația:

$$T = \frac{2qa}{\pi\lambda V} \int_{Z-H}^{Z+H} \exp(-\xi) \dots K_0(\sqrt{x^2 + \xi^2}) d\xi \quad (3.10)$$

unde s-au notat:

$$x = \frac{\sqrt{X}}{2a}, \quad z = \frac{\sqrt{Z}}{2a}, \quad H = \frac{\sqrt{h}}{2a} \quad (3.11)$$

iar funcția  $K_0$  este dată de :

$$K_0(m) = \int_0^{\infty} \frac{dz}{z} \exp\left[-(m^2 z^2 + \frac{1}{4z^2})\right] \quad (3.12)$$

Pentru calcul efectiv se introduce temperatura adimensională

$$\theta = T \cdot \frac{\pi\lambda V}{2qa} \quad (3.13)$$

și relația de calcul devine

$$\theta = J(Z+H) - J(Z-H) \quad (3.14)$$

cu

$$J(U) = \int_0^U \exp(-\xi) K_0(\sqrt{x^2 + \xi^2}) d\xi \quad (3.15)$$

Cu ajutorul relațiilor (3.14) și (3.15) se calculează câmpul temperaturilor în piesa rectificată.

Relațiile precedente sînt valabile pentru cazul rectificării fără lichid de răcire. Dacă rectificarea se face cu răcire relațiile de calcul sînt:

$$\theta = K [J(Z+H) - J(Z-H)] \quad (3.16)$$

și

$$J(U) = \int_0^U \exp(-\xi) K_0(\sqrt{x^2 + \xi^2}) - \beta \int_0^U \exp(\beta x - \xi) \int_x^{\infty} \exp(-\beta x) K_0(\sqrt{x^2 + \xi^2}) dx d\xi \quad (3.17)$$

unde coeficientul  $K$  este dat de graficul din fig. 3.2 iar

$$\beta = \frac{2\alpha a}{\lambda v} \quad (3.18)$$

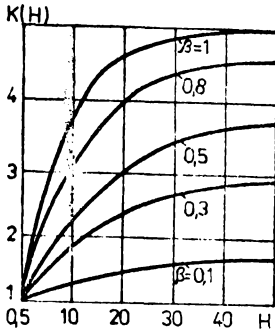


FIG. 3.2

La rezolvarea numerică dacă se introduc  $\beta = 0$  și  $K = 1$  se obține cazul rectificării fără răcire.

### 3.2. Determinarea sursei termice în zona de contact a discului de rectificat cu piesa

Această problemă constituie punctul de plecare în soluționarea ecuației (3.3).

Există două puncte de vedere considerate extreme asupra caracterului sursei termice în zona de contact și anume:

- sursă discretă de căldură
- sursă continuă de căldură

Prima ipoteză, cea a sursei discrete admite că suprafața de contact este atinsă numai de grăunți, atunci procesul de rectificare poate fi considerat ca o sursă de procese de microașchiere cu grăunți distincți. Temperatura va fi o însumare a impulsurilor termice ale fiecărui grăunte:

$$T = \frac{2qa}{\pi\lambda v} \left( \theta_0 + \theta_1 \sum_{n=1}^N \frac{1}{\sqrt{n}} \right) \quad (3.19)$$

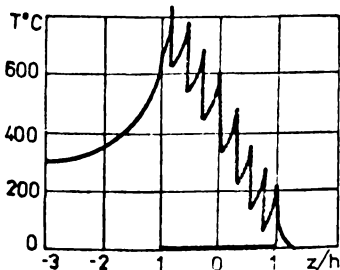
unde  $\theta_0$  - temperatura relativă la primul grăunte

$\theta_1$  - temperatura relativă la al doilea

$n$  - numărul curent al grăuntelui

$N$  - numărul total al grăunților în contact cu punctul dat.

Caracterul variației temperaturii cu coordonată  $Z$ , pentru un sistem mobil de coordonate este prezentată în fig. 3.3.



Sursa continuă de căldură este sugerată de faptul că în procesul de lucru se produce pătrunderea șculei în întregime în metal. Intrucât componentele forței de așchiere ating valori mari, grăunții cei mai proeminenți și liantul ce îi leagă, suferă deformații

elastice și numărul grăunților în contact cu suprafața metalului se mărește esențial.

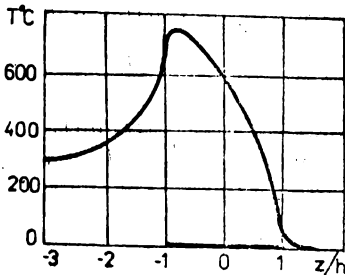


FIG. 3.4

Distribuția teoretică a temperaturii pentru sursa continuă de căldură este reprezentată în fig.3.4.

Utilizarea sursei continue de căldură este justificată de măsurători și eficiență pentru calcule. Pentru acest motiv și în prezentă lucrare se acceptă sursa continuă de căldură.

La calculul temperaturii după schema sursei continue trebuie analizată influența legii distribuției densității fluxului termic pe lățimea  $2h$  a sursei. Rezultatele unor calcule prezentate în fig.3.5 arată că temperaturile caracteristice depind puțin de legea de distribuție a densității. Aici legile adoptate au fost

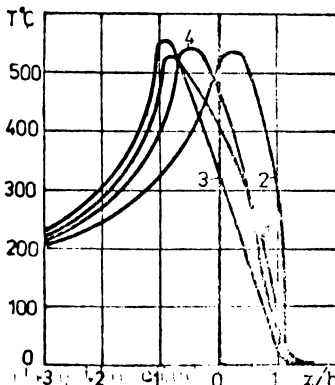


FIG. 3.5

- 1 - densitate constantă a fluxului
- 2 - variație liniară cu maximum pe muchia din față:

$$q = q_0 \frac{z' + h}{h}$$

- 3 - variație liniară cu maximum pe muchia din spate

$$q = q_0 \frac{h - z'}{h}$$

- 4 - variație parabolică

$$q = 3q_0 \frac{h^2 - z'^2}{2h^2}$$

unde  $Z'$  este coordonata punctului de aplicare a elementului infinit mic al sursei de căldură în formă de bandă.

Deci adoptarea sursei termice de intensitate constantă este o ipoteză acceptabilă.

Pentru a aplica modelul matematic este necesară analiza în continuare a caracteristicilor esențiale ale procesului de rectificarea, pe care o prezentăm succint mai jos.

Încălzirea stratului superficial al piesei rectificate se face pe o adâncime mică, de ordinul a 1 mm. Această adâncime se modifică puțin cu regimul de aşchiere, dar aproape în toate cazurile

nu depășește această mărime. Acest fapt permite să se considere piesele drept corpuri semifinite, iar condițiile să se deie numai pentru o limită: suprafața rectificată.

Pe de altă parte experiența arată ca la rectificarea fără răcire schimbul de căldură cu aerul poate fi neglijat, iar suprafața să se considere izolată termic.

Suprafața de contact se poate considera zona prin care trece fluxul termic uniform repartizat, iar în afara zonei fluxul termic e nul.

Dacă rectificarea se face cu răcire forțată, zona de contact este răcită neglijabil, schimbul de căldură se realizează doar pe suprafața liberă a piesei.

Zona de contact a sculei abrazive cu piesa se poate considera un dreptunghi de lungime egală cu lățimea sculei și lățimea egală cu lungimea arcului de contact a sculei cu piesa (v. 3.3). Astfel lungimea este de 30-40 mm iar lățimea mult mai mică (2h 2 mm). În acest caz este rațional să se modeleze zona de contact ca o bandă infinit lungă.

Condițiile inițiale se adoptă ca o temperatură constantă în tot volumul piesei.

La rectificarea reală, în zona de contact, câmpul de temperatură atinge rapid (în fracțiuni de secundă) starea de saturație termică, adică devine staționar.

Fluxul termic se determină experimental fie prin măsurarea forței de aşchiere  $F_z$ , fie prin măsurarea puterii motorului electric de acționare a sculei, respectiv la mers în gol și în sarcină.

Analiza distribuției căldurii între elementele în contact arată că în sculă intră max.1% din căldura degețată, în aşchii cea. 10% la rectificare plană și cea.20% la cea cilindrică, în lichidul de răcire răcește doar piesa.

### 3.3. Determinarea lungimii curbei de contact la rectificarea cilindrică exterioară

În lucrarea [93] s-a efectuat o analiză a contactului sculei abrazive cu piesa la rectificarea cilindrică exterioară. Pentru aceasta se pleacă de la constatarea că traiectoriile virfului grăunțelului abraziv, relativ față de piesă la rectificarea cilindrică exterioară cu avans transversal discret sînt curbe spirale epiciolo-

ide alungite, când vitezele periferice ale sculei și piesei ( $v_s$  și  $v_p$ ) au același sens și curbe spirale hipocicloide alungite când  $v_s$  și  $v_p$  au sensuri contrare. Curbele respective sînt determinate prin sistemul de ecuații:

$$\begin{aligned} X &= H \cos i\varphi - R_s \cos (1 \pm i)\varphi \\ Y &= H \sin i\varphi + R_s \sin (1 \pm i)\varphi \\ z &= \frac{v_1}{2\eta} i\varphi \end{aligned} \quad (3.20)$$

unde:  $H = R_p + R_s$  este distanța dintre axele de rotație ale piesei și sculei abrazive, [mm];

$R_p, R_s$  - raza piesei de rectificat, respectiv a discului, [mm];

$i = \frac{\omega_p}{\omega_s} = \frac{v_p R_s}{60 v_s R_p}$  este raportul dintre vitezele unghiulare ale piesei și sculei;

$s_1$  - avansul longitudinal, în mm/rotă a piesei;

$v_p, v_s$  - vitezele periferice ale piesei, [m/min] și ale sculei abrazive, [m/s].

În sistemul (3.20) și în continuare semnele superioare se referă la situația în care piesa și scula se rotesc în același sens, iar cele inferioare în care piesa și scula se rotesc în sens contrar.

Lungimea elementară a curbei de contact a grăuntelui abraziv cu piesa este:

$$dL = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2} \quad (3.21)$$

După efectuarea operațiilor necesare și simplificare, relația (3.21) obține forma:

$$dL = \sqrt{H^2 i^2 + R_s^2 (1 \pm i)^2 \mp 2H R_s (1 \pm i) \cos \varphi + \left(\frac{s_1 \cdot i}{2\eta}\right)^2} d\varphi \quad (3.22)$$

Se transformă relația (3.22) considerînd că:

$$A = H^2 i^2 + R_s^2 (1 \pm i)^2 + \left(\frac{s_1 \cdot i}{2\eta}\right)^2;$$

$$B = 2H R_s (1 \pm i) \cos \varphi$$

$$C = \frac{B}{A}$$

$$\text{Atunci: } dL = \sqrt{A} \cdot \sqrt{1 + C \cos \varphi} d\varphi \quad (3.23)$$

Lungimea curbei de contact a grăuntelui abraziv cu piesa poate fi determinată prin integrarea relației (3.23) între limitele 0 și  $\varphi_0$ , adică din momentul intrării grăuntelui abraziv în materialul piesei, pînă în momentul ieșirii din piesă (v.fig.3.6)

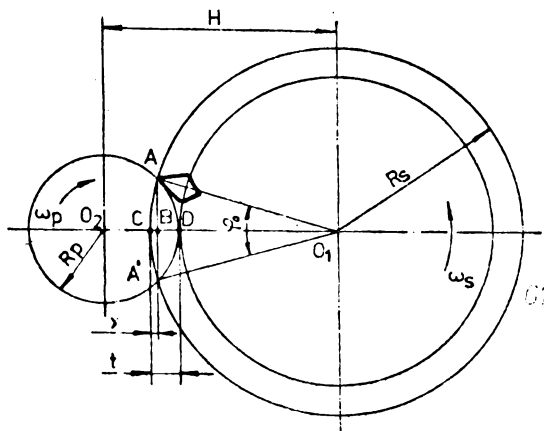


FIG. 3.6

sau

$$L = \sqrt{A} \left( \varphi_0 + \frac{1}{2} C \sin \varphi_0 \right) \quad (3.25)$$

Introducînd în (3.25)  $C = \frac{B}{A}$  și considerînd valorile lui A și B și de asemenea că  $H = R_p + R_s$ ,  $i = \frac{v_p R_s}{60 v_s R_p}$  după transformare și simplificare se obține formula pentru determinarea lungimii curbei de contact a sculei abrazive cu piesa la rectificarea cilindrică exterioară cu avans longitudinal:

$$L = \sqrt{\left[ (R_s + R_p)^2 + \left( \frac{s_1}{2\pi} \right)^2 \right] \left( \frac{v_p R_s}{60 v_s R_p} \right)^2 + R_s^2 \left( 1 \pm \frac{v_p R_s}{60 v_s R_p} \right)^2} \cdot \varphi_0 + \frac{(R_s + R_p) \frac{v_p R_s^2}{60 v_s R_p} \left( 1 \pm \frac{v_p R_s}{60 v_s R_p} \right) \sin \varphi_0}{\sqrt{\left[ (R_s + R_p)^2 + \left( \frac{s_1}{2\pi} \right)^2 \right] \left( \frac{v_p R_s}{60 v_s R_p} \right)^2 + R_s^2 \left( 1 \pm \frac{v_p R_s}{60 v_s R_p} \right)^2}} \quad (3.26)$$

Dacă rectificarea se face prin pătrundere formula (3.26) se simplifică întrucît  $s_1 = 0$ . În acest caz traiectoriile vârfului grăuntelui abraziv, relativ față de piesă, la rectificarea exterioară, cu avans longitudinal discret, va fi o epicicloidă alungită la rectificarea cu  $v_p$  și  $v_s$  în acelaș sens și o hipocicloidă alungită la rectificarea cu  $v_p$  și  $v_s$  în sens opus.



Formula (3.26) poate fi transformată într-o formulă de calcul a lungimii arcului de contact când  $\varepsilon_1 = 0$  și  $v_p = 0$ . Formula devine

$$L'' = R_s \cdot \varphi_0 \quad (3.27)$$

Dacă se ia în considerație că așchia are formă de virgulă, unghiul de contact real este  $\frac{\varphi_0}{2}$  și (3.27) devine

$$L'' = R_s \varphi_0 / 2 \quad (3.28)$$

Unghiul  $\varphi_0$  care intră în relația (3.26), se determină din fig. 3.6:

$$\cos \frac{\varphi_0}{2} = \frac{O_1 D}{O_1 A} = \frac{R_s - x}{R_s} = 1 - \frac{x}{R_s}$$

Se notează:  $CD = t$ ,  $BC = x$ ,  $AB = y$

Din triunghiul  $ABO_2$ :

$$R_p^2 = y^2 + [R_p - (t - x)]^2 \quad (3.29)$$

Din triunghiul  $ABO_1$ :

$$R_s^2 = y^2 + (R_s - x)^2 \quad (3.30)$$

Efectuînd transformările și scăzînd (3.30) din (3.29) se obține

$$2x(R_s + R_p - t) = 2R_p t - t^2$$

de unde:

$$x \cong \frac{2R_p t - t^2}{2(R_s + R_p - t)}$$

Valorile lui  $t^2$  de la numărător și  $t$  de la numitor se pot neglija, ca fiind mici și se obține:

$$x = \frac{R_p \cdot t}{R_s + R_p}$$

$$\text{și } \cos \frac{\varphi_0}{2} = 1 - \frac{R_p \cdot t}{R_s(R_s + R_p)} \quad (3.31)$$

În literatură, [52] pentru calcularea lungimii curbei de contact a grăuntelui abraziv cu piesa se propune formula:

$$L = \sqrt{\left(1 \pm \frac{v_p}{60v_s}\right)^2 + \left(\frac{v_1}{60v_s}\right)^2} \cdot \sqrt{\frac{D_s \cdot D_p \cdot t}{D_s + D_p}} \quad (3.32)$$

în care:  $D_s$  și  $D_p$  sînt respectiv diametrele sculei și piesei, în mm;

$v_1 = s_1 \cdot n_p$ , [mm/min] este viteza avansului longitudinal;  
 $t$  - adâncimea de rectificare, [mm]

Pentru rectificarea cu avans de pătrundere  $v_1 = 0$  și (3.32) devine:

$$L' = \left( 1 \pm \frac{v_p}{60 v_s} \right) \sqrt{\frac{D_s \cdot D_p \cdot t}{D_s + D_p}} \quad (3.33)$$

Dacă se acceptă că piesa care se rectifică este fixă ( $v_1 = 0$  și  $v_p = 0$ ) lungimea arcului de contact este:

$$L'' = \sqrt{\frac{D_s \cdot D_p \cdot t}{D_s + D_p}} \quad (3.34)$$

În [93] s-au efectuat calcule comparative ale lungimilor curbei de contact cu formulele propuse (3.26) și (3.28) și cu cele din [52], respectiv (3.32) și (3.34) pentru situațiile concrete considerate în experimentările efectuate.

Valoarea lui  $L''$  rezultă aproape identică la calculul cu (3.28) și (3.34), diferența este de ordinul 1-1,5%; valoarea lui  $L$ , calculată cu (3.26) este mai mare față de cea calculată cu (3.29) cu 4-5% fiind  $v_p$  și  $v_d$  au sensuri contrare și 6-9% când  $v_p$  și  $v_d$  au același sens.

Se mai fac în plus următoarele observații:

1. Valoarea absolută a lui  $L$  este mică; de exemplu pentru  $D_s = 500$  mm,  $D_p = 60$  mm,  $v_s = 32$  m/s,  $v_p = 30$  m/min și  $t = 0,005$  mm  $L'' = 0,522$  mm iar  $L = 0,529$  mm.

2. Pentru avansuri transversale mici, diametrul sculei influențează foarte puțin lungimea curbei de contact; de exemplu pentru  $t = 0,005$  mm mărirea lui  $D_s$  de 4 ori ( $D_s = 2000$  mm) determină creșterea lui  $L''$  cu  $0,539 - 0,522 = 0,017$  - adică cu aproximativ 3%. Prin mărirea lui  $t$  influența lui  $D_s$  crește.

3. Influența vitezei periferice a piesei și avansului longitudinal asupra lungimii curbei de contact este nesemnificativă. Pentru cele mai obișnuite condiții de rectificare lungimea curbei de contact se modifică, pe scara lui  $v_p$  și  $s_1$  în limitele 1-2%. Parametrii principali care determină lungimea arcului de contact a sculei cu piesa sînt  $D_s$ ,  $D_p$  și  $t$ . Din acest motiv la rectificarea cilindrică exterioară lungimea curbei de contact este practic egală cu lungimea arcului de contact ( $L \cong L''$ ).

4. Pentru calculele practice privind determinarea temperaturilor la rectificare, vom folosi formula (3.28) datorită simplității acesteia.

### 3.4. Rezolvarea numerică a ecuației temperaturilor la rectificare

Se pleacă de la expresia lui  $\Theta(Z)$  :

$$\Theta(Z) = \int_{Z-H}^{Z+H} \exp(-\xi) K_0(\sqrt{x^2 + \xi^2}) d\xi - \beta \int_{Z-H}^{Z+H} \exp(\beta x - \xi) \int_x^{+\infty} \exp(-\beta x) K_0(\sqrt{x^2 + \xi^2}) dx d\xi$$

Pentru calculul integralei improprie  $K_0$  procedăm la descompunerea ei într-o sumă de două integrale:

$$K_0(m) = \int_0^1 \frac{1}{z} \exp\left[-\left(m^2 z^2 + \frac{1}{4z^2}\right)\right] dz + \int_1^{\infty} \frac{1}{z} \exp\left[-\left(m^2 z^2 + \frac{1}{4z^2}\right)\right] dz$$

În cea de-a doua integrală efectuăm o schimbare de variabilă:  $x = \frac{1}{u}$ ,  $dx = -\frac{1}{u^2} du$

Noile limite de integrare devin:

$$x = 1 \Rightarrow u = 1$$

$$x = +\infty \Rightarrow u = 0$$

Expresia lui  $K_0$  devine:

$$K_0(m) = \int_0^1 \frac{1}{z} \exp\left[-\left(m^2 z^2 + \frac{1}{4z^2}\right)\right] dz + \int_0^1 \frac{1}{u} \exp\left[-\left(m^2 \cdot \frac{1}{u^2} + \frac{1}{4} u^2\right)\right] du$$

Pentru calculul integralei  $\int_x^{+\infty} \exp(-\beta x) K_0(\sqrt{x^2 + \xi^2}) dx$

analizăm două cazuri funcție de  $X$ .

1. Cazul  $X < L$  atunci:

$$\int_x^{\infty} \exp(-\beta X) K_0(\sqrt{X^2 + \xi^2}) dX = \int_1^{\infty} \exp(-\beta X) K_0(\sqrt{X}) dX + \int_1^{\infty} \exp(-\beta X) K_0(\sqrt{X}) dX$$

$$= \int_x^1 \exp(-\beta X) K_0(\sqrt{X}) dX + \int_0^1 \frac{1}{2} \exp(-\beta \cdot \frac{1}{u}) K_0(\sqrt{\frac{1}{u^2} + \xi^2}) du$$

unde în a doua integrală am efectuat din nou schimbarea de variabilă  $X = 1/u$ .

2. Cazul  $X \gg 1$

$$\int_x^{+\infty} \exp(-\beta X) K_0(\sqrt{X}) dX = \int_0^{1/X} \frac{1}{u^2} \exp(-\frac{\beta}{u}) K_0(\sqrt{\frac{1}{u^2} + \xi^2}) du$$

Pentru calculul efectiv al funcției  $\Theta$  aplicăm formula de cvadratură a lui Gauss în 8 puncte.

Detaliem în continuare formulele de calcul.

$$u = Z - (-1)^n \cdot H ; \quad n = 1, 2$$

$$K(u) = \sum_{m=1}^{10} \frac{u}{10} \sum_{i=1}^8 a_i \left[ \exp(-\xi_{im}) K_0(\sqrt{X^2 + \xi_{im}^2}) - \right.$$

$$\left. - \beta \exp(\beta X - \xi_{im}) K_1(\xi_{im}) \right]$$

unde  $a_i$  - ponderile punctelor lui Gauss

$g_i$  - abscisele punctelor lui Gauss

$\xi_{im} = u(m-1)/10 + g_i \cdot P/10$  abscisele corespunzătoare din intervalul  $[\frac{u}{10}(m-1), \frac{u}{10} m]$

$$K_0(u) = \sum_{j=1}^8 a_j \left[ \frac{1}{Z_j} \left( \exp\left[-(u^2 \cdot Z_j^2 + \frac{1}{4Z_j^2})\right] + \exp\left[-(u^2 \cdot \frac{1}{Z_j^2} + \frac{1}{4Z_j^2})\right] \right) \right]$$

unde  $Z_j = g_j$

Pentru  $x < 1$ :

$$K_1(\xi) = (1-x) \sum_{l=1}^8 a_l \exp(-\beta u_l) K_0(\sqrt{u_l^2 + \xi^2}) +$$

$$+ \sum_{q=1}^8 a_q \frac{1}{u_{q2}} \exp(-\frac{\beta}{u_q}) x K_0(\sqrt{\frac{1}{u_{q2}^2} + \xi^2}) \quad \text{unde:}$$

$$u_l = x + (1-x) g_l ; \quad u_q = g_q$$

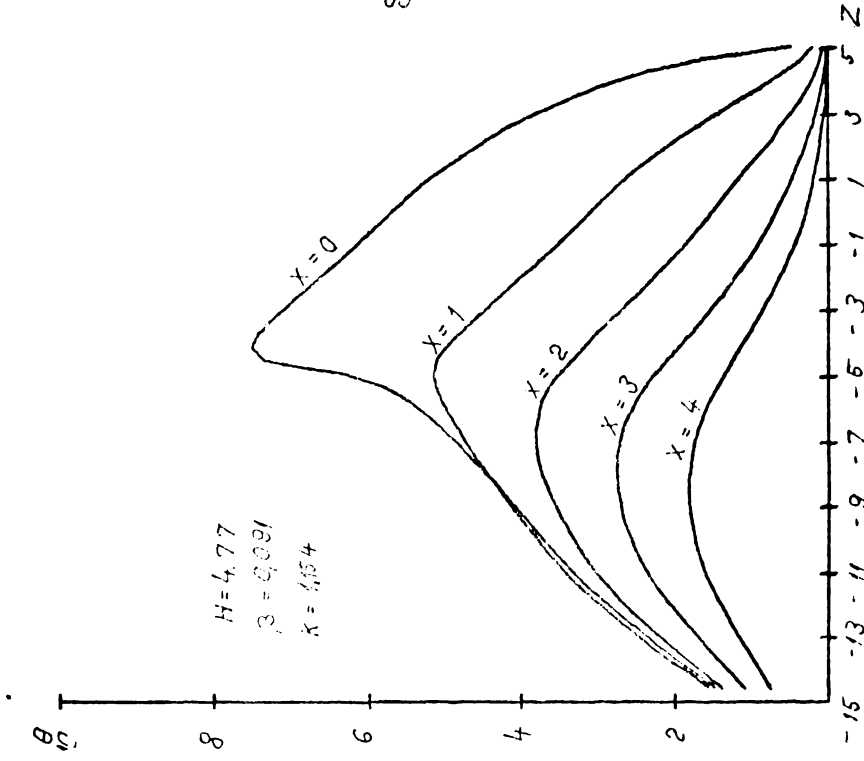


Fig. 3.9.

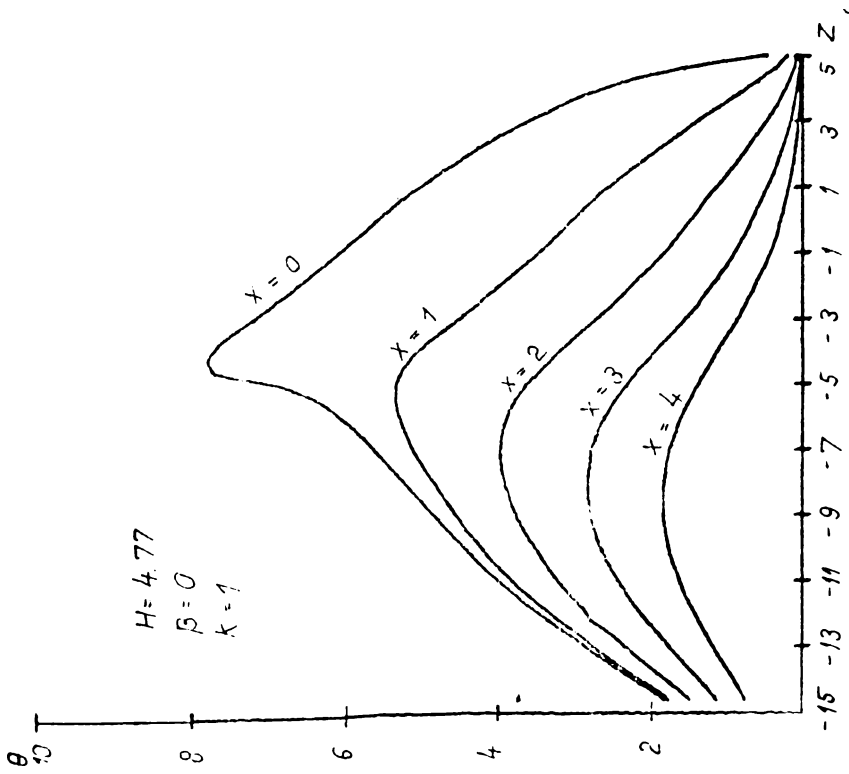


Fig. 3.7.

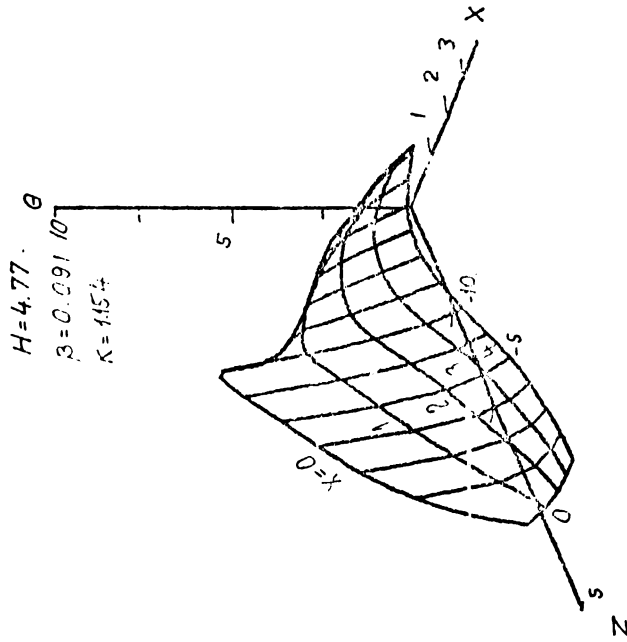


Fig. 3.10.

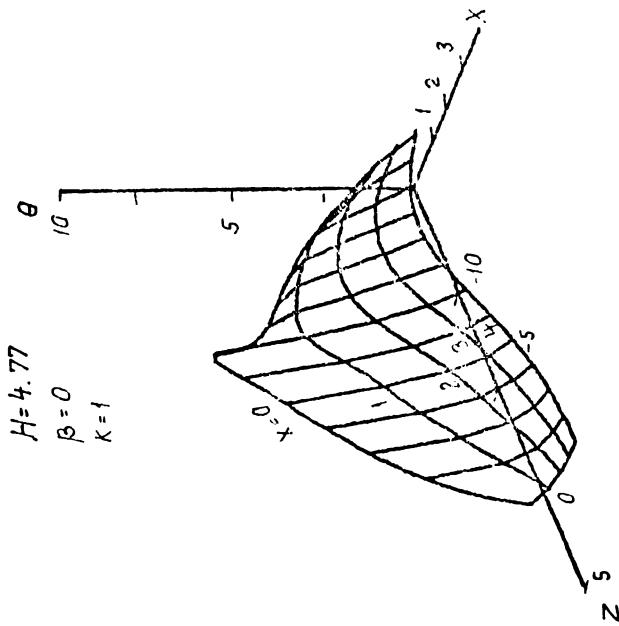


Fig. 3.8.

Pentru  $x \geq 1$ :

$$K_1(\xi) = \frac{1}{x} \sum_{l=1}^8 a_l \cdot \frac{1}{u_l^2} \exp\left(-\frac{\beta}{u_l} K_0\left(\sqrt{\frac{1}{u_l^2} + \xi^2}\right)\right)$$

$$\Theta(Z) = K [J(Z + H) - J(Z - H)]$$

Expresia lui  $\Theta$  se poate particulariza pentru  $\beta = 0$  și  $K = 1$ . (ceea ce corespunde relației (3.3) și (3.14) fără lichid de răcire).

### 3.5. Exemplificarea aplicării metodei de calcul a temperaturilor la rectificare

Pentru ilustrarea metodologiei de calcul se alege un exemplu concret astfel: materialul rectificat este OLC45, cu  $\emptyset 41$  mm. Viteza de rectificare este  $v_p = 9,3$  m/min = 15,5 cm/s. Adâncimea  $t = 0,01$  mm, diametrul discului  $D_s = 500$  mm.

Lungimea arcului de contact va fi:

$$L'' = 2h = \sqrt{\frac{D_s D_p t}{D_s + D_p}} = \sqrt{\frac{500 \cdot 41 \cdot 0,01}{500 + 41}} = 0,615 \text{ mm}$$

deci  $h = 0,0307$  cm.

Valoarea coeficientului de conductibilitate termică este  $a = 0,05$  cm<sup>2</sup>/s, deci  $H = \frac{15,5 \cdot 0,0307}{2 \cdot 0,05} = 4,77$

Pe baza acestora rezultă funcția  $\Theta(X, Z)$  conform fig. 3.7 respectiv reprezentarea spațială cu ajutorul calculatorului numeric conform <sup>fig.</sup> 3.8. Calculul funcțiilor (3.14) și (3.16) s-a făcut cu un program elaborat pe baza schemei logice prezentată

în continuare, pe un calculator II01.

Dacă rectificarea se face cu răcire adoptînd:  $\alpha = 0,86$  cal/cm<sup>2</sup>·s·grad și  $\lambda = 0,061$  cal/cm·s·grad.

$$\beta = \frac{2 \cdot 0,86 \cdot 0,05}{0,061 \cdot 15,5} = 0,091$$

respectiv pentru  $H = 4,77$  și  $\beta = 0,091$  rezultă  $K = 1,15$ .

Funcția  $\theta$  este cea din fig.3.9 și 3.10.

Trecerea la temperaturile efective și coordonatele dimensionale se face pe baza următoarelor:

$$x = \frac{2a}{v_p} X = \frac{2 \cdot 0,05}{15,5} X = 0,00645 X \text{ (cm)}$$

$$z = \frac{2a}{v_p} Z = \frac{2 \cdot 0,05}{15,5} Z = 0,00645 Z \text{ (cm)}$$

$$T = \frac{2c \cdot a}{\pi \lambda v_p} \theta = \frac{2 \cdot 817 \cdot 0,05}{3,14 \cdot 0,061 \cdot 15,5} \theta = 27,52 \theta$$

unde

$q = 817$  obținut din valoarea puterii consumată la aşchiere  $P = 1680$  Watt, iar conform metodei temperatura inițială a piesei este  $T = 0^\circ\text{C}$ .

Temperaturile efective în piese sînt reprezentate în fig. 3.11 - 3.12.



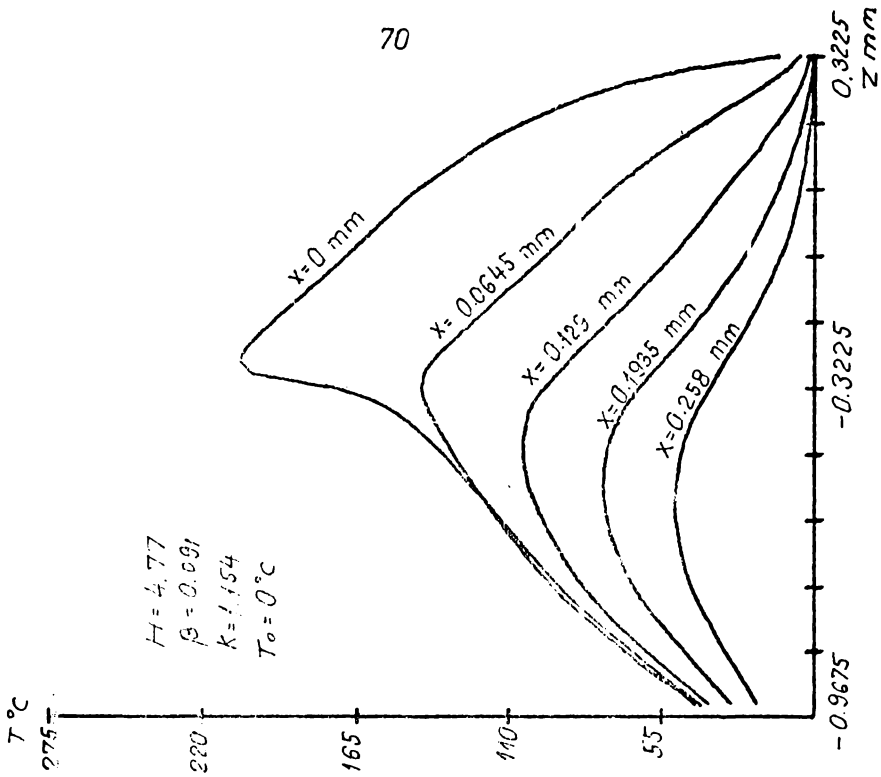


Fig. 3.12.

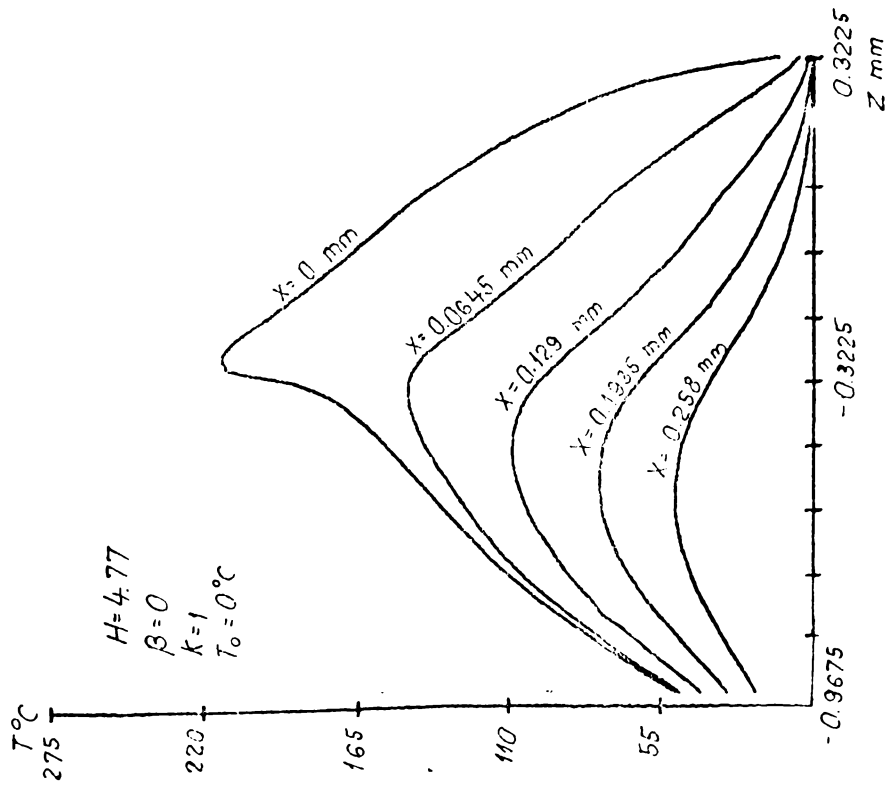
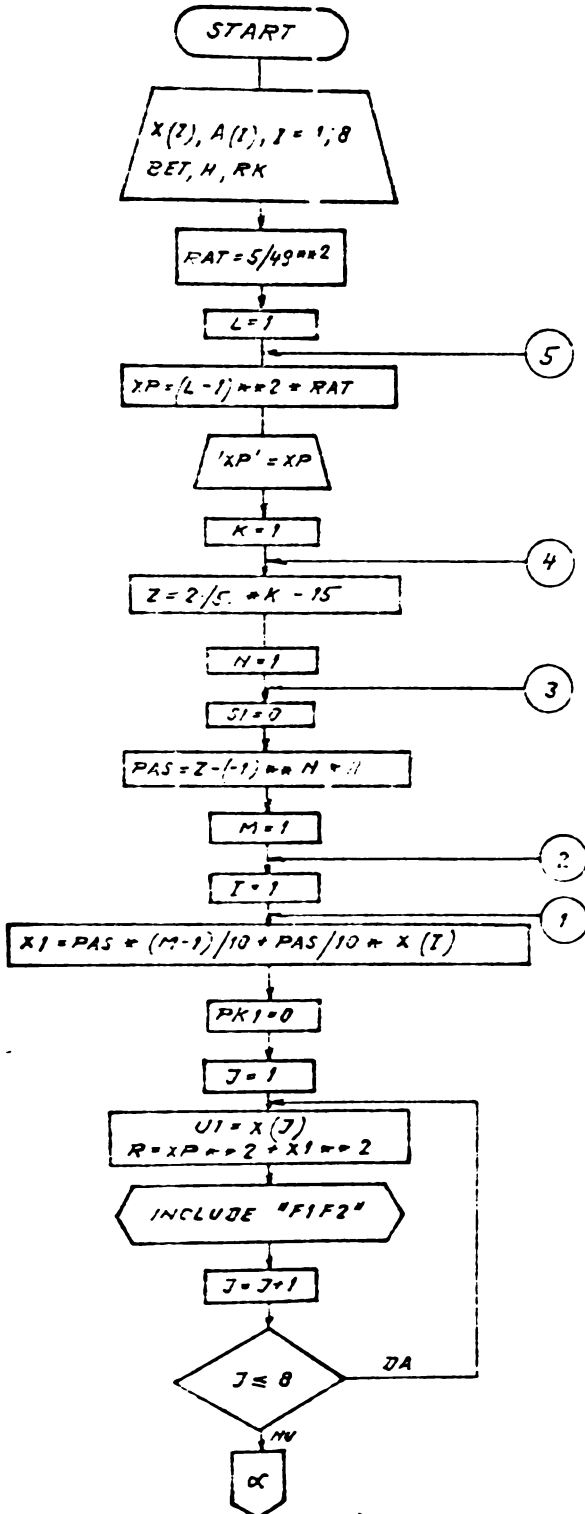
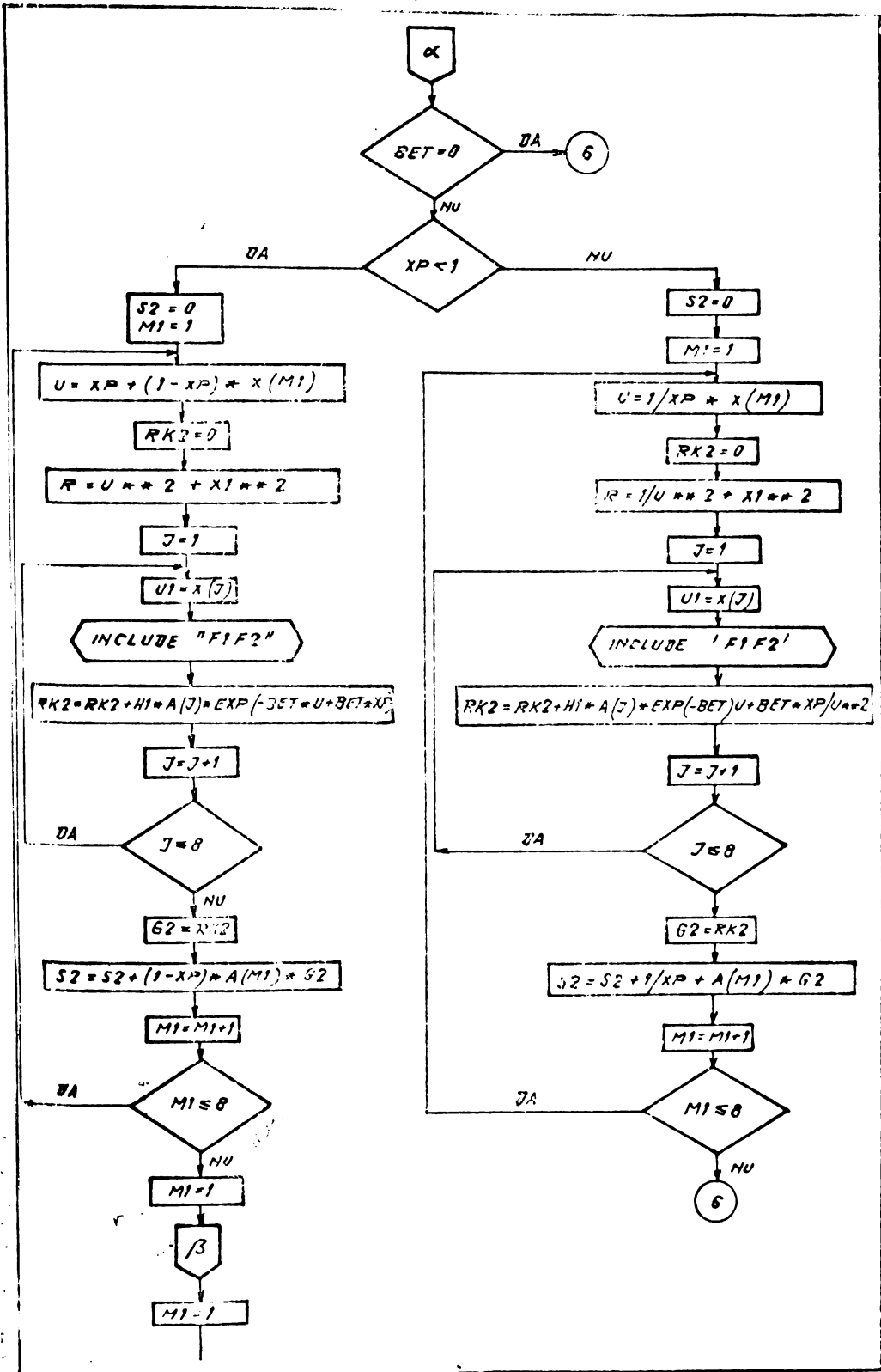
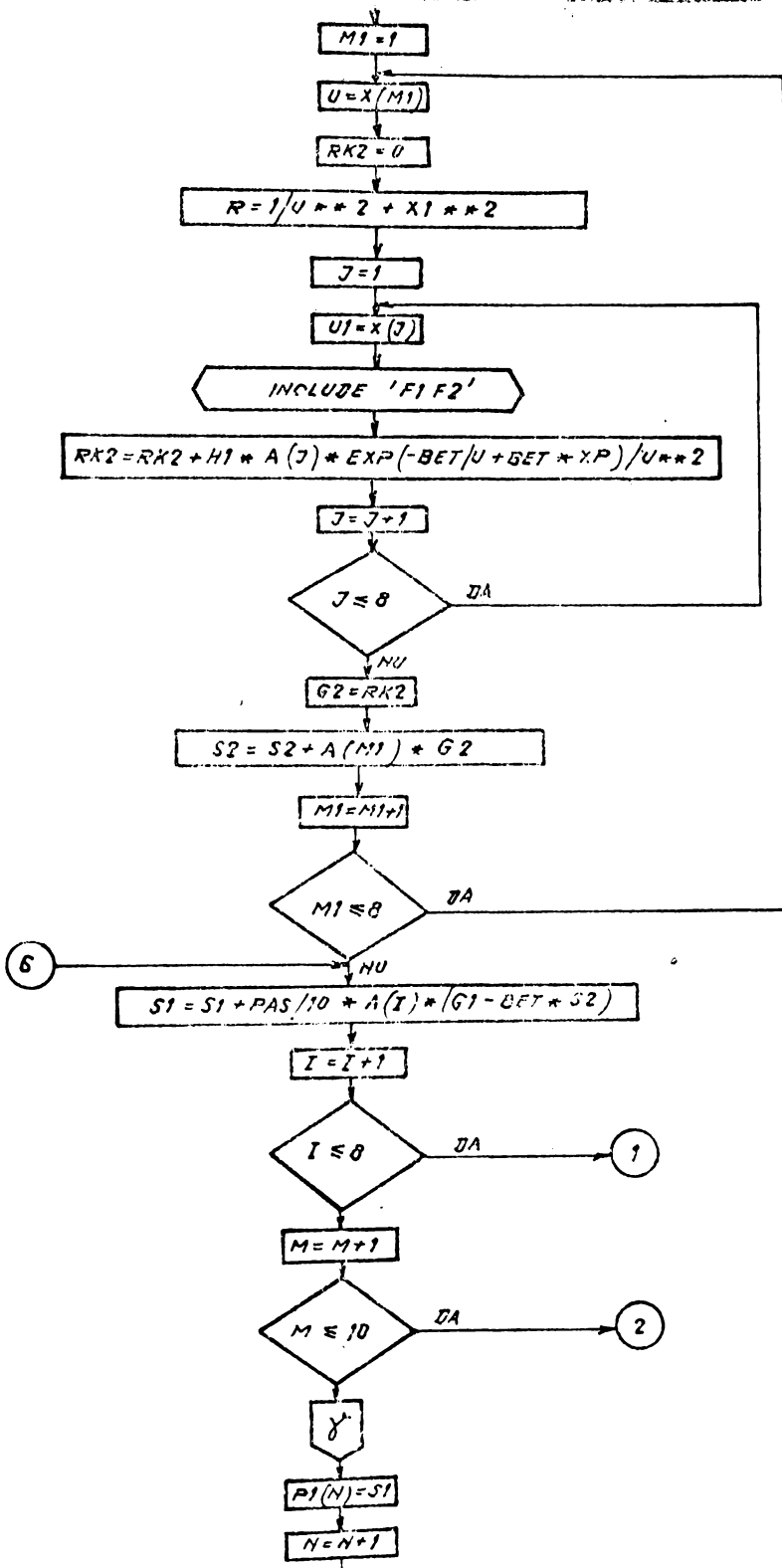


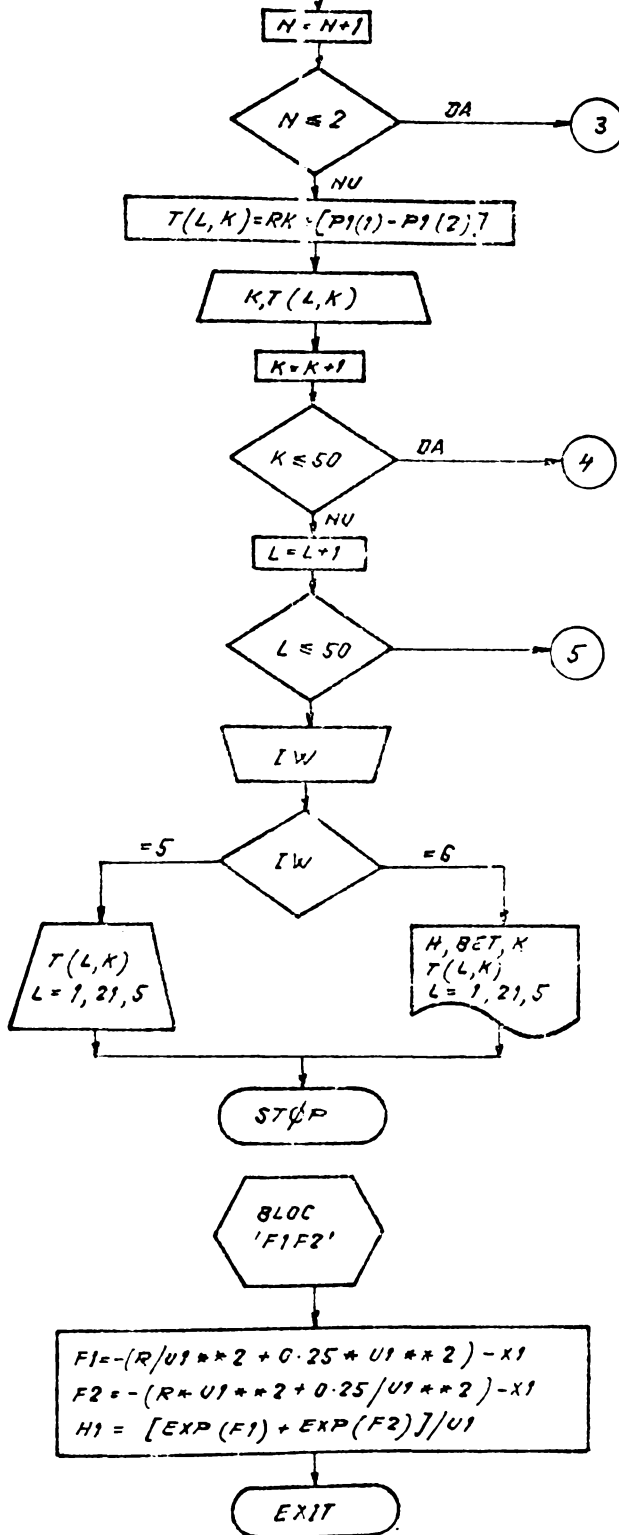
Fig. 3.11.

Schema logică a programului









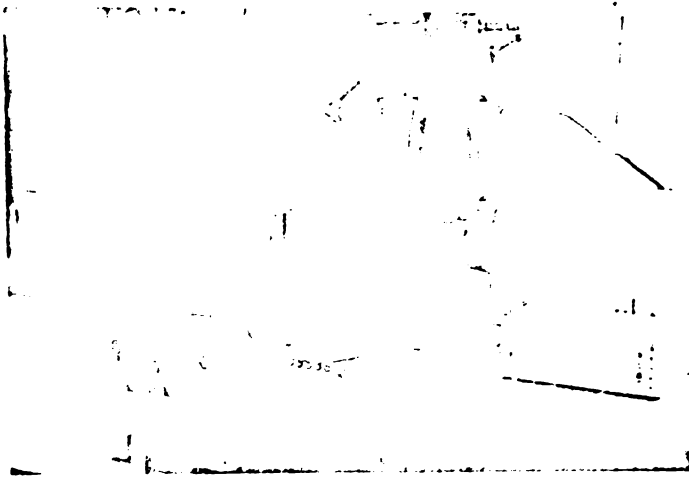
Capitolul 4ECHIPAMENTUL DE CERCETARE. MARIMI DE MASURAT4.1. Mașina de rectificat cilindric RU-350

Fig. 4.1

Cercetările experimentale s-au efectuat pe mașina de rectificat cilindric universală RU-350 (fig.4.1) fabricată de IMUAB - Intreprinderea de mașini-unelte și agregate București - varianta normală, având următoarele caracteristici tehnice:

## a) Discul de rectificare

- Diametrul exterior ..... 280...400 mm; 400...500 mm
- Diametrul interior..... 203 mm
- Lățimea normală a discului simplu ..... 80 mm
- Lățimea maximă a discului simplu ..... 100 mm
- Lățimea maximă a discului compus ..... 125 mm
- Turația discului de rectificare (corespunzătoare diametrelor discului) .....  
1535 rot/min; ... 1230 rot/min

(viteza periferică a discului de rectificare nu trebuie să depășească niciodată 35 m/s)

## b) Piesa de rectificat:

- Diametrul maxim ... 350 mm
- Lungimea maximă a piesei... 630-1000 ..... 1500-2000 mm
- Greutatea maximă a piesei între vîrfuri..... 300 kg
- Turația piesei (11 trepte)..... 28-280 rot /min
- Turația piesei pentru un motor trifazat cu 50 Hz și turația 1500 rot/min.

Diam.roților de curea,mm		Turațiile piesei rot/min						
la motor	la axul intermediar	28	40	56	80	112	150	
58	220							
95	191	53	75	106	150	212	280	

## c) Masa

- Rotirea mesei la diferite distanțe între vîrfuri  $\frac{9^\circ}{630}$   $\frac{7^\circ}{1000}$   $\frac{6^\circ}{1500}$   $\frac{5^\circ}{2000}$
- Viteza mesei reglabilă fără trepte ... 0,05 ... 6 m/min
- Cursa minimă la mișcarea hidraulică a mesei ..... 2 mm

## d) Sania pietrei de rectificare

- Cursa rapidă a saniei..... 50 mm
- Cursa maximă a avansului transversal-mecanic (raportat la diametrul piesei)..... 2 mm
- Valoarea unei gradații pe tamburul gradat al avansului transversal (raportat la diametru)..... 0,01 mm
- Valoarea avansului transversal în cazul acționării prin rotirea cu un dinte (raportat la diametru)..... 0,005 mm
- Valoarea avansului în cazul limitatorului micrometric (raportat la diametru)... 0,001 mm

## e) Rectificarea interioară

- Lungimea maximă de rectificare pentru diferite distanțe între vîrfuri  $\frac{280}{630}$   $\frac{500}{1000}$   $\frac{500}{1500}$   $\frac{500}{2000}$  mm
- Dimensiunile locașului port-brogă din brațul de rectificare interioară (diametrul x lungimea) ..... 80 x 160 mm

## f) Motoare

- Pentru antrenarea discului de rectificare.....	5,5 Kw
- Pentru antrenarea piesei .....	1,1 Kw
- Pentru antrenarea pompei de ulei .....	1,5 Kw
- Pentru antrenarea pompei de răcire .....	0,37 Kw
- Pentru antrenarea broșei de rectificat interior .....	1,47 Kw
- Puterea totală instalată a mașinii .....	9,94 Kw

## g) Greutatea

- Greutatea netă a mașinii pentru diferite distanțe între vîrfuri (cu accesorii normale) - Kgf....	4200	4550	5000	5400
	630	1000	1500	2000

## h) Dimensiuni de gabarit

- Lungimea.....	$\frac{630}{2234}$	$\frac{1000}{2984}$	$\frac{1500}{4178}$	$\frac{2000}{4974}$ mm
- Gabarit de funcționare în lungime .....	3504	4442	5028	6080
- Lățimea .....	1880	1880	1880	1880
- Înălțimea .....	1880	1880	1880	1880
Înălțimea vîrfurilor .....	175 mm			

#### 4.1.1. Determinarea rigidității subsansamblelor principale ale mașinii de rectificat RU-350

S-au determinat rigiditățile arborelui pietrei de rectificat (APR), ale arborelui port piesă (APP) și pinolei păpușii mobile (PPM) - pentru piesa fixată între vîrfuri.

În acest scop s-au aplicat forțe cunoscute, măsurîndu-se deformațiile corespunzătoare. Forțele s-au aplicat prin intermediul unui dispozitiv cu șurub montat în dispozitivul de corectare a pietrei și s-au măsurat cu un traductor de forță Hottinger și un tenso-metru Hottinger cu șase canale. Deformațiile s-au măsurat cu comparatoare cu cadran cu valoarea diviziunii scării de 0,001 mm (RDG).

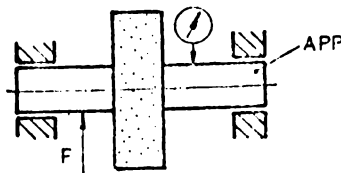


FIG. 4.2

Schemele de aplicare a forței și de măsurare a deformațiilor sînt prezentate în fig.4.2 și fig.4.3.



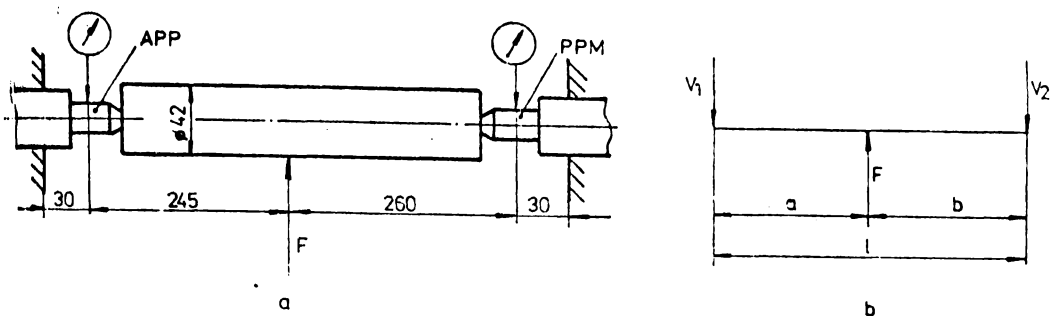


FIG. 4.3

În tabelele 4.1 și 4.2 se prezintă datele experimentale privind determinarea rigidității subansamblurilor menționate.

Pentru traductorul de forță, Hottinger  $4000 \mu D \approx 500 \text{ Kgf}$   
 $= 4900 \text{ N}$  ( $1 \mu D \approx 1,225 \text{ N}$ )

Tabelul nr.4.1

Determinarea rigidității arborelui port-piatră  
 (APR)

Nr. crt.	F		Deformația $\mu m$	Rigiditatea $N/\mu m$
	$\mu D$	N		
1	240	294	3	98
2	250	306	3	102
3	280	343	4	86
4	320	392	5	78
			media	91

Tabelul nr.4.2

Determinarea rigidității arborelui port piesă (APP)  
și pinolei păpușii mobile (PPM)

Nr. crt.	F		V <sub>1</sub> N	V <sub>2</sub> N	Deformația, Rigiditate,				Observații
	μD	N			μm		N/μm		
					APP	PPM	APP	PPM	
1	30	37	18,2	18,6	0	2	-	9,3	Încărcare
2	46	56	27,8	28,5	1	3	27,8	9,5	"
3	100	122,5	60,5	62	2	5	30,25	12,4	"
4	130	159	78,7	80,6	3	6	26,86	13,4	"
5	170	208	103	105,4	4	7	25,75	15,1	"
6	180	220,5	109	111,6	5	8	21,8	14,0	"
7	210	257	127	130,2	6	9	21,2	14,5	"
8	230	282	139,2	142,6	8	10	17,4	14,3	"
9	250	306	151,2	155	8	10	18,9	15,5	"
10	270	331	163,4	167,4	9	11	18,2	15,2	"
11	280	343	169,4	173,6	9	11	18,2	15,8	"
12	290	355	175,5	180	10	12	17,5	15	"
13	300	367,5	181,5	186	11	13	16,5	14,3	"
14	320	392	193,6	198,4	12	14	16,1	14,1	"
15	340	416,5	205,8	210,8	13	15	15,8	14	"
16	350	429	211,8	217	14	16	15,1	13,6	"
17	400	490	242	248	17	17	14,2	14,6	"
18	430	526	260,2	266,5	18	19	14,4	14	"
19	450	550	271,7	278,3	20	22	13,6	12,6	"
20	0	0	0	0	3	4	-	-	Descărcare
Valoare medie							19,45	13,74	

Forțele V<sub>1</sub> și V<sub>2</sub> - reacțiuni - s-au calculat cu relația din Rezistența materialelor. Pentru fig. 4.3.

$$V_1 = F \left[ \frac{b}{l} + \frac{ab(b-a)}{l^3} \right] = F \left[ \frac{280}{565} + \frac{285 \cdot 280 (280-285)}{565^3} \right] = 0,494 F$$

$$V_2 = F \left[ \frac{a}{l} - \frac{ab(b-a)}{l^3} \right] = F \left[ \frac{285}{565} - \frac{285 \cdot 280 (280-285)}{565^3} \right] = 0,506 F$$

Se apreciază că rigiditatea subansamblelor principale ale mașinii de rectificat RU-350 este bună.

Determinările rigidității ca și experimentările s-au efectuat după controlul pretensionării la arborele ppușii port-piesă, care a fost găsită normală. Mașina a fost în regim termic stabil de funcționare.

## 4.2. Aparatură folosită

### 4.2.1. Rugozimetrul Hommel - Tester tip T

(produs de firma Hommelwerke Mannheim - K&Fertal RFG)

Rugozimetrul lucrează pe principiul modulării frecvenței purtătoare cu ajutorul unui palpator inductiv și elaborează electronic criteriile  $R_a$ ,  $R_y$  ( $R_t$  la aparat),  $R_p$  și  $R_t$  (valoarea instantanee a rugozității). Diferitele valori sînt elaborate în cursul unui singur ciclu de măsurare și memorate, cu excepția lui  $R_t$ . După terminarea ciclului de măsurare diferitele valori pot fi afișate succesiv pe aparatele indicatoare ale unității de integrare cu ajutorul unui selector.

Aparatul a fost realizat pe principiul construcției modulare pentru a se obține o universalitate de folosire, redată în fig.4.4. Vederea exterioară a aparatului se prezintă în fig. 4.5.

Unitatea de integrare are încorporate filtre trece-sus și trece-jos. Prin selectarea corespunzătoare a cut-off (lungimea de undă limită a filtrului electric egală cu valoarea numerică a lungimii de bază și considerată ca limită de separare convențională a componentelor transmise de cele atenuate ale profilului efectiv), se obțin măsurări și înregistrări de calitate ale rugozității suprafețelor.

Aparatul are trei valori diferite pentru cut-off pe cursă, redată în tabelul nr.4.3.

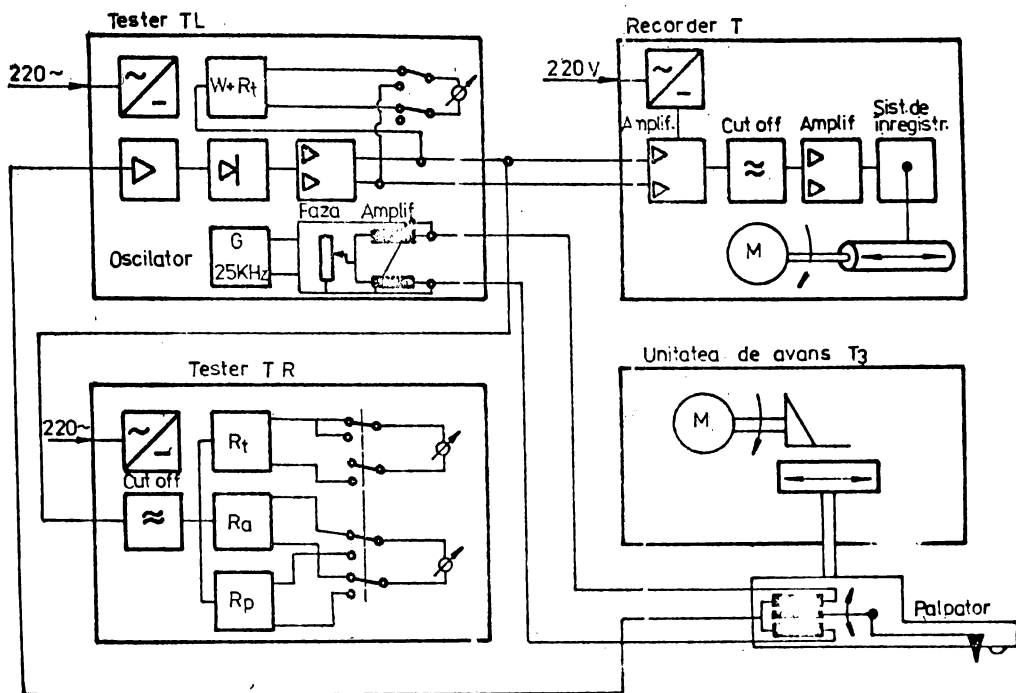


FIG. 4.4

Schema bloc a rugoimetrlui Hommel Tester T

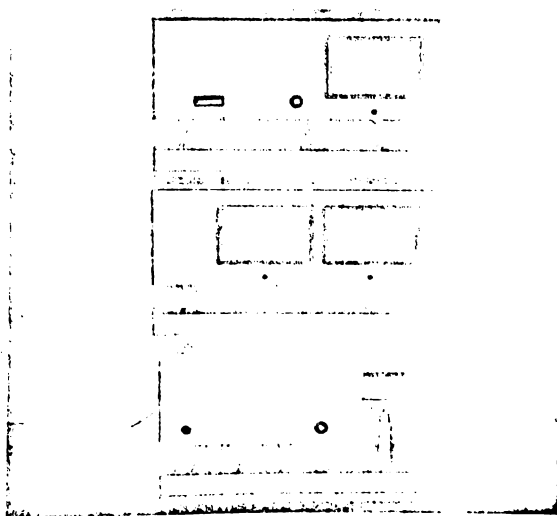


Fig.4.5

Tabelul nr.4.3

Cursa de palpator (mm)	Durata de palpate (s)	Cut-off (mm)				Măsurarea orizontală	
		X	Y	Z	W	A	B
0,63	25	0,025	0,075	0,25	0,075	300:1	1000:1
2	25	0,075	0,25	0,75	0,25	100:1	300:1
6,3	25	0,25	0,75	2,5	0,75	30:1	100:1
20	25	0,75	2,5	7,5	2,5	10:1	30:1

Unitatea de măsurare, Hommel - Tester TL, este un amplificator al frecvenței purtătoare modulate cu o punte de intrare inductivă.

Unitatea de integrare, Hommel - Tester TR, se poate racorda la unitatea de măsurare și ansamblul constituie un aparat pentru măsurarea rugozității, permițând să se obțină valori numerice ale parametrilor  $R_a$ ,  $R_y$  ( $R_t$ ),  $R_p$  și  $R_t \sim$ , afișate succesiv pe aparatele indicatoare ale unității de integrare.

Unitatea de înregistrare Hommel - Recorder T poate fi racordată la unitatea de măsurare, fiind un înregistrator rapid care înregistrează fără atenuare frecvențe pînă la 80 Hz. În corelație cu unitatea de măsurare permite înregistrarea abaterilor dimensionale. Racordat la combinația unitate de măsurare - unitate de integrare furnizează o diagramă a suprafeței explorate de către palpator. Punând în circuit diferite filtre încorporate în unitatea de înregistrare se poate înregistra rugozitatea, undulațiile sau rugozitatea și undulațiile.

Ținînd seama de amplificarea orizontală se poate citi pe diagramă pasul rugozității profilului.

La interpretarea diagramei trebuie ținut seama de "comprimarea" profilului, rezultă din amplificările diferite pe orizontală și pe verticală. Amplificarea pe verticală se ia mai mare decît amplificarea pe orizontală din motive de economie, astfel că apare comprimarea profilului în raportul

$$C = \frac{M_v}{M_h}$$

unde  $M_v$  - amplificarea pe verticală

$M_h$  - amplificarea pe orizontală

Comprimarea profilului face să apară unghiuri de deschidere foarte ascuțite, deși în realitate aceste unghiuri au valori mai mari de  $120^{\circ}$ .

Unitatea de avans,  $T_3$ , are rolul de a deplasa palpatorul în direcție liniară și cu viteză constantă pe o distanță prereglată. Unitatea de avans este montată pe un suport cu ghidaje, putând fi reglată la înălțimea potrivită.

Echipamentul de bază al aparatului cuprinde mai multe tipuri de palpatoare. Palpatoarele cu vîrf de diamant conic la  $60^{\circ}$ , cu raza vîrfului de 5 sau  $10\mu\text{m}$ .

Domeniul de măsurare al aparatului este cuprins între  $0,025 \dots 40\mu\text{m}$  pentru  $R_a$  și  $0,1 \dots 100\mu\text{m}$  pentru  $R_y$ .

#### 4.2.2. Aparate pentru măsurarea vibrațiilor subansamblelor mașinii de rectificat RU-350

S-au măsurat vibrațiile proprii ale subansamblelor principale ale mașinii de rectificat și s-a studiat influența vibrațiilor asupra preciziei geometrice ale pieselor rectificate. S-au folosit următoarele aparate (fig. 4.6 a și b).



Fig. 4.6 b

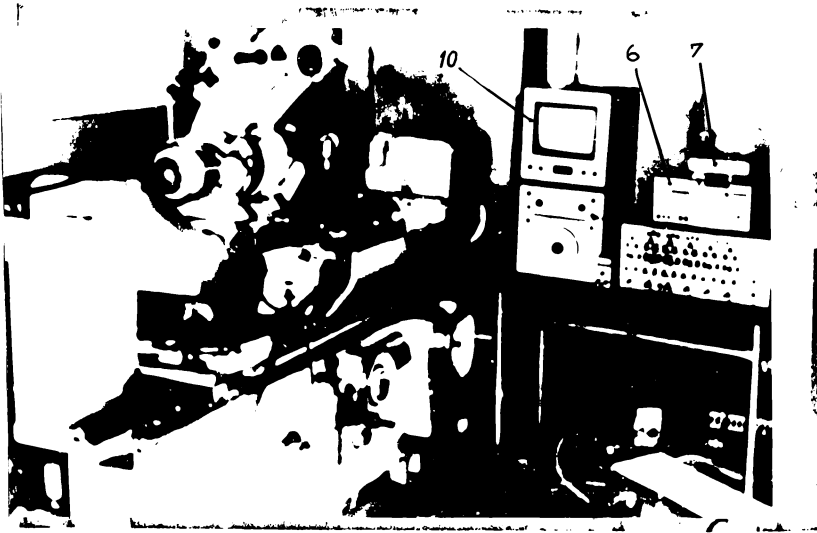


Fig. 4.6 a

1) Aparat de măsurat vibrații SM 231 (RDG). Aparatul a servit pentru controlul nivelului de vibrații al subansamblelor mașinii, piesei și generatorului electrodinamic, având posibilitatea vizualizării pe osciloscop a oscilațiilor. Aparatul are trei canale și poate măsura accelerații -  $m/s^2$  - viteze -  $m/s$  și deplasări -  $mm$ . Caracteristicile principale ale aparatului sînt:

- Domeniul de frecvență: 2 Hz ... 15 Kz
- Domeniul de măsură:
  - accelerații  $5 \cdot 10^{-3} \dots 3200 m/s^2$
  - viteze  $4 \cdot 10^{-4} \dots 3,2 m/s$
  - deplasări  $2 \cdot 10^{-3} \dots 1000 mm$
- Precizia de indicare:  $\pm 4 \%$  (pentru măriri sinusoidale)
- Posibilitățile de măsurare a valorii efective sau a valorii de vîrf la toate mărimea măsurate
- Curent de ieșire pentru înregistrator: 5 mA ( $R_e \leq 5 \Omega$ )
- Unitatea de măsurare: SM40 cu ac indicator
- Unitatea de vizualizare: SM50 cu osciloscop
- Alimentare: 220 V; 50 Hz

2) Generator de semnale sinusoidale - tip 2012 (RDG)

Este un generator sinusoidal cu tuburi care pilotează gene-

ratorul electrodinamic de vibrații. Are caracteristicile:

- Domeniul de frecvență: 0,1 ... 1000 Hz, cu reglaj în trepte de 0,1 Hz, 1 Hz, 10 Hz, 100 Hz.
- Tensiunea maximă de ieșire: 10 V (reglaj continuu)
- Curentul maxim de ieșire: 0,5 A
- Alimentare: 220 V; 50 Hz.

### 3) Amplificator de semnale electrice tip LV - 102 (RDG)

Este un amplificator de putere folosit la amplificarea semnalelor electrice provenite de la generatorul sinusoidal.

Are următoarele caracteristici principale:

- Puterea maximă: 50 W
- Domeniul de frecvență: 3 Hz - 20 KHz
- Tensiunea maximă de ieșire: 15 V
- Reglaj continuu al tensiunii de ieșire
- Alimentare: 220 V, 50 Hz

### 4) Generator electrodinamic de vibrații - tip ESE 201 (RDG)

Aparatul este folosit la generarea vibrațiilor mecanice:

Pentru piese cu masă mare se pot genera vibrații prin forțele de reacție la vibrația cilindrului mobil al generatorului.

Mărimea forței ce produce oscilația se calculează cu formula:

$$F_{osc} = m_0 \cdot a \quad (4.1)$$

unde:  $m_0$  - este masa cilindrului mobil, Kg;

iar  $a$  - accelerația cilindrului mobil,  $m/s^2$ .

Amplitudinea oscilației cilindrului mobil se poate calcula cu formula:

$$y_0 = (2\tilde{\nu})^{-2} \cdot a \quad , [m] \quad (4.2)$$

unde:  $\tilde{\nu}$  - este frecvența oscilației.

Amplitudinea de oscilație a piesei depinde de rigiditatea ei.

Caracteristicile principale ale aparatului sînt:

- Amplitudinea maximă a cilindrului mobil
  - la funcționare orizontală  $\pm 4,5$  mm
  - la funcționare verticală  $\pm 3$  mm
- Valoarea accelerației maxime a cilindrului mobil
  - la  $\tilde{\nu} = 50$  Hz :  $a_{max} = 115 m/s^2$ .
- Forța maximă de împingere a cilindrului mobil:  $F_{max} = 75$  N



- Frecvența proprie a sistemului oscilant:  $\nu_p = 13 \text{ Hz}$
- Domeniul de frecvență: 5 - 2000 Hz (comportare liniară)
- Masa sistemului oscilant (cilindru) : 610 g
- Masa adițională admisibilă:
  - funcționare orizontală: 1,5 Kg
  - funcționare verticală: 0,3 Kg
- Masa totală : 28 Kg

5) Acțelerometru - tip KD35 (RDG). Este un acțelerometru piezoelectric, folosit la controlul vibrației cilindrului mobil al generatorului de vibrații:

- Sensibilitate:  $4,9 \text{ mV/ms}^{-2}$
- Frecvența de rezonanță: 20 KHz
- Domeniul linier de frecvență: 5 ... 4500 Hz
- Precizia: 5 %
- Masa: 28 g
- Domeniul de temperatură:  $-50^{\circ}\text{C} \dots +60^{\circ}\text{C}$

Schema bloc a montajului de generare a vibrațiilor se prezintă în fig. 4.7.

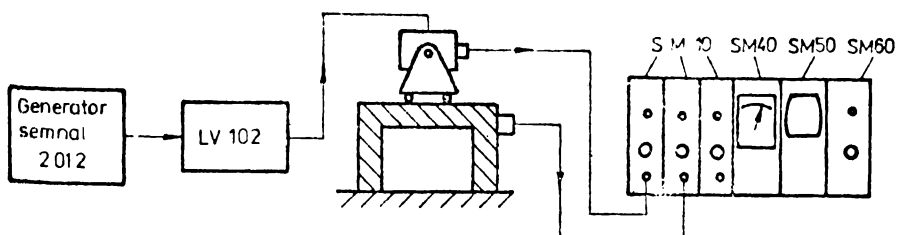


FIG. 4.7

#### 6) Oscilograf - tip 8LS-1 (RDG)

S-a folosit pentru înregistrarea semnalelor de vibrații, sau a celor date de tensometru. Caracteristicile principale ale aparatului sînt:

- Numărul canalelor: 8
- Lățimea hîrtiei : 120 mm
- Viteza hîrtiei, mm/s : 0,3; 3; 10; 100; 1000
- Baza de timp, s : 0,01; 0,1; 1; 10
- Tipul hîrtiei folosite: AGFA-GEVAERT - 120 mm/30,5 m
- Alimentare: 220 V, 50 Hz

7) Adaptor - tip AS-101 (RDG)

S-a folosit pentru adaptarea rezistenței interne a buclei cu atenuatorului și tensometrului.

8) Atenuator de semnal - tip 8MW-1 (RDG), servește la atenuarea semnalului provenit de la tensometru.

9) Tensometru electronic - tip N2302 (RSR), are următoarele caracteristici principale:

- Număr de canale : 6
- Frecvența purtătoare: 5 KHz
- Domeniul de măsură: 0 ... 100.000  $\mu\text{m/m}$
- Tensiunea de ieșire:  $\pm 4$  Vcc
- Precizia de măsurare: 1,5%
- Alimentare: 220 V, 50 Hz

Schema bloc pentru măsurarea și înregistrarea semnalelor tensometrice în regim dinamic este prezentată în fig. 4.8 .

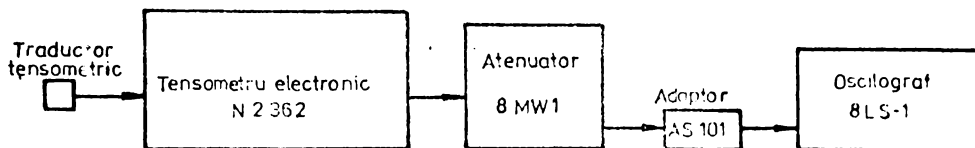


FIG. 4.8

10) Analizor în timp real 1/3 octavă - tip 3347

(Bruel și Kjaer, Danemarca)

Acest aparat execută analiza în frecvență a semnalelor electrice. Caracteristicile principale ale aparatului sînt:

- Domeniul de frecvență: 25 Hz ... 20 KHz
- Lățimea filtrelor trece-bandă: 1/3 octavă față de frecvența centrală
- Numărul canalelor analizate: 20
- Domeniul dinamic pe ecran: 10 dB; 25 dB; 50 dB
- Indicarea nivelului: pe instrument sau digital
- Timp de memorizare: 2 minute
- Timp de integrare: stohastic rapid și încet
- Rezistența de intrare: 1M $\Omega$

- Alimentare : 220 V, 50 Hz

11) Amplificator de sarcină - tip 2635 (Bruel și Kjaer, Danemarca). Acest aparat amplifică semnalul electric provenit de la acclerometru și are caracteristicile:

- Numărul canalelor: 1
- Domeniul de frecvență - pentru accelerații: 0,2 Hz ... 100 KHz
  - pentru viteze: 1 Hz...10 KHz
  - pentru deplasări: 1 Hz... 1 KHz
- Tensiunea de ieșire: max 8 V (valoare de vîrf)
- Zgomotul intern:  $10\mu\text{V}$  între 2 Hz și 300 KHz
- Alimentare: baterii 3 x 1,5 V

Tot lanțul de măsurat vibrații a fost etalonat cu un calibrator pentru vibrații tip 4291 Bruel și Kjaer. Semnalul etalon a avut următoarele caracteristici: -  $9,81 \text{ m/s}^2$  valoare de vîrf  
- 79,6 Hz

Alimentarea s-a făcut cu baterii 4 x 1,5 V.

Schema bloc pentru analiza și/sau înregistrarea semnalelor de vibrații se prezintă în fig. 4.9

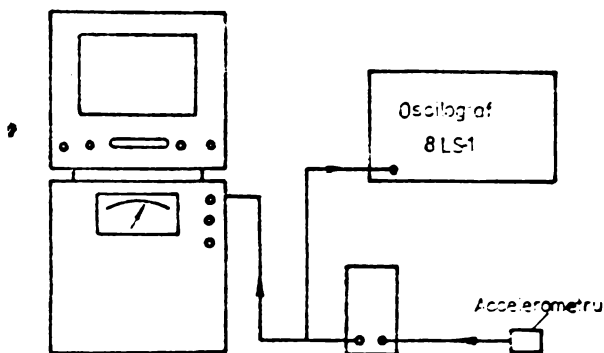


FIG. 4.9

#### 4.2.3. Vîrf tensometric rezistiv pentru măsurarea componentelor forței de aşchiere la rectificarea cilindrică

Cercetările efectuate în lucrarea de față au necesitat măsurarea forțelor de aşchiere la rectificarea diferitelor probe, în vederea evidențierii influenței condițiilor de prelucrare asupra mărimii acestora.

În acest scop s-au proiectat și executat două vîrfuri dinamometrice echipate cu traductoare tensometrice rezistive.

### Principiul și construcția vîrfurilor dinamometrice

Cele două componente ale forței de archiere la rectificarea cilindrică exterioară - tangențială,  $F_t$  și normală,  $F_n$  sînt reprezentate în fig.4.10. Aceste componente sînt preluate de traductoarele tensometrice rezistive  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7$  și  $T_8$ , lipite pe două direcții reciproc perpendiculare pe cele două vîrfuri de centrare fixe de susținere a piesei.

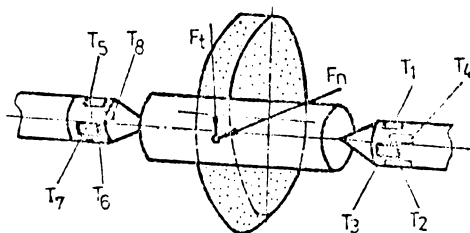


FIG. 4.10

S-au folosit traductoare de tip rezistiv 3/120 LAll-Hottinger Baldwin. Lipirea s-a făcut conform prescripțiilor furnizorului. Schema de conectare a traductoarelor este redată în fig. 4.11 a și b. Acest mod de conectare elimină influența poziției forțelor  $F_t$  și  $F_n$ , aspect confirmat prin măsurătorile efectuate (v.fig.4.16).

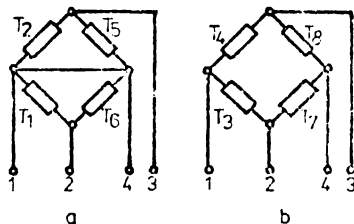


FIG. 4.11

În fig.4.12 este redată construcția vîrfurilor dinamometrice. Capacele 2 și garniturile 3, 4 împiedică pătrunderea lichidului de răcire-ungere la traductoarele tensometrice rezistive.

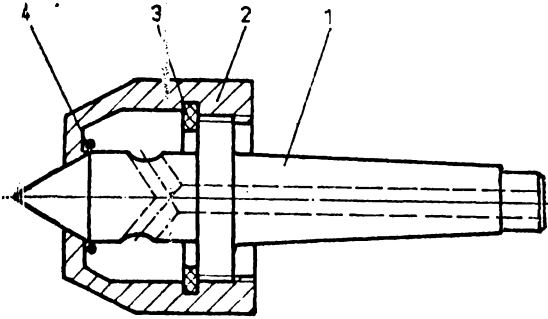


FIG. 4.12

7 - păpușa mobilă, 8 - canalul pentru cablu, 9 - cablul spre puntea de măsurare (tip N2302), 10 - apărătoare, 11 - vîrf de centrare dinamometric.

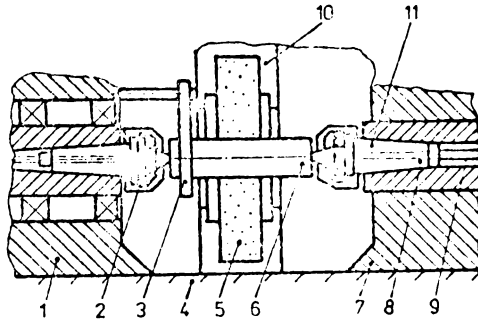


FIG. 4.13

### Etalonarea

Etalonarea vîrfurilor dinamometrice s-a făcut stativ, prin încărcarea acestora cu sarcini cunoscute, dispuse la diferite distanțe. Incărcarea s-a făcut succesiv pentru  $F_t$  și  $F_n$ . Deformațiile

au fost măsurate cu cîte un tensometru cu un canal N2301. S-au efectuat zece cicluri de încărcare-descărcare, fiecare punct pentru trasarea diagramei de etalonare fiind astfel media aritmetică a zece măsurători. Diagramele de etalonare rezultate sînt reprezentate în fig.4.14 ( $F_t-\epsilon$ ) și fig.4.15 ( $F_n-\epsilon$ ). Rezultatele prezentate în fig.4.16 confirmă faptul că poziția sarcinii de

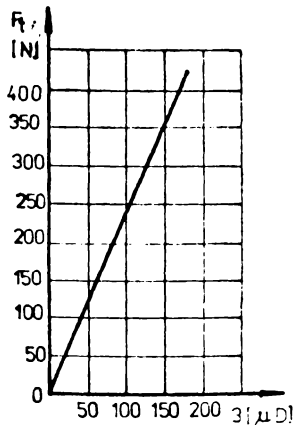


FIG. 4.14

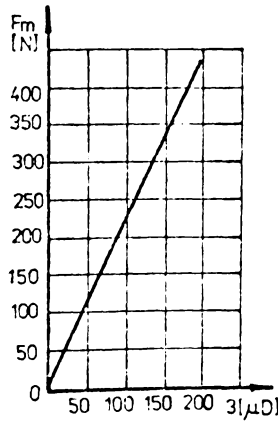


FIG. 4.15

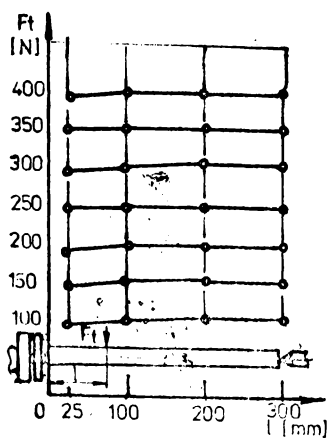


FIG. 4.16

încărcare pe dorn nu influențează, practic, valoarea deformației.

Încercările dinamice, în sarcină, ale vîrfurilor dinamometrice s-au făcut rectificînd cilindric exterior arbori netezi din oțeluri de largă utilizare și speciale, folosind regimuri de rectificare și discuri de rectificat diferite. S-a folosit un tenometru cu șase canale tip M2302 (RSR). Înregistrările s-au făcut folosind un oscilograf tip SLS-1 (RDG). Experimentările și prelucrarea acestora se prezintă în capitolul 5.

#### 4.2.4. Complet de control activ pentru suprafețe cilindrice continue, tip CAS (EI) C-2E (RSR)

Completul este fabricat la I.M.F. București și reprezintă un ansamblu compus dintr-un bloc electronic pentru control activ tip MOE-X și un cap electronic de măsurare pentru suprafețe cilindrice continue CONTIN-2E simbol IC-2E fiind destinat controlului dimensiunilor pieselor în timpul rectificării pe mașini de rectificat universale sau specializate (RU, RE, RI) pentru care parametrii principali sînt conform STAS 9242-80 și STAS 9243-80.

Completul pentru control activ, reprezentat în fig.4.17 poate îndeplini următoarele funcțiuni:

- controlează și măsoară abaterile dimensionale și de formă de la cota nominală sau cota reglată, pentru piese cilindrice fără discontinuități;
- semnalizează optic cu ajutorul unor lămpi de culori diferite atingerea sau depășirea unor limite dimensionale prestabilite;
- transmite semnale pentru comanda ciclului tehnologic de lucru al mașinii-unelte, corespunzător cu limitele de dimensionare prestabilite.

Pentru îndeplinirea acestor funcțiuni este necesar ca mașinile unelte să fie prevăzute cu mufe de comandă pentru automatizarea ciclului de lucru.

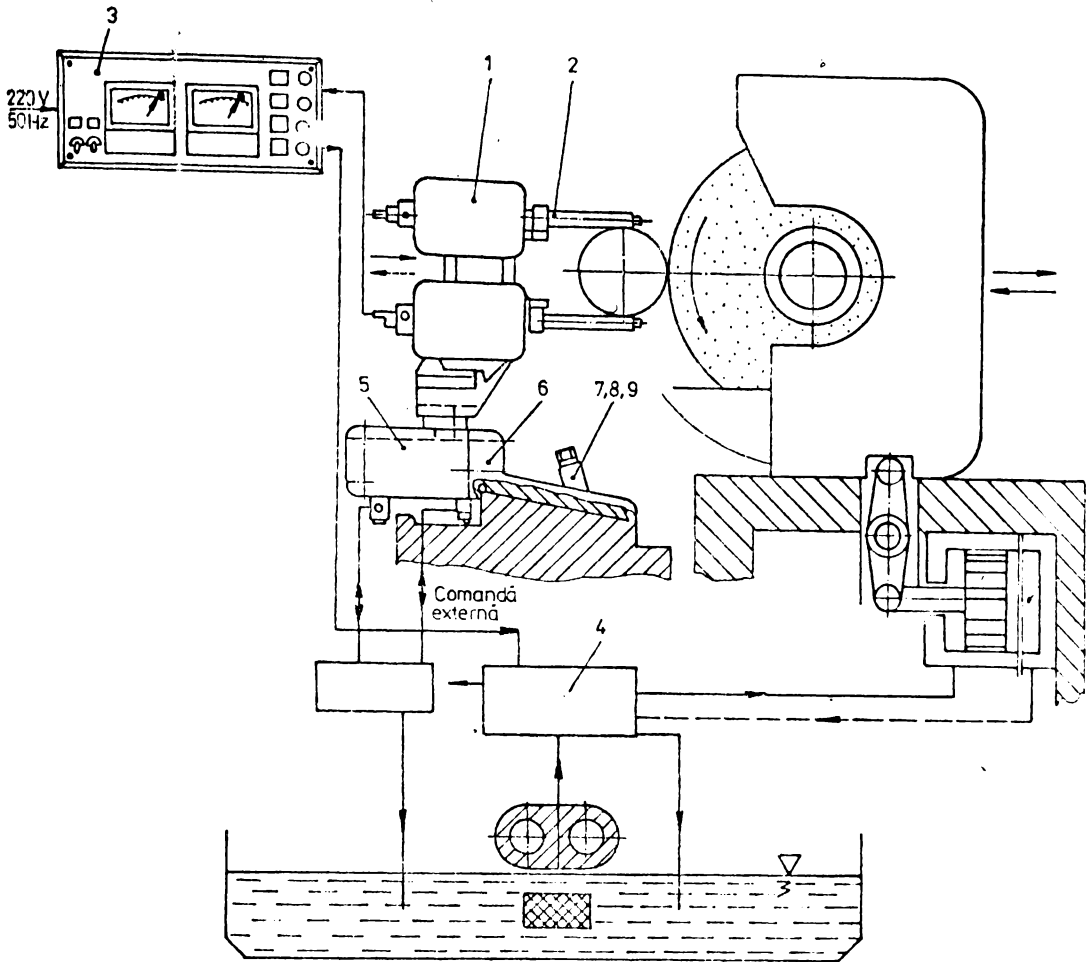


FIG. 4.17

- |  |                            |
|--|----------------------------|
| 1. Cap de măsurare electronic tip CONTIN 2E          | 5. Cilindru hidraulic      |
| 2. Brațe de palpăre                                  | 6. Talpa de fixare         |
| 3. Bloc electronic tip MCE -X                        | 7. Șurub special de fixare |
| 4. Relee de comandă ale mașinii de rectificat RU 350 | 8. Șaibă de siguranță      |
|  | 9. Piulița M14             |

Modul de funcționare al completului este următorul. Operațiile de măsurare se realizează prin contactul mecanic cu suprafața măsurată. Variațiile dimensionale, față de o piesă etalon sau de reglare, sînt transformate în variații de inductanță de către un transductor inductiv diferențial de deplasare, compus dintr-un sistem de două bobine în interiorul cărora se deplasează un miez de ferită. Variațiile inductanței sistemului de bobină sînt preluate de către un bloc electronic tip MLE-X. Intrucît bobinele formează o jumătate de punte Wheastone, deplasarea miezului de ferită în câmpul siste-

mului de bobine atrage după sine creșterea reluctanței unei bobine și, respectiv, scăderea reluctanței celeilalte bobine.

Capul electronic de măsurare este astfel construit încît tensiunea de dezechilibrare a punții să fie direct proporțională cu mărimea deplasării miezului de ferită și deci cu abaterea față de dimensiunea prestabilită.

Semnalul de dezechilibru al punții este amplificat și detectat sincron de către două blocuri amplificator-detector, corespunzător celor două scări afișate: brut și fin. Tensiunile continue de la ieșirile detectorilor prin comparație cu tensiuni din exterior, prescrise, generează cele 1-4 semnale de comandă. Comenzile sînt transmise mașinii-unelte prin relee și semnalizate lumines pe panou.

Pentru efectuarea operațiilor de măsurare, capul electronic de măsurare este adus automat în poziție de lucru, adică în situație de a prelua abaterile dimensionale prin intermediul unui cilindru hidraulic de acționare comandat corespunzător ciclului tehnologic al mașinii-unelte.

Caracteristicile tehnice principale ale completului sînt:

- Gama de diametre măsurate, varianta CASEC-2E 6...120 mm
- Intervalul de măsurare, degroșare: 0,500 mm
- finisare: 0,050 mm
- Valoarea dimensiunii instrumentului indicator,
  - degroșare: 0,010 mm
  - finisare: 0,001 mm
- Stabilitatea declanșării semnalelor de comandă
  - timp de două ore de funcționare,
    - degroșare:  $\pm 0,00015$  mm  $\pm 0,1$  %
    - finisare:  $\pm 0,00015$  mm  $\pm 0,05$  %
- din valoarea indicației de declanșare prestabilită
- Afișare analogică cu două instrumente cu indicatori
  - interval de degroșare: -0,100...+0,400 mm
  - interval de finisare: -0,010...+0,040 mm
- Numărul de semnale de comandă: minim 1, maxim 4
- Interval de temporizare: 0...50 secunde sau 0...5 minute
- Timpul de răspuns la instalarea semnalului de comandă 50 ms, indiferent de inerția instrumentului indicator
- Plașa de echilibrare rezistivă: minim 0,060  $\mu$ m



- Deriva de zero în timp de două ore: max  $\pm 0,00025$  mm  
 $\pm 0,05\%$  din capacitatea de măsurare
- Forța de măsurare pe palpator:  $140 \pm 15$  CN
- Cursa de îndepărtare pe palpator:  $0,5 \pm 0,15$  mm
- Palpatoare de măsurare: carbură metalică
- Prinderea pe mașină-unealtă:
  - capul de măsurare UC-2E pe masa mașinii-unealtă, cu unul din cilindrii de acționare CA-1, CA-2;
  - blocul electronic MLE-X pe un suport special
- Alimentare: - rețea electrică 220V  $\pm 10\%$ ; 50Hz-15%
  - instalația hidraulică: minim 8 bari  
maxim 12 bari
- Puterea electrică consumată: maxim 40 VA
- Umiditatea relativă a mediului ambiant: 85% maxim
- Temperatura de lucru:  $10^{\circ} \dots 40^{\circ} \text{C}$

#### 4.2.5. Trusă wattmetrică - tip QN11 (R.S.Cehoslovacă)

Trusa wattmetrică este o instalație de măsură complexă, care reunește aparatele necesare efectuării de măsurători asupra principalilor parametri ai energiei electrice, atât în sistem monofazat cât și trifazat - cu trei conductoare (echilibrate) și cu patru conductoare (neechilibrate).

Trusa permite măsurarea următoarelor mărimi:

- Tensiunea între faze și între faza R și nul pe următoarele domenii:
 

I 0-110 V	III 0-440 V
II 0-220 V	IV 0-550 V
- Curentul pe cele trei faze pe următoarele domenii:
 

I 0-5 A	III 0-25 A	V 0-100 A
II 0-10 A	IV 0-50 A	

- Puterea pe douăzeci de domenii corespunzătoare combinațiilor posibile între domeniile de tensiune și de curent. Puterea activă maximă care se poate măsura direct este de 100 Kw.

- Puterea reactivă în sisteme trifazate echilibrate și neechilibrate pe douăzeci de domenii corespunzătoare combinațiilor posibile între domeniile de tensiune și de curent. Puterea reactivă maximă care se poate măsura direct este de 100 KVA .

Trusa poate fi folosită și pentru măsurători de tensiuni și curenți mai mari decât valorile maxime date mai sus, cu condiția utilizării de transformatoare de măsură corespunzătoare.

Indicațiile aparatelor, în acest caz, se vor înmulți cu constantele transformatoarelor de măsură conectate.

Trusa semnalizează succesiunea corectă a fazelor prin aprinderea unei lămpi miniatură cu neon.

Aparatele de măsură cu care este dotată trusa au clasa de precizie 1.

#### 4.3. Mărimi de măsurat

În prezenta lucrare s-au măsurat următoarele mărimi:

##### 4.3.1. Abaterile geometrice ale suprafeței rectificate:

- Parametrii undulației:  $W_l$  - adâncimea maximă a undulației longitudinale;  $W_t$  - adâncimea maximă a undulației transversale;  $S_{Wl}$ ,  $S_{Wt}$  - pasul undulației longitudinale, respectiv transversale;  $R_y$  - adâncimea totală a rugozității;  $R_a$  - abaterea medie aritmetică a rugozității;  $S$  - pasul mediu al proeminențelor locale ale profilului. Acești parametri pot fi măsurați cu profilometrul-profilograf Hommel-Tester.

4.3.2. Amplitudinea,  $a$ , și frecvența  $\nu$ , vibrațiilor proprii ale subansamblului mașinii de rectificat s-au determinat cu aparatele menționate la punctul 4.2.2.

4.3.3. Forțele de aşchiere - componenta normală  $F_n$  și tangențială  $F_t$  s-au măsurat cu ajutorul vîrfurilor tensometrice rezistive prezentate la punctul 4.2.3.

4.3.4. Puterea consumată la rectificare s-a măsurat cu trusa wattmetrică QN11 prezentată la punctul 4.2.5.

4.3.5. Duritățile epruvetelor s-au măsurat cu aparat Brinell și Rockwell.

4.3.6. Microduritatea s-a măsurat cu microdurimetrul PMT-3 (URSS); structura și microstructura epruvetelor s-au studiat la microscopul metalografic.

## Capitolul 5

### EXPERIMENTARI. PRELUCRAREA DATELOR EXPERIMENTALE

#### 5.1 Date generale

Cercetările experimentale din prezenta lucrare s-au efectuat la rectificarea cilindrică exterioară cu avans longitudinal și avans de pătrundere a unor arbori cilindrici de diametre  $\varnothing 40 - \varnothing 80$  mm și lungimi  $l = 200 - 300$  mm, din oțeluri de largă utilizare: OL60 ; OLC45 (normalizat și îmbunătățit) OLC60 (normalizat și îmbunătățit), OSC10 călit la HRC 62...64, Rp3 călit la HRC 63...65, 40G10 călit la HRC 42-46, Rul 1 și Rul 2 călit la HRC 52-60, precum și oțelului inoxidabil, rezistent la cavitație To9CuMoMnNiCr185-Ti utilizat la fabricația unor piese componente ale turbinelor hidraulice la ICM-Reșița (rotoare turnate monobloc pentru turbine de tip Francis, palete rotor, ș.a.).

Rectificarea s-a realizat pe mașina de rectificat cilindric RU-350, prezentată în capitolul 4.1. Rigiditatea arborelui port piatră a fost de  $91\text{N}/\mu\text{m}$ , iar rigiditatea arborelui port piatră de  $19,5\text{N}/\mu\text{m}$ . Amplitudinea vibrațiilor puse în mișcare de port-piatră a fost de  $1,5 - 1,75\mu\text{m}$  în gol și  $1,6 - 2\mu\text{m}$  în regim de lucru (v. fig. 5.1 a și b).

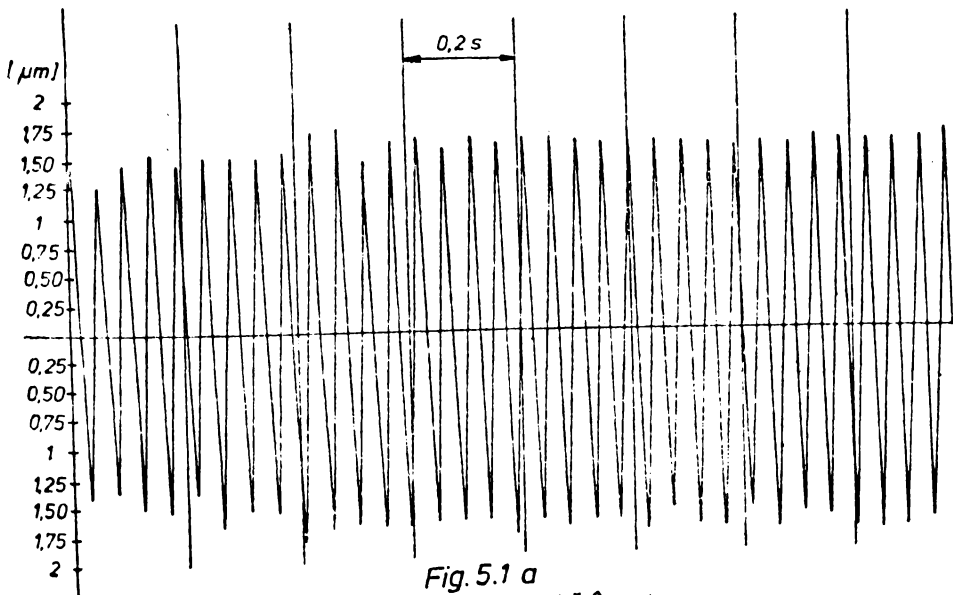


Fig. 5.1 a

Amplitudinea vibrațiilor arborelui port-piatră în gol.

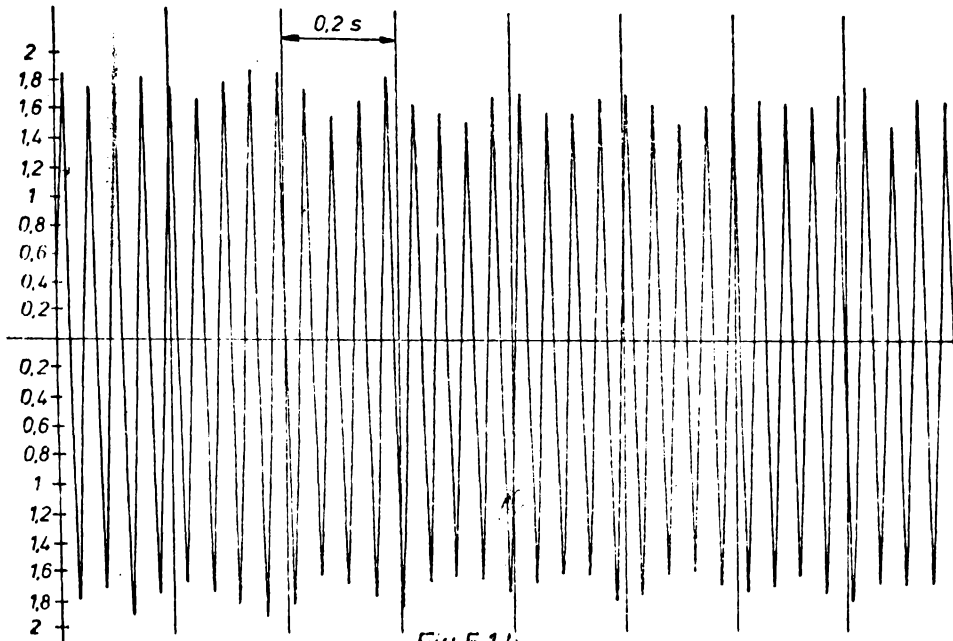


Fig. 5.1 b

Amplitudinea vibrațiilor arborelui port-piatră la rectificare

Amplitudinea vibrațiilor s-a determinat pentru toate regiunile de rectificare.

Mașina a fost în regim termic stabil de funcționare.

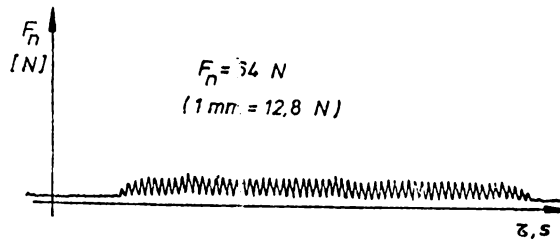
Pe tot parcursul experimentărilor s-au înregistrat continuu valoarea forțelor de aşchiere ( $F_n$  și  $F_t$ ) și puterea consumată pentru aşchiere ( $P_{totală} - P_{gol}$ ).

Sculele de rectificare utilizate au fost discuri cilindrice plane  $\varnothing 500 \times 203 \times 80$  mm din electrocorindon normal și superior, cu granulația 40 - 16, duritate J, K, L, structura 6 - 8, cu liant ceramic; sculele au fost echilibrate static îngrijit; ascuțirea și netezirea sculelor s-a făcut cu creion cu vîrf din diamant.

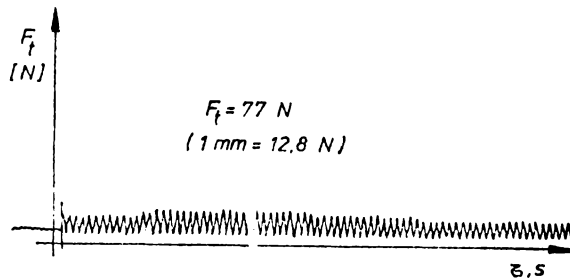
S-a rectificat uscat și cu răcire, LRU fiind soluție 5% de emulsol în apă.

Pe tot parcursul experimentărilor s-a măsurat continuu și înregistrat valoarea forțelor de aşchiere ( $F_n$  și  $F_t$ ); piesele au fost fixate între vîrfuri tensometrice (v. cap. 4.2.3) iar valoarea forțelor a fost citită direct la tensometrul electronic tip K2302,

sau înregistrat pe hîrtie fotosensibilă la oscilograful tip 8LS-1 (v.cap.4.2).



Valoarea forței  $F_v$ , la rectificarea cu disc En40K6C și regimul  $v_s = 32$  m/s;  $v_p = 20$  m/min  $V_1 = 0,4$  m/min;  $t = 0,015$  mm.



Valoarea forței  $F_n$  la rectificarea cu disc En16K8C cu regimul:  $v_s = 32$  m/s  $v_p = 10$  m/min  $s_1 = 0,4$  m/min  $t = 0,01$  mm.

Puterea consumată la aşchiere s-a măsurat cu trusa wattmetrică QN11 (v.cap.4.2.5).

Ondulația și rugozitatea suprafețelor rectificate s-au măsurat cu profilometrul - profilograf Hömmel-Tester tip T (v.cap.4.2.1).

Cantitatea de metal îndepărtat s-a controlat cu completul de control activ tip CAS(EI)C-2E (v.cap.4.2.4): ciclul de lucru a fost întrerupt după îndepărtarea unui strat de material de grosime prestabilită; volumul de material aşchiat a fost calculat și, prin sondaj, piesele au fost cîntărite. Grosimea stratului de material rectificat s-a mai controlat și prin măsurare cu micrometrul.

Fiecare experiment s-a repetat de 3-5 ori pentru obținerea unor rezultate stabile. La interpretare s-a considerat media rezultatelor parametrilor măsurați.

S-a studiat influența caracteristicilor sculei abrazive, a regimului de aşchiere a acesteia, a duratei de lucru a sculei după

îndreptare, a parametrilor regimului de lucru și a gradului de puritate a LRU asupra calității stratului superficial al pieselor rectificate.

Parametrii regimului de rectificare au fost următorii:

- viteza de aşchiere (viteza de rotație a sculei abrazive)  
 $v_B \cong 32$  m/s, fixă (viteza a variat puțin numai datorită uzurii sculei);
- viteza de rotație a piesei:  $v_p = 9 \dots 60$  m/min;
- viteza avansului longitudinal (viteza mesei mașinii):  
 $v_l = 430 \dots 2700$  mm/min;
- adâncimea de aşchiere  $t = 0,001 \dots 0,03$  mm.

Majoritatea experimentelor s-au efectuat cu un adaus de prelucrare de 0,1mm sau 0,2 mm.

Din cercetările efectuate s-a stabilit că rugozitatea suprafeței rectificate și forțele de aşchiere (inclusiv puterea consumată), pentru aceleași condiții de lucru - aceeași sculă abrazivă și aceeași parametri ai regimului de rectificare - diferă valoric foarte puțin pentru oțelurile de utilizare generală studiate, motiv pentru care s-au putut determina relații de calcul ale rugozității suprafeței și forțelor de aşchiere.

Rezultate puțin diferite s-au obținut pentru  $R_p3$  și oțelul inoxidabil To9CuMoMnNiCr185-T.

Prelucrarea datelor experimentale s-a făcut cu metode grafo-analitice și se prezintă în continuare.

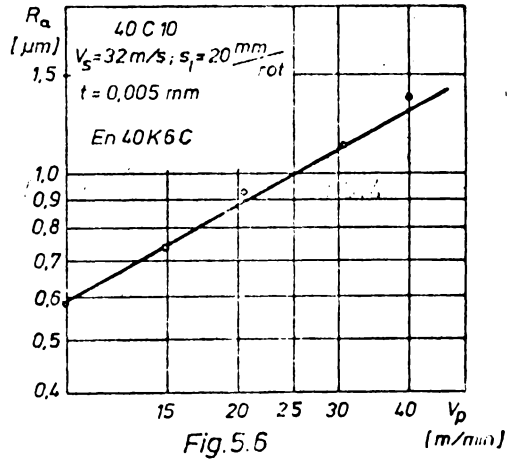
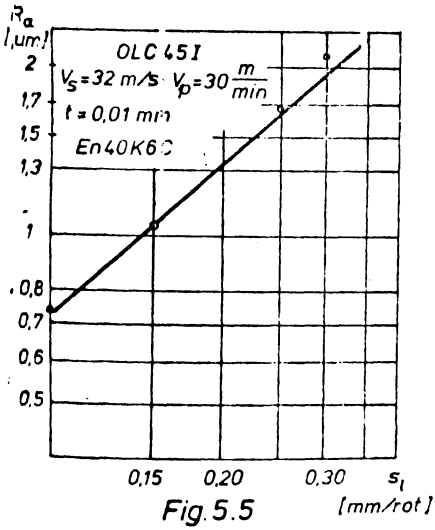
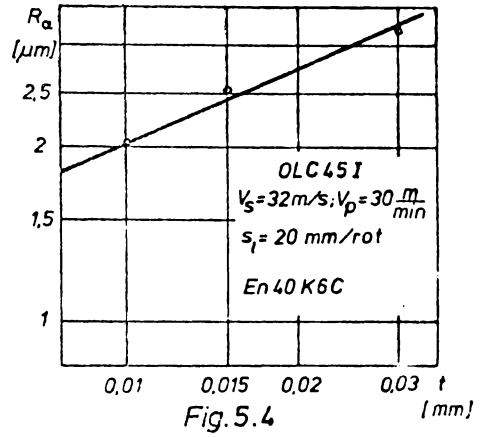
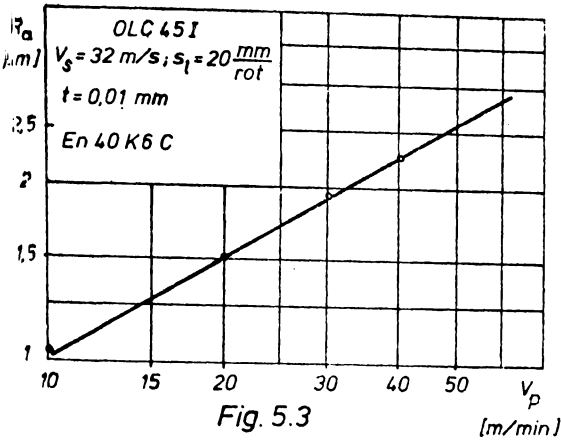
## 5.2 Rezultate experimentale

### 5.2.1 Rectificare cilindrică exterioară cu avans longitudinal,

Oțeluri tratate termic (îmbunătățite sau călite).

S-au rectificat OLC45 îmbunătățit (la HRC  $\approx 54$ ), 40C10 călit la HRC 42-46, Rul 1 călit la HRC 52-60, OSC10 călit la HRC 62...64 și  $R_p3$  călit la HRC 63...65, cu un disc abraziv plan  $\varnothing 500 \times 80 \times 203$  din En40K6C, cu un avans longitudinal  $s_l = KB$  mm/rot în care  $K = 0,10 \div 0,30$ , iar  $B = 80$  mm lățimea discului.

S-a reprezentat variația rugozității cu parametrii regimului de lucru:  $v_p$ , în m/min,  $s_l$ , în fracțiuni din lățimea sculei,  $t$ , în mm/cd (v. fig. 5.3 ... 5.11).



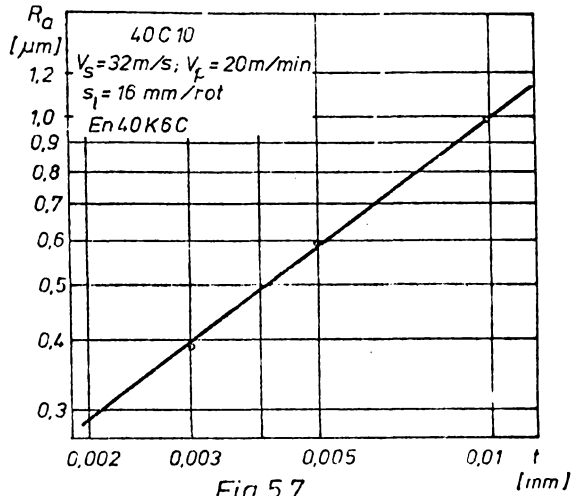


Fig. 5.7

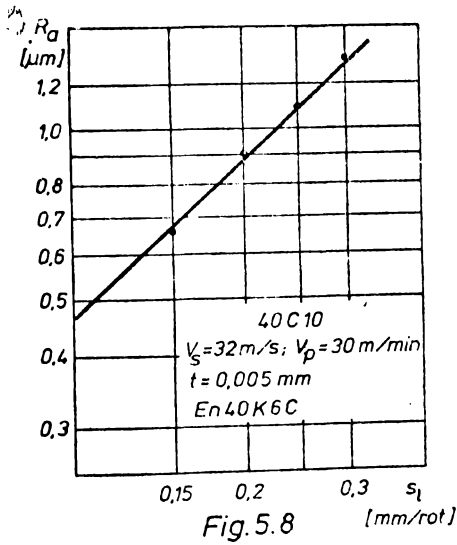


Fig. 5.8

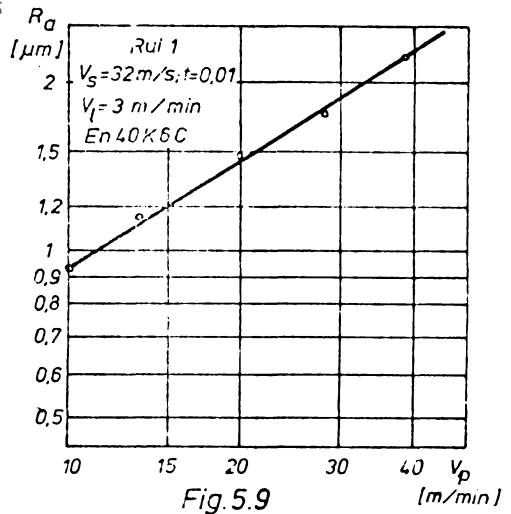
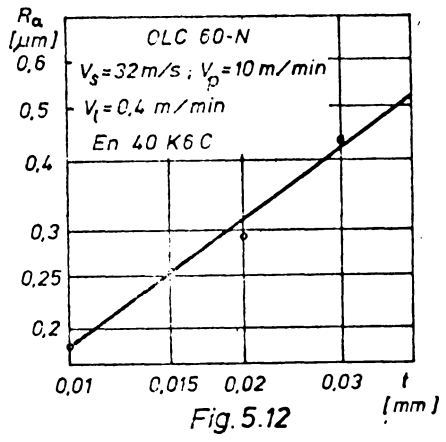
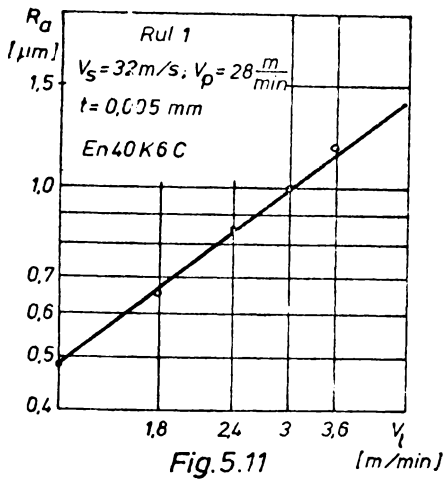
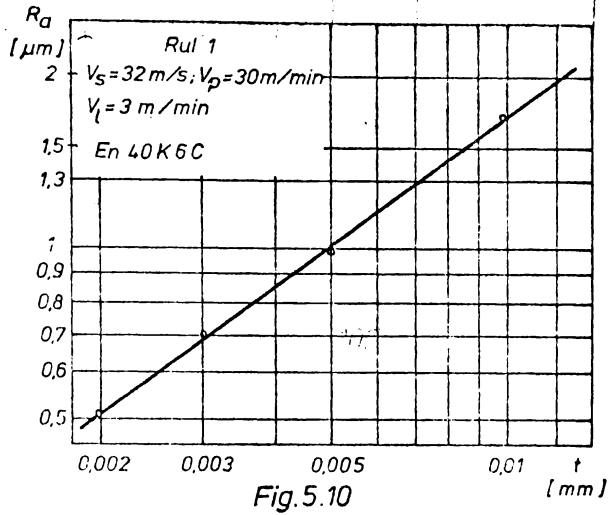


Fig. 5.9





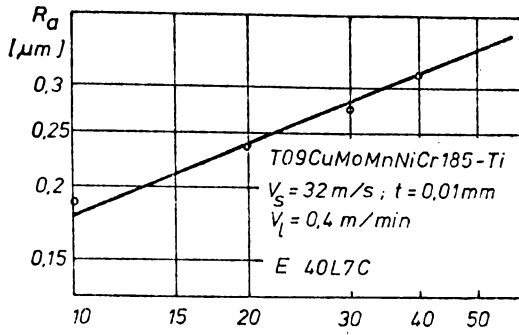


Fig. 5.15

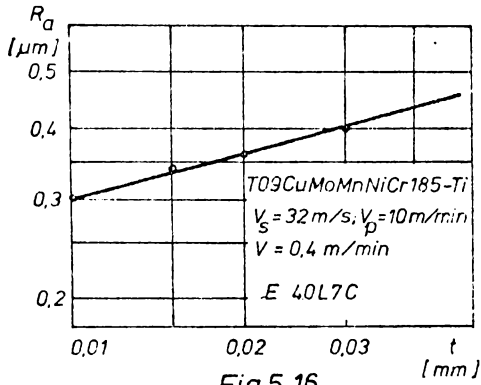


Fig. 5.16

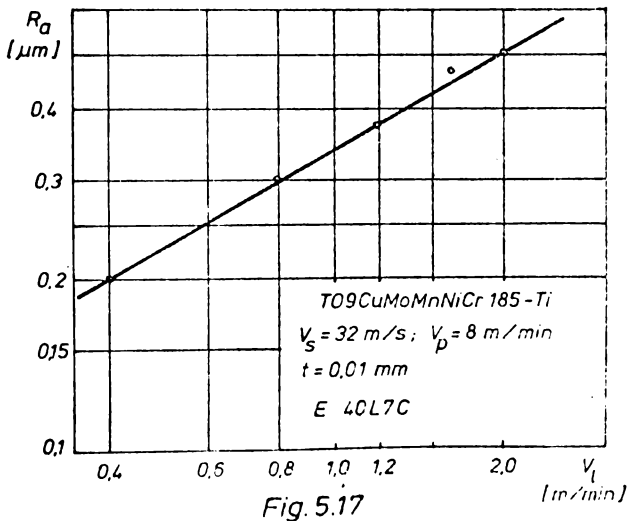


Fig. 5.17

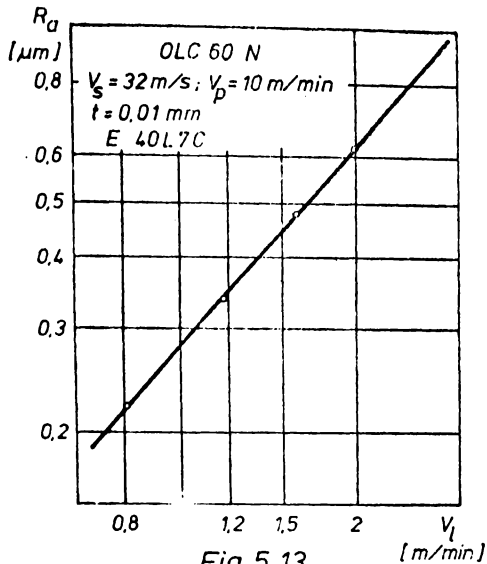


Fig. 5.13

Din analiza diagramelor prezentate se observă că pentru aceleași condiții de prelucrare, rugozitatea suprafețelor este aproape identică. În plus mai arătăm că și puterea măsurată în aceste condiții are valori foarte apropiate.

Pentru  $v_s = 32 \text{ m/s}$ ,  $v_p = 30 \text{ m/min}$ ,  $S_1 = 16 \text{ mm/rot}$  (0,2 B) și  $t = 0,01 \text{ mm/cd}$  aceste rezultate se prezintă în tabelul 5.1.

Tabelul 5.1

Marca oțelului	Duritatea HRC	$R_a$ $\mu\text{m}$	$P_e$ Kw
OLC45I	52...54	2	1,7
Rul 1	52...60	1,8	1,8
40C10	42...46	2	1,65

Pentru aceste motive s-a putut deduce o formulă empirică pentru calculul valorii rugozității la rectificarea oțelurilor tratate termic cu piatră En40K6C:

$$R_a = 25,7 v_p^{0,6} S_1^{0,85} t^{0,75} [\mu\text{m}] \quad (5.1)$$

unde:  $v_p$ , [m/min];  $S_1 = K \cdot B$  [mm/rot]; ( $K = 0,1 \dots 0,3$ ),  $t$ , [mm/cd].

#### Oțeluri netratate termic

Se prezintă rezultatele măsurării rugozității suprafețelor rectificate a unor arbori  $\varnothing 50 - \varnothing 70$  din OLC60 normalizat. Rectificarea s-a făcut cu un disc plan  $\varnothing 500 \times 80 \times 203$  din electrocorindon normal E40L7C. (Fig. 5.12; 5.13; 5.14)

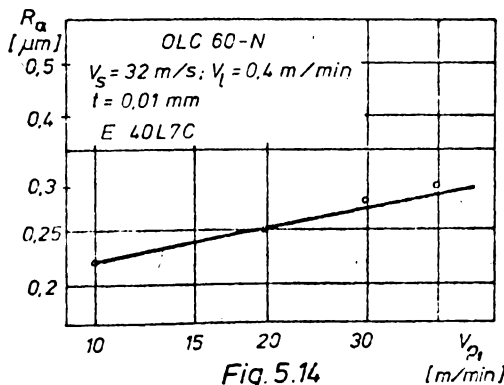
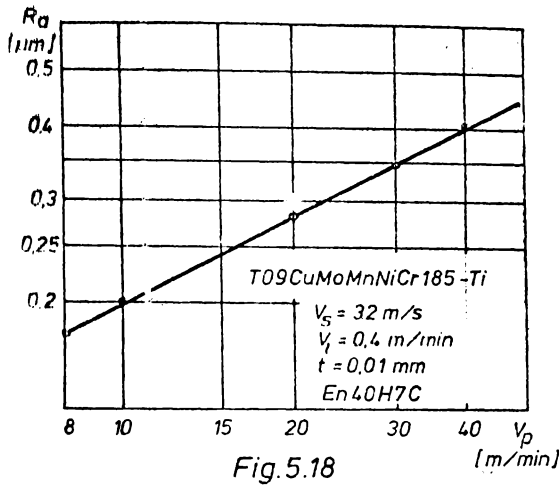


Fig. 5.14



Rezultate asemănătoare s-au obținut și la rectificarea OLC45 normalizat și OI50.

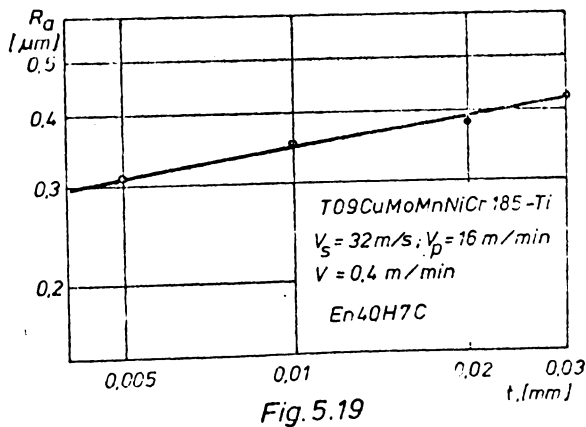
Formula empirică pentru calculul rugozității în această situație este următoarea:

$$R_a = 1.1 v_p^{0.2} v_f^{1.15} t^{0.8} \quad [\mu\text{m}] \quad (5.2)$$

în care  $v_f$  este viteza avansului longitudinal măsurată în [m/min];  $v_p$ , [m/min] și  $t$ , [mm/od].

Oțelul inoxidabil T09CuMoMnNiCr185-Ti, brevetat la I.C.M.-Reșița este un oțel austenito-martensitic-feritic, rezistent la coroziune și cavitație, cu  $\sigma_{r \text{ min}} = 60 \text{ daN/mm}^2$  și HB = 160...220 (după austenitizare la 1000-1020°C, răcire în apă și revenire la 650°C-680°C). Se folosește la fabricarea unor piese importante ale turbinelor hidraulice: rotoare turnate monobloc pentru turbine de tip Francis, palete rotor pentru turbine Kaplan și Bulb, ș.a.

Incercările privind determinarea condițiilor optime de rectificare cilindrică cu avans de trecere, s-au făcut cu discuri plane  $\varnothing 500 \times 203 \times 80$  din B4CL7C, discuri  $\varnothing 500 \times 203 \times 60$  din En40H7C și En25L7C. S-au rectificat arbori cilindrici  $\varnothing 120 \times 500 \text{ mm}$ , cu regimuri de finisare, urmărindu-se obținerea unei netezimi avansate a suprafețelor rectificate. Variația rugozității -  $R_a, \mu\text{m}$  - cu parametrii regimului de rectificare se prezintă în figurile 5.15...5.20.



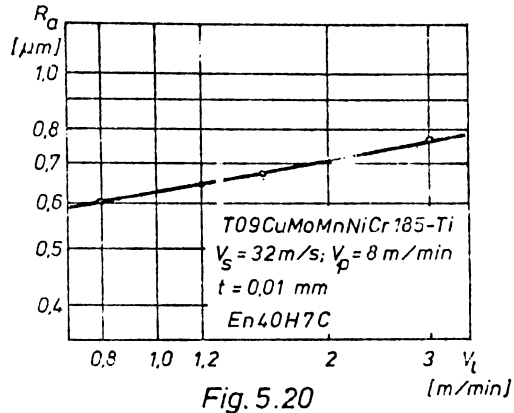


Fig. 5.20

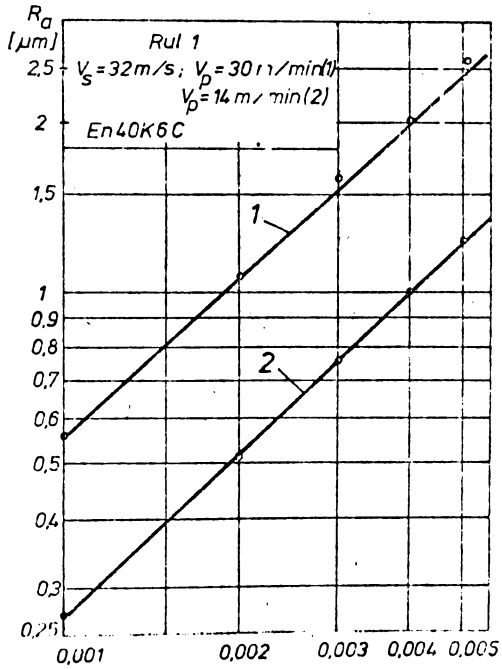


Fig. 5.21

În urma prelucrării datelor experimentale s-au obținut următoarele formule empirice pentru calculul rugozității suprafețelor rectificate:

Cu sculă E40L7C:

$$R_a = 0,30 v_p^{0,5} v_l^{0,17} \cdot t^{0,17} [\mu m], \quad (5.3)$$

în care:  $v_p$  - [m/min],  $v_l$  - [m/min] și  $t$  - [mm/cd].

Cu sculă En40H7C:

$$R_a = 0,52 v_p^{0,42} \cdot v_l^{0,57} \cdot t^{0,26} [\mu m] \quad (5.4)$$

în care:  $v_p$  - [m/min];  $v_l$  - [m/min] și  $t$  - [mm/cd].

### 5.2.2. Rectificarea cilindrică exterioară cu avans de pătrundere

S-au rectificat trepte de lățimi  $b = 50$  mm și  $\varnothing 80 - 120$  mm, executate pe arbore din 40Cr10 călit, Bul 1 și Bul 2 călit și 01C45 îmbunătățit, cu discuri abrazive 1500 x 203 x 60 mm din En40K6C, En25J7C și En16K8C. Viteza de rotație a sculei a fost practic constantă  $v_g = 32$  m/s, viteza de rotație a piesei  $v_p = 10 \dots 60$  m/min, dar avansul de pătrundere, egal cu adâncimea de așchiere  $t = 0,001 \dots 0,01$  mm.

Și la rectificarea cu avans de pătrundere s-a constatat că, în aceleași condiții de lucru (aceeași sculă abrazivă și aceiași parametri ai regimului de așchiere), rugozitatea suprafețelor prelucrate, forțele de așchiere și puterea consumată sînt practic identice.

O parte a rezultatelor experimentale se prezintă sub formă de variație a rugozității cu parametrii regimului de lucru în fig. 5.21 ... 5.27.

Prin prelucrarea datelor experimentale s-au obținut următoarele formule empirice pentru calculul rugozității suprafețelor rectificate:

La rectificare cu disc abraziv En40K6C:

$$R_a = 15,7 \cdot v_p^{0,95} \cdot t^{0,93} [\mu m] \quad (5.5)$$

La rectificare cu disc abraziv En25J7C:

$$R_a = 5 v_p^{0,8} \cdot t^{0,7} [\mu m] \quad (5.6)$$

La rectificare cu disc abraziv En16K8C:

$$R_a = 4,8 v_p^{0,38} \cdot t^{0,57} [\mu m] \quad (5.7)$$

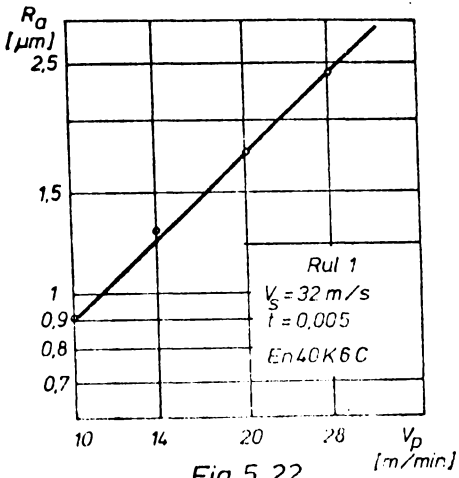


Fig. 5.22

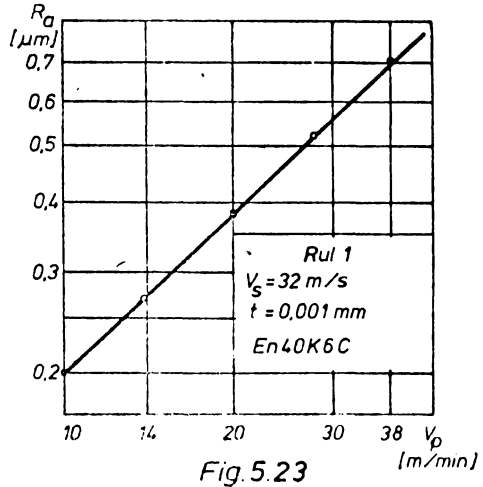


Fig. 5.23

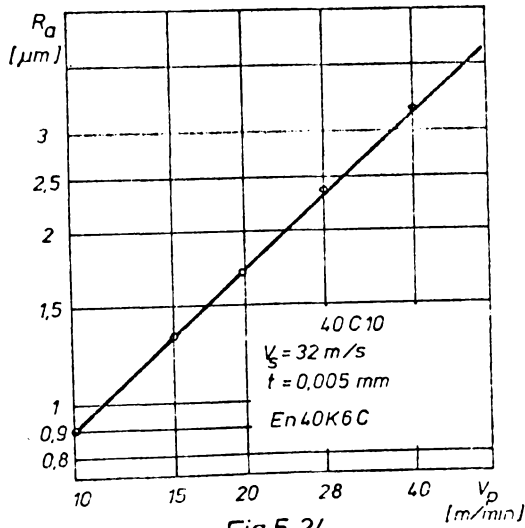


Fig. 5.24

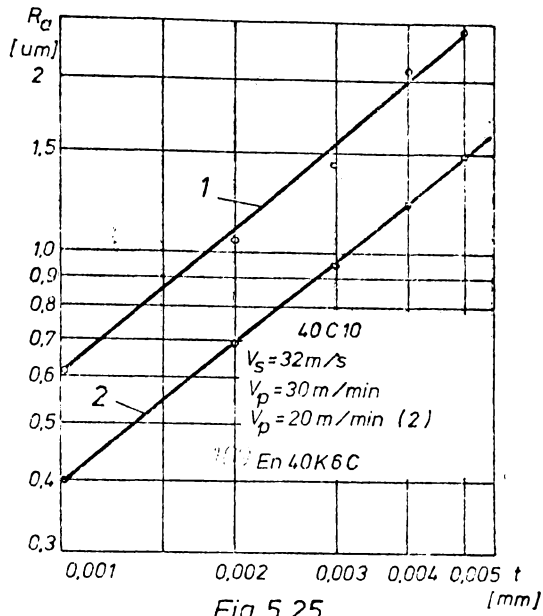


Fig. 5.25

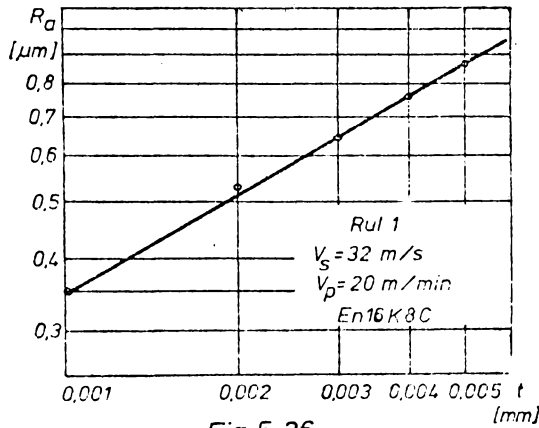


Fig. 5.26

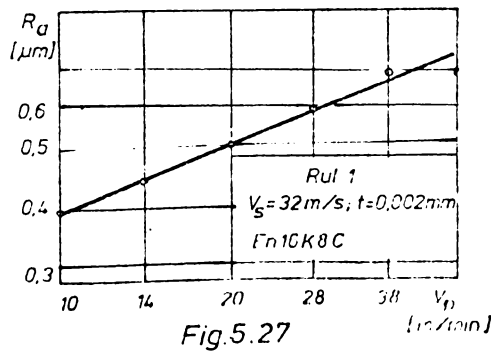


Fig. 5.27



În formulele prezentate mărimile se iau cu următoarele unități de măsură:  $v_p$  - m/min, iar  $t$  - mm.

*treceții de*

5.3. Influența netezire la rectificarea asupra calității stratului superficial al pieselor

După cum se cunoaște <sup>*treceții de*</sup> netezire se realizează fără avans de pătrundere a sculei abrazive. Scula agochiază un strat foarte subțire de material - egal cu mărimea revenirii elastice a materialului, tensionat în timpul rectificării.

În această etapă a prelucrării rugozitatea suprafeței rectificate este influențată de interacțiunea dintre metalul prelucrat, materialul grăunților abrazivi și al liantului. Este de menționat că, deși ne luăm în considerare în majoritatea cercetărilor, influența materialului liantului asupra rugozității este mare, liantul avînd un efect de netezire a suprafeței rectificate. Cel mai mare efect de netezire îl are vulcanita, ceva mai mic bachelita și cel mai mic liantul ceramic.

Materialul grăunților abrazivi are un efect de durificare al stratului superficial al pieselor în timpul netezirii.

În scopul evidențierii influenței netezirii la rectificarea asupra calității stratului superficial au fost efectuate cercetări asupra unor piese din oțel Rul 2 călitate. Arbori de  $\varnothing 60 \times 300$  mm au fost împărțiți prin canale inelare în porțiuni de 25 mm. Arborii au fost otrăniți la  $R_a \approx 12,5 \mu\text{m}$  și apoi căliti la SRC 62. După călire arborii au fost rectificați în întregime cu acelaș regim de lucru:  $v_s = 32$  m/s,  $v_p = 31$  m/min,  $v_l = 0,7$  m/min,  $t = 0,01$  mm/cursă dublă. S-a măsurat rugozitatea și microduritatea fiecărei porțiuni: s-au efectuat cinci măsurători pe fiecare porțiune considerîndu-se apoi media acestora. Cu o mică dispersie a rezultatelor s-a obținut  $R_a = 0,65 \mu\text{m}$  și  $H_{100} = 720$  daN/mm<sup>2</sup>. Microduritatea s-a măsurat cu microdurimetrul PMT-3. În continuare, prima porțiune a rămas numai rectificată, a doua a fost netezită 5 s, iar pentru fiecare porțiune următoare durata netezirii s-a prelungit cu 5 s. Rugozitatea suprafeței s-a micșorat la  $R_a = 0,3 \mu\text{m}$  pentru o netezire de 15 s după care a rămas aproape constantă la  $R_a \approx 0,23 \mu\text{m}$  (v. fig. 5.28). Ca rezultat al acțiunii grăunților abrazivi microduritatea stratului superficial a crescut cu 17-20%. Evident că <sup>*treceții de*</sup> netezire se vor răsfrînge și creșterea microdurității în următoarele

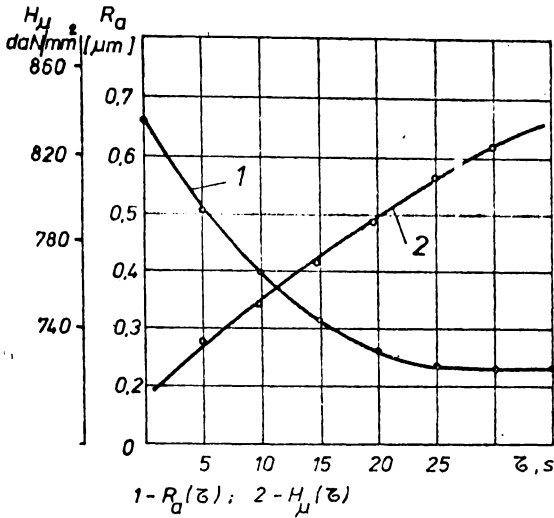


Fig. 5.28

din En40K6C (v.fig.5.29). După o netezire de 30 s rugozitatea suprafeței a scăzut la  $R_a = 0,3\mu\text{m}$ .

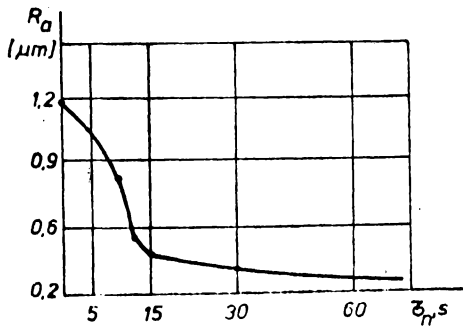


Fig. 5.29

Scăderea rugozității după  $n = 10$  treceri fără avans de pătrundere se prezintă în fig. 5.31.

favorabil în comportarea pieselor în exploatare. După date din literatură, [34], rezultă că prin creșterea microdunității cu 25%, se îmbunătățește rezistența la solicitarea de contact cu circa 20%.

Rezultate asemănătoare au fost obținute și prin netezirea unor arbori din 40C10 căliți, rectificați cu avans de pătrundere ( $v_B = 32 \text{ m/s}$ ;  $v_p = 30 \text{ m/min}$ ;  $t = 0,002 \text{ mm}$ ) cu o sculă abrazivă.

Prelungirea timpului de netezire peste 1 minut nu duce la scăderea esențială a rugozității; aceasta se stabilizează la o anumită valoare minimă (v.fig. 5.30).

Situația prezentată se referă la rectificarea unor arbori din 40C10 căliți, în aceleași condiții ca și în exemplul precedent.

Dureta netezirii poate fi exprimată și prin numărul  $n$  de curse fără avans de pătrundere.

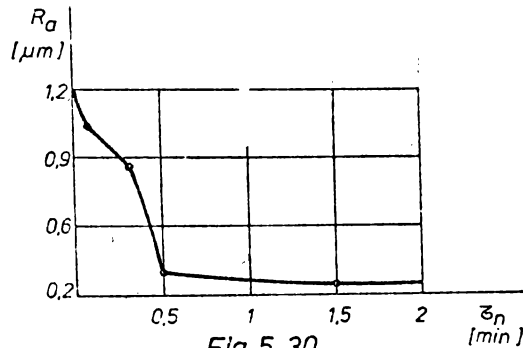
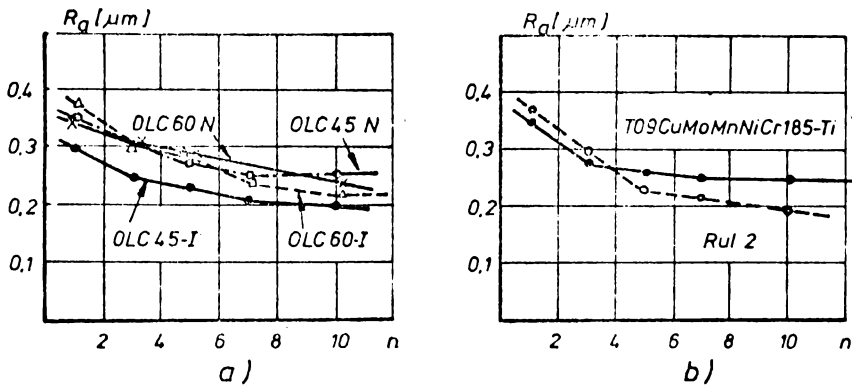


Fig. 5.30



Regimul de lucru :  $V_d = 32 \text{ m/s}$ ;  $V_p = 20 \text{ m/min}$ ;  $s_f = 410 \text{ mm/min}$   
 $s = 0,01 \text{ mm/c}$  Piatra abraziva  $500 \times 203 \times 80\text{E}40\text{LC}$

Fig. 5.31

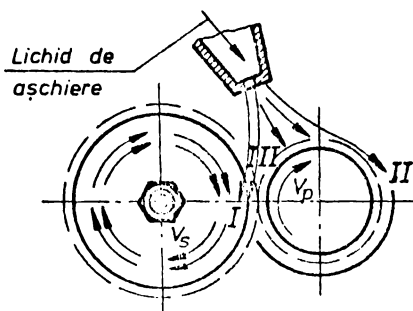
#### 5.4 Influența calității lichidului de răcire-ungere (LRU) asupra calității suprafețelor rectificate

##### 5.4.1 Acțiunea fizico-chimică a lichidului de aşchiere asupra procesului de rectificare.

Folosirea lichidului de răcire-ungere (LRU) la rectificare provoacă scăderea temperaturii, ceea ce determină reducerea intensității și numărului arsurilor și microfisurilor, micșorarea adâncimii stratului

defect și a mărimii tensiunilor interne, îmbunătățirea microgeometriei suprafeței rectificată, micșorarea uzurii sculei abrazive, creșterea volumului specific de metal îndepărtat (până la de 5-6 ori).

La rectificare, sub acțiunea jetului de aer comprimat de la periferia sculei abrazive, ventilației acesteia și altor factori vîna de LRU se dividează în trei părți (v.fig.5.32).



Schema distribuției LRU la rectificare:

I - partea LRU care acționează asupra discului

II - partea LRU care acționează asupra piesei

III - partea LRU care acționează asupra zonei de aschiere;

$V_s$  - viteza discului abraziv

$V_p$  - viteza piesei

Fig. 5.32

Prima parte a LRU (I) acționează asupra sculei. Aceasta rupe stratul de aer comprimat de la periferia acesteia, curge pe suprafețele frontale ale sculei, pătrunde în interiorul sculei prin capilarele liantului și ale grăunților abrazivi și este apoi împins de către curentul de aer prin porii interiori către periferia sculei. Capilarele mențin LRU în tot timpul funcționării sculei. Confirmarea acestui fapt se obține prin spargerea sculei după rectificare cu LRU - toate fragmentele acesteia vor fi îmbibate cu lichid.

Un prim efect al LRU asupra sculei abrazive este scăderea durității acesteia în medie cu o clasă de duritate în procesul de exploatare în cursul primelor două ore (v.fig.5.33 a) și pînă la două clase în timpul unei exploatare mai îndelungate (pînă la 200 ore, v.fig.5.33.b). [45] Al doilea efect al absorbției LRU în sculă este formarea pe suprafața grăunților, liantului și porilor a unor pelicule de absorbție și de săruri din moleculele substanțelor superficial active din compoziția LRU, care protejează suprafața sculei.

Se poate concluziona că prima parte a LRU asigură răcirea sculei, spălarea parțială a sculei de particule metalice, formarea unor pelicule rezistente de săruri pe suprafața sculei și în unele duritatea.

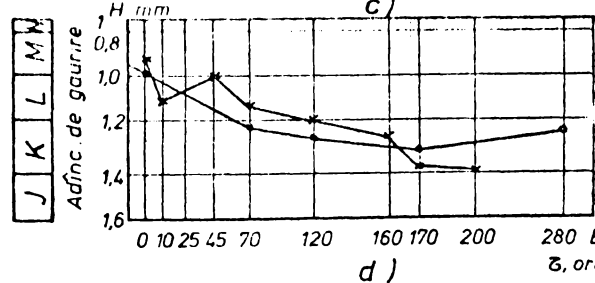
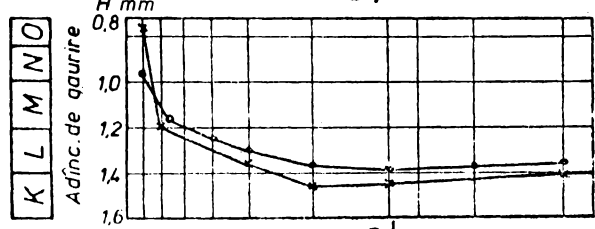
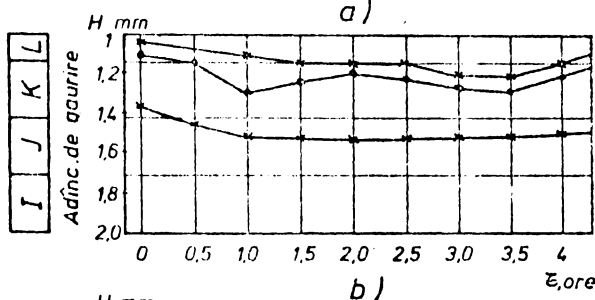
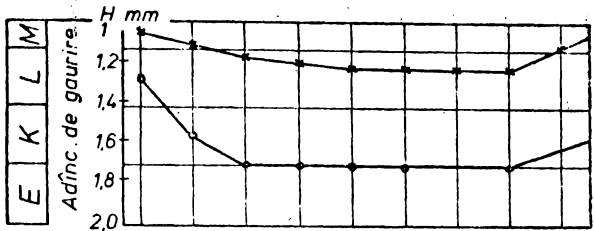
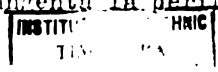


Fig. 5.33

A doua parte a vînei LRU (II) cade pe piesă, răcește suprafața acesteia și este parțial absorbită în stratul superficial al piesei; această parte are acțiune de răcire, ungere, aşchiere, spălarea suprafeței de produsele prelucrării și de protecție contra coroziunii.

A treia parte a vînei de LRU (III) acționează în zona de aşchiere pătrunzînd în această zonă pe mai multe  $\mu$ i. Se cunoaște că în timpul rotației sculei abrazive, sub acțiunea forțelor centrifuge se produce expulzarea aerului din porii discului formîndu-se vid. Mișcarea aerului expulzat este orientată după tangenta la periferia sculei, din care cauză în jurul acesteia se formează un strat de aer comprimat. Aerul comprimat pulverizează parțial LRU transformîndu-l în ceață, care se împrăștie în aerul înconjurător.

De acest lucru ne putem convinge ușor expunînd o foaie de hîrtie în spațiul din apropierea sculei și alta după o direcție tangențială la perife-



ria acesteia. Ambele foi se umezesc rapid.

Amestecul de aer cu LRU este aspirat în pori, circulă prin aceștia și este proiectat în exterior ajungând și în zona de aşchiere.

Altă cale de pătrundere a LRU în zona de aşchiere este prin microfisurilo, porii și neregularitățile suprafețelor în contact ale piesei și sculei.

Acțiunea LRU asupra zonei de aşchiere constă în răcirea acesteia în oarecare măsură, precum și spălarea de produsele rectificării.

Din analiza distribuției LRU la rectificare este evident că toate cele trei părți ale vînei de lichid au acțiune de răcire, ungere, spălare și absorbție asupra sculei și piesei. Divizarea analizată a vînei de LRU nu depinde de metodele de admisie a acestuia, întrucît metoda de admisie modifică numai proporția între părți.

Acțiunea principală a LRU la rectificare este cea de răcire. Ca urmare a răcirii se păstrează o duritate mai ridicată a grăunților abrazivi și liantului. Participarea la rectificare a unui număr mare de grăunți duri asigură un număr sporit de suprapunerile trajectoriilor de aşchiere în direcție longitudinală și transversală, ceea ce determină micșorarea înălțimii microneregularităților suprafeței prelucrate.

Rectificarea cu grăunți duri asigură simultan și creșterea productivității și micșorarea uzurii sculei (v. tabelul 5.2).

Tabelul 5.2

Productivitatea rectificării oțelului OLC25  
prin folosirea diferitelor LRU

LRU folosit	Productivitatea prelucrării $Z, \text{mm}^3/\text{s}$	Uzura sculei $Z_s, \text{mm}^3/\text{s}$	Productivitatea specifică $\varphi = \frac{Z}{Z_s}$
Fără răcire	19,5	3,9	5,0
Soluție apoasă: 5% emulsol +2% sulfofrezol +0,2% sodă	11,0	0,66	16,7
Sulfofrezol cu 10% motorină	23,6	0,48	49,2

Folosirea LRU la rectificare, determinând condiții mai bune de evacuare a căldurii, favorizează micșorarea numărului și intensității arsurilor și microfisurilor, reducerea tensiunilor interne din stratul superficial al piesei.

Un aspect cercetat insuficient este acela al influenței purității LRU, respectiv al gradului de impurificare al acestuia cu fragmente abrazive și așchii metalice, asupra rugozității suprafeței și productivității rectificării. În lucrarea de față s-a făcut o astfel de cercetare, datele și rezultatele prezentându-se în continuare.

#### 5.4.2. Influența purității LRU asupra procesului de rectificare

La rectificare, deșeurile mecanice - fragmente abrazive și așchii metalice - formează un nămol, care este antrenat de LRU, ajunge în rezervor și este adus parțial din nou în zona de lucru, influențând rezultatele prelucrării: rugozitatea suprafeței și productivitatea rectificării.

Modelarea influenței impurităților mecanice asupra rezultatelor rectificării s-a făcut prin adăugarea în LRU curat - soluție de 5% emulsie în apă - a unor cantități determinate de nămol: 0 - 650 g/l, ceea ce corespunde unei durate de circa 10 săptămâni de utilizare a LRU, la rectificarea în condiții industriale [29]. Se apreciază că la o rotație a LRU în sistem cad 0,5-1,5 g/l impurități și în 10 săptămâni de funcționare se produc 1500-5000 de rotații ale LRU.

Impuritățile s-au obținut prin rectificarea uscată a unor arbori din Rul 2 cu un disc abraziv  $\varnothing 500 \times 203 \times 80$  din En60K6C și colectarea prefului format.

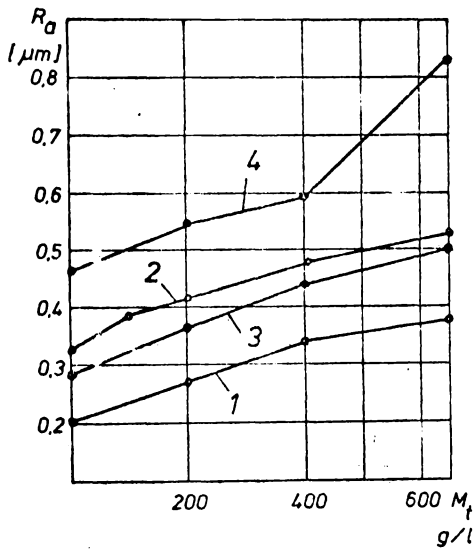
Se notează cu  $M_1 = 0 \dots 0,5$  g/l gradul de impurificare a LRU. La o rotație a acestuia în sistem și cu  $M_2 = 0-650$  g/l, impurificarea finală a LRU.

S-au rectificat arbori netezi  $\varnothing 50 \times 300$  mm din Rul 2, cu disc abraziv din En60K6C cu regimul  $v_s = 32$  m/s,  $v_p = 23,5$  m/min,  $v_1 = 1,1$  m/min,  $t = 0,005 - 0,02$  mm/cd. Scula a fost ascuțită cu vîrf de diamant, în trei treceri de degrogare ( $t_{d1} = 0,01$  mm/cd), cinci de finisare ( $t_{f1} = 0,005$  mm/cd) și trei treceri fără avans de pătrundere.

LRU s-a administrat prin curgere literă. S-au măsurat următorii parametri ai rugozității:  $R_a$  și  $R_y$  și s-a determinat productivitatea prelucrării  $Z$  - valoare teoretică și efectivă.

O parte a rezultatelor experimentale se prezintă în fig. 5.34.

Analizând modificarea rugozității suprafeței rectificate cu gradul de impurificare a LRU se vede că acest factor are influență mai mare decât creșterea *avansului transversal*.



- $t=0,005$  mm/cd : 1- $M_1=0$   
2- $M_1=1,5$  g/l
- $t=0,02$  mm/cd : 3- $M_1=0$   
4- $M_1=1,5$  g/l

Fig. 5.34

Astfel, prin creșterea avansului transversal de la 0,005 mm/cd la 0,02 mm/cd rugozitatea crește în aceleași condiții de 1,3 - 1,4 ori, în timp ce datorită impurificării LRU 1,5 - 1,6 ori.

Prin impurificarea LRU productivitatea prelucrării a scăzut de 2,3 - 3 ori.

### 5.5 Influența operațiilor anterioare rectificării asupra preciziei geometrice, a suprafețelor rectificate

Se apreciază obișnuit că precizia geometrică a suprafețelor se obține la operația finală de prelucrare a pieselor - rectificarea în majoritatea cazurilor. Cercetări recente [33] au arătat că, calitatea

finală a suprafețelor prelucrate se formează sub acțiunea întregului complex de operații care compun procesul tehnologic de execuție al piesei (operații de prelucrare mecanică și tratamente termice). S-a introdus noțiunea de "creditate tehnologică", înțelegând prin aceasta transferarea proprietăților (și preciziei) obiectului prelucrării de la operațiile anterioare la cele finale, ceea ce influențează în continuare comportarea în exploatare a piesei: rezistența la uzură, rezistența la oboseală, rigiditatea de contact. ș.a.



În cadrul cercetării de față s-a studiat și influența rugozității inițiale - după strunjire - asupra rugozității finale - după rectificare. Cercetările s-au efectuat pe două loturi de arbori  $\varnothing 60 \times 300$  din Rul 2, care au fost împărțiți prin canale inelare în porțiuni de 25 mm. Arborii din primul lot au fost strunjiți și apoi rectificați, cei din lotul al doilea au fost strunjiți, căliți și apoi rectificați.

Regimurile de așchiere pentru strunjiri și rectificări au fost identice pentru porțiunile corespunzătoare ale arborilor din cele două loturi. Strunjirile s-au executat pe un strung normal SNA 560 x 1500, iar rectificările pe mașina de rectificat RU-350. S-au folosit cuțite cu plăcuță lipită din carbură metalică P30 cu geometria identică ( $\alpha_r=6^\circ$ ,  $\gamma_r=-5^\circ$ ,  $\kappa_r=60^\circ$ ,  $\varepsilon_r=90^\circ$ ,  $\lambda=0^\circ$ ); scula abrazivă a fost un disc plan  $\varnothing 500 \times 203 \times 80$  din E40L6C. Parametrii regimurilor de așchiere au fost aceși pentru porțiunile corespunzătoare ale arborilor din cele două loturi.

După fiecare operație s-au măsurat rugozitatea și undulația suprafețelor rezultate - cu profilometrul Hommel-Tester și abaterea de formă cu un pasamtru cu precizia de citire de 0,002 mm.

Rezultatele măsurătorilor se prezintă în tabelele 5.3 și 5.4.

Tabelul 5.3

Precizia arborilor după strunjire

Nr. crt.	Regimul de așchiere			Abaterea de la circularitate $\mu\text{m}$	Undulația $W_y$ $\mu\text{m}$	Rugozitatea		Obs
	t mm	s mm rot	v m min			$R_y$ $\mu\text{m}$	$R_a$ $\mu\text{m}$	
0	1	2	3	4	5	6	7	8
1.	0,2	0,024	113	16	7,6	4,5	1	Lot 1
2.	0,2	0,053		16	7,4	6,7	1,2	
3.	0,2	0,083		18	7,6	7,3	1,6	
4.	0,5	0,146		21	8	8,2	1,8	
5.	0,5	0,208		22	8,2	23	6,5	
6.	1,0	0,302		33	8,7	24	7	
7.	1,0	0,416		39	9	30	8,2	
8.	3,0	0,7		47	12	44	12	

0	1	2	3	4	5	6	7	8
1.	0,2	0,024	113	18	7,2	4,3	1,2	Lot 2
2.	0,2	0,053		17	7,4	5,9	1,8	
3.	0,2	0,083		21	7,0	8,0	2	
4.	0,5	0,146		23	7,6	9	2,3	
5.	0,5	0,208		23	8	21	6	
6.	1,0	0,302		33	8,3	24	7,4	
7.	1,0	0,416		40	8,9	27	9	
8.	3,0	0,7		52	11	42	12,2	

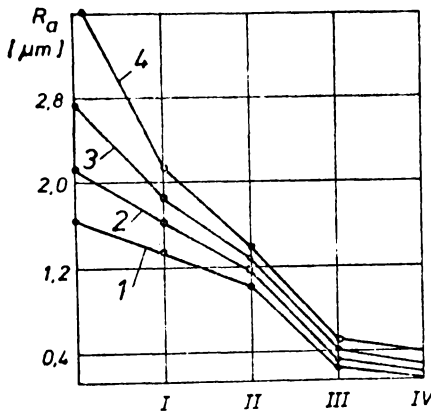
Tabelul 5.4

## Precizia arborilor după rectificare

Nr. crt.	Regimul de rectificare					Abatere de la circularitate $\mu m$	Ondulația maximă $w_y, \mu m$	Inpozitatea		Obs.
	$v_B$ $\frac{m}{s}$	$v_p$ $\frac{m}{min}$	$a$ mm	$v_l$ $\frac{m}{min}$	$t$ $\frac{mm}{cd}$			$k_y$ $\mu m$	$k_a$ $\mu m$	
1.	32	21	0,3	0,4	0,01	2	3,6	2	0,4	Lot 1
2.						3	3,6	2	0,4	
3.						3	4	2,8	0,4	
4.						3	4	2,2	0,43	
5.						3,6	4,5	3	0,45	
6.						4	5	3,2	0,56	
7.						4	6	3,7	0,65	
8.						6	8	3,5	0,80	
1.	32	21	0,3	0,4	0,01	2	3	2	0,3	Lot 2
2.						2,8	3,2	2	0,3	
3.						2,8	3,7	1,8	0,34	
4.						3	4	1,6	0,40	
5.						3	4,2	2,2	0,40	
6.						4	5,5	2,4	0,45	
7.						4	6	2,6	0,50	
8.						5	6,8	3	0,60	

Analiza comparativă a datelor din cele două tabele arată că la rectificarea după călire se obține o precizie geometrică mai bună a suprafețelor prelucrate.

Date din literatură [33] confirmă influența rugozității inițiale - după strunjire - asupra rugozității suprafețelor rectificate. Au fost strunjite patru loturi de câte 25 role fiecare. Rolele din primul lot au avut o rugozitate medie de  $R_a = 3,2 \mu\text{m}$ , cele din al doilea lot  $R_a = 2,6 \mu\text{m}$  al treilea  $R_a = 2,1 \mu\text{m}$  și al patrulea  $R_a = 1,6 \mu\text{m}$ . Toate rolele din cele patru loturi au fost strunjite odată. Au fost supuse apoi unei rectificări de degroșare, de finisare și netezire. După fiecare operație s-a măsurat rugozitatea cu profilometrul KV-7. Rezultatele experimentărilor se prezintă în fig. 5.35.



I, II, III, IV - rectificare de degroșare, semifinisare, finisare și netezire;

1, 2, 3, 4 - loturi de piese cu rugozitate inițială diferită

Fig. 5.35

Fiecare punct din această figură reprezintă media aritmetică a cinci valori ale parametrului măsurat. Din figură se vede că rugozitatea inițială influențează numai rezultatele rectificării de degroșare. În urma acestor operații suprafețele care au avut o rugozitate inițială mare rezultă, de asemenea, cu rugozitate mare. Rugozitatea inițială nu influențează rugozitatea obținută după rectificarea de finisare - porțiunea II-III și după netezire - porțiunea III-IV. Pe porțiunile menționate variația rugozității se prezintă sub forma unor

fascicule de drepte paralele. Rugozitatea obținută la rectificarea de finisare și la netezire depinde numai de valoarea parametrilor regimului de lucru.

Copierea parțială interoperații a rugozității inițiale se explică prin următoarele. La rectificarea de degroșare asperitățile mari rezultate din strunjire interacționează cu suprafața de lucru a sculei abrazive, dislocând grăunți abrazivi și liant. Pe conturul așchietor al sculei apar denivelări, care se copiază pe suprafața prelucrată. Rezultă o suprafață cu rugozitate mai mică decât la strunjire, dar totuși suficient de mare. După rectificarea de degroșare, microasperitățile suprafeței nu mai provoacă rizuri adânci în materialul liantului. Conturul așchietor al sculei este mai uniform, iar suprafața rectificată rezultă cu o rugozitate mai mică; înălțimea microasperităților după rectificarea de finisare și netezire depinde numai de condițiile prelucrării.

## 5.6. Diagrame de prelucrabilitate

5.6.1 Adâncimea de așchiere echivalentă,  $t_e$ , mm, este o mărime fizică importantă, prin intermediul căreia se pot caracteriza condițiile de rectificare.

Se prezintă în continuare semnificația fizică a acestei mărimi.

Se consideră schematic un proces de rectificare cilindrică exterioară cu avans de pătrundere (v.fig.5.36). Un strat de material de grosime  $t$  intră cu

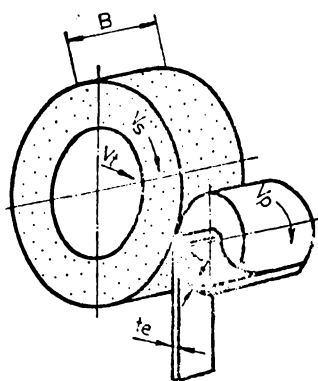


FIG. 5.36

viteza  $v_p$ , de rotație a piesei, în zona de contact sculă-piesă. Teoretic, așchile formate pot fi grupate într-un strat de grosime  $t_e$ , care iese cu viteza periferică a sculei  $v_g$ . Se poate calcula grosimea  $t_e$  aplicând principiul continuității volumului: volumul de material care intră în așchiere este egal cu volumul așchilor, adică:

$$b v_p \cdot t_e = b \cdot v_g \cdot t, \text{ cu } b - \text{lă-}$$

țimea de așchiere.

$$\text{Rezultă } t_e = t \frac{v_p}{v_g}$$

$$(5.8)$$

Această relație poate fi transformată avantajos în cazul rectificării cilindrice cu avans de pătrundere.

Se știe că:

$$t = \frac{v_t}{n}$$

unde:  $v_t$  este viteza avansului transversal, mm/s  
iar  $n$  este turația piesei, în rot/s,

$$\text{și } v_p = \pi D_p \cdot n$$

unde  $D_p$  - diametrul piesei, mm

Atunci:

$$t_e = \frac{tv_p}{v_s} = \frac{v_t \cdot \pi D_p \cdot n}{nv_s} = \frac{\pi D_p \cdot v_t}{v_s} \quad (5.9)$$

În final, întrucît  $t \cdot v_p$  și  $\pi D_p \cdot v_t$  reprezintă o productivitate specifică (productivitatea raportată la lățimea activă a sculei  $Z'$ , mm<sup>3</sup>/s.mm) formulele (5.8) și (5.9) se pot scrie:

$$t_e = \frac{Z'}{v_s} \quad (5.10)$$

Intrucît  $Z'$  se exprimă în mm<sup>3</sup>/s.mm, iar  $v_s$  în m/s

$$t_e = \frac{Z'}{10^3 v_s} \quad (5.11)$$

S-a obținut o mărime care nu depinde de viteza de rotație a piesei.

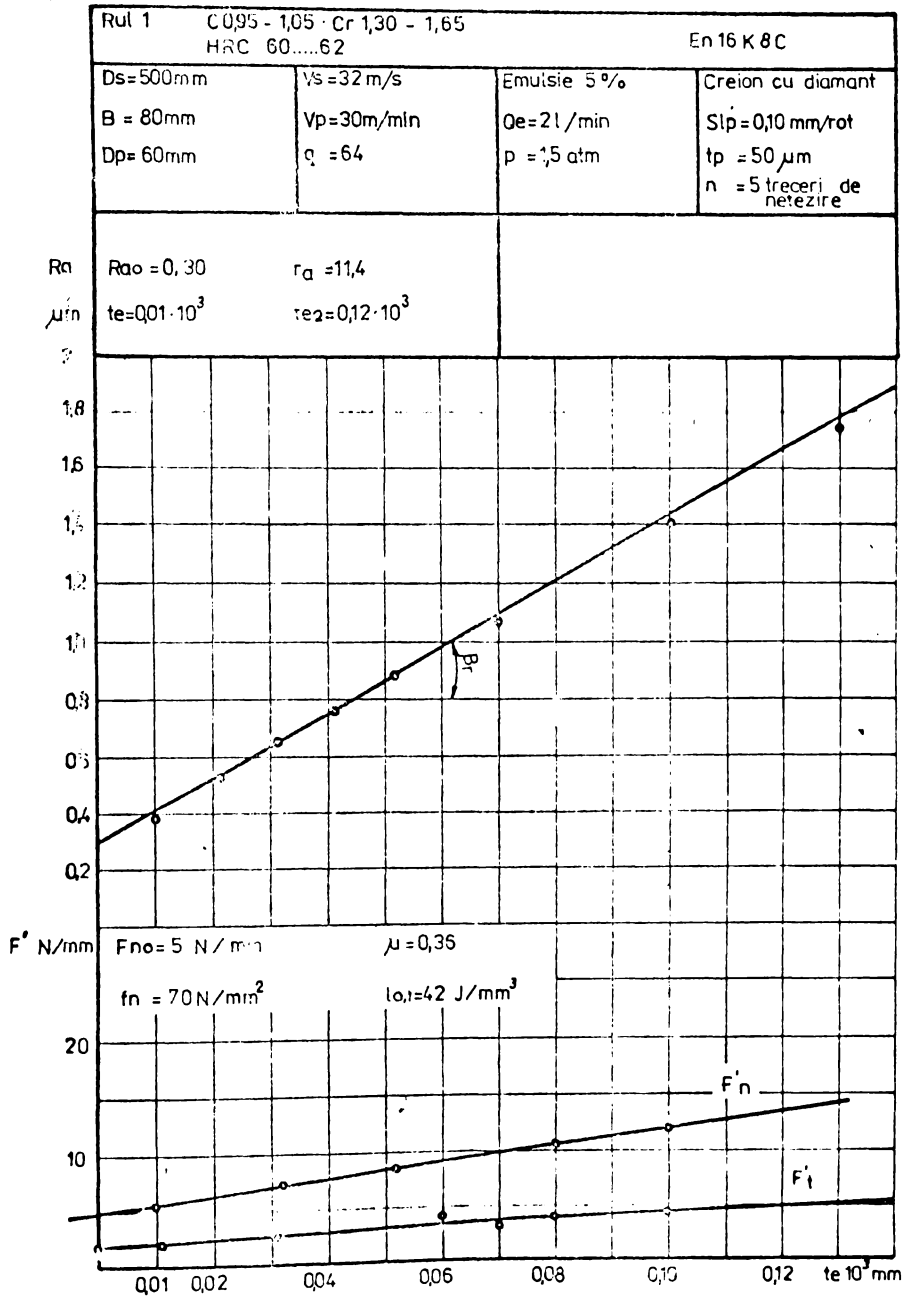
5.1.2 Din cercetările efectuate rezultă că ne pot stabili variații liniare ale rugozității suprafeței prelucrate ( $R_a$ , μm), forțelor de așchiere ( $F_n$  și  $F_t$ , N) și puterii consumate ( $P_g$ , Kw) în funcție de  $t_e$ .

Aceste dependențe sînt valabile pentru rectificarea oțelurilor de durități apropiate, în aceleași condiții (aceleași parametrii ai regimului de rectificare, scule identice, ascuțite la fel, același fel de răcire), independent, practic, de magina pe care se face rectificarea.

Pentru o mai bună generalizare, forțele de așchiere se vor exprima raportate la lățimea activă a sculei și se vor nota  $F'_n$ ,  $F'_t$  exprimate în  $\frac{N}{mm}$  și respectiv  $P'_g$  exprimată în  $\frac{Kw}{mm}$ .

Valorile  $R_a$ ,  $F_n$ ,  $F_t$  și  $P_a$  se obțin experimental.

Reprezentarea acestor mărimi în funcție de  $t_e$ , la rectificarea oțelului Rul 1 cu o sculă  $\varnothing 500 \times 203 \times 20$  din En16K8C se prezintă în fig. 5.37.



Din figura 5.37 se vede că rugozitatea suprafeței rectificata se poate scrie sub forma:

$$R_a = R_{ao} + r_a \cdot 10^3 t_e \quad (5.12)$$

în care  $R_{ao} = 0,3 \mu m$  este rugozitatea de referință (obținută prin intersecția dreptei cu axa ordonatelor) iar  $r_a$  este panta dreptei ( $r_a = tg \beta_r$ ), care se poate calcula în felul următor:  $r_a = (R_{ao,1} - R_{ao}) \times 10 = (1,44 - 0,30) \cdot 10 = 11,4$

și  $R_a = 0,3 + 11,4 \cdot 10^3 t_e, [\mu m]$

Ordonata la origină  $R_{ao}$  și panta dreptei,  $r_a$  sînt coeficienți caracteristici pentru dreapta  $R_a(t_e)$ .

În mod analog:

$$F'_n = F'_{no} + f_n \cdot 10^3 t_e \quad [N/mm] \quad (5.13)$$

și

$$F_t = \mu F'_n = \mu (F'_{no} + f_n \cdot 10^3 t_e) [N/mm] \quad (5.14)$$

Prin analogie cu  $R_{ao}$ ,  $F'_{no}$  se determină la intersecția lui  $F'_n$  cu axa ordonatelor ( $t_e = 0$ ), în timp ce  $f_n$  indică rezistența pe care materialul o opune la pătrunderea grăunților abrazivi și se numește creșterea specifică a forței normale;  $f_n$  se determină ca fiind panta dreptei

$$F'_n(t_e) : f_n = tg \beta_n, [N/mm^2]$$

Pentru situația prezentată:

$$F'_{no} = 5 \text{ N/mm}$$

$$f_n = (F'_{no,1} - F'_{no}) \cdot 10 \quad (12-5) \cdot 10 = 70 [N/mm^2]$$

Și prin urmare:

$$F'_n = 5 + 70 \cdot 10^3 t_e, \quad [N/mm]$$

Astfel, se poate determina forța de așchiere normală plecînd de la cunoașterea a doi coeficienți caracteristici  $F'_{no}$  și  $f_n$  și a unei combinații de  $v_t$ ,  $v_s$  și  $D_p$ .

Pe diagrama din fig. 5.37 s-a reprezentat și variația lui  $F'_t(t_e)$ .

Valoarea raportului  $\mu = \frac{F'_t}{F'_n} = 0,36$  pentru situația reprezentată este constantă (dreptele  $F'_n$  și  $F'_t$  se intersectează pe

axa absciselor.

Din diagramă se poate calcula puterea de aşchiere pe unitate de lăţime utilă a sculei:

$$P'_a = F'_t \cdot v_s = \mu v_s (F'_{no} + f_n \cdot 10^3 \cdot t_e) [\text{Watt/mm}] \quad (5.15)$$

Energia specifică  $e$ , este cantitatea de energie necesară pentru a aşchia un volum elementar de material.

Această importantă caracteristică fizică se poate deduce cu uşurinţă din coeficientii caracteristici  $\mu$ ,  $f_n$  şi  $F'_{no}$ :

$$e = \frac{F'_t}{10^3 t_e} \quad (5.16)$$

Înlocuirea lui  $F'_t$  din ecuaţia (5.15) dă:

$$e = \frac{\mu}{10^3} \left( f_n + \frac{F'_{no}}{t_e} \right) [\text{J/mm}^3] \quad (5.17)$$

Pentru a permite compararea energiei specifice necesare rectificării diferitelor materiale (gradului de uşurinţă cu care aceste materiale se rectifică), aceasta se va calcula pentru aceeaşi valoare a  $t_e$ . Se va indica valoarea lui  $t_e$  pentru care s-a calculat  $e$ ; de exemplu pentru  $t_e = 0,1 \cdot 10^{-3}$  mm. Se va scrie  $e_{0,1}$ .

Valoarea lui  $e_{0,1}$  se deduce cu uşurinţă din diagrama de prelucrabilitate ca fiind  $e_{0,1} = 10 \cdot F'_t_{0,1}$ ,  $F'_t_{0,1}$  reprezentînd valoarea forţei tangenţiale specifice pentru  $t_e = 0,1 \cdot 10^{-3}$  mm.

În cazul oţelului Rul 1, în condiţiile considerate  $e_{0,1} = 10 \cdot 4,2 = 42 \text{ J/mm}^3$ .

**5.6.3.** Diagrama de prelucrabilitate prezentată în fig.5.37 s-a trasat în urma unor cercetări de laborator, în cursul cărora forţele tangenţiale şi normale au fost măsurate continuu, prin intermediul virfurilor dinamometrice, de asemenea nivelul vibraţiilor.

În condiţii de atelier o diagramă de prelucrabilitate se poate obţine în felul următor.

Scula abrazivă se alege în funcţie de materialul de prelucrat şi se ascute în condiţii bine determinate.

Se alege o primă viteză de pătrundere, de exemplu  $v_t = 0,05$  mm/s. Se rectifică timpul necesar pentru a îndepărta un volum determinat de material (de exemplu  $V'_p = 100 \text{ mm}^3/\text{mm}$ ). La sfîrşitul cer-



cetării, înainte de oprirea prelucrării, se notează puterea electrică totală absorbită  $P_t$ .

Forța tangențială se calculează cu formula:

$$F_t' = \frac{\eta P_t}{100 B \cdot v_g} \quad , \quad [\text{N/mm}]$$

în care  $P_t$  - este puterea totală absorbită, măsurată în Watt;

$B$  - lățimea activă a sculei, mm ;

$v_g$  - viteza periferică a sculei, m/s ;

$\eta$  - randamentul transmisilor, care poate fi calculat în funcție de  $P_t$  și pierderile la mers în gol  $P_0$  :

$$\eta = 100 \frac{P_t - P_0}{P_t} \quad \%$$

Rugozitatea piesei e măsurată în minimum 5 locuri și apoi se calculează media valorilor obținute.

Aceste încercări se fac pentru minimum trei viteze de pătrundere, în fiecare caz rectificându-se același volum de material.

Pentru fiecare încercare se calculează  $t_e$ :

$$t_e = \frac{\sqrt[3]{D_p \cdot v_t}}{10^3 \cdot v_g} \quad , \quad [\text{mm}]$$

Pentru valorile calculate ale lui  $t_e$  se reprezintă valorile lui  $R_a$  (media celor cinci valori măsurate) și valorile lui  $F_t'$ . Din grafic se deduc coeficienții caracteristici  $R_{a0}$  și  $a$  precum și  $F_{t0}'$  și  $f_t'$ , și în final se calculează energia specifică  $e_{0.1}$ , J/mm<sup>3</sup>.

În partea de sus a diagramei este util să se treacă datele inițiale, iar după prelucrarea rezultatelor valorile coeficienților caracteristici  $R_{a0}$ ;  $f_a$ ;  $F_{t0}'$  și  $f_n$  precum și valoarea lui  $e_{0.1}$ .

### 5.7. Diagrame de calitate

După cum s-a evidențiat pe parcursul lucrării, calitatea suprafeței rectificată poate fi caracterizată în principal prin rugozitate ( $R_a$ ) și absența modificărilor structurale. Acest al doilea aspect se apreciază cantitativ prin nedepășirea la suprafața piesei a temperaturilor de revenire maxime admise pentru materialul rectificat.

Pentru câteva din oțelurile rectificată acestea sînt:

Tabelul 5.5

Material	Temperatura de călire °C	Temperatura de revenire °C	Duritate după revenire max HR
40C10	820-860	540-680	56
OLC45	840-860	550-650	50
Rul 2	790-810	150-200	63
Rul 1	800-810	150-200	63

În capitolul 3 s-a prezentat metoda de calcul a cîmpurilor de temperatură la rectificarea. Valoarea maximă a temperaturii se atinge la suprafața piesei, în banda de contact a sculei cu piesa și ea este caracterizată de temperatura adimensională  $\theta = \theta_{\max}$ .

Pentru a se asigura calitatea piesei rectificată în timpul procesului de lucru nu trebuie depășită temperatura maximă de revenire la suprafața piesei.

Parametrul  $\theta$  este o funcție de parametrul adimensional

$H = \frac{v_p \cdot h}{2a}$ , care caracterizează mărimea zonei de contact, materialul prelucrat și parametrii regimului de prelucrare ( $v_p$  și  $t$ ).

Pentru diferite valori ale lui  $H$ , programul de calcul prezentat în capitolul 3 dă cîmpul de temperaturi, din care rezultă

$\theta_{\max}$ .

Reprezentînd  $\theta_{\max}$  în funcție de  $H$  s-a stabilit o dependență de forma:

$$\theta_{\max} = 2,6 H^{0,584} \quad (5.18)$$

Temperatura maximă în timpul rectificării va fi:

$$T_{\max} = \frac{2qa}{v_p} \theta_{\max} + T_0 \quad (5.19)$$

în care  $T_0$  - este temperatura mediului ambiant, egală cu temperatura piesei la începutul rectificării. ...

Avînd în vedere că  $T_{\max} = T_{\max}(v_p, t)$  și  $R_a = R_a(v_p, t)$  se pot construi, pentru condiții date, (un material și o sculă abrazivă) o diagramă în care să se delimiteze regimurile de lucru  $(v_p, t)$  care asigură simultan rugozitatea impusă fără depășirea temperaturii admise.

Aceste digrame le numim diagrame de calitate.

Modul de obținere a diagramelor de calitate se prezintă pentru cazul rectificării cilindrice exterioare cu disc  $\varnothing 500 \times 80 \times 203$  din En40K6C a unui arbore  $\varnothing 60 \times 200$  mm executat din Rul 1, călit și revenit la HRC 60...62.

Se pleacă de la relația (5.1) pentru calculul rugozității:

$$R_a = 25,7 v_p^{0,6} s_1^{0,85} t^{0,75} \mu m$$

care pentru  $s_1 = 16$  mm/rot.piesă devine:

$$R_a = 6,54 v_p^{0,6} t^{0,75} \mu m \quad (5.20)$$

în care  $v_p$  - [m/min] și  $t$  - [mm]

Cu ajutorul acestei relații se construiește familia de curbe  $R_a(v_p, t) = \text{const.}$

Din  $H = \frac{v_p h}{2a}$  și  $2h = \sqrt{\frac{D_s D_p \cdot t}{D_s + D_p}}$  rezultă

$$H = 11,57 v_p t^{0,5} \quad (5.21)$$

în care  $v_p$  - [cm/s] și  $t$  - [cm]

Relația  $q = \frac{F_t \cdot v_p}{4,75 S}$ , pentru  $v_p = 32$  m/s = const.;  $F_t = 152,28 v_p^{0,7} t^{0,6}$

și  $S = B \cdot 2h$  devine

$$q = 62,97 v_p^{0,7} t^{0,1} \quad (5.22)$$

Introducînd (5.18), (5.21) și (5.22) în (5.19) se obține:

$$T_{\max} - T_0 = 357,6 v_p^{0,284} t^{0,392} \quad (5.23)$$

Punînd  $T_{\max} = 150^\circ C$  și  $T_0 = 20^\circ C$

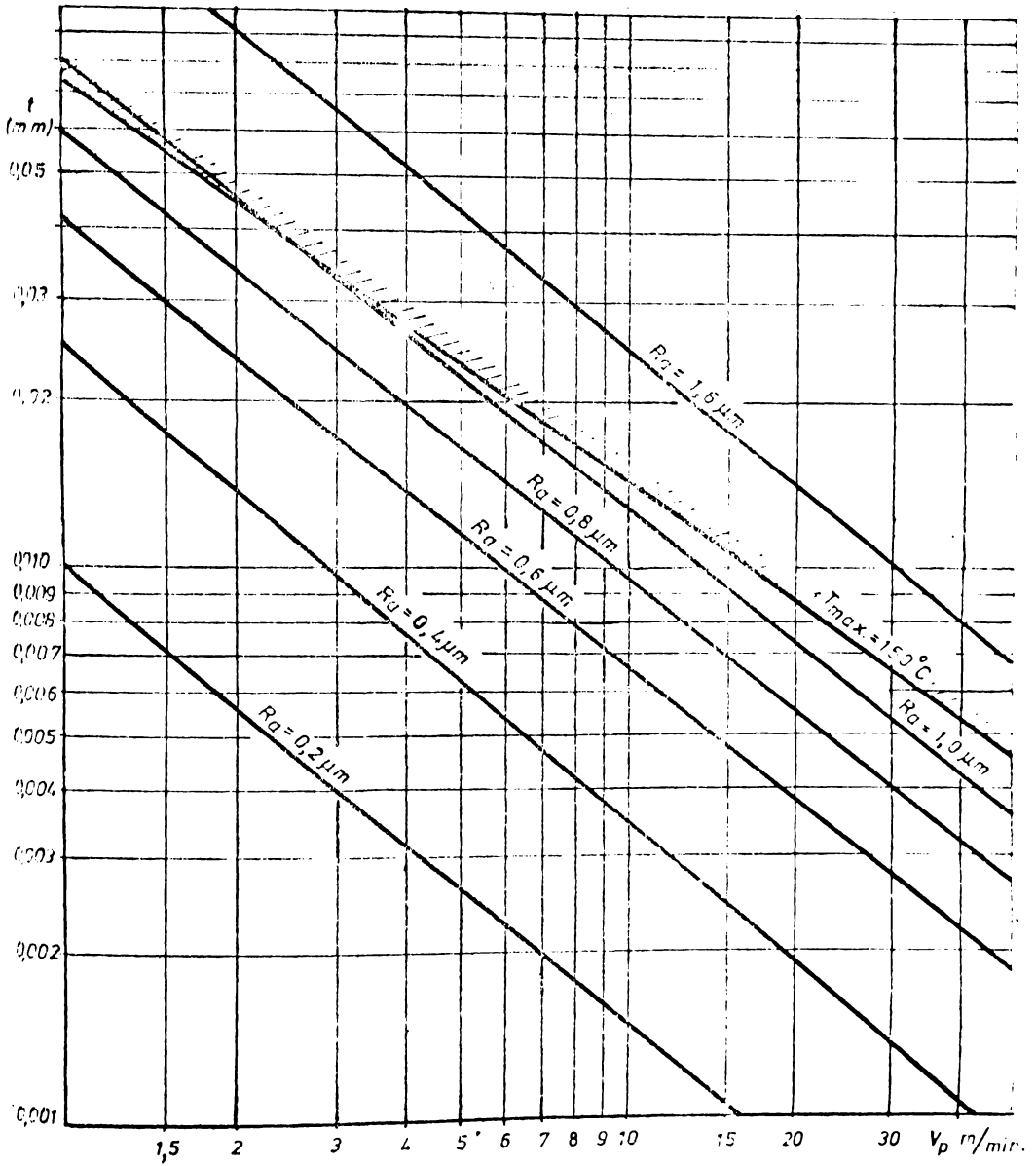


Fig. 5.38

rezultă:

$$v_p = \frac{0,0285}{t^{1,38}} \quad (5.24)$$

Se construiește în continuare, curba  $v_p(t)$  pentru  $T_{\max} = 150^\circ\text{C}$ .

Curbele  $R_a(v_p, t) = \text{const.}$  și curba  $v_p(t)$  se reprezintă în coordonate logaritmice în diagrama din fig. 5.38.

Din analiza diagramei de calitate reprezentată rezultă că, pentru valorile curente  $(v_p, t)$  se pot obține rugozități  $R_a \leq 0,8 \mu\text{m}$  fără pericolul apariției modificărilor structurale.

Dacă se lucrează cu regimuri de rectificare intense - pentru creșterea productivității, combinațiile de  $(v_p, t)$  trebuie alese la limita curbei  $T_{\max} = 150^\circ\text{C}$ .

Urmind metodologia expusă se pot construi diagrame de calitate pentru diferite materiale și scule abrazive, sub forma unor cataloage.

### Concluzii

Cercetările teoretice și experimentale prezentate în capitolul 5 aduc date noi privind corelațiile între parametrii tehnologici și calitatea suprafețelor rectificate.

Pentru mărcile de oțel studiate: OLC45, OLC60, 40C10, OSC10 Rul 1 și Rul 2,  $\text{Fe9CuMoInNiCr185-Ti}$  s-au stabilit formule analitice pentru calculul rugozității la rectificarea cilindrică exterioară, cu avans de trecere și cu avans de pătrundere (5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7). S-a arătat influența calității LRU asupra rugozității finale a suprafeței prelucrate.

Pentru obținerea unei rugozități bune a suprafeței rectificate sînt necesare 8-10 treceri de netezire.

S-a arătat că pentru oțeluri de durități apropiate, rectificate în aceleași condiții (aceeași sculă abrazivă și același regim de lucru) rugozitatea suprafeței, forțele de așchiere și puterea sînt aproape identice, ceea ce a permis construirea diagramelor de prelucrabilitate. Din diagrama de prelucrabilitate se poate calcula puterea necesară la rectificare și energia specifică.

Din analiza temperaturii maxime la rectificare, determinată analitic s-a stabilit o corelație  $v_p(t)$ , care împreună cu curbile de rugozitate  $R_a(v_p, t)$  s-au reprezentat în diagrama de calitate din fig. 5.38, care este o sinteză a legăturii material-sculă-regim de lucru, cu utilizare practică evidentă. Confirmarea rezultatelor prezentată în diagrama de calitate se prezintă în fig. 5.38, a, b, c, d. Structurile metalografice au fost obținute la microscopul electronic, la o mărire de 900.



Fig. 5.38 a.

Rull: Structura inițială, obținută după strunjire de finisare, călix și revenire  
la HRC 58...60.

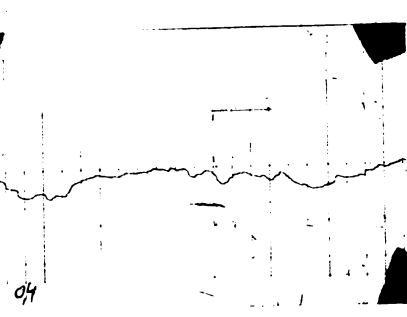
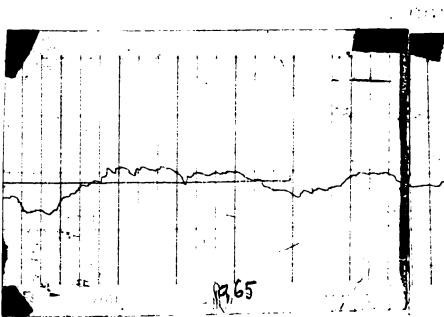


Fig. 5.38b

Fig. 5.38c

Rectificare prin pătrundere:  $v_p = 18,6 \text{ m/min}$ ;  
 $t = 0,005 \text{ mm}$ ;  $R_a = 0,65 \mu\text{m}$

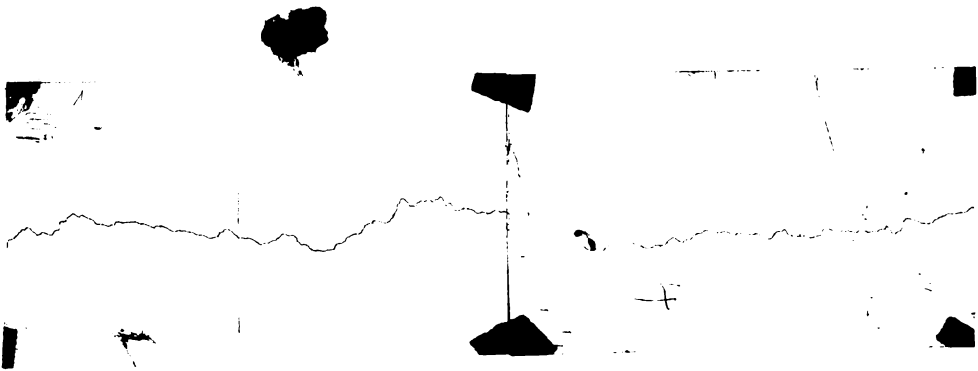
Rectificare prin pătrundere  
 $v_p = 12,6 \text{ m/min}$ ;  $t = 0,003 \text{ mm}$ ;  $R_a = 0,4 \mu\text{m}$



Fig. 5.38 d



Fig. 5.38 e



Rectificare prin pătrundere  $v_0 = 12,6 \frac{m}{min}$   
 $t = 0,008 mm$  ;  $R_a = 0,8 \mu m$

Rectificare prin pătrundere  
 $v_0 = 25,2 \frac{m}{min}$  ,  $t = 0,015 mm$   
 $R_a = 1,86 \mu m$



## Capitolul 6

### CONCLUZII. CONTRIBUTII ORIGINALE.

Lucrarea reprezintă un studiu detaliat, sub aspect teoretic și experimental, al problemei realizării preciziei suprafețelor rectificatice cilindric exterior.

Problema a fost rezolvată prin cercetarea interdependenței dintre toți factorii tehnologici care influențează prelucrarea.

Rezultatele cercetării au fost parțial aplicate în producție pe parcursul obținerii lor.

Prezentând în capitolul 1 stadiul actual și perspectivele rectificării, se subliniază faptul că rectificarea ocupă o pondere însemnată în volumul total al proceselor din industria constructoare de mașini, cu tendința de creștere pînă în anul 2000, date de prognoză apreciind că circa 25% din volumul prelucrărilor, care actualmente se realizează cu scule cu tășuri, se vor realiza la sfîrșitul secolului prin rectificare.

Este unghiul recunoscută importanța care trebuie să se acorde creșterii calității produselor, siguranței în funcționare și durabilității acestora, caracteristici care sînt asigurate în mare măsură de calitatea stratului superficial al pieselor componente. Calitatea stratului superficial se realizează la operațiile de finisare, între care rectificarea ocupă o pondere însemnată.

Este justificată în aceste condiții, prin actualitatea tehnico-economică, tema cercetării.

În capitolul 2 se definesc indicii de calitate ai stratului superficial al pieselor rectificatice. Orice neîncadrare în indicii de calitate prescriși se consideră defect.

La rectificarea cilindrică exterioară se consideră defect depășirea valorilor admise pentru abaterile de formă, ondulații, rugozitate, precum și existența zgîrieturilor, fisurilor, arsurilor, modificărilor structurale, etc.

Din cercetările efectuate s-au desprins concluzii privind cauzele defectelor de rectificare și se propun metode de remediere a acestora. Sintetizarea acestor concluzii în tabelul 6.1 este o contribuție personală adusă prin lucrare.

TABELUL 6.1

Nr. crt.	Defectul	Cauza	Modul de remediere
0	1	2	3
	<p><u>Abatere de formă</u></p> <p>1. Abateri de la circularitate</p>	<p>Scula prea compactă</p> <p>Lichid de aşchiere insuficient</p> <p>Găuri de centrare defecte</p> <p>Vîrfurile de centrare ale maşinii se mişcă</p> <p>Vîrfurile de centrare ale maşinii sînt uzate</p> <p>Antrenorul nu e paralel cu axa</p> <p>Presiune neegală pe inima de antrenare</p> <p>Scula neechilibrată</p>	<p>Să se rectifice mai deschis sau să se adopte o sculă cu structura mai puţin densă</p> <p>Să se folosească un debit mai mare de lichid de aşchiere</p> <p>Să se rectifice sau lepuiască găurile de centrare din piesă</p> <p>A se demonta şi curăţi vîrfurile de centrare; a se verifica să nu conţină aşchii</p> <p>A se verifica vîrfurile în scopul corectării unghiului</p> <p>Să se ajusteze faţa flanşei de antrenare şi antrenorul</p> <p>Să se prevadă un amortizor între antrenor şi inima de antrenare</p> <p>Să se echilibreze static şi/sau dinamic scula</p>
	<p>2. Abateri de la rectilinitatea şi/sau paralelismul generatorilor</p>	<p>Piesa arcuieşte sub acţiunea forţelor de aşchiere</p>	<p>Să se folosească lunete corect ajustate, să se reducă adîncimea de rectificare, sau să se folosească o sculă mai îngustă</p>
		<p>Dilatarea piesei datorită căldurii</p>	<p>Să se folosească mai mult lichid de aşchiere; să se reducă adîncimea de rectificare. Să se folosească o sculă cu structura mai rară</p>
		<p>Uzură excesivă a sculei</p>	<p>Să se folosească o sculă mai dură</p>

0	1	2	3
		Vîrfurile de centrare (din păpușa port piesă și din pinolă) sînt dezaxate	Se vor curăța vîrfurile, se vor centra vîrfurile
		Masa deranjată	Se va regla masa mașinii
	<u>Ondulații</u>		
3.	Ondulații longitudinale cu pas mic și egal	Joc prea mare între arborele sculei și lagăre	Se va roti scula în gol astfel încît lagărele să atingă temperatura de lucru înainte de a începe rectificarea. Se va folosi marca de ulei pentru lagăre indicată de producător. Se vor ajusta lagărele sau se vor monta lagăre noi
4.	Ondulații cu pas mediu și mare	Vibrații generale	Se va verifica rigiditatea mașinii, se va echilibra motorul electric de antrenare al sculei și roțile de curec. Se va verifica strîngerea în toate locurile prevăzute pentru ajustări
		Piesa este dezechilibrată	Se va echilibra piesa sau se va căuta o viteză a acosteia pentru care vibrația este redusă la minimum
5.	Ondulații lungi și regulat distanțate, formînd un desen ca o tablă de șah.	Scula abrazivă este dezechilibrată	Se va echilibra din nou, cu grijă, static și/sau dinamic scula de rectificat
6.	Ondulații destul de lungi, late și egal distanțate la intervale largi	Scula prea dură, de obicei lustruită sau încărcată	Se va înlocui scula cu una mai moale sau cu o structură mai puțin deasă, sau se modifică vitezele și avansurile pentru a face ca scula să rectifice mai moale
7.	Ondulații neregulate	Găurile de contra-re ale piesei sau lunetele incorrect sau insuficient lubrificate	Se va verifica starea și configurația găurilor de centrare și a lunetelor, ungîndu-se corect

0	1	2	3
8.	Ondulații care se întind pe întreaga lungime a piesei, cu pas mare, devenind mai proeminente către cap	Curea defectă sau flanșa de antrenare defectă	Se înlocuiește curea. Se verifică lagărele flanșoi de antrenare
9.	Ondulații în fază cu vibrațiile pardoselei	Vibrațiile clădirii	Se încearcă strângerea sau slăbirea șuruburilor de fundație; se adoptă amortizoare; se mută mașina într-o poziție mai bună; se prevede o fundație de beton independentă pentru mașină
10.	Ondulații la întimplare	Scula abrazivă defectuos ascuțită	Se ascute corect și se netezește scula abrazivă
11.	Ondulații transversale	Fața sculei este convexă	Se îndreaptă plan fețele frontale ale discului abraziv și se rotunjesc marginile acestuia
		Aliniere greșită	Se corectează alinierea vârfului din păpușa piesei și vârfului din pinolă; se poziționează corect masa mașinii; se verifică poziția diamantului față de sculă și se ascute din nou, corect scula abrazivă.
12.	Rugozitate Microasperități la întimplare însoțite de o finisare "oglin-dă"	Ardere în loc de așchiere	Se va folosi o sculă care așchiază ușor, cu structură mai puțin deasă; se va deschide scula prin ascuțire; se va folosi un lichid de așchiere mai subțire se va majora viteză piesei
13.	Rugozitatea prea mare	Scula cu granulație mare	Se va folosi o sculă abrazivă cu granulație mai fină

0	1	2	3
	Defecte de suprafață		
14.	Zgîrieturi largi, cu adîncime variabilă, neregulat distanțate.	Scula abrazivă prea moale, se rupe liantul	Se va folosi o <i>scula</i> mai dură sau se vor micșora viteza de rotație a piesei și viteza de avans longitudinal a mesei mașinii
15.	Zgîrieturi neregulate	Așchii care circulă liber	Se vor adopta colectoare de praaf
16.	Zgîrieturi neregulate în "coșă de pește"	Lichidul de așchiere murdar	Se vor curăța rezervorul de lichid, filtrul și apărătorile <i>sculei</i>
17.	Zgîrieturi fine în spirală	Diamantul de ascuțire în poziție proșită sau defect	Se va înlocui diamantul crăpat sau spart; se va folosi un avans longitudinal mai mic la ascuțirea <i>sculei</i> ; <i>scula</i> se va ascuți cu adîncime mică de pătrundere; se va asigura că diamantul și suportul său sînt bine fixate; se vor rotunji marginile <i>sculei</i> .
		Generatoarea <i>sculei</i> nu este paralelă cu piesa	Se vor alinia păpușa piesei, păpușa mobilă și masa și se va ascuți din nou <i>scula</i> abrazivă
		Piesa arcuiește	Se va reduce adîncimea de rectificare; se vor prevedea lunete suplimentare; după fiecare trecere se va modifica repertul între viteza avansului longitudinal și viteza de rotație a piesei
18.	Zgîrieturi spirale ondulate	Marginile <i>sculei</i> ciobite	Se vor rotunji marginile <i>sculei</i>
19.	Pete, mult distanțate între ele	Porțiuni lustruite pe <i>scula</i>	<i>Scula</i> se va ascuți, netezi și echilibra; se vor evita netele de ulei pe <i>scula</i> .
20.	Semne de frînare	Încălzire locală sau <i>scula</i> prea lată	Se slăbește curecua; se asigură că <i>scula</i> este adusă în contact cu piesa încet și ușor

0	1	2	3
21.	Arsuri	Sculă abrazivă incorct aleasă	Se va folosi o sculă mai moale sau se va re- gla mașina pentru a ob- ține o rectificare mai moale
		Regim de lucru greșit	Se vor corecta parame- trii regimului de rec- tificare; se va folosi o adâncime de rectifi- care mai mică, se vor corecta viteza de rota- ție a piesei și avansul longitudinal al mesei. Scula se va aduce ușor în contact cu piesa. Se va folosi un debit mai mare de lichid de aş- chiere

Pentru obținerea unor suprafețe prelucrate cu rugozitate mică la rectificarea pieselor din oțeluri călitate se fac în plus și următoarele recomandări.

Rectificarea de degroșare se face cu o sculă abrazivă cu granulația 63...40 și cu o adâncime de 0,01...0,02 mm pe cursă, rectificând în acest fel până la un diametru mai mare cu 0,04-0,05 mm decât cota finală.

Înainte de a începe finisarea trebuie curățite foarte bine de așchii apărutea sculei, spatole mașinii și rezorvorul lichidului de aşchiere. Lichidul de aşchiere se recomandă să fie filtrat în întregime. Găurile de centrare se vor lepui la geometria și netezimea prescrisă de standardele în vigoare și se vor unge corect.

Scula pentru rectificare va avea granulația 16...10, duritate medie spre moale (L, H, I, J) va fi corect ascuțită și netezită (cu 3-4 treceri fără pătrunderea diamantului), bine echilibrată.

Se vor alege un raport corect între viteza sculei și viteza de rotație a piesei ( $i=60...120$ ), un avans longitudinal mic ( $v_1 = 0,15 - 0,25$  mm/min), și adâncimea de rectificare 0,005-0,002 mm/cursă.

Se va rectifica astfel până se atinge cota finală, după care se vor mai face 3...10 treceri fără avans de pătrundere.

Prin corectările efectuate în lucrarea de față pe baza unui volum foarte mare de cercetări experimentale și analize teoretice au fost evidențiate noi aspecte tehnologice și astfel, aduse

contribuții personale, principalele fiind următoarele:

1. Evidențierea interacțiunii factorilor legați de piesă-sculă abrazivă - mașina uncaltă, parametrii regimului de rectificarea - LRU asupra rezultatului final al rectificării: calitatea suprafeței prelucrate.

2. A fost concepută o metodică de cercetare experimentală a preciziei geometrice a suprafețelor rectificate, prin controlarea simultană a nivelului vibrațiilor subansamblelor principale ale mașinii de rectificat, măsurarea forțelor de așchiere și a puterii. A fost determinată rigiditatea arborelui sculei de rectificare, ale arborelui port-piesă și pinolei păpușii mobile ale mașinii de rectificat RU-350.

3. S-a evidențiat faptul că numai precizia geometrică nu poate caracteriza calitatea suprafeței rectificate; având în vedere temperaturile ridicate din zona de contact sculă abrazivă-piesă se impune ca structura stratului superficial - obținută prin tratamentul termic să nu se modifice.

Prin finalizarea cercetării au fost aduse și o serie de contribuții originale, care sînt prezentate în continuare:

4. S-a realizat o modelare matematică a proceselor termice la rectificare, programul de calcul elaborat permițînd rezolvarea numerică a ecuației temperaturilor din stratul superficial.

5. S-au reprezentat grafic cu calculatorul cîmpuri de temperatură din stratul superficial al pieselor rectificate.

6. Se propun formule mai precise pentru calculul lungimii curbei de contact a grîuntelui abraziv cu piesa la rectificarea cilindrică exterioară.

7. Au fost proiectate și realizate vîrfuri dinamometrice cu traductori tensometrici rezistivi pentru măsurarea continuă, pe parcursul experimentărilor, a forțelor de așchiere normală și tangențială.

8. S-a dovedit că la rectificarea unor oțeluri de duritate apropiată rugozitatea suprafețelor, forțele și puterea de așchiere sînt practic constante.

9. S-au dedus relații empirice simple pentru calculul rugozității la rectificarea cilindrică exterioară cu avans de trecere și de pătrundere.

10. S-a elaborat metodică construireii diagramelor de prelucrabilitate și a diagramelor de calitate, care permit determinarea regimurilor de prelucrare care să asigure simultan rugozitatea impusă, nedepășirea temperaturii admise la suprafața piesei și obținerea

unei productivități maxime. Acestea se pot constitui în criterii pentru conducerea automată a procesului de rectificare cilindrică exterioară.

Cercetările din prezenta lucrare constituie contribuții la aprofundarea cunoașterii procesului formării calității suprafețelor rectificate, prin caracterul lor aplicativ contribuind la îmbunătățirea acestora.



TABEL DE DATE PENTRU DIAGRAMA DE PRELUCRABILITATE  
( IS.5.37)

Nr. crt.	Material	Scală abrazivă	Regim de rectificare	t. [mm]											
				v <sub>s</sub> m/s	n rot/min	v <sub>p</sub> m/min	C,001	C,002	C,003	C,004	C,005	C,01	C,012	C,015	
C		2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
			32	105	20										
1	Rul 1 Ø60x300mm	Disc plan 550C-80X 205													
1	HRC60...62	En16180													
2															
3															
4															
5															
media															
1															
2															
3															
4															
5															
media															
1															
2															
3															
4															
5															
media															

C	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
II	Rul 1	Disc plan	Rg	32	80	20								
1	Ø80x700mm	Ø500x80x	[µm]				0,24	0,54	0,65	0,74	0,85	1,30	1,71	1,75
2	HRC60..62	203					0,35	0,52	0,63	0,73	0,82	1,36	1,76	1,75
3		En16KSC					0,27	0,50	0,65	0,77	0,87	1,32	1,65	1,78
4							0,24	0,50	0,66	0,75	0,85	1,35	1,66	1,72
5							0,35	0,52	0,66	0,75	0,86	1,42	1,72	1,75
media							0,35	0,52	0,65	0,75	0,85	1,35	1,70	1,75
1			Fl				5,5	6,5	7,5	8,1	9,0	12,1	13,5	14,0
2			[µm]				5,3	6,3	7,8	8,0	8,0	12,3	13,5	14,2
3							5,6	6,5	7,1	8,2	8,3	12,5	13,8	14,1
4							5,2	6,7	7,5	8,0	8,1	11,9	12,6	14,3
5							5,9	6,5	7,6	8,2	8,6	12,2	14,1	14,2
media							5,5	6,5	7,5	8,1	8,0	12,2	13,5	14,16
1			Fl				2,0	2,2	2,7	3,0	3,3	4,4	4,8	5
2			[µm]				2,1	2,3	2,6	2,8	3,1	4,3	4,7	5
3							2,2	2,4	2,5	2,9	3,2	4,2	4,5	5,1
4							2,0	2,1	2,7	2,9	3,4	4,1	4,7	5,2
5							2,2	2,5	3,0	3,1	3,0	4,5	5,3	4,7
media							2,1	2,3	2,7	2,9	3,18	4,3	4,8	5

Valorile  $v_p$  - (m/min) din relația 5.20 pentru  
reprezentarea curbelor  $R_a(v_p, t) = \text{const.}$

(fig.5.38)

t mm	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,6
	$v_p$ m/min							
0,001		17,2	54,4	106,8	168,7	247,4	336,9	543,3
0,002		7,23	22,87	44,92	70,93	104,03	141,6	228,39
0,005		2,30	7,28	14,3	22,6	33,2	45,08	72,7
0,010		0,97	3,06	6,00	9,3	14,0	18,99	30,55
0,015		0,59	1,87	3,62	5,7	8,4	11,41	18,4
0,020		0,40	1,28	2,50	4	5,85	8,26	12,8
0,025		0,30	0,97	1,90	3	4,40	6,03	9,7
0,030		0,24	0,77	1,52	2,30	3,534	4,80	7,74

Notă: 1. Valorile  $v_p$  s-au calculat din relația (5.20) punând

$R_a = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2$  și  $1,6 \mu\text{m}$ .

2. La trasarea curbelor  $R_a(v_p, t)$  se iau în considerare valorile lui  $v_p$  tehnic acceptabile,  $v_{p=2} + 40$  m/min.



B I B L I O G R A F I I

1. N. Ceșușescu - Raport la Cel de al XIII-lea Congres al Partidului Comunist Român - Editura Politică București 1984.
2. N. Ceșușescu - Cuvântare la Congresul Științei și Învățământului, Editura Politică, București 1985.
3. - - Programul - directivă de cercetare științifică, dezvoltare tehnologică și introducerea progresului tehnic în perioada 1981-1990 și direcțiile principale până în anul 2000, Editura politică București 1979.
4. Balakçin B.S. i.dr. - Adaptivnoe upravlenie stankami, Moskva, Maşinostroenie, 690 p.
5. Baikalov A.K., Dubovnik N.P. - Rejuşciaia sposobnosti şlifoval-nîn Krugov posle pravki ih almaznîmi instrumentami, Stanki i instrument Nr.2, 1968 p. 67-68.
6. Bickel A.E. - Die Bezugsstrecke oder Bezugslänge für die Rauheitsmessung, Werkstattstechnik 60/1960 p.294-301.
7. Bogomolov N.I. - O rabote trenia v abrazivnîh proţessah. Trudî VNIIS Nr.1 "Maşinostroenie" 1965 s. 72-79.
8. Bogomolov N.I., Novikova L.N. - Issledovanie trenia i iznosa kristallov karbida kromia i elektrokorunda v zavisimosti ot orientirovki ih kristallograficeşkih ploskostei. Teoria trenia i iznosa M. "Nauka", 1965 p.148-151.
9. Bogomolov N.I. - Issledovanie procinosti abrazivnîh zeren v proţesse micrezania - "Zavodşkaia Laboratoria" 1966, Nr.3, p.353-354.
10. Bogomolov N.I., Saiutin G.I., Tikedji B.A. - Şubmicrorelief şlifovannoi poverhnosti - Stanki i instrument, 1969-Nr.7 p.37-38.
11. Borisoglebskii A.E. - Strukturnîi analiz proţesse şlifovania trudno obrabativşemîh splavov, Teoria i praktika almaznoi obrabotki, Moskva, NIIAS, 1969 p.61-72.
12. Borgordski E.S. - Scule aşchietoare din policristale de nitrură cubică de bor, PTNB, Conferinţa Almaz 1975 în BIT nr.2/1976.

13. V. Botiș, V. Bologan, V. Tanu - Metode de control a formei și poziției pieselor, Editura Tehnică, București 1973.
14. P. Dodoc - Metode și mijloace de măsurare moderne în mecanica fină și construcția de mașini, Ed. Tehnică, 1978.
15. P. Dodoc - Metrologie generală, Ed. Tehnică 1974.
16. Dutschke W. - Messen der Oberflächenrauheit an bewegten Flächen, Werkstattstechnik nr. 7/1973 p. 416-418.
17. Enache St. - Calitatea suprafețelor prelucrate, Ed. Tehnică 1966.
18. Dyer H. B. - Grinding with diamond abrasives Part 1-stell "De Beers industrial diamond" 1969, p. 1-15.
19. Eckolt K. și Hillmann W. - Bestimmung der Rauheit technischen Oberflächen mit dem Raster Elektronenmikroskop durch Kontaminationslinie.
20. Erben A. - Optische Antasten des Prüflings mit Hilfe der Interferenzlinie bei Längen und Winkelmessungen am Messmikroskop BK 70x50 des VEB Carl Zeiss - Jena, Feinoptotechnik 21 Nr. 2/1972 p. 61-64.
21. Feinberg B. - Scule șchietoare din diamant. Manufacturing Engineering & Management, ianuarie 1974.
22. Ferscher A. F. - Berührungsfreie Antastung technischer Oberflächen. Feinwerktechnik und Messtechnik 84/1976 p. 72-74.
23. Gavrilaș I. ș. a. - Tehnologii de prelucrare cu scule din materiale dure și extradure, Editura tehnică, București 1977.
24. Grinding high strength thermal resistant materials - Grind. and Finish 1966, Nr. 9 p. 44-46.
25. Gwiazdowski S. - Măsurarea rugozității suprafețelor cu ajutorul traductorului capacitiv, după Pomiarų Automatica i Kontrols (Polonia) nr. 10-11/1971 în BIT nr. 3/1972.
26. R. Hahn, R. Lindsay - Basic relationship in precision grinding - Machinery - July 1971.
27. Hillmann W., Veigländer H. - PEB - Einstellnormal zum Kalibrieren der Vertikal Vergrößerung von Oberflächenmessgeräten Messtechnik 81/1973 p. 7-22.
28. Hrukov V. A. - Slifovanie žeroprocinňh splavov, M. Mașinostroenie, 1964.
29. Hudobin L. V. - Smazocino-ohlajdajușcie sredstva, primenișemie pri șlifovanii, M. Mașinostroenie, 1971 214 p.

30. Iașcerițin P.I. - Povîșenie ekspluatationnîh svoistv șlifovannîh poverhnostei, Minsk, Nauka i tehnika, 1966.
31. Iașcerițin P.I., Jalnerovici E.A. - Șlifovanie metallov, Minsk, Belarusi 1963.
32. Iașcerițin P.I., Zaițev A.G. - Povîșenie kacestva șlifovalnîh poverhnostei i rejușcih svoistv abrazivno-almaznovo instrumenta. Minsk, "Nauka i tehnika", 1972, 475 p.
33. Iașcerițin P.I., Rîjov E.V., Avercenkov V.I. - Tehnologiceskaia nasledstvennosti v mașinostroenii, Minsk, izdatelstvo Nauka i tehnika, 1977.
34. Iașcerițin P.I. - Tehnologiceskaia nasledstvennosti i ekspluatationnîe svoistva șlifovannîh detaiei, Minsk, Nauka i tehnika, 1971.
35. Ippolitov G.M. - Abrazivno - almaznaia obrabotka, M. Mașinostroenie, 1969, 331 p.
36. Ionescu R. - Utilizarea diamantelor sintetice la prelucrarea convențională a metalelor. Sinteză bibliografică în BIT.- Prelucrarea metalelor prin așchiere Nr. 2/1972.
37. Ippolitov G.M. - Abrazivnîe instrumentî - Stanki i instrument, 1967, Nr.11, p.24-28.
38. Kolev K.S. - Voprosî tocinosîi pri rezanii metallov Moskva, Mașghiz-1966.
39. Komissarjevskaja V.N., Lurie M.Z. - Vîsokoproizvoditelnoe șlifovanie, Moskva, Mașinostroenie, 1976.
40. Konovalov A.G., Sidorenko V.A. - Cistovaja i uprociniaiușciaia rotaționnaia obrabotka poverhnostei Minsk, "Vîșșaja škola", 1968, 363 p.
41. Korciak S.N. - Progressivnaia tehnologiia i avtomatizația kruglogo șlifovanja M. Mașinostroenie 1968, 108 p.
42. Kragelski I.V. - Trenie i iznos, M. Mașghiz, 1962.
43. Kudasov G.F., Kartășev A.M. - Nekotorîe voprosî primeneniia șlifovalnîh krugov iz menceșunđa, "Vestnik mașinostroenia", 1964 Nr.12 p.50-52.
44. Kudinov V.A., Grișin V.M. - Dinamiceskie oisostotnîe karakteristiki proșessa șlifovanja, Stanki i instrument 1972, Nr.1, p.7-9.
45. Kulatov Iu.M., Hruikov V.A., Dunin - Barkevskii I.V. - Predotvrașenie defektov pri șlifovanii, Moskva, Mașinostroenie, 1975.

46. Lindenbeck D.A. - Basic parameters for grinding with diamond wheels "Industrial diamond review" oct.1971, p.400-407.
47. Lişanov V.S., Spotakovskii D.F. - Oblasti effektivnogo primeneniia şlifovalnih krugov iz elbora - Stanki i instrument, 1972 nr.6, p.5-6.
48. Loladze T.N., Bekuciava G.V. - Iznoş almazov i almaznih krugov, Maşinostroenie, 1967, 112 p.
49. Lurie G.B., Komissarjevskaja V.N. - Şlifovanie stanki i ih naladka, Moskva, Vişşiaia şkola, 1976.
50. Malkin B.M. - Tehnologhia profilnogo şlifovalnia Leningrad, Maşinostroenie, 1976.
51. Makarov A.D. - Optimizaţia proşessov rezania, Moskva, Maşinostroenie, 1976.
52. Maslov E.N. - Teoria şlifovanii materialov - Moskva, Maşinostroenie 1974.
53. Maslov E.N., i.d. - Vnedrenie almazov v promişlennosti, Moskva, NIIMAS, 1966.
54. Maslov E.N. - Mehanizm raboti abrazivnogo zerna pri şlifovanii, în c. Osnovniie voprosi vişokoproizveditelnogo şlifovanii, Moskva, Maşghiz 1960, p.5-29.
55. Maslov E.N. - Vişokoproizveditelnoe şlifovanie A.N. SSSR, 1962.
56. Natalin A.A. - Kacstvo provernosti i ekspluatacionnie svoistva detalei maşin, Moskva, Maşghiz, 1972.
57. Natalin A.A. - Tocnosti mehaniceskoi obrabotki i proiectirovanie tehnologhiceskih proşessov, M-L Maşinostroenie, 1970, 315 p.
58. Natalin A.A. - Kacstvo provernosti i ekspluatacionnie svoistva maşin, M-L, Maşghiz 1966, 252 p.
59. Muşianko V.I. - Abrazivnaia zatocika i dovodka metallorejuşcih instrumentov, M-L Maşinostroenie 1967, 134 p.
60. -Maşini unelte francoze prezentate la a XII-a Expoziţie europeană de maşini-unelte de la Milano în BIT, Prelucrarea metalelor prin aşchiere nr. 5/1972.
61. -Automatische Rundschleifmaschine SKR 16A Industrie Anzeiger nr.36/1972, p.824-853.
62. -Manualul inginerului mecanic - Tehnologhia construcţiilor de maşini, Editura tehnică 1972.



63. - Noutăți în construcția mașinilor de rectificat. traducere din am. în Machinery and Production Engineering vol.121 nr.2116/16 aug.1972 p.217 și 228-232 și nr.2119/23 aug.1972 p.276-279.
64. Naerman M.S., Pekrev L.E. - Slifovanie bistrorejuščih stalei krugami iz elbora - Stanki i instrument, 1972 s. 8-10.
65. Ovnikov A.A. - Materiale policristaline extradure și domeniul lor de utilizare. Conferința Almaz 1975 în BIT nr. 2/1976.
66. Podzei A.V. - Tehnologicheskie ostarocinje napriajenia, M. Mašinostroenie, 1973, 216 p.
67. Pötschke H. - Schutzvorrichtungen an Werkzeugmaschinen Technische Rundschau, vol.63 nr.31/1971 p.9-10.
68. Prohorovskii A.D., Kaciov I.I. - Primenenie elbora dlja šlifovanija rezbi-hodovih vintov - Stanki i instrument, 1972 Nr.6 p.6-8.
69. Prinz D.G. - Un nou procedeu pentru măsurarea rugozității Din Industrie Anzeiger nr.93/1971 în D.S.Tehnica măsurării nr.10/1971.
70. - Rectification au diamant du carbure de tungstène, Machine moderne nr.748, iulie 1971.
71. Rittman, K. - Cu privire la problema măsurării rugozității pe suprafețe realizate tehnic. Din Industrie Anzeiger 93/1971 p.1126-1129 în D.S.Tehnica măsurării 10/1971.
72. Rišov B.V., Suslov A.G., Fedorov V.P. - Tehnologicheskoe obospo-cenie eksploatacionnih svoistv detalei mašin Moskva, Mašinostroenie, 1979.
73. Salutin G.I., Snovidov V.M., Bogomolov N.I. - Issledovanie fizikohimicheskikh proçessov, proçishodiaščih v poverhnosti šlifovanija detalei iz titanovih splavov, Mašinostroenie, 1971 Nr.5 p.22-24.
74. Salutin G.I., Smirnov V.A., Grigorjeva K.T. șa. - Krugi dlja šlifovanija titanovih splavov - Stanki i instrument 1970 Nr.5 p.15.
75. Salutin G.I., Bogomolov, N.I. i dr. - Vıber šlifovalnih krugov pri obrabotke titanovih splavov - Vestnik mašinostroenia 1972 Nr.5 p.65-67.
76. Salnov V.A. - Slifovanie i polirovanie visokoprocınih materialov, M. Mašinostroenie, 1972, 272 p.

77. Scheiding U., Weingraber H., u.a. - Bezugssystemstützzyylinder. Ein Beitrag zur räumlichen Beschreibung quasizylinder Werkstücke und deren Abweichungen von geometrisch idealen Zylinderform, in Fertigung 66/1976 S.73-76.
78. Schlötterer H. - Zur Definition und Messung des Glanzes metallischen Oberflächen, Metalloberfläche, vol.16/1972 nr.2 p.49-52, nr.3 p.81-85, nr.5 p.141-147.
79. - Schleifen mit ungebundenem Korn, in Werkstattstechnik, vol.61 nr.7 iulie 1971 p.445.
80. Sipașlov V.A. - Toplovîe protsessî pri șlifovanii i upravlenie kacostvom poverhnosti, Moskva, Mașinostroenie, 1978.
81. - Spravocnik metallista vol.4, Moskva, Mașinostroenie 1977.
82. Sturzu A, Bădescu Gh., Militaru C., Brăgăru A., - Indrumător practic uzinal și de laborator pentru controlul preciziei de prelucrare în construcția de mașini. Ed.Tehnică București, 1976.
83. Serîșev V.I., Iakimov A.V., Kazimircik I.A. - Silovîe zavisimosti pri șlifovanii tarelcistîmi krugami - Stanki i instrument, 1965 Nr.1 p.9-10.
84. - Sinteticeskie almazî v promșlennosti, Kiev Naukovo dumka, 1974.
85. - Tendințe de dezvoltare și exemple constructive prezentate la expoziția europeană de mașini-unelte din 1971, de la Milano.- în BIT Prelucrarea metalelor prin așchiere, Nr.2/1972.
86. Thiede K. - Spezielle elektronische Messteuerungen für Schleifmaschinen. Industrie - Anzeiger vol.93, nr. 97/1971 p.2452-2459.
87. Tihonov V.M. - Omlajdaiușcie svoistva raspîlennîh smazocino-ohlajdaiușcih jidkostei, - Stanki i instrument, 1966 Nr.8 p.6-9.
88. Trefilov V.I. ș.a. - Domenii de utilizare eficientă și condițiile de exploatare ale sculelor armate cu hexanit-R, Conferința Almaz 1975, în BIT nr.2/1976.
89. I.Voia - Realizări actuale în domeniul aplicării rectificării cilindrice exterioare - Referat nr.1 (1977).
90. I.Voia - Factori care influențează precizia geometrică la rectificarea cilindrică exterioară-Referat nr.2 (1978).

91. I.Voia - Instalații experimentale, metodologia de măsurare a preciziei geometrice - Referat nr.3 (1978).
92. I.Voia, I.Schwainert - Studiu privind adaptarea la ICMR a unor aparate pentru control activ, fabricate în țară - în Volumul Sesiunii de comunicări tehnico-științifice a cadrelor didactice și studenților - I.S.R. 1976.
93. I.Voia - Analiza lungimii curbei de contact a grăuntelui abraziv cu piesa la rectificarea cilindrică exterioară. Sesiunea de comunicări tehnico-științifice, I.S.R. 1977.
94. I.Voia - Influența regimului de lucru asupra preciziei geometrice a pieselor din oțel  $109\text{CuMoMnNiCr185-Ti}$  rectificate cilindric - în Volumul II al Celei de a III-a Conferințe Naționale din domeniul proceselor și utilajelor de prelucrare la roca (PUPR), Timișoara 1978.
95. I.Voia - Vîrf tensometric rezistiv pentru măsurarea componentelor forței de aşchiere la rectificarea cilindrică exterioară - în Volumul II al celei de a III-a Conferințe Naționale PUPR, Timișoara, 1978.
96. I.Voia - Forțele de aşchiere la rectificarea cilindrică exterioară a oțelului austenitic  $109\text{CuMoMnNiCr185-Ti}$  - a III-a Conferință Națională PUPR, Timișoara 1978.
97. I.Voia - Influența parametrilor regimului de lucru asupra preciziei suprafețelor rectificate cilindric - Sesiunea de comunicări tehnico-științifice a cadrelor didactice și studenților, I.S.R. 1979.
98. M.Golumba, I.Voia - Tensiuni de suprafață la piesele din oțel prelucrate prin rectificare - Idem, I.S.R. 1979.
99. I.Voia - Modificarea interoperațională a preciziei pieselor rectificate cilindric, Idem I.S.R. 1979.
100. I.Voia - Rugozitatea suprafețelor rectificate cilindric exterior, în Volumul de lucrări al Sesiunii de comunicări tehnico-științifice ale cadrelor didactice și studenților, I.S.R. 1981.
101. I.Voia - Coeficienți specifici pentru rectificarea cilindrică exterioară, Idem I.S.R. 1981.

102. I. Voia - Diagramă de prelucrabilitate la rectificarea cilindrică exterioară cu avans de pătrundere a oțelurilor Rul 2 călite, Idem I.S.R. 1981.
103. I. Voia - Studiul prelucrabilității prin rectificare a stellitului, în Volumul Sesiunii de comunicări științifice I.S.R. 1983.
104. I. Voia - Căi de reducere a temperaturii la rectificare, idem I.S.R. 1983.
105. I. Voia - Formarea proprietăților fizico-mecanice și structurii suprafeței pieselor rectificate cilindric - Simpozionul "Realizări și orientări în cercetarea și producția mașinilor-unelte de prelucrare prin abrazare și a echipamentelor hidraulice", I.P.Cluj 1983.
106. I. Voia - Influența parametrilor regimului de rectificare cilindrică asupra rugozității și microdurității suprafețelor prelucrate la piese din oțeluri de scule, Idem I.P.Cluj 1983.
107. I. Voia - Diagrama pentru determinarea condițiilor de rectificare în vederea obținerii calității impuse a suprafeței prelucrate, Idem I.P.Cluj, 1983.
108. - Contract nr.127/1975 - Studii și experimentări privind introducerea controlului activ la prelucrarea prin așchiere pe mașini-unelte, beneficiar I.C.M. Reșița.
109. - Contract nr.23/1982 - Cercetări privind uzurile subansamblelor principale ale motoarelor Diesel tip R251 F10 și a boghiurilor locomotivelor Diesel electrice de 3000 și 4000 CP. Tehnologii și dispozitive pentru remedierea uzurilor - beneficiar I.M.M.R. Craiova.
110. Weingraber H., u.a. - Einheitliche Definition, räumliche Messung und eindeutige gegenseitige Abgrenzung von Formabweichung, Welligkeit und Rauheit, in Feingrätetechnik nr.2/1976 S.58-62.
111. Weyers H.W. - Măsurarea rugozității suprafețelor. Din Canadian Machinery and Metalworking, Canada nr.83/1972 în D.S.Tehnica Măsurării nr.3/1973 p.173.

## C U P R I N S

	pag.
Prefață .....	3
NOTAȚII .....	6
<b>1. PROBLEME GENERALE</b>	
1.1. Scurt istoric. Studiul actual și perspectivele rectificării .....	9
1.2. Particularități ale procesului de rectificare .....	16
1.3. Indicatori de eficiență a rectificării .....	24
1.4. Concluzii .....	26
<b>2. CALITATEA SUPRAFEȚELOR RECTIFICATE</b>	
2.1. Indicii de calitate ai suprafețelor rectificate .....	27
2.2. Undulația suprafețelor rectificate .....	30
2.3. Rugozitatea suprafețelor rectificate .....	34
... 2.3.1. Influența avansului longitudinal .....	36
... 2.3.2. Influența vitezei de rotație a piesei asupra rugozității suprafeței prelucrate .....	39
... 2.3.3. Influența adânciturii de rectificare, egală cu avansul transversal .....	39
... 2.3.4. Influența vitezei de așchiere .....	40
2.3.5. Influența caracteristicilor sculei de rectificat .....	41
2.4. Tensiuni remanente .....	43
2.5. Arsuri .....	46
2.6. Fisuri și microfisuri .....	49
<b>3. DETERMINAREA CIMPULUI TERMIC LA RECTIFICARE</b>	
3.1. Modelarea matematică a proceselor termice la rectificare .....	52
3.2. Determinarea sursei termice în zona de contact a distului de rectificat cu piesa .....	57
3.3. Determinarea lungimii curbei de contact la rectificarea cilindrică exterioară .....	59
3.4. Rezolvarea numerică a ecuației temperaturilor la rectificare .....	64
3.5. Exemplificarea aplicării metodei de calcul a temperaturilor la rectificare .....	68
<b>4. ECHIPAMENTUL DE CERCETARE. MARIMI DE MASURAT</b>	
4.1. Mașina de rectificat cilindric RU-350 .....	75

4.1.1. Determinarea rigidității subansamblelor principale ale mașinii de rectificat RU-350...	77
4.2. Aparatură folosită .....	80
4.2.1. Rugozimetrul Hommel-Tester tip T .....	80
4.2.2. Aparate pentru măsurarea vibrațiilor subansamblelor mașinii de rectificat RU-350...	83
4.2.3. Vîrf tensometric rezistiv pentru măsurarea componentelor forței de aşchiere la recti- ficarea cilindrică .....	88
4.2.4. Complex de control activ pentru suprafețe cilindrice continue tip CAS(MI)C-2E' .....	91
4.2.5. Trusă Wattmetrică tip QN11 .....	94
4.3. Mărimi de măsurat .....	95
5. EXPERIMENTARI. PRELUCRAREA DATELOR EXPERIMENTALE	
5.1. Date generale .....	96
5.2. Rezultate experimentale .....	99
5.2.1. Rectificare cilindrică exterioară cu avans longitudinal .....	99
5.2.2. Rectificarea cilindrică exterioară cu avans de pătrundere .....	107
5.3. Influența netezirii la rectificare asupra calității stratului superficial al pieselor .....	110
5.4. Influența calității lichidului de răcire-ungere (LRU) asupra calității suprafețelor rectificate.....	112
5.5. Influența operațiilor anterioare rectificării asupra preciziei geometrice a suprafețelor rectificate .....	117
5.6. Diagrame de prelucrabilitate .....	121
5.7. Diagrame de calitate .....	127
6. CONCLUZII, CONTRIBUTII ORIGINALE .....	133
ANEXA Nr.1 .....	141
ANEXA Nr.2 .....	143
BIBLIOGRAFIE .....	145