

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" TIMIȘOARA  
FACULTATEA DE MECANICĂ  
CATEDRA "TEHNOLOGIE MECANICĂ"

---

---

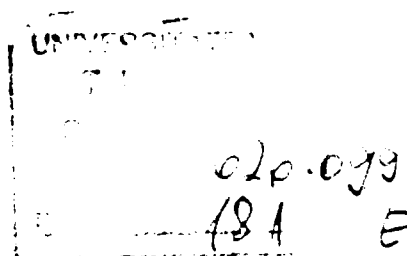
ing. IOAN-VASILE GROZA

CERCETĂRI TEORETICE ȘI  
EXPERIMENTALE PRIVIND OPTIMIZAREA  
PRELUCRĂRII CU MEDII ABRAZIVE  
MAGNETO-REOLOGICE

TEZĂ DE DOCTORAT

BIBLIOTECA CENTRALĂ  
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"  
TIMIȘOARA

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC  
prof.dr.ing. ALEXANDRU NICHICI



2000

# C U P R I N S

Abrevieri, notații, și simboluri .....	5
Cap.1 Introducere .....	9
Cap.2 Stadiul actual al prelucrărilor cu medii abrazive magneto-reologice .....	15
2.1. Evoluția aplicațiilor industriale ale prelucrărilor cu medii abrazive magneto-reologice .....	15
2.1.1. Particularitățile de bază ale abrazării .....	15
2.1.2. Medii abrazive .....	17
2.1.3. Medii abrazive magneto-reologice (MAMR) .....	18
2.2. Fenomenologia interacțiunii particulă abrazivă-substanță .....	22
2.2.1. Mecanismul formării așchiei .....	22
2.2.2. Modelul granulei singulare .....	25
2.2.3. Modelul granulelor multiple .....	30
2.2.4. Forțe motrice pentru interacțiunea în spațiul de lucru la prelucrările cu MAMR .....	33
2.2.4.1. Interacțiuni în spațiul de lucru la prelucrările cu MAMR utilizând materiale abrazive feromagnetice .....	33
2.2.4.2. Interacțiuni în spațiul de lucru la prelucrările cu MAMR utilizând materiale abrazive nemagnetice .....	38
2.3. Procese tehnologice de prelucrare cu MAMR .....	41
2.3.1. Procese tehnologice de prelucrare cu MAMR utilizând materiale abrazive feromagnetice .....	41
2.3.2. Procese tehnologice de prelucrare cu MAMR utilizând materiale abrazive nemagnetice .....	47
2.4. Concluzii și probleme deschise privind prelucrările cu MAMR ....	50

<b>Cap.3 Modele generale ale sistemelor tehnologice de prelucrarea cu medii abrazive-magnetoreologice .....</b>	<b>52</b>
3.1. Structura sistemelor tehnologice de prelucrare cu MAMR .....	52
3.1.1. Structura morfologică .....	52
3.1.2. Structura funcțională .....	54
3.2. Abordarea sistemică .....	55
3.2.1. Modelul intrări - ieșiri al sistemelor tehnologice de prelucrare cu MAMR .....	55
3.2.2. Funcțiile obiectiv pentru modelul generalizat al sistemului .....	56
3.2.3. Factorii de influență pentru modelul generalizat al sistemului .....	57
3.3. Modelarea matematică a capacității abrazive a MAMR .....	62
3.3.1. Condiții inițiale și ecuații fundamentale .....	62
3.3.1.1. Condiții inițiale.....	62
3.3.1.2. Ecuații fundamentale .....	63
3.3.2. Model matematic pentru determinarea coeficientului de reducere a secțiunii active a granulelor abrazive .....	64
3.3.3. Model matematic pentru determinarea volumului de abraziv susceptibil la levitație .....	67
3.3.4. Model matematic pentru determinarea capacității abrazive a MAMR .....	71
3.4. Concluzii .....	74
<b>Cap.4 Modelarea experimentală a funcțiilor obiectiv ale prelucrării cu medii abrazive magneto-reologice .....</b>	<b>77</b>
4.1. Obiectivele și metodica modelării experimentale .....	77
4.2. Prezentarea standului experimental utilizat .....	79

4.3. Modelarea experimentală a capacității abrazive a MAMR ( $p$ ) .....	84
4.3.1. Proiectarea și realizarea experimentului .....	84
4.3.2. Prelucrarea rezultatelor măsurătorilor .....	88
4.3.3. Concluzii .....	93
4.4. Modelarea experimentală a productivității ( $Q_p$ ) și a rugozității suprafețelor ( $R_a$ ) prelucrate cu MAMR .....	93
4.4.1. Proiectarea și realizarea experimentului .....	94
4.4.2. Prelucrarea rezultatelor măsurătorilor .....	96
4.4.3. Concluzii .....	111
4.5. Modelarea calității suprafețelor prelucrate cu MAMR cu ajutorul unor parametri de distribuție ai rugozității .....	112
4.5.1. Descrierea standului pentru măsurarea rugozității .....	112
4.5.2. Prelucrarea datelor achiziționate și trasarea profilogramelor .....	114
4.5.3. Analiza principalilor estimatori de verosimilitate ai rugozității .....	115
4.5.4. Concluzii .....	122
4.6. Posibilități de optimizare a prelucrărilor cu medii abrazive magneto-reologice .....	123
Cap. 5 Concluzii generale și contribuții originale .....	127
5.1. Concluzii generale .....	127
5.2. Contribuții originale .....	128
5.2.1. Contribuții în domeniul cercetării teoretice.....	128
5.2.2. Contribuții în domeniul cercetării experimentale .....	129
Bibliografie .....	131

## ABREVIERI, NOTAȚII ȘI SIMBOLURI

$a$ [mm]	⇒ dimensiunea cubului asociat particulei abrazive;
$B$ [T]	⇒ inducția magnetică;
$B_i$ [T]	⇒ inducția câmpului magnetic din interiorul granulei abrazive;
$B_{ir}, B_{i\alpha}$	⇒ componentele câmpului magnetic în coordonate cilindrice;
$B_x, B_y, B_z$	⇒ componentele câmpului magnetic într-un sistem de referință cartezian;
$C$ [%]	⇒ concentrația materialului abraziv în MAMR;
$c_{din}(z)$ [-]	⇒ densitatea dinamică a tășurilor în raport cu adâncimea $z$ ;
$C_{din}(z)$ [-]	⇒ numărul dinamic al tășurilor pe unitatea de lungime;
$C_g$	⇒ coeficient geometric asociat materialului abraziv;
$d$ [mm]	⇒ diametrul suprafeței piesei care se prelucrează;
$F$ [N]	⇒ forța de interacțiune dintre dipolul magnetic și câmpul în care se află;
$F_a$ [N]	⇒ forța de așchiere;
$F_{ax}, F_{ay}, F_{az}$	⇒ componentele forței de așchiere pe direcțiile sistemului de referință cartezian;
$F_M$ [N]	⇒ forța magnetică care acționează asupra particulei feromagnetice dispuse într-un câmp magnetic;
$F_V, F_H$	⇒ componentele forței de interacțiune a câmpului magnetic cu fața superioară și respectiv, inferioară a cubului elementar asociat particulei feromagnetice;

$F_r, F_\alpha$	$\Rightarrow$ componentele forței de interacțiune în coordonate polare (cilindrice);
$g_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\Rightarrow$ granulația materialului abraziv;
$H$ [A/m]	$\Rightarrow$ intensitatea câmpului magnetic;
$i$ [-]	$\Rightarrow$ numărul de granule abrazive pe unitatea de lungime;
$l$ [mm]	$\Rightarrow$ lungime;
$\Delta l, dl$ [-]	$\Rightarrow$ lungime elementară;
$M$ [A/m]	$\Rightarrow$ magnetizația totală a unui corp;
$m$ [ $\text{Am}^{-1} / \text{m}^3$ ]	$\Rightarrow$ momentul magnetic al unității de volum;
$m_a$ [g]	$\Rightarrow$ cantitatea de abraziv participant la MAMR;
$m_l$ [g]	$\Rightarrow$ cantitatea de fluid magnetic participant la MAMR;
$m_x, m_y, m_z$	$\Rightarrow$ componentele carteziene ale momentului magnetic al unității de volum;
$n$ [rot/min]	$\Rightarrow$ turația;
$\vec{n}$ [-]	$\Rightarrow$ versorul normalei la suprafață;
$p$ [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]	$\Rightarrow$ presiunea;
$Q_p$ [g/min]	$\Rightarrow$ productivitatea prelucrării;
$r_a$ [mm]	$\Rightarrow$ raza sferei asociate particulei abrazive;
$R_{af}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\Rightarrow$ rugozitatea finală a suprafeței piesei prelucrate cu MAMR;
$R_{ai}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\Rightarrow$ rugozitatea inițială a suprafeței piesei ce urmează a fi prelucrată cu MAMR;
$s$ [mm/rot]	$\Rightarrow$ avansul;
$S$ [ $\text{m}^2$ ]	$\Rightarrow$ suprafața de contact dintre OP și MAMR;
$\Delta S, dS$	$\Rightarrow$ suprafețe elementare;

$t$ [mm]	⇒ adâncimea de așchiere;
$t_p$ [min]	⇒ timpul (durata) prelucrării;
$v$ [m/min]	⇒ viteza de așchiere;
$v_f$ [m/min]	⇒ viteza de avans;
$V_a$ [m <sup>3</sup> ]	⇒ volumul de material abraziv participant la MAMR;
$V_{al}$ [m <sup>3</sup> ]	⇒ volumul de abraziv susceptibil la levitație pe suprafața OP;
$V_l$ [m <sup>3</sup> ]	⇒ volumul de fluid magnetic participant la MAMR;
$V_p$ [m <sup>3</sup> ]	⇒ volumul unei particule abrazive;
$\Delta V, dV$ [-]	⇒ volum elementar;
$v_o$ [m/min]	⇒ viteza de oscilație în timpul prelucrării;
$v_p$ [g/h]	⇒ viteza de prelevare de material;
$\alpha_p$ [°]	⇒ semiunghiul capetelor polare;
$\beta_a$ [°]	⇒ unghiul de îngroșare al așchiei;
$\delta$ [mm]	⇒ valoarea interstițiului de lucru dintre OP și MAMR;
$\varepsilon$ [-]	⇒ deformația specifică liniară;
$\varphi$ [-]	⇒ potențialul scalar al câmpului magnetic;
$\gamma$ [°]	⇒ unghiul de degajare al sculei așchietoare;
$\mu_e$ [N/A <sup>2</sup> ]	⇒ permeabilitatea magnetică a mediului care umple interstițiul de lucru;
$\mu_i$ [N/A <sup>2</sup> ]	⇒ permeabilitatea magnetică a granulei abrazive;
$\mu_o$ [N/A <sup>2</sup> ]	⇒ permeabilitatea magnetică a vidului;
$\theta$ [°]	⇒ unghi de interferență la așchiere;
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	⇒ densitatea;
$\rho_a$ [kg/m <sup>3</sup> ]	⇒ densitatea materialului abraziv;

- $\rho_{ap}$  [kg/m<sup>3</sup>] ⇒ densitatea aparentă a fluidului magnetic;
- $\rho_l$  [kg/m<sup>3</sup>] ⇒ densitatea fluidului magnetic;
- $\sigma$  [N/m<sup>2</sup>] ⇒ tensiunea normală;
- $\psi$  [-] ⇒ coeficient de reducere a secțiunii active a granulei abrazive;

FI ⇒ factori de influență;

FO ⇒ funcții obiectiv;

MAMR ⇒ mediu abraziv magnetoreologic;

OP ⇒ obiect de prelucrat.



# CAPITOLUL 1

## INTRODUCERE

Studiul proceselor tehnologice de prelucrare prin aşchiere a devenit în ultimul timp o preocupare deosebită datorită cerinţelor referitoare la precizia şi calitatea suprafeţelor generate şi apariţiei unor noi materiale, adesea greu prelucrabile prin aşchiere. Aceste preocupări se amplifică în condiţiile introducerii pe scară largă a automatizării proceselor tehnologice şi dezvoltării de noi procedee de prelucrare prin aşchiere [11], [15], [49].

Prelucrarea prin aşchiere este o metodă tehnologică de tăiere mecanică, finalizată prin fenomene de deformare, desprindere şi îndepărtare sub formă de aşchii a surplusului de material de pe piesa prelucrată în scopul asigurării formei geometrice, dimensiunilor, poziţiei reciproce şi calităţii suprafeţelor prelucrate. Studiile efectuate menţionează faptul că pentru majoritatea pieselor utilizate în construcţia de maşini, peste 70% din totalitatea operaţiilor reprezintă operaţii de prelucrare prin aşchiere [11].

Această pondere însemnată a prelucrărilor prin aşchiere se justifică prin următoarele:

- prin aşchiere se obţine o gamă largă de piese, cu dimensiuni de la cele mai mici (mecanică fină) până la cele mai mari (mecanică grea), cu diferite forme geometrice şi din cele mai diverse materiale (oţel, fontă, neferoase, materiale polimerice, ceramică, sticlă, lemn etc.);

- caracteristicile tehnice obţinute prin aşchiere capătă valori într-un câmp larg, ceea ce avantajează atât executanţii cât şi beneficiarii;

- productivitatea, calitatea şi costul prelucrărilor prin aşchiere depind de dotarea tehnică, condiţiile de lucru, organizarea producţiei şi pregătirea personalului, astfel încât acestea pot fi optimizate la valori avantajoase economic;

- sistemele tehnologice sunt uşor de reglat, comode şi sigure în exploatare şi nu necesită cheltuieli mari pentru întreţinere, lărgirea domeniului de utilizare şi chiar schimbarea destinaţiei lor;

- perfecționarea, modernizarea și automatizarea sistemelor tehnologice se realizează cu eforturi de proiectare și de execuție relativ reduse;

- la producție individuală și de serie mică și în cazul pieselor relativ mari, așchierea este cel mai economic procedeu de prelucrare.

Tehnica prelucrărilor prin așchiere s-a dezvoltat în mod permanent în scopul realizării de piese cât mai repede, cât mai bine și cu cheltuieli minime. În cadrul acestei dezvoltări, știința așchierii metalelor, mașinile-unelte, sculele și tehnologiile de prelucrare s-au perfecționat continuu, influențându-se reciproc [16], [43], [44], [45], [49], [58].

Principalele etape înregistrate în dezvoltarea tehnicii prelucrărilor prin așchiere sunt următoarele:

- trecerea de la sculele de mână la sculele de mașină și apoi la acționarea mecanică a mașinilor-unelte, finalizată prin utilizarea căruciorului portsculă în locul mâinilor operatorului uman;

- utilizarea acționărilor electromecanice în cadrul acestor sisteme tehnologice favorizându-se astfel perfecționarea metodelor de generare a suprafețelor și intensificarea regimurilor de așchiere;

- perfecționarea materialelor pentru sculele așchietoare corelată cu creșterea vitezelor de așchiere până la 200÷300 m/min;

- utilizarea progreselor fără precedent înregistrate în domeniul microelectronicii, calculatoarelor și ciberneticii, dezvoltându-se astfel automatizarea sistemelor tehnologice, introducerea comenzilor numerice, a sistemelor adaptive și extinderea robotizării;

- dezvoltarea cercetărilor teoretice și experimentale în scopul optimizării parametrilor proceselor de prelucrare și adâncirea cercetărilor privind bazele așchierii optime.

Pe lângă menționarea principalelor etape înregistrate în dezvoltarea tehnicii prelucrărilor prin așchiere, este imperios necesară și evidențierea principalelor momente înregistrate de dezvoltarea unei direcții de vârf în domeniul magnetohidrodinamicii, respectiv în domeniul lichidelor magnetice.

Astfel, la începutul anilor '70 tematica Laboratorului de mașini hidraulice al Institutului Politehnic Timișoara s-a îmbogățit cu primele teme de cercetare.

deosebit de interesante, care utilizau elemente din domeniul magnetohidrodinamicii [67].

Pe baza rezultatelor promițătoare obținute, au fost demarate cercetări sistematice, teoretice și experimentale, de către un colectiv de cercetare multidisciplinar format în anul 1975 de către *acad. Ioan ANTON* din cadre didactice și cercetători de la facultățile de mecanică, electrotehnică și de chimie industrială.

Formarea unui puternic colectiv din specialiști în hidrodinamică, fizică, chimie și electrotehnică a corespuns pe deplin cerințelor domeniului fluidelor magnetice și a facilitat abordarea eficientă a problemelor științifice fundamentale, precum și a celor orientate spre aplicații tehnice concrete.

Actualmente, ființează în cadrul Filialei Timișoara a Academiei Române, Laboratorul de lichide magnetice de la Centrul de Cercetări Tehnice Fundamentale și Avansate, care, împreună cu Institutul pentru Fluide Complexe al Universității "Politehnica" Timișoara, se constituie ca o *adevărată școală în domeniul fluidelor magnetice*, deschisă spre aplicațiile tehnice ale domeniului în cauză [1], [2], [72], [73].

Pe acest fond al evoluției tehnicii prelucrărilor prin așchiere și al aplicațiilor practice ale fluidelor magnetice se înscrie și dorința autorului prezentei teze de doctorat, de a-și fi orientat cercetările spre noi procedee de prelucrare tehnologică.

Înlocuirea procedeelelor clasice de prelucrare cu procedee noi se justifică printr-o profundă analiză tehnico-economică (costuri, productivitate, performanțe tehnice, profit) care necesită, de asemenea, cunoașterea elementelor de bază ale așchierii optime [8], [9], [10], [11], [17], [43].

Orientarea spre noile tehnologii de prelucrare se face numai după o abordare sistemică a fenomenelor de interacțiune din spațiul de lucru și cunoașterea amănunțită a tuturor posibilităților de exploatare dirijată a acestora spre scopul final al cercetătorului [19], [48], [49].

De pe aceste poziții, autorul prezentei teze de doctorat a abordat noul procedeu de prelucrare cu medii abrazive magneto-reologice → MAMR.

Această abordare își propune ca obiective generale identificarea evoluției aplicațiilor industriale ale prelucrărilor cu MAMR, realizarea unor modele generale, analitice și experimentale, care să permită optimizarea acestor prelucrări.

În țara noastră, primele cercetări privind optimizarea prelucrării cu MAMR au fost realizate la Universitatea "Ștefan cel Mare" din Suceava, de către dl.prof.dr.ing. *Mircea CIOBANU*.

Structura logică pe baza căreia a fost construită prezenta teză de doctorat este următoarea:

a). analiza evoluției aplicațiilor industriale ale proceselor de prelucrare cu MAMR în scopul cunoașterii celor mai semnificative date privind schimbările cantitative și calitative înregistrate de OP. Acest lucru implică:

- identificarea aplicațiilor industriale în care se utilizează prelucrări cu MAMR;
- studierea fenomenelor de interacțiune particulă abrazivă-substanță care se produc în spațiul de lucru;
- determinarea forțelor motrice necesare pentru prelevarea de material;
- detalierea variantelor constructiv-tehnologice semnificative care utilizează prelucrări cu MAMR în procese de netezire și de generare a unor suprafețe tehnologice.

Aceste aspecte formează subiectul capitolului 2 al tezei și reprezintă o sinteză bibliografică astfel structurată încât să evidențieze stadiul actual al cercetărilor în acest domeniu.

b). determinarea unui model generalizat pentru sistemele de prelucrare cu MAMR, model care să răspundă multitudinii de variante individuale întâlnite în literatura de specialitate. Acest lucru implică:

- analiza structurii morfologice și funcționale a sistemelor tehnologice de prelucrare cu MAMR;
- identificarea tuturor factorilor de influență, inclusiv gruparea lor în mai multe mulțimi, atribuite, respectiv, MAMR, OP, mișcărilor și poziției relative dintre MAMR și OP;

- determinarea funcțiilor obiectiv și a perturbațiilor ce le influențează;

- stabilirea unor modele generale/parțiale ale proceselor de transformare tehnologică din spațiul de lucru;

- analiza posibilităților de rezolvare a ecuațiilor ce exprimă modelul matematic general al sistemelor tehnologice de prelucrare cu MAMR.

Aspectele de mai sus constituie obiectul capitolului 3, care este original atât sub aspectul concepției, cât și al modului de rezolvare.

c). modelarea experimentală în scopul evidențierii valorilor factorilor de influență pentru care acțiunea tehnologică prezintă interes și care totodată, asigură atingerea domeniilor de optim pentru funcțiile obiectiv respective. Aceasta presupune:

- precizarea obiectivelor cercetării experimentale și a programului de experimentări;

- găsirea ecuațiilor de regresie corespunzătoare modelelor empirice căutate prin prelucrarea datelor rezultate în urma realizării experimentelor programate;

- formularea concluziilor privind optimizarea prelucrărilor cu MAMR.

Cele de mai sus fac obiectul capitolului 4 al tezei de doctorat, capitol în totalitate original.

În finalul lucrării este prezentat un capitol de sinteză (cap.5) în care s-au formulat concluziile finale și sunt prezentate principalele contribuții originale.

Teza de doctorat cuprinde un total de 135 pagini, 13 tabele, 90 figuri, 71 relații și 79 de titluri bibliografice. Lista bibliografică cuprinde și 15 lucrări proprii ale autorului, dintre care la 14 lucrări este unic autor.

Autorul consideră această lucrare ca o modestă, dar utilă contribuție la dezvoltarea noului procedeu tehnologic de prelucrare cu medii abrazive magneto-reologice (MAMR).

Realizarea cercetărilor teoretice și experimentale, orientarea spre o bogată bibliografie de specialitate, ca și elaborarea lucrării, s-au bucurat permanent de autoritatea științifică și de generozitatea recunoscută a

profesorului *dr.ing. Alexandru NICHICI*, căruia autorul îi poartă o adâncă recunoștință. Pe parcursul întregii activități de cercetare, autorul a beneficiat de competența și experiența didactică și științifică a distinsului îndrumător științific, de spiritul său modern, creativ, de evidentă emulație, fiind stimulat și încurajat permanent de bunăvoința și exigența îmbinate într-o complementaritate firească.

Autorul mulțumește d-lui *ing. Iosif POTENCZ*, *dr. Doina BICA*, *fiz.dr. Ladislau VEKAȘ* și celorlalți colegi de la Centrul de Cercetări Tehnice Fundamentale și Avansate a Filialei Timișoara a Academiei Române, pentru sprijinul moral, științific și material, adus la realizarea cercetărilor experimentale.

De asemenea, se aduc calde mulțumiri d-lui *prof.dr.ing. Mircea CIOBANU* de la Universitatea "Ștefan cel Mare" din Suceava, pentru colaborarea și disponibilitatea manifestate față de autorul prezentei teze de doctorat.

Mulțumiri pentru înțelegerea și ajutorul acordat în elaborarea și finalizarea tezei de doctorat sunt aduse, de asemenea, colectivului Catedrei de Tehnologie Mecanică, și în special d-lui *conf.dr.ing. Eugen CICALĂ* pentru colaborarea fructuoasă și ajutorul substanțial.

O serie de determinări experimentale s-au putut realiza datorită aparaturii moderne pusă la dispoziție de către colegii de la catedra de Organe de mașini și mecanisme, cărora le sunt aduse și pe această cale mulțumiri.

În fine, dar nu în ultimul rând, autorul mulțumește familiei pentru sprijinul, răbdarea și înțelegerea manifestate pe parcursul întregii activități care a dus la realizarea prezentei teze.

## CAPITOLUL 2

# STADIUL ACTUAL AL PRELUCRĂRILOR CU MEDII ABRAZIVE MAGNETO-REOLOGICE

### 2.1. Evoluția aplicațiilor industriale ale prelucrărilor cu medii abrazive magneto-reologice

#### 2.1.1. Particularitățile de bază ale abrazării

Cercetările efectuate până în prezent permit definirea aşchierii ca o metodă tehnologică de tăiere mecanică, finalizată prin desprinderea și îndepărtarea sub formă de aşchii a adaosului de material de pe obiectul supus prelucrării în scopul asigurării formei geometrice, dimensiunilor, poziției relative și calității impuse suprafețelor piesei prelucrate [11], [14].

Prelucrările finale capabile să realizeze acest scop reprezintă de cele mai multe ori variante ale procedurii de prelucrare prin aşchiere cu particule abrazive, denumit *abrazare* [15], [51].

În acest caz prelucrarea are loc sub acțiunea unei mulțimi de granule abrazive, legate sau libere, a căror muchii și vârfuri ascuțite au orientări și forme aleatoare, de unde și denumirea de scule cu tășuri geometrice nedefinite, atribuită corpurilor abrazive. Granulele abrazive pot fi compactate cu ajutorul lianților în corpuri abrazive cu forme macroscopice bine precizate, ca în cazul rectificării, de exemplu, constituind astfel un mediu abraziv clasic. Modul de lucru al unui corp abraziv astfel constituit este similar cu cel al unei freze, care are un număr foarte mare de dinți, granulele abrazive fiind încastrate în masa de liant. Condițiile de lucru ale sculei abrazive diferă de cele ale unei scule aşchietoare metalice cu tășuri definite prin următoarele:

- geometria granulelor abrazive este variabilă și diferită de la granulă la granulă, fiind posibile unghiuri de degajare atât pozitive cât și negative (fig.2.1), într-un câmp foarte larg, respectiv  $\gamma = -50...+45^\circ$ ;

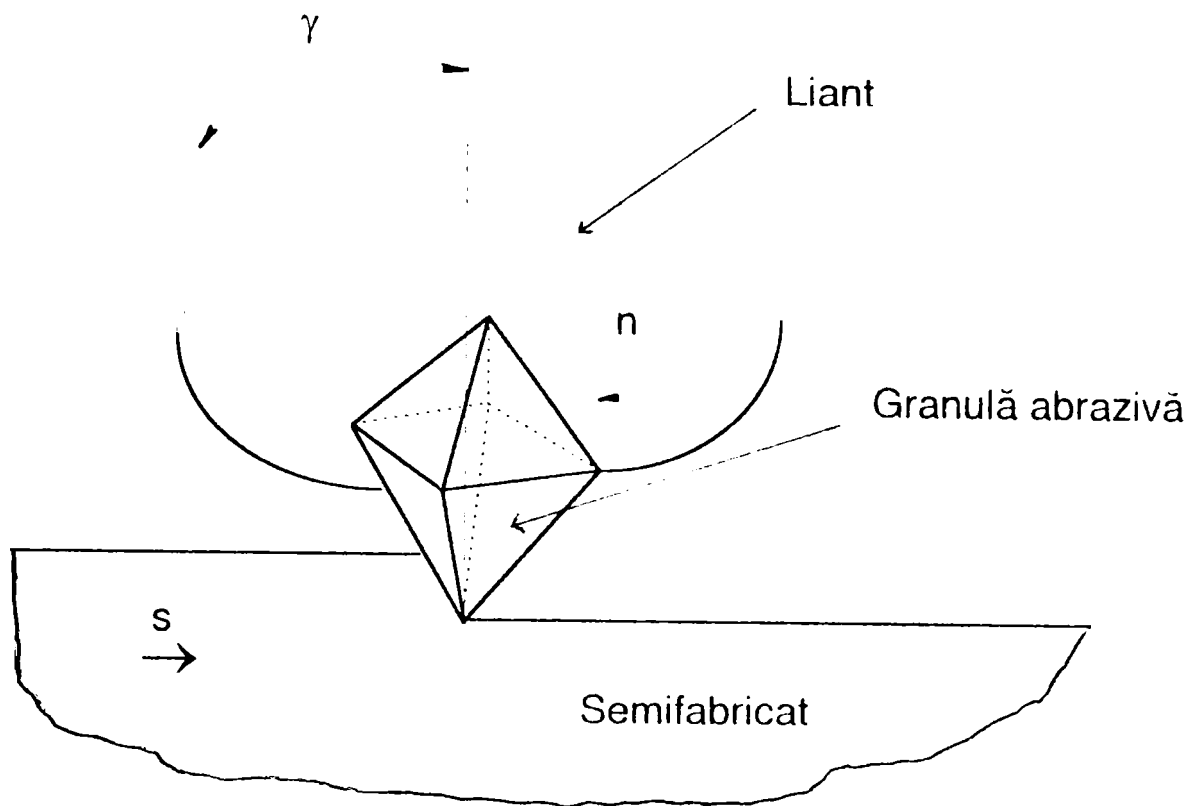


Fig.2.1

- tășurile granulelor abrazive aflate pe periferia sculei sau mai exact în zona de așchiere, au o dispunere neregulată și nu sunt înscrise, în general, în aceeași suprafață inițială;

- pe linia de contact dintre sculă și obiectul supus prelucrării se află foarte multe granule, care au o duritate ridicată și care îndepărtează fiecare un volum de materiale de aproximativ 40000 ori mai mic decât oricare dinte așchietor al unei scule așchietoare cu tăș definit (de exemplu, o freză cu foarte mulți dinți);

- procesul de așchiere prin abrazare se desfășoară la viteze ridicate ( $v = 30 \dots 80$  m/s) și ca urmare procesele specifice așchierii pe fiecare granulă abrazivă se succed cu frecvență ridicată. Timpul cât așchiază o granulă este de ordinul  $10^{-4} \dots 5 \cdot 10^{-5}$  sec., ceea ce înseamnă transformarea practic instantanee în așchii a adaosului de prelucrare local;

- vitezele mari de așchiere și geometria neadecvată pentru unele dintre granulele abrazive conduc la dezvoltarea unei temperaturi ridicate în zona de așchiere ( $1000 \div 1500$  °C), ceea ce pot determina oxidarea superficială a



suprafeței prelucrate;

- dirijarea procesului de abrazare se poate realiza numai pe baza modificării regimului de aşchiere și a mediului de aşchiere, deoarece modificarea geometriei granulei abrazive este practic imposibilă.

### 2.1.2. Medii abrazive

Prelucrările prin aşchiere cu ajutorul granulelor abrazive sunt dezvoltate în mai multe procedee tehnologice: rectificare, honuire, vibronetezire, rodare, lepuire, şlefuire, lustruire etc.

Caracteristica generală, comună acestor procedee, este utilizarea materialelor abrazive (pulberi sau granule) dispuse într-un anumit mediu purtător. Se pot realiza astfel, diferite medii abrazive, care, în funcție de modul în care sunt constituite, diferențiază procesele de abrazare în procedeele tehnologice mai sus amintite.

Granulele abrazive pot fi dispuse într-un liant și compactizate în corpuri abrazive cu forme bine precizate, utilizate la operațiile de rectificare. Se realizează astfel mediul abraziv clasic, cu cea mai răspândită utilizare.

În alte cazuri, cum ar fi lepuirea sau rodarea, se folosesc abrazivi în suspensii, care, cel puțin în parte, se impregnează pe suprafața de lucru a unor scule realizate din materiale solide relativ moi [20], [22], [23].

Dezvoltarea tehnologiilor de prelucrare prin abrazare a condus la realizarea unor noi medii abrazive, *mediile abrazive reologice*, care sunt medii adaptabile funcțional și geometric, în contul mobilității relative a granulelor abrazive, care nu mai sunt compactizate "rigid" în forme prestabilite, ci sunt compactizate "elastic" în anumite condiții de timp și spațiu [3], [12], [14], [19], [46], [51].

Buletinele științifice și de informare [74] menționează primele utilizări de medii abrazive reologice, ca fiind constituite din material abraziv și apă înghețată. Astfel, în anii 1930-1935, la șantierele navale din Vladivostok se realiza debavurarea construcțiilor metalice ale navelor cu ajutorul unor bucăți de gheață în care exista material abraziv. Acest lucru poate duce la concluzia

126.099 181E

că primul mediu abraziv reologic s-a realizat pe bază de apă.

### 2.1.3. Medii abrazive magneto-reologice (MAMR)

Una din formele efectiv realizate și dezvoltate de medii abrazive reologice o reprezintă mediile abrazive *magnetoreologice* (MAMR). Aceste medii se bazează pe capacitatea câmpului magnetic de a acționa asupra unor granule abrazive cu o forță a cărei mărime este suficientă pentru asigurarea mobilității și compactității acestora precum și pentru realizarea unei acțiuni abrazive. Acțiunea câmpului magnetic asupra granulelor abrazive constă, în principal, în concentrarea și dirijarea acestora pe suprafața de prelucrare. În acest fel, energia câmpului magnetic și a mișcărilor relative se transformă în lucru mecanic de așchiere în zona de lucru, zonă în care au loc și alte procese, cum ar fi, de exemplu, deformarea plastică superficială a materialului și dizolvarea electrochimică a sa. Forțele de așchiere sunt realizate de câmpul magnetic, iar mărimea și direcția acestor forțe sunt determinate de intensitatea și distribuția câmpului în spațiul de lucru.

Literatura de specialitate care a stat la baza acestei sinteze bibliografice [4], [5], [8], [54], [71], [74] menționează încă din anii 1950-1955 preocupări de dezvoltare a prelucrărilor cu MAMR. Astfel, în perioada anilor 1955-1970 în fosta Uniune Sovietică, în jurul orașelor Minsk și Leningrad se formează centre de cercetare care pun bazele și dezvoltă unele din variantele de prelucrări cu MAMR, utilizând granule abrazive feromagnetice dispuse într-un câmp magnetic. Cercetătorii și-au orientat preocupările spre determinarea legăturilor care guvernează modificările suprafeței obiectului supus prelucrării, calculul câmpului magnetic în zona de prelucrare, studiul comportării granulelor abrazive în interstițiul de lucru, precum și aplicarea procedurii pentru o mare diversitate de suprafețe (cilindrice exterioare și interioare, plane, danturi, etc). După anul 1970 se înregistrează o extindere a ariei geografice de aplicare a acestei variante de prelucrare (cu MAMR), și în Germania, Bulgaria, Polonia, Ungaria.

Același procedeu de prelucrare cu MAMR, dar într-o altă variantă, care

constă în utilizarea granulelor abrazive nemagnetice dispuse într-un fluid magnetic activat de un câmp magnetic, a fost dezvoltat în ultimele decenii, în Japonia, la Universitățile din Tokyo, Senday și Kanazawa, [35], [37], [39], [40], [41], [48], [55], [61], [63], [64], [65], [66], [71].

Sinteza privind aria de răspândire și frecvența lucrărilor științifice accesibile care prezintă aplicații ale prelucrărilor cu MAMR, pentru perioada 1985-1990, se prezintă în tabelul 2.1 [18], [19], [30], [68].

Repartiția lucrărilor științifice cu aplicații ale MAMR

Tabelul 2.1

Țara	Lucrări apărute în anii						Total (procente)
	1985	1986	1987	1988	1989	1990	
Japonia	7	4	6	11	8	6	42 (18%)
U.R.S.S.	24	22	28	22	31	27	154 (66%)
Polonia	1	3	2	4	2	1	13 (6%)
Germania	1	2	2	1	3	2	11 (4,8%)
Bulgaria	-	1	2	1	2	2	8 (3,5%)
Ungaria	-	2	1	-	1	-	4 (1,7%)
Total	33	34	41	39	47	38	232

Din datele prezentate se desprinde concluzia că prelucrările cu MAMR au fost dezvoltate în două mari zone de interes, fosta Uniune Sovietică și Japonia, diferențiat însă de particularitățile de realizare a mediului magneto-reologic, ceea ce a determinat identificarea a două variante principale de aplicare a acestor prelucrări.

În funcție de modul efectiv de realizare a MAMR, aceste două variante pot fi caracterizate astfel:

- granule (pulberi) abrazive feromagnetice introduse într-un câmp magnetic creat în spațiul de lucru de către magneți permanenți sau electro-magneți; această variantă va fi utilizată în continuare sub denumirea de *prelucrare cu MAMR cu granule abrazive feromagnetice*;
- granule (pulberi) abrazive nemagnetice introduse într-un fluid

magnetic activat de un câmp magnetic exterior, varianta ce va fi denumită în continuare *prelucrare cu MAMR cu granule abrazive nemagnetice*.

În figura 2.2. se prezintă, principial o schemă tehnologică utilizată la prelucrarea cu MAMR cu granule abrazive feromagnetice [24], [26], [27].

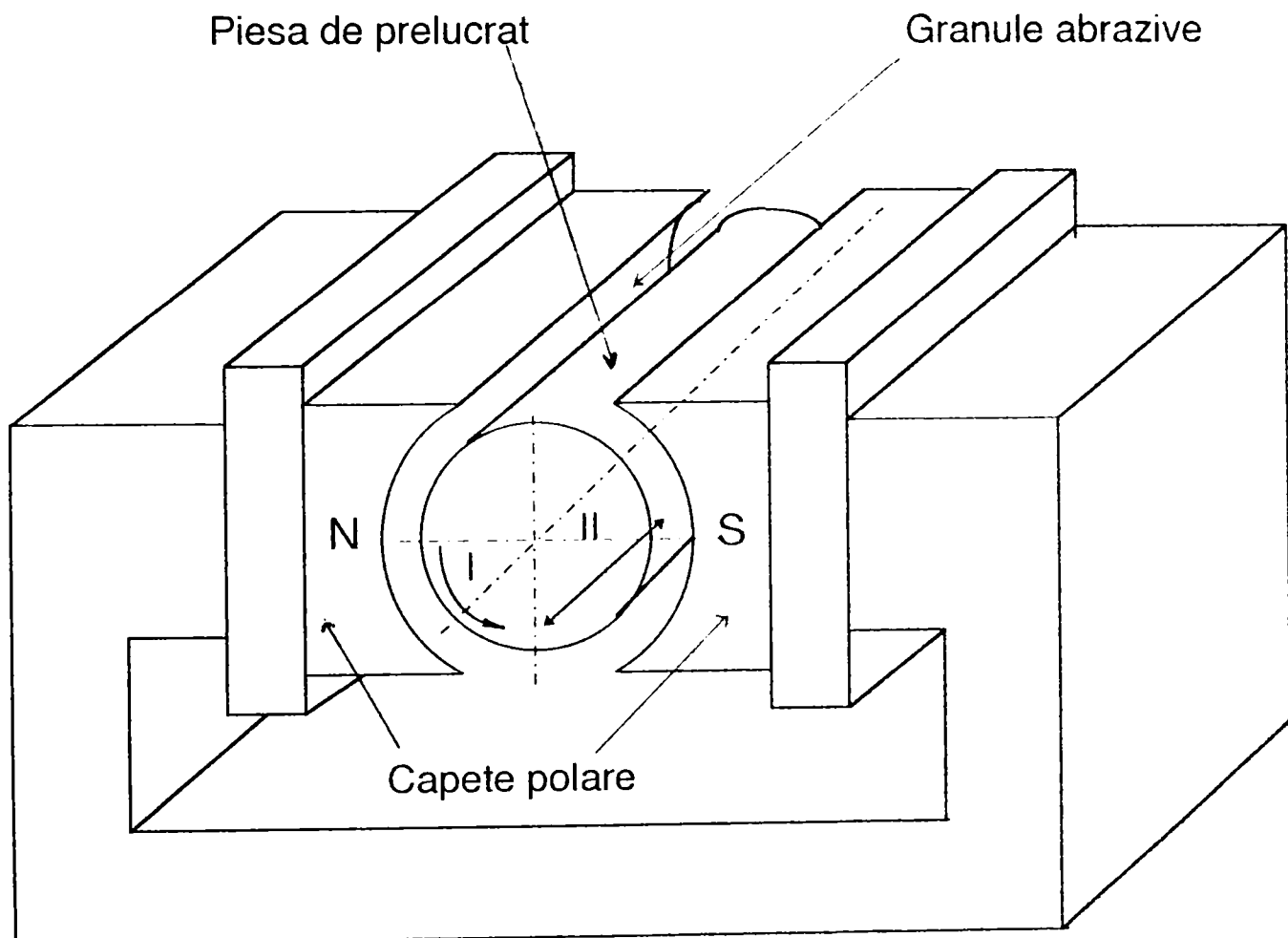


Fig.2.2

Capetele polare N și S sunt dispuse diametral opus realizând câmpul magnetic din interstițiul de lucru, umplut cu material abraziv fero-magnetic. În acest interstițiu în care este întreținut MAMR, se găsește suprafața cilindrică a obiectului supus prelucrării, care execută o mișcare de rotație și una de oscilație, obținând efecte de prelevare de material pe această suprafață.

În figura 2.3. se exemplifică schema tehnologică principială pentru prelucrare cu MAMR cu granule abrazive nemagnetice. Câmpul magnetic

este creat de magneții permanenți dispuși în “baterie” într-o incintă în care se introduce o suspensie formată din materiale abrazive nemagnetice imersate într-un fluid magnetic. Această suspensie reprezintă MAMR în care se introduce obiectul supus prelucrării, astfel încât să realizeze un interstițiu optim de lucru între suprafața frontală plană a sa și magneții permanenți. Obiectului supus prelucrării i se imprimă o mișcare de rotație cu o turație ridicată, rezultând pe suprafața frontală efecte de prelevare de material, respectiv o așchiere de finisare.

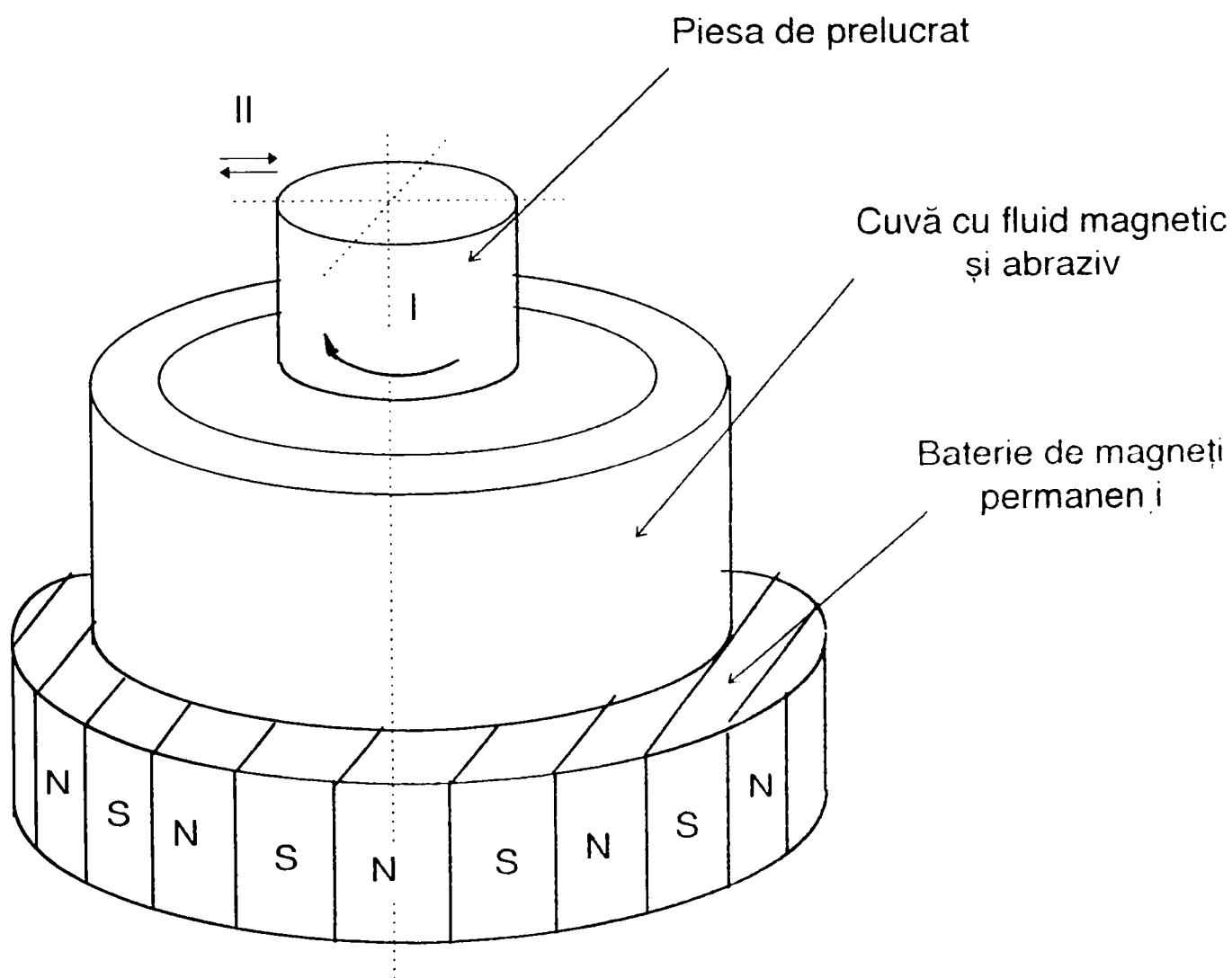


Fig.2.3

Datele semnificative privind schimbările cantitative și calitative la prelucrările cu MAMR, comparativ cu alte procedee de finisare, sunt prezentate în tabelul 2.2 [11], [14], [51].

Principalele caracteristici ale prelucrărilor cu MAMR  
comparativ cu alte procedee

Tabelul 2.2

Procedeul	Adaos de prelucrare [mm]	Granulație abraziv [ $\mu\text{m}$ ]	Viteza de așchiere [m/min]	Abateri dimensionale ale suprafeței prelucrate [mm]	Rugozitate obținută $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]
Rectificare	0,04-0,1	5 - 250	10-40 m/s	0,01-0,05	0,4-1,6
Honuire	0,02-0,2	6-16	20-80	0,01-0,05	0,05-0,8
Lepuire	0,005-0,01	2-40	10-150	0,002-0,05	0,012-0,05
Superfinisare	0,005-0,02	10-400	5-25	0,002-0,02	0,025-0,1
Prel.cu MAMR	0,008-0,05	40-200	3-30	0,005-0,02	0,02-0,8

## 2.2. Fenomenologia interacțiunii particulă abrazivă-substanță

### 2.2.1. Mecanismul formării așchiei

Abrazarea reprezintă un proces de așchiere complex, având unele particularități care o deosebesc de celelalte tipuri de așchiere (vezi 2.1.1.). Analiza esenței procesului de așchiere are la bază studiul celui mai simplu proces de așchiere, cel ortogonal sau liber [51]. O schemă simplificată a procesului de așchiere ortogonal este prezentată în figura 2.4, unde scula acționează cu o forță de așchiere  $F_z$  asupra așchiei neridicate, solicitând-o la compresiune. Considerând porțiunea ce urmează a fi detașată din semifabricat ca o epruvetă izolată supusă la compresiune de o forță  $F_z$ , în aceasta vor apare deformări elastice, plastice și apoi ruperea, tensiunile tangențiale maxime apărând după direcția liniilor de alunecare.

Natura formării așchiei conține informații importante asupra modului în care decurge procesul de așchiere, fiind cunoscute, în general trei tipuri de bază ale formării așchiei și anume:

- formarea așchiei discontinue care implică rupturi periodice, astfel încât așchia este formată din mici fragmente separate;

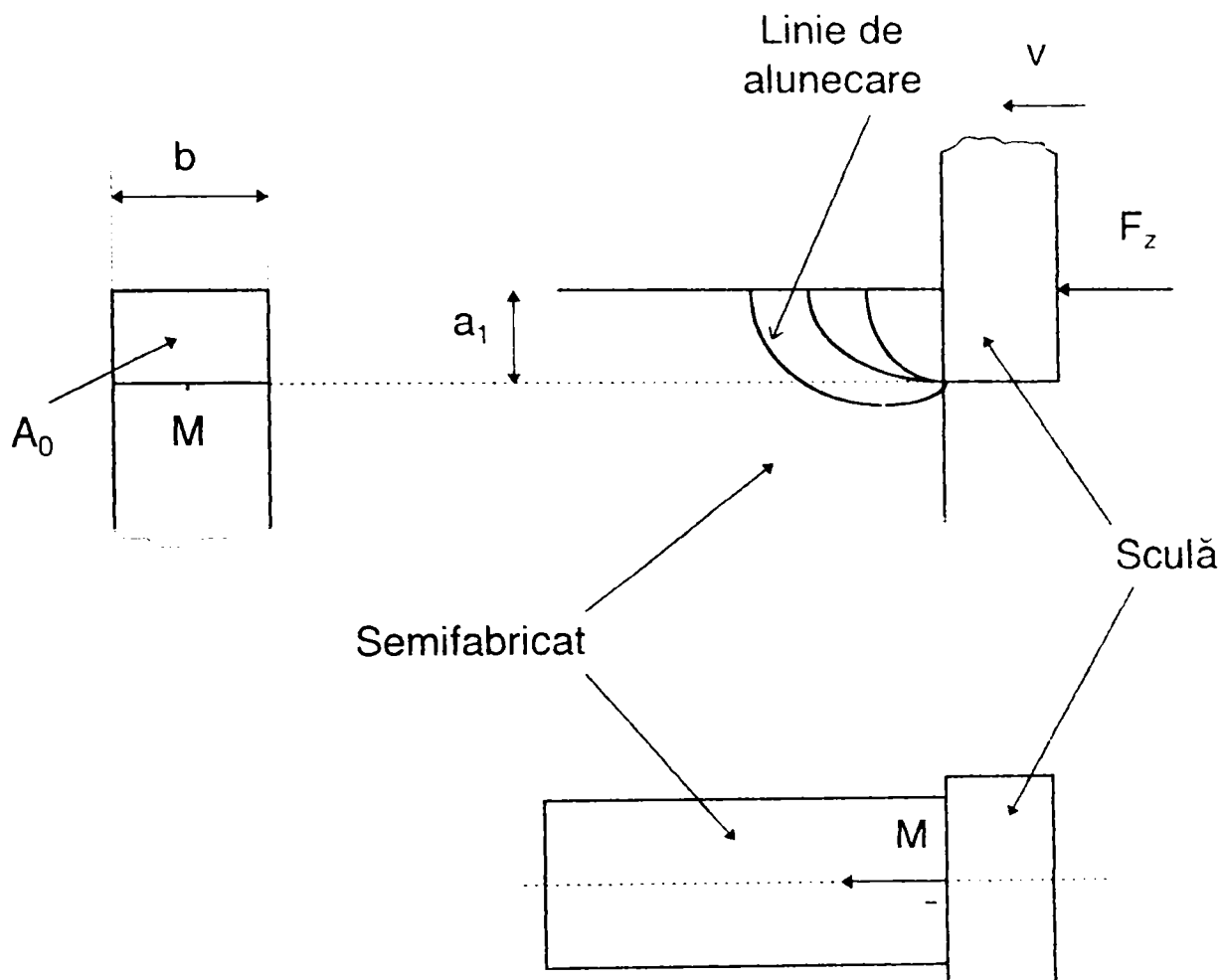


Fig.2.4

- formarea aşchii lamelare sau semicontinui;
- formarea aşchii continue sau de curgere.

Se poate face o legătură între diferitele tipuri de formare a aşchii și capacitatea de prelucrare prin aşchiere (aşchiabilitatea) a materialului supus prelucrării. În figura 2.5 este prezentată dependența dintre tensiunile tangențiale din planul de forfecare și mărimea deformației  $\epsilon$ . În evoluția acestei dependențe se pot deosebi trei domenii [51]:

I - domeniul elastic de la 0 la  $\epsilon'$ ;

II - domeniul plastic de la  $\epsilon'$  la  $\epsilon''$ ;

III - domeniul de la  $\epsilon''$  la  $\epsilon_z$  în care apare odată cu deformarea crescândă, o deteriorare a legăturii structurale.

În momentul în care deformarea materialului atinge limita  $\epsilon_z$  se produce ruperea totală.

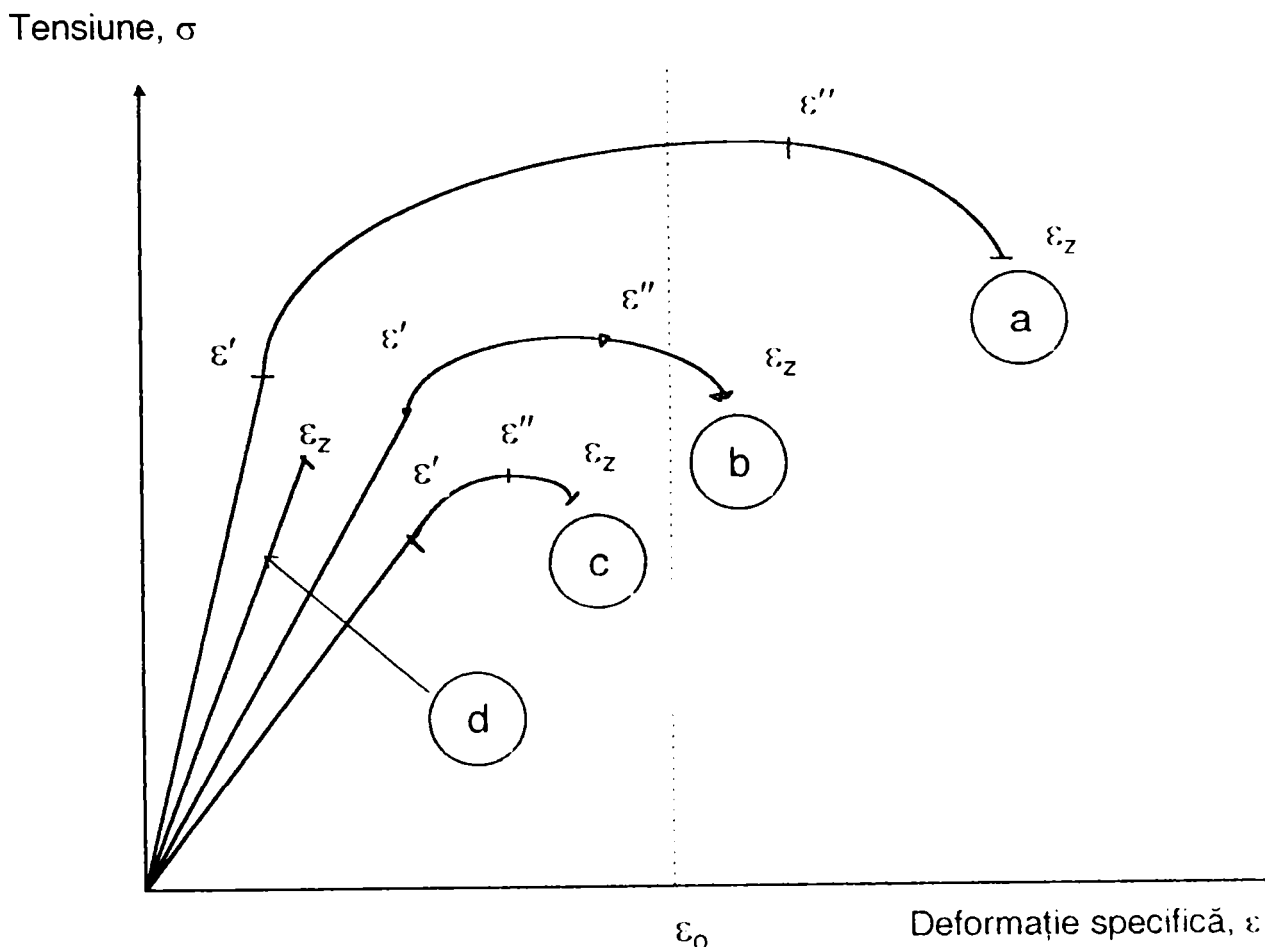


Fig.2.5

Considerând că în planul de forfecare se produce o deformare de valoare  $\varepsilon_0$  apar următoarele situații:

a)  $\varepsilon_0 < \varepsilon''$ , (curba a) ceea ce înseamnă că deformarea are loc în domeniul de ecrusare, capacitatea de așchiere nefiind complet consumată. În felul acesta apare o așchie de curgere care, pentru a fi ruptă, are nevoie de o deformare suplimentară;

b)  $\varepsilon'' < \varepsilon_0 < \varepsilon_z$ , caz în care forța de așchiere se reduce imediat după ce gradul de deformare atinge valoarea  $\varepsilon''$  (curba b). În acel moment se produce "întărirea" planului de forfecare, până când presiunea creată de fața de degajare produce o deplasare a planului de forfecare. Apar așchii lamelare, care se nasc odată cu creșterea deformării și scăderea rezistenței materialului, în planul de forfecare;

c)  $\varepsilon_0 > \varepsilon_z$ , este situația în care apar așchii de forfecare. Așchia se foarfecă complet, rămânând legată pe o mică porțiune; apare în special la



materialele fragile (curba c);

d)  $\varepsilon_0 \gg \varepsilon_z$ , (curba d) situație corespunzătoare materialelor foarte fragile.

În cazul abrazării, cele mai frecvente așchii care se formează sunt cele discontinue. Formarea acestora se datorește atât contactului relativ mic și temporar între fiecare granulă abrazivă și suprafață, cât și condițiilor de frecare puternică între granulele abrazive și obiectul de prelucrat.

Formarea așchiilor discontinue a fost studiată prin metoda filmării la microscop [51], putându-se determina existența mai multor faze, prezentate în figura 2.6. În prima fază scula atacă suprafața înclinată a piesei, rămasă după desprinderea anterioară a așchiei. Distorsiunea metalului din faza a doua indică o valoare mare a unghiului  $\beta_1$  de forfecare, care scade pe măsură ce scula avansează în material. Când scula ajunge în poziția din faza a treia, planul de forfecare se extinde până la suprafața orizontală. La continuarea pătrunderii sculei, așa cum se vede în fazele următoare, unghiul de forfecare  $\beta_1$  continuă să scadă, producându-se rupturi în planul de forfecare, care au ca rezultat desprinderea segmentului de așchie din ultima fază, după care procesul se repetă.

### 2.2.2. Modelul granulei singulare

Abrazarea se desfășoară după principiul așchierii ortogonale, însă cu unele particularități. Astfel, granulele abrazive au de regulă unghiuri de degajare  $\gamma$  negative, vitezele de așchiere sunt mai mari, iar grosimile așchiilor sunt foarte mici. În consecință vor fi prezente pronunțate fenomene termice și de frecare. Pe lângă acestea, scula nu are muchii așchietoare continue și definite, ci dispuse stocastic, atât pe suprafața de așchiere, cât și în adâncime față de aceasta. Interacțiunea material/corp abraziv - material de prelucrat trebuie abordată mai întâi prin modelul granulei singulare [51].

În figura 2.7 se prezintă acest model pentru cazul ideal al abrazării unei suprafețe plane, situație în care traiectoria granulei abrazive este rectilinie. În figura 2.8 se prezintă cazul real al abrazării unei suprafețe plane, situație în care granula realizează o traiectorie circulară cu viteza  $v$  în timp ce obiectul

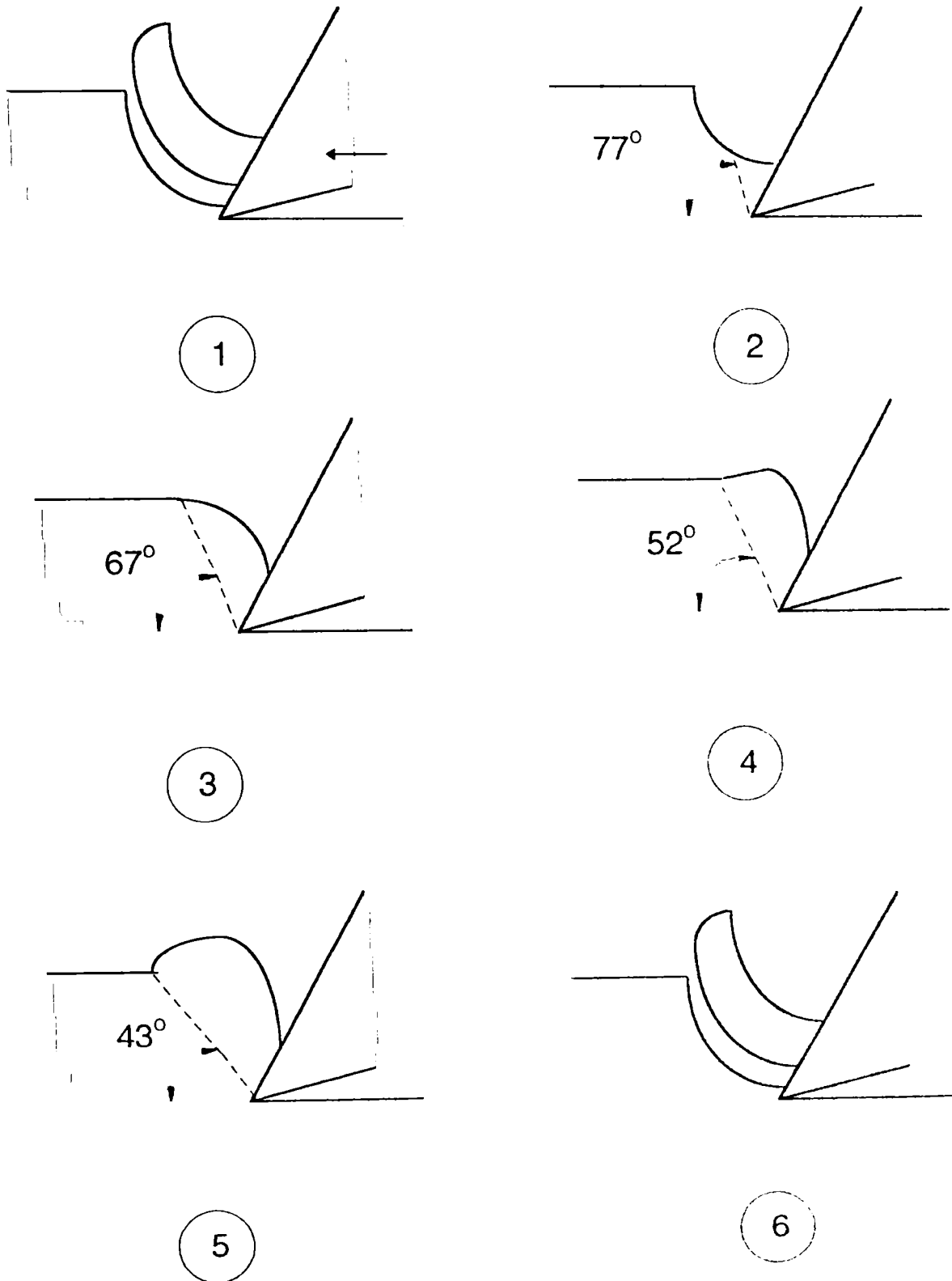


Fig.2.6

supus prelucrării realizează o traiectorie rectilinie cu viteza  $v_f$ . Locul geometric al muchiei așchietoare a granulei abrazive în raport cu piesa va fi o curbă trachoidă. Datorită faptului că cele două viteze  $v$  și  $v_f$  sunt diferite, modelul poate fi considerat ca și cum piesa ar sta pe loc iar granula abrazivă

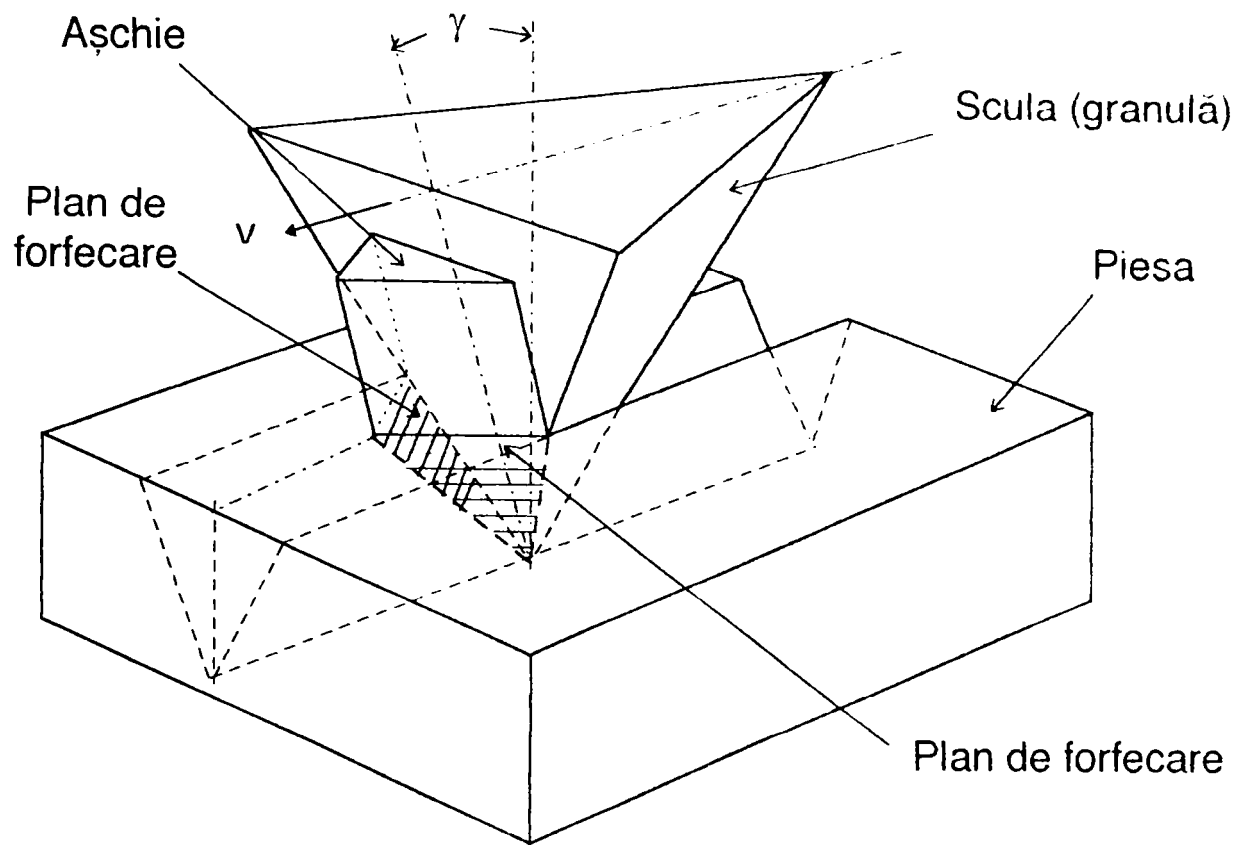


Fig.2.7

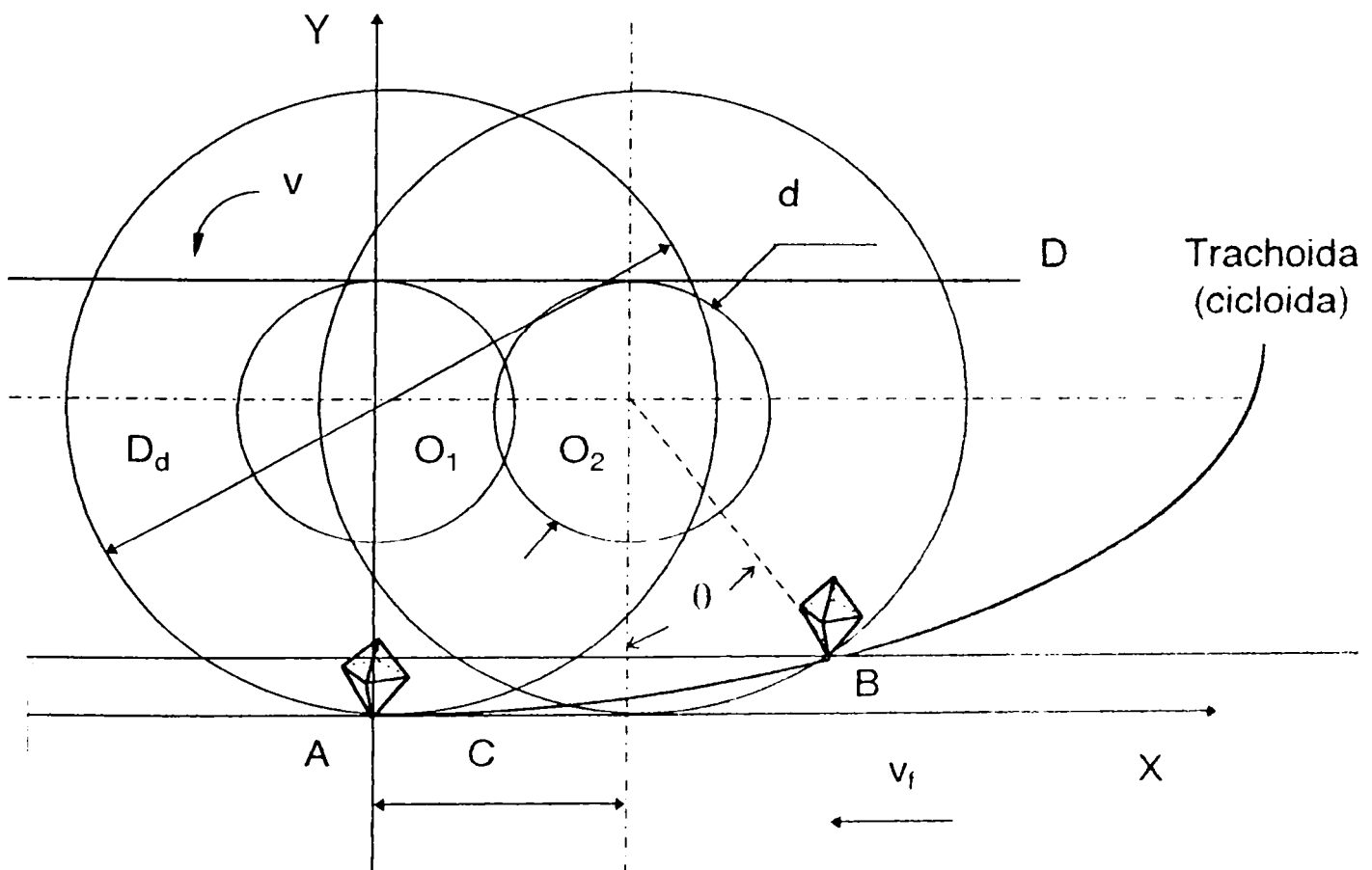


Fig.2.8

solidarizată pe un disc (de diametru  $D_d$ ) coaxial cu un cerc-ruletă (de diametru  $d$ ) rulează fără alunecare pe dreapta  $D$ . Ruleta (imaginară) va avea diametrul:

$$d = D_d \cdot \frac{v_f}{v} \quad (2.1)$$

sau, notând raportul  $v_f / v$  cu  $K_v$ , obținem:

$$d = D_d \cdot K_v \quad (2.2)$$

Dacă dimensiunea  $C$  constituie deplasarea axei  $O$  a discului, atunci când acesta se rotește cu unghiul  $\theta$ , coordonatele punctului  $B$  (ieșirea muchiei) vor fi:

$$\left. \begin{aligned} x &= R_d \cdot \sin \theta \pm C \\ y &= R_d (1 - \cos \theta) \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

unde semnul  $+$  corespunde prelucrării în contra avansului, iar semnul  $-$  în cazul prelucrării în sensul avansului. Cunoscând că axul discului ruletă se deplasează cu mărimea  $C_0$  atunci când face o rotație, rezultă:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{\theta}{2\pi} \rightarrow C = C_0 \cdot \frac{\theta}{2\pi} \quad (2.4)$$

Mărimea  $C_0$  se deduce astfel: dacă discul face o rotație în timpul  $1/n$ , în acest timp piesa se deplasează cu mărimea:

$$C_0 = v_f \cdot \frac{1}{n_d} \quad (2.5)$$

sau, raportat la viteza periferică a discului, cu mărimea

$$C_0 = \frac{v_f}{v} \cdot \pi \cdot D_d = K_v \cdot \pi \cdot D_d \quad (2.6)$$

De aici rezultă:

$$C = C_0 \cdot \frac{\theta}{2\pi} = K_v \cdot R_d \cdot \theta \quad (2.7)$$

iar coordonatele punctului  $B$  vor avea expresiile:

$$\left. \begin{aligned} x &= R_d \cdot (\sin \theta \pm K_v \cdot \theta) \\ y &= R_d (1 - \cos \theta) \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

Deoarece curba de contact granulă-piesă are lungime foarte mică,

mulți autori [14], [51] o aproximează prin curbe mai simple. Într-o asemenea aproximare, ecuația locului geometric al granulei abrazive pentru cele trei variante de bază la abrazare (plană, cilindrică exterioară și cilindrică interioară va fi):

$$\frac{y}{R_d} = \left( \frac{m \cdot n}{2} \right) \cdot \left( \frac{x}{R_d} \right)^2 \quad (2.9)$$

unde:

$$m = \frac{1}{(K_r + 1)^2} ; \quad n = \left[ 1 - \frac{K_r}{\rho \cdot K_r} \cdot (K_r + 2) \right]; \quad K_r = \frac{R_d}{R_r}; \quad (2.10)$$

$K_r$  fiind raportul razelor (piesă-sculă).

Unghiul de interferență  $\theta$  care se formează între cele două poziții succesive pe care le ocupă granula abrazivă, este tocmai unghiul de îngroșare a așchii nedeformate  $\beta_a$ , care are un rol deosebit în fizica formării așchii. Datorită adâncimii mici de așchiere, acest unghi va fi foarte mic (de ordinul minutelor). Din această cauză așchia în cursul deformării, va avea trei zone distincte (fig. 2.9.a).

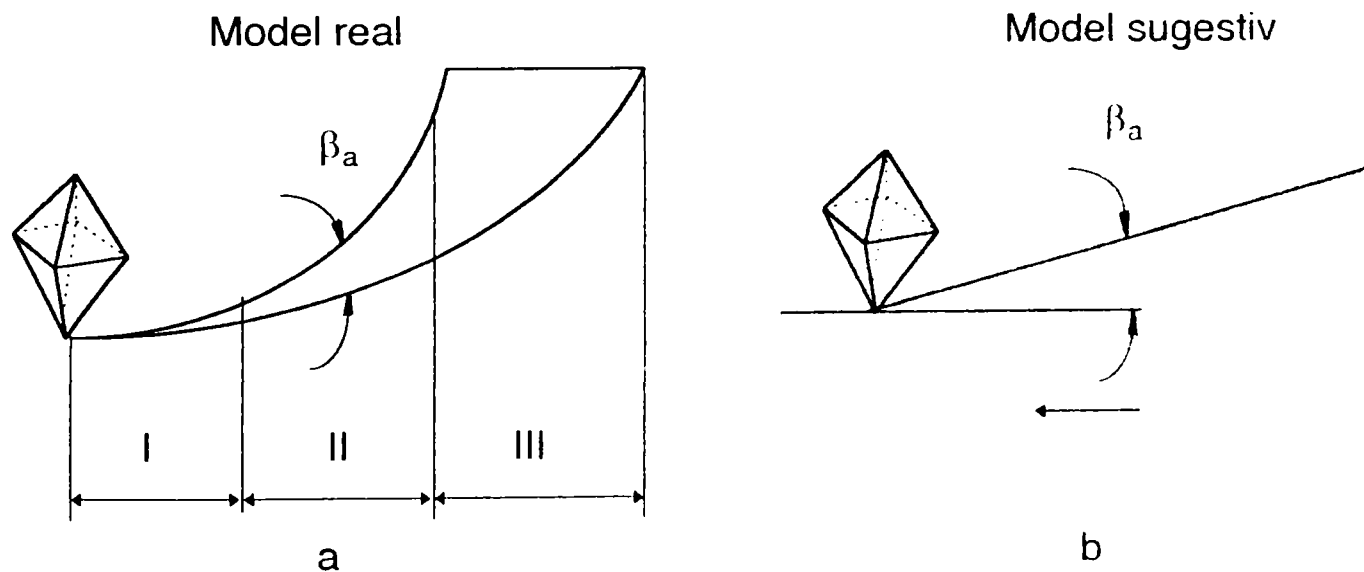


Fig.2.9

În prima zonă (de lunecare) granula va aluneca pe suprafață fără să așchieze (problema raportului între raza de ascuțire și grosimea așchii), alunecare

care este foarte importantă, deoarece influențează direct îndepărtarea adaosului tăişului, temperatura și duritatea stratului superficial al piesei. Lungimea zonei depinde de unghiul de interferență  $\beta_a$ ; cu cât acesta este mai mic, lungimea de alunecare va fi mai mare. În zona II are loc o deformare plastică, iar în zona III are loc aşchierea propriu-zisă.

Se apreciază [51] că lungimea lunecării și cea corespunzătoare deformației plastice vor crește odată cu scăderea unghiului de interferență. Expresia unghiului de interferență  $\beta_a$  poate fi ușor determinată analitic, plecând de la expresia generală pentru coordonatele punctului de intersecție a celor două traiectorii și dezvoltând-o în serii de soluții [51]. După toate calculele, se obține:

$$\beta_a = 2p \cdot \operatorname{tg}^{-1} \left[ \frac{l}{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \left( 1 - \sqrt{1 - 2p \cdot m \cdot n \cdot K_r \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right) \right] \cdot \frac{K_v \cdot K_p}{p \cdot K_r} \quad (2.11)$$

care, pentru unghiuri mici se poate simplifica la:

$$\beta_a \approx K_v \cdot K_p \cdot \left( m \cdot n + \frac{l}{p \cdot K_r} \right) \quad (2.12)$$

De aici rezultă că unghiul  $\beta_a$  crește cu mărirea lui  $K_v$ , deci cu creșterea vitezei piesei sau scăderea vitezei granulei abrazive și cu scăderea lui  $K_p$  (a distanței între tăişuri, respectiv a densității de granule abrazive în mediul abraziv).

### 2.2.3. Modelul granulelor multiple

Modelul granulei singulare este folosit numai pentru cunoașterea principiilor de bază privind interacțiunea material abraziv-obiect de prelucrat. Dependentele stabilite anterior au un caracter orientativ, deoarece - în realitate - partea activă a unui corp abraziv sau MAMR are o configurație stocastică, după cum reiese și din figura 2.10.

Tăişurile sunt orientate aleator fiind situate la adâncimi  $z$ , diferite față de o suprafață de referință. Pe de altă parte, geometria tăişurilor se modifică în timp deoarece granulele abrazive se stânjenesec reciproc în timpul formării

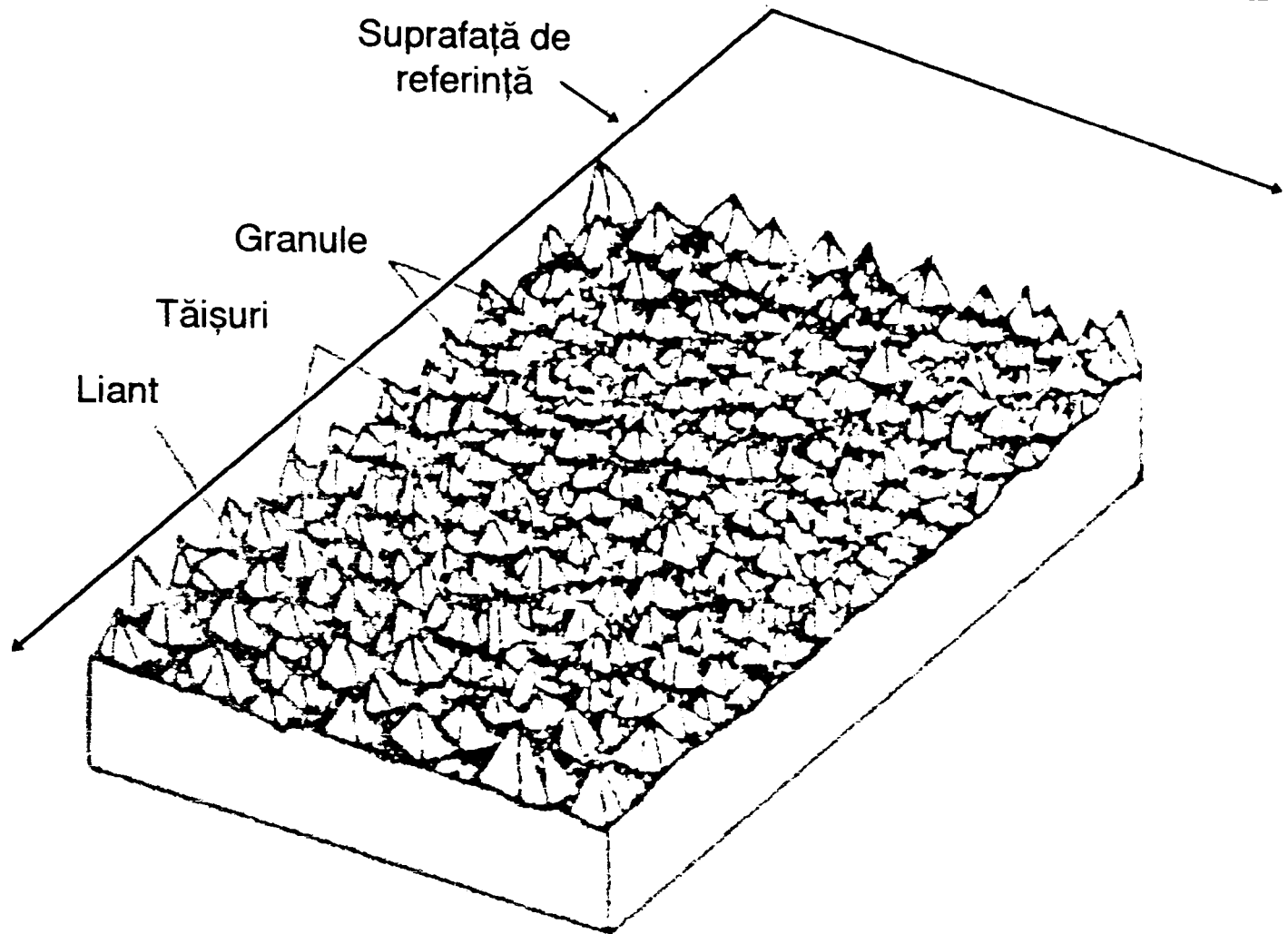


Fig.2.10

așchii. Materialul de prelucrat, mediul în care este dispus abrazivul (liant sau mediu reologic) și reacțiile chimice care însoțesc procesul exercită influențe complexe, insuficient modelate. Zona de interacțiune dintre mediul abraziv (corp sau MAMR) și obiectul de prelucrat este caracterizată de granulele abrazive, tășurile acestora și spațiul dintre ele, elemente cu ajutorul cărora se poate descrie capacitatea de așchiere și comportările de pătrundere în material.

Rezultă evident ideea că nu toate granulele abrazive au aceleași condiții de așchiere. În plus, se manifestă tendința de îndesire a granulelor abrazive la un nivel  $z$ , lucru ce poate fi modelat, considerându-se legătura dintre granulă și mediu ca fiind realizată printr-un resort (fig.2.11). Granulele 1 și 4 și mai puțin 2 și 3 sub acțiunea forțelor din proces, se vor înfunda și roti, astfel că numărul celor "active" se va modifica.

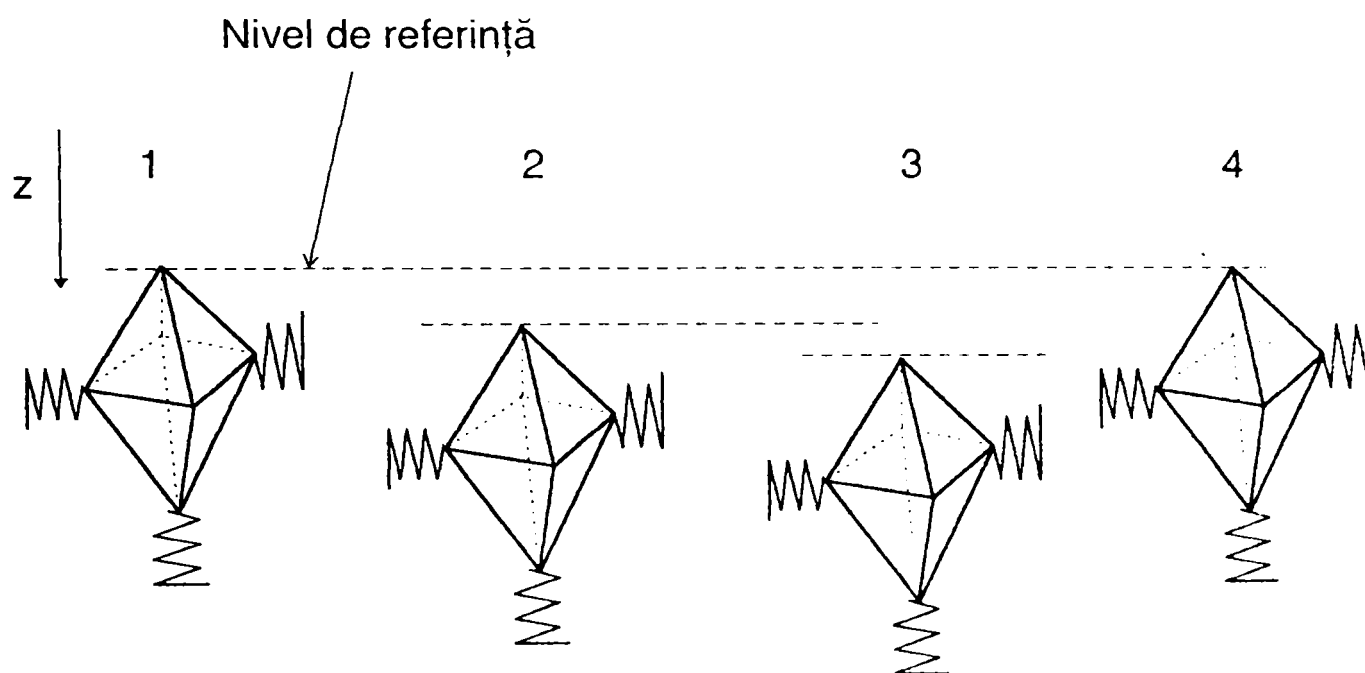


Fig.2.11

Modelele elaborate pe aceste principii [51] utilizează noțiunea de “sesizare statică” a muchiiilor abrazive, conform căreia se evidențiază numai acele muchii așchietoare care vin în contact cu suprafața de prelucrat, în funcție de condițiile de așchiere concrete: adâncime, raportul vitezelor, traiectoria și poziția granulei etc. Numărul acestora raportat la unitatea de lungime, se numește număr dinamic al tășurilor,  $C_{din}$  (celelalte tășuri ale granulelor se vor afla în zona “umbrită” cinematic de către tășurile anterioare și nu vor pătrunde în material):

$$C_{din}(z) = \frac{1}{L} \sum N(z, v, v_r, t, D) \quad (2.15)$$

Derivata acestei funcții în raport cu adâncimea  $z$  a spațiului de așchiere se definește ca densitatea dinamică a tășurilor  $c_{din}(z)$ :

$$\frac{dC_{din}(z)}{dz} = c_{din}(z) \quad (2.16)$$

Cercetările efectuate pe baza acestor noi ipoteze privind topografia suprafeței de lucru în procedeele de abrazare au determinat variația numărului de tășuri și de granule în timpul prelucrării [51]. Astfel, s-a stabilit



că deși cu creșterea adâncimii spațiului de așchiere,  $C_{din}$  crește continuu, numărul dinamic de tășuri de la un  $z_{critic}$ , nu mai are nici o creștere sensibilă. Valoarea lui  $z_{critic}$  este cuprinsă între 10 și 25  $\mu m$  pentru granulațiile și regimurile curent folosite. De asemenea, la atingerea acestei limite, numărul dinamic reprezintă 5...15 % din numărul total de muchii abrazive.

#### 2.2.4. Forțe motrice pentru interacțiunea în spațiul de lucru la prelucrările cu MAMR

Cunoașterea în profunzime a fenomenelor de abrazare din spațiul de lucru este în strânsă corelație cu determinarea principalelor forțe motrice care întrețin procesul. Capacitatea de prelucrare a MAMR este determinată în cele din urmă de câmpul magnetic care acționează asupra granulelor abrazive cu o forță a cărei mărime este suficientă pentru asigurarea mobilității și compactității acestora și realizarea unei acțiuni abrazive. Forțele de așchiere sunt realizate prin interacțiunea granulelor abrazive cu câmpul magnetic iar mărimea și direcția acestora sunt determinate de intensitatea și structura câmpului în spațiul de lucru.

##### *2.2.4.1. Interacțiuni în spațiul de lucru la prelucrările cu MAMR utilizând materiale abrazive feromagnetice*

Acest procedeu se caracterizează prin utilizarea particulelor abrazive (granule și/sau pulberi) cu proprietăți feromagnetice, introduse într-un câmp magnetic creat de magneți permanenți sau electromagneți. Particulele abrazive utilizate sunt: oxizi de fier, oxizi de siliciu, oxizi de aluminiu și fier, granule de fier pur, fontă albă etc. Se formează o "perie" magneto-abrazivă ca urmare a orientării particulelor în lungul liniilor de forță magnetică, "perie" cu ajutorul căreia se realizează așchiera. În interstițiul de lucru umplut cu materialul abraziv feromagnetic, care constituie MAMR, obiectul supus prelucrării realizează o mișcare de rotație și una de oscilație în lungul axei sale. Particulele abrazive (granule sau pulberi) execută în MAMR o mișcare complexă, formată în principal din oscilații pe suprafața circulară a piesei, cu

centrul în axa acesteia, oscilații în jurul axei de orientare proprii și oscilații în lungul generatoarei piesei [4], [54].

Procesul de așchiere este determinat, în ultimă instanță de câmpul magnetic exterior care străbate zona de prelucrare. Studiul fenomenelor care au loc, a dinamicii și cinematicii procesului trebuie să înceapă cu cercetarea structurii câmpului magnetic în spațiul de lucru.

Structura câmpului magnetic poate fi reprezentată grafic prin repartiția spațială a liniilor de forțe echipotențiale ale acestuia [4]. După cum rezultă din figura 2.12, liniile de forță ale câmpului magnetic ( $a_1a_1$ ,  $a_2a_2$ ,  $a_3a_3$ ,  $a_4a_4$  etc.) sunt de fapt niște curbe cărora în fiecare punct li se pot asocia vectorii inducției magnetice. Liniile echipotențiale ( $u_1u_1$ ,  $u_2u_2$ ,  $u_3u_3$ ,  $u_4u_4$  etc.) unesc punctele spațiului cu potențiale magnetice egale și intersectându-se cu liniile de forță ale câmpului magnetic formează o rețea structurală compusă din celule curbilunii.

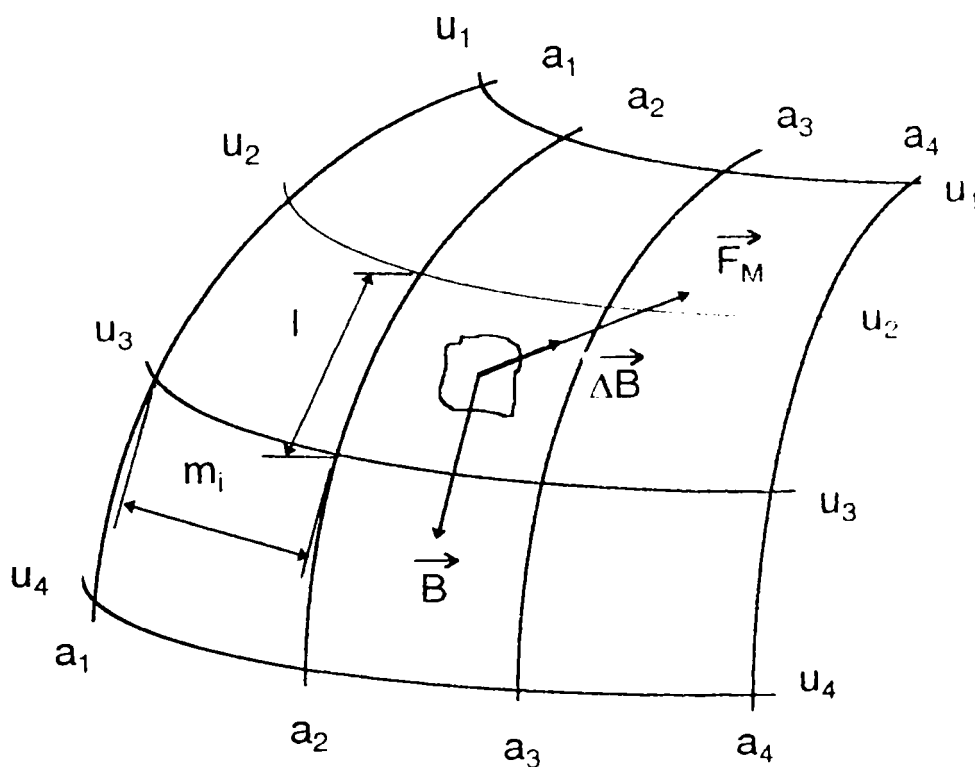


Fig.2.12

Inducția magnetică în fiecare celulă a rețelei este invers proporțional cu lățimea  $m_i$  a acestei celule:

$$B_i = \frac{\Phi}{S_i} = \frac{\Phi}{m_i \cdot l} = \frac{\Phi}{l} \cdot \frac{1}{m_i} \quad (2.17)$$

Astfel, cunoscând scara reprezentării pentru fiecare punct al construcției spațiului cercetat din fig.2.12, cu ajutorul imaginii câmpului se poate determina mărimea și direcția vectorului de inducție magnetică  $\vec{B}_i$

Pentru explicitarea mărimii și direcției forțelor care acționează asupra particulelor abrazive feromagnetice în spațiul de lucru, se aplică relația lui Maxwell [4]:

$$\vec{F}_M = \frac{1}{\mu_o} \cdot \oint_S \left[ \left( \vec{B} \cdot \vec{n} \right) \cdot \vec{B} - \frac{1}{2} \cdot B^2 \cdot \vec{n} \right] \cdot dS \quad (2.18)$$

Admițând că vectorul inducției magnetice intră pe suprafața particulei abrazive feromagnetice și iese din ea după normala la această suprafață, atunci pentru produsul scalar se obține:

$$\left( \vec{B} \cdot \vec{n} \right) = B \cdot n \cdot \cos\left(\vec{B}, \vec{n}\right) = B \cdot n \quad (2.19)$$

relația 2.19 simplificându-se la forma

$$\vec{F}_M = \frac{1}{2 \cdot \mu_o} \oint_S B^2 \cdot \vec{n} \cdot dS \quad (2.20)$$

Acceptând convențional că particula abrazivă feromagnetică are forma unui cub cu latura  $a$ , acest cub poate fi așezat într-un câmp magnetic (fig.2.13). Forța care acționează asupra unui astfel de corp, din partea câmpului magnetic, se va determina prin suma vectorială a forțelor care acționează perpendicular pe fiecare față. Pentru fețele laterale, rezultanta acestor forțe este nulă din cauza simetriei corpului și a câmpului în plan orizontal. Forțele care acționează pe fața superioară și inferioară au, respectiv, expresiile:

$$\vec{F}_V = \frac{a^2}{2 \cdot \mu_o} \cdot B_i^2 \cdot \vec{n}_i \quad ; \quad \vec{F}_H = \frac{a^2}{2 \cdot \mu_o} \cdot B_{ii}^2 \cdot \vec{n}_{ii} \quad (2.21)$$

Considerând ca pozitivă direcția ce coincide cu vectorul gradientului inducției

magnetice se obține:

$$\vec{n}_H = -\vec{n}_V = \vec{n}_{\nabla B} \quad (2.22)$$

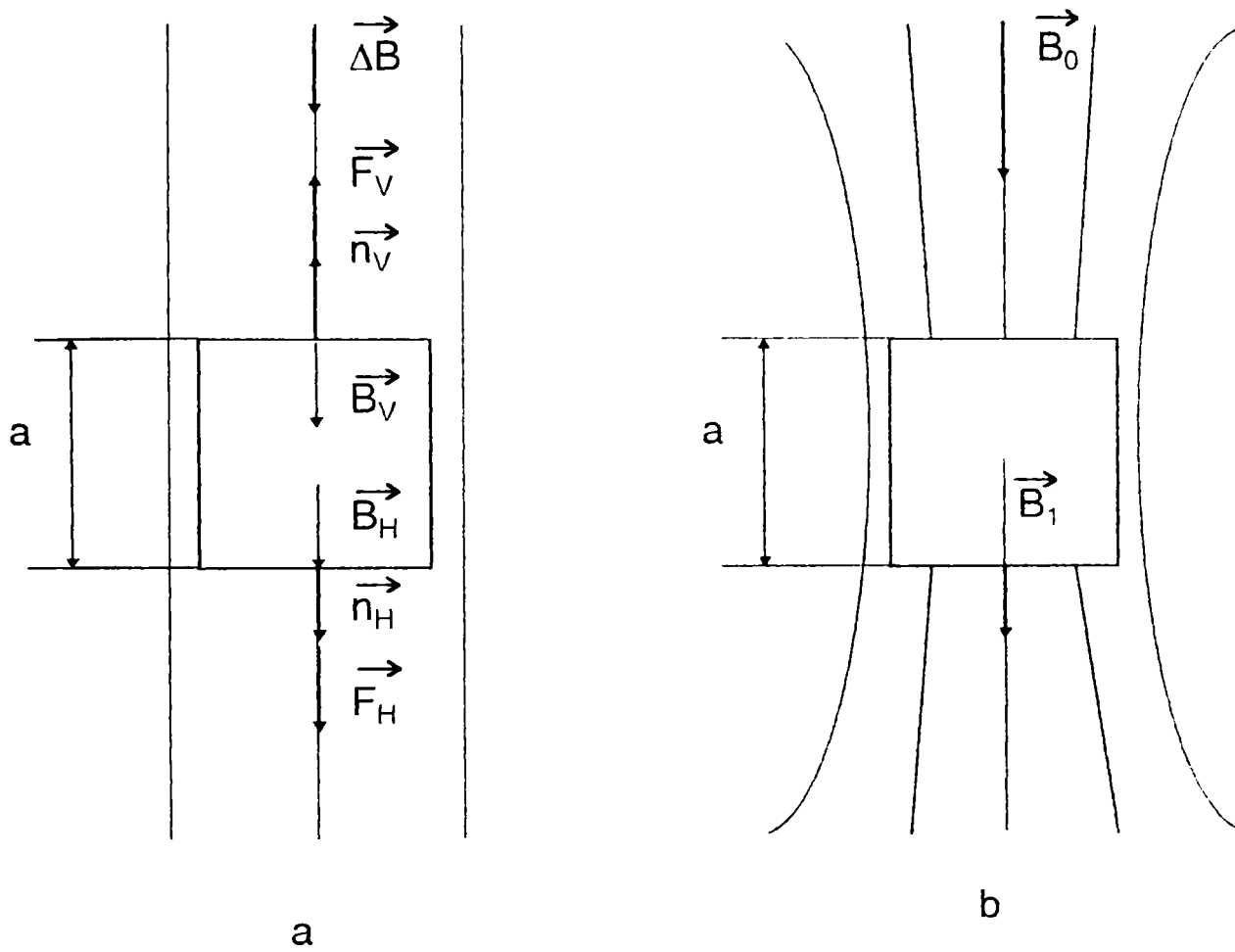


Fig.2.13

Forța magnetică totală care acționează asupra particulei feromagnetice va fi:

$$\vec{F}_M = \vec{F}_V + \vec{F}_H = \frac{a^2}{2 \cdot \mu_0} (B_H^2 - B_V^2) \cdot \vec{n}_{\nabla B} \quad (2.23)$$

Densitatea fluxului magnetic care trece prin fețele superioare și inferioare diferențiază cu mărimea  $\nabla B a$ , unde  $\nabla B$  este gradientul, adică creșterea specifică a inducției magnetice. Mărimea inducției magnetice pe fața inferioară va fi:

$$B_H = B_V + \nabla B a \quad (2.24)$$

iar forța magnetică totală din relația (2.23) devine:

$$\vec{F}_M = \frac{a^2}{2 \cdot \mu_0} \left[ B_V^2 + 2\nabla B \cdot a \cdot B_V + (\nabla B \cdot a)^2 - B_V^2 \right] \vec{n}_{\text{ext}} \quad (2.25)$$

Deoarece la valori mici ale lui  $a$ , mărimea  $\nabla B a \rightarrow 0$  iar  $a^3 = V_p$ , unde  $V_p$  este volumul particulei abrazive feromagnetice, obținem în final:

$$\vec{F}_M \approx \frac{1}{\mu_0} \cdot V_p \cdot B \cdot \nabla B \quad (2.26)$$

În spațiul din jurul particulei abrazive feromagnetice introduse în câmpul magnetic are loc o îngustare a fluxului magnetic (fig.2.13, b) iar topografia liniilor de câmp va diferi în realitate, în raport cu cea din figura 2.13, a.

În mod similar, se pot determina expresiile forțelor cu care acționează câmpul magnetic asupra particulelor feromagnetice, considerând și alte forme pentru aceste particule: sferă, elipsoid etc. Problematika determinării interacțiunilor în spațiul de lucru este mult mai complexă, ținând seamă de faptul că și particula abrazivă feromagnetică introdusă în câmp magnetic devine dipol magnetic, ce interacționează cu acest câmp. De aceea, modelarea ulterioară a interacțiunilor se va face în următoarea succesiune:

- determinarea câmpului magnetic în interstițiul de lucru și a forțelor cu care acesta acționează asupra particulei în câmp;
- determinarea momentului dipolului magnetic al particulei feromagnetice;
- determinarea interacțiunilor particulă-câmp.

Particularitățile fenomenologice ale proceselor de abrazare pentru acest procedeu se vor analiza, în continuare, considerând cazul prelucrării unei suprafețe cilindrice exterioare după schema din figura 2.14. Spațiul de lucru în acest caz este un interstițiu inelar, între suprafața piesei de prelucrat și suprafața cilindrică a sistemului magnetic. Această porțiune de lucru se poate împărți în trei sectoare: zona de intrare  $abcd$ , zona centrală  $cdef$  și zona de ieșire  $efgh$ .

În zona de intrare  $abcd$  se formează "lanțurile unitare de granule/particule abrazive", care, pe măsură ce părăsesc această zonă și se apropie de zona centrală  $cdef$  au tendința de a se "îndesa" [54].

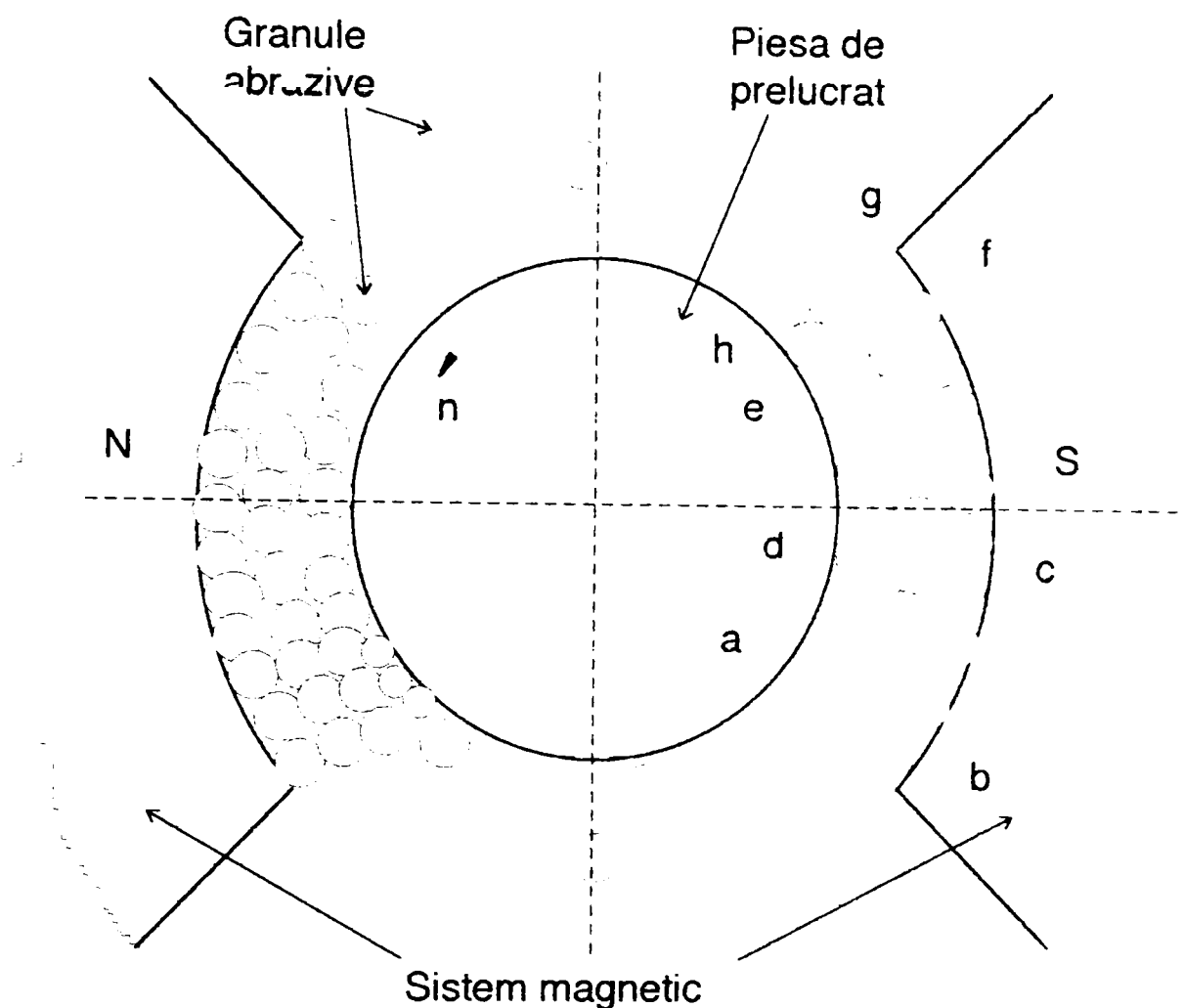


Fig.2.14

Comportarea întregii mase abrazive determină formarea unor “perii” așchietoare, care după cum se vede din figura 2.14, tind să se deplaseze în direcția de mișcare a piesei, spre zona *efgh*, de ieșire din interstițiu. Unele particule se desprind de masa respectivă iar altele își continuă deplasarea împreună cu suprafața piesei. În locul celor desprinse vin altele pentru completare, conferind MAMR proprietăți așchietoare sporite, fenomen similar “autoascuțirii” discurilor abrazive.

#### 2.2.4.2. Interacțiuni în spațiul de lucru la prelucrările cu MAMR utilizând materiale abrazive nemagnetice

Punctul de plecare al metodei este dat de [1], conform căreia, o forță ascensională  $\vec{F}$  acționează asupra unui corp nemagnetic introdus într-un fluid

magnetic. Se folosește o combinație de câmp magnetic, fluid magnetic și materiale abrazive nemagnetice, care, conform principiului amintit pot fi dispersate într-o anumită poziție în masa fluidului magnetic, iar forțele ascensionale respective pot fi folosite ca forțe de așchiere.

Fluidele magnetice (ferofluide sau lichide magnetice) sunt suspensii coloidale ultrastabile de particule feri sau fero-magnetice (magnetită,  $Fe_3O_4$ , Fe, Co, Ni), care își păstrează starea cvasiomogenă chiar și sub acțiunea unui câmp magnetic intens. Particulele magnetice au dimensiuni de  $100 \text{ \AA}$  și se integrează în structura lichidului de bază, de regulă prin intermediul unei substanțe tensioactive, cu rol de stabilizator. Moleculele acestor substanțe formează un strat monomolecular pe fiecare particulă ( $10^{18}$  particule/cm<sup>3</sup>) și realizează cuplajul cu lichidul de bază. Sub acțiunea unui câmp magnetic neuniform ce acționează asupra coloizilor, lichidul se va deplasa ca un întreg, asemănător unui mediu magnetizat. Particulele devin astfel micro-magneți, adică au moment magnetic propriu. Magnetizația substanței, adică momentul magnetic pe unitatea de volum are expresia:

$$\vec{M} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{m}_i}{V} \quad (2.27)$$

iar forța magnetică pe unitatea de volum:

$$\vec{f}_m = \mu_0 M \nabla H \quad ; \quad \left| \vec{f}_m \right| \approx M \quad \text{respectiv} \quad \left| \vec{f} \right| \approx |\nabla H| \quad (2.28)$$

Asupra unui corp nemagnetic, având  $\mu = \mu_0$ , introdus într-un fluid magnetic, aflat la rândul său sub acțiunea unui câmp magnetic, va acționa o forță suplimentară, de origine magnetică (fig.2.15). Această forță este dependentă de intensitatea și gradientul câmpului. În anumite condiții, corpurile cu densitate mult mai mare decât densitatea fluidului plutesc, iar acest fenomen se numește *levitație*. Rezultanta forțelor care acționează asupra corpului va fi de forma:

$$\vec{F} = -\iint_S p \cdot \vec{ds} - \vec{k} \iiint_V \rho_s \cdot \rho \cdot dv = -\iiint_V \nabla p \cdot dv - \vec{k} \iiint_V \rho_s \cdot g \cdot dv \quad (2.29)$$

Deoarece:

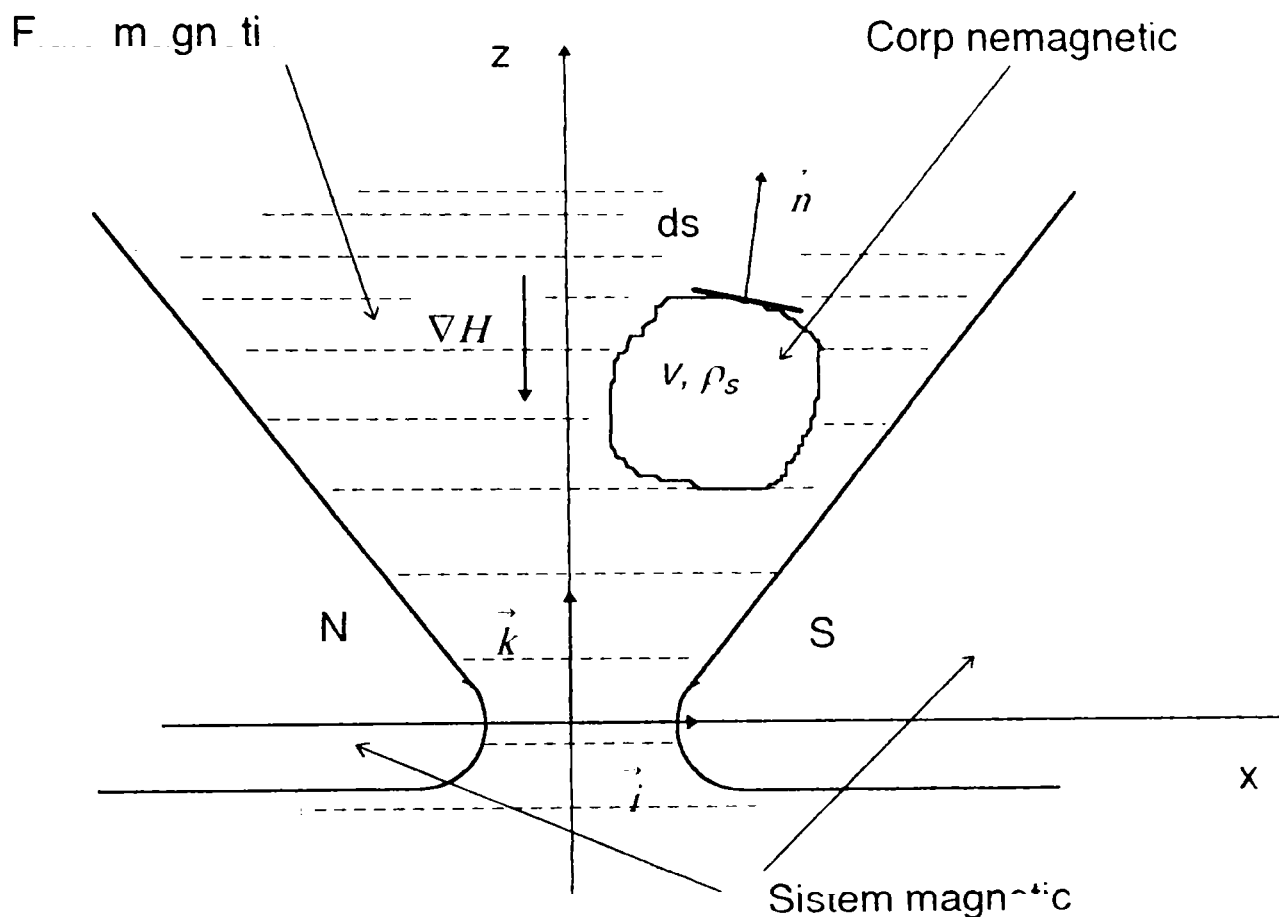


Fig.2.15

$$\nabla p = \mu_0 \cdot M \cdot \nabla H + \rho \cdot g \cdot \nabla z \quad (2.30)$$

iar condițiile inițiale impun:

$$\nabla H = \vec{k} \frac{\partial H}{\partial z} \quad (2.31)$$

ceea ce determină ca:

$$\nabla p = \mu_0 \cdot M \cdot \nabla H + \rho \cdot g \cdot \nabla z = \mu_0 \cdot M \cdot \nabla H + \rho \cdot g \cdot \vec{k} = \mu_0 \cdot M \frac{\partial H}{\partial z} \vec{k} + \rho \cdot g \cdot \vec{k} \quad (2.32)$$

În caz de echilibru obținem:

$$\vec{k} \iiint \mu_0 \cdot M \frac{\partial H}{\partial z} dv = \vec{k} \cdot g \iiint (\rho - \rho_s) dv \quad (2.33)$$

respectiv:

$$\rho_{ap} = \rho_s = \rho - \frac{\mu_0}{g} \cdot M \frac{\partial H}{\partial z} \quad \text{dacă} \quad M \approx M_{sat}; \quad \frac{\partial H}{\partial z} = const. \quad (2.34)$$



relație care dă condiția plutirii unui corp în fluid magnetic.

Relația (2.34) arată că densitatea aparentă a fluidului magnetic poate fi modificată continuu, în limite foarte largi, în funcție de magnetizarea fluidului magnetic și gradientul câmpului magnetic aplicat. Introducând într-un astfel de fluid magnetic materiale abrazive nemagnetice, care levitează, se obțin forțele levitaționale, care pe suprafața obiectului supus prelucrării creează presiunea de așchiere necesară.

## 2.3. Procese tehnologice de prelucrare cu MAMR

### 2.3.1. Procese tehnologice de prelucrare cu MAMR utilizând materiale abrazive feromagnetice

Literatura de specialitate care stă la baza acestei sinteze, consemnează existența unui mare număr de scheme tehnologice de prelucrare cu MAMR. Aceasta se explică prin diversitatea formelor geometrice a suprafețelor care prezintă interes pentru prelucrare, dar și prin posibilitățile largi ale câmpului magnetic capabil să îndeplinească diferite funcții în timpul prelucrării. Clasificarea schemelor existente se poate face după mai multe criterii, cele mai semnificative fiind criteriul cinematic și cel al rolului câmpului magnetic.

În figura 2.16 se prezintă clasificarea schemelor principiale după criteriul cinematic, respectiv al modului de efectuare al mișcărilor.

În continuare se vor prezenta procesele tehnologice care redau cele mai semnificative funcții pe care le poate îndeplini câmpul magnetic.

În figura 2.17 câmpul magnetic și masa abrazivă formează "o sculă așchietoare" de o anumită formă și asigură forțele necesare așchierii. Mișcarea de așchiere se transmite piesei de prelucrat, prin acționări separate, de regulă electromecanice. Sistemul magnetic este constituit din capetele polare cu electromagneți (numiți și inductori) și împreună cu pulberea abrazivă feromagnetică formează "scula așchietoare". Pe lângă mișcarea principală de așchiere, de rotire a piesei, e necesară o mișcare de oscilație relativă în lungul axei de rotație realizată fie de inductor, fie de piesă.

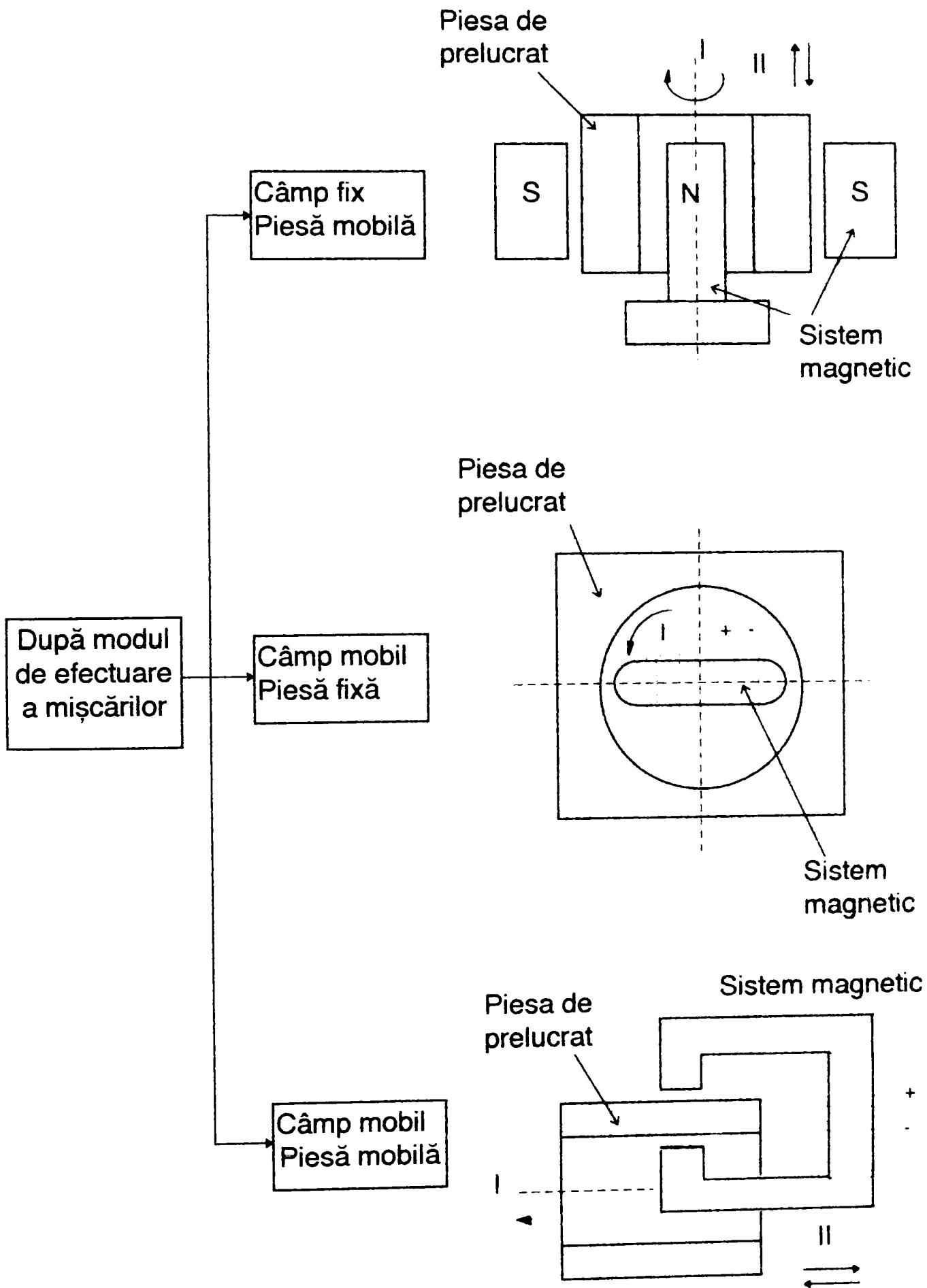


Fig.2.16

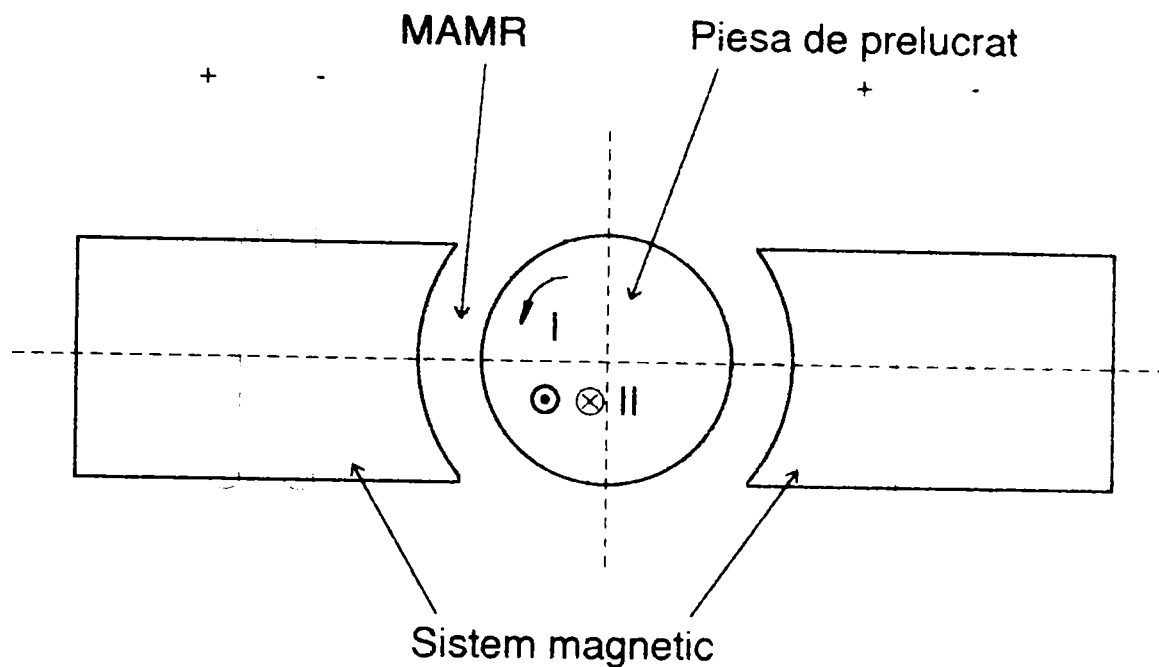


Fig.2.17

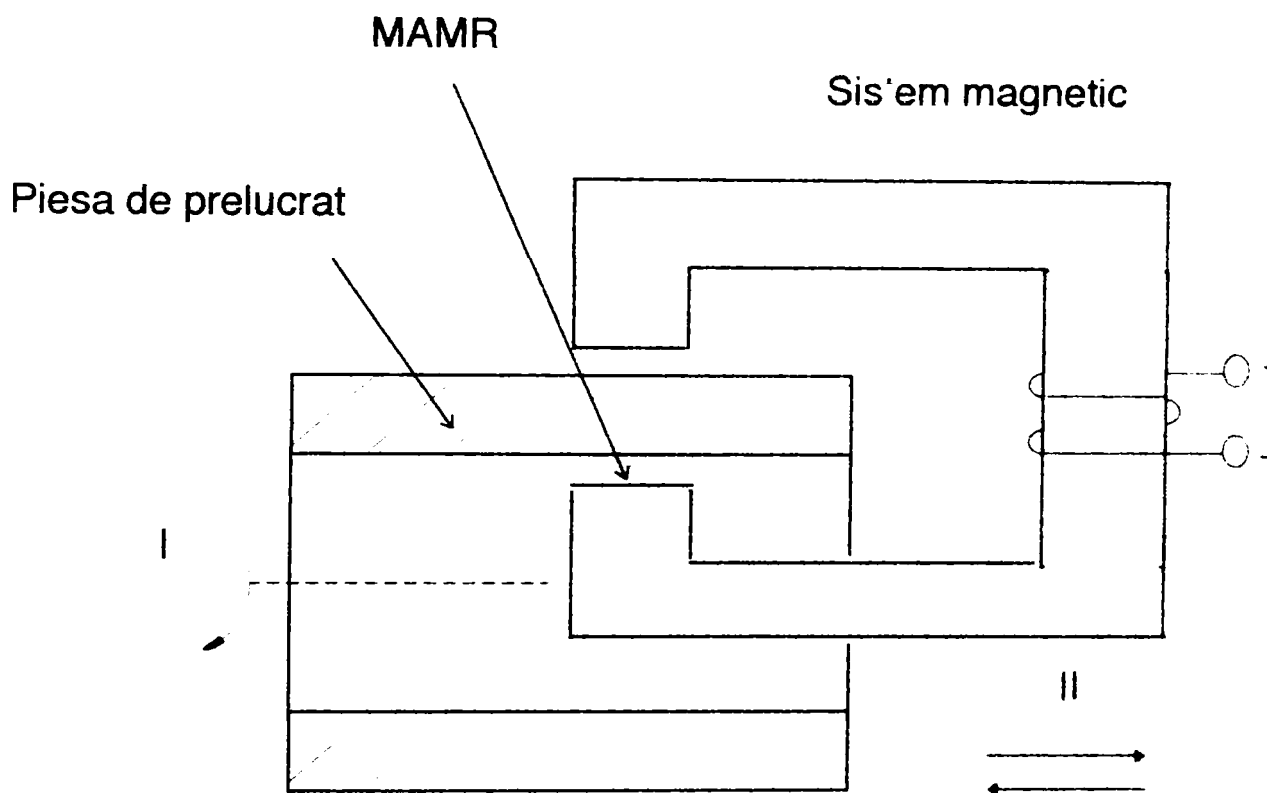


Fig.2.18

Pe lângă piese de revoluție (fig.2.17 și 2.18) se pot prelucra piese cu configurație oarecare (fig.2.19). Piesele de prelucrat, cu secțiune mică și configurație oarecare, au posibilitatea deplasării în lungul interstițiului median

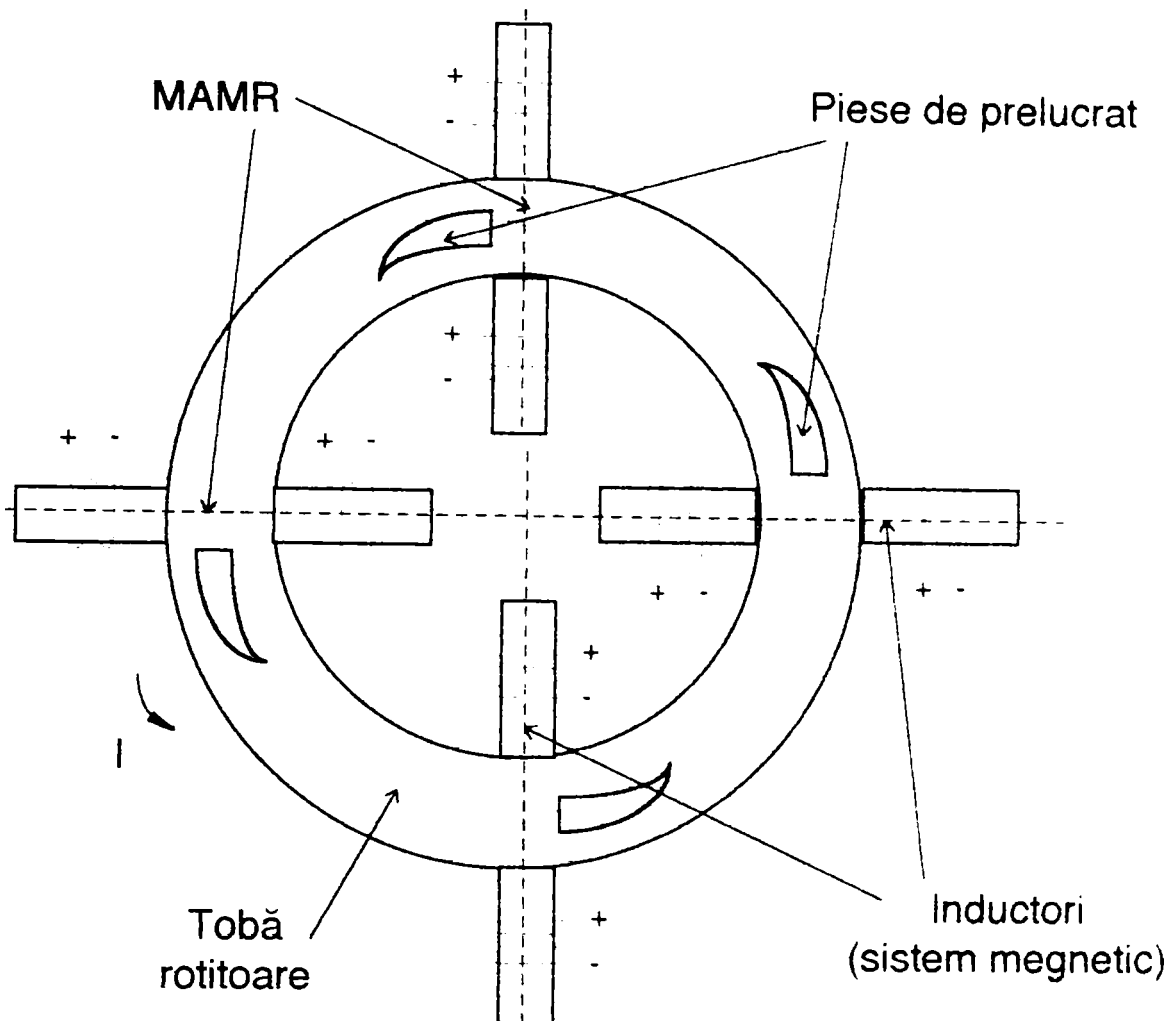


Fig.2.19

al tobei inelare. Fluxurile magnetice ale electromagneților traversează în câteva locuri, în direcție radială, spațiul de lucru și formează cu pulberea abrazivă feromagnetică a acestor zone "scula așchietoare" specifică, cu rigiditate reglabilă. Piesele ce trebuie prelucrate traversează în mod repetat zonele respective și sunt supuse acțiunii abrazive.

Pentru schemele din figurile 2.20, 2.21 și 2.22 este caracteristic faptul că mișcarea principală de așchiere nu mai este transmisă piesei, ci "sculei" adică MAMR, în contul mișcării polilor electromagneților. Se pot prelucra suprafețe ale pieselor feromagnetice (fig.2.20 și 2.22) precum și suprafețe plane sau profilate ale pieselor nemagnetice (fig.2.21), caz în care se utilizează un sistem magnetic închis, format din doi inductori între care se interpune piesa.

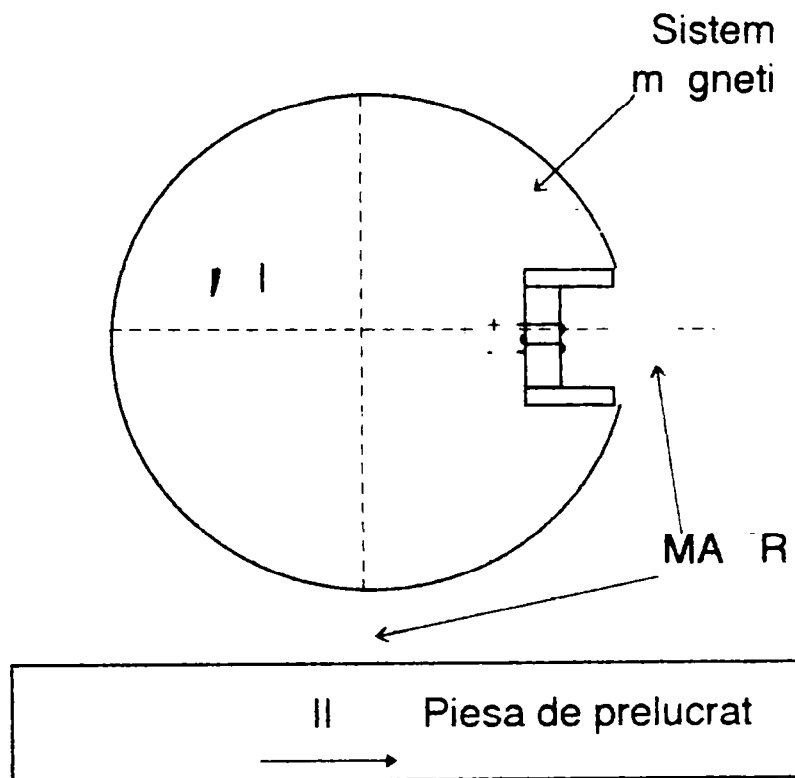


Fig.2.20

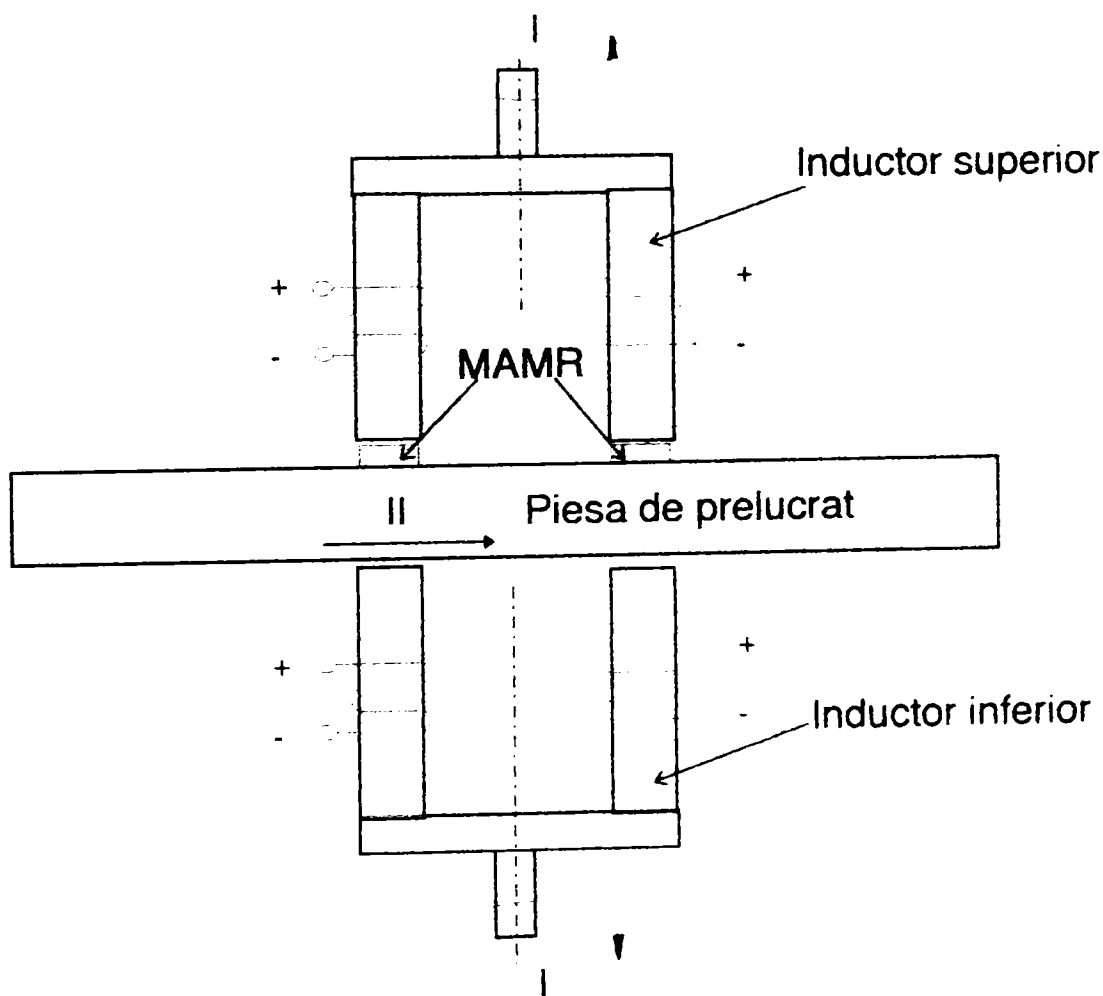


Fig.2.21

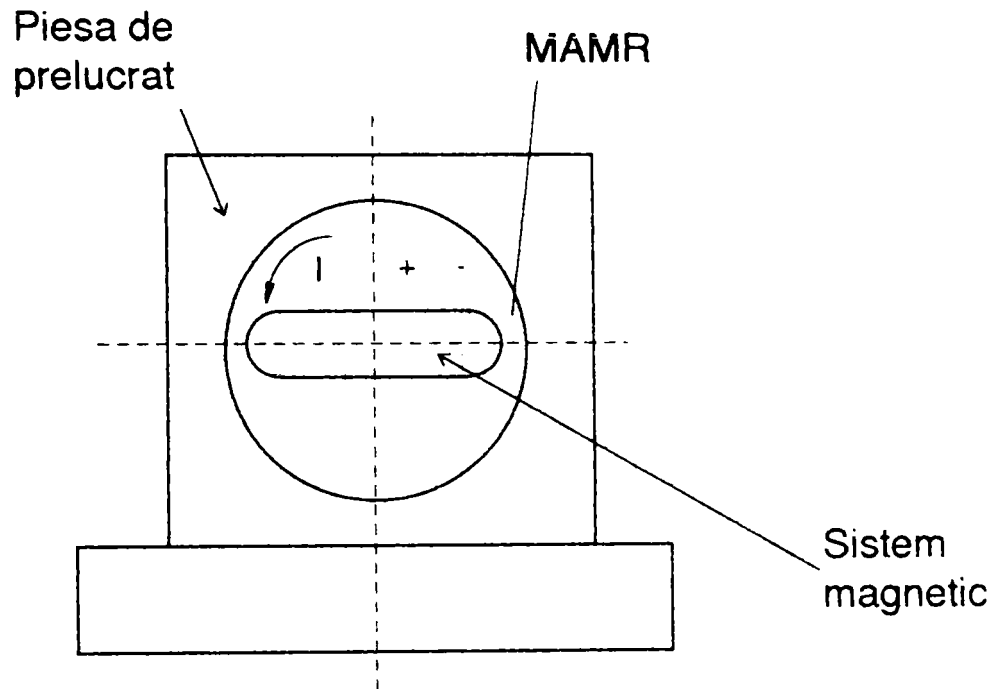


Fig.2.22

Schema din figura 2.23 se deosebește de cele anterioare prin faptul că masa abrazivă feromagnetică sau o suspensie a sa se așează împreună cu piesa de prelucrat într-un vas. Câmpul magnetic generat din exterior, variabil

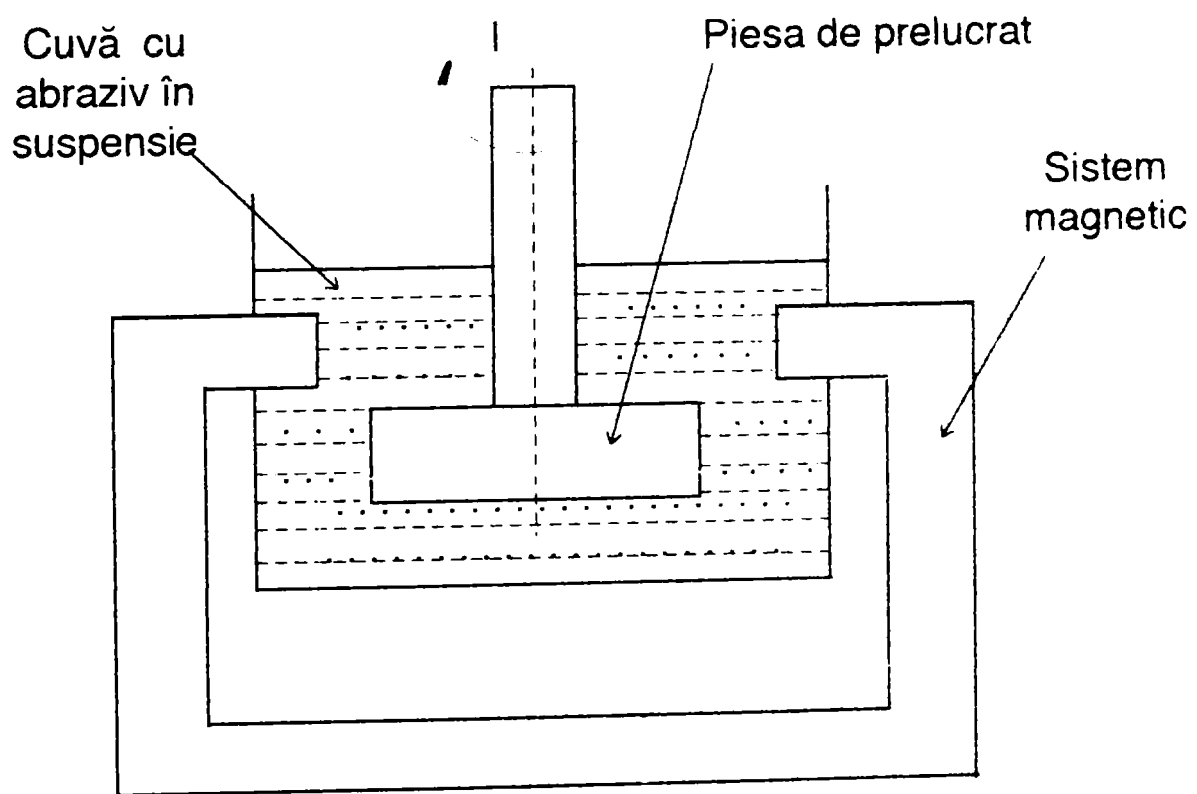


Fig.2.23

ca mărime și direcție, determină deplasarea materialului abraziv în interiorul vasului și realizarea acțiunilor abrazive pe piesă. Pe înfășurările electromagneților se aplică un curent alternativ, a cărui frecvență și amplitudine se poate modifica.

### 2.3.2. Procese tehnologice de prelucrare cu MAMR utilizând materiale abrazive nemagnetice

Caracteristica generală a acestor procedee este faptul că obiectul supus prelucrării este din material nemagnetic. Se supun acestor prelucrări piese din materiale neferoase (cupru, aluminiu și aliajele lor), materiale polimerice, materiale ceramice.

În figura 2.24 se prezintă modul de prelucrare pentru o bară cilindrică din polimeri acrilici. Bara este fixată într-o mandrină și execută o mișcare de

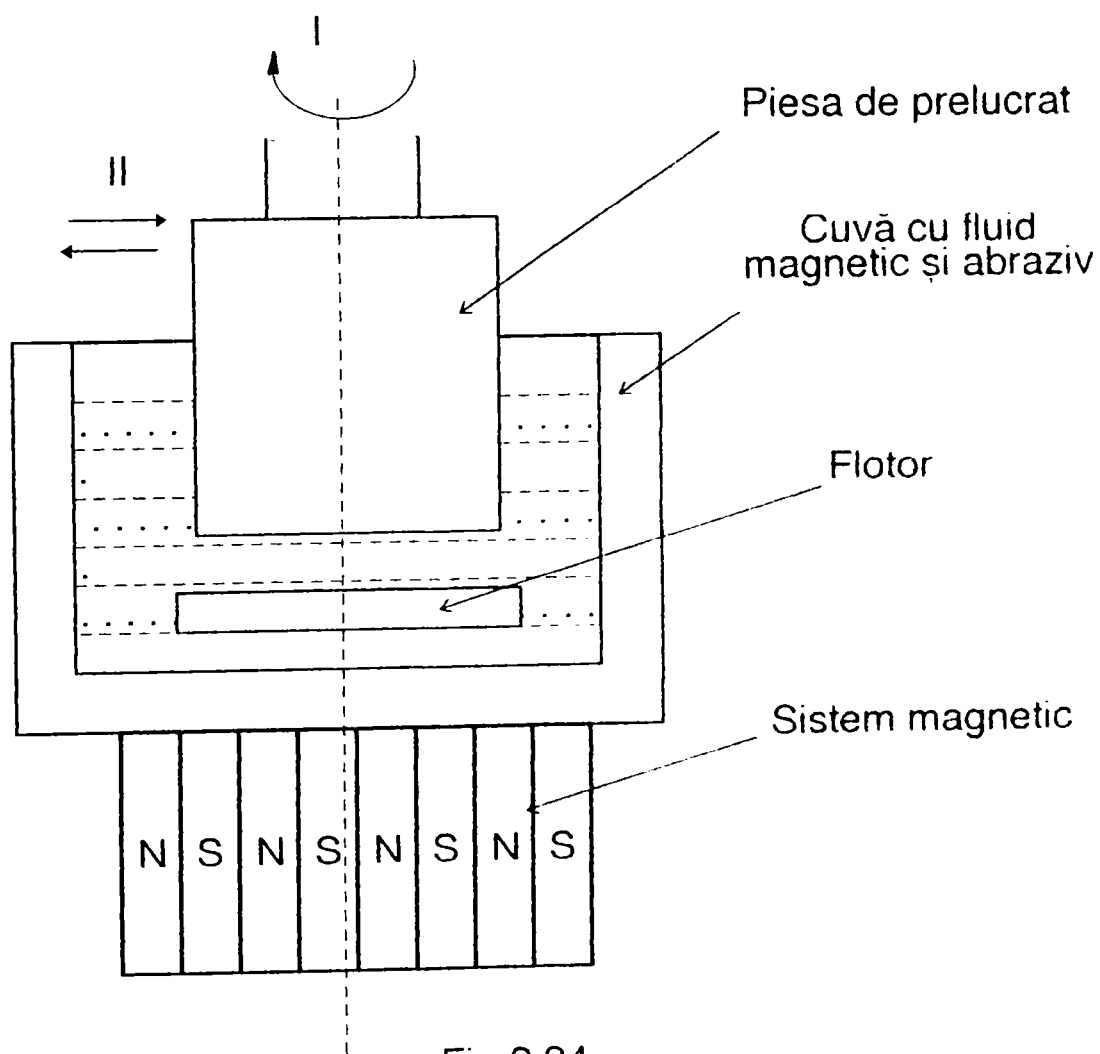


Fig.2.24

rotație, cu turația  $n=4000-40000$  rot/min precum și o mișcare de translație, cu un avans de 50 mm/min. Câmpul magnetic este creat de magneți permanenți care au fost astfel asamblați încât polaritățile magnetelor adiacenți să fie opuse. Interstițiul de lucru este de 1 mm. Fluidele magnetice utilizate sunt pe bază de hidrocarburi (W35 și DES-40) [19] iar particulele abrazive de tipul oxizilor de aluminiu și carburi de siliciu. Productivitatea prelucrării crește considerabil, dacă se utilizează un element intermediar denumit *flotor* interpus între polii magnetelor și suprafața de prelucrat. În figura 2.25 se supun prelucrării bile de ceramică, care sunt puse în mișcare de rotație de către un dorn de antrenare.

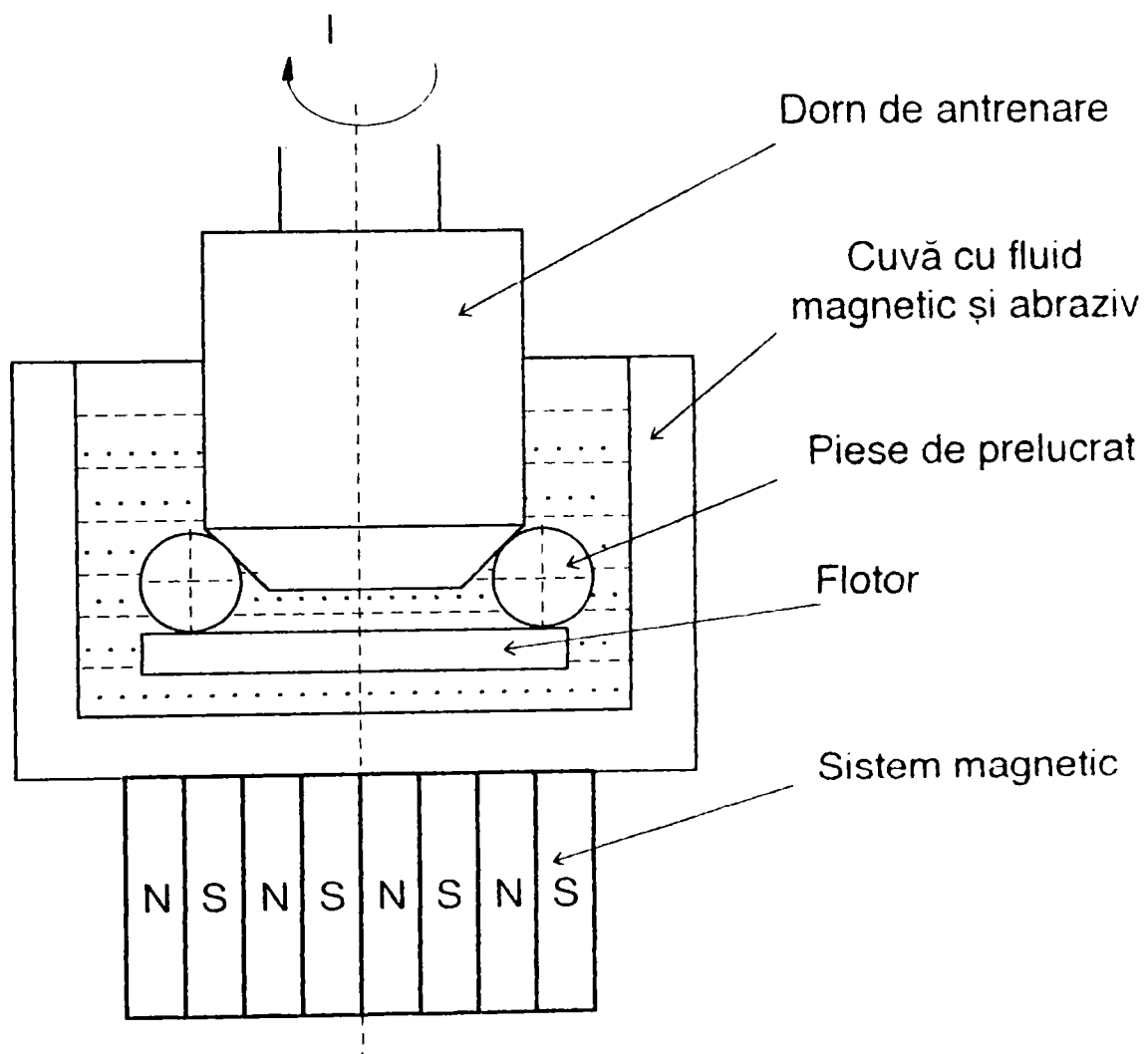


Fig.2.25

În ambele situații, forțelor ascensionale ale granulelor nemagnetice li se adaugă cele ale flotorului confecționat, de asemenea, din material



nemagnetic cu bune proprietăți de levitație, mărindu-se astfel capacitatea de aşchiere a granulelor abrazive.

Cercetătorii care au dezvoltat acest procedeu [63], [64] l-au aplicat în situații în care, practic, nici o altă metodă nu ar fi dat rezultate. Este cazul prezentat în figura 2.26, când se prelucrează suprafața interioară a unor piese tubulare, de diametru mic (8...15 mm) și grosime mică a peretelui (0,8...2 mm) confecționate din materiale nemagnetice.

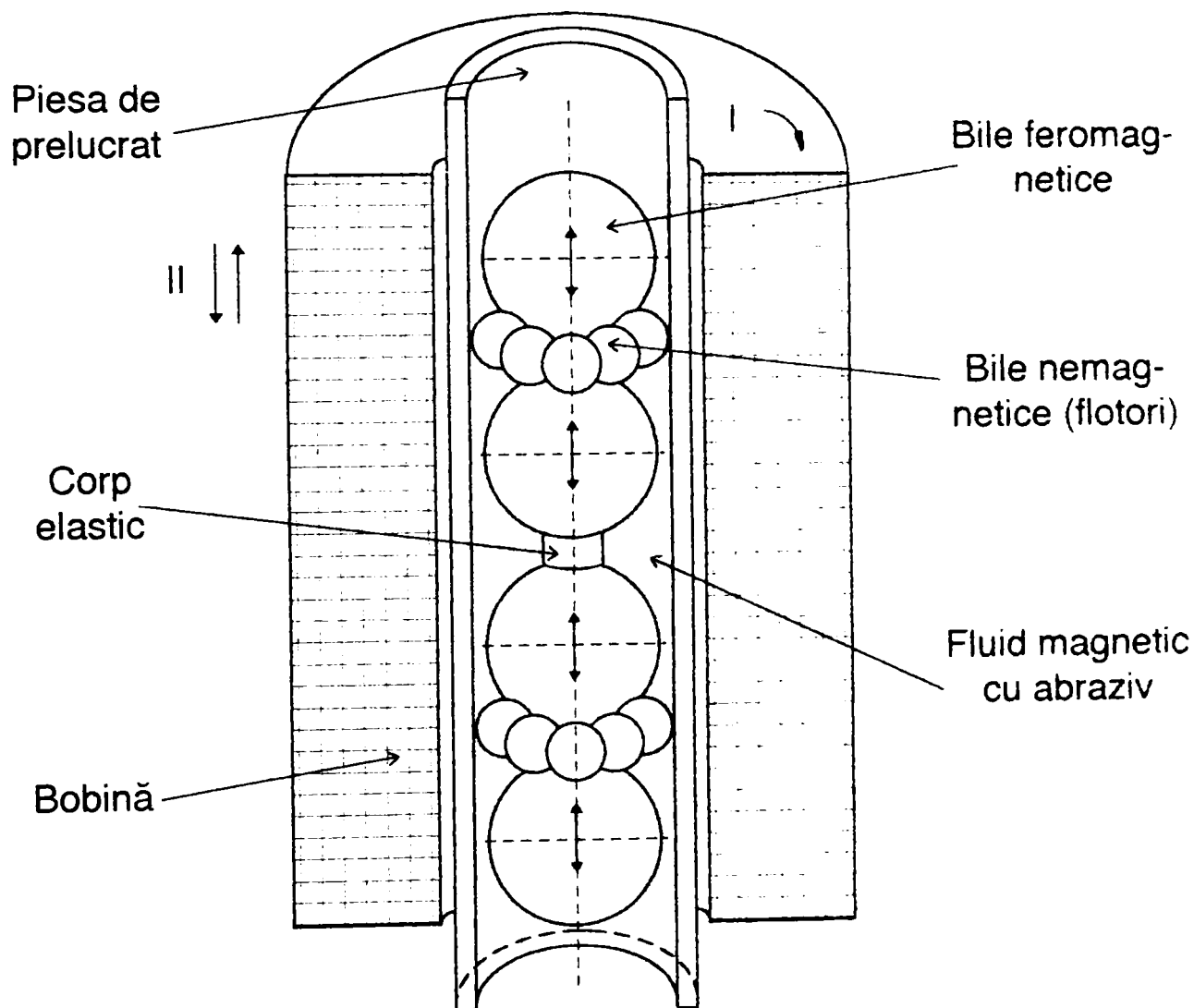


Fig.2.26

Sistemul magnetic în acest caz are o construcție specială, fiind constituit dintr-o bobină ce are ca miez un ansamblu de patru bile din material feromagnetic. Între primele și ultimile două bile ale miezului magnetic sunt

dispuși circular flotorii sferici, din material nemagnetic, iar între bila a doua și a treia se interpune un corp elastic. Câmpul magnetic este asigurat de o bobină care, fiind alimentată cu un curent de frecvență variabilă, va determina mișcări de atracție și de respingere din partea bilelor feromagnetice. Acestea vor deplasa radial flotorii, care împreună cu fluidul magnetic și materialul abraziv vor realiza efecte de așchiere în interiorul tubului.

#### 2.4. Concluzii și probleme deschise privind prelucrările cu MAMR

Din analiza stadiului actual al prelucrărilor cu MAMR se desprind următoarele concluzii:

- ◆ există o mare varietate de scheme tehnologice care se aplică, determinată de prioritatea acordată detaliilor și variantelor individuale;

- ◆ se utilizează prelucrări cu MAMR în diverse stadii ale proceselor de fabricație, de la operații de debavurare, polizare, sablare, până la prelucrări finale, de netezire și precizie geometrică ridicată;

- ◆ cele mai favorabile rezultate se obțin la prelucrarea materialelor neferoase (aluminiu, cupru și aliajele acestora), materialelor ceramice, polimerice, adică materialelor unde procedeele clasice se aplică mai greu;

- ◆ se pot prelucra piese cu suprafețe simple, riglate, (plane, cilindrice, sferice), dar și cu configurație oarecare, sau suprafețe greu accesibile prin alte procedee tehnologice;

- ◆ cercetătorii au abordat fenomenologia procesului, făcând (uneori) multe ipoteze simplificatoare, a căror rezultat a fost îndepărtarea de condițiile reale;

- ◆ se face simțită lipsa unei abordări sistemice, care să definească (mai) complet fenomenele din interiorul proceselor;

- ◆ preocupările autohtone sunt sărace în aceste aplicații (doar o singură teză de doctorat a fost susținută în acest sens).

Pentru a aduce aceste prelucrări în zona noastră de interes, geografic

și tehnologic, consider necesară realizarea următoarelor obiective:

⇒ stabilirea unui sistem tehnologic generalizat, care să răspundă tuturor variantelor și detaliilor individuale;

⇒ găsirea unor modele generale parțiale/totale ale proceselor de transformare tehnologică din spațiul de lucru;

⇒ analiza posibilităților de rezolvare a ecuațiilor ce exprimă modelele generale;

⇒ compensarea instabilității unor submulțimi de factori ce determină modificarea capacității de așchiere a MAMR prin modelare experimentală, modelare care să suplinească și necunoașterea în detaliu a tuturor mărimilor de transformare tehnologică.

Obiectivele enunțate sunt asumate ca obiective prioritare ale prezentei teze de doctorat.

# CAPITOLUL 3

## MODELE GENERALE ALE SISTEMELOR TEHNOLOGICE DE PRELUCRARE CU MEDII ABRAZIVE MAGNETO-REOLOGICE

### 3.1. Structura sistemelor tehnologice de prelucrare cu medii abrazive magneto-reologice

Elementele definitorii ale acțiunii tehnologice de prelucrare cu MAMR pot fi evidențiate, cel mai bine, prin analiza aspectului structural al acesteia.

În pofida diversității variantelor și detaliilor individuale prezentate în capitolul 2, procedeele de prelucrare cu MAMR posedă o structură principială identică a sistemului de acțiune tehnologică reprezentată ca schemă bloc în figura 3.1. În cele ce urmează, această structură va fi analizată din punct de vedere morfologic și funcțional.

#### 3.1.1. Structura morfologică

Principalele elemente componente ale unui astfel de sistem tehnologic sunt următoarele:

- blocul mecanic;
- blocul magneto-reologic;
- blocul electric;
- blocul de comandă și control.

Blocul mecanic, la rândul său se compune din batiu, săniile pentru asigurarea deplasărilor, transmisiile mecanice și echipamentul de completare și dispozitivare, care realizează conexiunile cu celelalte blocuri.

În componența blocului magneto-reologic se regăsește materialul abraziv, mediul purtător, sistemul de alimentare/vehiculare, sistemul magnetic și echipamentul de completare-dispozitivare corespunzător.

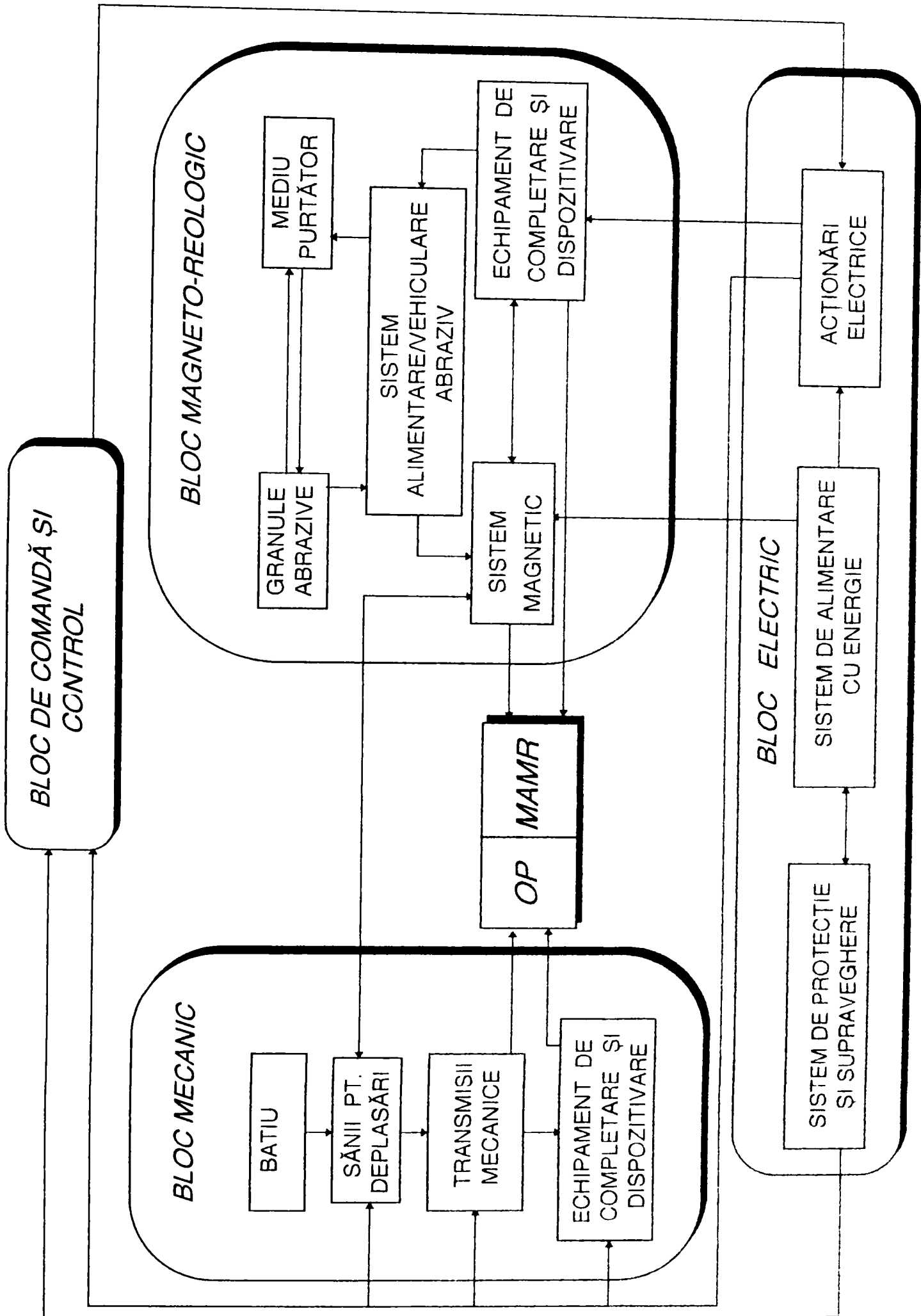


Fig.3.1

Blocul electric are în componența sa sistemul de alimentare cu energie electrică, acționările electrice, sistemul de protecție și supraveghere.

Blocul de comandă și control cuprinde aparatele și sistemele de interconectare/sincronizare între toate blocurile componente ale sistemului tehnologic.

### 3.1.2. Structura funcțională

Realizarea acțiunii tehnologice de prelucrare cu MAMR este condiționată de îndeplinirea unor funcții vitale de către componentele sistemului tehnologic.

*Blocul mecanic* îndeplinește următoarele funcții:

- instalarea, poziționarea și fixarea corespunzătoare a obiectului supus prelucrării în raport cu MAMR;
- realizarea cinematicii necesare generării și prelucrării suprafeței;
- susținerea, poziționarea și consolidarea celorlalte subansamble și blocuri componente.

*Blocul magneto-reologic* realizează următoarele funcții:

- transformarea energiei primare (cel mai adesea electrică sau magnetică) în energie de efect destinată desfășurării proceselor abrazive din spațiul de lucru;
- formarea, întreținerea și regenerarea MAMR;
- introducerea în spațiul de lucru a abrazivului, dozarea și vehicularea acestuia;
- refacerea condițiilor geometrice și tehnologice optime din interstițiul de lucru, pentru asigurarea continuității prelucrării.

*Blocul electric* asigură următoarele funcții:

- adaptează energia (preponderent electrică) la cerințele sistemului;
- distribuie energia electrică unităților funcționale (acționări electrice, sistem magnetic, sistem de protecție și siguranță) din cadrul sistemului tehnologic;
- transformă energia electrică în energie mecanică la unitățile care realizează cinematica procesului de prelucrare;

- asigură protecția și siguranța în exploatare a tuturor componentelor sistemului tehnologic.

*Blocul de comandă și control* îndeplinește următoarele funcții:

- conectarea/deconectarea sistemului tehnologic și a blocurilor componente în condiții de exploatare normală și respectiv, în caz de avarie;
- controlează funcționarea sincronizată și coordonată a tuturor celorlalte blocuri din sistemul tehnologic.

### 3.2. Abordarea sistemică

#### 3.2.1. Modelul intrări - ieșiri al sistemelor tehnologice de prelucrare cu MAMR

Sistemele tehnologice de prelucrare cu MAMR se consideră sisteme concrete, având o structură constituită și o funcționalitate determinată, exprimată prin capacitatea de realizare a unor transformări specifice de energie, substanță și informație. Aceste transformări sunt concretizate prin acțiunile de prelevare de material de pe suprafața OP.

Având în vedere multitudinea schemelor și variantelor individuale care utilizează prelucrări cu MAMR, prezentate în capitolul 2, se impune elaborarea unui model generalizat pentru aceste sisteme tehnologice. Schema unui astfel de sistem tehnologic generalizat de prelucrare cu MAMR, într-o soluție originală, bazată pe modelul intrări - ieșiri, se prezintă în fig.3.2.

Se consideră că intrările sunt constituite din materiale (fluidul purtător, granulele abrazive și obiectul de prelucrat OP), energia primară (electrică și magnetică) precum și din informația tehnologică.

În sistemul tehnologic care dispune de o anumită structură morfologică și funcțională, structură ce a fost prezentată în fig.3.1., au loc procesele de transformare tehnologică, finalizate prin prelucrarea suprafeței OP. Aceste transformări se realizează pe baza unor funcții și programe de lucru bine definite. Obiectivul relevant în acest caz este prelevarea de material, care se realizează pe suprafața OP. Procesul tehnologic este supus unor restricții, cum ar fi: proprietățile magnetice/nemagnetice ale OP, anumite condiții de

realizare a MAMR. Procesul tehnologic este influențat de o serie de perturbații, cea mai importantă fiind determinată de aşchiera cu granule

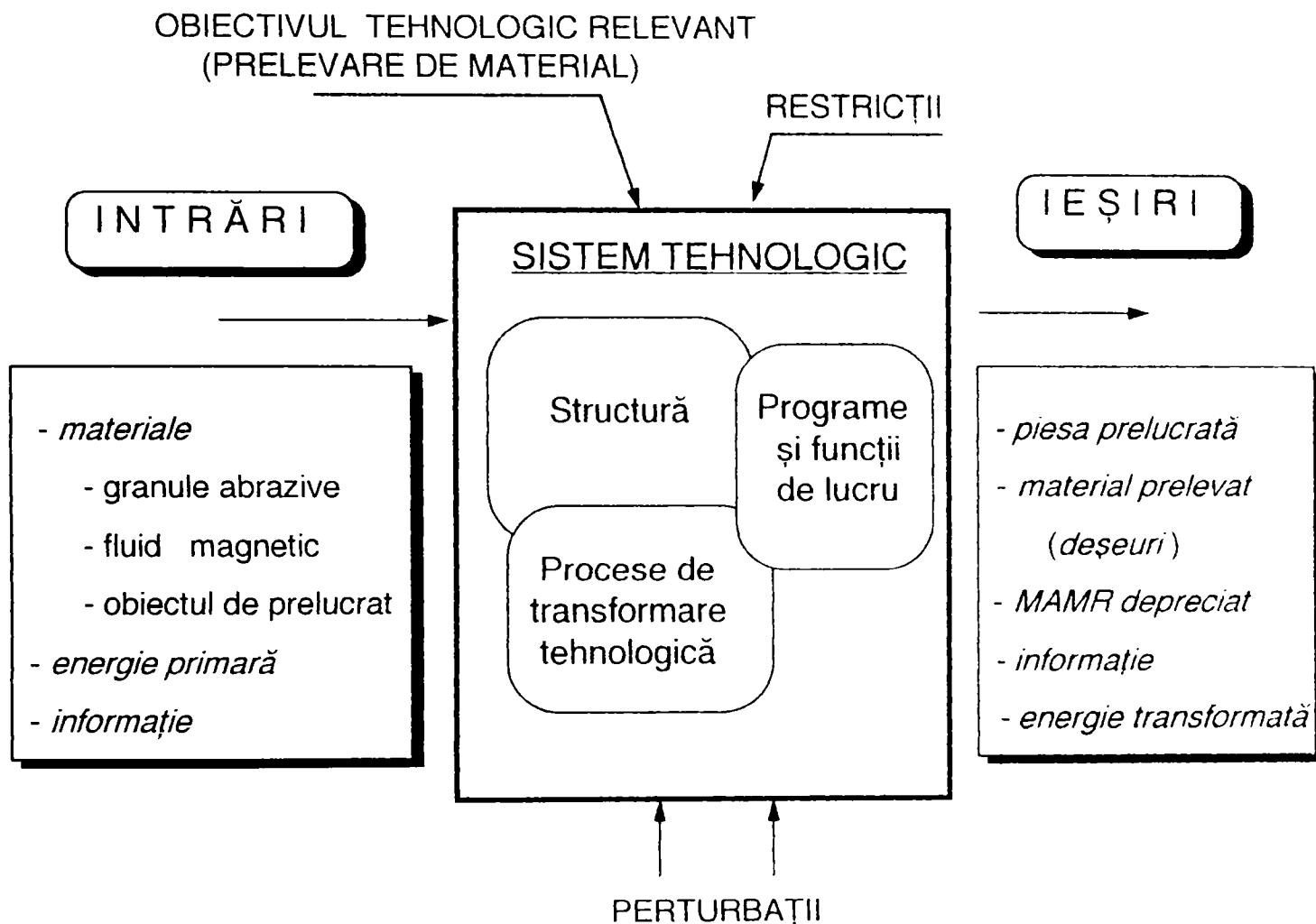


Fig.3.2.

având tășuri multiple caracterizate prin muchii și vârfuri ascuțite cu orientări și forme aleatoare.

Principalele ieșiri substanțiale din sistem sunt piesa prelucrată, cu o anumită precizie și calitate a suprafețelor, precum și materialul prelevat depus în MAMR.

### 3.2.2. Funcțiile obiectiv pentru modelul generalizat al sistemului

Prelucrarea cu MAMR reprezintă rezultatul interacțiunii elementelor FI în spațiul de lucru, interacțiune finalizată prin prelevarea de material de pe suprafața OP.



FI trebuie să fie situați pe nivele corespunzătoare astfel încât MAMR să poată efectua acțiuni abrazive. Se deduce de aici, necesitatea de a atribui MAMR calitatea de *“capacitate abrazivă”* notată  $C(FI)$  care va fi considerată ca primă funcție obiectiv interesantă din punct de vedere tehnologic pentru acest subsistem. Această funcție va fi rezultatul reuniunii unor funcții elementare cum ar fi:

- forța (presiunea) exercitată de MAMR pe suprafața OP, notată  $F(FI)$ , respectiv  $p(FI)$ ;

- cantitatea de material îndepărtată de pe suprafața OP într-un anumit timp, respectiv productivitatea prelucrării, notată  $Q(FI)$ .

Tot ca o funcție obiectiv de natură tehnologică, dar pentru întregul sistem tehnologic, poate fi considerată geometria suprafeței prelucrate,  $G(FI)$ , o funcție generală, care, la rândul ei reprezintă o reuniune de funcții elementare, cum ar fi:

- starea fizico-chimică ce definește caracteristicile fizice și chimice ale stratului de suprafață al piesei prelucrate, notată  $S(FI)$ ;

- starea geometrică ce caracterizează abaterile geometrice ale suprafeței reale în raport cu suprafața nominală, teoretică, dintre care cele mai semnificative sunt abaterile de ordinul 3 și 4 care definesc rugozitatea suprafeței, funcție notată cu  $R(FI)$ .

Alegerea rugozității suprafeței prelucrate ca funcție obiectiv este justificată, pe de-o parte de faptul că aceasta influențează comportamentul în exploatare al piesei realizate, iar pe de altă parte, de faptul că rugozitatea este determinată de caracteristicile procedurii de prelucrare [76].

### 3.2.3. Factorii de influență pentru modelul generalizat al sistemului

Pornind de la studiul stadiului actual al prelucrării cu MAMR, rezultă, într-o manieră originală de punere a problemei, faptul că această prelucrare este rezultatul acțiunii și interacțiunii unui număr de factori de influență FI ce sunt elementele aparținătoare a patru mulțimi disjuncte [6], [50], [53].:

- mulțimea factorilor de influență legați de sistemul magnetic  $\Rightarrow M$ ;
- mulțimea factorilor de influență legați de mediul (fluidul) purtător  $\Rightarrow F$ ;

- mulțimea factorilor de influență legați de materialul abraziv  $\Rightarrow A$ ;
- mulțimea factorilor de influență legați de OP  $\Rightarrow P$ .

Toate aceste mulțimi sunt discrete și ele cuprind un număr finit de elemente, care pot fi evidențiate distinct (E) sau grupate în submulțimi sugestive (S).

Alcătuirea acestor mulțimi, într-o variantă personală, dar care nu epuizează alte puncte de vedere, se prezintă în continuare.

*Mulțimea FI legați de fluidul purtător (F)* este formată din următoarele elemente:

- $E_{1 FL} \Leftrightarrow$  densitatea fluidului purtător;
- $E_{2 FL} \Leftrightarrow$  magnetizația fluidului purtător;
- $E_{3 FL} \Leftrightarrow$  volumul de fluid participant la MAMR;
- $S_{4 FL} \Leftrightarrow$  natura fluidului.

Mulțimea F va fi evidențiată astfel:

$$F = \{E_{1 FL}, E_{2 FL}, E_{3 FL}, S_{4 FL}\} \quad (3.1)$$

*Mulțimea FI legați de sistemul magnetic (M)* este formată din următoarele elemente:

- $E_{1 SM} \Leftrightarrow$  intensitatea câmpului magnetic;
- $S_{2 SM} \Leftrightarrow$  natura elementelor sistemului magnetic;
- $E_{3 SM} \Leftrightarrow$  dimensiunile circuitului magnetic;
- $S_{4 SM} \Leftrightarrow$  dispunerea elementelor magnetice.

Mulțimea M va fi evidențiată astfel:

$$M = \{E_{1 SM}, S_{2 SM}, S_{3 SM}, S_{4 SM}\} \quad (3.2)$$

*Mulțimea FI legați de materialul abraziv (A)* este formată din următoarele elemente:

- $E_{1 GA} \Leftrightarrow$  granulația (dimensiunea) abrazivului;
- $E_{2 GA} \Leftrightarrow$  volumul materialului abraziv în MAMR;
- $E_{3 GA} \Leftrightarrow$  densitatea materialului granulelor abrazive;
- $S_{4 GA} \Leftrightarrow$  geometria părții așchietoare a granulelor abrazive;
- $S_{5 GA} \Leftrightarrow$  natura abrazivului.

Mulțimea A va fi evidențiată astfel:

$$A = \{E_{1 GA}, E_{2 GA}, E_{3 GA}, S_{4 GA}, S_{5 GA}\} \quad (3.3)$$

Mulțimea FI legați de obiectul de prelucrat (P) este formată din următoarele elemente:

- $E_{1 OP} \Rightarrow$  diametrul de prelucrat;
- $E_{2 OP} \Rightarrow$  rugozitatea inițială a suprafeței ce se prelucrează;
- $S_{3 OP} \Rightarrow$  natura materialului OP.

Mulțimea P va fi evidențiată astfel:

$$P = \{E_{1 OP}, E_{2 OP}, S_{3 OP}\} \quad (3.4)$$

Realizarea efectivă a prelucrării presupune o anumită poziție relativă spațială a elementelor celor patru mulțimi prezentate, precum și o anume cinematică. Acestea vor genera o nouă mulțime de FI suplimentari, care sunt reuniți în mulțimea C astfel:

- $E_{1 C} \Rightarrow$  grosimea interstițiului dintre OP și sistemul magnetic;
- $E_{2 C} \Rightarrow$  viteza mișcării principale (de rotație) a OP în raport cu MAMR;
- $E_{3 C} \Rightarrow$  viteza mișcării de oscilație a OP în raport cu MAMR;
- $E_{4 C} \Rightarrow$  durata prelucrării .

Mulțimea C va fi evidențiată astfel:

$$C = \{E_{1 C}, E_{2 C}, E_{3 C}, E_{4 C}\} \quad (3.5)$$

Reuniunea mulțimilor F, M, A, P, și C formează mulțimea FI:

$$FI = F \cup M \cup A \cup P \cup C \quad (3.6)$$

În tabelul 3.1. se prezintă mulțimea factorilor de influență și valorile de interes tehnologic pentru aceștia.

Valorile de interes tehnologic prezentate în acest tabel au fost stabilite pe baza informațiilor din sursele bibliografice parcurse (vezi cap.2) corelate cu posibilitățile concrete care au permis realizarea unui stand experimental cu ajutorul căruia s-au realizat o serie de experimente preliminare.

În figura 3.3 se prezintă schema sistemului tehnologic de prelucrare cu MAMR în situația în care s-au identificat toți FI potențiali și au fost grupați în submulțimi disjuncte.

Factorii de influență potențiali la prelucrarea cu MAMR

Tabelul 3.1

Mulțimea	Simbol	Denumirea	U.M.	Valori de interes tehnologic
FI legați de fluidul purtător (F)	$E_{1FL}$	densitatea fluidului	kg/m <sup>3</sup>	900 ... 1800
	$E_{2FL}$	magnetizația fluidului	A/m	(8 ... 38)·10 <sup>3</sup>
	$E_{3FL}$	volumul fluidului	m <sup>3</sup>	(10...50)·10 <sup>-5</sup>
	$S_{4FL}$	natura fluidului	-	bază de petrol
FI legați de sistemul magnetic (M)	$E_{1SM}$	intensitatea câmpului magnetic	A/m	8 ... 16·10 <sup>6</sup>
	$S_{2SM}$	natura elementelor magnetice	-	magneți perman.
	$E_{3SM}$	dimensiunile circuitului magnetic	m <sup>2</sup>	(125x85)·10 <sup>-6</sup>
	$S_{4SM}$	dispunerea sistemului magnetic	-	baterie
FI legați de materialul abraziv (A)	$E_{1GA}$	granulația (dimensiunea)	mm	(20...120)·10 <sup>-3</sup>
	$E_{2GA}$	volumul de abraziv în MAMR	m <sup>3</sup>	(20...200)·10 <sup>-6</sup>
	$E_{3GA}$	densitatea	kg/m <sup>3</sup>	3000...3500
	$S_{4GA}$	geometria părții așchietoare	-	aleatoare
	$S_{5GA}$	natura abrazivului.	-	carbură de Si
FI legați de OP (P)	$E_{1OP}$	diametrul de prelucrat	mm	15...50
	$E_{2OP}$	rugozitatea inițială	μm	1,6...12,5
	$S_{3OP}$	natura materialului	-	aliaje de Al, Cu
FI suplimentari (C)	$E_{1C}$	interstițiul de lucru	mm	0,5...5
	$E_{2C}$	viteza mișcării de rotație	m/min	5...150
	$E_{3C}$	viteza mișcării de oscilație	m/min	1...15
	$E_{4C}$	durata prelucrării	min.	5...20

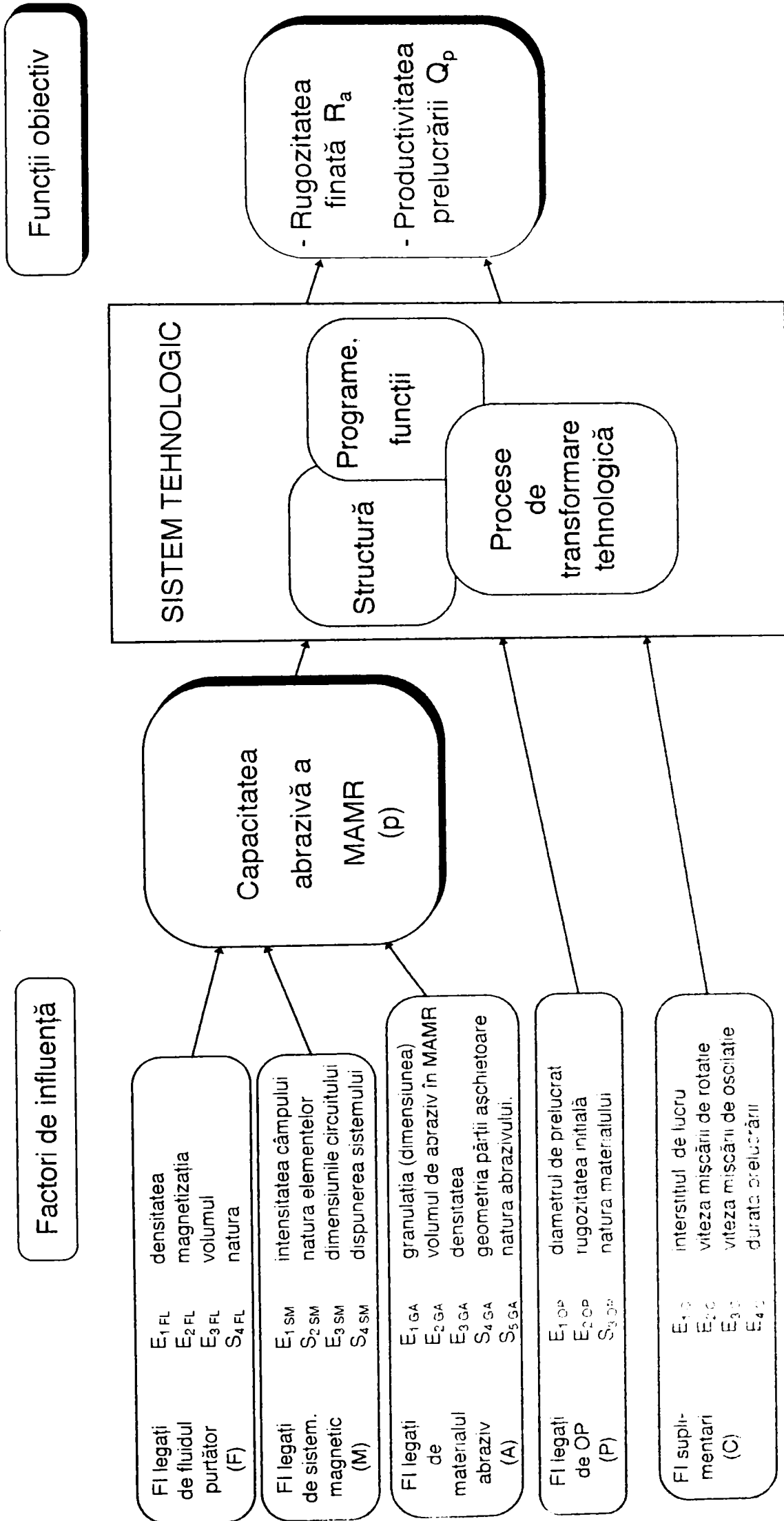


Fig.3.3

Odată identificați factorii de influență FI și precizate funcțiile obiectiv de interes tehnologic, se va trece la determinarea legăturilor de cauzalitate între unele dintre acestea, respectiv la determinarea unui model matematic pentru sistemele tehnologice de prelucrare cu MAMR.

### 3.3. Modelarea matematică a capacității abrazive a MAMR

Teza de doctorat abordează în continuare modelarea matematică a capacității abrazive a MAMR ce utilizează materiale abrazive nemagnetice. Orientarea spre determinarea unui model matematic este motivată prin faptul că literatura de specialitate oferă cu precădere modele matematice empirice.

Etapele principale ale acestui demers sunt următoarele:

- stabilirea condițiilor inițiale și a ecuațiilor fundamentale;
- elaborarea unui model matematic pentru determinarea coeficientului de reducere a secțiunii active a granulelor abrazive;
- elaborarea unui model matematic pentru determinarea volumului de abraziv susceptibil la levitație;
- elaborarea modelului matematic pentru determinarea capacității abrazive a MAMR.

Se are în vedere ca după determinarea acestui model matematic, să se realizeze o verificare experimentală ulterioară.

#### 3.3.1. Condiții inițiale și ecuații fundamentale

Determinarea modelului analitic se realizează pe baza cunoașterii legilor fizice care guvernează fenomenele de transformare tehnologică din sistemul tehnologic de prelucrare cu MAMR.

O primă etapă necesară identificării analitice o constituie adoptarea condițiilor inițiale, respectiv particularizarea elementelor mulțimii FI, urmată de scrierea ecuațiilor fundamentale [21], [28], [29].

##### *3.3.1.1. Condiții inițiale*

Mulțimea F:

- $E_{1FL}$  = densitatea fluidului purtător -  $\rho_f = 1200 \text{ kg/m}^3$  ;

- $E_{2 FL}$  = magnetizația fluidului purtător -  $M = 25 \cdot 10^3$  A/m;
- $E_{3 FL}$  = volumul de fluid participant la MAMR -  $V_f$  - mărime variabilă;
- $S_{4 FL} \Rightarrow$  natura fluidului magnetic - pe bază de petrol.

Mulțimea M:

- $E_{1 SM}$  = intensitatea câmpului magnetic -  $H = 14 \cdot 10^6$  A/m;
- $S_{2 SM} \Rightarrow$  natura elementelor magnetice - magneți permanenți;
- $E_{3 SM}$  = dimensiunile circuitului magnetic - 125x85 mm ;
- $S_{4 SM} \Rightarrow$  dispunerea elementelor magnetice - în baterie.

Mulțimea A:

- $E_{1 GA}$  = granulația (dimensiunea) abrazivului -  $g_a$  - mărime variabilă;
- $E_{2 GA}$  = volumul materialului abraziv din MAMR -  $V_a$  - mărime variabilă;
- $E_{3 GA}$  = densitatea materialului abraziv -  $\rho_a$  - mărime variabilă;
- $S_{4 GA} \Rightarrow$  orientări și forme geometrice aleatoare;
- $S_{5 GA} \Rightarrow$  natura abrazivului - carbură de siliciu.

Mulțimea P:

- $E_{1 OP}$  = diametrul suprafeței ce se prelucrează -  $d = 15 \dots 50$  mm;
- $E_{2 OP}$  = rugozitatea inițială a suprafeței OP -  $R_{ai} = 1,6 \dots 12,5$   $\mu$ m;
- $S_{3 OP}$  = materialul OP - aliaj pe bază de aluminiu.

Mulțimea C:

- $E_{1 C}$  = interstițiul de lucru -  $\delta = 1$  mm;
- $E_{2 C}$  = viteza mișcării de rotație -  $v = 5 \dots 150$  m/min;
- $E_{3 C}$  = viteza mișcării de oscilație -  $v_o = 1 \dots 15$  m/min;
- $E_{4 C}$  = durata prelucrării -  $t_p = 5 \dots 20$  min.

3.3.1.2. Ecuatii fundamentale [1], [2], [31], [32], [42], (vezi și 2.2.4.2.)

- conservarea masei, exprimată prin ecuația de continuitate pentru un fluid magnetic incompresibil (similar fluidelor ordinare):

$$\nabla \vec{v} = 0 \tag{3.7}$$

unde  $\vec{v}$  reprezintă vectorul viteză;

- ecuațiile magnetostatice de stare a câmpului magnetic:

$$\nabla \vec{B} = 0 \tag{3.8}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} \tag{3.9}$$

unde  $\vec{B}$  și  $\vec{H}$  reprezintă inducția și respectiv intensitatea câmpului magnetic;

- ecuația de evaluare a forțelor levitaționale de speța întâi:

$$\vec{F} = \left[ (\rho_l - \rho_s) \cdot g - \mu_0 \cdot M_l \cdot \frac{\partial H}{\partial z} \right] V_s \cdot \vec{k} \quad (3.10)$$

care proiectată pe direcție verticală conduce la expresia:

$$F = \left[ (\rho_l - \rho_s) \cdot g + \mu_0 \cdot M_l \cdot \left| \frac{\partial H}{\partial z} \right| \right] \cdot V_s \quad (3.11)$$

deoarece:

$$\frac{\partial H}{\partial z} < 0 \quad (3.12)$$

### 3.3.2. Model matematic pentru determinarea coeficientului de reducere a secțiunii active a granulelor abrazive

Modelul granulei singulare precum și modelele elaborate până în prezent pentru corpurile abrazive (vezi 2.2.2 și 2.2.3) pot fi utilizate doar pentru cunoașterea elementelor de bază și au un caracter orientativ, având în vedere configurația stocastică a MAMR.

Se impune elaborarea unui model care să descrie topografia suprafeței de așchiere, model care să țină seama de următoarele aspecte:

- transmiterea forțelor de levitație, care devin forțe de așchiere, spre suprafața de prelucrat se face prin intermediul granulelor abrazive;
- granulele abrazive vin în contact cu OP prin intermediul muchiilor așchietoare, care realizează astfel contacte multipunctiforme;
- la un moment dat, numai o parte dintre muchiile așchietoare a unei submulțimi de granule abrazive din MAMR sunt sesizate static (vezi 2.2.3), adică vin în contact cu OP și pot realiza acțiuni abrazive;
- capacitatea abrazivă și comportarea la pătrundere a MAMR în suprafața de prelucrat a OP sunt dependente de topografia suprafeței de așchiere;
- în funcție de pătrunderea granulelor abrazive din MAMR în suprafața OP se realizează diferitele valori a secțiunii de contact a acestor granule cu suprafața OP.



Toate aceste elemente conduc la necesitatea introducerii unui coeficient  $\psi$  care, pe de o parte, să țină seama de muchiile active sesizate static, iar pe de altă parte, de secțiunea de contact a granulelor abrazive cu suprafața OP. Acest coeficient  $\psi$ , denumit “coeficientul de reducere a secțiunii active a granulei abrazive la pătrunderea în suprafața OP” reprezintă raportul dintre suprafața reală de contact  $S_r$  și cea teoretică (maximă)  $S_t$ :

$$\psi = \frac{S_r}{S_t} \quad (3.13)$$

Se fac următoarele ipoteze:

- granulele abrazive au aceeași formă geometrică, respectiv cub, a cărui dimensiune maximă (diagonala acestuia) are valoarea  $g_a$  pentru fiecare dintre acestea;
- forțele levitaționale ascensionale orientează fiecare cub elementar după o direcție preferențială, direcție care coincide cu diagonala acestui cub;
- această direcție preferențială determină un singur vârf așchietor (dinte) pentru granulă, care este vârful superior, după cum se prezintă în figura 3.4; cu acestea, se poate considera dispunerea granulelor, astfel încât să formeze un lanț elementar pe suprafața de așchiere, conform figurii 3.5.

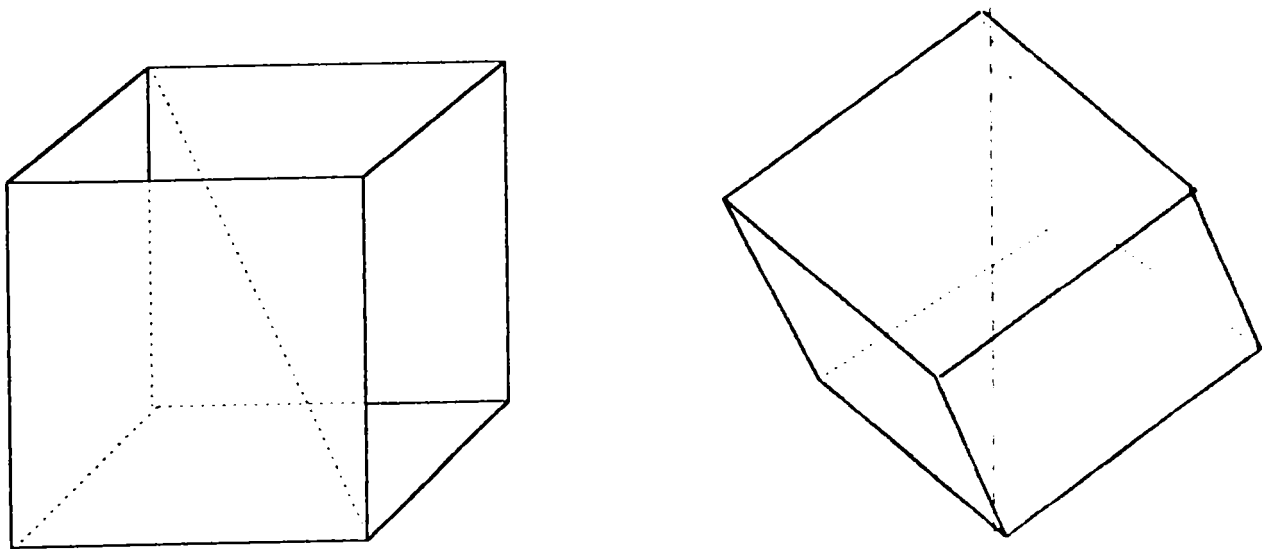


Fig.3.4

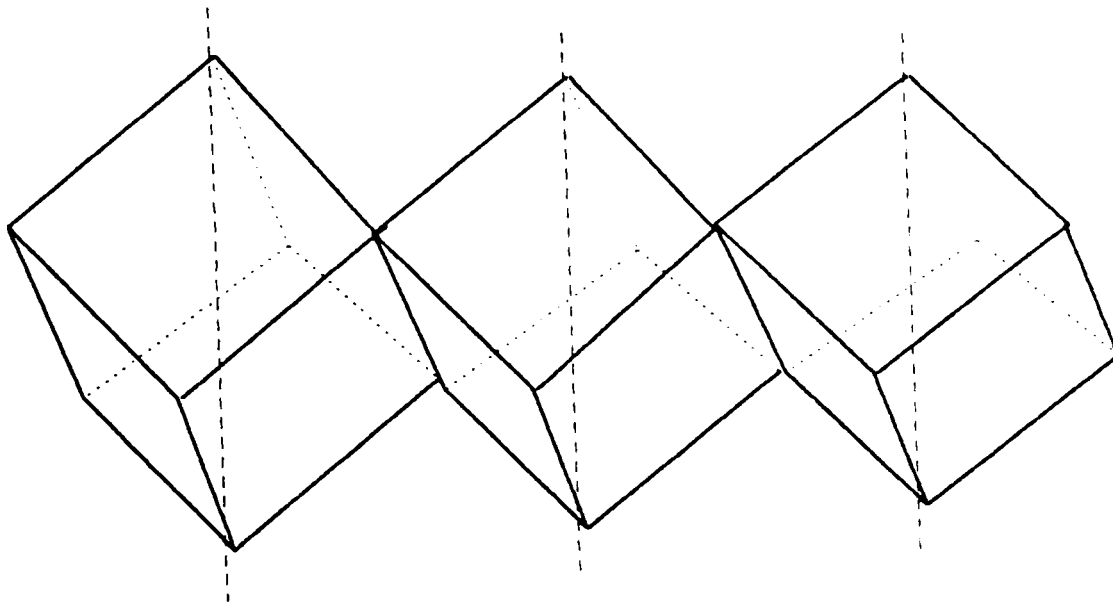


Fig.3.5

- fiecare vârf așchietor al unei granule abrazive pătrunde în materialul OP realizând adâncimea de așchiere  $t$ ; această adâncime de așchiere depinde în principal de caracteristicile materialului de prelucrat, respectiv de submulțimea  $S_3_{OP}$  din mulțimea FI precum și de caracteristicile granulelor abrazive, adică submulțimea  $S_5_{GA}$ .

În baza ipotezelor făcute, se deduce că forma "dintelui așchietor" al granulei abrazive este un tetraedru regulat, în care fețele laterale sunt triunghiuri dreptunghice isoscele:

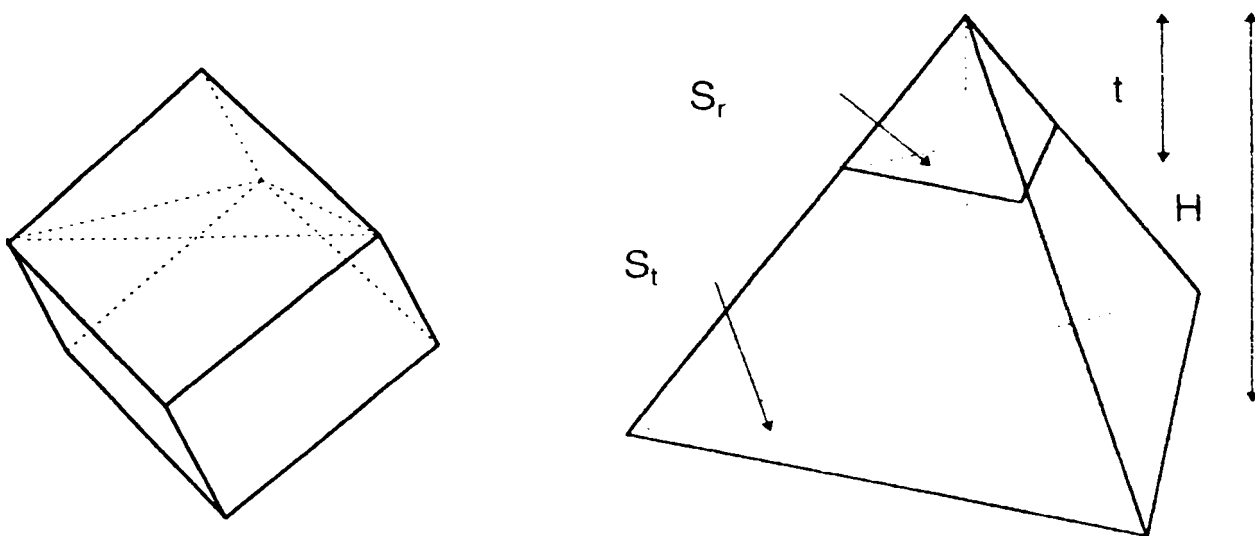


Fig.3.6

În fig.3.6 s-au evidențiat suprafața teoretică  $S_t$  și respectiv cea reală  $S_r$  de contact dintre vârful așchietor și suprafața OP. Determinarea coeficientului  $\psi$  se face pe baza unui calcul geometric în acest tetraedru. Se observă că adâncimea de așchiere  $t$  determină secțiunea  $S_r$  și obținerea unui tetraedru mic, asemenea cu cel mare. Raportul bazelor acestor două tetraedre este egal cu pătratul înălțimilor:

$$\frac{S_r}{S_t} = \left(\frac{t}{H}\right)^2 \quad (3.14)$$

Făcând toate înlocuirile necesare și exprimând elementele geometrice în funcție de mărimea granulei abrazive  $g_a$  se obține:

$$\psi = \psi \cdot \left(\frac{t}{g_a}\right)^2 \quad (3.15)$$

Relația 3.15 reprezintă expresia coeficientul de reducere a secțiunii active a granulelor abrazive la pătrunderea în suprafața OP, element ce va fi utilizat ulterior la modelul general pentru determinarea capacității abrazive a MAMR.

În cazul prelucrării aliajelor pe bază de aluminiu, utilizând granule abrazive din carbură de siliciu care au dimensiunea  $g_a = 20...200 \mu\text{m}$ , se realizează o adâncime de așchiere  $t$ , care are valoarea de  $15...30 \mu\text{m}$ . Se obțin în acest caz valori ale coeficientului  $\psi = 0.05...0.40$ .

### 3.3.3. Model matematic pentru determinarea volumului de abraziv susceptibil la levitație

Forțele levitaționale sunt direct dependente de volumul granulelor abrazive aflate în fluidul magnetic. La nivel de granulă, acest volum este influențat de mărimea  $g_a$  iar la nivelul întregii cantități de abraziv intervine și influența concentrației  $C$ . Această concentrație se definește ca raportul dintre cantitatea de abraziv și cantitatea totală de suspensie abrazivă (lichid magnetic și abraziv):

$$C = \frac{m_a}{m_a + m_f} \quad (3.16)$$

Exprimând aceste cantități în funcție de densitățile și volumele corespunzătoare, obținem:

$$C = \frac{m_a}{m_a + m_l} = \frac{\rho_a \cdot V_a}{\rho_a \cdot V_a + \rho_l \cdot V_l} \quad (3.17)$$

Din relația 3.17 se poate exprima volumul de abraziv din MAMR în funcție de concentrație:

$$V_a = \frac{\rho_l \cdot V_l \cdot C}{\rho_a \cdot (1 - C)} \quad (3.18)$$

În mod cert, modificarea dimensiunii granulei abrazive va determina modificarea volumului, a suprafeței laterale și a perimetrului acesteia. Pentru a putea exprima analitic aceste dependențe, se fac următoarele ipoteze:

- volumul de abraziv  $V_a$  crește cu creșterea dimensiunii granulei abrazive  $g_a$ ;

- prin micșorarea dimensiunii granulei abrazive  $g_a$  se mărește numărul de granule în unitatea de volum și implicit numărul vârfurilor așchietoare;

- creșterea numărului de granule abrazive în unitatea de volum ca urmare a micșorării granulației abrazivului, conduce la creșterea suprafeței de contact dintre materialul abraziv și fluidul magnetic;

- se utilizează granule abrazive a căror dimensiuni  $g_a$  formează progresii cvasi-geometrice, respectiv fac parte dintr-un șir de numere normalizate.

Apare necesitatea introducerii unui coeficient geometric  $C_g$ , care să exprime variația elementelor geometrice așchietoare (vârfuri, muchii, suprafețe) în raport cu dimensiunea materialului abraziv, coeficient care va afecta volumul de abraziv susceptibil la levitație.

În continuare, se va prezenta contextul în care se definește acest coeficient geometric,  $C_g$ .

Se consideră un volum elementar de material abraziv, având forma geometrică a unui cub, de latură  $a$  (de exemplu  $a = 1 \text{ mm}$ ). Volumul, aria totală și lungimea muchiilor acestui cub vor fi, respectiv:

$$V_l = a^3 \quad S_l = 6 \cdot a^2 \quad L_l = 12 \cdot a \quad (3.19)$$

Împărțim fiecare latură a cubului elementar în două părți egale (fig.3.7).

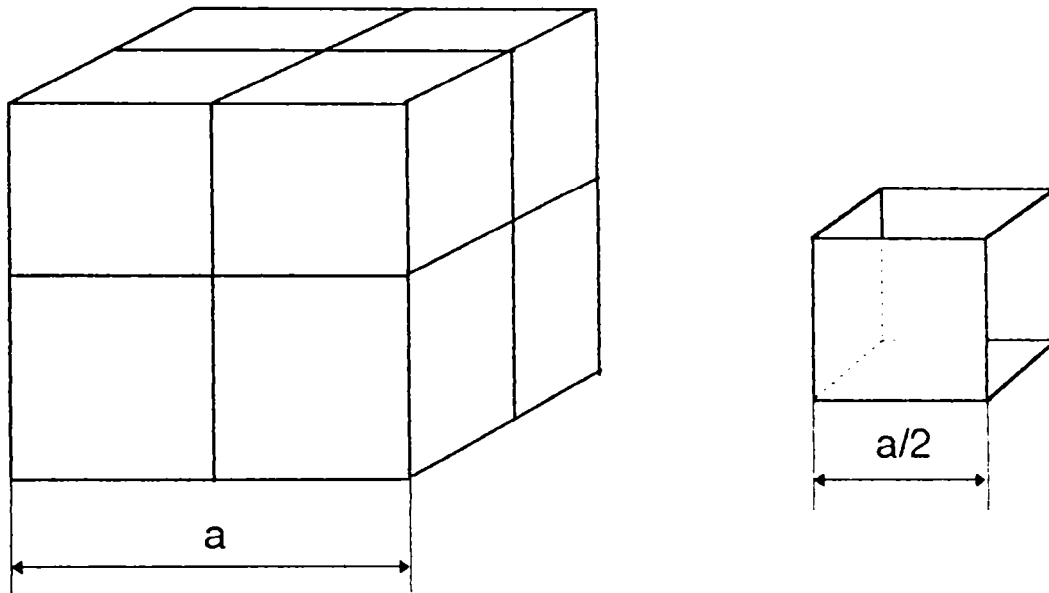


Fig.3.7

Vom obține astfel 8 cuburi egale, a căror latură va fi jumătate din cea inițială, respectiv  $a/2$ .

În mod similar, se poate împărți latura cubului elementar în 3, 4, 5, ... ,  $i$  părți egale. Presupunem că am împărțit latura cubului în " $i$ " părți. Se formează  $i^3$  cuburi cu latura  $a/i$ , care vor avea volumul, aria totală și lungimea muchiilor date de expresiile:

$$V_i = \frac{V_1}{i^3}; \quad S_i = 6 \cdot \left(\frac{a}{i}\right)^2; \quad L_i = 12 \cdot \left(\frac{a}{i}\right) \quad (3.20)$$

Însumând volumele, ariile totale și lungimile muchiilor tuturor celor  $i^3$  particule formate, se obține:

$$V_T = V_i \cdot i^3 = \frac{V_1}{i^3} \cdot i^3 = V_1 \quad (3.21)$$

$$S_T = S_i \cdot i^3 = 6 \cdot \left(\frac{a}{i}\right)^2 \cdot i^3 = 6 \cdot a^2 \cdot i = S_1 \cdot i \quad (3.22)$$

$$L_T = L_i \cdot i^3 = 12 \cdot \left(\frac{a}{i}\right) \cdot i^3 = 12 \cdot a \cdot i^2 = L_1 \cdot i^2 \quad (3.23)$$

Prin formarea celor  $i^3$  cuburi, a crescut și numărul de vârfuri așchietoare

$$v_{T_i} = v_{T_1} \cdot i^3 \quad (3.24)$$

În concluzie, pentru un volum elementar  $V_1$  care a fost împărțit în  $i^3$  părți egale, numărul vârfurilor așchietoare crește cu  $i^3$ , lungimea muchiilor cu  $i^2$  iar aria laterală cu  $i$ .

Coeficientul geometric  $C_g$  care urmează a fi definit, va ține seamă de aceste efecte:

$$C_g = f(\text{volum, suprafață, lungime, vârfuri}).$$

Expresia analitică a acestui coeficient geometric va fi:

$$C_g = b_0 \cdot \frac{V_f}{V_1} + b_1 \cdot \frac{S_f}{S_1} + b_2 \cdot \frac{L_f}{L_1} + b_3 \cdot \frac{v_{f_1}}{v_{t_1}} \quad (3.25)$$

Din relațiile (3.21), (3.22), (3.23) și (3.24) se obține:

$$\frac{V_f}{V_1} = 1; \quad \frac{S_f}{S_1} = i; \quad \frac{L_f}{L_1} = i^2; \quad \frac{v_{f_1}}{v_{t_1}} = i^3 \quad (3.26)$$

Cu aceste valori, relația (3.25) devine:

$$C_g = b_0 + b_1 \cdot i + b_2 \cdot i^2 + b_3 \cdot i^3 \quad (3.27)$$

Expresia (3.27) reprezintă o parabolă cubică, a cărei coeficienți polinomiali pot fi determinați prin condițiile de limită aplicate funcțiilor polinomiale continue și derivabile pe un interval, sau prin metoda celor mai mici pătrate.

În primul caz se fac următoarele precizări:

- dacă  $V_1 = 1 \text{ mm}^3$ , atunci variabila  $i$  reprezintă tocmai inversul granulației  $g_a$ , respectiv numărul de granule pe unitatea de lungime, putând stabili ca interval de studiu al funcției polinomiale, mulțimea  $M = (0 \dots 1000)$ ;

- se poate aplica teorema lui Fermat și teorema lui Rolle pe acest interval continuu al funcției, admitând că există un extrem relativ al acesteia. adică:

$$\exists a \in M, b \in M \text{ astfel încât } C_g(a) = C_g(b)$$

$$\exists i_0 \in M, \text{ pentru care } C'_g(i_0) = 0 \text{ și } C_g(i_0) = 1$$

ceea ce reprezintă condiții de limită care conduc la următoarele valori ale coeficienților polinomiali:

$$b_0 = 800561,4 \cdot 10^{-5}$$

$$b_1 = -33783,3 \cdot 10^{-5}$$

$$b_2 = -1031,7 \cdot 10^{-5}$$

$$b_3 = 1 \cdot 10^{-5}$$

Aceste valori au fost verificate și prin metoda celor mai mici pătrate.

Expresia coeficientului geometric devine:

$$C_x = 800561,4 \cdot 10^{-5} - 33873,3 \cdot 10^{-5} \cdot i - 1031,7 \cdot 10^{-5} \cdot i^2 + 10^{-5} \cdot i^3 \quad (3.28)$$

Toate aceste ipoteze și influențele corespunzătoare, demonstrează faptul că volumul de material abraziv care levitează este influențat de concentrația C și de numărul de granule abrazive pe unitatea de lungime i (respectiv de inversul granulației  $g_a$ ). Expresia analitică a volumului de abraziv susceptibil la levitație pe suprafața OP va avea forma:

$$V_{al} = V_a \cdot C_x = \frac{\rho_l \cdot V_l \cdot C}{\rho_a \cdot (1 - C)} \cdot C_x = f(C, i) \quad (3.29)$$

După toate înlocuirile se obține:

$$V_{al}(C, i) = \frac{10^{-5} \rho_l \cdot V_l \cdot C}{\rho_a \cdot (1 - C)} (800561,4 - 33873,3 \cdot i - 1031,7 \cdot i^2 + i^3) \quad (3.30)$$

Această expresie reprezintă forma explicită a unei funcții ( $V_{al}$ ) de două variabile (C, i), care va fi utilizată la scrierea modelului analitic general.

### 3.3.4. Model matematic pentru determinarea capacității abrazive a MAMR

S-a prezentat la paragraful 3.2.2. necesitatea de a atribui MAMR calitatea de "capacitate abrazivă" notată C(FI) și care reprezintă o primă funcție obiectiv interesantă din punct de vedere tehnologic. Această funcție este rezultatul reuniunii unor funcții elementare, dintre care cea mai importantă este forța (presiunea) de așchiere exercitată de MAMR pe suprafața OP, notată  $F_a$  (respectiv  $p_a$ ).

Se consideră că forțele levitaționale date de relația 3.11 sunt tocmai forțele de așchiere necesare în proces. Prin evaluarea acestora, în raport cu volumul de abraziv  $V_{al}$ , care este susceptibil la levitație, se obține expresia:

$$\vec{F} = \left[ (\rho_l - \rho_a) \cdot g - \mu_0 \cdot M_l \cdot \frac{\partial H}{\partial z} \right] V_a \cdot k \quad (3.31)$$

Înlocuind în această relație volumul  $V_{al}$  cu expresia sa din relația (3.29), se va obține:

$$\vec{F} = \left[ (\rho_l - \rho_a) \cdot g - \mu_0 \cdot M_l \cdot \frac{\partial H}{\partial z} \right] \cdot \frac{\rho_l \cdot V_l \cdot C}{\rho_a \cdot (1 - C)} \cdot C_s \cdot \dot{k} \quad (3.32)$$

Proiectând această forță după direcția verticală, normală la suprafața de prelucrat, se obține relația:

$$F = \left[ (\rho_l - \rho_a) \cdot g + \mu_0 \cdot M_l \cdot \left| \frac{\partial H}{\partial z} \right| \right] \cdot \frac{\rho_l \cdot V_l \cdot C}{\rho_a \cdot (1 - C)} \cdot C_s \quad [\text{N}] \quad (3.33)$$

Raportând această forță la suprafața  $S$ , afectată de coeficientul de sesizare statică prezentat la paragraful 3.3.2. se obține presiunea de aşchiere  $p$ , a cărei expresie este:

$$p = \frac{F}{S \cdot \psi} = \frac{\left[ (\rho_l - \rho_a)g + \mu_0 M_l \left| \frac{\partial H}{\partial z} \right| \right] \cdot \frac{\rho_l \cdot V_l \cdot C}{\rho_a \cdot (1 - C)} \cdot C_s}{S \cdot \psi} \quad (3.34)$$

La ipotezele prezentate la paragraful 3.3.1.1. mai trebuiesc precizate următoarele valori ale FI pentru un caz concret de prelucrare:

- $E_{3_{FL}} = V_l = 100 \text{ cm}^3$ ;
- $E_{3_{GA}} = \rho_a = 3200 \text{ kg/m}^3$  [66];
- $E_{1_{OP}} = d = 30 \text{ mm}$ ;
- $\psi = 0.3$ .
- $\frac{\partial H}{\partial z} = -11,8 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$  valoare obținută prin metoda grafo-analitică.

Disponem astfel de toate mărimile necesare pentru relația de calculul a presiunii de aşchiere, care după efectuarea tuturor înlocuirilor va avea forma:

$$p = \frac{6,22 \cdot 10^{-7} \cdot C}{(1 - C)} (800561,4 - 33873,3 \cdot i - 1031,7 \cdot i^2 + i^3) \quad [\text{MPa}] \quad (3.35)$$

În figura 3.8 se prezintă forma suprafeței de răspuns  $p = f(C, i)$  pentru acest caz concret de prelucrare.

În figura 3.9. se prezintă curbele de nivel constant, obținute prin secționarea suprafeței de răspuns  $p = f(C, i)$  cu plane orizontale.



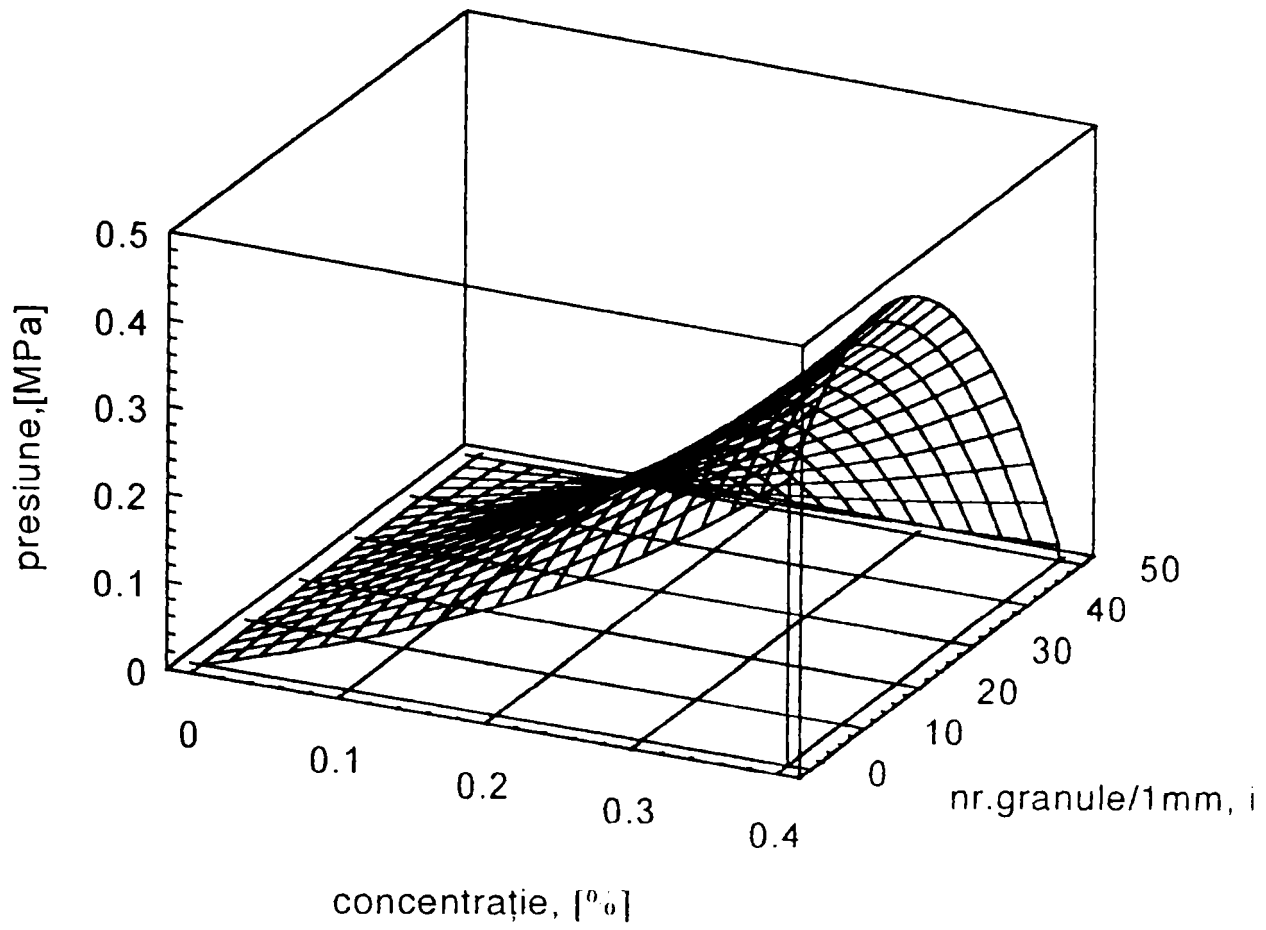


Fig.3.8

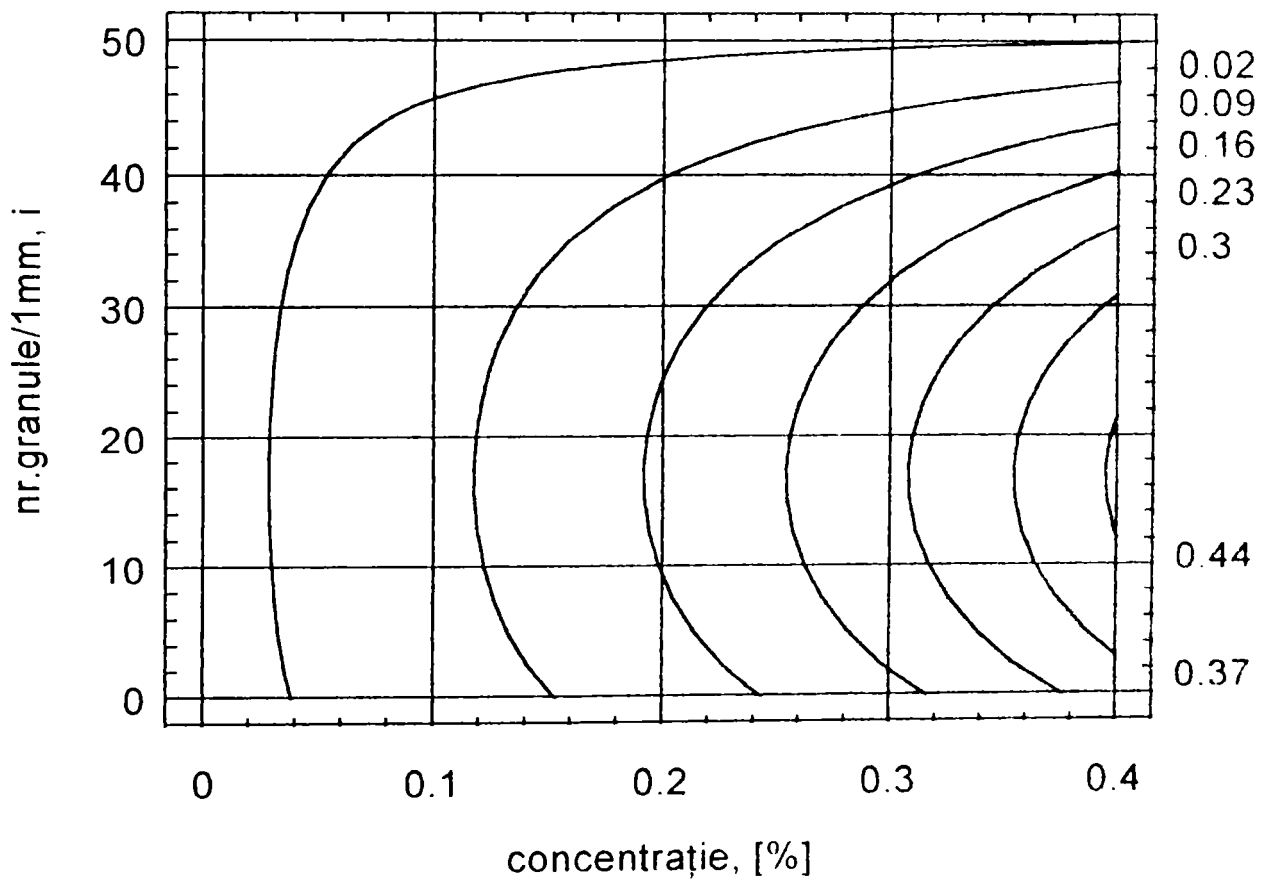


Fig.3.9

Analiza formei suprafeței de răspuns  $p = f(C, i)$  descrisă cu relația 3.36 și prezentată în figurile 3.8 și 3.9 conduce la următoarele observații:

- presiunile de aşchiere calculate cu relația 3.35 au valori cuprinse între 0,02...0,50 MPa și se situează în domeniul valorilor recomandate pentru procedeele de finisare (la honuire  $p = 0,03...0,40$  MPa, la superfinisare  $p = 0,05...0,6$  MPa iar la lepuire  $p = 0,05...0,45$  Mpa) [11], [14], [51];

- variabilele independente, concentrația  $C$  și granulația  $g_a$  exprimată prin numărul de granule  $i$  pe unitatea de lungime, variază în limitele intervalelor de interes tehnologic, precizate în tabelul 3.1;

- în raport cu numărul de granule  $i$  pe unitatea de lungime, suprafața de răspuns prezintă un extrem local de tip maxim, ceea ce demonstrează faptul că, cel puțin din punct de vedere teoretic, ipotezele făcute la modelarea matematică sunt corecte și descriu bine fenomenele reale din proces în raport cu această variabilă;

- în raport cu concentrația  $C$ , suprafața de răspuns nu prezintă extrem. Aceasta demonstrează faptul că, ipotezele făcute în modelare ar putea fi considerate relativ simplificatoare, depărtându-se de fenomen, sau că, din punct de vedere teoretic, extremul nu s-ar afla în zona de interes tehnologic pentru această variabilă. Există și o a treia motivație pentru acest aspect, care se consideră mai plauzibilă, și anume faptul că fenomenul de levitație la nivel de granulă abrazivă individuală diferă de cel la nivel de submulțime de granule. La acestea se mai adaugă și faptul că în timpul prelucrării apar turbulențe iar regimul curgerii hidrodinamice diferă de cel static.

Adecvanța acestui model analitic urmează a fi studiată prin cercetările experimentale ce se vor efectua după programe direcționate în acest sens.

### 3.4. Concluzii

Tratarea problematicii prezentată în paragrafele acestui capitol, permite formularea următoarelor concluzii:

- ◆ diversitatea variantelor și detaliilor individuale ale prelucrărilor cu MAMR prezentate în capitolul 2, a condus la necesitatea conceperii unui

model generalizat al sistemului de acțiune tehnologică, a cărui structură morfologică și funcțională să răspundă tuturor acestor variante;

- ◆ odată realizată schema bloc a acestui model generalizat, apare necesitatea identificării funcțiilor obiectiv ale prelucrării precum și a factorilor de influență;

- ◆ definirea factorilor de influență, grupați în submulțimi disjuncte, are un caracter general valabil pentru toate variantele de prelucrare cu MAMR, astfel încât realizarea unei variante să fie echivalentă cu particularizarea corespunzătoare a acestor factori sau chiar submulțimi;

- ◆ determinarea unor funcții obiectiv de interes tehnologic, cu caracter general, formate la rândul lor din reuniuni de funcții elementare, permite evaluarea “ieșirilor” din sistem, precum și a posibilităților de cuantificare a acestora;

- ◆ ca și în cazul sculelor așchietoare cu tășuri definite (cuțite, freze, burghie etc) și pentru MAMR se poate defini “*capacitatea abrazivă*” care se consideră una din funcțiile obiectiv globale ale procesului;

- ◆ fixarea funcțiilor obiectiv permite adoptarea condițiilor inițiale, respectiv particularizarea elementelor mulțimii FI, urmată de scrierea ecuațiilor fundamentale;

- ◆ lipsa unei modelări matematice analitice, în favoarea celei empirice, prezentă în literatura de specialitate, conduce la necesitatea elaborării unor modele matematice analitice parțiale/generale;

- ◆ se poate realiza un model analitic pentru determinarea coeficientului de reducere a secțiunii active a granulelor abrazive, luând în considerare cele mai simple forme și orientări ale granulelor abrazive;

- ◆ indiferent de varianta de constituire a MAMR, se poate determina analitic un coeficient geometric  $c_g$ , care exprimă variația elementelor geometrice așchietoare (vârfuri, muchii, suprafețe) în raport cu dimensiunea materialului abraziv;

- ◆ în modelare se ține seamă de influența celor mai semnificativi FI (concentrația și granulația abrazivului) la nivel de granulă individuală dar și la nivelul unei submulțini de granule abrazive care levitează;

◆ modelele analitice prezentate în § 3.3.2 și 3.3.3 pot fi utilizate la elaborarea unui model matematic pentru funcția obiectiv intermediară  $p = f(C, i)$ , model descris printr-o funcție explicită de două variabile și care prezintă punct de extrem relativ la una din variabile;

◆ valorile presiunii de aşchiere  $p$  calculate cu ajutorul acestei funcții sunt în domeniul de valori dat de modelele empirice deja existente, pentru alte procedee de finisare;

◆ deși au fost adoptate ipoteze relativ simplificatoare (forme și orientări geometrice regulate, regim static de interacțiuni, raționamente inductive etc.) din punct de vedere al interpretării matematice, modelul analitic prezintă interes pentru studiul punctelor extreme (de tip maxim);

◆ rezultatele obținute în modelarea matematică analitică pot constitui puncte de plecare pentru modelarea experimentală și chiar pot fi verificate de aceasta.

# CAPITOLUL 4

## MODELAREA EXPERIMENTALĂ A FUNCȚIILOR OBIECTIV ALE PRELUCRĂRII CU MEDII ABRAZIVE MAGNETO-REOLOGICE

### 4.1. Obiectivele și metodica modelării experimentale

Utilitatea modelelor analitice prezentate în capitolul anterior este preponderent gnoseologică, deoarece aplicarea lor pentru rezolvarea unei probleme practice concrete este laborioasă și dificilă. Această dificultate este determinată de mulțimea factorilor de influență FI care prezintă interacțiuni complexe, precum și de ipotezele adoptate care, uneori, prin simplitatea lor se depărtează de realitățile din sistemul analizat.

Optimizarea proceselor de prelucrare cu MAMR pe cale exclusiv analitică este, cel puțin deocamdată, practic imposibilă, iar orientarea doar spre modelarea experimentală ar fi foarte costisitoare și greu de realizat. De aceea, s-a considerat că cea mai rațională cale de urmat este aceea de a elabora modele analitice relativ simple, (ca modelul capacității abrazive a MAMR) dar suficient de fidele pentru ca datele furnizate de acestea să fie utilizabile la modelarea experimentală.

Obiectivele majore pe care le vizează modelarea experimentală prezentată în acest capitol sunt următoarele:

- obținerea unor modele experimentale cât mai fidele, astfel încât estimările făcute cu ajutorul lor să poată fi folosite în scopuri tehnologice;
- obținerea unor valori experimentale pentru funcțiile obiectiv analizate, care să permită compararea lor cu valorile estimate cu ajutorul modelelor analitice prezentate în capitolul anterior, în scopul verificării adecvantei acestor modele.

Realizarea acestor obiective este susținută de o anume programare rațională a experimentărilor, care pentru domeniul prelucrărilor cu MAMR abordat de prezenta teză de doctorat se propune a fi următoarea:

- realizarea unor experimente preliminare prin care să se determine FI semnificativi pentru procesele tehnologice analizate, precum și mulțimea valorilor de interes tehnologic ale acestora;

- pentru FI de primă importanță rezultați, determinarea pe bază experimentală a ecuațiilor de regresie pentru FO analizate;

- pe baza modelelor experimentale elaborate, alegerea domeniilor sau valorilor FI care asigură optimizarea FO în condițiile precizării unui criteriu de optimalitate.

De precizat faptul că experimentele preliminare au necesitat un volum de încercări relativ mare, rezultatele obținute pentru mulțimea valorilor de interes tehnologic ale FI semnificativi, fiind deja prezentate în tabelul 3.1. Cu titlu informativ se face precizarea că numărul acestor experimente preliminare este de ordinul câtorva sute de încercări și replici.

FO analizate în cadrul cercetărilor experimentale au fost alese astfel încât să concorde cu cele explicitate la modelarea analitică. În consecință, s-a ales ca FO pentru capacitatea abrazivă a MAMR presiunea exercitată de mediu pe suprafața OP ( $Y_{M1} \Leftrightarrow p$ ), iar pentru sistemul tehnologic de prelucrare cu MAMR productivitatea prelucrării ( $Y_{S1} \Leftrightarrow Q_p$ ) și rugozitatea suprafeței obținute ( $Y_{S2} \Leftrightarrow R_a$ ).

Toate experimentările prezentate în acest capitol au fost realizate cu ajutorul unui stand experimental, realizat în cadrul catedrei *Tehnologie mecanică* de către autorul prezentei teze de doctorat.

Metodologia de cercetare aplicată a fost experimentarea factorială [7], [50], care prezintă avantajul unei eficiențe sporite în raport cu experimentarea clasică.

În cadrul experimentelor preliminare au fost supuse prelucrării cu MAMR diverse materiale: aliaje pe bază de aluminiu, pe bază de cupru, sticlă, materiale polimerice.

La prelucrarea materialelor polimerice (de exemplu teflon) odată cu micșorarea rugozității suprafețelor prelucrate, s-a constatat modificarea culorii acestora, fenomen pus pe seama interacțiunii dintre OP și fluidul magnetic.

În cazul prelucrării sticlei, rezultate semnificative s-au obținut numai la prelucrarea sticlei optice brute, corespunzător fazelor de șlefuire din procesele tehnologice ale componentelor optice.

În timpul efectuării experimentelor preliminare, cele mai semnificative rezultate au fost obținute la prelucrarea aliajelor pe bază de aluminiu, motiv pentru care aceste materiale au fost utilizate, în continuare, la modelarea experimentală.

La măsurarea valorilor FO analizate au fost valorificate metoda și aparatura existente în catedrele *Tehnologie mecanică și Organe de mașini și mecanisme* [47], [52], [56].

Presiunea exercitată de MAMR pe suprafața OP a fost determinată cu ajutorul unui traductor piezoceramic; semnalele electrice ale traductorului au fost transmise unui aparat înregistrator (osciloscop) prin intermediul unui bloc de adaptare, format dintr-un amplificator de sarcină, un filtru și un amplificator operațional. Valorile oferite de aparatul înregistrator au fost corelate cu curba de etalonare realizată pentru o presiune considerată "etalon", presiune ce a fost asigurată gravitațional.

Cantitatea de material îndepărtată în unitatea de timp (productivitatea prelucrării  $Q_p$ ) a fost determinată, ca diferență între masa inițială și cea finală a OP. Determinările au fost realizate utilizând o balanță analitică tip MB-C-03/02 (Balanța - Sibiu), cu precizie de  $10^{-7}$ .

La aprecierea rugozității suprafețelor prelucrate s-a utilizat un aparat cu traductor piezoelectric, tip Surtronic Taylor - Anglia, iar pentru analiza principalilor indicatori de estimare a acesteia, s-a utilizat un stand a cărui construcție va fi detaliată ulterior.

#### 4.2. Prezentarea standului experimental utilizat

Concepția standului experimental a avut în vedere următoarele cerințe:

- utilizarea unei mașini-unelte care să permită realizarea vitezei de prelucrare în domeniul de interes tehnologic;
- posibilitatea de realizare a diferitelor valori pentru interstițiul de lucru;
- posibilitatea de schimbare rapidă și cu ușurință a OP;

- asigurarea cinematicii necesare prelucrării prin utilizarea dispozitivului de oscilare a OP.

Schema de principiu a standului experimental utilizat, realizat după principiile enunțate, este prezentată în figura 4.1.

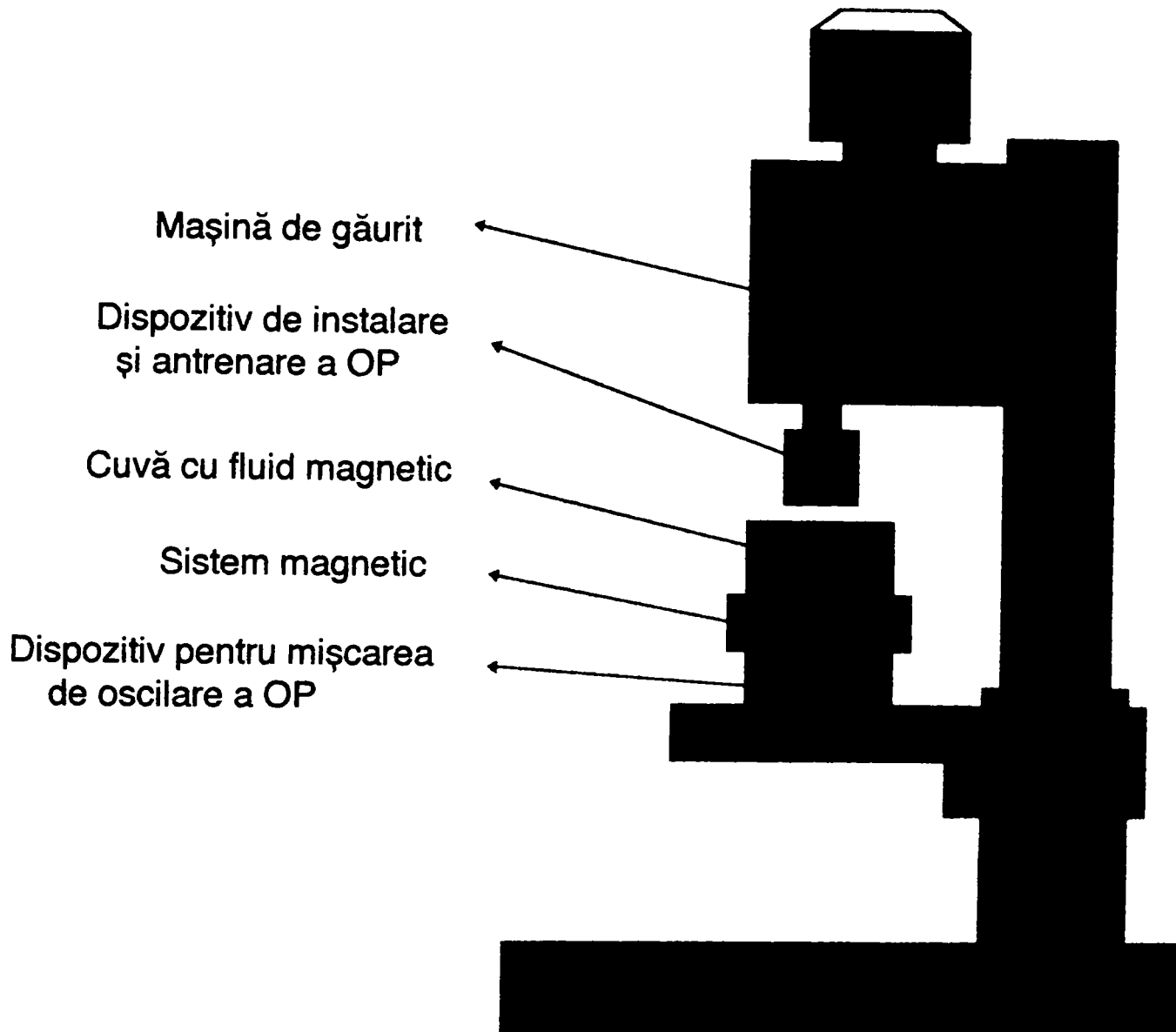


Fig. 4.1.

Elementele principale ale standului sunt:

- mașina de găurit cu coloană care permite realizarea turațiilor corespunzătoare vitezelor de prelucrare de interes tehnologic, precum și asigurarea intersișului tehnologic de prelucrare corespunzător;

- dispozitivul de instalare și antrenare în mișcare de rotație a OP constituit din mandrină și o bucă elastică pentru intervalul de diametre de 13-18 mm;



- cuva din material plastic, de dimensiuni 120x120x180 mm, în care se găsește fluidul magnetic și în interiorul căreia efectiv, se va realiza procesul de prelucrare;

- sistemul magnetic, realizat din magneți permanenți dispuși în baterie, pe trei rânduri;

- dispozitivul de oscilare care permite realizarea unei mișcări oscilatorii a OP, cu viteza de 12 m/min., și amplitudinea de 5 mm, mișcare ce completează cinematica procesului.

Elementul esențial în construcția acestui stand îl reprezintă sistemul magnetic, a cărui construcție va fi prezentată în continuare.

Schița de principiu a acestuia este prezentată în figura 4.2.

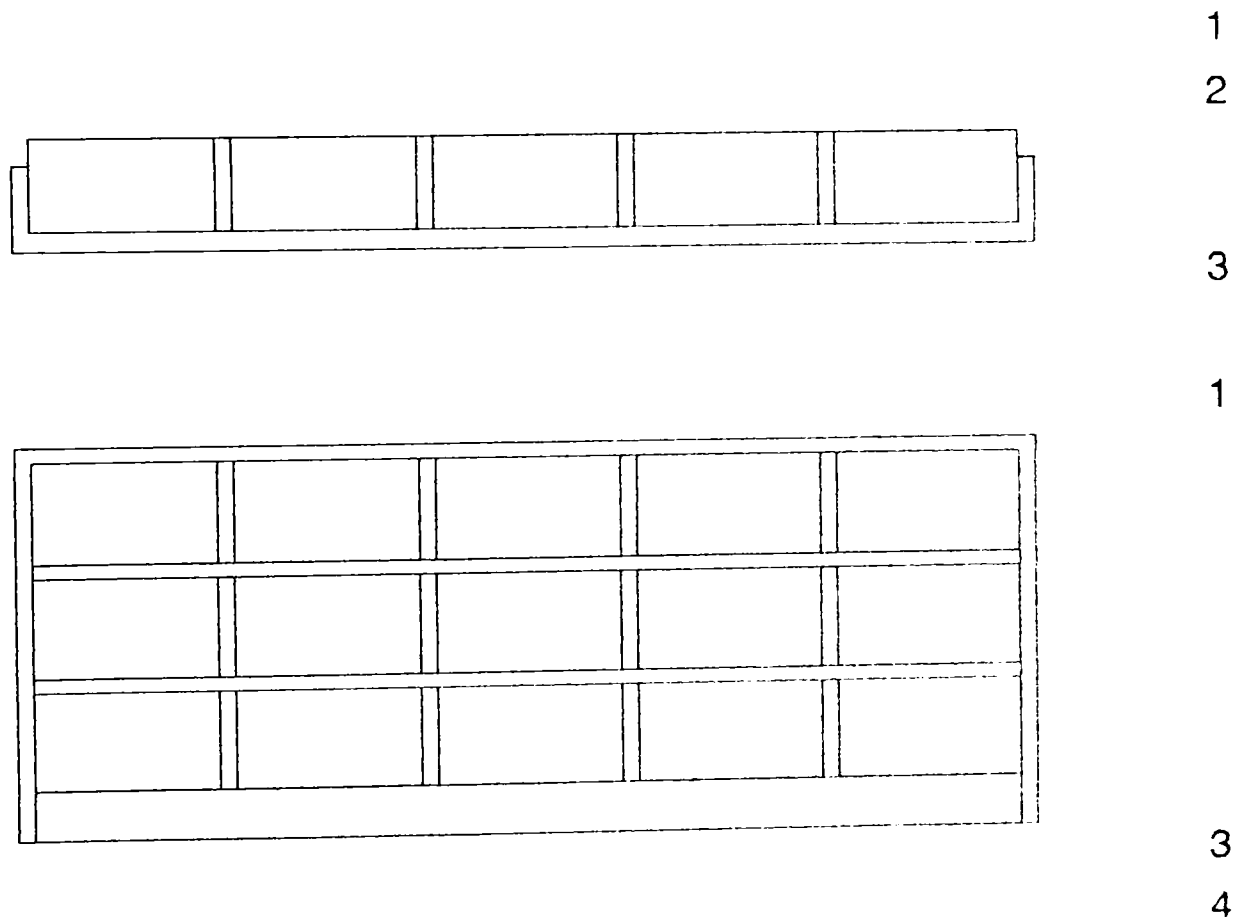


Fig.4.2.

Sistemul magnetic este constituit din magneții permanenți 1, dispuși în baterie pe placa de bază 3. Magneții permanenți sunt de tipul NdFeB sinterizați, cu dimensiunile 42 x 20 x 10,5 mm, realizați la I.C.P.E. București. În tabelul 4.1 sunt prezentate caracteristicile magnetice principale ale acestora.

Caracteristicile magnetice principale ale componentelor sistemului magnetic

Tabelul 4.1

Producător: I.C.P.E. secția 02 - București		
Denumire produs: Magnet NdFeB sinterizat		
Dimensiuni: 42 x 20 x 10,5		
Codul de identificare al magnetului	Inducția remanentă $B_r$ (Gs)	Câmpul coercitiv intrinsec $JH_C$ (Oe)
743	12.000	> 14.000
771	12.500	> 14.000
772	12.000	> 14.000
773	12.500	> 14.000
778	11.500	> 14.000
779	13.000	> 14.000
780	12.500	> 14.000
781	12.500	> 14.000
784	11.500	> 14.000
786	12.000	> 14.000
791	12.000	> 14.000
793	13.500	> 14.000
799	13.000	> 14.000
813	13.000	> 14.000
818	12.000	> 14.000

Între magneți sunt dispuse lamelele transversale 2 și lamelele longitudinale 4; aceste lamele precum și placa de bază 3 sunt realizate din tablă de aluminiu, cu grosimea de 2 și respectiv 4 mm.

În figurile 4.3 și 4.4 se prezintă imaginea standului de experimentări, cu mențiunea că în figura 4.4. a fost înlăturată cuva pentru a putea fi mai bine evidențiat sistemul magnetic.

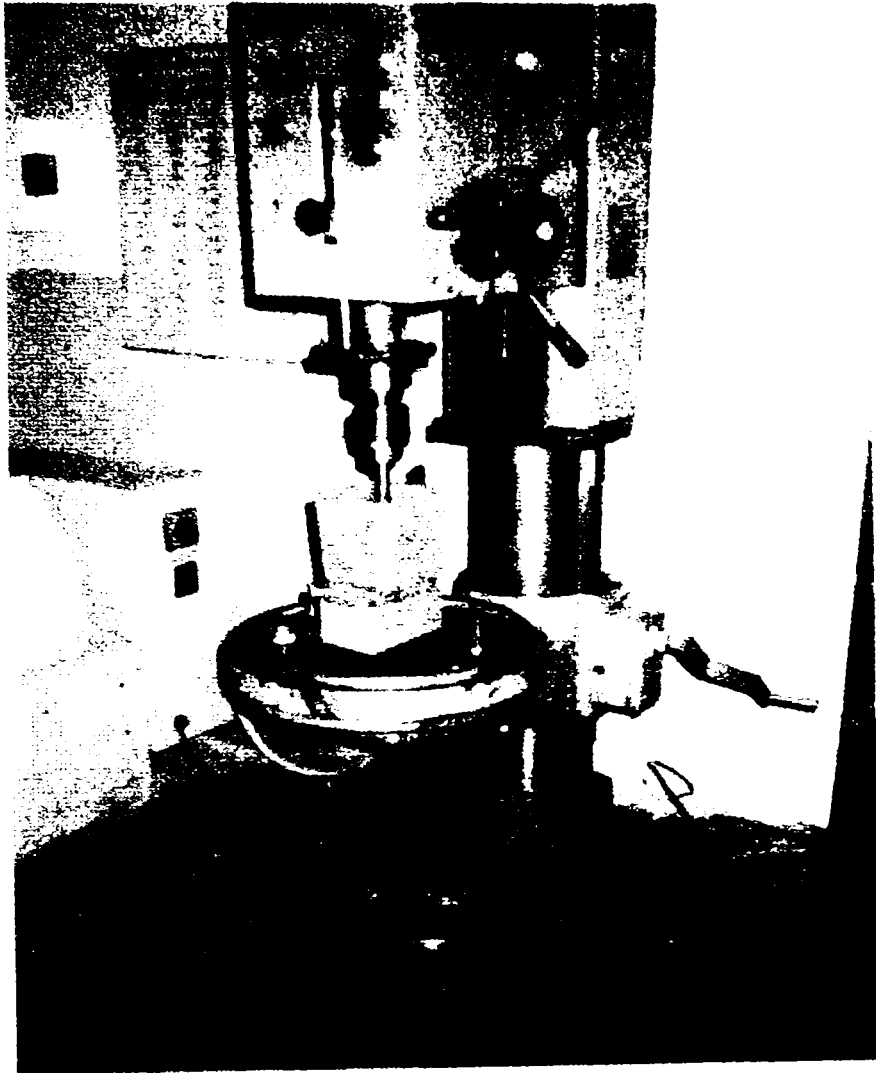


Fig.4.3

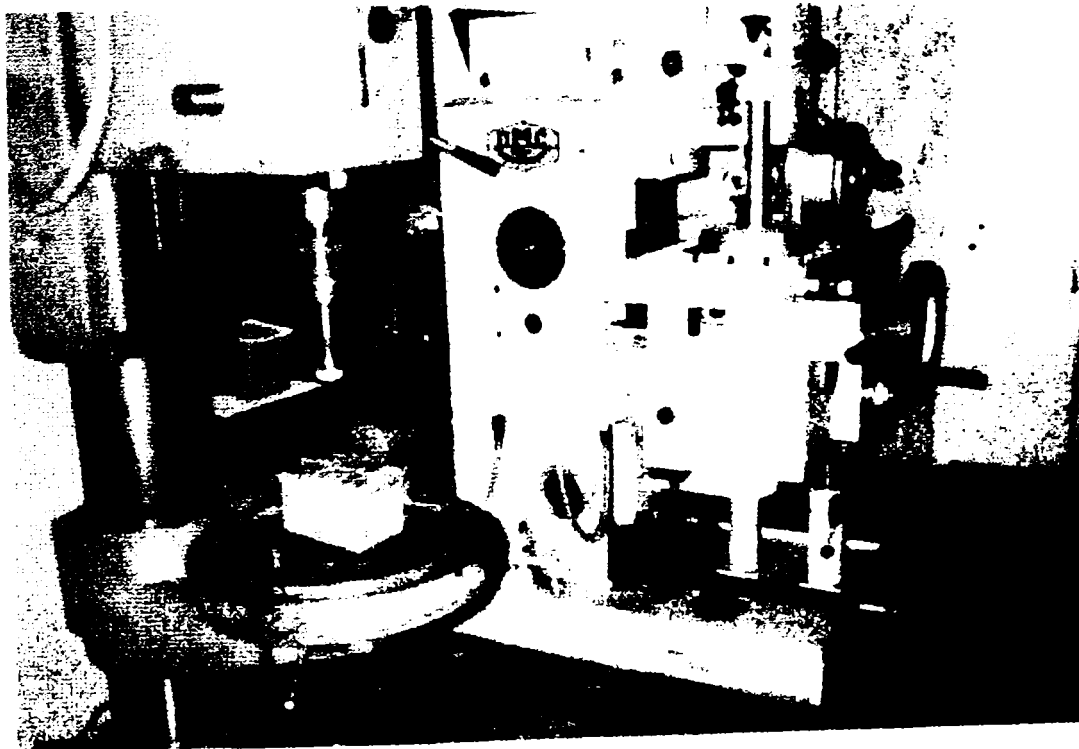


Fig.4.4

În cadrul experimentărilor au fost prelucrate suprafețele plan-frontale ale unor “probe” care au constituit OP. Schița acestora se prezintă în figura 4.5.

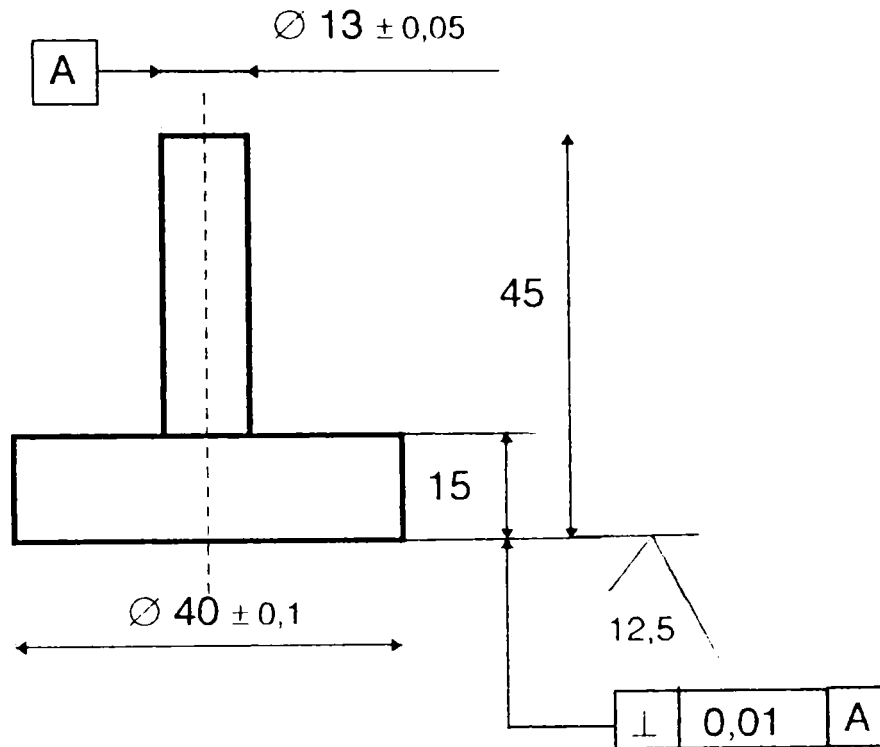


Fig.4.5

Materialul din care sunt prelucrate aceste probe este un aliaj pe bază de aluminiu, realizat în cadrul laboratorului de turnătorie al catedrei Tehnologie Mecanică.

### 4.3. Modelarea experimentală a capacității abrazive a MAMR (p)

#### 4.3.1. Proiectarea și realizarea experimentului

Utilizarea experimentului factorial la modelarea proceselor tehnologice constituie una dintre cele mai eficiente metode de modelare experimentală. Această metodă necesită parcurgerea următoarelor etape principale [6], [7], [53]:

- a) stabilirea domeniului de experimentare, care presupune:
  - stabilirea nivelului de bază (punctul central al experimentării);
  - stabilirea intervalului de variație a fiecărui FI;
- b) construcția matricii-program a experimentării și realizarea experimentărilor;

- c) determinarea modelului matematic al funcției obiectiv investigate, care presupune:

- alegerea formei modelului matematic (de regulă polinomial), calculul coeficienților de regresie și explicitarea cantitativă a modelului matematic adoptat;

- analiza statistică a modelului obținut, care constă în estimarea erorii experimentale, verificarea semnificației statistice a coeficienților de regresie și verificarea adecvănței valorilor FO calculate cu modelul empiric, cu valorile reale (măsurate) ale FO.

Calcululele sunt mult facilitate de existența unor programe de calculator extrem de performante, între care și programul *STATGRAPHICS* [75] care va fi utilizat pentru prelucrarea datelor experimentale.

În urma experimentelor preliminare au fost stabiliți următorii FI semnificativi pentru capacitatea abrazivă a MAMR [21], [28], [29]:

- $X_{F1} \Leftrightarrow n$  [rot/min] reprezentând turația OP;
- $X_{F2} \Leftrightarrow g_a$  [ $\mu\text{m}$ ] reprezentând granulația abrazivului;
- $X_{F3} \Leftrightarrow C$  [%] reprezentând concentrația MAMR.

Se observă că FI au fost renotați față de tab.3.1., pentru a fi în concordanță cu cerințele experimentelor factoriale [7].

Ca FO pentru capacitatea abrazivă a MAMR a fost aleasă presiunea de așchiere  $p$  exercitată de acesta pe suprafața OP:

- $Y_{M1} \Leftrightarrow p$  [MPa]

Presiunea de așchiere pe care o exercită MAMR asupra OP a fost determinată cu ajutorul unui stand experimental a cărui concepție a avut în vedere următoarele cerințe [47], [56]:

- convertirea directă a presiunii MAMR în semnale electrice ușor prelucrabile;
- asigurarea unei viteze mari de răspuns în condiții de sensibilitate ridicată;
- realizarea unui sistem rigid de măsurare;

De precizat, faptul că în locul OP a fost montat direct un traductor piezoceramic care, pentru diferitele valori ale FI, să permită determinarea presiunii exercitată de MAMR pe suprafața acestuia.

Schema de principiu a acestui stand se prezintă în figura 4.6.

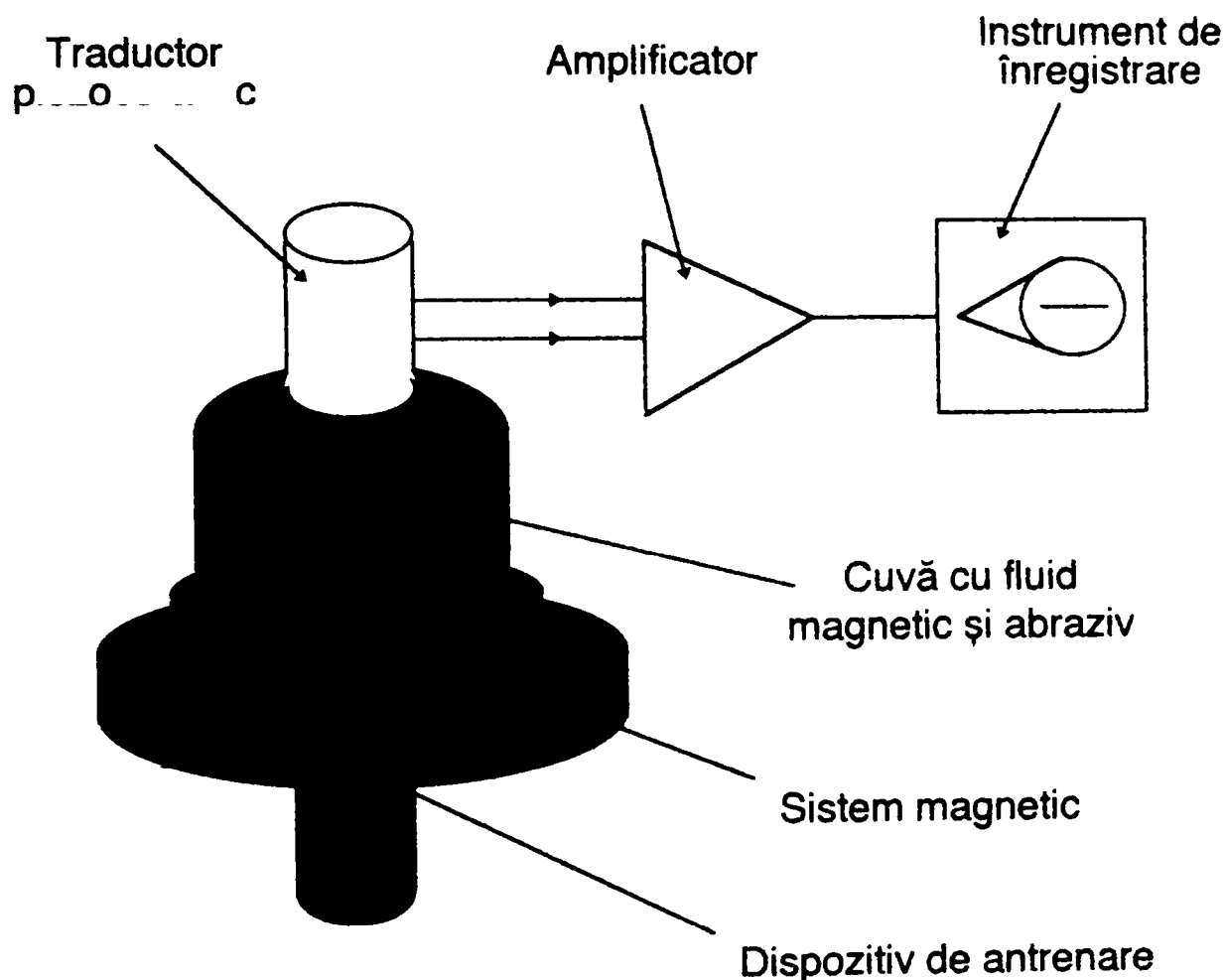


Fig.4.6

Datorită identificării teoretice a unui punct de maxim al FO  $Y_{M1} \Leftrightarrow p$  în raport cu FI  $X_{F2} \Leftrightarrow g_a$  (vezi 3.3.4), se justifică realizarea unui experiment factorial de ordinul doi în jurul unui punct apropiat de valoarea corespunzătoare granulației teoretice care a furnizat maximum. Acest lucru va permite verificarea modelului analitic precum și utilizarea efectivă a acestor modele în optimizarea proceselor tehnologice de prelucrare.

Conform celor prezentate anterior, coordonatele punctului central al experimentării, valorile nivelului superior și inferior, precum și intervalele de variație a FI,  $X_{F1}$ ,  $X_{F2}$ ,  $X_{F3}$  au fost alese pe baza informațiilor apriorice (din modelarea analitică anterioară, sursele bibliografice studiate și pe baza experimentelor preliminare) și se prezintă în tabelul 4.2.

Valorile și nivelele FI la modelarea capacității abrazive a MAMR Tabelul 4.2

Parametru	Cod	Valori fizice		
		$X_{F1} \Leftrightarrow n$ [rot/min]	$X_{F2} \Leftrightarrow g_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$X_{F3} \Leftrightarrow C$ [%]
Nivel superior	+1	900	100	35
Nivel inferior	-1	355	20	6
Punct central	0	627,5	60	20,5
Braț pozitiv	$+\alpha$	1172	140	49,5
Braț negativ	$-\alpha$	82,5	12	3

Matricea-program specifică experimentelor factoriale compuse și centrate Box-Wilson de ordinul doi cu trei FI, precum și valorile măsurate ale FO  $Y_{M1} \Leftrightarrow p$  se prezintă în tabelul 4.3.

Matricea-program la modelarea capacității abrazive a MAMR Tabelul 4.3

Nr. crt.	Valorile FI codificate (fizice)			Valorile FO $Y_{M1} \Leftrightarrow p$ [MPA · 10 <sup>-2</sup> ]
	$X_{F1}$	$X_{F2}$	$X_{F3}$	
1.	-1 (355)	-1 (20)	-1 (6)	15,95
2.	+1 (900)	-1 (20)	-1 (6)	16,15
3.	-1 (355)	+1 (100)	-1 (6)	21,45
4.	+1 (900)	+1 (100)	-1 (6)	22,60
5.	-1 (355)	-1 (20)	+1 (35)	22,15
6.	+1 (900)	-1 (20)	+1 (35)	24,40
7.	-1 (355)	+1 (100)	+1 (35)	22,20
8.	+1 (900)	+1 (100)	+1 (35)	22,55
9.	-2 (82,50)	0 (60)	0 (20,5)	19,25
10.	+2 (1172,5)	0 (60)	0 (20,5)	19,75
11.	0 (627,5)	-1,2 (12)	0 (20,5)	18,60
12.	0 (627,5)	+2 (140)	0 (20,5)	28,85
13.	0 (627,5)	0 (60)	-1,2 (3,1)	17,20
14.	0 (627,5)	0 (60)	+2 (49,5)	25,60
15.	0 (627,5)	0 (60)	0 (20,5)	21,20
16.	0 (627,5)	0 (60)	0 (20,5)	21,30

### 4.3.2. Prelucrarea rezultatelor măsurătorilor

Prelucrarea rezultatelor a fost realizată cu ajutorul programului *STATGRAPHICS*, pe baza metodologiei din literatura de specialitate [6], [7], [50]. Pentru FO  $Y_{M1} \Leftrightarrow p$  au fost determinate următoarele:

- influența FI și interacțiunile de ordinul II semnificative;
- coeficienții modelului experimental căutat, determinați pentru valorile codificate ale FI (tab.4.4) și respectiv pentru valorile fizice ale FI (tab.4.5); modelul experimental este un polinom de ordinul II cu forma generală:

$$Y_{M1} = b_0 + \sum_{j=1}^3 b_j \cdot x_j + \sum_{\substack{u,j=1 \\ u \neq j}}^3 b_{uj} \cdot x_u \cdot x_j + \sum_{j=1}^3 b_{jj} \cdot x_j^2 \quad (4.1)$$

Coeficienții modelului experimental cu FI având valori codificate *Tabelul 4.4*

Coeficient	Valoare	Coeficient	Valoare
$b_0$	20,4255	$b_{13}$	0,15625
$b_1$	0,309375	$b_{23}$	-1,96875
$b_2$	1,84603	$b_{11}$	- 0,266032
$b_3$	1,96952	$b_{22}$	1,01706
$b_{12}$	- 0,11875	$b_{33}$	0,14338

Coeficienții modelului experimental cu FI având valori fizice *Tabelul 4.5*

Coeficient	Valoare	Coeficient	Valoare
$b_0$	11,2472	$b_{13}$	$3,95444 \cdot 10^{-5}$
$b_1$	$5,47452 \cdot 10^{-3}$	$b_{23}$	$- 3,3944 \cdot 10^{-3}$
$b_2$	$46,2927 \cdot 10^{-3}$	$b_{11}$	$- 3,28262 \cdot 10^{-6}$
$b_3$	$286,719 \cdot 10^{-3}$	$b_{22}$	$6,35662 \cdot 10^{-4}$
$b_{12}$	$- 1,08945 \cdot 10^{-5}$	$b_{33}$	$6,8195 \cdot 10^{-4}$

- histograma efectelor, care pune în evidență amplitudinea variației valorilor FO produsă când FI parcurg domeniul dintre nivelul inferior și cel superior (fig.4.7);

- compararea valorilor măsurate cu cele estimate cu ajutorul modelului polinomial găsit (fig.4.8) la o precizie de estimatie de 95,5 %.

Pentru toate combinațiile posibile ale FI grupați doi câte doi, au fost trasate suprafețele de răspuns ale FO  $Y_{M1} \Leftrightarrow p$  (fig.4.9 ... 4.14).



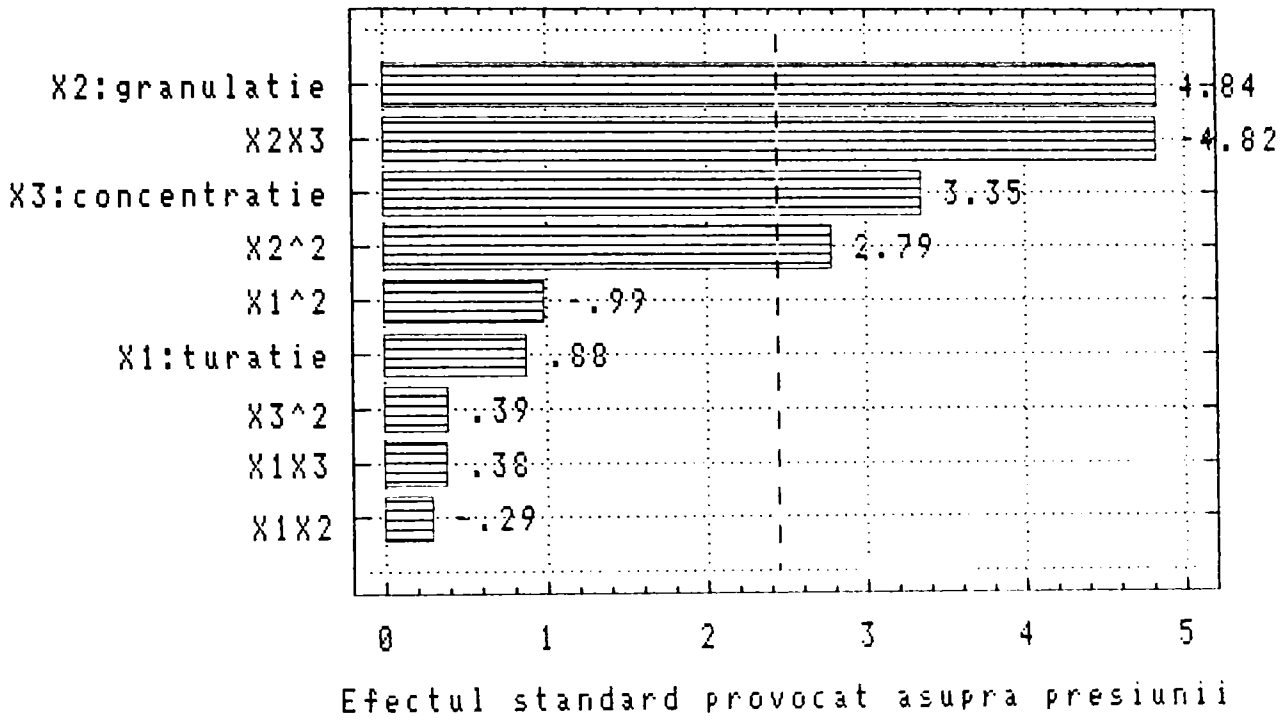


Fig.4.7

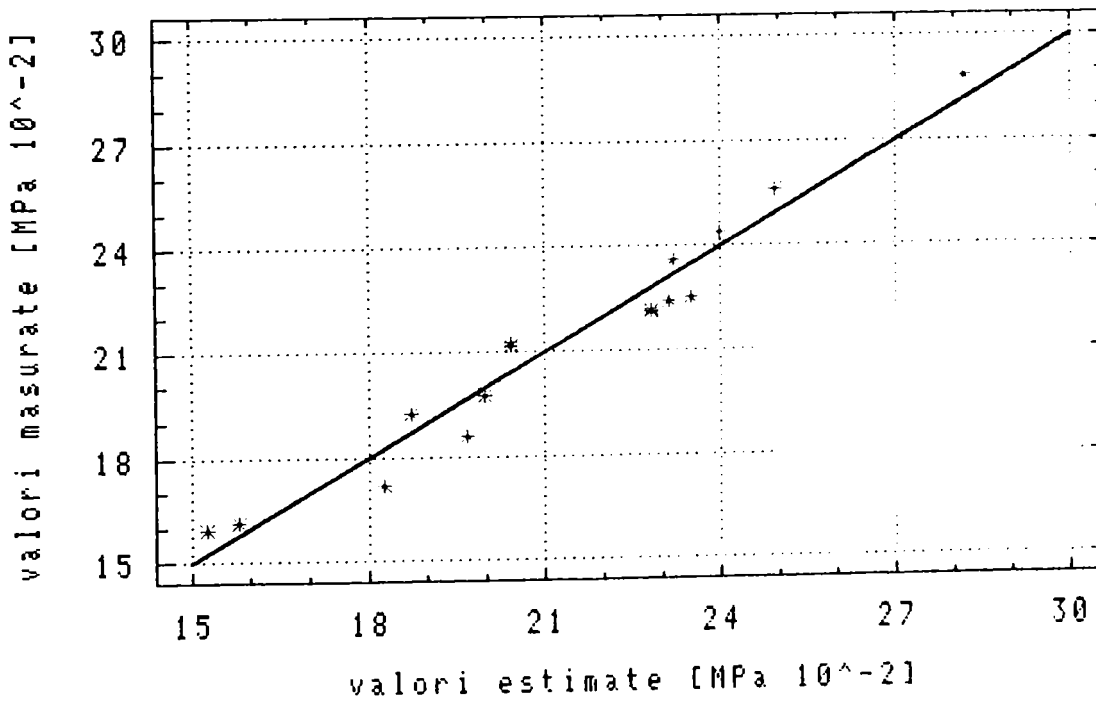


Fig.4.8

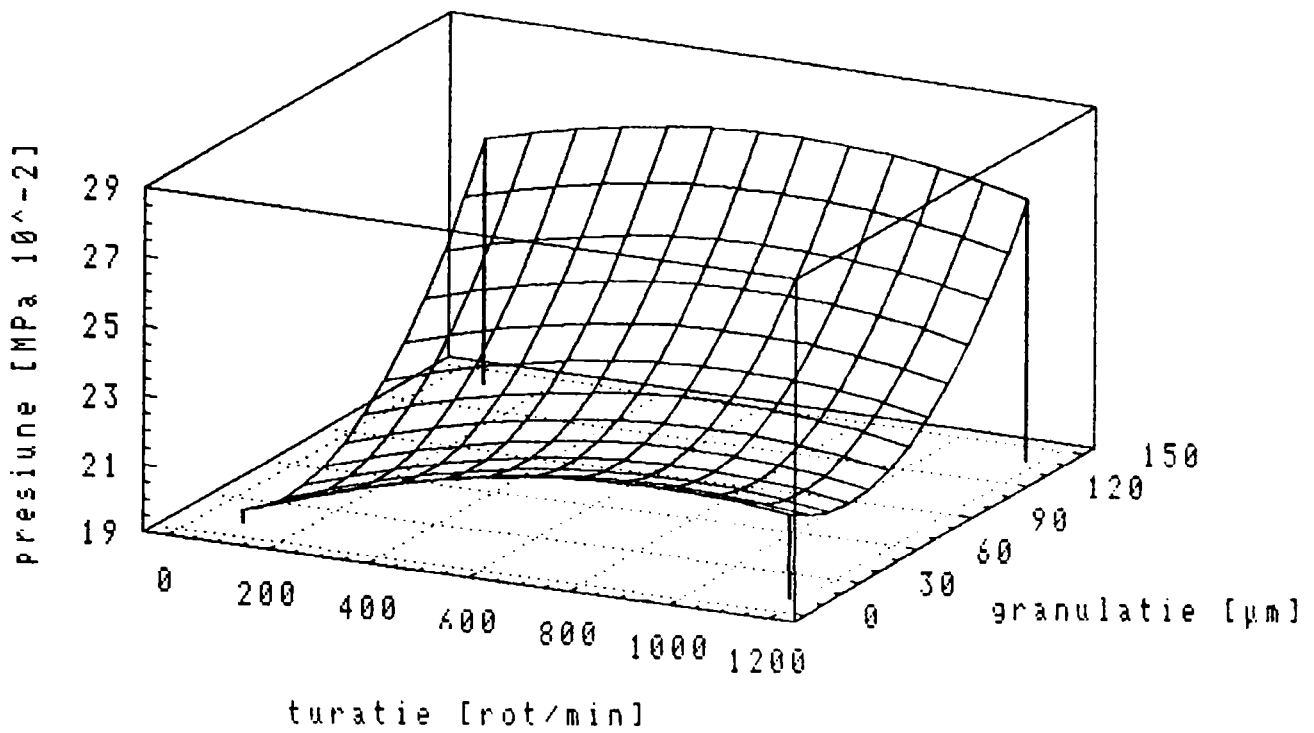


Fig.4.9

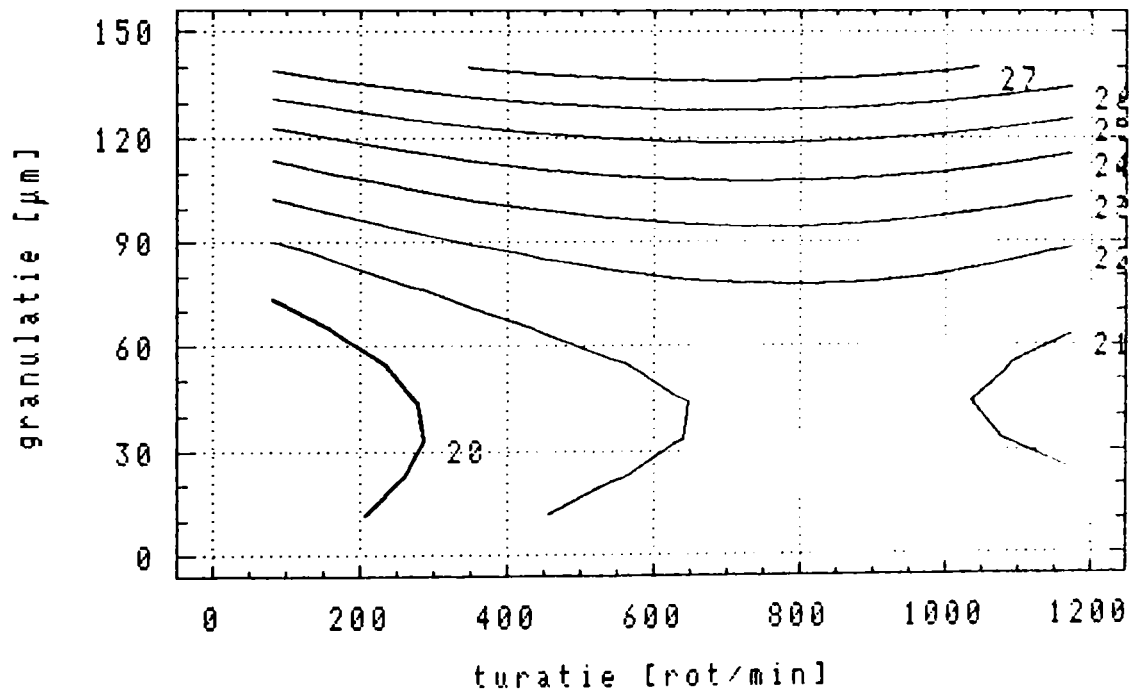


Fig.4.10

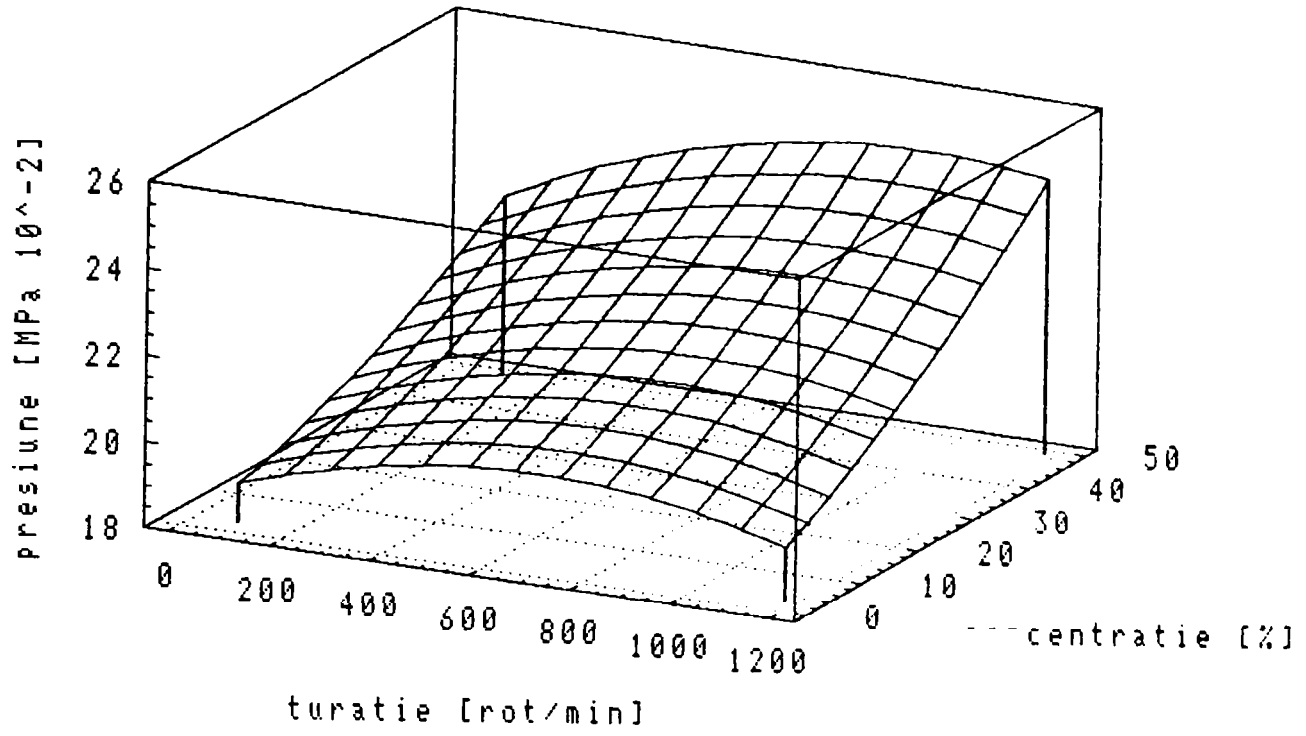


Fig.4.11

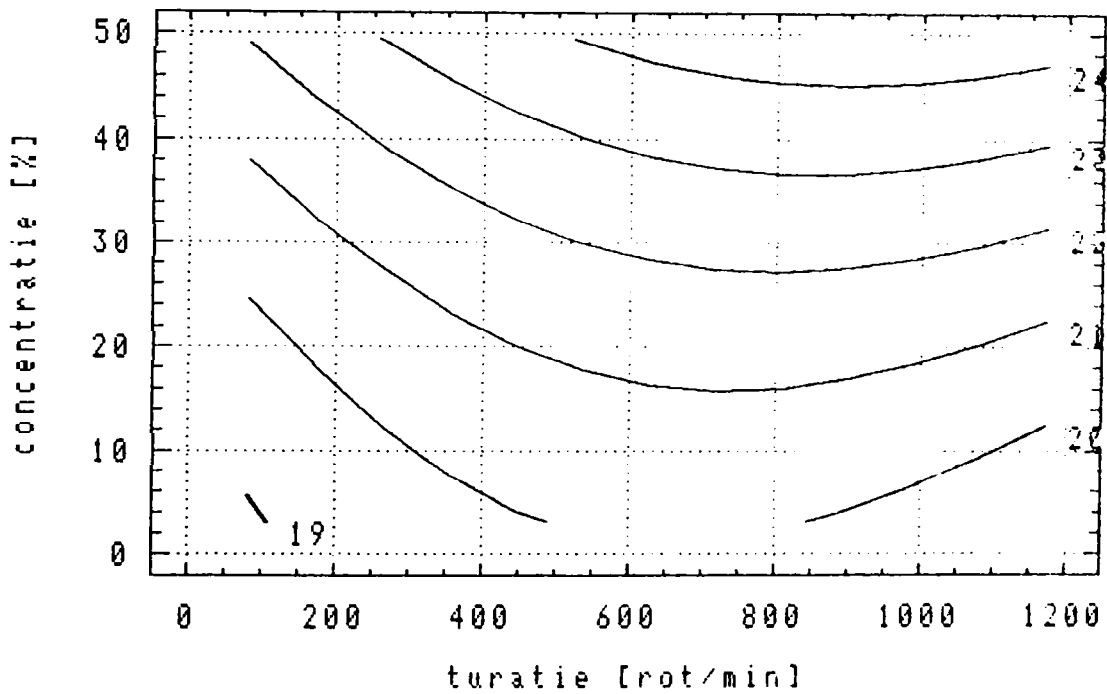


Fig.4.12

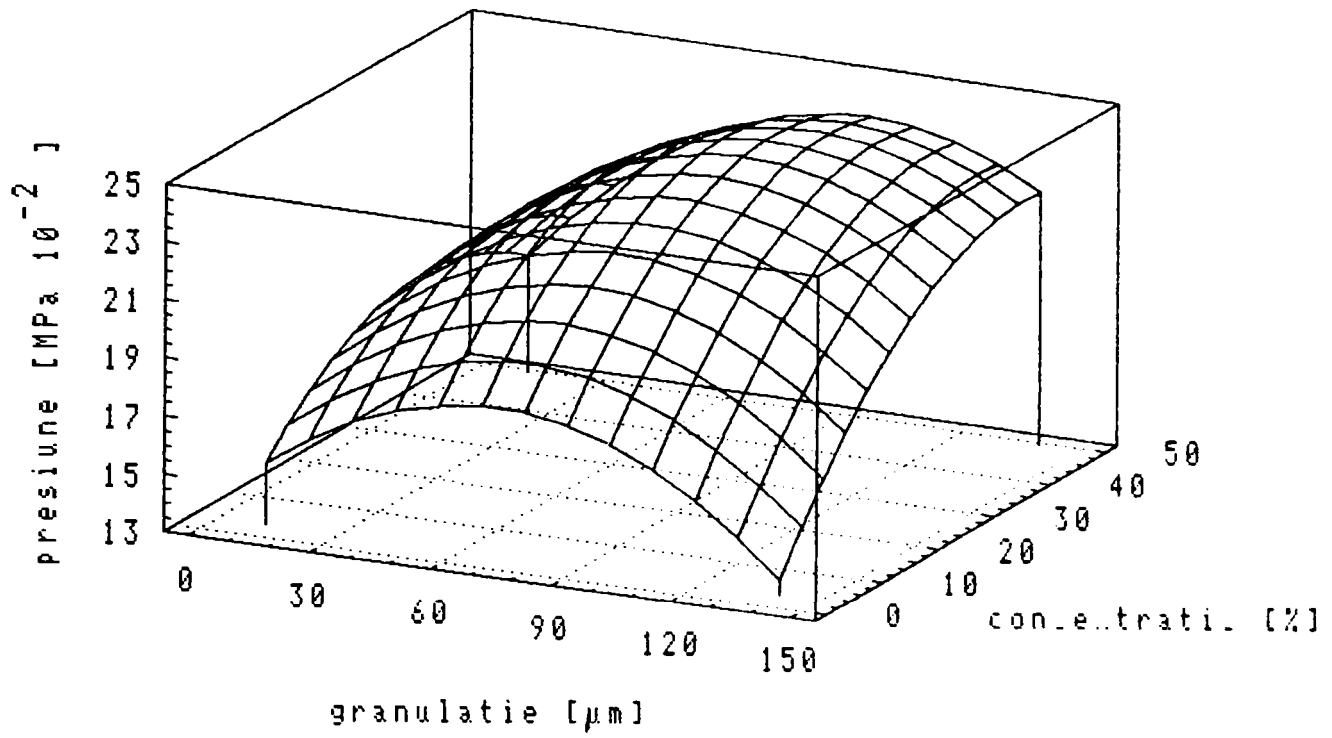


Fig.4.13

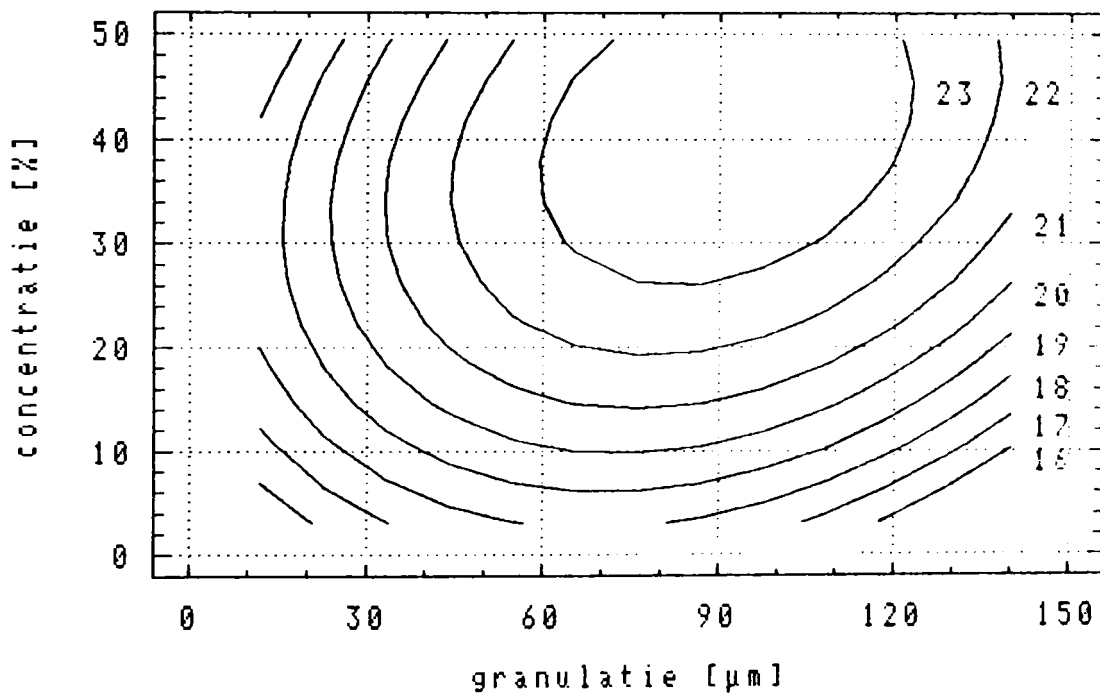


Fig.4.14

### 4.3.3. Concluzii

Din analiza tuturor rezultatelor obținute în urma prelucrării datelor experimentale pot fi formulate următoarele concluzii privind capacitatea abrazivă a MAMR:

- modelul polinomial de gradul II obținut în urma realizării experimentului factorial de ordin doi este adecvat estimării suprafeței de răspuns corespunzătoare domeniului experimental investigat, deci se poate obține cu ajutorul lui o bună estimare a presiunii pe care o exercită MAMR pe suprafața OP;

- de primă importanță privind presiunea de aşchiere sunt (în ordine): granulația, concentrația, termenul pătratic al granulației, care sunt în relație de directă proporționalitate cu valorile FO precum și interacțiunea de ordinul doi între granulație și concentrație, care este invers proporțională cu valorile FO  $Y_{M1} \leftrightarrow p$ ;

- fără semnificație statistică semnificativă, în domeniul investigat, este turația și interacțiunile de ordinul doi între acest factor de influență și ceilalți doi, precum și termenul pătratic al concentrației;

- suprafața de răspuns are o formă complexă, care, în raport cu granulația tinde spre un extrem; forma acestei suprafețe este asemănătoare celei obținute la modelarea analitică (fig.3.7), fapt ce demonstrează valabilitatea modelului analitic realizat în capitolul 3, atât din punct de vedere al ipotezelor făcute cât și al concluziilor desprinse din modelare;

- buna concordanță dintre valorile estimate și cele măsurate ale FO (95,5%) face ca modelul experimental găsit să permită formularea condițiilor necesare și suficiente, ce trebuiesc îndeplinite de FI în scopul atingerii obiectivului de maximizare de către FO  $Y_{M1} \leftrightarrow p$ .

### 4.4. Modelarea experimentală a productivității ( $Q_p$ ) și a rugozității suprafețelor ( $R_a$ ) prelucrate cu MAMR

Concluziile desprinse din modelarea analitică și experimentală a capacității abrazive a MAMR determină, ca și pentru sistemele tehnologice de

prelucrare aferente să se utilizeze modelarea cu ajutorul experimentelor factoriale de ordinul doi.

#### 4.4.1. Proiectarea și realizarea experimentului

În urma experimentelor preliminare și a celor referitoare la capacitatea abrazivă a MAMR (vezi 4.3) au fost stabiliți următorii FI semnificativi pentru aceste mărimi:

- $X_{F1} \Leftrightarrow n$  [rot/min] - turația OP;
- $X_{F2} \Leftrightarrow g_a$  [ $\mu\text{m}$ ] - granulația abrazivului;
- $X_{F3} \Leftrightarrow R_{ai}$  [ $\mu\text{m}$ ] - rugozitatea inițială a suprafeței ce se prelucrează;
- $X_{F4} \Leftrightarrow C$  [%] - concentrația MAMR.

Se observă că și în acest caz FI au fost renotați față de tab.3.1., pentru a fi în concordanță cu cerințele experimentelor factoriale [7].

Ca FO pentru prelucrările cu MAMR au fost stabilite următoarele:

- $Y_{S1} \Leftrightarrow Q_p$  [g/min] - productivitatea prelucrării, care exprimă cantitatea de material prelevată în unitatea de timp;
- $Y_{S2} \Leftrightarrow R_a$  [ $\mu\text{m}$ ] - rugozitatea suprafeței obținută în urma prelucrării.

În tabelul 4.6 se prezintă coordonatele punctului central al experimentării, valorile nivelului superior și inferior, precum și intervalele de variație a FI,  $X_{F1}$ ,  $X_{F2}$ ,  $X_{F3}$ ,  $X_{F4}$ .

Valorile și nivelele FI la modelarea productivității și rugozității Tabelul 4.6

Parametru	Cod	Valori fizice			
		$X_{F1} \Leftrightarrow n$ [rot/min]	$X_{F2} \Leftrightarrow g_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$X_{F3} \Leftrightarrow R_{ai}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$X_{F4} \Leftrightarrow C$ [%]
Nivel superior	+1	900	100	12,5	35
Nivel inferior	-1	355	20	1,6	6
Punct central	0	627,5	60	7,05	20,5
Braț pozitiv	$+\alpha$	1172	140	17,95	49.5
Braț negativ	$-\alpha$	82.5	12	0,51	3,1

Matricea-program specifică experimentelor factoriale compuse și centrate Box-Wilson de ordin doi cu patru FI, precum și valorile măsurate ale FO  $Y_{S1} \Leftrightarrow Q_p$  și  $Y_{S2} \Leftrightarrow R_a$  se prezintă în tabelul 4.7.

Matricea-program la modelarea productivității și rugozității

Tabelul 4.7

Nr. crt.	Valorile FI codificate (fizice)				Valorile FO $Y_{S1} \Leftrightarrow Q_p$ [g/min · 10 <sup>-3</sup> ]	Valorile FO $Y_{S2} \Leftrightarrow R_a$ [μm]
	$X_{F1}$	$X_{F2}$	$X_{F3}$	$X_{F4}$		
1	-1 (355)	-1 (20)	-1 (1,6)	-1 (6)	16,52	1,48
2	+1 (900)	-1 (20)	-1 (1,6)	-1 (6)	18,42	1,34
3	-1 (355)	+1 (100)	-1 (1,6)	-1 (6)	19,36	1,42
4	+1 (900)	+1 (100)	-1 (1,6)	-1 (6)	20,14	1,18
5	-1 (355)	-1 (20)	+1 (12,5)	-1 (6)	22,67	8,24
6	+1 (900)	-1 (20)	+1 (12,5)	-1 (6)	24,36	7,26
7	-1 (355)	+1 (100)	+1 (12,5)	-1 (6)	27,53	5,16
8	+1 (900)	+1 (100)	+1 (12,5)	-1 (6)	29,62	4,44
9	-1 (355)	-1 (20)	-1 (1,6)	+1 (35)	19,36	1,54
10	+1 (900)	-1 (20)	-1 (1,6)	+1 (35)	20,86	1,48
11	-1 (355)	+1 (100)	-1 (1,6)	+1 (35)	21,54	1,46
12	+1 (900)	+1 (100)	-1 (1,6)	+1 (35)	22,48	1,38
13	-1 (355)	-1 (20)	+1 (12,5)	+1 (35)	24,34	8,42
14	+1 (900)	-1 (20)	+1 (12,5)	+1 (35)	26,46	6,28
15	-1 (355)	+1 (100)	+1 (12,5)	+1 (35)	24,60	7,46
16	+1 (900)	+1 (100)	+1 (12,5)	+1 (35)	26,56	5,84
17	-2 (82,5)	0 (60)	0 (7,05)	0 (20,5)	24,52	4,54
18	+2 (1172,5)	0 (60)	0 (7,05)	0 (20,5)	25,18	3,26
19	0 (627,5)	-1,2 (12)	0 (7,05)	0 (20,5)	22,47	2,08
20	0 (627,5)	+2 (140)	0 (7,05)	0 (20,5)	24,36	1,98
21	0 (627,5)	0 (60)	-1,2 (0,4)	0 (20,5)	20,23	0,38
22	0 (627,5)	0 (60)	+2 (18)	0 (20,5)	24,64	8,42
23	0 (627,5)	0 (60)	0 (7,05)	-1,2 (3,1)	24,16	2,78
24	0 (627,5)	0 (60)	0 (7,05)	+2 (49,5)	29,43	4,38
25	0 (627,5)	0 (60)	0 (7,05)	0 (20,5)	26,62	0,60
26	0 (627,5)	0 (60)	0 (7,05)	0 (20,5)	26,65	0,58

4.4.2. Prelucrarea rezultatelor măsurătorilor

Prelucrarea rezultatelor a fost realizată cu ajutorul programului *STATGRAPHICS*, pe baza metodologiei din literatura de specialitate [6], [7], [50]. Pentru FO  $Y_{S1} \Leftrightarrow Q_p$  și  $Y_{S2} \Leftrightarrow R_a$  au fost determinate următoarele:

- influența FI și interacțiunile de ordinul II semnificative;
- coeficienții modelului experimental căutat, determinați pentru valorile codificate ale FI pentru cele două FO (tab.4.8, respectiv tab.4.9); modelul experimental este un polinom de ordinul II cu forma generală:

$$Y_{F1} = b_0 + \sum_{j=1}^4 b_j \cdot x_j + \sum_{\substack{u,j=1 \\ u \neq j}}^4 b_{uj} \cdot x_u \cdot x_j + \sum_{j=1}^4 b_{jj} \cdot x_j^2 \quad (4.2)$$

Coeficienții modelului experimental pentru FO  $Y_{S1} \Leftrightarrow Q_p$  Tabelul 4.8

Coeficient	Valoare	Coeficient	Valoare	Coeficient	Valoare
$b_0$	26,1511	$b_{12}$	-0,090	$b_{34}$	-0,7512
$b_1$	0,5958	$b_{13}$	0,1712	$b_{11}$	-0,3712
$b_2$	1,2724	$b_{14}$	$3,75 \cdot 10^{-3}$	$b_{22}$	-1,2127
$b_3$	2,9647	$b_{23}$	0,1325	$b_{33}$	-1,9164
$b_4$	0,6996	$b_{24}$	-0,6575	$b_{44}$	-0,2427

Coeficienții modelului experimental pentru FO  $Y_{S2} \Leftrightarrow R_a$  Tabelul 4.9

Coeficient	Valoare	Coeficient	Valoare	Coeficient	Valoare
$b_0$	1,0536	$b_{12}$	0,04125	$b_{34}$	0,15375
$b_1$	-0,355833	$b_{13}$	-0,30875	$b_{11}$	0,74084
$b_2$	-0,477716	$b_{14}$	-0,11375	$b_{22}$	0,504358
$b_3$	2,44752	$b_{23}$	-0,43125	$b_{33}$	0,779064
$b_4$	0,109861	$b_{24}$	0,28375	$b_{44}$	0,887388

- histogramele efectelor, care pun în evidență amplitudinea variației valorilor FO produsă când FI parcurg domeniul dintre nivelul inferior și cel superior (fig.4.15 pentru FO  $Y_{S1} \Leftrightarrow Q_p$  și fig.4.16 pentru FO  $Y_{S2} \Leftrightarrow R_a$ );

- compararea valorilor măsurate cu cele estimate cu ajutorul modelului polinomial găsit (fig.4.17 și fig.4.18) la o precizie de estimație de 93,5 % și respectiv 92,7 %.

Pentru toate combinațiile posibile ale FI grupați doi câte doi, au fost trasate suprafețele de răspuns ale FO (fig.4.19 ... 4.42).



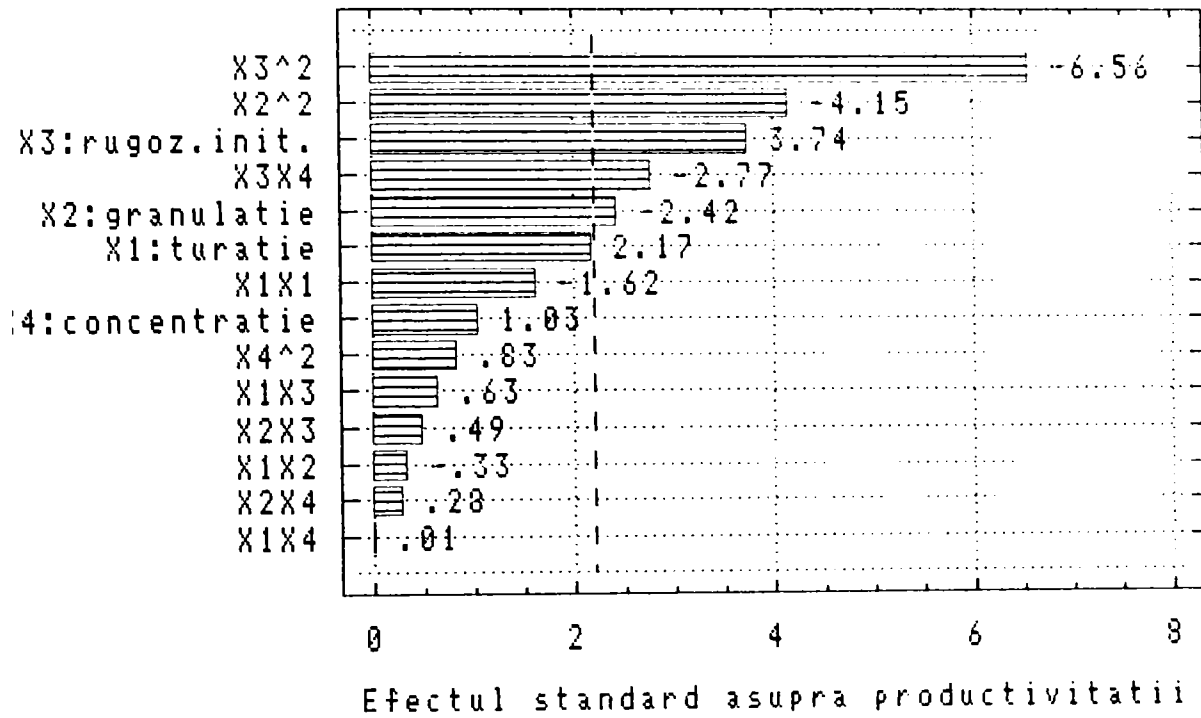


Fig.4.15

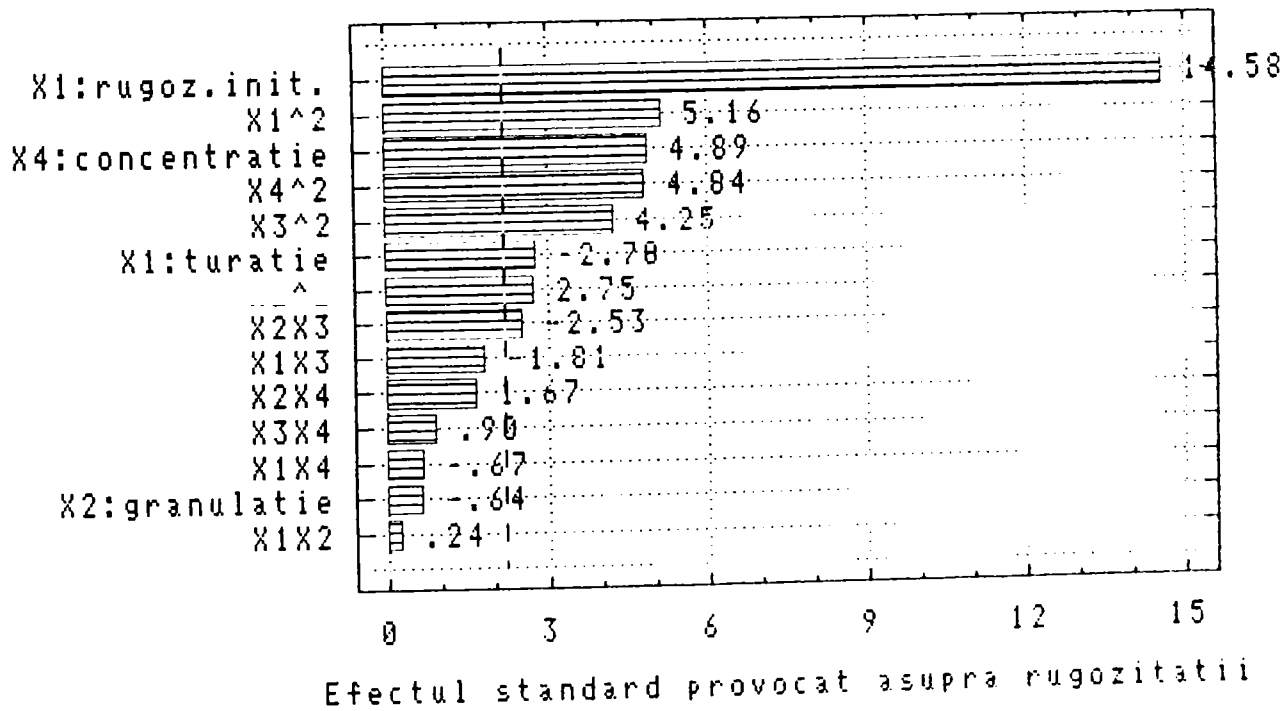


Fig.4.16

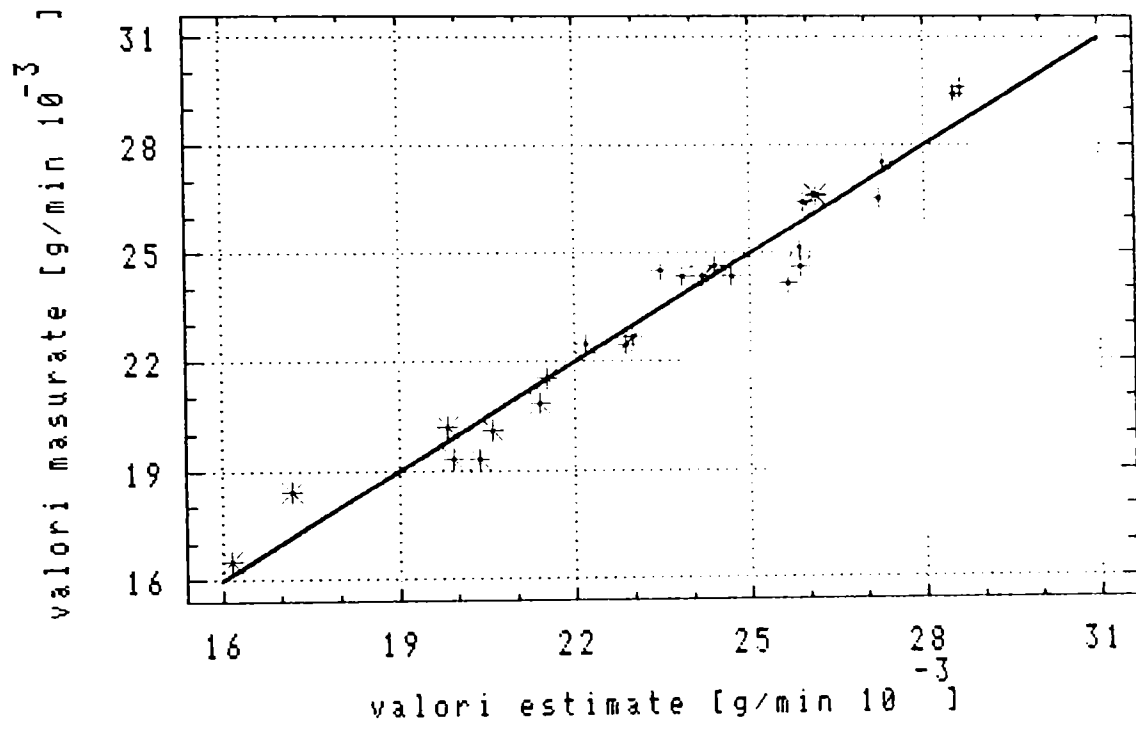


Fig.4.17

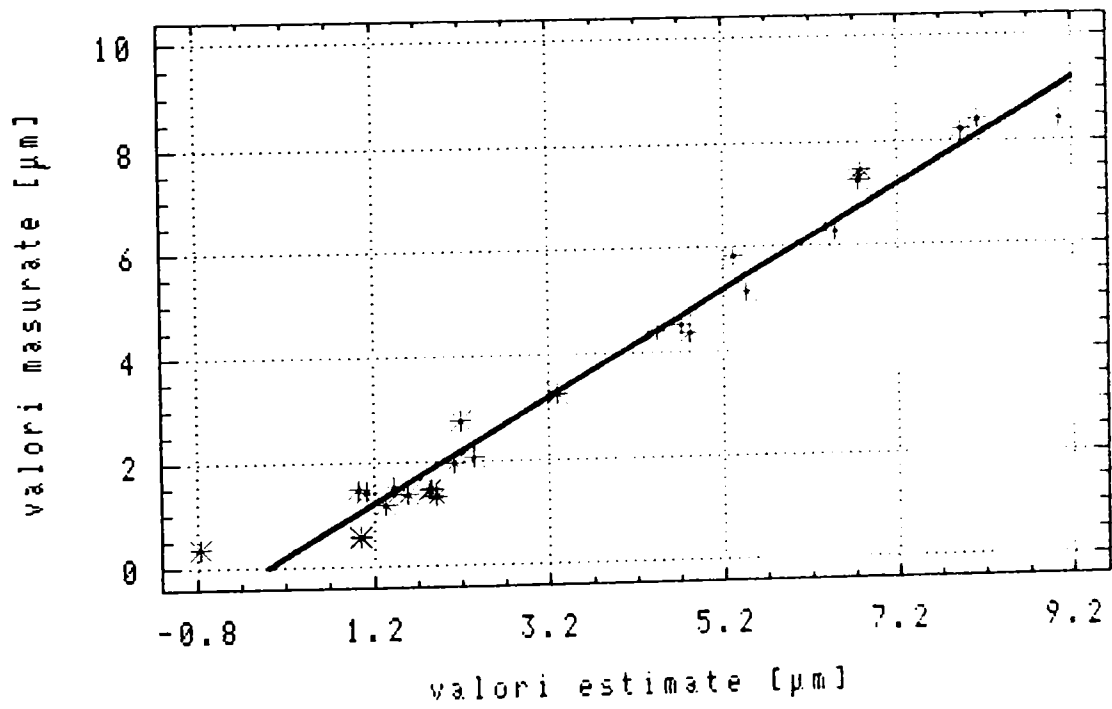


Fig.4.18

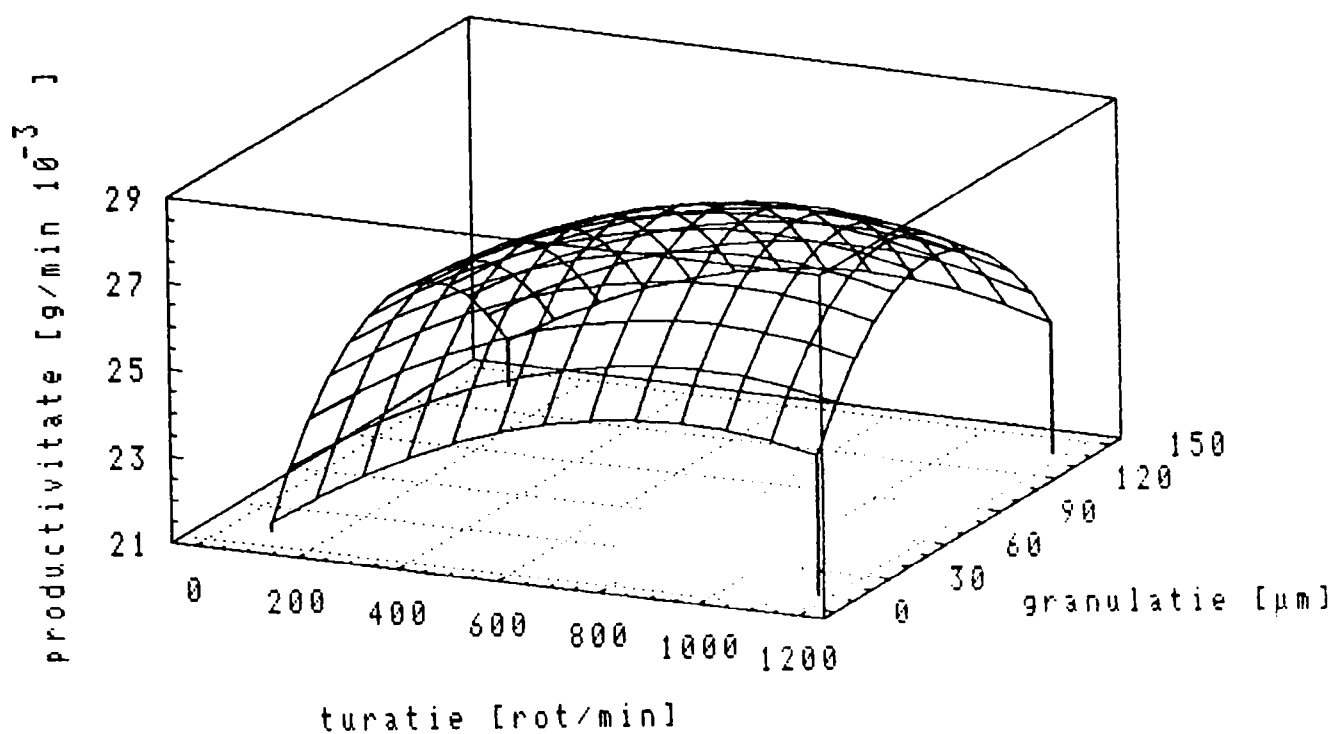


Fig.4.19

Estimated Response Function

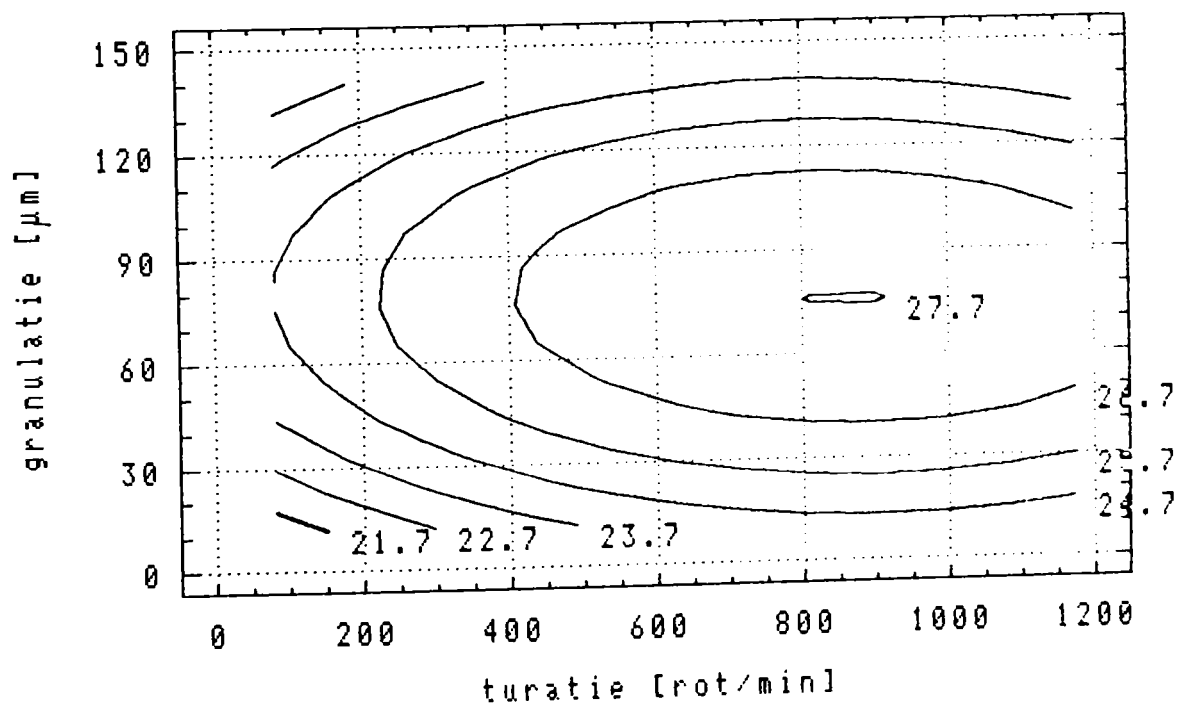


Fig.4.20

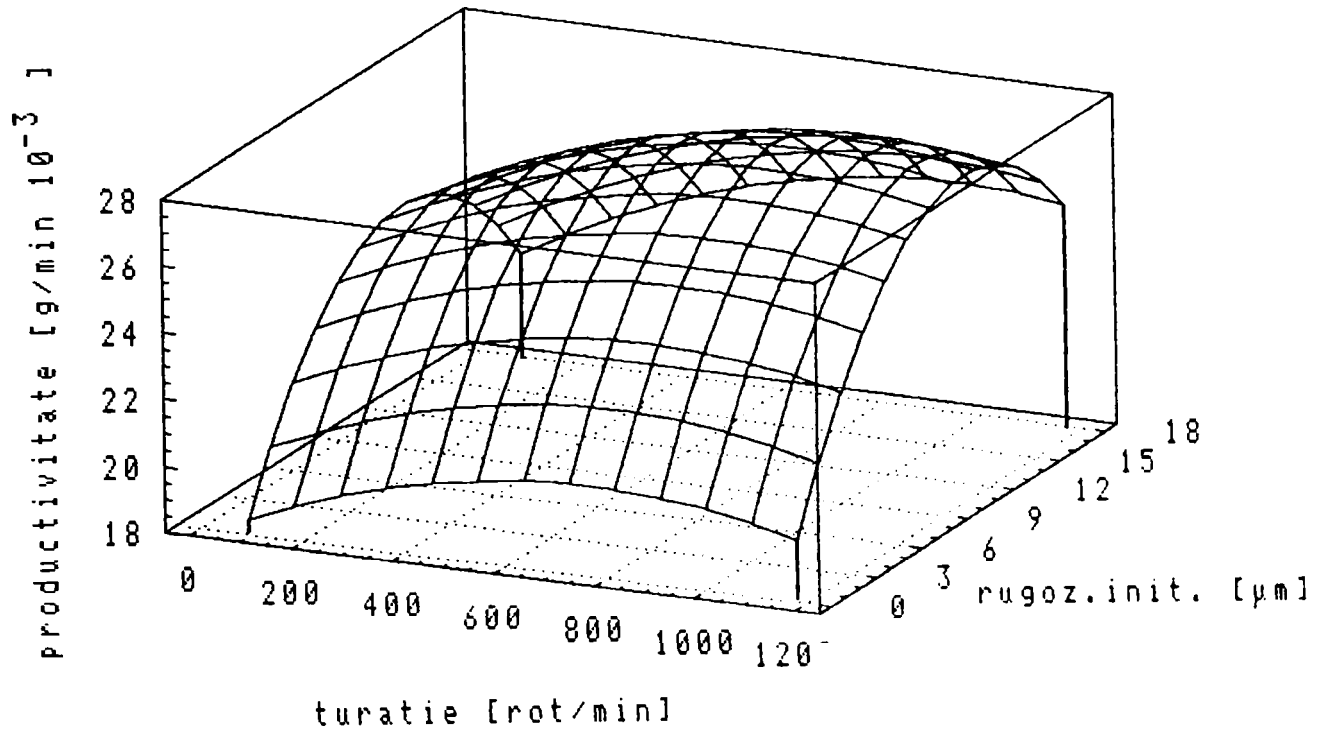


Fig.4.21

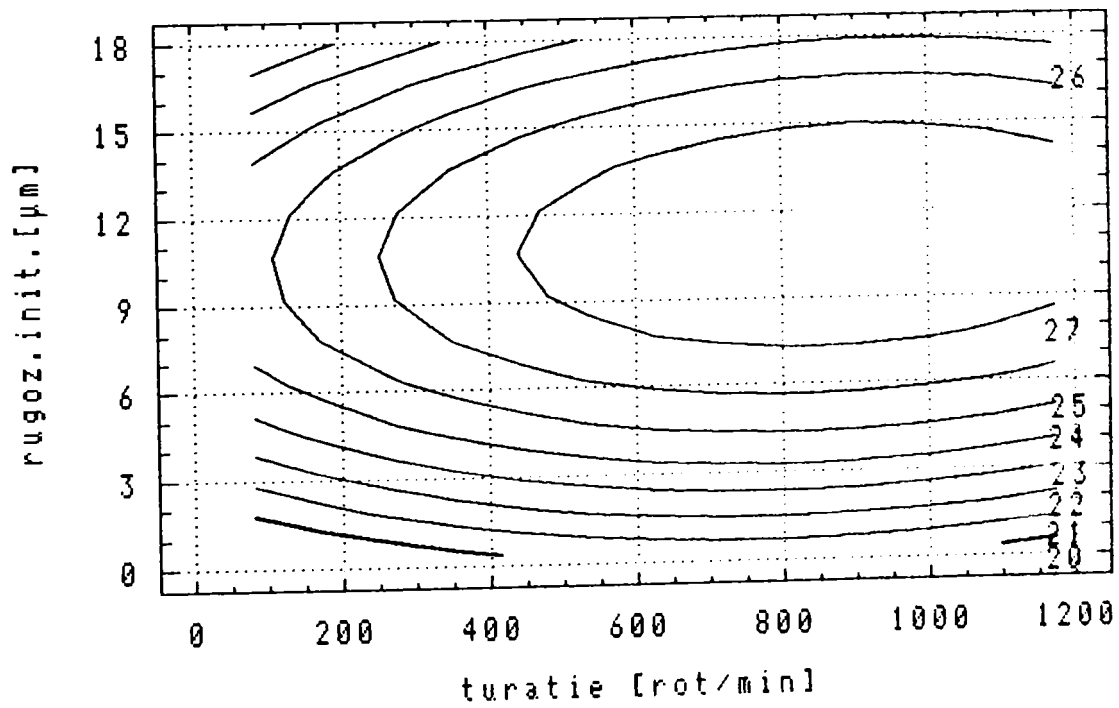


Fig.4.22

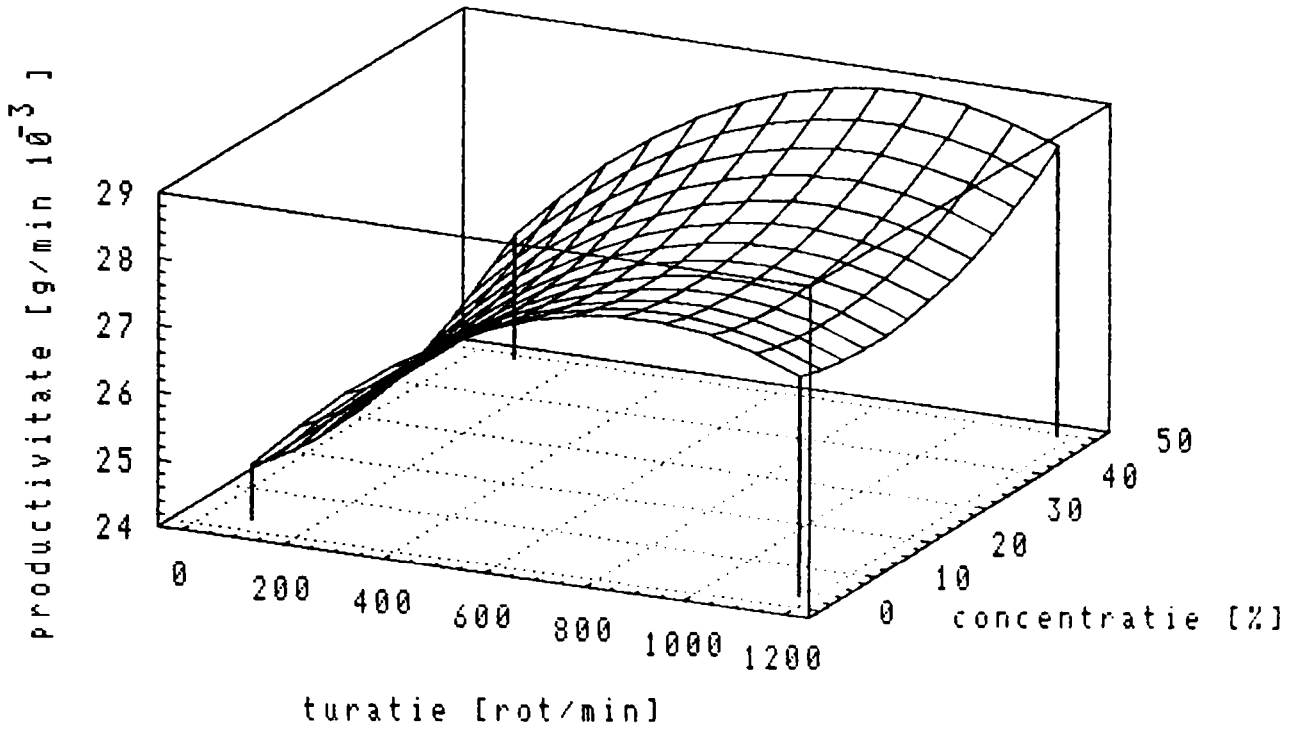


Fig.4.23

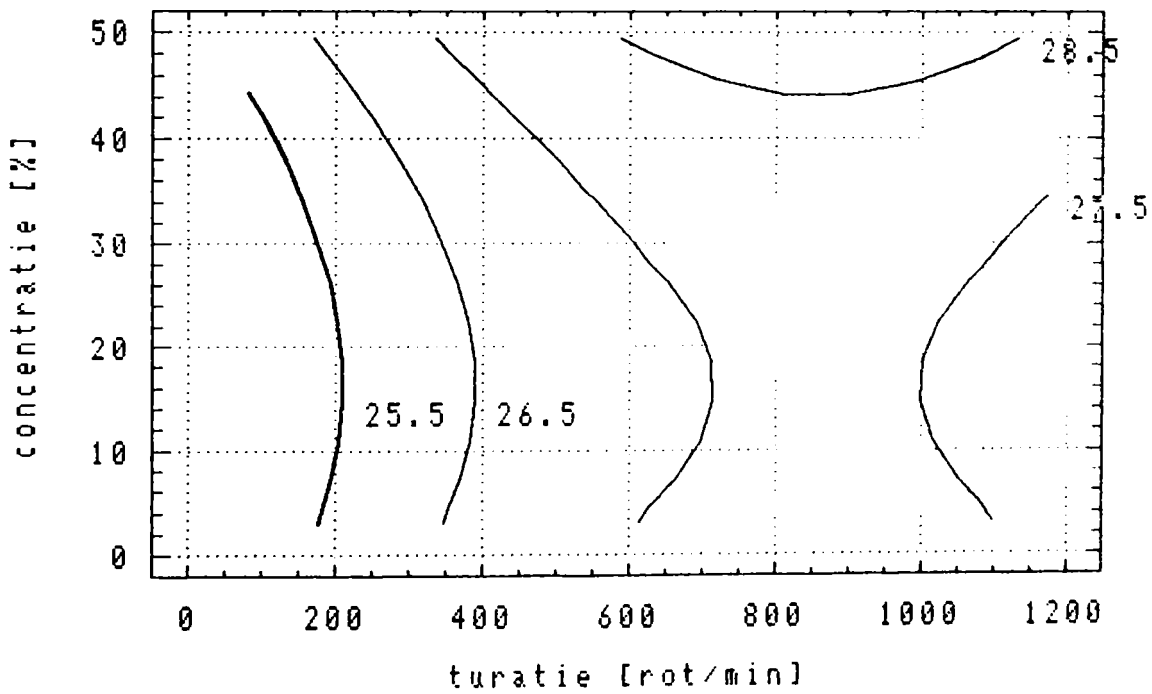


Fig.4.24

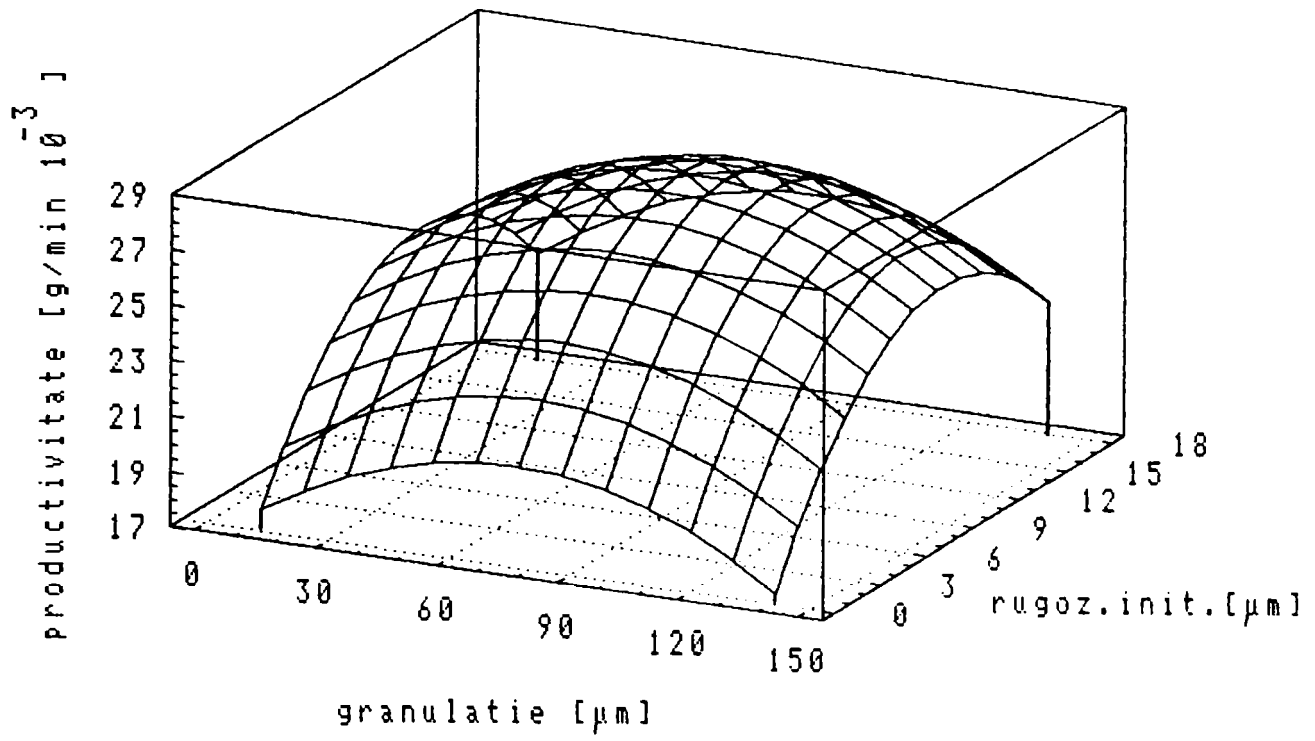


Fig.4.25

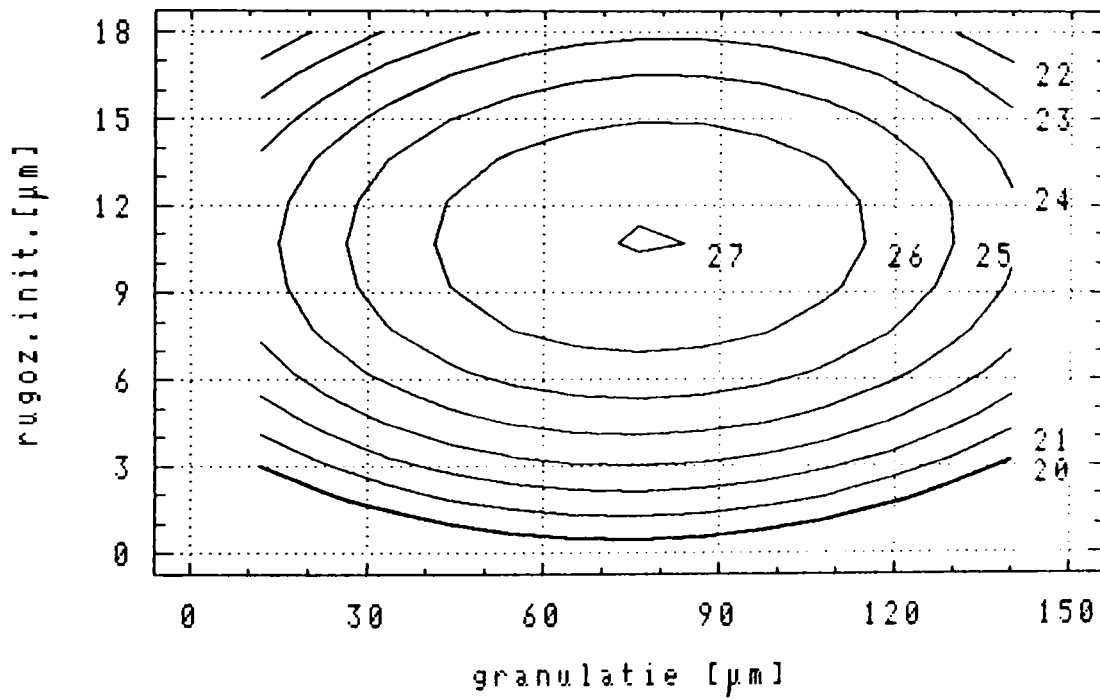


Fig.4.26

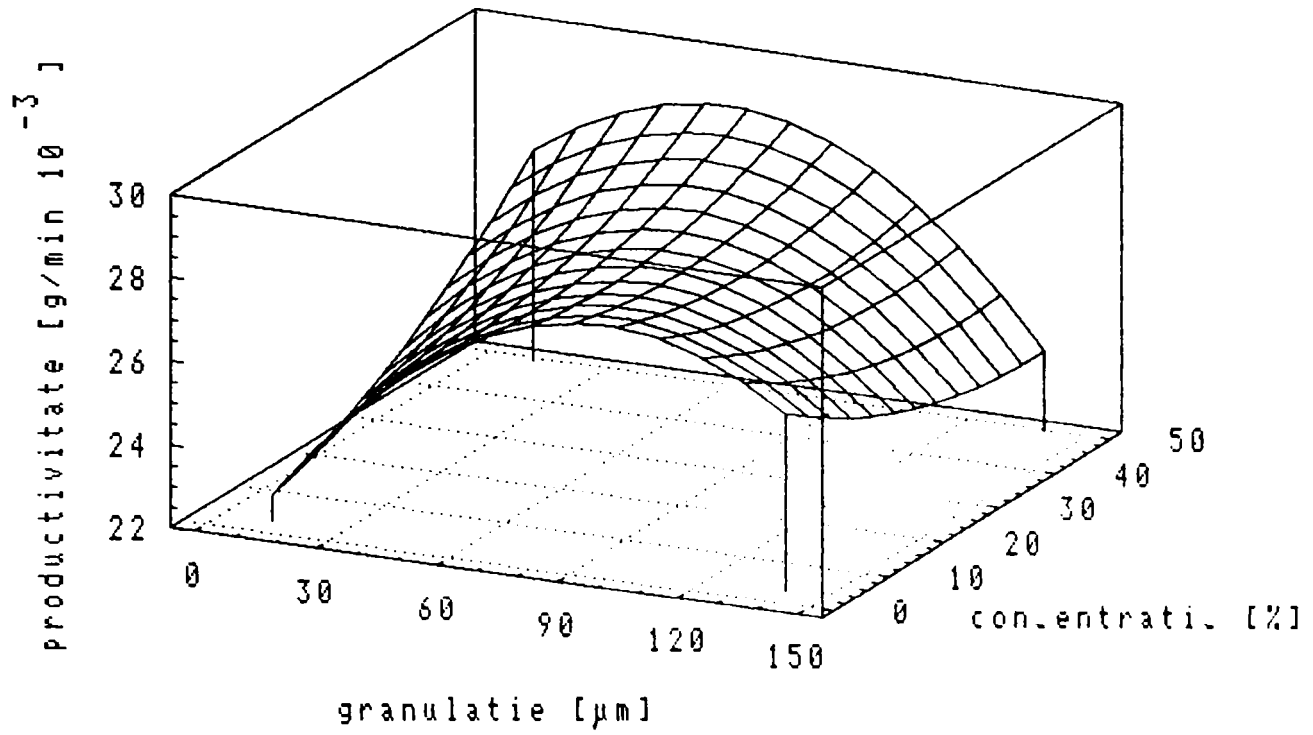


Fig.4.27

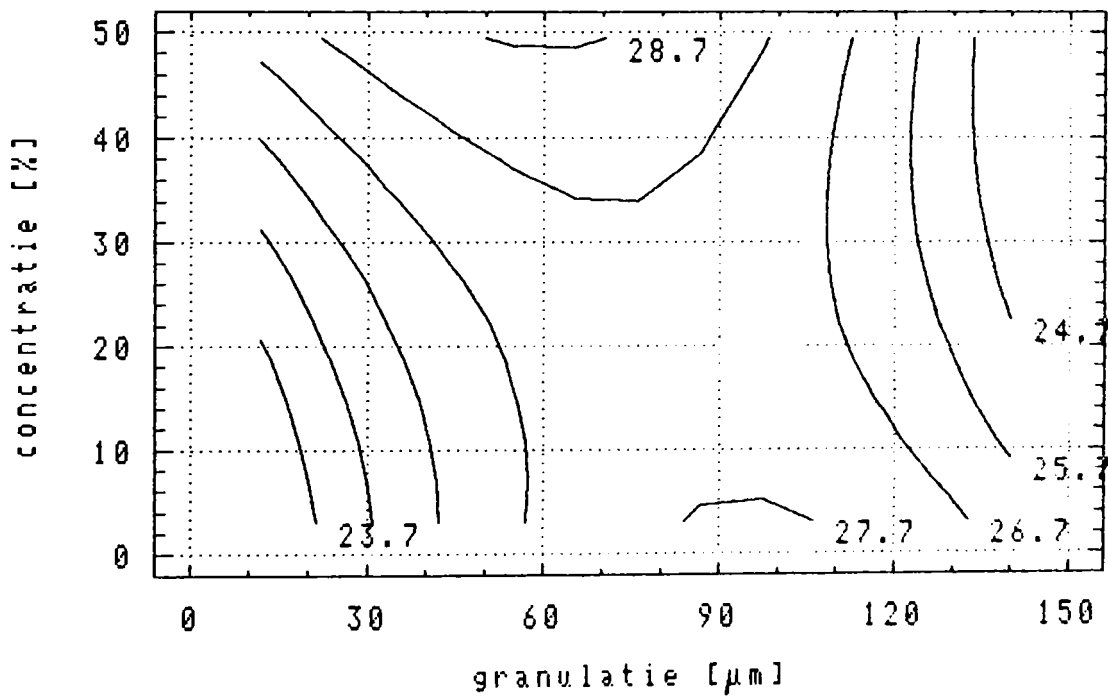


Fig.4.28

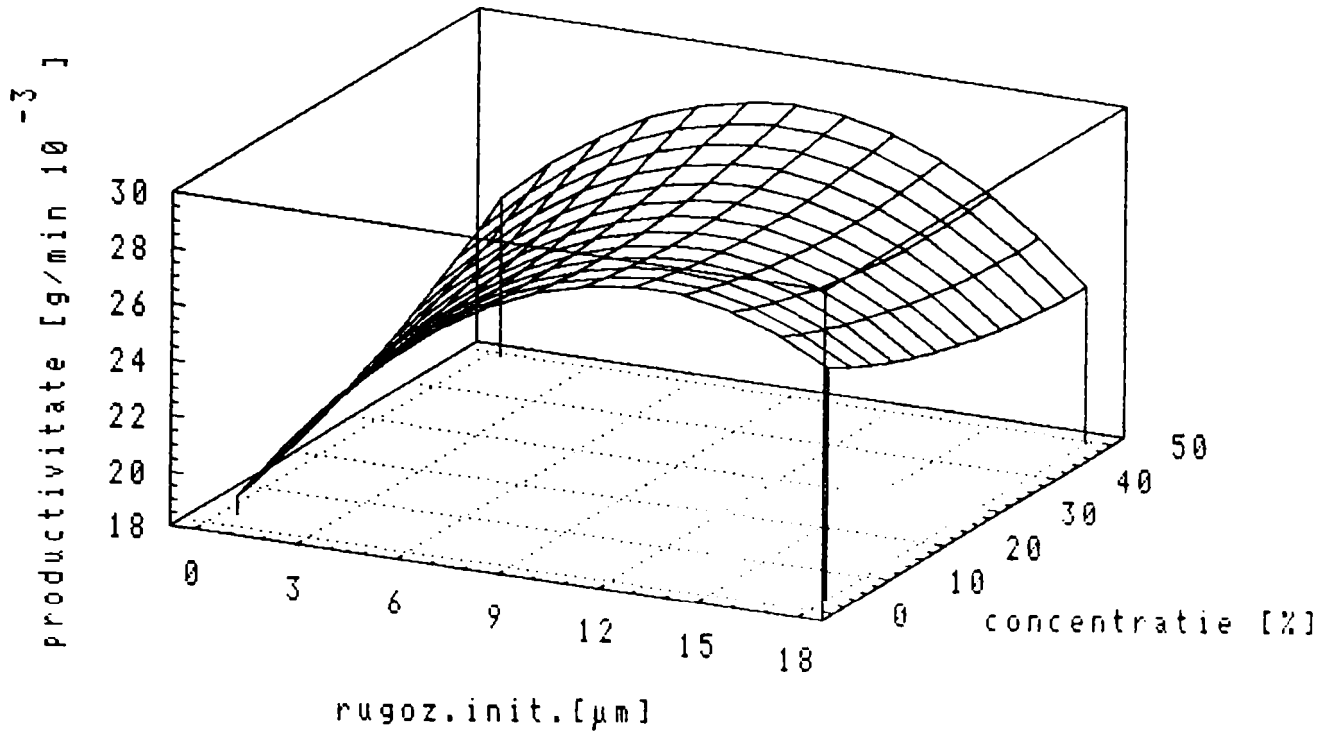


Fig.4.29

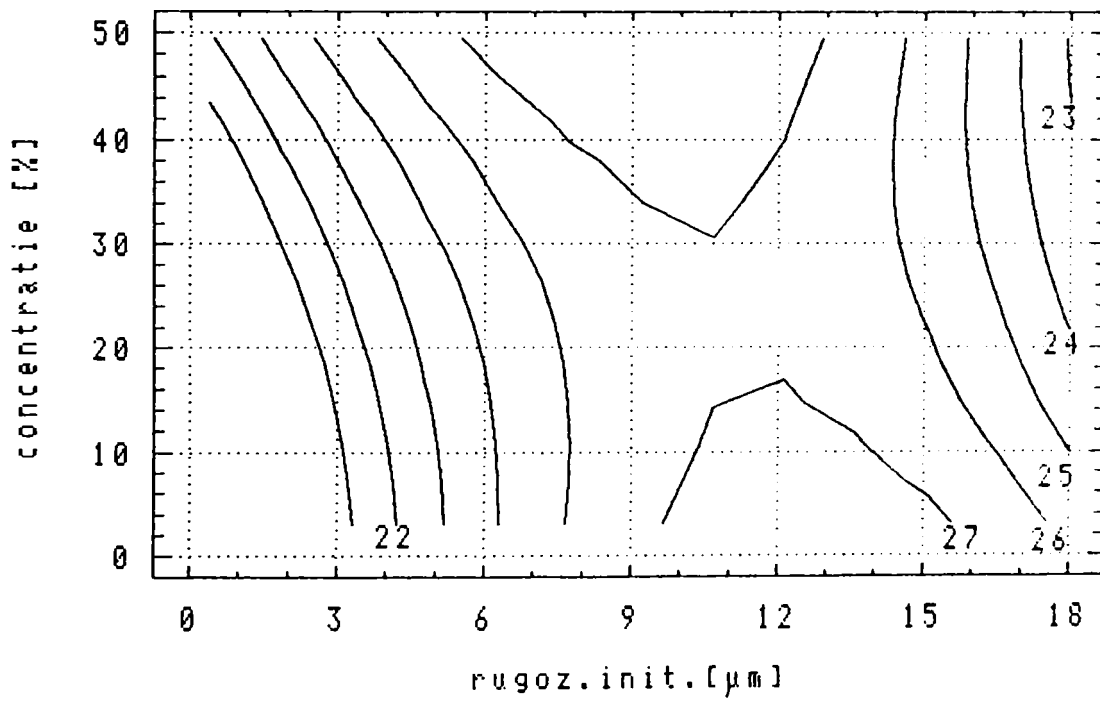


Fig.4.30



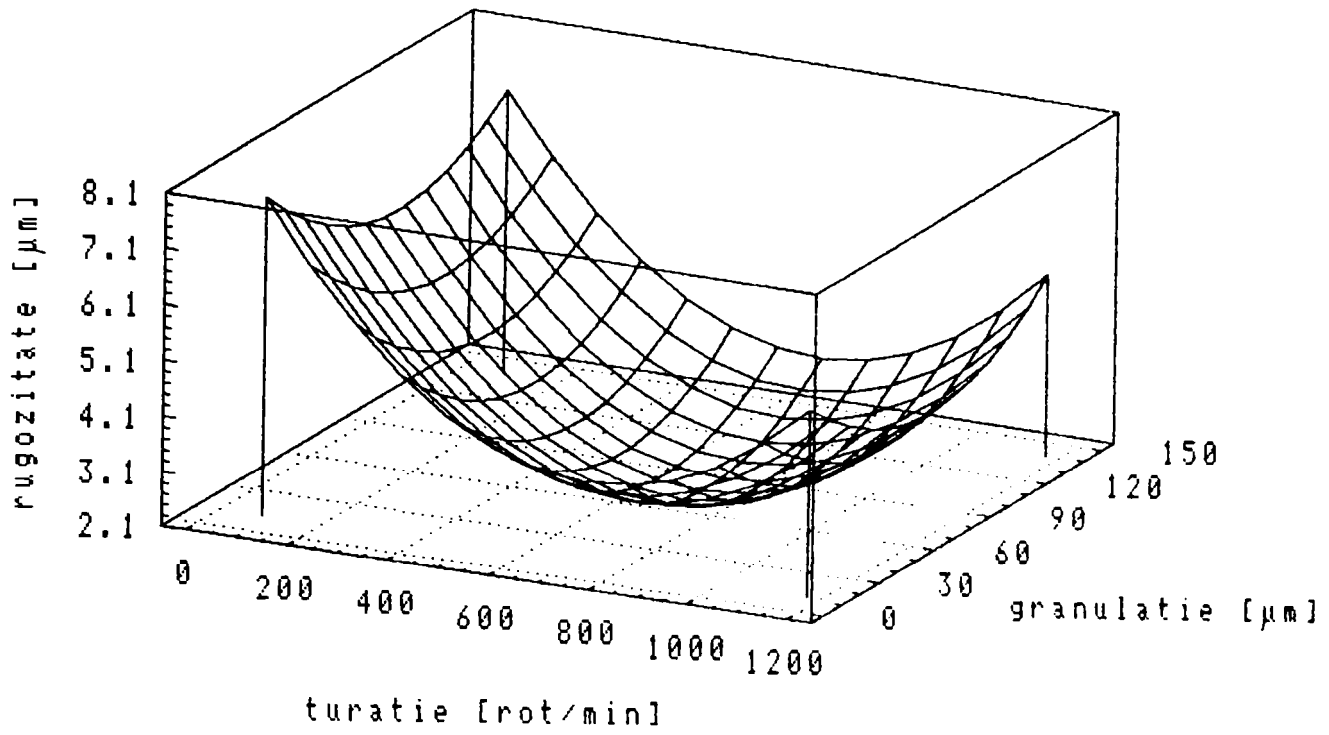


Fig.4.31

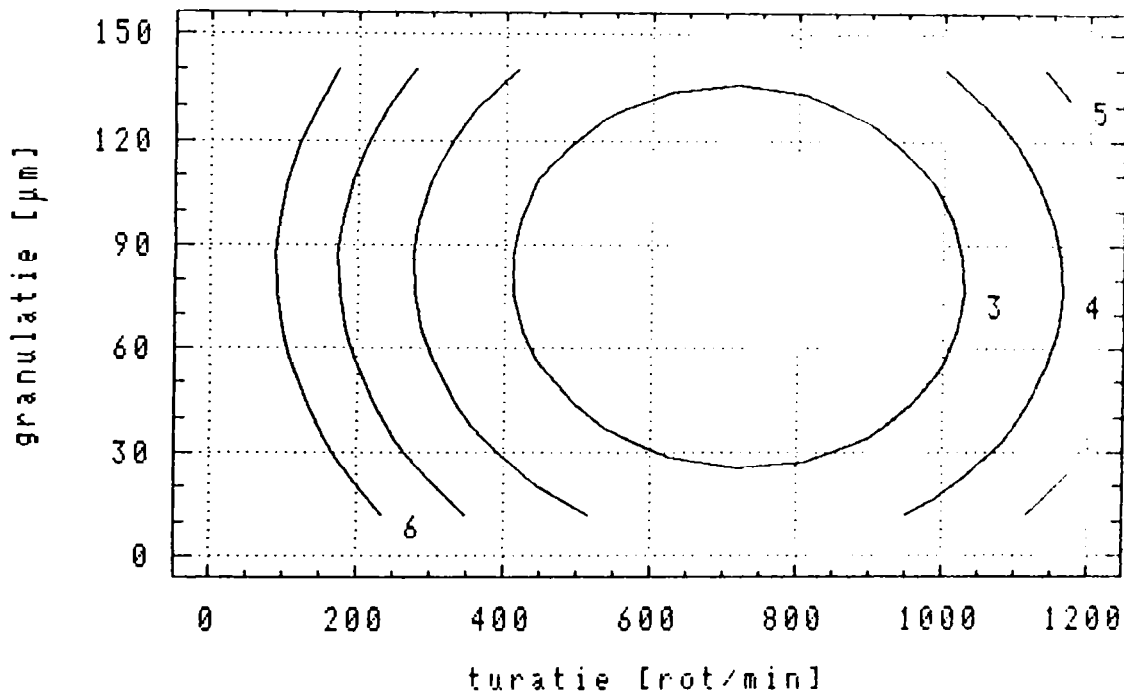


Fig.4.32

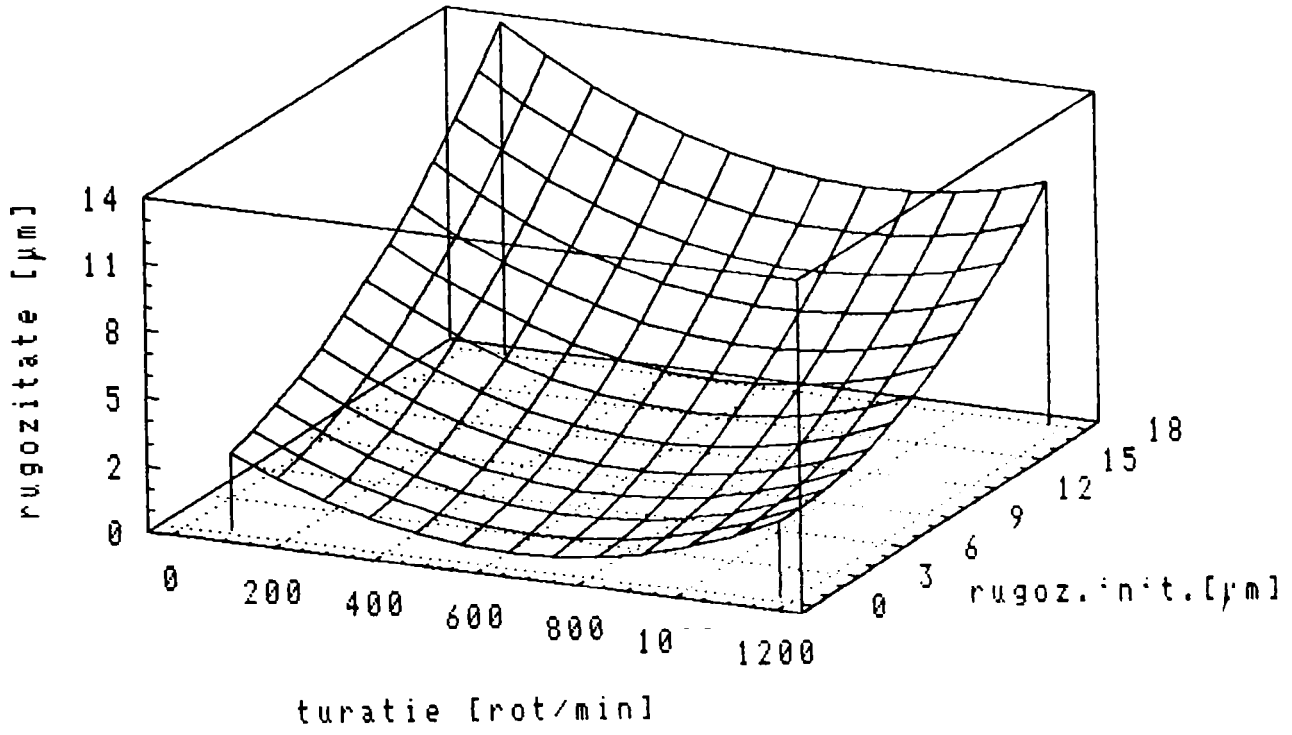


Fig.4.33

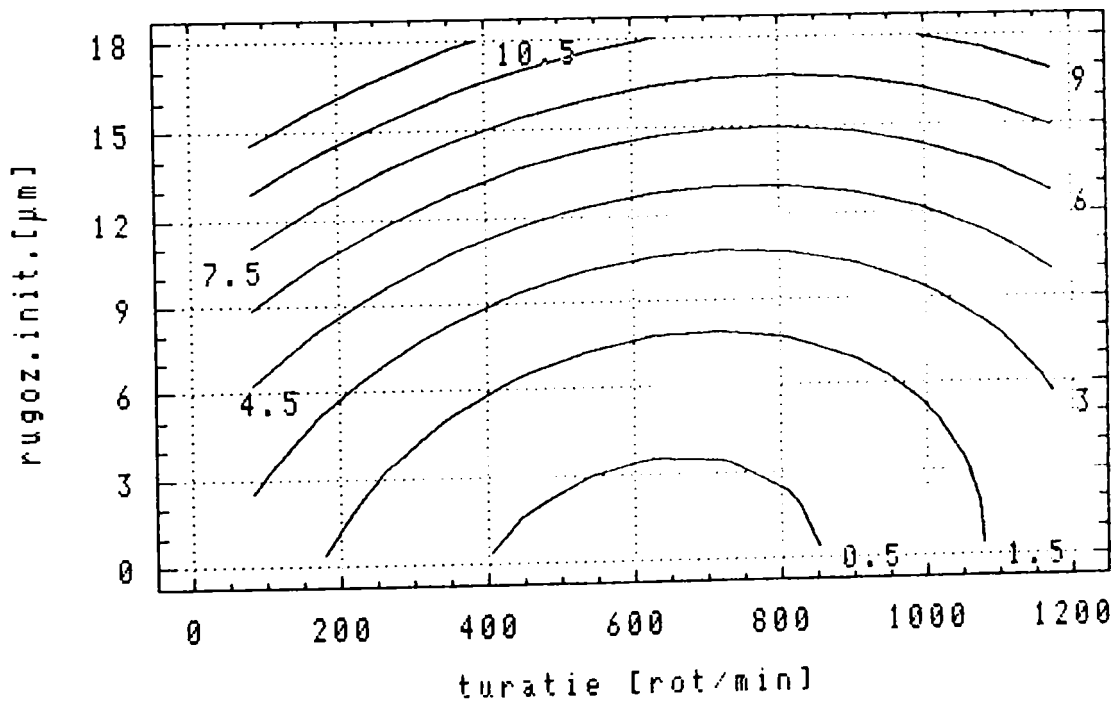


Fig.4.34

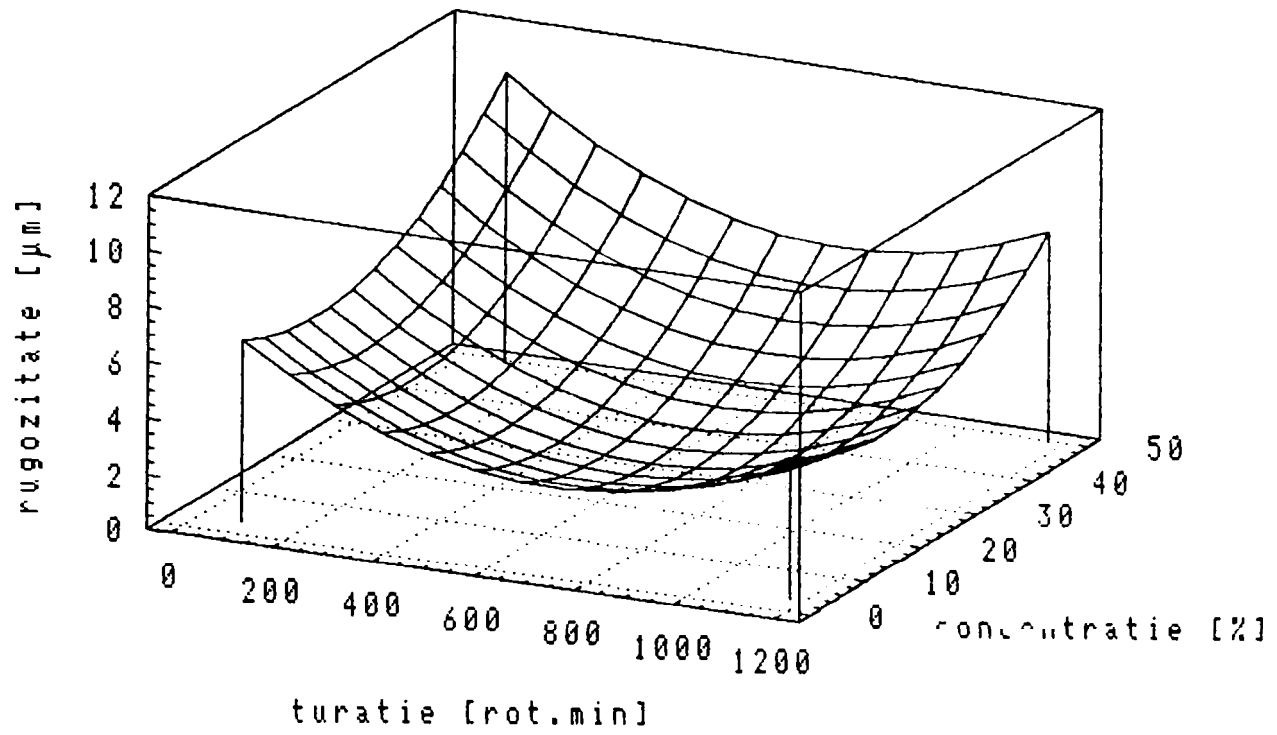


Fig.4.35

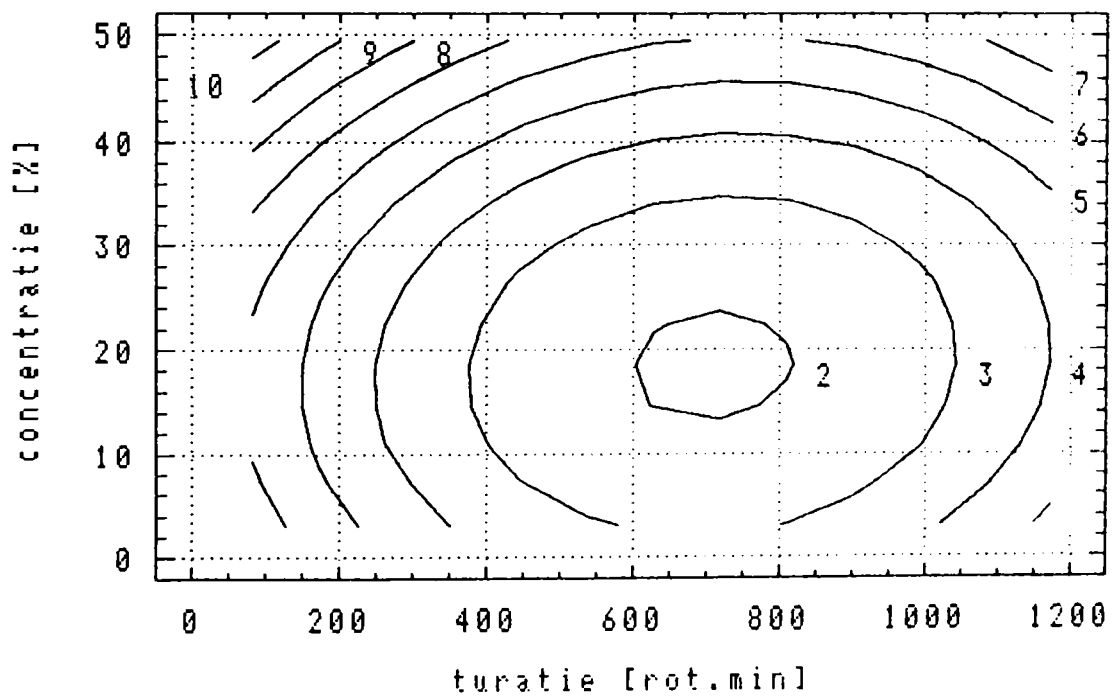


Fig.4.36

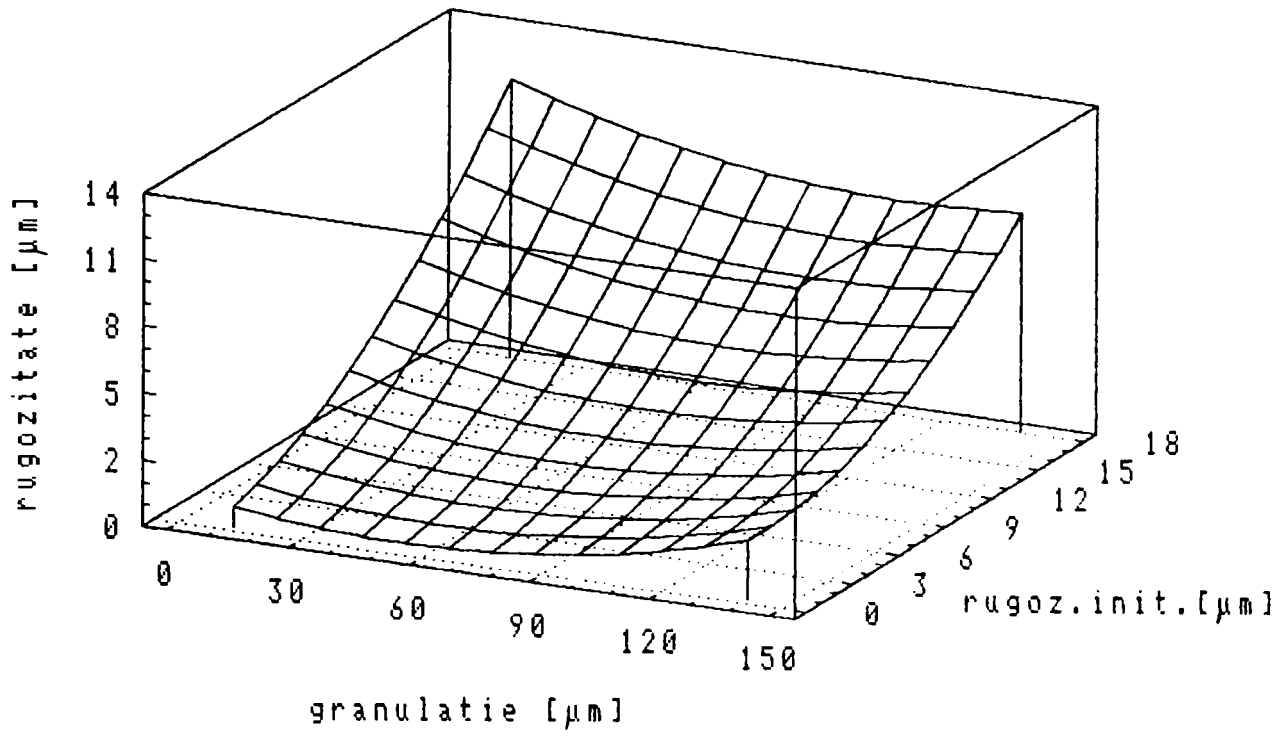


Fig.4.37

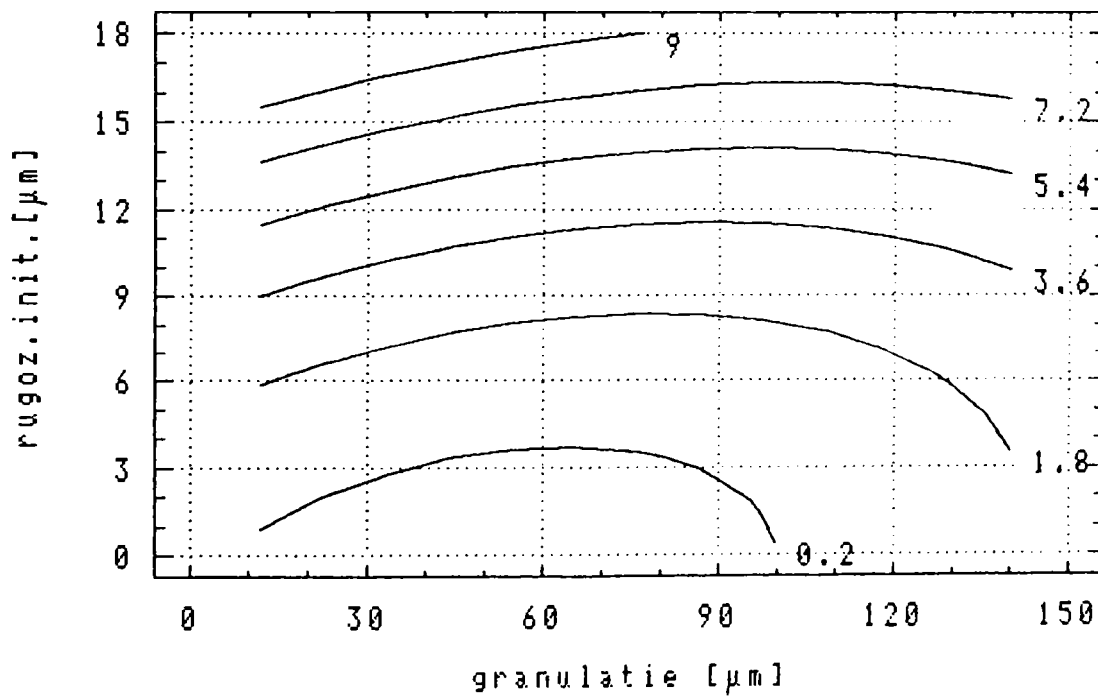


Fig.4.38

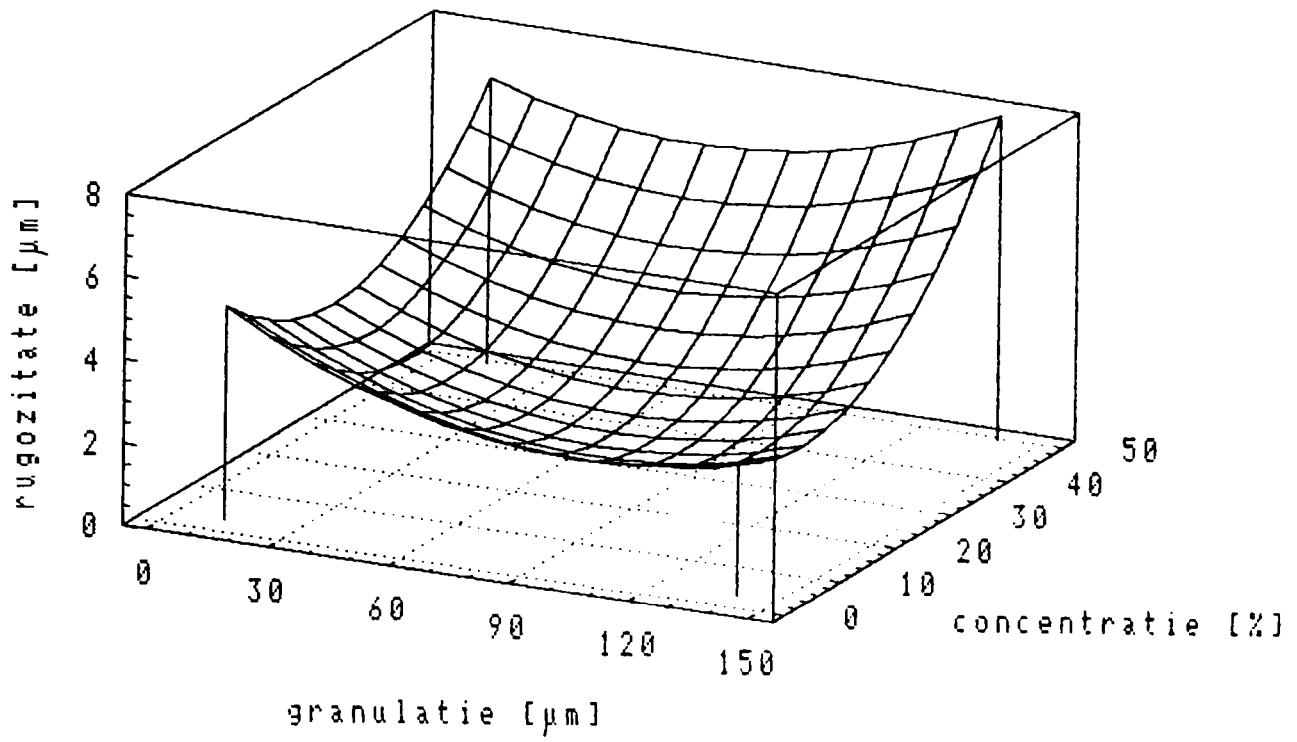


Fig.4.39

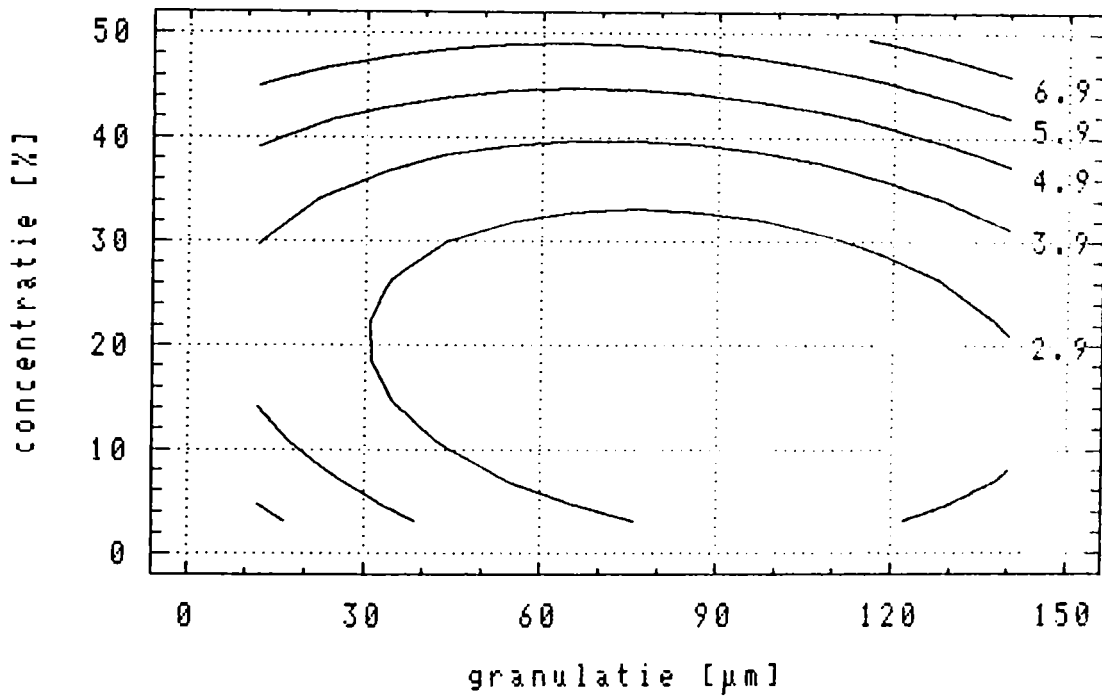


Fig.4.40

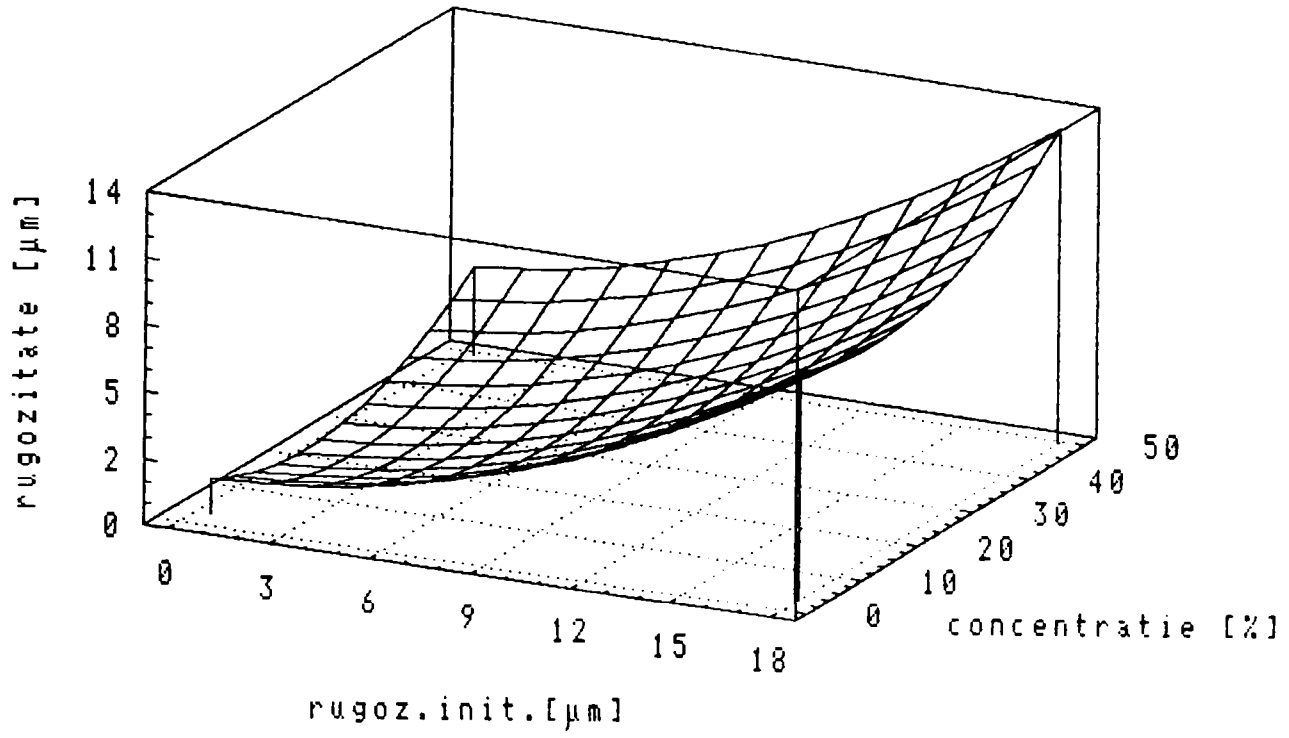


Fig.4.41

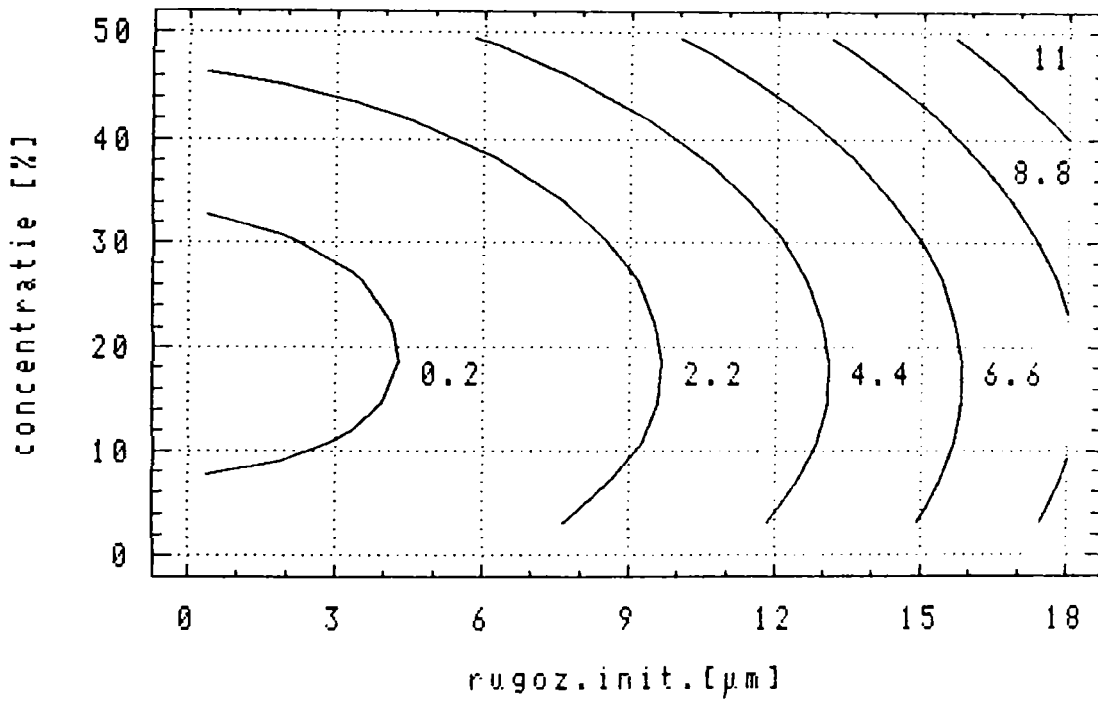


Fig.4.42

### 4.4.3. Concluzii

Din analiza tuturor rezultatelor obținute în urma prelucrării datelor experimentale, pot fi formulate următoarele concluzii privind productivitatea și rugozitatea suprafețelor prelucrate cu MAMR:

- modelele polinomiale de gradul II obținute în urma realizării experimentelor factoriale de ordin doi sunt adecvate estimării suprafețelor de răspuns corespunzătoare domeniului experimental investigat, deci se poate obține cu ajutorul lor o bună estimare a productivității procesului și a rugozității suprafețelor prelucrate;

- de primă importanță privind productivitatea prelucrării sunt: termenii pătratici ai rugozității inițiale și ai granulației, interacțiunea de ordinul doi între rugozitatea inițială și concentrație, granulația și turația, care sunt invers proporționale cu FO  $Y_{S1} \Leftrightarrow Q_p$  precum și rugozitatea inițială cu termenul liniar, care este direct proporțională cu FO  $Y_{S1} \Leftrightarrow Q_p$ ;

- pentru FO  $Y_{S2} \Leftrightarrow R_a$  de primă importanță sunt: termenii pătratici ai celor patru FI, rugozitatea inițială a OP, concentrația MAMR, care sunt în relație de directă proporționalitate cu aceasta, precum și turația și interacțiunea de ordinul doi între granulație și rugozitatea inițială, care sunt invers proporționale cu valorile FO  $Y_{S2} \Leftrightarrow R_a$ ;

- fără semnificație statistică semnificativă, în domeniul investigat, sunt celelalte interacțiuni de ordinul doi între FI precum și termenul liniar al concentrației pentru FO  $Y_{S1} \Leftrightarrow Q_p$  iar pentru FO  $Y_{S2} \Leftrightarrow R_a$  nesemnificative sunt celelalte interacțiuni de ordinul doi între FI precum și termenul liniar al granulației;

- buna concordanță dintre valorile estimate și cele măsurate ale celor două FO (93,5 % și respectiv 92,7 %) face ca modelele experimentale găsite să permită formularea condițiilor necesare și suficiente, ce trebuie să îndeplinite de FI în scopul atingerii obiectivelor de maximizare a FO  $Y_{S1} \Leftrightarrow Q_p$  respectiv de minimizare pentru FO  $Y_{S2} \Leftrightarrow R_a$ .

#### 4.5. Modelarea calității suprafețelor prelucrate cu MAMR cu ajutorul unor parametrii de distribuție ai rugozității

Calitatea suprafețelor prelucrate este considerată o funcție obiectiv generală, de natură tehnologică, care reprezintă o reuniune de funcții elementare, dintre care cea mai importantă este starea geometrică [11], [76], [77], [78]. La rândul său, starea geometrică este caracterizată în principal, de abaterile geometrice de ordinul 3 și 4, care definesc rugozitatea suprafeței.

Având în vedere acestea, precum și capacitatea prelucrării cu MAMR de a genera suprafețe foarte fine, se justifică interesul major pentru studiul calității suprafețelor prelucrate cu MAMR cu ajutorul parametrilor rugozității [52], [62].

Particularitățile proceselor tehnologice de prelucrare cu MAMR, precum și analiza modelelor experimentale anterior prezentate pun în evidență o serie de aspecte cu influențe antitetice dar mai ales aleatoare, ceea ce face ca rugozitatea să fie, sub aspect geometric, de natură aleatoare.

Determinarea parametrilor rugozității precum și a distribuției acestora se realizează pe baza profilogramelor suprafețelor, prin analiza detaliată a graficului rugozității sau cu ajutorul unor profilometre conectate la microprocesoare specializate. Pentru măsurarea valorilor  $FO Y_{S2} \Leftrightarrow R_a$  de la modelarea experimentală, prezentată în paragraful 4.4, s-a utilizat în primă fază un instrument de tip SURTRONIC. Acest instrument, cu traductor piezoelectric, prin prelucrarea semnalelor oferă informații doar despre parametrul  $R_a$ . Informații mult mai complete despre rugozitatea suprafețelor prelucrate s-au obținut prin determinarea rugozității pe un stand pus la dispoziție de laboratorul de Tribologie al catedrei "Organe de mașini și mecanisme" de la Facultatea de Mecanică din Timișoara [33], [56], [57].

##### 4.5.1. Descrierea standului pentru măsurarea rugozității

Schema de principiu a acestui stand se prezintă în figura 4.43. iar imaginea sa de ansamblu figura 4.44.

Elementele principale din componența standului sunt următoarele:

- sistemul de fixare a piesei de măsurat;



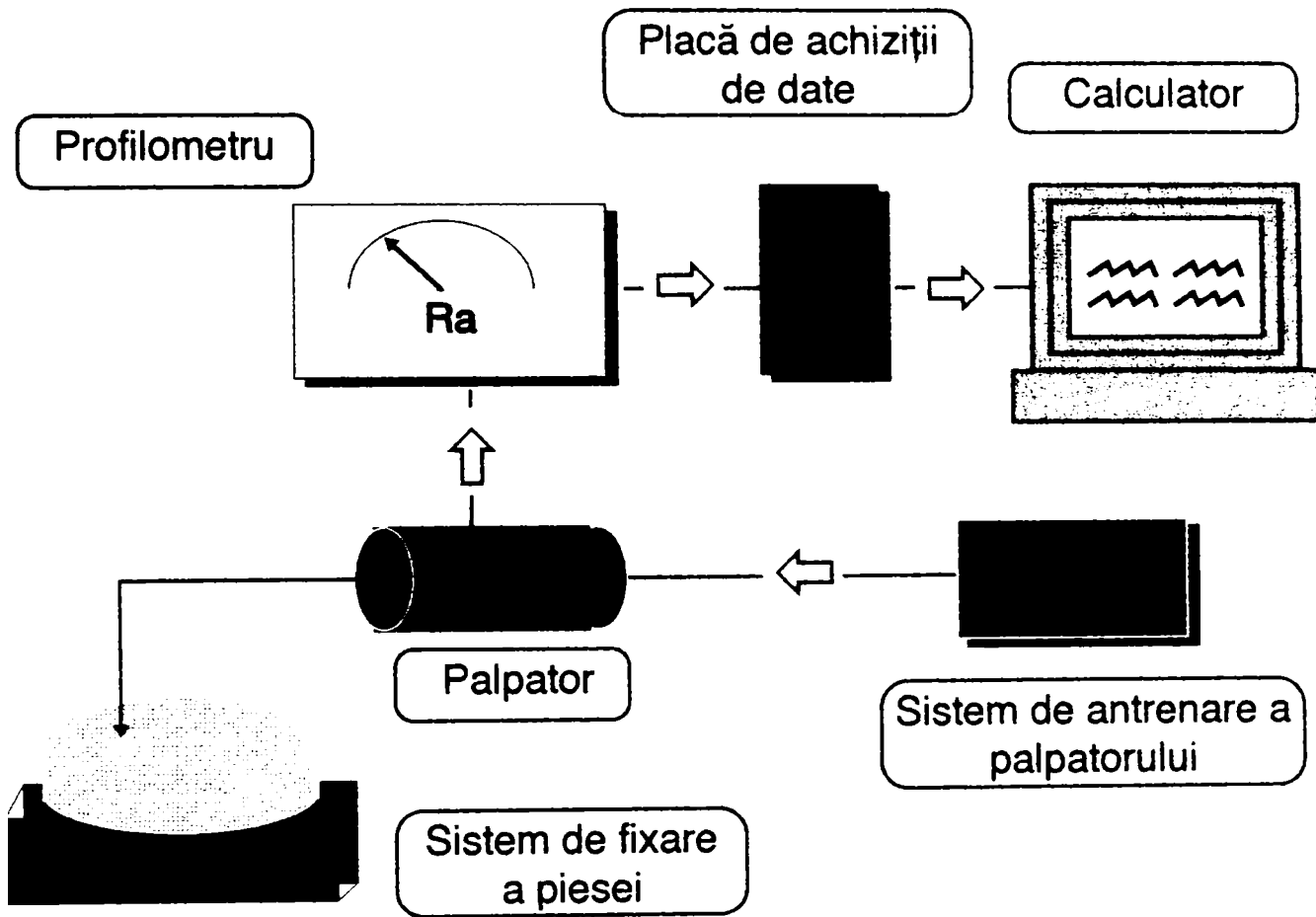


Fig.4.43

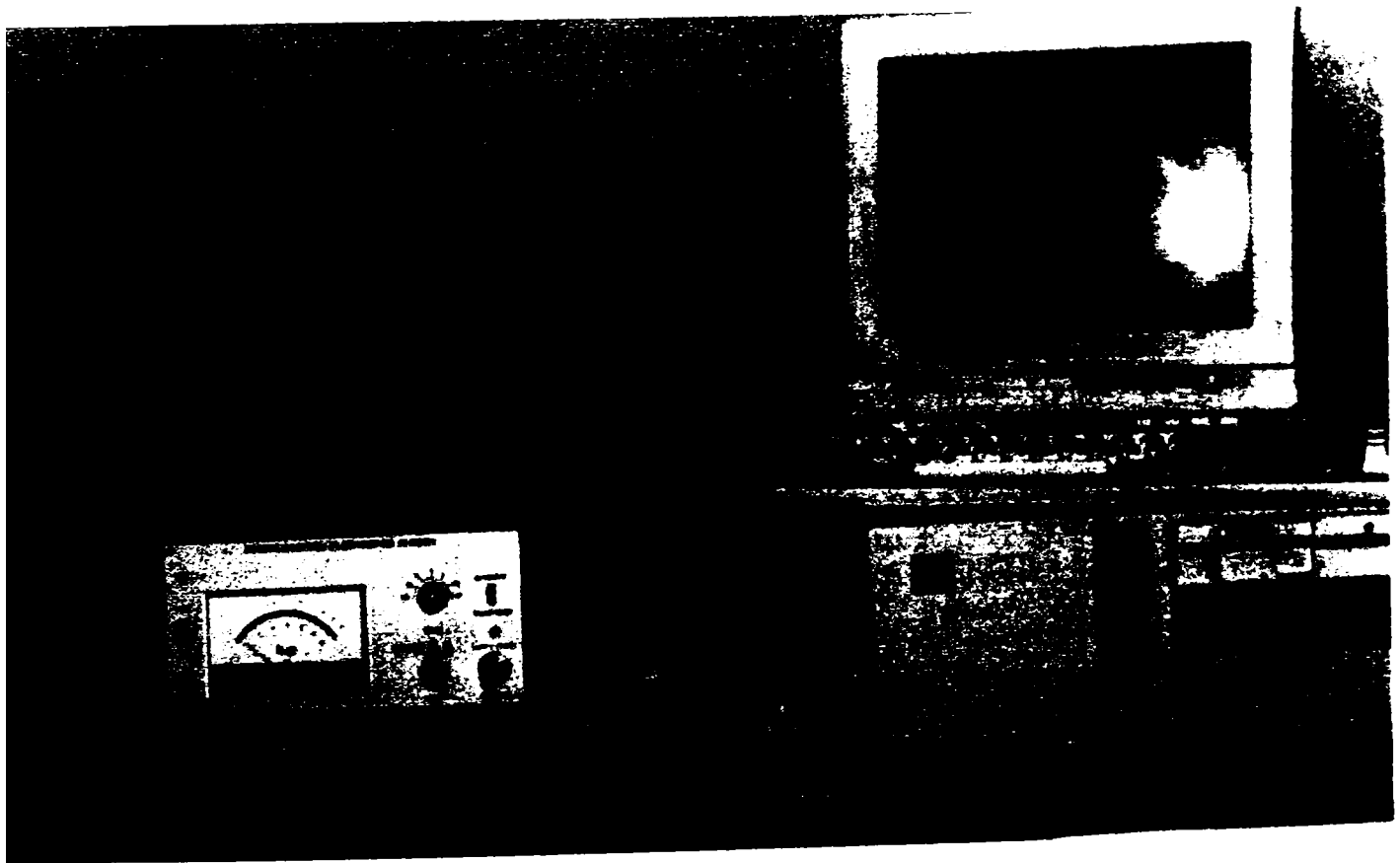


Fig.4.44

- rugozimetru cu palpator - cu traductor piezoelectric; vârful palpatorului este de tip conic, din diamant; palpatorul este montat pe o lamelă elastică pentru a asigura forța de apăsare necesară palpării;

- sistemul de antrenare a palpatorului rugozimetrului, care este format dintr-un motor electric și un reductor de turație ce asigură două trepte de viteză;

- profilometrul care are rolul de a prelucra preliminar semnalul dat de rugozimetru pentru a putea fi preluat de placa de achiziții de date;

- placa de achiziții de date, care are rolul de a prelua datele oferite de profilometru și de a le transforma în semnale numerice;

- calculatorul electronic, cu rolul de a prelua datele oferite de placa de achiziții de date, în scopul prelucrării lor ulterioare.

Această placă este de tipul AM - M10 - 16XE50 și, împreună cu soft-ul din calculator, fac parte dintr-un sistem de achiziții de date și prelucrare a acestora al firmei National Instruments, numit *Virtual Bench* [79]. Din biblioteca de programe a acestui instrument se folosește programul *Virtual Bench - Logger*.

#### 4.5.2. Prelucrarea datelor achiziționate și trasarea profilogramelor

Cu ajutorul standului anterior prezentat, s-a realizat măsurarea și implicit achiziționarea datelor pentru piesele prelucrate cu valorile FI ce constituie punctul central al experimentelor efectuate conform matricii-program, care a fost prezentată în tabelul 4.7.

De menționat faptul, că soft-ul utilizat oferă la ieșire fișiere de tip matrice cu extensie "log" (logger); canalul pe care s-a făcut înregistrarea are ca variabilă independentă o mărime temporală (milisecunde), iar ca variabilă dependentă o tensiune electrică (milivolti). Datele obținute au fost prelucrate în programul *MICROSOFT EXCEL* [13], [34], [36].

Având în vedere acestea, prelucrarea datelor achiziționate s-a realizat în următoarele etape:

- salvarea fișierelor achiziționate cu extensie "log";
- importarea și convertirea acestora în fișiere cu extensie "xls", specifice pentru EXCEL, utilizând opțiunea *Text Import Wizard*;

- păstrarea coloanelor alocate variabilei independente (timp) și a celei dependente (milivolți) și eliminarea tuturor celorlalte coloane adiacente înregistrării;

- determinarea valorii minime pentru variabila dependentă și translatarea față de aceasta, a tuturor celorlalte valori, în domeniul pozitiv;

- determinarea abaterii medii aritmetice a variabilei dependente;

- echivalarea mediei aritmetice obținute pentru fiecare probă în parte, cu media aritmetică a etalonului având  $R_a = 6,1 \mu\text{m}$ ;

- convertirea valorilor (exprimate în milivolți) variabilei dependente în micrometri pentru aprecierea rugozității suprafeței înregistrate;

- convertirea valorilor (exprimate în milisecunde) variabilei independente în unități de lungime a profilului pe care s-a făcut înregistrarea;

- determinarea noii abscise care coincide cu linia medie a profilului;

- trasarea profilogramelor corespunzătoare fiecărei probe.

Pentru cele două piese corespunzătoare punctului central al experimentului (ultimile două linii din tabelul 4.7) se prezintă în figurile 4.45 și 4.46 profilogramele realizate pentru cinci lungimi de bază, iar în figurile 4.47 și 4.48, profilogramele pentru o singură lungime de bază.

#### 4.5.3. Analiza principalilor estimatori de verosimilitate ai rugozității

În practica prelucrării matematice a datelor experimentale privind microgeometria suprafețelor, caracteristicilor aleatoare ale acestora i se asociază o funcție de repartiție [53], [62]. Forma analitică a profilului studiat poate fi pusă în evidență prin funcția densității spectrale, funcția de autocorelație și curba de portanță ABBOTT - FIRESTONE.

Cercetările întreprinse până în prezent [62], consideră că rugozitatea este o variabilă aleatoare cu o lege de repartiție normală (Gauss) pentru cele mai multe procedee tehnologice, cu o lege exponențială și o lege Rayleigh pentru unele procedee speciale. Spre această finalitate se orientează și prezentele cercetări, urmărind identificarea repartiției de probabilitate adecvată suprafețelor prelucrate cu MAMR.

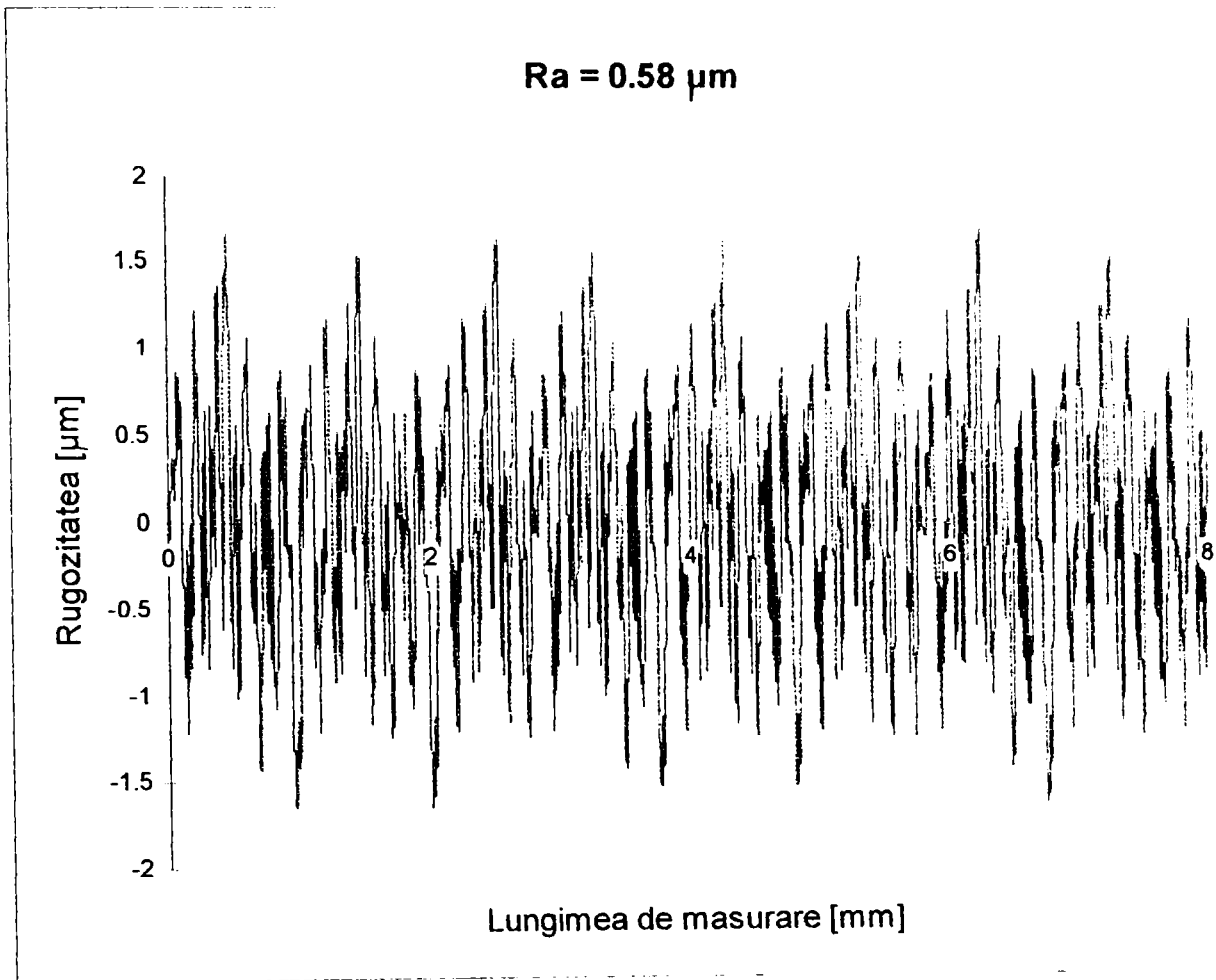


Fig.4.45

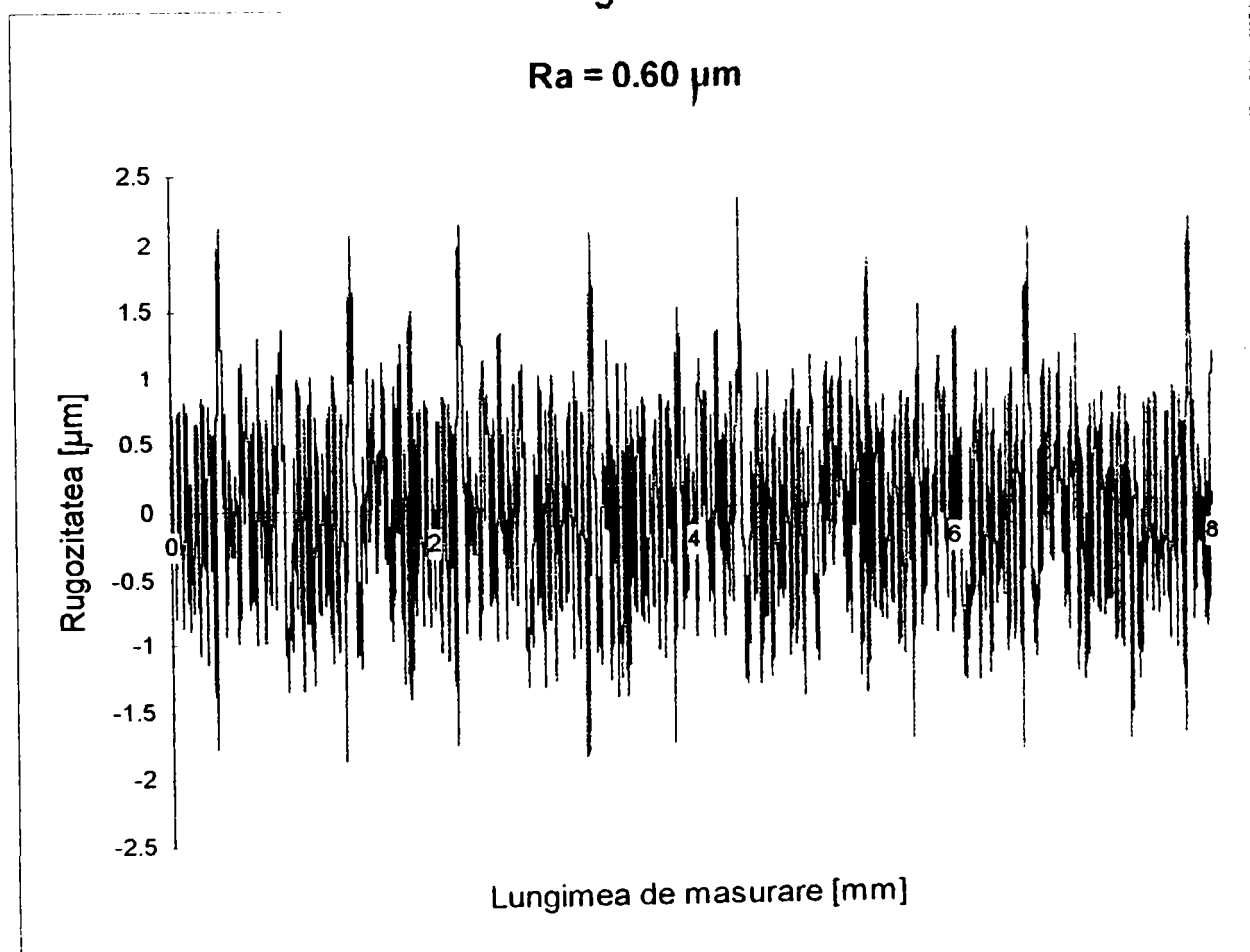


Fig.4.46

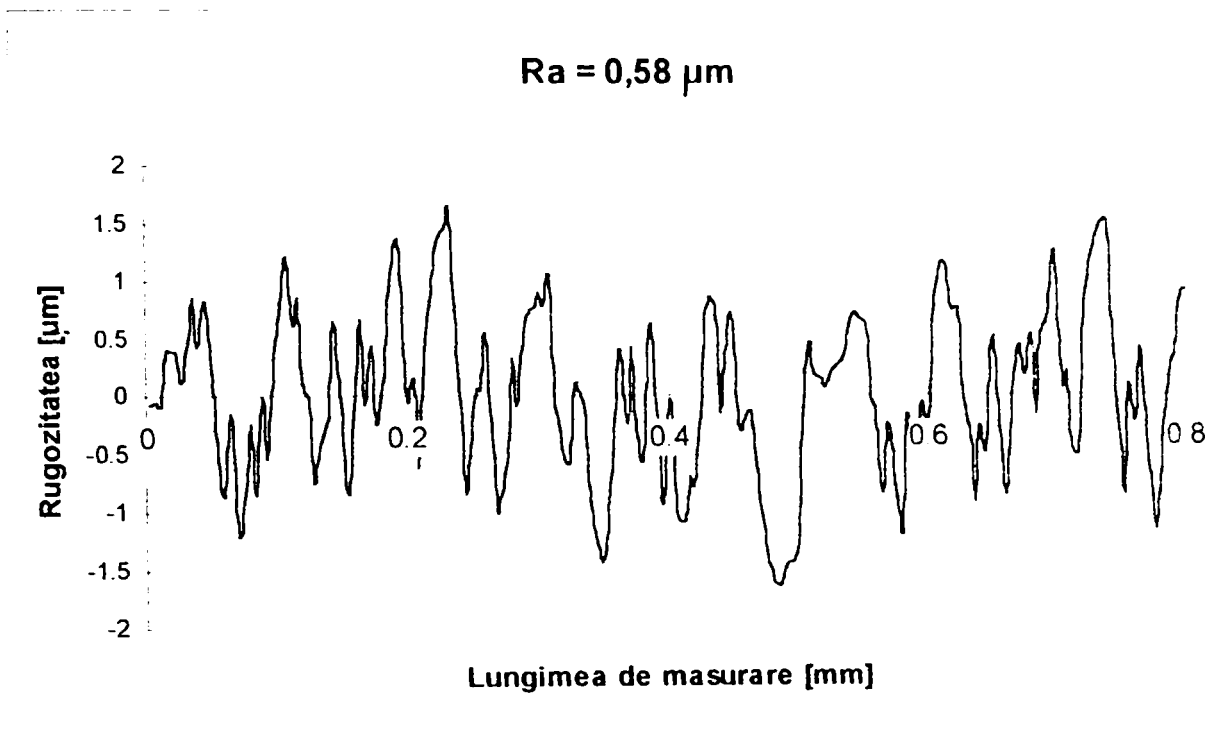


Fig.4.47

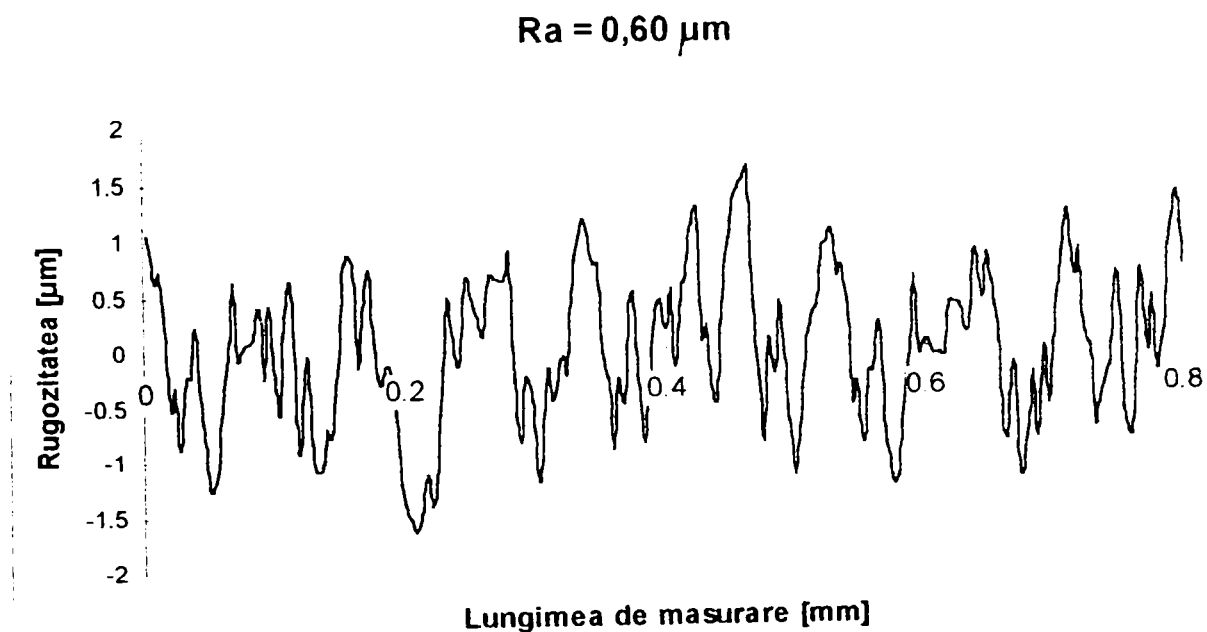


Fig.4.48

Datele achiziționate la măsurarea rugozității și pe baza cărora s-au trasat profilogramele prezentate au constituit date primare pentru definirea funcțiilor densității spectrale, a funcțiilor de autocorelație și a curbelor de

portanță ABBOTT - FIRESTONE. Prelucrarea rezultatelor a fost mult facilitată de utilizarea unor programe de calculator extrem de performante, printre care se numără și programul *STATGRAPHICS* [75].

Fișierele cu extensie "xls" au fost convertite în fișiere tip "Text Tab Delimited", pe care programul *STAGRAPHICS* le recunoaște și le poate importa. Pentru cele două probe analizate, cu ajutorul procedurilor "Distribution Fitting" din familia funcțiilor de distribuție și "Autocorrelation Function" din analiza temporală au fost realizate histogramele frecvențelor (fig.4.49 și 4.50) și funcțiile de autocorelație (fig.4.51 și 4.52).

Verificarea normalității repartiției datelor s-a efectuat cu ajutorul procedurii "Summary Statistics" din familia metodelor descriptive a aceluiași program, precum și prin aplicarea testului  $\chi^2$ . În tabelul 4.10 se prezintă valorile parametrilor statistici ce caracterizează distribuția rugozității celor două probe analizate.

Utilizând programul *EXCEL*, pe baza datelor achiziționate de sistemul de măsurare a rugozității au fost trasate curbele de portanță pentru fiecare din cele două piese analizate (fig.4.53 și 4.54) înainte și după prelucrare, iar în figura 4.55 se prezintă comparativ, curbele finale cu cea inițială.

Verificarea normalității distribuției rugozității

Tabelul 4.10

Parametrul	Proba 1 ( $R_a=0,58 \mu\text{m}$ )	Proba 2 ( $R_a=0,60 \mu\text{m}$ )
- coeficientul de asimetrie	- 0,074	0,01
- coeficientul de exces	- 0,498	- 0,299
- media aritmetică	0,022	0,024
- mediana	0	0
- deviația standard	0,684	0,706
- dispersia empirică	0,468	0,498
$\chi^2_{\text{calc}}$	60,83/ 11 grade de libertate	51,7/ 9 grade de libertate

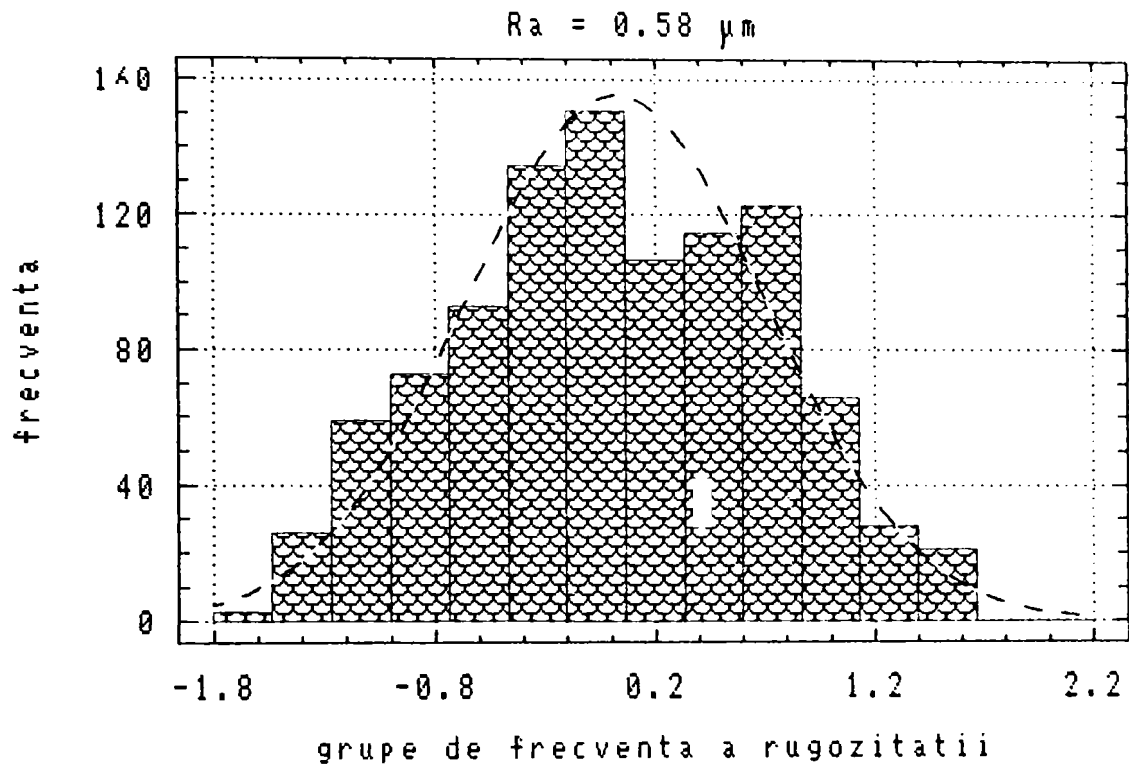


Fig.4.49

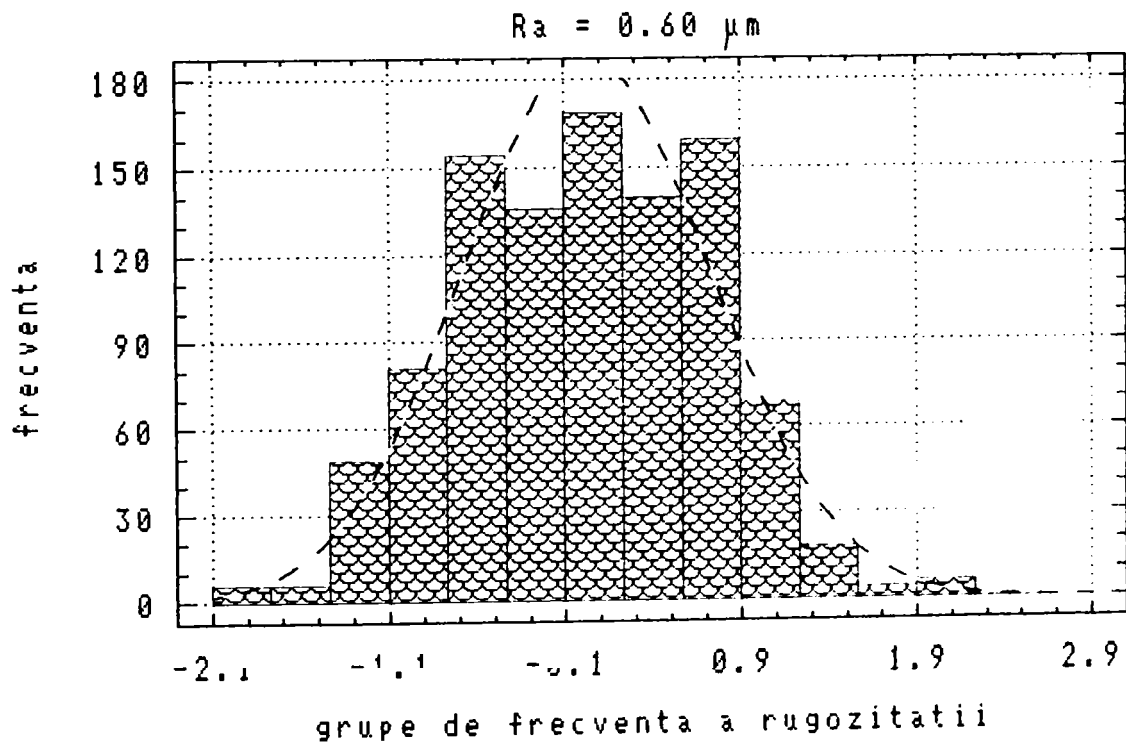


Fig.4.50

$Ra = 0.58$

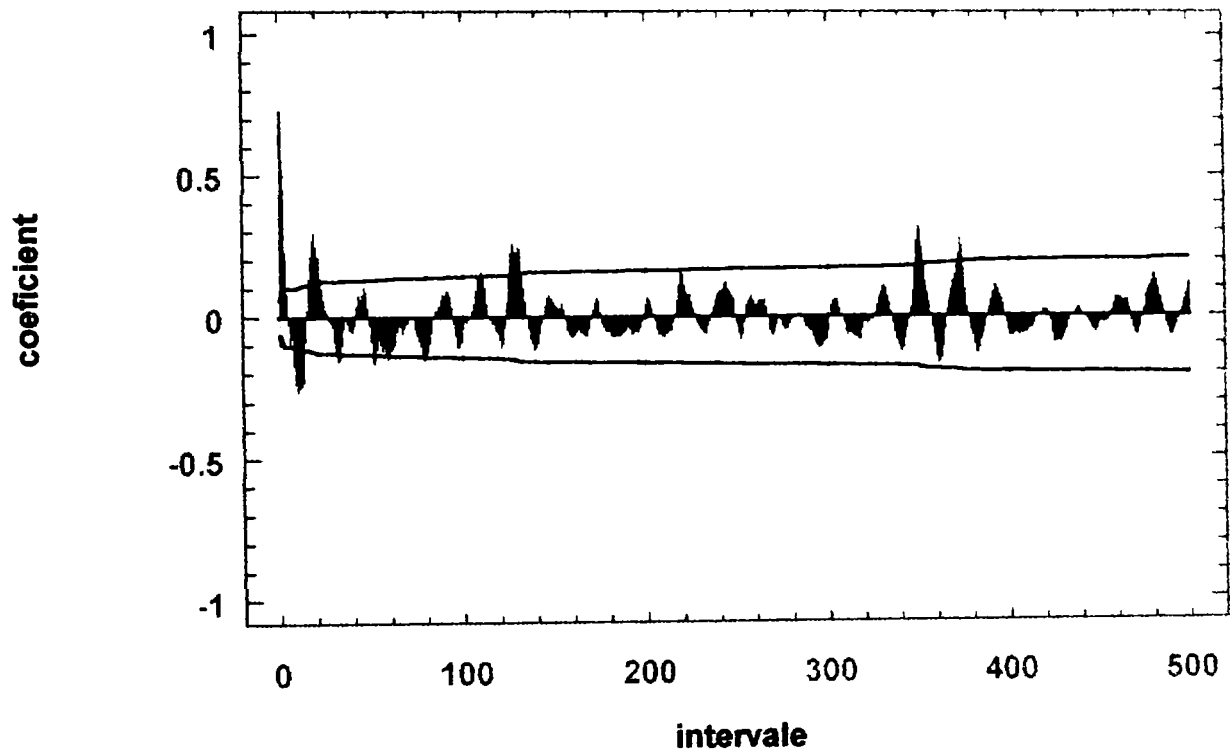


Fig.4.51

$Ra = 0.60$

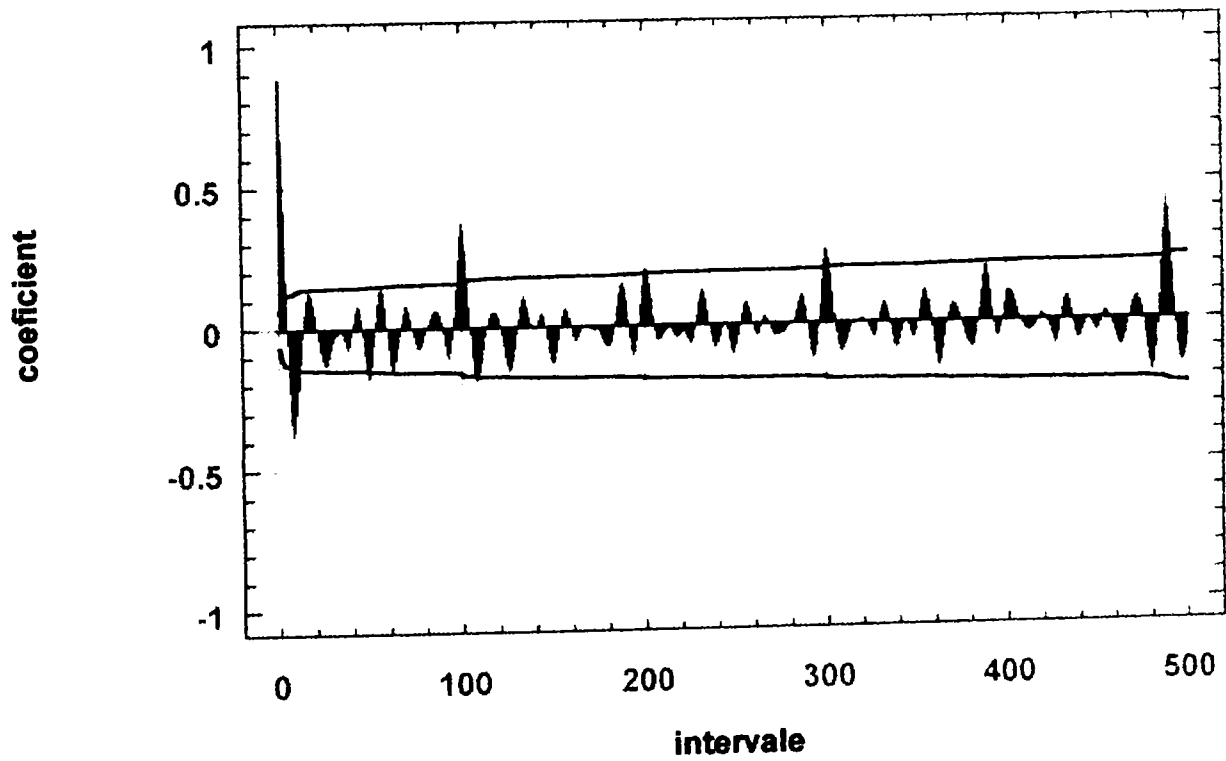


Fig.4.52



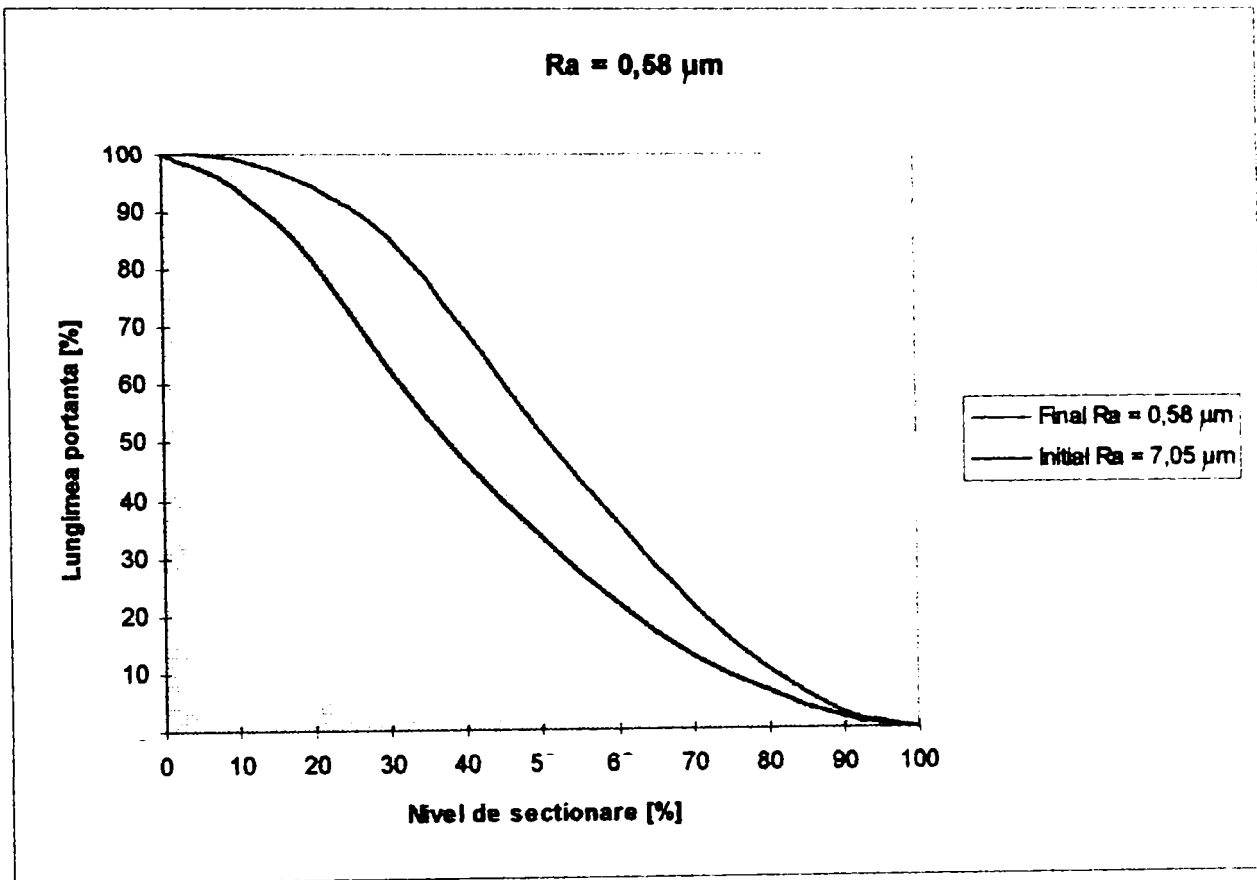


Fig.4.53

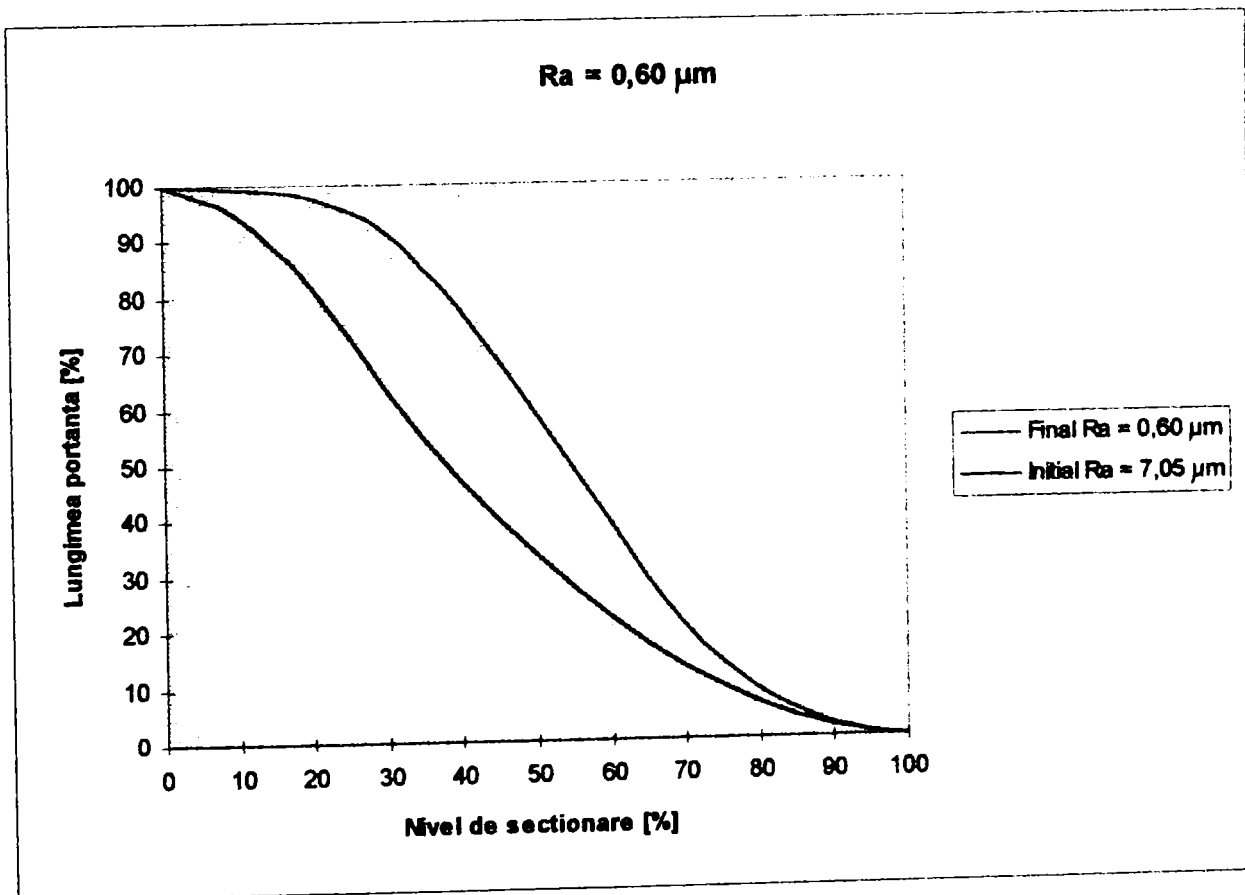


Fig.4.54

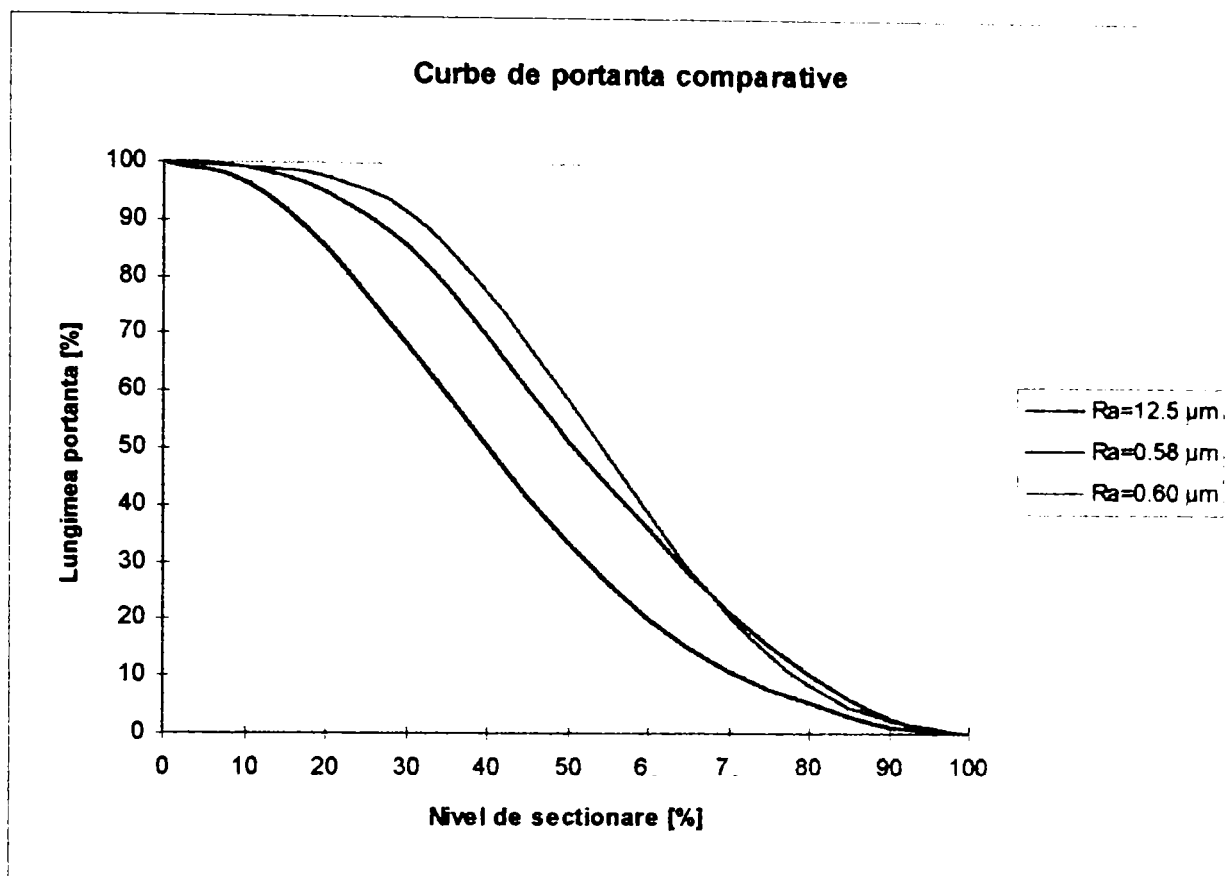


Fig.4.55

Din analiza acestor curbe, se observă creșterea lungimii portante a profilului suprafeței prelucrate cu MAMR (aria suprafeței inferioare delimitată de curba finală este mai mare decât cea delimitată de curba inițială).

De asemenea, se constată că pe măsură ce scade rugozitatea finală, are loc o distribuție mai uniformă a creșterii lungimii portante a profilului în raport cu nivelele de secționare.

#### 4.5.4. Concluzii

Prelucrarea datelor achiziționate la măsurarea rugozității permite formularea următoarelor concluzii:

- analiza densității de repartiție pentru rugozitatea suprafețelor obținute la prelucrarea cu MAMR are o formă ce tinde spre distribuția normală Gauss (vezi fig.4.47 și 4.48); acest lucru este susținut și de valorile coeficienților de exces ușor negative, ne semnificative, precum și de coeficienții de asimetrie ne semnificativi (vezi tab.4.9). Toate acestea demonstrează faptul că vectorul aleator rugozitate satisface condițiile teoremei limită centrale din teoria statistică-matematică. În plus, tendința spre distribuția normală Gauss

plasează prelucrarea cu MAMR în familia procedeele tehnologice de prelucrare prin aşchiere [62];

- coeficienții de autocorelație sunt inferiori intervalului de încredere delimitat de dublul erorii standard, ceea ce arată faptul că nu există nici o tendință sistematică a procesului, inclusiv de periodicitate și ca atare rugozitatea este guvernată exclusiv de fenomene aleatoare. Lipsa oricărei tendințe a procesului probează stabilitatea în timp a acestuia, omogenitatea și izotropia suprafețelor rezultate prin prelucrare;

- echipamentul utilizat și soft-urile aplicate au permis determinarea estimatorului de verosimilitate maximă a rugozității, care este curba de portanță [33], [57], [62]; alura acestor curbe cu tendința asimptotică spre drepte ce limitează profilul și existența unui singur punct de inflexiune indică similitudinea acestor curbe ce cea ideală (Abbott-Firestone).

Toate aceste concluzii permit atribuirea caracteristicilor de stabilitate a proceselor de prelucrare cu MAMR, iar suprafețelor obținute, izotropie și omogenitate.

#### 4.6. Posibilități de optimizare a prelucrărilor cu MAMR

Analiza făcută în cadrul prelucrării datelor experimentale privind modelarea capacității abrazive a MAMR permite formularea următoarelor concluzii privind posibilitățile de optimizare a acestei FO:

- ◆ precizia ridicată a estimației pentru FO  $Y_{M1} \Leftrightarrow p$  (95,5 %), permite utilizarea modelului experimental găsit la identificarea valorilor FI care în domeniul explorat, funcție de criteriul precizat, optimizează FO;

- ◆ criteriul de optimalitate a FO  $Y_{M1} \Leftrightarrow p$  este acela de maximizare a valorilor acesteia, respectiv capacitatea abrazivă a MAMR este cu atât mai ridicată cu cât presiunea pe care o exercită pe suprafața OP este mai mare;

- ◆ identificarea zonelor de optim ale FO  $Y_{M1} \Leftrightarrow p$  se poate face fie apelând la relația polinomială găsită (studiul extremelor cu ajutorul derivatei de ordinul I), fie, mai ușor, prin referire la suprafețele de răspuns reprezentate în figurile 4.9 ... 4.14;

◆ din analiza histogramei efectelor (fig.4.7) și a suprafețelor de răspuns, rezultă că FO  $Y_{M1} \Leftrightarrow p$  depinde semnificativ de FI  $X_{F2} \Leftrightarrow g_a$  [ $\mu\text{m}$ ] granulația abrazivului și  $X_{F3} \Leftrightarrow C$  [%] concentrația MAMR, precum și de interacțiunea acestor două mărimi;

◆ capacitatea abrazivă a MAMR poate fi dirijată spre valori care să corespundă unor performanțe superioare ale proceselor de prelucrare, utilizându-se (în ordinea importanței) creșterea granulației și după aceea creșterea concentrației;

◆ identificarea unui punct de extrem (de tip maximal) a FO  $Y_{M1} \Leftrightarrow p$  în raport cu cei doi FI semnificativi și similitudinea suprafețelor de răspuns corespunzătoare cu cele din modelarea analitică justifică, pe de o parte, corectitudinea ipotezelor adoptate la modelarea analitică, iar pe de altă parte, atestă faptul că obiectivele modelării experimentale a capacității abrazive a MAMR au fost atinse;

◆ existența acestui punct de extrem justifică introducerea coeficientului geometric  $C_g$  (vezi 3.3.3) care exprimă variația elementelor geometrice așchietoare în raport cu dimensiunea materialului abraziv.

Analiza făcută în cadrul prelucrării datelor experimentale privind modelarea productivității și a rugozității suprafețelor prelucrate cu MAMR permite formularea următoarelor concluzii privind posibilitățile de optimizare a acestor două FO:

◆ preciziile ridicate ale estimațiilor pentru FO  $Y_{S1} \Leftrightarrow Q_p$  și  $Y_{S2} \Leftrightarrow R_a$  (93,5 % și respectiv 92,7 %), permit utilizarea modelelor experimentale găsite la identificarea valorilor FI care în domeniul explorat, funcție de criteriul precizat, optimizează cele două FO;

◆ criteriul de optimalitate a FO  $Y_{S1} \Leftrightarrow Q_p$  este acela de maximizare a valorilor acesteia, în timp ce pentru  $Y_{S2} \Leftrightarrow R_a$  este acela de minimizare a valorilor acesteia din urmă;

◆ identificarea zonelor de optim ale acestor două FO se poate face fie apelând la relațiile polinomiale găsite (studiul extremelor cu ajutorul derivatei de ordinul I), fie, mai ușor, prin referire la suprafețele de răspuns reprezentate în figurile fig.4.19 ... 4.42;

◆ din analiza histogramelor efectelor (fig.4.14 și 4.16) și a suprafețelor de răspuns, rezultă că FO  $Y_{S1} \Leftrightarrow Q_p$  depinde semnificativ de FI  $X_{F3} \Leftrightarrow R_{ai}$  [ $\mu\text{m}$ ] - rugozitatea inițială a suprafeței, de  $X_{F2} \Leftrightarrow g_a$  [ $\mu\text{m}$ ] - granulația abrazivului și de  $X_{F1} \Leftrightarrow n$  [rot/min] - turația piesei, iar FO  $Y_{S2} \Leftrightarrow R_a$  depinde semnificativ de FI  $X_{F3} \Leftrightarrow R_{ai}$  [ $\mu\text{m}$ ] - rugozitatea inițială a suprafeței ce se prelucrează, de  $X_{F4} \Leftrightarrow C$  [%] - concentrația MAMR și de  $X_{F1} \Leftrightarrow n$  [rot/min] - turația piesei;

◆ performanțele superioare ale procedeelor de prelucrare cu MAMR sunt determinate de productivități maxime și rugozități finale mici pentru suprafețele prelucrate;

◆ studiul parametrilor de distribuție a rugozității efectuat la modelarea calității suprafețelor (vezi 4.5) permite atribuirea caracteristicilor de stabilitate a acestor procese tehnologice iar suprafețelor obținute, izotropie și omogenitate.

Făcând referire la toate suprafețele de răspuns, pentru cele trei FO analizate ( $p$  - presiunea MAMR,  $Q_p$  - productivitatea prelucrării și  $R_a$  - rugozitatea suprafeței obținute), s-au identificat următoarele domenii de extrem optimal:

- pentru presiunea MAMR  $p = 22 \dots 25 \cdot 10^{-2}$  MPa, valorile FI fiind situate în următoarele domenii
  - turația  $n = 550 \dots 1100$  rot/min.
  - granulația abrazivului  $g_a = 60 \dots 100$   $\mu\text{m}$
  - concentrația  $C = 35 \dots 38$  %;
- pentru productivitatea prelucrării  $Q_p = 25 \dots 27 \cdot 10^{-3}$  g/min., valorile FI fiind situate în următoarele domenii
  - turația  $n = 600 \dots 800$  rot/min.
  - granulația abrazivului  $g_a = 60 \dots 100$   $\mu\text{m}$
  - rugozitatea inițială  $R_{ai} = 6,3 \dots 12,5$   $\mu\text{m}$
  - concentrația  $C = 32 \dots 38$  %;
- pentru rugozitatea suprafeței prelucrate  $R_a = 1,6 \dots 3,2$   $\mu\text{m}$ , valorile FI fiind situate în următoarele domenii
  - turația  $n = 650 \dots 850$  rot/min.

- granulația abrazivului  $g_a = 60 \dots 90 \mu\text{m}$
- rugozitatea inițială  $R_{ai} = 6,3 \dots 12,5 \mu\text{m}$
- concentrația  $C = 12 \dots 35 \%$ .

Față de valorile FO recomandate de sursele bibliografice [8], [11], [19], [21], [64], [65], [71], tendințele de evoluție a valorilor FO obținute în modelarea experimentală se caracterizează astfel:

- presiunea MAMR ( $p$ ) concordă bine ca valori cu cele din literatura de specialitate;

- productivitatea prelucrării  $Q_p$  este sensibil mai mare comparativ cu valorile din literatura de specialitate;

- rugozitatea suprafețelor obținute  $R_a$  este relativ mai mare comparativ cu aceleași surse citate.

Aceste tendințe de evoluție sunt determinate și de diferențierile relative între FI și condițiile inițiale (cele din prezentele cercetări și cele din sursele bibliografice menționate).

Având în vedere acestea, rezultatele obținute în modelarea experimentală a FO ale prelucrării cu MAMR pot fi apreciate ca satisfăcătoare, ele putând fi considerate ca elemente inițiale pentru cercetări ulterioare în domeniu.

# CAPITOLUL 5

## CONCLUZII GENERALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

### 5.1. Concluzii generale

Analiza de ansamblu a tezei de doctorat elaborată, arată că principalele obiective ale acesteia și anume:

- evidențierea stadiului actual și a tendințelor de evoluție ale procedeelelor și proceselor de prelucrare cu MAMR,

- determinarea unui model generalizat pentru sistemele de prelucrare cu MAMR, model capabil să integreze multitudinea de variante individuale întâlnite în literatura de specialitate,

- elaborarea unor modele matematice analitice pentru capacitatea abrazivă a MAMR precum și pentru principalele FO ale procesului: productivitatea prelucrării  $Q_p$  și rugozitatea suprafețelor prelucrate  $R_a$ ,

- modelarea experimentală a capacității abrazive a MAMR  $p$ , a productivității prelucrării  $Q_p$  și a rugozității suprafeței prelucrate  $R_a$ , în scopul evidențierii valorilor factorilor de influență pentru care acțiunea tehnologică prezintă interes și care totodată, asigură atingerea domeniilor de optim pentru funcțiile obiectiv respective, au fost îndeplinite.

Principalele preocupări și tendințe actuale în domeniul conținutului tezei de doctorat sunt următoarele:

- abordarea sistemică a interacțiunilor ce au loc în spațiul de lucru cu scopul definirii cât mai complete a fenomenelor din interiorul acestor procese;

- extinderea modelelor matematice și dezvoltarea de noi modele analitice care înlocuiesc pe cele empirice existente în momentul de față;

- creșterea interesului pentru aceste tehnologii prin evidențierea performanțelor pe care le conferă și găsirea unor potențiali beneficiari care să le implementeze la scară industrială.

Domeniul de aplicare optimă a prelucrării cu MAMR este acela de finisare a suprafețelor pieselor realizate din materiale neferoase, care prin utilizarea corpurilor abrazive clasice determină îmbăcsirea acestora. De asemenea, ținând seamă de adaptibilitatea MAMR la suprafața OP, se recomandă utilizarea acestor tehnologii la prelucrarea suprafețelor cu configurație oarecare, neriglate, greu accesibile prin procedeele clasice.

## 5.2. Contribuții originale

În urma parcurgerii prezentei teze de doctorat, se pot remarca următoarele contribuții originale ale autorului, atât în domeniul cercetării fundamentale, cât și în domeniul cercetării experimentale.

### 5.2.1. Contribuții în domeniul cercetării teoretice

✎ studierea principalelor fenomene de interacțiune particulă abrazivă - substanță care se produc în spațiul de lucru;

✎ elaborarea unui model generalizat al sistemelor tehnologice de prelucrare cu MAMR, pe baza variantelor și detaliilor individuale relevate de stadiul actual al acestor prelucrări, urmată de analiza structurii morfologice și funcționale a acestuia;

✎ identificarea tuturor factorilor de influență, inclusiv gruparea lor în mai multe submulțimi, atribuite respectiv, MAMR, OP, mișcărilor și poziției relative dintre MAMR și OP;

✎ determinarea forțelor motrice necesare pentru prelevarea de material de pe suprafața OP;

✎ atribuirea MAMR a calității de “capacitate abrazivă”, considerată ca o FO generală, cu caracter tehnologic, a cărei componentă principală este presiunea pe care MAMR o exercită pe suprafața OP;

✎ elaborarea unui model analitic pentru determinarea coeficientului de reducere a secțiunii active a granulelor abrazive;

✎ elaborarea unui model analitic pentru volumul de abraziv susceptibil la levitație pe suprafața OP;



☞ definirea coeficientului geometric  $C_g$  care exprimă variația elementelor geometrice așchietoare (vârfuri, muchii, suprafețe) în raport cu dimensiunea materialului abraziv;

☞ modelarea capacității abrazive a MAMR utilizând cele două modele analitice mai sus menționate și coeficientul geometric definit anterior, modelare care prin reprezentarea grafică a suprafeței corespunzătoare ecuației obținute a condus la identificarea teoretică a unui extrem în raport cu variabila “granulație”.

### 5.2.2. Contribuții în domeniul cercetării experimentale

☞ identificarea aplicațiilor industriale în care se utilizează prelucrări cu MAMR;

☞ detalierea variantelor semnificative care utilizează prelucrări cu MAMR în procese de netezire și de generare a unor suprafețe tehnologice;

☞ conceperea și realizarea unui stand experimental, pentru studiul prelucrării cu MAMR utilizând granule abrazive nemagnetice, prin dispozitivarea corespunzătoare a unei mașini de găurit cu coloană;

☞ realizarea unor experimente preliminare prin care s-au determinat FI semnificativi precum și mulțimile valorilor de interes tehnologic a acestora;

☞ conceperea și realizarea unui stand experimental pentru determinarea presiunii pe care o exercită MAMR pe suprafața OP, stand care cu ajutorul unui traductor piezoceramic, permite convertirea presiunii MAMR în semnale electrice și asigurarea unor viteze mari de răspuns în condiții de sensibilitate ridicată;

☞ proiectarea și realizarea unui experiment factorial compus și centrat Box-Wilson de ordinul doi cu trei FI care a furnizat modelul regresional pentru FO “p - presiune de așchiere” pe care o exercită MAMR pe suprafața OP;

☞ verificarea prin rezultate experimentale a naturii modelului analitic pentru determinarea capacității abrazive a MAMR;

☞ proiectarea și realizarea unor experimente factoriale compuse și centrate Box-Wilson de ordinul doi cu patru FI care au furnizat modelele

regresionale pentru FO “ $Q_p$  - productivitate” și “ $R_a$  - rugozitate a suprafeței prelucrate”;

✎ evaluarea calității suprafețelor prelucrate cu MAMR prin analiza principalilor estimatori de verosimilitate ai rugozității, evaluarea ce a permis atribuirea caracteristicilor de stabilitate acestor procese tehnologice iar suprafețelor obținute, izotropie și omogenitate;

Teza de doctorat nu și-a propus și nu a epuizat aprofundarea problematicii prelucrărilor cu MAMR, ci dimpotrivă, se consideră a fi una din primele încercări de abordare sistematică a acestor tehnologii. Prezenta lucrare deschide, atât autorului ei, dar și altor cercetători, posibilitatea continuării cercetărilor fundamentale și experimentale în scopul lansării acestor tehnologii într-un circuit aplicativ și productiv.

# BIBLIOGRAFIE

1. Anton, I., De Sabata, I., Vékáš, L., *Proprietăți și aplicații ale lichidelor magnetice*, în Tehnologii, Calitate, Mașini și Materiale, Editura Tehnică, București, 1987, Vol.1, pag.186-212
2. Anton, I., De Sabata, I., Vékáš, L., *Application orientated researches on magnetic fluids*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 85 (1990), pag.219-226
3. Anzai, M., *Surface finishing of curved surface of die/mold using magnetism*, Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., vol.57, No. 2 (Sept.1991), pag.129-132
4. Baron, Iu. M., *Magnitno-abrazivnaja i magnitnompole*, Izd. Masinostroienija, Leningrad, 1975
5. Childs, T.C., Yoon, H., *Magnetic Fluid Grinding Cell Design*, Annals of the CIRP, vol.42/2/1993, pag.343-346
6. Cicală, E., *Optimizarea proceselor de tăiere conturată cu laser a materialelor*, Teză de doctorat, Universitatea "Politehnica" din Timișoara, 1997
7. Cicală, E., *Metode de prelucrare a datelor experimentale*, Editura "Politehnica", Timișoara, 1999
8. Ciobanu, M., *Cercetări privind optimizarea parametrilor de lucru la finisarea magneto-abrazivă cu ferrofluide*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică, Iași, 1993
9. Ciobanu, M., *Elemente de bază ale finisării magneto-abrazive*, în "TEHNOMUS VI", Suceava, 1991, pag.61-69
10. Ciobanu, M., *Considerații privind performanțele și limitele de aplicare ale finisării magneto-abrazive*, în "TEHNOMUS VI", Suceava, 1991, pag.70-78
11. Cozmâncă, M., Panait, S., Constantinescu, C., *Bazele aşchierii*, Editura "Gheorghe Asachi", Iași, 1995
12. Dehoff, A. ș.a., *Magnetoabrasives Entgraten der Zahnstirnkanten von Zahnraden*, Werkstatt und Betrieb, 117, (1984),2, pag.77-80
13. Dima, G., Dima, M., *Tehnoredactare computerizată în Word 6.0 sub Windows*, Editura Teora, București, 1996
14. Dreucean, A., *Mașini-unelte și prelucrări prin aşchiere*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1968
15. Dreucean, A. ș.a., *Mașini - unelte și control dimensional*, partea I, vol. I și II, Litografia Institutului Politehnic Timișoara, 1984

16. Fătăceanu, I. ș.a., *Proiectarea sculelor, dispozitivelor și verificatoarelor*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1985.
17. Gavrițaș, I. ș.a., *Prelucrări neconvenționale în construcția de mașini, Vol. I*, Editura Tehnică, București, 1991.
18. Golini, D. ș.a., *Computer control makes asphere production run of the mill*, Laser Focus World, september, 1995, pag.86-91
19. Groza, I., *Stadiul actual al prelucrării cu medii abrazive magneto-reologice*, Universitatea Tehnică din Timișoara, 1991, referat nr.1, nepublicat
20. Groza, I., *Concepția și proiectarea sistemelor tehnologice de prelucrare cu medii abrazive magneto-reologice*, Universitatea Tehnică din Timișoara, 1992, referat nr.2, nepublicat
21. Groza, I., *Modelarea matematică a proceselor de prelucrare cu medii abrazive magneto-reologice*, Universitatea Tehnică din Timișoara, 1993, referat nr.3, nepublicat
22. Groza, I., *Prelucrarea materialelor cu medii abrazive magneto reologice*, în "TEHNOMUS VI", Suceava, 1991, pag.55-60
23. Groza, I., *Medii abrazive magneto-reologice*, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Oradea, 1991
24. Groza, I., *Scheme principial-constructive a sistemelor de prelucrare cu medii abrazive magneto-reologice*, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Oradea, 1991
25. Groza, I., *Relații analitice a forțelor de interacțiune în medii abrazive magneto-reologice*, Lucrările Sesiunii de Comunicări Științifice, Universitatea "Aurel Vlaicu, Arad, vol.II, 1992, pag.156-161
26. Groza, I., *Sisteme de prelucrare cu medii abrazive magneto-reologice. Problematika proiectării*, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Oradea, 1992
27. Groza, I., *Soluții constructive pentru sistemele magnetice a mediilor abrazive magneto-reologice*, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Oradea, 1992
28. Groza, I., *Analiza dispersională monofactorială a factorilor de influență la prelucrările cu medii abrazive magneto-reologice*, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Oradea, 1993
29. Groza, I., *Metode de planificare matematică aplicate prelucrărilor cu medii abrazive magneto-reologice*, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Oradea, 1993

30. Groza, I., *Finishing Manufacturing of Magneto-Rheological Abrasive Mediums*, Research Reports 1995/96, Department of Materials and Production, University "Federico II", Naples-Italy, 1996, pag.39-44
31. Groza, I., *Model analitic pentru sesizarea statică a muchiiilor active de aşchiere*, Revista de tehnologii neconvenţionale, nr.1/1999
32. Groza, I., *Model analitic pentru determinarea volumului de abraziv susceptibil la levitaţie*, Revista de tehnologii neconvenţionale, nr.1/1999
33. Hoancă, C. ş.a., *Determinarea parametrilor curbei de portanţă Abbot-Firestone prin calcul statistic automat*, Analele Universităţii Oradea, 1991
34. Holmes, R. ş.a., *Word 6 pentru Windows în imagini*, Editura Teora, Bucureşti, 1995
35. Ikawa, N., Tanaka, T., *Thermal Aspects of Wear of Diamond Grain in Grinding*, Annals of the CIRP, vol. 19/1971, pag.153-157
36. Kenny, C., *Excel pentru Windows în imagini*, Editura Teora, Bucureşti, 1996
37. Kim, J.D. ş.a., *Study of magnetic polishing of free-form surfaces*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol.37, No.8/1997, pag.1179 -1187
38. König, W. ş.a., *A Survey of the Present State of High Speed Grinding*, Annals of the CIRP, vol.19/1971, pag.275 - 282
39. Kurobe, T. ş.a., *Magnetic Field-Assisted Fine Finishing*, Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., vol.17, No. 1 (Mar.1983), pag.49-51
40. Kurobe, T. ş.a., *Magnetic Field-Assisted Lapping*, Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., vol. 20, No. 1 (Mar. 1986), pag.48-51
41. Kunieda, M. ş.a., *Robot-polishing of curved surfaces with magnetically pressed polishing tool*, Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., vol.54, No.1 (Mar.1988), pag.25-31
42. Luca, E. ş.a., *Ferofluidede şi aplicaţiile lor în industrie*, Editura Tehnică, Bucureşti, 1978
43. Marinescu, I.D., *Diamantul şi aplicaţiile lui*, Editura Tehnică, Bucureşti, 1985
44. Marinescu, N.I. ş.a., *Prelucrări neconvenţionale în construcţia de maşini, Vol. II*, Editura Tehnică, Bucureşti, 1993
45. Marinescu, N.I. ş.a., *Tehnologii de prelucrare a sculelor din materiale dure şi extradure*, Editura Tehnică, Bucureşti, 1985
46. Mărcuşanu, A., Lăncrăngean, Z., Olariu, M., Groza, I., *Tehnologii de suprafaţare*, Editura "Mirton", Timişoara, 1996
47. Mnerie, D., *Contribuţii la optimizarea utilizării materialelor piezoceramice în construcţia traductoarelor de forţă*, Teză de doctorat, Universitatea "Politehnica" din Timişoara, 1997

48. Nakagawa, T., ș.a., *Study on polishing automation of die/mold using magnet*, Machine and Tools, No.3(1992), pag.41-46
49. Nichici, Al., ș.a., *Prelucrarea prin eroziune în construcția de mașini*. Ed. Facla, Timișoara, 1983
50. Nichici, Al., Cicală, E., Mee, R., *Prelucrarea datelor experimentale. Curs și aplicații*, Centrul de multiplicare, Universitatea "Politehnica" Timișoara, 1996
51. Oprean, A. ș.a., *Bazele aşchierii și generării suprafețelor*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981
52. Paulescu, G., *Contribuții la optimizarea tehnologiei de prelucrare dimensională cu unde ultrasonice a materialelor fragile și dure*, Teză de doctorat, IPTVT, 1987
53. Popescu, I., *Optimizarea procesului de aşchiere*, Editura Scrisul Românesc, Craiova, 1987
54. Sakulevik, F. Iu. ș.a., *Magnitno-abrazivnaia obrabotka tocinîh detale*, Izd. Vîscisaia Skola, Minsk, 1977
55. Shimura, T. ș.a., *Study on Magnetic Abrasive Finishing*, Annals of the CIRP, vol.39/1/1990, pag.325-328
56. Sticlaru, C., *Contribuții la studiul fenomenului de stick-slip*, Teză de doctorat, Universitatea "Politehnica" Timișoara, 1998
57. Sticlaru, C. ș.a., *Prelucrarea automată a profilului de rugozitate și obținerea curbei de portanță Abbott-Firestone*, Simpozionul Național RI, Timișoara, 1994
58. Tache, V., ș.a., *Dispozitive pentru mașini-unelte. Proiectarea schemelor de orientare și fixare a semifabricatelor*, Editura Tehnică, București, 1989
59. Taloi, D., *Optimizarea proceselor tehnologice. Aplicații în metalurgie*, Editura Academiei, București, 1987
60. Tönshoff, H.K. ș.a., *Optimisation of Internal Grinding by Microcomputer - Based Force Control*, Annals of the CIRP, vol.35/1/1986, pag.293-296
61. Trmal, G.J., Zsu, C.B., *An expert system for grinding process optimisation*, Journal of Materials Processing Technology, 33 (1992), pag.507-517
62. Tudor, A., *Contactul real al suprafețelor de frecare*, Editura Academiei Române, București, 1990
63. Umehara, N. ș.a., *Internal plishing of tube with magnetic fluid grinding, Part 1, fundamental polishing properties with taper-type tools*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 149 (1995), pag.185-187
64. Umehara, N., ș.a., *Internal plishing of tube with magnetic fluid grinding, Part 2, fundamental polishing properties with rotating balls and with oscillating balls*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 149 (1995), pag.188-191

65. Umehara, N., Kato, K., *Hidromagnetic Grinding Properties of Magnetic Fluid containing Grains at High Speed*, Journal of Magnetic Materials, 65 (1987), pag.397-400
66. Umehara, N., Kato, K., *In situ observation of the behavior of abrasives in magnetic fluid grinding*, Journal of Magnetic Materials, 149 (1995), pag.181-184
67. Vékás, L., *Laboratorul de lichide magnetice din Timișoara*, în Academia Română, Filiala Timișoara, istoric 1951-1999, Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 1999, pag.280-293
68. Venk, S., *A Systems Approach for Decision Making in Production Grinding*, Annals of the CIRP, vol.40/1/1991, pag.445-449
69. Vuia, I., *Tabele pentru calculul maselor în construcția de mașini*, Editura Tehnică, București, 1977
70. Wen, X.M. ș.a., *Micro-computer-based optimisation of the surface grinding process*, Journal of Materials Processing Technology, 29 (1992), pag.75-90
71. \*\*\* *Bull. Japan Soc. of Prec. Engg*,
72. \*\*\* *Proceedings of the IV th National Workshop on Magnetic Fluids and Applications*, (Timișoara, 1984), in Romanian Reports in Physics, vol.47, 1985
73. \*\*\* *Proceedings of 8 th International Conference on Magnetic Fluids*. (Timișoara, 1998,) în special issue of Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol.201 (1997)
74. \*\*\* *Referativny Jurnal, Tehnologija mašinostroenja*,
75. \*\*\* *STATGRAPHICS - Reference Manual*, Manustinc, 1992
76. \*\*\* STAS 5730/1-85, *Starea suprafețelor. Rugozitatea suprafeței. Terminologie*
77. \*\*\* STAS 5730/3-85, *Starea suprafețelor. Parametrii de rugozitate și specificarea rugozității suprafeței*
78. \*\*\* STAS 5730/4-85, *Reguli pentru măsurarea rugozității suprafeței cu aparate cu palpare*
79. \*\*\* Virtual Bench <sup>TM</sup> *Getting Started with Virtual Bench*, august, 1997

