

MINISTERUL ÎNVĂȚĂMÂNTULUI
UNIVERSITATEA TEHNICĂ DIN TIMIȘOARA
FACULTATEA DE MECANICĂ

ing.HERMAN RICHARD IOAN EMIL

CONTRIBUȚII LA OPTIMIZAREA REALIZĂRII
FANTELOR PRIN EROZIUNE ELECTRICĂ
COMPLEXĂ

TEZĂ DE DOCTORAT

UNIVERSITATEA POLITEHNICA	
TIMIȘOARA	
BIBLIOTECA CENTRALĂ	
NR.	70
CATEG.	MEC / HER
NR.	271000

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:
prof.dr.doc.șt.ing.AUREL NANU

T I M I Ș O A R A
1995

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA POLITEHNICA
TIMIȘOARA

CUPRINS

LISTA ABREVIERILOR SI SIMBOLURILOR UTILIZATE.....	6
INTRODUCERE.....	11
1 STADIUL ACTUAL AL PRELUCRARIII FANTELOR.....	16
1.1 Domenii de utilizare a fantelor în industrie.....	16
1.2 Analiza comparativă a proceselor de realizare a fantelor.....	18
1.2.1 Realizarea fantelor prin ștanțare și deformare plastică.....	18
1.2.2 Realizarea fantelor prin tăiere termică.....	19
1.2.3 Realizarea fantelor prin așchiere.....	20
1.2.4 Realizarea fantelor prin eroziune electrică complexă.....	20
1.3 Stadiul actual al prelucrării dimensionale prin eroziune electrică complexă.....	22
1.3.1 Principiul prelucrării dimensionale prin eroziune electrică complexă.....	22
1.3.2 Parametrii și factorii care determină carac- teristicile tehnologice la prelucrarea dimen- sională prin eroziune electrică complexă.....	24
1.3.3 Utilajul tehnologic de prelucrare prin eroziune electrică complexă.....	30
2 CERCETARI TEORETICE SI EXPERIMENTALE LA PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE ELECTRICA COMPLEXA.....	33
2.1 Procesele elementare de prelucrare dimensională prin eroziune electrică complexă.....	33

2.1.1	Dizolvarea anodică, fenomen fundamental la prelucrarea dimensională prin eroziune electrică complexă.....	33
2.1.2	Descărcarea electrică în impuls prin rupere de contact electric.....	38
2.1.2.1	Pregătirea impulsului de curent.....	38
2.1.2.2	Amorsarea și dezvoltarea DEI prin ruperea contactului electric.....	38
2.1.2.3	Intreruperea DEI.....	39
2.1.3	Amorsarea și dezvoltarea descărcărilor electrice în impuls prin străpungerea unui dielectric...	45
2.1.4	Fenomenele fundamentale în spațiul de lucru la prelucrarea prin eroziune electrică complexă în condiția prezenței contactelor multiple.....	46
2.2	Influența modului de spălare a spațiului de lucru asupra principalelor caracteristici tehnologice ale prelucrării prin eroziune electrică complexă.....	46
3	MODELAREA MATEMATICĂ A PROCESULUI DE PRELUCRARE DIMENSIONALA PRIN EROZIUNE ELECTRICA COMPLEXA.....	55
3.1	Modelarea statistică a procesului de prelucrare prin eroziune electrică complexă prin metoda experimentului psihologic.....	55
3.1.1	Stabilirea parametrilor prelucrării și a indicatorilor de performanță.....	56
3.1.2	Intocmirea chestionarului.....	57
3.1.3	Sinteza informațiilor.....	58
3.1.4	Corecția și ponderarea valorilor primare.....	58
3.1.5	Verificarea gradului de consens al specialiștilor.....	62
3.1.6	Reprezentări grafice.....	70
3.1.7	Gruparea factorilor pe grupe de influență.....	70
3.1.8	Interpretarea rezultatelor.....	71
3.2	Modelarea matematică prin experiment activ a procesului de prelucrare prin eroziune electrică complexă...	80

3.2.1	Premodelarea.....	80
3.2.2	Modelarea matematică prin experiment activ.....	82
3.2.2.1	Programul de experimentare.....	83
3.2.2.2	Conducerea experimentului și analiza rezultatelor obținute.....	85
4	CONTRIBUTII LA OPTIMIZAREA PROCESULUI DE PRELUCRARE A FANTELOR PRIN EROZIUNE ELECTRICA COMPLEXA.....	93
4.1	Model matematic privind determinarea funcțiilor de răspuns în cazul prelucrării fanțelor prin eroziune electrică complexă.....	95
4.1.1	Stabilirea modelelor matematice pentru timpul de prelucrare.....	98
4.1.2	Stabilirea modelelor matematice pentru uzura obiectului de transfer.....	105
4.1.3	Stabilirea modelelor matematice pentru lățimea fanței.....	111
5	UTILAJE DE PRELUCRARE A FANTELOR PRIN EROZIUNE ELECTRICA COMPLEXA.....	114
5.1	Sistemul mecanic și sistemul pentru electrolit.....	117
5.2	Sistemul de alimentare cu energie electrică a spa- țiului de lucru.....	129
5.3	Sistemul de reglare automată a avansului.....	133
5.4	Determinarea funcției de transfer a sistemului de reglare automată a avansului.....	135
5.4.1	Funcția de transfer a procesului (P).....	136
5.4.2	Funcția de transfer a elementului de măsurare (EM).....	136
5.4.3	Funcția de transfer a regulatorului electronic (RE).....	137
5.4.4	Funcția de transfer a elementului de execuție (EE).....	137
5.4.5	Funcția de transfer a reductorului melcat (RM)...	138
5.4.6	Funcția de transfer a mecanismului șurub- piulița (MSP).....	138

5.4.7 Modelul matematic al sistemului de reglare automată a avansului.....	138
5.5 Analiza stabilității sistemului de reglare automată a avansului.....	139
5.6 Realizarea fantelor transversale.....	144
5.7 Proiectarea tehnologiei de prelucrare în cazul realizării fantelor prin eroziune electrică complexă.....	147
5.7.1 Alegerea utilajului tehnologic de prelucrare.....	148
5.7.2 Stabilirea sistemului de alimentare cu lichid de lucru.....	148
5.7.3 Stabilirea densității de curent.....	149
5.7.4 Stabilirea curentului de prelucrare și a tensiunii optime pe spațiul de lucru.....	149
5.7.5 Stabilirea naturii circuitului electric de alimentare.....	150
5.7.6 Stabilirea vitezei periferice a obiectului de transfer.....	150
5.7.7 Stabilirea materialului, a modului de obținere și a preciziei geometrice și dimensionale a obiectului de transfer.....	151
5.7.8 Stabilirea presiunii dintre obiectul de prelucrat și obiectul de transfer.....	151
6 CONCLUZII.....	152
BIBLIOGRAFIE.....	155

LISTA ABREVIERILOR SI SIMBOLURILOR UTILIZATE

- A - ampermetru
- A - arbore portsculă
- a_{ij} - rangul parametrului x_i , dat de specialistul s_j
- b - lătimea fantei
- b_i - coeficientii ecuației de regresie
- b_i - valoarea calculată cu ajutorul funcției $M(x)$ a timpului de prelucrare, uzurii obiectului de transfer și lățimii fantei în punctul x_i
- b_s - lătimea relativă a fantei
- $b_{s1, 2}$ - grosimi relative limită a fantelor
- BG - bucxse cu bile
- c - căldura specifică
- C - capacitatea din circuitul electric de alimentare a spațiului de lucru
- C - colector
- C - cuvă de lucru
- CA - cuvă auxiliară
- C_{EEC} - costul realizării unei fante
- CG - coloane de ghidare
- CL - cap de lucru
- CL - conductele de legătură
- C_o - valoarea calculată a criteriului Cochran
- $C_o 0,05 (\nu_1, \nu_2)$ - valoarea tabelată a criteriului Cochran
- C_p - costul realizării fantei prin procedeul tehnologic p
- CR - cale de rulare
- CSR - cadru de rigidizare
- d_{F1} - diametrul flanșei de fixare a OT
- d_{OT} - diametrul obiectului de transfer
- D - dop
- $D_{1, 2}$ - dulap electric a postului 1, respectiv 2
- DEI - descărcare electrică în impuls
- DEIRC - descărcare electrică în impuls prin rupere de contact
- DEISD - descărcare electrică în impuls prin străpungerea unui di-electric

DFx - dispozitiv de fixare a semifabricatului tubular
DR - dispozitiv de rotire și divizare a obiectului de prelucrat
DP - prelucrare prin ștanțare și deformare plastică
e - sarcina electrică a electronului
e - eroarea relativă procentuală a mărimilor calculată față de
mărimile obținute în experiment, în punctul considerat
E - intensitatea câmpului electric dintre obiectul de prelucrat
și obiectul de transfer
EE - element de execuție
EEC - eroziune electrică complexă
EM - element de măsurare
 f_{EP} - frecvența impulsurilor
F - numărul lui Faraday
FM - filtru metalic
 F_{iC} - valoarea calculată a criteriului Fischer
 F_{iT} - valoarea tabelată a criteriului Fischer
FOT - forma obiectului de transfer
g - grosimea obiectului de transfer
GE - grup electrolit
H - duritatea măsurată macroscopic
HRC - duritatea materialului apreciată prin criteriul Rockwell
 H_S - adâncimea stratului modificat termic
I - intensitatea curentului electric
 I_e - intensitatea curentului electric elementar
IL - modul de introducere a lichidului de lucru în spațiul de
lucru
 I_m - valoarea medie a intensității curentului de lucru
j - densitatea de curent
 l_f - lungimea fantei
L - inductivitatea din circuitul electric de alimentare a spațiului
de lucru
LL - lichid de lucru
LR - lagăr de rostogolire
m - numărul specialiștilor consultați
 $m_{O, f}$ - masa inițială, respectiv finală a probei analizate termo-
gravimetric
 m_{OP1} ; m_{OP2} - masa obiectului de prelucrat înainte, respectiv după
prelucrare
 m_{OT1} , m_{OT2} - masa înainte, respectiv după prelucrare a OT

M - modulul soluției de silicat de sodiu
M - melcul reductorului melcat
 $M(x_i)$ - funcția polinomială de ordinul trei pentru modelarea timpului de prelucrare, a uzurii obiectului de transfer și a lățimii fantei
ML - natură lichidului de lucru
Me - metal
Me - materialul obiectului de transfer
 Me_{aq} - metal în formă hidratată
MCC - motor de curent continuu
MCA - motor de curent alternativ
ML - mediu de lucru electrolitic
 $ML_{1, 2, 3}$ - duze pentru distribuția lichidului de lucru
MLP - mișcarea de poziționare orizontală a capului de lucru
MPR - mișcarea de rotație de poziționare
MPT - mișcarea de poziționare transversală
MRR - mișcarea de retrăgere rapidă a obiectului de transfer
MRP - mișcarea de poziționare de rotire a obiectului de prelucrat
MSP - mecanism șurub-piuliță
n - numărul punctelor de contact dintre obiectul de prelucrat și obiectul de transfer
n - numărul factorilor
n - numărul de intersecții ale liniei medii cu profilul
n - turația obiectului de transfer
OP - obiectul de prelucrat
OT - obiectul de transfer
 $OT_{1, 2}$ - obiectele de transfer 1 și 2
OT-F - obiect de transfer filiform
OT-P - obiect de transfer bandă
 q_{OP} - productivitatea specifică a prelucrării
 q_{OT} - debitul specific al uzării
 Q_{OP} - productivitatea prelucrării
 Q_{OT} - debitul uzării
p - presiunea de contact dintre obiectul de prelucrat și obiectul de transfer
P - pompă centrifugală
P - puterea introdusă în spațiul de lucru
PB - placă de bază
PF - placă fixă
PM - placă mobilă
PP - peliculă pasivatoare (pasivă)
PP-P - sistem portperie-perie
 $r_{1, 2}$ - rezistori de limitare

R - constanta Regnault
R - rezistența din circuitul electric de alimentare a spațiului de lucru
R - rezistență variabilă
 R_1, R_2 - robinetele pentru reglarea debitelor
 R_a, R_z, R_{max} - rugozitatea
 R_A^+ - ioni pozitivi din mediul de lucru
 R_B^- - ioni negativi din mediul de lucru
RE - regulator electronic
Red - reductor melcat
RG - role de ghidare
RM - reductor melcat
RM - roată melcată
RS - role de sprijin
 R_s - rezistență suplimentară
RR - role de rulare
Rz - rezervor
s - grosimea semifabricatului
 S_{ce} - mărimea suprafeței microcontactului electric
 s_i - specialistul cu numărul i
 s_l - interstițiul lateral
 s_l - avans de lucru longitudinal
 s_t - avans de lucru transversal
S - sorb
S - surub
 $S_{1, 2}$ - surse de curent continuu
SAPT - sistem de asigurare a avansului de poziționare transversal
SB - strat de bolovăniș
 S_{bi}^2 - dispersia coeficienților
 S_{conc}^2 - dispersia de concordanță
SN - strat de nisip
 S_o^2 - eroarea experimentală (dispersia reproductibilității)
SP - strat de pietriș
SP - surub-piuliță
 $S_t 0,05(\gamma_o)^2$ - valoarea tabelată a criteriului Student
 S_u - dispersia determinărilor paralele
t - timpul de prelucrare
 t_t - temperatura de topire a materialului
T - tablou de distribuție

TC - transmisie cu curele
u - uzura relativă volumică
U - tensiunea electrică
 U_g - tensiunea de mers în gol a redresorului
 U_s - căderea de tensiune pe interstitiu
 v_m - viteza medie de avans
 v_r - viteza relativă dintre obiectul de prelucrat și obiectul de transfer
 v_l - viteza de avans longitudinal
 v_t - viteza de avans transversal
V - voltmetru
 V_{DA} - volumul mediu de material îndepărtat prin dizolvare anodică
 V_{EP} - volumul mediu al craterelor elementare
 V_{ET} - volumul mediu uzat din obiectul de transfer la fiecare descărcare electrică în impuls
 V_{OP} - volumul de material prelevat din obiectul de prelucrat
 V_{OT} - volumul de material prelevat din obiectul de transfer
 x_i - factorii de intrare independenți ai procesului
 x_i - valoarea puterii din spațiul de lucru
 x_i - valoarea intensității curentului de lucru
y - variabilă de stare
 Y_n - valoarea experimentală medie a variabilelor de stare
 Y_{uk} - variabila de stare (în determinări paralele)
z - valența elementului
ZIT - zonă influențată termic
 δ_i - coeficient de pondere
 $\Delta\phi$ - potențialul de deelectronare
 η - suprapotențialul de curent aplicat
 ξ - coeficientul lui Prandtl
 ρ - rezistivitatea materialului;
 ρ - densitatea lichidului de lucru
 ρ_{OP} - densitatea materialului obiectului de prelucrat
 ρ_{OT} - densitatea materialului obiectului de transfer
 $e_j^{(k)}$ - ordinea de influență stabilită pentru etapa k de prelucrare a rezultatelor

INTRODUCERE

Introducerea unor materiale cu caracteristici fizico-chimice excepționale, necesitatea îmbunătățirii tehnologiilor de fabricație, ridicarea calității produselor și nu în ultimă instanță obținerea unor produse de calitate corespunzătoare în condițiile unor cheltuieli minime, au impus noi metode, procedee și operații de prelucrare. Printre acestea se numără și prelucrarea prin EEC.

Ca toate metodele și procedeele de prelucrare, și EEC are o serie de avantaje și dezavantaje, care o impun în cazurile de aplicare în practică.

Dintre avantajele majore se amintesc:

- construcție foarte simplă a OT față de oricare altă sculă utilizată în tehnologiile clasice;
- tehnologii de fabricare ale OT simple și ieftine;
- materiale ale OT uzuale, ieftine, ceea ce impune, alături de avantajele anterioare, un cost foarte scăzut al OT;
- posibilitatea prelucrării cu ajutorul unor OT cu proprietăți mecanice scăzute, a unor OP cu proprietăți mecanice excepționale (duritate, rezistență mecanică, refractaritate înaltă, etc.), care se prelucrează extrem de greu sau sunt chiar imposibil de prelucrat prin tehnologii de prelucrare clasice;
- la debitare, lățimile tăieturilor sunt foarte mici, deci un coeficient de utilizare a materialului mult mai ridicat decât la oricare altă tehnologie clasică;
- deși uzura OT este mult mai mare ca la sculele aferente tehnologiilor clasice, la prelucrarea prin EEC nu mai sunt necesare, în general, reascuțiri (excepție profilarea) și pe ansamblu, chiar cu aceste uzuri mari, cheltuielile cu sculele sunt mult mai reduse;
- posibilitatea realizării unor sisteme tehnologice relativ simple, care funcționează în ciclu complet automat, inclusiv

procesul de prelucrare, ceea ce situează prelucrarea în zona de optim;

- realizarea cu ușurință, numai prin modificarea parametrilor electrici ai prelucrării, a unor regimuri de degroșare, semifinisare sau finisare, pe aceeași mașină și cu aceeași sculă;

- executarea unor prelucrări care, prin tehnologiile clasice, sunt imposibil de realizat, sau posibil de realizat numai cu eforturi materiale mari (fante, prelucrarea pieselor metalice de duritate excepțională, etc.).

Cu toate aceste avantaje, prelucrarea prin EEC are și o serie de dezavantaje, care îi limitează mult utilizarea:

- este un procedeu relativ puțin cunoscut și deci puțin aplicat, și prin urmare banca de date referitoare la tehnologiile de prelucrare este foarte redusă, numărul și densitatea mașinilor de prelucrat mică, domeniile de aplicare concretă puțin;

- din cauza numărului mic de instalații de prelucrare, costul lor este foarte ridicat;

- costul relativ ridicat al energiei electrice;

- lichidul de lucru utilizat ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$) are multiple dezavantaje (aerosoli nocivi, depuneri de cruste greu de îndepărtat, etc.).

Se remarcă faptul că o serie din dezavantajele prezentate se pot elimina prin aprofundarea studiilor și cercetărilor asupra proceselor fundamentale de prelucrare prin EEC, cât și prin determinarea unor noi domenii de aplicații industriale pentru procedeu.

În lumina acestor considerații, prezenta lucrare de doctorat și-a propus să contribuie la cunoașterea mai aprofundată a proceselor fundamentale la prelucrarea prin EEC, la optimizarea tehnologiei de prelucrare a fantelor, respectiv la diversificarea tipurilor de utilaje existente de prelucrare cu o instalație automată de realizare a fantelor în semifabricate tubulare. Tratarea temei a fost relativ dificilă, atât datorită bibliografiei reduse, cât și datorită necesității aplicării în producție a cercetărilor, cu finalizarea lor prin realizarea unui utilaj tehnologic industrial.

Lucrarea este structurată pe 6 capitole, cuprinzând 163 de pagini, cu 56 tabele și 84 figuri, 132 referințe bibliografice, din care 58 aparțin autorului (6 realizate singur și 32 ca prim autor).

În capitolul unu se prezintă stadiul actual al prelucrării fantelor, cu trecerea în revistă a metodelor și procedeelelor (clasice sau neconvenționale) de realizare a lor. După prezentarea succintă a principiului prelucrării prin EEC se realizează o clasificare completă a parametrilor și factorilor care determină caracteristicile de prelucrare dimensională prin EEC, analiză efectuată în urma unui vast studiu bibliografic, într-o încercare de unificare a tuturor conceptelor folosite pentru caracterizarea performanțelor acestei prelucrări de către diferiți cercetători.

Al doilea capitol este destinat cercetărilor teoretice și experimentale referitoare la evoluția proceselor fundamentale ce au loc la prelucrarea prin EEC și a succesiunii întinse dezvoltate în proces dinamic, în cazul descărcărilor singulare, ce stau la baza prelevării de material.

În urma unor ample cercetări teoretice și experimentale, se emite o nouă teorie cu privire la mecanismul de formare a PP, confirmată prin analizele röntgenografice, termogravimetrice și termică diferențială.

Ultima parte a capitolului doi este destinată analizei teoretice și experimentale cu privire la dezvoltarea fenomenelor și mecanismelor ce stau la baza prelucrării prin EEC în condițiile reale ale prezenței contactelor multiple, evidențiindu-se rolul și influența modului de spălare asupra stabilității și dezvoltării continue a proceselor fundamentale în scopul stabilirii unor parametri optimi de prelucrare. De asemenea, rezultatele teoretico-experimentale obținute stau la baza conceperii și proiectării structurii funcțional-constructive a utilajelor destinate prelucrării fantelor.

Capitolul trei este o aplicație matematică a rezultatelor experimentale obținute, constând în stabilirea ordinii de influență a principalelor mărimi de intrare asupra a șase principale caracteristici tehnologice ale procesului. Apoi, pe baza rezul-

tatelor obținute, s-a realizat un experiment activ de tip factorial prin care s-a urmărit stabilirea ecuațiilor de regresie aferente unor cazuri particulare tipice de prelucrare. Prelucrarea matematică a datelor experimentale s-a făcut utilizând tehnica de calcul automat. Concluziile obținute prin experimentul psihologic și prin experimentul activ sunt concordante.

Rezultatele teoretico-experimentale obținute anterior sunt utilizate în capitolul patru la stabilirea și amplificarea programului de cercetare teoretico-experimentală efectuată în cazul prelucrării fantelor prin EEC, prin modelare matematică. Modelarea a utilizat programe pe calculator pentru stabilirea expresiilor funcțiilor de răspuns în cazul timpului de prelucrare, a uzurii relative a OT, respectiv lățimii fantei, caracteristici tehnologice esențiale, funcție de puterea introdusă în spațiul de lucru. Pe baza funcțiilor de răspuns obținute s-au determinat zonele optime de prelucrare.

În capitolul cinci se face o analiză profundă a structurii utilajelor destinate prelucrării fantelor prin EEC, evidențiindu-se condițiile restrictive care stau la baza realizării fantelor, cu caracteristici dimensionale și calitative impuse. Se realizează în continuare o analiză detaliată a componentelor constitutive pentru utilajul specializat în prelucrarea fantelor, concepându-se totodată un sistem original de reglare automată a avansului. Rezultatele obținute în urma cercetării teoretico-experimentale au permis stabilirea principiilor de proiectare tehnologică, precum și conceperea și realizarea unui utilaj destinat prelucrării singulare sau multiple, utilaj brevetat, aflat în exploatare la întreprinderea S.C. "Safar" București.

Ultimul capitol este destinat concluziilor, cu precizarea contribuțiilor originale aduse atât în domeniul cercetării fundamentale, cât și al cercetării aplicative.

În realizarea lucrării, obiectivul urmărit permanent a fost optimizarea procesului de prelucrare a fantelor prin EEC. Pentru o alegere optimă a parametrilor reglați în cadrul prelucrării a fost necesară o ierarhizare a lor, în funcție de gradul de importanță (experimentul psihologic), urmată de realizarea unor modele

matematice care să prezinte corelațiile dintre parametri reglați și caracteristicile tehnologice urmărite.

Același obiectiv s-a urmărit în capitolele 3 și 4, oferind o serie de relații matematice care să permită determinarea directă a valorii optime a parametrilor reglați.

Conceperea, proiectarea și realizarea practică a utilajului de prelucrare a fantelor prin EEC a urmărit o structură optimă de prelucrare, cu încercări și modificări succesive ale lui, rezultând în final o instalație de prelucrare exploatată în regim industrial, care a satisfăcut deplin pe beneficiarul ei.

Autorul mulțumește și pe această cale conducătorului științific, prof.dr.doc.șt.ing.AUREL NANU, exprimându-și profunđa prețuire și recunoștință atât pentru îndrumarea competentă permanentă și ajutorul acordat în realizarea acestei lucrări, cât și pentru contribuția majoră în formarea profesională a autorului.

De asemenea autorul mulțumește tuturor colegilor din colectivul Catedrei „Tehnologie mecanică” din Facultatea de Mecanică din Timișoara pentru ajutorul dat în documentarea și rezolvarea temei prezentei lucrări.

Timișoara, martie 1995

Autorul

1 STADIUL ACTUAL AL PRELUCRĂRII FANTELOR

1.1 Domenii de utilizare a fantelor în industrie

Deși numărul de piese care conțin fante existent în industrie este extrem de mare, nu s-a realizat o clasificare și simbolizare a lor, mai ales din cauza mării lor diversități.

Câteva din criteriile care s-au putut utiliza la clasificarea acestor fante ar fi următoarele:

a) după așezarea fantei în piesă:

a₁) fante deschise (marginale - fig.1.1 a);

a₂) fante închise (fig.1.1 b).

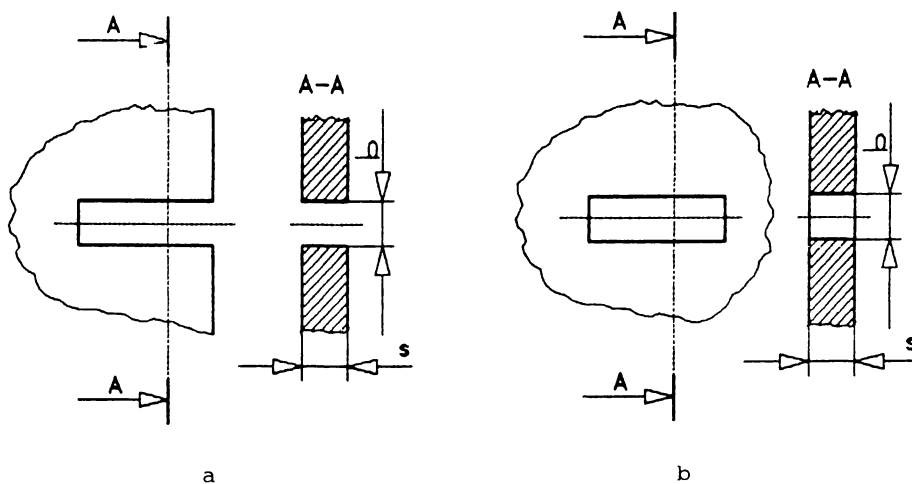


Fig.1.1 Forma fantelor

b) după lățimea fantei:

b₁) fante submilimetrice, la care lățimea b este mai mică decât 1 mm ($b < 1$ mm);

b₂) fante milimetrice, la care lățimea b este mai mare

decât 1 mm ($b \geq 1$ mm);

c) după lățimea relativă a fantei b_s , definită de relația:
 $b_s = b/s$ (b - lățimea fantei [mm]; s - grosimea semifabricatului [mm]):

c_1) fante foarte înguste ($b_s < b_{s1}$);

c_2) fante înguste ($b_{s1} \leq b_s \leq b_{s2}$);

c_3) fante normale ($b_s > b_{s2}$);

Valorile concrete pentru b_{s1} și b_{s2} se determină în funcție de procedeul de prelucrare posibil de aplicat, propunându-se, pentru prelucrarea fantelor prin EEC, valorile $b_{s1} = 0,1$ mm și $b_{s2} = 1$ mm.

d) după natura materialului din care este confecționată piesa care conține fanta:

d_1) din materiale metalice;

d_2) din materiale nemetalice;

e) după caracteristicile fizico-mecanice (în principal duritate și fragilitate) ale materialului piesei care conține fanta:

e_1) materiale cu caracteristici fizico-mecanice deosebite;

e_2) materiale cu caracteristici fizico-mecanice obișnuite, normale.

Diferențierea celor două categorii nu este netă, dar criteriul de clasificare este strict necesar pentru selectarea procedurilor de prelucrare posibile a fantelor.

f) după destinația piesei care conține fanta și rolul funcțional al acesteia, criteriu de clasificare care impune caracteristicile tehnice și tehnologice ale fantei (precizie dimensională și geometrică, calitate a suprafeței, mărime a zonei influențate termic, etc.)

g) după numărul fantelor care trebuie realizate, criteriu care are o puternică influență asupra tehnologiei de prelucrare.

Câteva domenii de utilizare mai frecventă a fantelor sunt:

1^o industria componentelor electronice și a pieselor din industria electronică, în care predomină fantele foarte înguste, submilimetrice, realizate în materiale metalice sau nemetalice dure și/sau fragile. Aceste fante se pot realiza în cazul materialelor metalice prin eroziune electrică cu electrod filiform,

641.666
MECHER

UNIV. POLITEHNICA
TIMIȘOARA
BIBLIOTECA CENTRALĂ

cu fascicul de electroni, fascicul laser, sau eroziune chimică. In cazul materialelor nemetalice se poate apela la fasciculul de electroni, fasciculul laser, sau eroziunea chimică (în unele cazuri).

2^o filtre din industria chimică, petrochimică, din sistemele de alimentare cu apă potabilă subterană, realizate din semifabricate metalice de tip țevă sau tablă. Caracteristic pentru acestea este numărul mare de fante necesare pentru realizarea unui filtru, lungimile relativ mari ale lor și materialele cu caracteristici fizico-mecanice și chimice superioare.

Funcție de condițiile concrete, fantele acestor filtre se pot realiza prin ștanțare, deformare plastică, tăiere termică (oxigaz sau plasmă), prin aşchiere sau prin EEC. Se remarcă gama relativ restrânsă de procedee prin care se pot realiza, în condiții economice, aceste fante.

3^o alte domenii de activitate. Datorită diversității enorme a pieselor care conțin fante și a destinației lor, este extrem de grea gruparea lor în alte categorii, urmând ca fiecare caz concret să fie analizat separat, și pe baza criteriilor prezentate anterior să i se stabilească metoda și procedeul de prelucrare.

1.2 Analiza comparativă a proceselor de realizare a fanțelor

Având în vedere ponderea fanțelor milimetrice practicate în piese din materiale metalice, acestea se vor trata în continuare în mod preferențial. Principalele metode și procedee de realizare a fanțelor realizate în piese din materiale metalice, precum și principalele lor caracteristici se prezintă în continuare.

1.2.1 Prin ștanțare și deformare plastică, fantele se pot realiza fie prin perforare (fig.1.1 b), fie prin două operații aplicate simultan: forfecare și reliefare (fig.1.2) [49,109,120].

Se remarcă în primul rând faptul că prin perforare nu se pot realiza decât fante normale, cu lățimea relativă $b_s \geq 0,9$, deci un domeniu relativ restrâns de utilizare. Al doilea procedeu amintit este folosit aproape în exclusivitate la realizarea fil-

trelor. Fantele se realizează, în ambele cazuri, pe un semifabri-

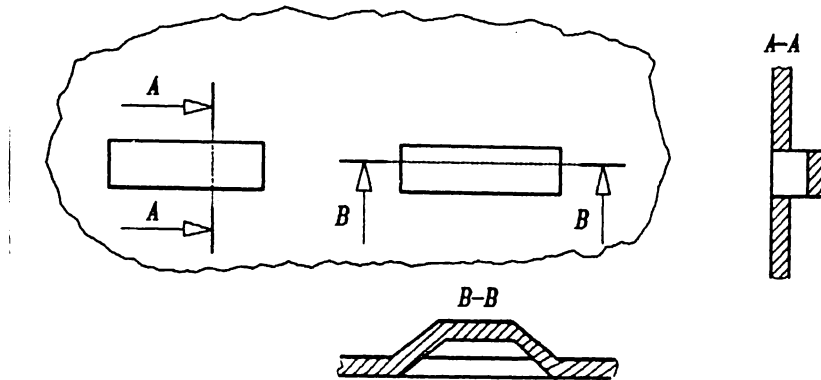


Fig.1.2 Forma fantelor realizate prin deformare plastică

cat plan, urmând apoi virolarea și asamblarea prin sudare longitudinală.

Avantajele realizării fantelor prin ștanțare și deformare plastică sunt:

- preț de cost scăzut;
- precizie ridicată;
- calitate corespunzătoare a suprafeței.

Simultan apar însă o serie de dezavantaje:

- imposibilitatea realizării fantelor direct pe țevă;
- necesitatea unor mașini de virolat de construcție specială;
- limitarea lungimii maxime a filtrelor posibil de realizat;
- obligativitatea asamblării prin sudare după realizarea fantelor, ceea ce scade precizia piesei;
- durabilitate scăzută a filtrelor;
- flux de fabricație lung.

1.2.2 Prelucrarea fantelor prin tăiere termică se realizează funcție de materialul supus prelucrării prin tăiere oxigaz sau prin tăiere cu plasmă, celelalte procedee neprezentând interes.

Deși costul realizării fantelor prin tăiere termică este foarte redus, aplicarea metodei este limitată datorită următoarelor dezavantaje [123, 124]:

- zonă influențată termic cu o adâncime mare, cu scăderea rezistenței la coroziune și apariția fisurilor;
- calitate a suprafețelor prelucrate redusă;
- precizie dimensională scăzută;
- imposibilitatea automatizării procesului de realizare a fantelor;
- lățime minimă a fantelor de 2 mm la tăierea oxigaz și 2,5 mm la tăierea cu plasmă;
- neuniformitate a lățimii fantei.

1.2.3 **Prelucrarea mecanică prin aşchiere** este o altă metodă de realizare a fantelor, materializată în principal prin frezarea cu freză disc. Deși este una din cele mai cunoscute metode de prelucrare dimensională, ea are o aplicabilitate redusă la prelucrarea fantelor datorită următoarelor restricții [9,44,99,100]:

- cost ridicat al sculei aşchietoare;
- timp mare necesar realizării unei fante;
- consum mare de energie electrică;
- lățime minimă a fantei limitată, dependentă de proprietățile materialului.

Se remarcă totuși că procedeul este simplu, utilizează mașini-unelte și scule standardizate, oferă o precizie dimensională și calitate a suprafeței superioare.

1.2.4 O metodă nouă și foarte eficientă de realizare a fantelor este **eroziunea electrică complexă**. Teoretic se pot utiliza scheme de prelucrare cu OT disc, bandă sau fir, dar practic s-a impus prelucrarea prin EEC cu OT disc. Metoda s-a impus datorită unor avantaje cum ar fi [13,27,52,89,90,102]:

- posibilități de prelucrare a materialelor metalice cu proprietăți fizico-mecanice excepționale;
- pierderi de material minime;
- construcție simplă a instalațiilor de prelucrare;
- cost scăzut și construcție simplă a „sculelor” pentru prelucrare;

- posibilități de automatizare completă a procesului de prelucrare;
- realizarea unor game largi de lățimi ale fantelor.

Cu toate avantajele prezentate anterior, realizarea fantelor prin EEC are și o serie de dezavantaje, care, printr-o implementare mai accentuată a procedurii în industrie, pot fi mult atenuate sau chiar înlăturate. Printre aceste dezavantaje menționăm:

- inexistența unor utilaje fabricate în serie, rezultând costuri mari pentru utilajele unicat;
- inexistența unei bănci de date referitoare la rezultatele obținute până în prezent în domeniul prelucrărilor prin EEC;
- limitarea dimensiunii maxime a semifabricatelor utilizate;
- inexistența unor cercetări aprofundate asupra corelațiilor dintre parametri de prelucrare și caracteristicile materialului de prelucrat.

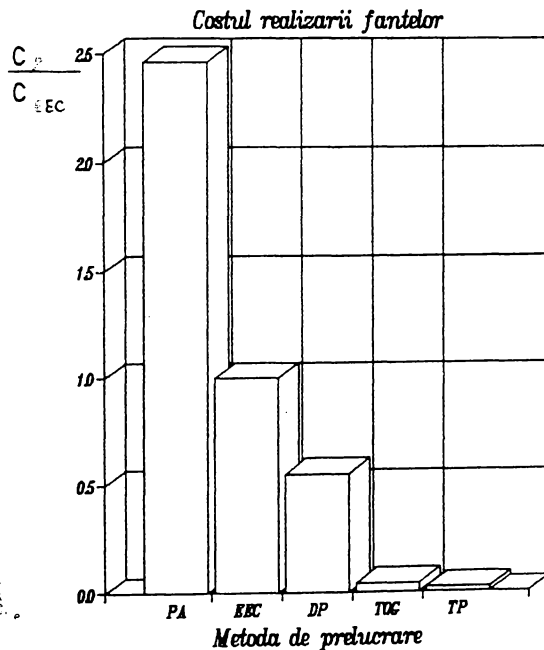


Fig.1.3 Costul prelucrării fantelor

Un factor important în alegerea procedurii de prelucrare a fantelor îl constituie prețul de cost al realizării lor. Considerând costul realizării unei fante prin EEC, C_{EEC} , egal cu unitatea, atunci costurile relative ale altor metode și procedee de fabricare a fantelor C_p / C_{EEC} se prezintă în figura 1.3.

Semnificațiile notațiilor din figura 1.3 sunt: PA - procedee de aşchiere; EEC - eroziune

electrică complexă; DP - stanțare și deformare plastică; FOG - tăiere oxigaz; TP - tăiere cu plasmă.

1.3 Stadiul actual al prelucrării dimensionale prin eroziune electrică complexă

Apărută în urmă cu peste jumătate de veac sub denumirea de „Metodă anodo-mecanică”, prelucrarea prin EEC a făcut pași importanți în cunoașterea și elucidarea fenomenelor fundamentale, cu stabilirea unor corelații între parametri principali ai procesului și caracteristicile tehnologice de bază, în relevarea unor particularități ale prelucrabilității unor materiale, în dezvoltarea unor noi aplicații și ale unor noi utilaje de prelucrare [20,52,58,62,75,79,81,87,88,102,103,105,106].

Toate aceste cercetări au deschis însă noi direcții de cercetare care vizează în principal:

- evidențierea clară a aportului fiecărui proces elementar de eroziune;
- definirea clară a parametrilor și factorilor prelucrării, precum și a dependențelor globale care se stabilesc între aceștia și caracteristicile tehnologice ale prelucrării;
- stabilirea unor modele matematice pentru modelarea procesului de prelucrare dimensională prin EEC;
- implementarea unor noi aplicații ale prelucrării prin EEC, inclusiv conceperea, proiectarea și realizarea unor noi utilaje de prelucrare.

1.3.1 Principiul prelucrării dimensionale prin eroziune electrică complexă

Prelucrarea dimensională prin EEC se bazează [52,85,89,102] pe dezvoltarea simultană a proceselor de dizolvare anodica și a descărcărilor electrice în impuls DEI în spațiul delimitat de obiectul de transfer OT, conectat la borna negativă a sursei de alimentare cu curent continuu, și de obiectul de prelucrat OP, conectat la borna pozitivă a aceleiași surse de alimentare cu

curent continuu (fig.1.4). Intre cele două obiecte se introduce un electrolit cu proprietăți speciale ML care în prezența câmpului electric generează o serie de procese fizice și chimice, dintre care o parte duc la erodarea progresivă a OP, iar altele

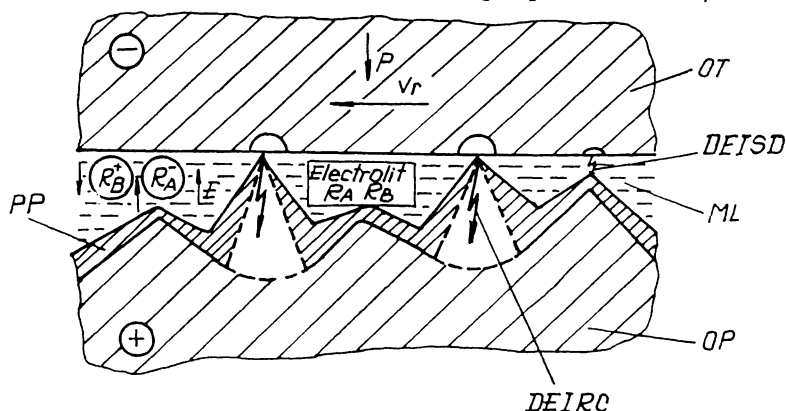


Fig.1.4 Schema de principiu a prelucrării prin EEC

determină formarea peliculei pasivizatoare PP pe suprafața OP.

Continuitatea procesului de dizolvare anodică se realizează prin acțiunea mecanică a OT, care se deplasează tangential pe suprafața OP cu viteza v_r , asigurând și presiunea de contact p . Sub acțiunea acestei solicitări mecanice, PP este îndepărtată la nivelul vîrfurilor microasperităților creându-se condițiile apariției DEI, astfel încât desfășurarea procesului de prelevare a materialului prin EEC este consecința prelucrării prin eroziune electrică și a prelucrării prin eroziune electrochimică cu depasivare mecanică.

În cazul prelucrării prin EEC au loc următoarele procese elementare de eroziune:

a) Prin conectarea celor două obiecte la bornele sursei de alimentare cu curent continuu, în prezența ML cu proprietăți electroconductoare apar procese anodice de decristalizare, transfer de sarcină, transport de substanță, reacții chimice, etc., în urma cărora pe suprafața anodului apare pelicula pasivă PP de mare rezistență mecanică și cu bune proprietăți dielectrice.

Grosimea PP atinge la un moment dat o valoare care determină oprirea procesului de dizolvare anodică, provocând pasivizarea anodului, fapt pentru care este necesară îndepărtarea ei mecanică prin abraziune de către OT. Se crează astfel condiții favorabile apariției proceselor de eroziune electrică prin declanșarea DEI.

DEI prezente în spațiul de lucru, amorsate între OT și OP, în condițiile existenței PP, a dizolvării anodice, a filmului de electrolit, cât și a cantităților mai mari sau mai mici de produse ale eroziunii aflate în suspensie, se pot genera fie prin ruperea contactelor metalice parcurse de curent (DEIRC), fie prin străpungerea dielectricului (DEISD).

Prin DEI amorsate între OP și OT se asigură în canalele descărcării densități de ordinul $10^3 \dots 10^5$ A/cm², cu durate cuprinse între $10^{-3} \dots 10^{-5}$ s, rezultând efecte termice materializate prin temperaturi de ordinul $10^4 \dots 10^5$ K, provocând topirea și vaporizarea explozivă a microasperităților metalice, simultan cu dezvoltarea unor procese termice de descompunere și degradare a electrolitului.

În aceste condiții în locul microvolumelor afectate termic vor apărea cratere, care vor fi supuse în continuare procesului de dizolvare anodică, precum și noi microasperități (vârfuri).

1.3.2 Parametrii și factorii care determină caracteristicile tehnologice la prelucrarea dimensională prin eroziune electrică complexă

Procesul prelucrării prin EEC este un proces complex, în cadrul căruia fenomenele fundamentale ce se desfășoară sunt dirijate și influențate de o întreagă suită de parametri și factori care acționează simultan într-o strânsă și continuă interdependență [15,16,18,52,60,61,78,107].

Mărirea și modul de variație al parametrilor și factorilor în timpul desfășurării procesului de prelucrare determină efectul eroziv global, acționează și dirijează ponderea fenomenelor elementare, participă direct la realizarea stabilității procesu-

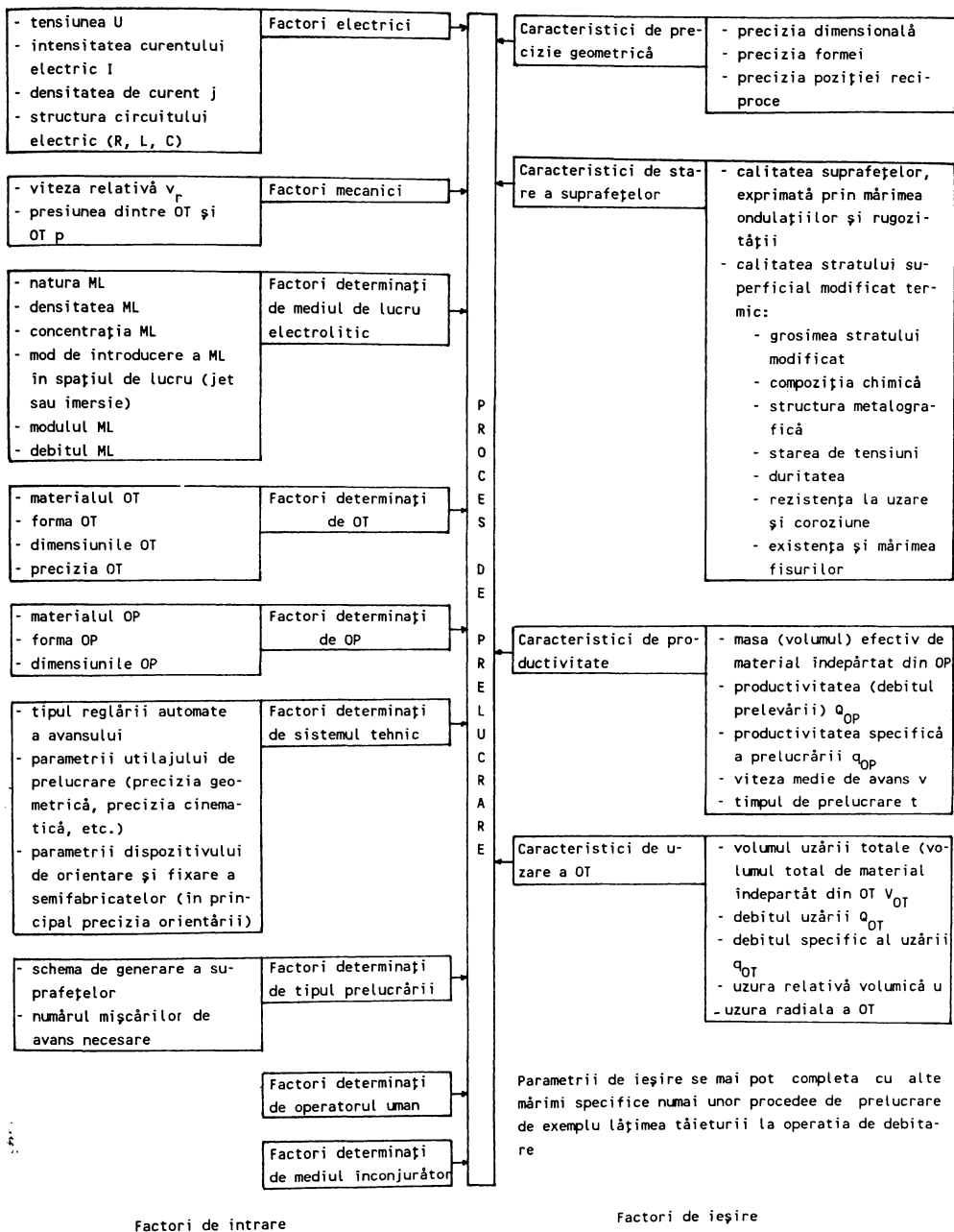


Fig.1.5 Schema factorilor de intrare și ieșire în cazul prelucrării prin EEC

lui de prelucrare, cât și la stabilirea caracteristicilor tehnologice finale (rugozitate, productivitate, grosime strat alb, mărime ZIT, prezență și mărime fisuri, uzură OT, viteză de prelucrare, etc.).

Schema principalelor categorii de factori de intrare și factori de ieșire în cazul prelucrării prin EEC este dată în figura 1.5. În figura 1.6 se prezintă principalii parametri de proces.

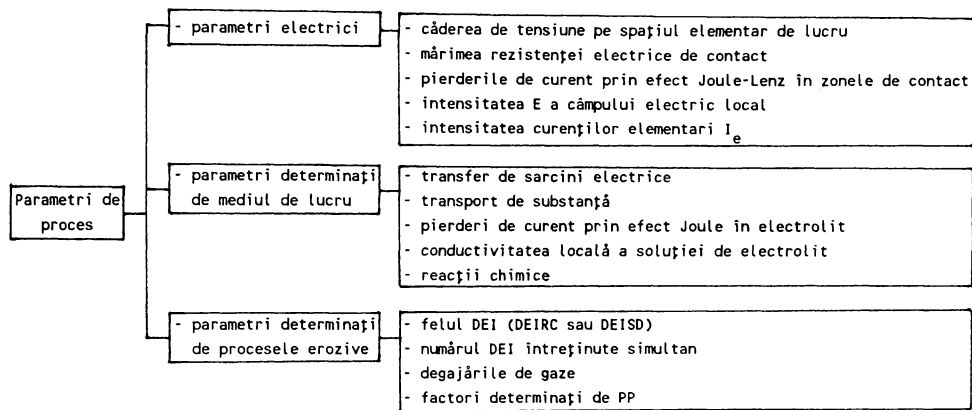


Fig.1.6 Schema parametrilor de proces

Se precizează că în cazuri concrete de prelucrare numărul parametrilor, atât cei de intrare cât și cei de ieșire, se pot completa cu alte mărimi specifice.

Este evident că unii parametrii au o importanță mai mare, alții mai mică, dar că toți sunt interconționați, fiind foarte dificilă punerea în evidență a influenței doar a unuia dintre ei. De aceea a fost necesară găsirea unor modalități noi de experimentare care să elimine acest dezavantaj.

În literatura de specialitate [14,52,85,89,102] se consideră că cei mai importanți factori și parametri de intrare sunt următorii:

Tensiunea electrică U pe spațiul de lucru este unul dintre cei mai importanți factori, determinând stabilitatea procesului de prelucrare. Din acest considerent este cel mai frecvent para-

metru de referință utilizat în realizarea sistemelor de reglaj automat al avansului. La valori normale (18 - 20 V), fenomenele din spațiul de lucru decurg corespunzător. În unele cazuri (de exemplu la rectificarea carburilor metalice) tensiunea pe spațiul de lucru poate lua valori mai mici.

Intensitatea curentului electric I , sau mai apropiat de realitate **densitatea de curent j** , sunt factorii determinanți în obținerea unor caracteristici tehnologice impuse. Mărimea lor reglează ponderea proceselor fundamentale din spațiul de lucru, dar mai ales energia DEI. Cu creșterea densității de curent (și implicit a intensității curentului), productivitatea crește, în detrimentul calității suprafeței prelucrate. De la o valoare maximă a densității de curent, din cauza curenților elementari mari din spațiul de lucru, crește frecvența scurtcircuitelor sau a descărcărilor electrice în arc staționar, ceea ce duce pe lângă o scădere rapidă a productivității, și la înrăutățirea accentuată a calității suprafeței prelucrate.

La aceleași valori ale intensității curentului electric și tensiunii pe spațiul de lucru, procesul eroziv este puternic influențat de tipul sursei de curent utilizate, sau folosind o aceeași sursă de curent, de parametri concentrați rezistență electrică R , capacitate C sau inductivitate L introduse în circuitul de lucru.

Presiunea dintre OT și OP p , pe lângă influența decisivă pe care o are asupra caracteristicilor tehnologice, influențează și densitatea de curent, respectiv intensitatea curentului din spațiul de lucru. Valoarea optimă se situează în intervalul $0,1 \dots 0,3 \text{ N/mm}^2$. La valori mai mici crește grosimea PP, iar la valori mai mari cresc numărul scurtcircuitelor, ambele situații ducând la scăderea productivității și la o instabilitate a procesului eroziv.

Viteza relativă v_r dintre OT și OP imprimă practic descărcării electrice caracterul de impuls, prin reglarea timpului descărcării. Și în acest caz se constată un interval optim ($v_r = 5 \dots 25 \text{ m/s}$) în care productivitatea prelucrării are un maxim, în condițiile unei stabilități corespunzătoare a procesului ero-

ziv. În afara influenței directe asupra duratei descărcării, viteza relativă v_r mai influențează și alți parametri, dar și accesul lichidului de lucru în spațiul de lucru și evacuarea produselor eroziunii. Deci viteza relativă v_r influențează forma, durata, energia și frecvența DEI.

Lichidul de lucru electrolitic cel mai frecvent utilizat este o soluție coloidală ale combinațiilor siliciului, a căror particule posedă sarcini electrice negative, care prin fenomenul de electroforeză migrează în soluție formând pelicule rezistente și vâscoase. Cel mai frecvent utilizat este soluția de silicat solubil de sodiu ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$), deoarece realizează cele mai ridicate performanțe. S-au mai utilizat și alte lichide (suspensii de caolin în apă cu adaosuri electrolitice, soluții de azotați, fosfați, etc.) fără rezultate corespunzătoare însă. Pentru silicatul solubil de sodiu se recomandă o densitate $\rho = 1,1 \dots 1,25 \text{ g/cm}^3$ și un modul $M = 2,8 \dots 3,2$.

Lichidul de lucru poate spăla spațiul de lucru fie prin jet, fie prin imersie, funcție de condițiile concrete de prelucrare.

Caracteristicile OT sunt de asemenea factori importanți în desfășurarea proceselor erozive la prelucrarea dimensională prin EEC, prin material, formă, dimensiuni și precizie de realizare. Cel mai frecvent se folosesc OT sub formă de disc, mai rar bandă și extrem de rar sub formă de fir. OT se realizează, din considerente economice, aproape exclusiv din oțel (fără pretenții deosebite de calitate a materialului), iar uneori din fontă. Deși cu OT din cupru, fontă sau alamă se obțin rezultate superioare, totuși prețul lor de cost ridicat nu este acoperit de creșterea productivității.

Principalii parametri de ieșire sunt următorii:

a) **Caracteristicile de precizie geometrică** (precizie dimensională, precizia formei, precizia poziției reciproce) se definesc la fel ca la oricare alt procedeu de prelucrare dimensională.

b) **Caracteristicile de stare a suprafețelor** sunt apreciate prin două categorii de mărimi:

- calitatea suprafețelor, exprimată prin mărimea ondu-

- lațiilor și rugozității (R_a , R_z , R_{max});
- caracteristicile stratului superficial modificat termic (grosime, compoziție chimică, structură metalografică, starea de tensiuni, duritate, rezistență la uzare și coroziune, existența și mărimea fisurilor).

Și în acest caz caracteristicile se definesc similar oricărui procedeu de prelucrare dimensională.

c) **Caracteristicile de productivitate**, exprimate prin mărimi- le:

- c₁) volumul prelevării totale V_{OP} , volum care depinde de:
- volumul mediu de material îndepărtat prin dizolvare anodică V_{DA} ;
 - volumul mediu al craterelor elementare V_{EP} ;
 - frecvența impulsurilor f_{EP} ;
 - timpul de prelucrare t ;

$$V_{OP} = (V_{EP} + V_{DA}) * f_{EP} * t = \frac{m_{OP1} - m_{OP2}}{\rho_{OP}} \quad [mm^3] \quad (1.1)$$

unde: m_{OP1} ; m_{OP2} - masa OP înainte, respectiv după prelucrare [g]; ρ_{OP} - densitatea materialului OP [g/mm³].

c₂) productivitatea prelucrării (debitul prelevării) Q_{OP} care reprezintă volumul de material îndepărtat în unitatea de timp:

$$Q_{OP} = \frac{V_{OP}}{t} = (V_{EP} + V_{DA}) * f_{EP} \quad [mm^3/min] \quad (1.2)$$

c₃) productivitatea specifică a prelucrării q_{OP} , care reprezintă eficacitatea energetică a prelevării:

$$q_{OP} = \frac{Q_{OP}}{I_m} \quad [mm^3/A.min] \quad (1.3)$$

unde: I_m - valoarea medie a intensității curentului de lucru.

În indicatorii prezentați anterior, volumele pot fi înlocuite cu mase, mai ușor de măsurat experimental, rezultând încă niște indicatori similari cu cei prezentați.

c₄) viteza medie de avans v_m care este viteza medie cu care

se realizează mișcarea de avans.

d) **Caracteristicile de uzare a OT** caracterizează transformările ce se produc la OT, definindu-se similar cu cele de la OP:

d₁) volumul uzării totale V_{OT} , adică volumul mediu efectiv de material prelevat din OT:

$$V_{OT} = V_{ET} \cdot f_{EP} \cdot t = \frac{m_{OT1} - m_{OT2}}{\rho_{OT}} \quad [\text{mm}^3] \quad (1.4)$$

unde: V_{ET} - volumul mediu uzat din OT la fiecare DEI; f_{EP} - frecvența DEI; t - timpul de prelucrare; m_{OT1} , m_{OT2} - masa înainte, respectiv după prelucrare a OT; ρ_{OT} - densitatea materialului OT;

d₂) debitul uzării Q_{OT} , care reprezintă volumul de material uzat în unitatea de timp din OT:

$$Q_{OT} = \frac{V_{OT}}{t} = V_{ET} \cdot f_{EP} \quad [\text{mm}^3/\text{min}] \quad (1.5)$$

d₃) debitul specific al uzării q_{OT} , care reprezintă volumul de material îndepărtat din OT, în unitatea de timp, sub acțiunea unui curent mediu de 1 A:

$$q_{OT} = \frac{Q_{OT}}{I_m} \quad [\text{mm}^3/\text{A} \cdot \text{min}] \quad (1.6)$$

d₄) uzura relativă volumică u , reprezintă volumul procentual de material uzat din OT pentru prelevarea unității de volum din OP:

$$u = \frac{V_{OT}}{V_{OP}} \cdot 100 = \frac{Q_{OT}}{Q_{OP}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1.7)$$

1.3.3 Utilajul tehnologic de prelucrare prin eroziune electrică complexă

Indiferent de destinație, orice utilaj de prelucrare prin

EEC trebuie să conțină sistemele funcționale prezentate în figura 1.7, sisteme care pot fi unități separate sau înglobate într-o construcție unitară.

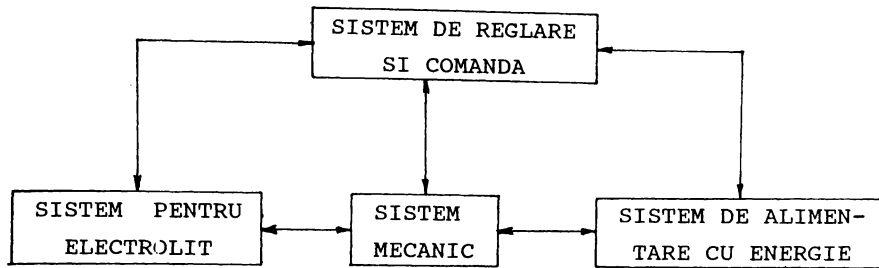


Fig.1.7 Sistemele funcționale ale unui utilaj de prelucrare dimensională prin EEC

Rolul funcțional al fiecărui bloc este:

a) **Sistemul mecanic** asigură:

- instalarea OP și OT;
- cinematica necesară generării suprafețelor;
- realizarea avansului OP sau OT necesar prelucrării;
- dirijarea corespunzătoare a ML;
- evacuarea surplusului de lichid de lucru, a produselor eroziunii și a aerosolilor formați.

Sistemul mecanic din structura mașinilor de prelucrare prin EEC este funcție de operația sau operațiile executate, existând o gamă extrem de largă de soluții constructive adoptate. Materializarea unor construcții de utilaje de prelucrare pentru realizarea fantelor prin EEC se vor prezenta în capitolul 5.

b) **Sistemul pentru electrolit** asigură stocarea, curățirea și recircularea lichidului de lucru.

c) **Sistemul de alimentare cu energie electrică** asigură energia necesară constituirii agenților erozivi și alimentarea cu energie a celorlalte sisteme.

Sistemul de alimentare cu energie electrică a spațiului de lucru în vederea constituirii agenților erozivi și a dezvoltării proceselor elementare de eroziune îl reprezintă, în principal re-

dresoarele mono- sau trifazate, sau generatoarele de curent continuu, cu caracteristici rigidizate.

În circuitul electric de alimentare se mai pot intercala rezistențe electrice sau inductivități pentru influențarea caracteristicilor tehnologice.

d) **Sistemul de comandă și reglare** acționează asupra tuturor sistemelor prezentate anterior, interdependente total.

Deplasarea relativă dintre OP și OT pe direcția și în sensul de prelucrare este necesară pentru realizarea unui contact electric corespunzător unei presiuni de $0,1 \dots 0,3 \text{ N/mm}^2$, presiune care poate fi realizată prin mai multe metode:

- d₁) acționare gravitațională a avansului sculei;
- d₂) acționare manuală sau mecanică, rigidă sau elastică, a avansului (analog mașinilor-unelte clasice);
- d₃) acționare automată a avansului prin:
 - urmărirea forței de reacțiune;
 - urmărirea parametrilor electrici ai prelucrării.

Metodele de acționare de la punctele d₁ și d₂ se folosesc în cazul mașinilor de prelucrat de complexitate redusă, la care este necesară prezența permanentă a operatorului uman.

Soluția optimă de automatizare a avansului este aceea de urmărirea parametrilor electrici ai prelucrării și anume:

- căderea de tensiune pe interstițiu U_s [V];
- intensitatea curentului prin interstițiul de lucru I [A];
- densitatea de curent prin interstițiu j [A/mm²].

2 CERCETARI TEORETICE SI EXPERIMENTALE LA PRELUCRAREA PRIN EROZIUNE ELECTRICA COMPLEXA

S-a acceptat în literatura de specialitate [52,85,89,102] că prelucrarea prin EEC se bazează pe existența în spațiul de lucru a proceselor fundamentale de dizolvare anodică și a descărcărilor electrice în impuls. Ponderea lor în prelevarea de material, precum și evoluția lor în timp în spațiul de lucru nu a fost complet elucidată, procesele fiind analizate aprofundat, dar preponderent teoretic și analizate experimental separat.

2.1 Procesele elementare de prelucrare dimensională prin eroziune electrică complexă

2.1.1 Dizolvarea anodică, fenomen fundamental la pre- lucrarea dimensională prin eroziune electrică complexă

La conectarea OT și OP la sursa de curent continuu, în spațiul de lucru, în prezența mediului lichid de lucru ML, apare un câmp electric de intensitate E , orientat ca în figura 2.1.

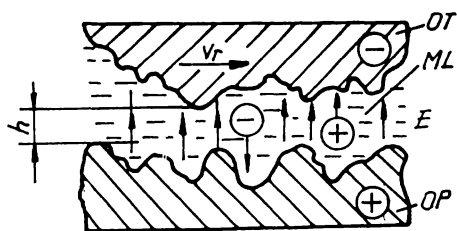
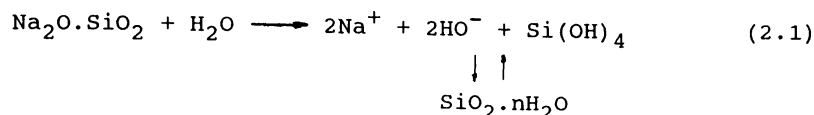


Fig.2.1 Starea inițială a spațiului de lucru

Conductivitatea soluțiilor de silicați, alcaline, scade puternic cu creșterea concentrației, și scade cu creșterea modului de silice până la disilicat, după care tinde să devină neschimbată.

Conductivitatea foarte ridicată a soluției diluate poate fi explicată numai prin concentrația ionilor rezultați în urma hidrolizei după schema de

mai jos:



Conductibilitatea electrică a silicaților bazici poate fi explicată prin existența micelilor de SiO_2 , cu mai multe sarcini care permite examinarea soluțiilor de silicați ca „electroliți coloidali”.

În soluțiile diluate, prezența micelilor coloidale, purtătoare unei cantități mari de sarcini electrice, condiționează o ridicată conductivitate electrică. Odată cu creșterea concentrației se produce mărirea micelilor cu mai multe sarcini, ca urmare a combinării lor una cu alta în agregate mai mari. Însă mobilitatea agregatelor mai mari devine considerabil mai mică, și în soluțiile concentrate ea are valori foarte mici.

Acest fenomen este cu atât mai pregnant cu cât modulul de silice este mai mare.

Etapile dizolvării anodice sunt:

- descreșterea rețelei cristaline (decrystalizare);
- transfer de sarcină;
- transport de substanță;
- reacții chimice.

Oricare din aceste etape poate avea o viteză mai mare sau mai mică și poate controla viteza întregului proces.

Dizolvarea unui metal pur se realizează conform schemei:



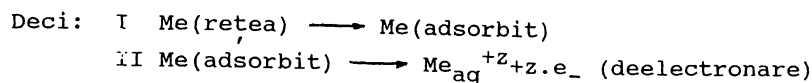
unde: Me - metal în formă hidratată;

e - electron;

z - valența metalului.

Atomul-ion trece prin etapa intermediară de atom adsorbit. În această etapă reacția anodică a fost inițiată, deci nu mai există atom-ion, dar etapa de transfer de sarcină nu a avut loc,

deci nu se poate vorbi de ioni.



Poten\civalul de deelectronare pentru un anumit curent exterior este factorul care condi\cioneaz\u0103 dizolvarea anodic\u0103:

$$\Delta\phi = \Delta\phi^{\circ} + \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln \frac{[M^{+z}]}{[M]} + \eta \quad (2.3)$$

unde: R - constanta Regnault;
T - temperatura absolut\u0103;
z - valen\c7a elementului;
F - num\u0103rul lui Faraday;
 η - suprapoten\civalul la curentul I aplicat.

La dizolvarea anodic\u0103 a metalelor drept criteriu orientativ al ordinii de dizolvare se consider\u0103 ordinea poten\civalelor normale standard.

Dizolvarea anodic\u0103 a unor metale ce prezint\u0103 mai multe trepte de valen\c7\u0103 (Cu, Fe) are loc cu randament total de curent 1, dar cantit\u0103\c7ile de ioni de cele dou\u0103 valen\c7e care se formeaz\u0103 depinde de poten\civalul sistemelor M/M^{+z1} ; M/M^{+z2} .

Dizolvarea anodic\u0103 a unui aliaj este un proces complex care depinde nu numai de poten\civalele diversilor componen\c7i, dar \c7i de raportul cantitativ \u00een care se g\u0103sesc ace\c7i componen\c7i.

Indat\u0103 ce este atins poten\civalul celui mai electronegativ element \u00eencepe dizolvarea anodic\u0103 a acestuia.

Faraday a admis ipoteza conform c\u0103reia pasivitarea este provocat\u0103 de un film sub\c7ire de oxid.

Dac\u0103 pe anod se formeaz\u0103 un film gros, apare pasivitarea mecanic\u0103. Acest film \u00empiedic\u0103 dizolvarea anodului prin efect chimic dac\u0103 filmul este compact, \c7i prin suprapoten\cival de transport dac\u0103 filmul este poros.

Instaurarea st\u0103rii pasive depinde de gradul de solubilitate a produsului anodic ob\c7inut.

Deci la eroziunea electrochimică se parcurg etapele:

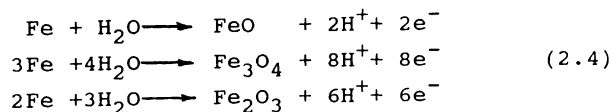
- dizolvare metal;
- descărcare O_2 pe zonele pasivate;
- pasivare (blocarea suprafețelor prin produși de hidroliză și prin oxizi).

Starea pasivă se instalează treptat. Fierul Fe se dizolvă atât sub formă Fe^{2+} cât și Fe^{3+} . La $\Delta\phi > 0,8V$, dizolvarea decurge exclusiv ca Fe^{3+} , pe când înaintea instalării stării pasive exclusiv ca Fe^{2+} . Densitatea de curent foarte mică rămâne constantă până la atingerea potențialului de descărcare a O_2 .

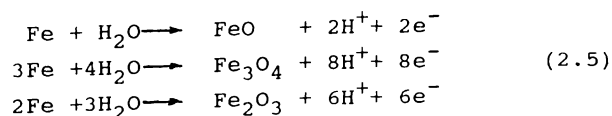
Pe suprafața metalului se depune un strat de sare, în a cărui pori care corespund cu zonele neacoperite ale anodului, suprafața este mult mai mare decât cea corespunzătoare secțiunii geometrice a electrodului. Acest strat de sare se dizolvă cu o viteză suficient de mare astfel încât nu poate să asigure pasivitatea anodului. Viteza sa de dizolvare-difuzie va controla și limita dizolvării anodului.

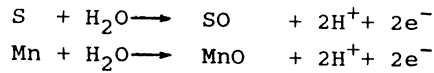
Creșterea densității de curent determină depășirea potențialului $\Delta\phi$ și formarea stratului pasivizator de oxid. Stratul pasivizator de oxid este fără pori. Dacă metalul anodului a fost complet acoperit, faza metalică nu mai poate reacționa cu particulele din soluție. Existența curentului foarte mic ce apare în starea pasivă este determinat de o foarte mică dizolvare a oxidului, și de eventualele impurități din PP.

Oxizii ce se formează sunt FeO , Fe_3O_4 , Fe_2O_3 :



În cazul oțelului (Fe, C, Si, P, Mn, S), pelicula pasivă este formată de reacțiile:





De asemenea, datorită temperaturilor înalte, din silicatul solubil de sodiu se depune în PP, bioxidul de siliciu (SiO_2).

Tot în spațiul de lucru se degajă oxigen și hidrogen provenite din reacțiile de descompunere electrochimică a apei și din reacțiile de oxidare hidrolitică.

Veridicitatea mecanismului fizic de formare a PP prezentat mai sus a fost pusă în evidență experimental în [102], prin înregistrarea variațiilor curentului din spațiul de lucru prin oscilografii. Durata procesului de pasivizare a OP este foarte mică, de 0,06...0,3 s, la parametrii electrici curent utilizați la prelucrarea prin EEC, timp însă suficient ca OT și OP să vină în contact, la nivelul microasperităților, datorită avansului de lucru s.

La sfârșitul acestei etape, spațiul de lucru se prezintă ca în figura 2.2, curentul prin spațiul de lucru fiind neglijabil.

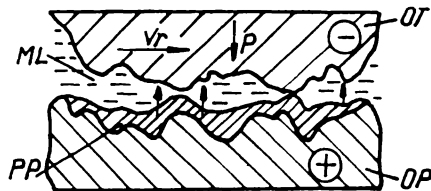


Fig.2.2 Starea spațiului de lucru la sfârșitul etapei de dizolvare anodică

Deci practic procesul de prelevare de material încetează.

Pentru a reactiva procesul de prelevare este necesară îndepărtarea PP rezultate în urma procesului de dizolvare anodică. Pentru aceasta se trece, în următoarea etapă de prelucrare, la îndepărtarea prin frecare mecanică a PP, la nivelul vârfurilor microasperității, frecare datorată deplă-

sării relative dintre OT și OP cu viteza v_r și apariției suplimentare a unei presiuni de contact p între cele două obiecte (electrozi), presiune dată de mișcarea de avans s , după realizarea contactului.

Prin îndepărtarea PP se crează condițiile favorabile pregătirii apariției DEIRC.

2.1.2 Descărcarea electrică în impuls prin rupere de contact electric

Pregătirea DEI începe din momentul realizării contactului fizic dintre două microasperități, una aparținând OP și alta OT, realizându-se în următoarele etape:

2.1.2.1 **Pregătirea impulsului de curent** se realizează în cazul contactului singular [52], ca în figura 2.3.

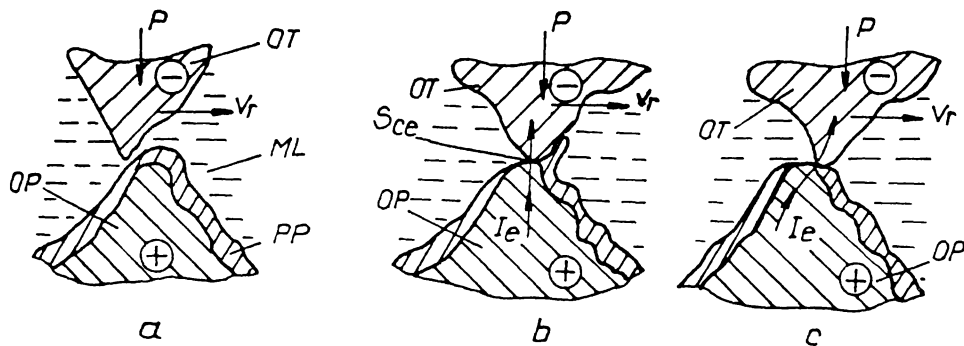


Fig.2.3 Etapele de pregătire a DEIRC

După îndepărtarea de către microasperitatea OT a PP, pe OP (fig.2.3 a) se realizează un microcontact metallic de suprafață S_{ce} , prin care trece curentul elementar I_e (fig.2.3 b). Datorită deplasării relative dintre OT și OP se ajunge în poziția din figura 2.3 c, în care suprafața de contact este foarte mică, practic nulă, trecându-se la etapa următoare.

2.1.2.2 **Amorsarea și dezvoltarea DEI prin ruperea contactului electric** se realizează în condițiile prezenței la nivelul suprafețelor de contact a unei temperaturi foarte ridicate a celor două microasperități, temperaturi care favorizează emisia termoelectronică. La început va apare un microarc care se dezvoltă rapid, în condițiile unei ionizări puternice în prezența vaporilor de metal (fig.2.4), constituindu-se DEIRC propriu-zisă.

Durata de întreținere a DEIRC este foarte mică, fiind în funcție de condițiile locale, de mărimea parametrilor electrici

(U, I, R, L, C), de viteza

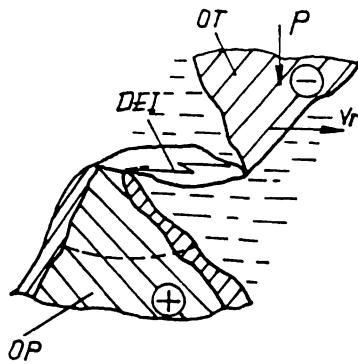


Fig.2.4 Etapa constituirii DEIRC

relativă v_r dintre OP și OT. Tocmai

durata mică de întreținere imprimă fenomenului caracterul de impuls, DEIRC păstrându-se în regim tranzitoriu.

2.1.2.3 **Intreruperea DEI** se produce datorită creșterii rapide a distanței dintre cele două micro-asperități, una de pe OP și alta de pe OT, respectiv scăderii sub o anumită limită a intensității câmpului electric din coloana arcului și scăderii ionizării electronice și termice.

În urma exploziei punții conductoare, materialul metallic vaporizat și topit datorită fenomenelor termice dezvoltate, este expulzat în ML și evacuat din zona de interacțiune dintre OT și OP (fig.2.5).

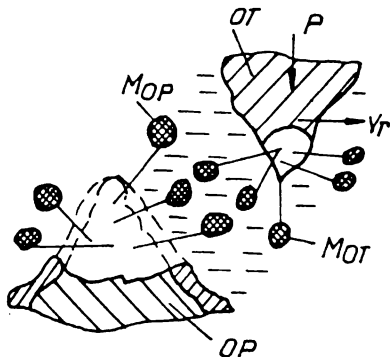


Fig.2.5 Etapa stingerii prin explozie a DEIRC

Ca urmare a acestui proces, în zona DEIRC, pe OP apare un crater, care este umectat de mediul de lucru.

Făcând abstracție de temperatura materialului adiacentă craterului, în prezența câmpului electric de intensitate E, ar trebui să se dezvolte din nou fenomenul de dizolvare anodică și procesul să se reia.

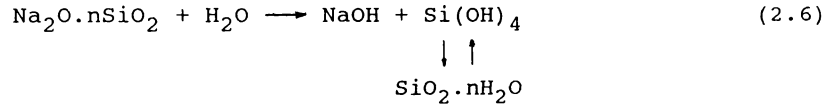
În realitate stratul de material de la suprafața craterului are o temperatură foarte ridicată, astfel încât la contactul ML (soluția de silicat solubil de sodiu) cu materialul supraîncălzit au loc o serie de reacții fizice și chimice, în urma cărora ia naștere, practic

prin efect termic, o peliculă pasivă cu caracteristici mecanice și electrice similare PP apărute în faza inițială prin dizolvare anodică. Este evident că astfel procesul de dizolvare anodică nu se mai poate dezvolta, nefiind însă necesar pentru continuarea procesului de prelucrare, pentru că PP există deja.

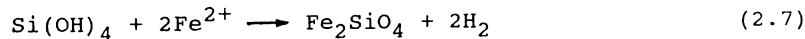
Pentru a dovedi cele afirmate mai sus de pe o suprafață supusă prelucrării prin EEC s-a prelevat PP formată, care a fost supusă unor analize fizice și chimice pentru identificarea componentelor, și reconstituirea cu ajutorul lor, a proceselor fizice și chimice din spațiul de lucru, după realizarea DEIRC.

Principala analiză realizată a fost cea Röntgen, care a pus în evidență ca și componentă predominantă ortosilicatul feros Fe_2SiO_4 , care se formează prin următoarele reacții:

- la dizolvarea silicatulului solubil în apă se formează acidul silicic $Si(OH)_4$ și hidroxidul de sodiu NaOH, conform reacției:



- Fierul rezultat prin topirea metalului, aflat pe suprafața craterului, reacționează cu acidul silicic formând ortosilicatul feros, conform reacției:



Analiza Röntgen se bazează pe determinarea unghiului de refracție caracteristic diversilor compuși cristalini.

Din analiza diagramei prezentate în figura 2.6 rezultă că cel mai pronunțat pic apare pentru un unghi de refracție $\alpha = 18^\circ$, corespunzător ortosilicatulului feros și caracteristic pentru structura compusului determinat. Acest lucru rezultă și din tabelul 2.1, în care s-au sintetizat datele cuprinse în diagrama de analiză.

Pe același esanțion, pentru identificarea compuşilor sub

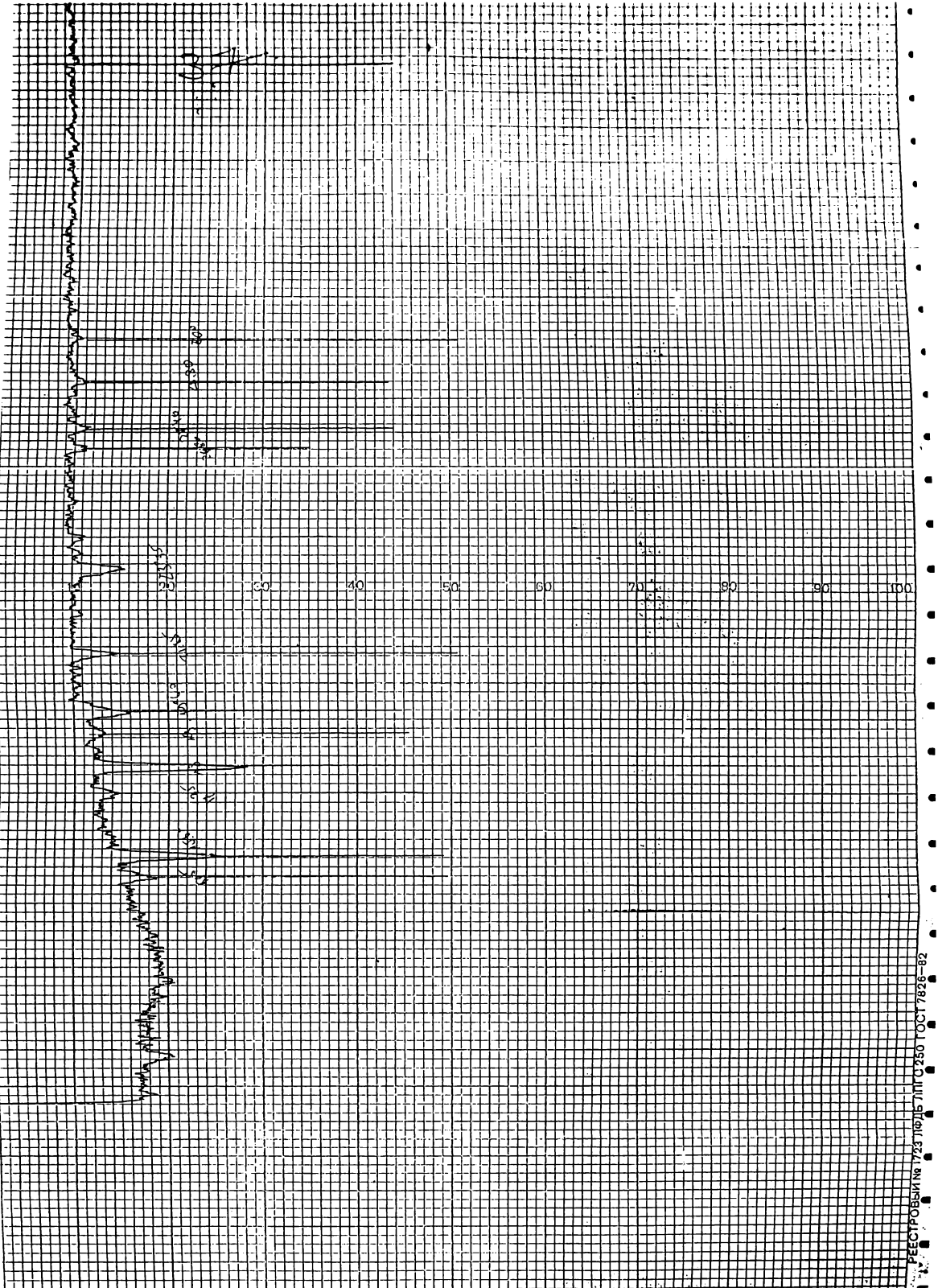


Fig.2.6 Diagrama corespunzătoare analizei Röntgen a pp rezultate în procesul de prelucrare prin EEC

РЕКОМЕНДОВАНОЕ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО 9286-82

Tabelul 2.1
 Valorile unghiurilor de refracție α și a distanțelor d_α corespunzătoare diagramei din figură 2.6

Nr. pic	Unghi de refracție α [°]	Distanța d_α	Intensitatea picului
1	30,00	1,5393	slabă
2	28,80	1,5976	slabă
3	27,40	1,6724	slabă
4	26,80	1,7070	slabă
5	24,30	1,8703	slabă
6	23,35	1,9419	medie
7	21,15	2,1331	medie
8	19,90	2,2944	medie
9	19,00	2,3640	slabă
10	18,00	2,4906	foarte puternică
11	17,35	2,5809	slabă
12	15,60	2,8620	tare
13	15,05	2,9641	slabă

formă de gel s-a utilizat metoda termică diferențială, metodă care se bazează pe măsurarea temperaturii probei și compararea acesteia cu temperatura unei substanțe etalon, la încălzirea concomitentă și egală în același cuptor. Atâta timp cât la încălzire nu apar transformări de fază în substanța analizată, termometrul diferențial, care măsoară diferența de temperatură între substanța analizată și cea etalon, nu indică nici o modificare de temperatură. Orice transformare endotermă sau exotermă de fază a probei duce la punerea în evidență a unei temperaturi ΔT . Rezultatele experimentale au fost materializate în diagrama din figura 2.7.

În aceeași direcție, o a doua metodă de analiză aplicată a fost analiza termogravimetrică, care constă în măsurarea masei probei cercetate în cursul încălzirii ei într-un anumit interval de temperatură. Se înregistrează simultan atât variația masei, cât și variația temperaturii. Curba termografică rezultată reprezintă variația masei probei în funcție de temperatură.

Analiza termogravimetrică permite obținerea următoarelor informații asupra sistemului analizat:

- stabilirea domeniilor de stabilitate termică a compusului cercetat;

Fig.2.7 Diagrama corespunzătoare analizei termice diferențiale a
PP rezultate în procesul de prelucrare prin EEC

- determinarea punctelor și intervalelor de descompunere termică sau interacțiune cu mediul înconjurător;
- determinarea stoichiometriei reacțiilor de descompunere termică, respectiv de interacțiune cu mediul (cel mai frecvent oxidări).

Produsul obținut de pe suprafața probelor a avut inițial o masă de $m_0 = 0,1695$ g, iar masa finală în urma deshidratării $m_f = 0,1263$ g. Intervalul de temperatură în care s-a făcut determinarea a fost cuprins între $20 \dots 1000^\circ\text{C}$, rezultând diagrama din figura 2.8.

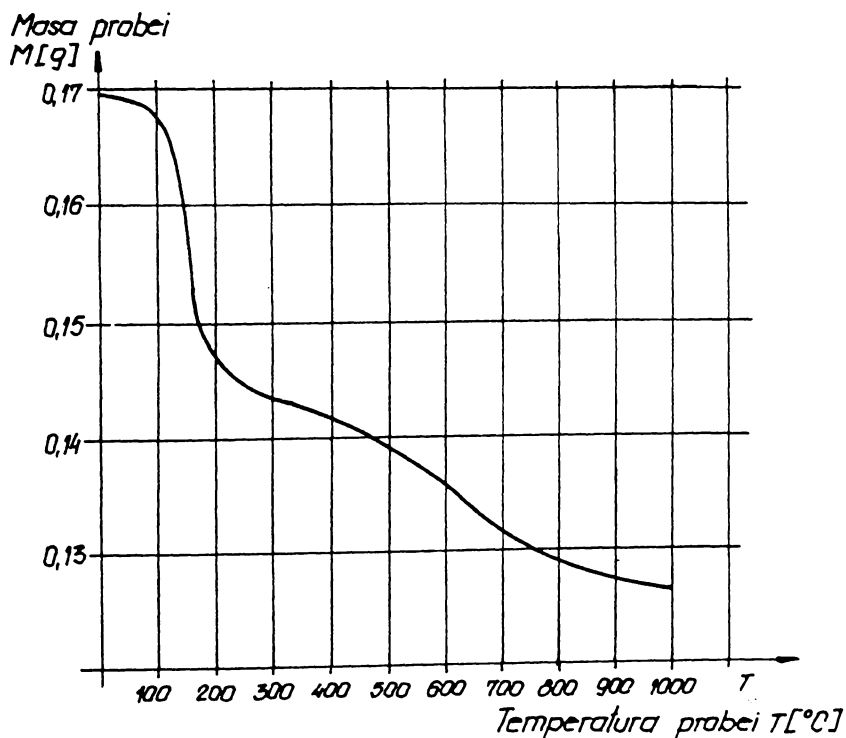


Fig.2.8 Variația masei probei prelevate din PP rezultate în procesul de prelucrare prin EEC la analiza termogravimetrică

In urma acestor analize s-a constatat că produsele care apar

ca urmare a proceselor de dizolvare anodică au o pondere extrem de mică.

S-a constatat de asemenea prezența unor compuși rezultați din descompunerea la temperaturi înalte a mediului de lucru (soluția de silicat solubil de sodiu). Așa cum s-a arătat (2.6), în soluție apare silice, care la temperatură înaltă suferă un proces de deshidratare conform reacției:



pe suprafața piesei apărând bioxid de siliciu, detectat în urma analizelor prezentate.

Un al doilea grup de experimentări realizate s-au referit la producerea, pe un stand special, numai a procesului de eroziune electrochimică, însă în condiții identice cu cele din timpul prelucrării și cu parametri identici. Experimentul a confirmat experiențele asemănătoare prezentate în [102]. S-a constatat că pe electrodul legat la polul pozitiv al sursei de curent (de fapt OP) s-a format o peliculă pasivă care a stopat procesul de dizolvare anodică (curentul din spațiul de lucru a luat o valoare foarte mică). PP realizată exclusiv prin dizolvare anodică s-a supus aceluși analize ca și probele prelevate anterior (analiza Röntgen, analiza termică diferențială și analiza termogravimetrică). S-a constatat că apar numai produse specifice procesului de dizolvare anodică.

Experimentele realizate confirmă practic că procesul de dizolvare anodică apare cu pondere masivă doar în faza inițială a prelucrării, după apariția DEI ea nemaiapărând, sau acționând într-o proporție extrem de mică.

2.1.3 Amorsarea și dezvoltarea descărcărilor electrice în impuls prin străpungerea unui dielectric

În unele zone ale spațiului de lucru se pot realiza condiții favorabile amorsării unor DEI prin străpungerea unui dielectric (DEISD), similar celor apărute în cazul prelucrării prin eroziune

electrică. Dintre condițiile care favorizează apariția DEISD se pot aminti:

- grosimea mai mică a PP;
- conținutul ridicat de impurități electroconductoare în PP sau în ML;
- temperatura locală.

Ponderea DEISD în comparație cu DEIRC nu poate fi determinată, fiind funcție de condițiile concrete din spațiul de lucru, dar se poate afirma că energia lor este mult mai mică decât energia DEIRC, și deci și ponderea în prelevarea de material este mult mai mică, ținând cont și de valoarea scăzută a diferenței de potențial.

2.1.4 Fenomenele fundamentale în spațiul de lucru la prelucrarea prin eroziune electrică complexă în condiția prezenței contactelor multiple

Tot ceea ce s-a prezentat anterior s-a făcut în condițiile existenței unui contact singular între OP și OT. Ori, în condiții normale, între suprafețele active ale OP și ale OT se realizează contactul în mai multe puncte concomitent, fenomenele însă dezvoltându-se similar. Este evident că intensitatea curentului în fiecare contact va fi în funcție de intensitatea globală a curentului din spațiul de lucru.

2.2 Influența modului de spălare a spațiului de lucru asupra principalelor caracteristici tehnologice ale prelucrării prin eroziune electrică complexă

Pentru dezvoltarea proceselor elementare din spațiul de lucru este necesară prezența unui mediu de lucru lichid electro-litic (cel mai frecvent soluție de silicat solubil de sodiu). Lichidul poate fi introdus în spațiul de lucru în două moduri:

- sub formă de jet (fig.2.9);
- prin imersiónarea OP și parțial a OT, în ML din cuva Cv (fig.2.10).

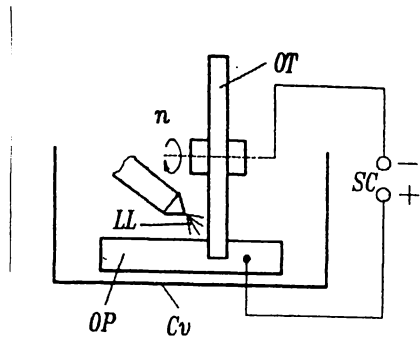


Fig. 2.9 Schema prelucrării prin EEC cu spălarea spațiului de lucru cu jet

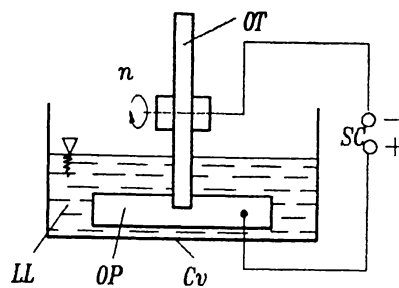


Fig. 2.10 Schema prelucrării prin EEC cu spălarea spațiului de lucru prin imersie

În cazul realizării prin EEC a fantelor deschise (fig. 2.11) și mai ales a fantelor închise (fig. 2.12), în zona de ieșire a OT din material, condițiile de acces a ML în spațiul de lucru sunt

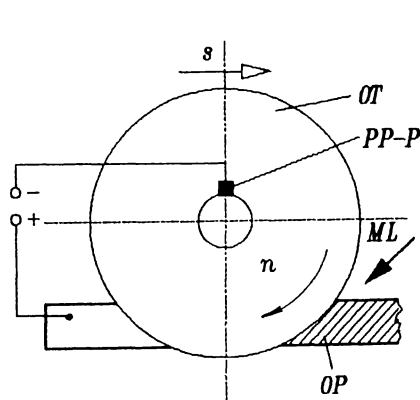


Fig. 2.11 Prelucrarea fantelor deschise prin EEC

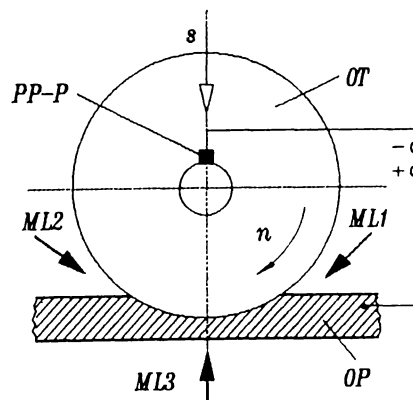


Fig. 2.12 Prelucrarea fantelor închise prin EEC

deficitare. Chiar prin plasarea în aceste zone a unor duze suplimentare (ML₂) pentru dirijarea lichidului de lucru, datorită

vitezelor mari ale discului OT, procesul nu se îmbunătățește simțitor. Procesul s-ar îmbunătăți prin amplasarea unei duze în partea inferioară (ML_3). Inșă acest lucru complică mult sistemul de lichid de lucru, fiind necesare și debite mult mai mari de lichid. In plus, în cazul realizării fantelor în conducte, plasa-rea duzelor devine imposibilă.

Singura soluție posibilă în acest ultim caz este utilizarea variantei de prelucrare prin imersia OP.

De pe aceste poziții s-a analizat comparativ, funcție de modul de spălare, câteva caracteristici tehnologice principale la realizarea fantelor prin EEC. Pentru a putea urmări variația rugozității pe toată lungimea fantei, s-au realizat experimentele prin practicarea unor fante deschise pe toată lungimea semifabricatului.

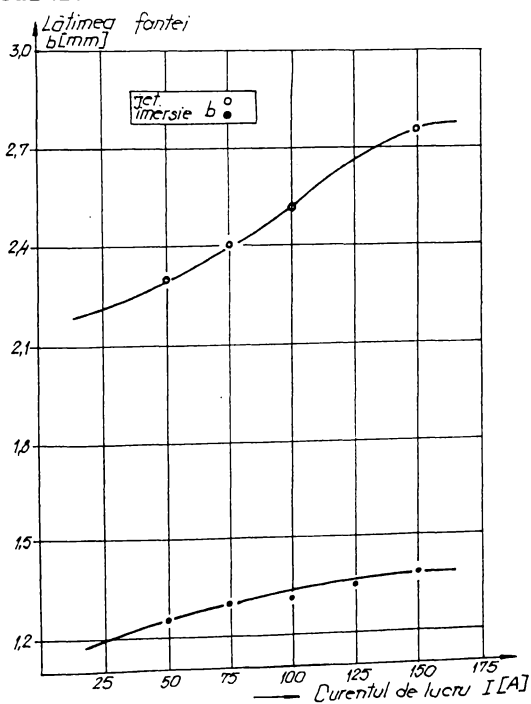


Fig.2.13 Variația lățimii fantei în funcție de curentul de prelucrare

In cercetările efectuate s-au urmărit drept parametri tehnologici principali următoarele mărimi: viteza medie de avans automat, productivitatea prelucrării, lățimea fantei și rugozitatea suprafețelor prelucrate. Pentru ca rezultatele să fie concludente, s-au păstrat constante toate condițiile de prelucrare (curent, tensiune, caracteristicile ML, viteza relativă OP-OT, tipul, materialul și dimensiunile semifabrica-

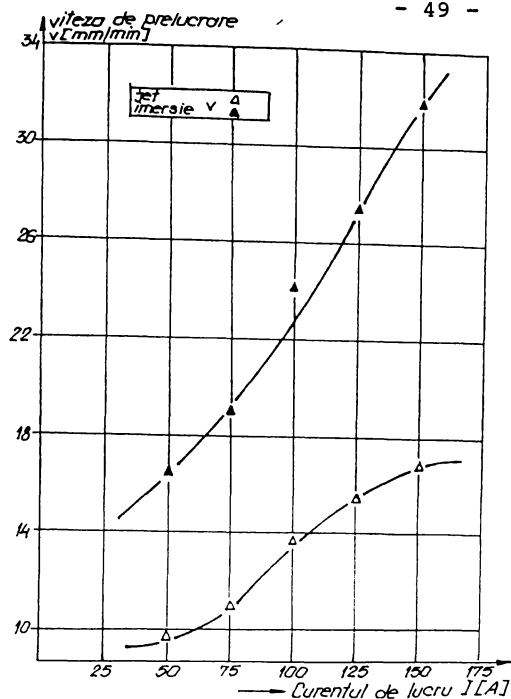


Fig.2.14 Variația vitezei de prelucrare în funcție de curentul de prelucrare

telor, etc.).

Inercările s-au efectuat pe mașina MEC 100, proiectată și realizată în catedra „Tehnologie mecanică” din Facultatea de Mecanică Timișoara.

Rezultatele obținute au fost sintetizate în diagramele din figurile 2.13, 2.14, 2.15 și 2.16.

Analizând graficele prezentate se remarcă următoarele aspecte caracteristice ale prelucrării prin imersia OP:

- calitatea su-

prafetelor prelucrate se îmbunătățește;

- crește precizia dimensională și precizia formei;
- scade consumul energetic ca urmare a micșorării timpului de funcționare a pompei (care este în funcție doar la umplere);
- se îmbunătățesc condițiile de muncă, prin scăderea volumului aerosolilor formați, nemaifiind necesară instalația de ventilație a cuvei de lucru.

Se remarcă faptul că toate aceste avantaje prezentate se produc în condițiile în care practic productivitatea rămâne neschimbată, în raport cu prelucrarea la care ML este introdus în spațiul de lucru prin jet. În aceleași condiții se poate afirma că și uzura relativă a OT scade, însă relativ puțin.

O observație importantă se referă la lățimea fantei prelucrate în cele două condiții (fig.2.13), care are o scădere accen-

tuată în condițiile prelucrării prin imersia OP, simultan cu o

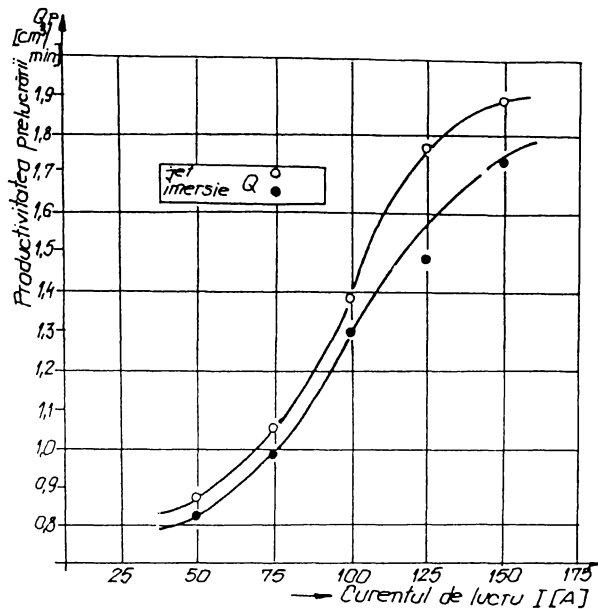


Fig.2.15 Variația productivității prelucrării în funcție de curentul de prelucrare

creștere a calității suprafețelor prelucrate, inclusiv a uniformității ei, ceea ce duce la o precizie dimensională crescută. Acest lucru, ca de altfel și observațiile anterioare, se explică prin:

- realizarea unei pelicule pasivatoare uniformă pe toată suprafața de contact dintre electrozi, micșorându-se posibilitatea apariției descărcărilor în arc nestaționar, descărcări care aduc numai dezavantaje (consum suplimentar de energie, fără efect de prelevare de material, uzură accentuată a OT, degradarea suprafețelor prelucrate, etc.);
- îmbunătățirea condițiilor de evacuare în exterior a căldurii rezultate în proces.

Observația, foarte importantă în stabilirea tehnologiei de realizare a fantelor devine esențială la prelucrările prin debitare, unde, prin scăderea lățimii tăieturii rezultă o serie de avantaje specifice:

- timpul de debitare scade cu până la 45%, sesizându-se inclusiv o scădere pronunțată a energiei specifice consumate pentru debitarea unității de lungime de material;
- adaosul de prelucrare la debitare scade, rezultând o economie importantă de material.

Un aspect important cercetat s-a referit la un alt parametru

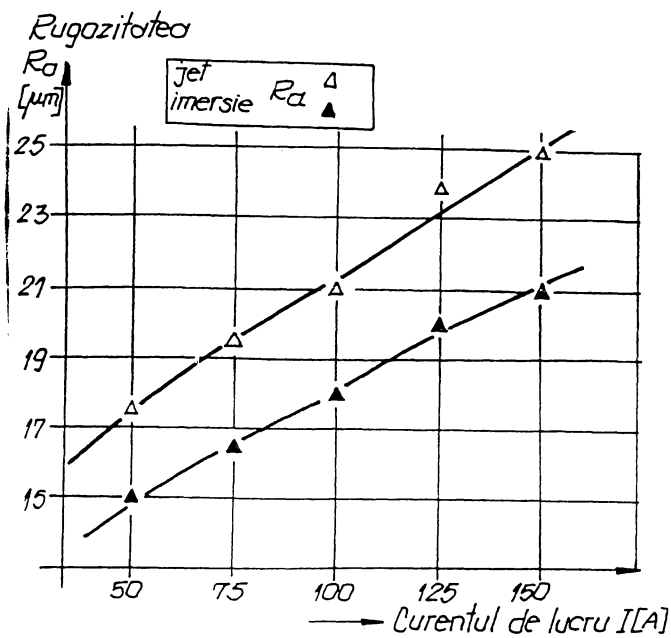


Fig.2.16 Variația rugozității suprafețelor prelucrate în funcție de curentul de prelucrare

al calității suprafeței, și anume la numărul n de intersecții ale liniei medii cu profilul (fig. 2.17). Măsurătorile au fost efectuate cu ajutorul unui profilometru „Kalibr” tip 252. Se constată:

a) pentru ambele moduri de spălare creșterea curentului de lucru conduce la creșterea rugozității și scăderea lui n , aspecte explicabile prin următoarele.

Datorită caracteristicii externe a sursei relativ rigidă (fig.2.18), creșterea

curentului de lucru conduce la o scădere nesemnificativă a tensiunii ($I_1 > I_2$; $\Delta U = U_1 - U_2 \cong 0$). Creșterea curentului se realizează pe seama creșterii presiunii din spațiul de lucru. La prima vedere s-ar părea că numărul descărcărilor electrice ar crește, curentul mai mare fiind preluat de un număr mai mare de descărcări simultane, și practic, puterea descărcării pe impuls ar rămâne constantă, și deci și rugozitatea. În realitate însă, numărul DEI simultane rămâne aproximativ constant [50, 52], crearea condițiilor de apariție a unei noi descărcări, conducând la dispariția altora, probabilitatea existenței unui număr mare de canale fiind foarte mică. Curentul mai mare repartizându-se pe același număr de descărcări individuale, conduce la realizarea unor cratere de dimensiuni mai mari, atât

ca adâncime, cât și ca diametru, regăsindu-se în partea experi-

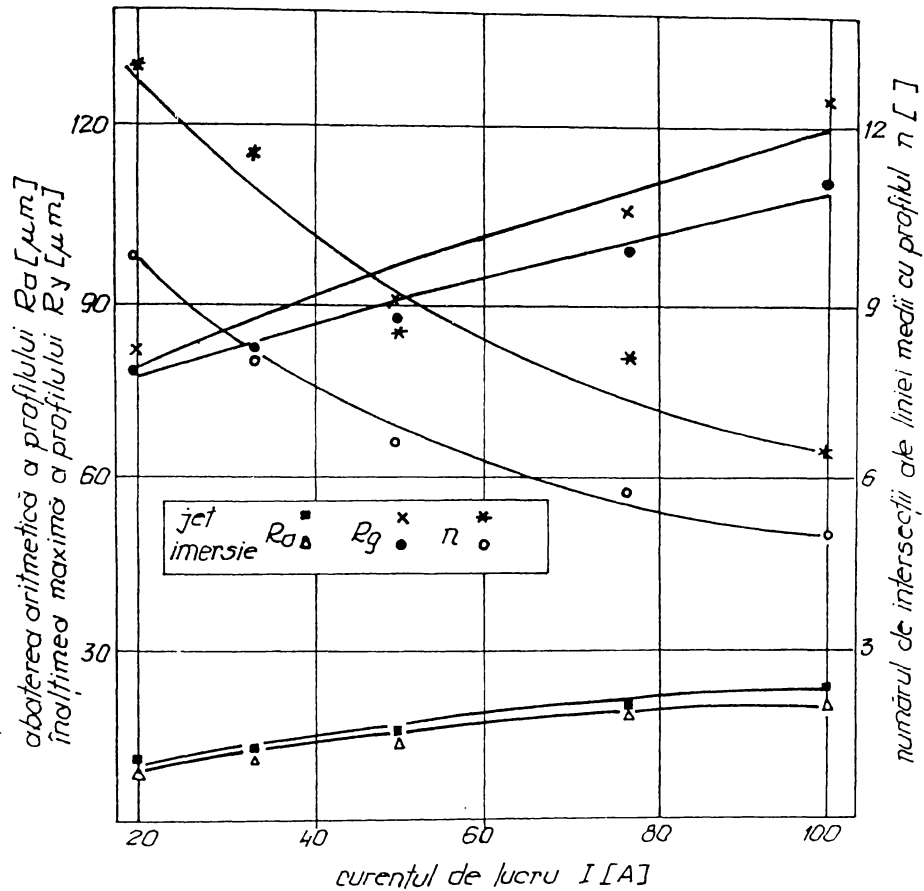


Fig.2.17 Variația unor parametri de calitate a suprafeței prelucrate prin EEC în funcție de curentul de prelucrare

mentală în creșterea rugozității.

Datorită simplității soluției constructive, utilajele de prelucrare prin EEC cu jet au fost proiectate și realizate astfel încât semifabricatul metalic supus prelucrării să fie izolat electric față de mașină. Pentru a evita pasivizarea întregului OP, și deci operații suplimentare de curățare ulterioară, se

recomandă ca la mașinile care au posibilități de prelucrare și

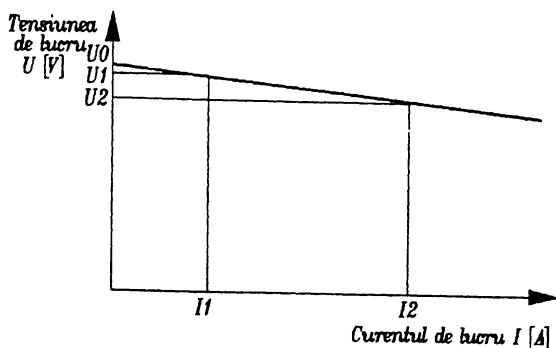


Fig.2.18 Caracteristica externă a sursei

prin imersie, piesa OP să nu mai fie izolată față de mașină, realizându-se izolarea electrică a OT față de mașină, prin izolarea lagărelor arborelui port-disc.

Principalele avantaje ale celor două moduri de spălare a spațiului de lucru sunt:

a) pentru cazul jetului:

- volume mai mici ale rezervorului și implicit cantități de ML mai mici;
- inexistența unor sisteme sofisticate de etanșare a spațiului de lucru (a incintei de prelucrare);
- utilizarea unei pompe de debit relativ mic, fiind necesară, în general, o singură pompă;

b) pentru cazul imersiei OP:

- calitate superioară a prelucrării (lățime a fantei realizate mai mică, rugozitate mai mică, etc.);
- incintă de lucru mai simplă (o simplă cuvă);
- stabilitate mai mare a procesului eroziv.

Totodată cele două procedee au și o serie de dezavantaje și anume:

a) pentru cazul jetului:

- lățimi mari ale fantelor (dezavantajos în cazul debitărilor);
- imposibilitatea realizării dirijării jetului de ML în condiții corespunzătoare (în unele cazuri);
- necesitatea unor construcții complicate a sistemelor pentru ML, respectiv a unor debite foarte mari, în cazul suprafețelor active mari;

- incinte de lucru complicate, prevăzute cu un sistem de ventilație pentru evacuarea aerosolilor.
- b) pentru cazul imersiei OP:
- necesitatea a două pompe pentru ML, una de debit mare pentru umplerea cuvei (timp de umplere minim), și alta cu un debit mai mic pentru recircularea ML;
 - sisteme de etansare a incintei de lucru relativ complicate, în cazul OP de lungime foarte mare sau forme geometrice complexe (pentru reducerea dimensiunilor cuvei);
 - volum de lichid de lucru utilizat mare, deci rezervoare de stocare de capacitate mai mare.

Având în vedere avantajele și dezavantajele prezentate, se recomandă următoarele:

- pe cât posibil, mașinile de prelucrare prin EEC să permită prelucrarea atât cu jet, cât și cu imersarea OP;
- pentru piesele de dimensiuni mici, cu suprafețe de interacțiune de dimensiuni mici, utilizarea prelucrării cu jet;
- pentru piesele de dimensiuni mari, cu suprafețe de interacțiune de dimensiuni mari, utilizarea prelucrării prin imersia OP;
- sunt cazuri în care prelucrarea cu jet nu se poate realiza, fiind obligatorie prelucrarea prin imersie (de exemplu în cazul fantelor realizate în OP tubulare).

3 MODELAREA MATEMATICĂ A PROCESULUI DE PRELUCRARE DIMENSIONALA PRIN EROZIUNE ELECTRICA COMPLEXA

Prin modelarea matematică a procesului de prelucrare se urmărește realizarea unui model fizic, care să ușureze studiul modelului real. Prin intermediul modelelor matematice se stabilesc relații de dependență fizice, care prin transpunere pe modelul real ușurează alegerea sau stabilirea tehnologiilor de prelucrare, facilitează optimizarea tehnologiilor, permit determinarea parametrilor tehnologici optimi.

În modelarea matematică a procesului de prelucrare dimensională prin EEC s-a adoptat varianta utilizării metodelor statistice de prelucrare a datelor, datorită avantajelor pe care acestea le oferă (eficiență ridicată, reducerea numărului experimentelor realizate, etc.) [5,71,73,76,93,94,115,118,119,121,122].

3.1 Modelarea statistică a procesului de prelucrare prin eroziune electrică complexă prin metoda experimentului psihologic

O problemă de o importanță deosebită care se pune la stabilirea unor tehnologii de fabricație, inclusiv în stabilirea principalilor parametri tehnologici ai prelucrării prin EEC, este stabilirea factorilor cu influență majoră, cu pondere semnificativă în procesul considerat.

Există relativ multe metode care pot fi aplicate pentru a rezolva această problemă (metoda bilanțului aleator, metoda experimentului factorial, metoda analizei dimensionale, etc.) dar ele necesită un volum mare de încercări experimentale.

Stabilirea ordinii de influență a diversilor parametri asupra unor mărimi de ieșire, precum și gruparea parametrilor în grupe de influență se poate realiza prin metoda experimentului

psihologic. Utilitatea metodei constă în faptul că ea permite ierarhizarea factorilor independenți, eliminarea celor ne semnificativi și concentrarea atenției numai asupra celor importanți, printr-un experiment relativ simplu, fără consum de manoperă, materiale și energie pentru experimentări, deci cu cheltuieli minime. Metoda se bazează pe anchetarea unor specialiști din domeniu și apoi prelucrarea statistică a informațiilor culese.

Pentru derularea experimentului psihologic se parcurg următoarele etape:

3.1.1 Stabilirea parametrilor prelucrării și a indicatorilor de performanță

Pe baza experienței anterioare, a cercetării bibliografiei de specialitate, se stabilesc parametrii reglabili (mărimile de intrare), mărimi care în mod obligatoriu trebuie să fie mărimi independente, să poată fi evidențiate și reglate.

Pentru cazul prelucrării prin EEC s-au stabilit ca principale mărimi de intrare independente următoarele:

- x_1 - p [bar] - presiunea dintre OP și OT;
- x_2 - v_r [m/min] - viteza relativă dintre OP și OT;
- x_3 - R [Ω] - rezistența din circuitul electric de alimentare a spațiului de lucru;
- x_4 - L [H] - inductivitatea din circuitul electric de alimentare a spațiului de lucru;
- x_5 - C [F] - capacitatea din circuitul electric de alimentare a spațiului de lucru;
- x_6 - iL - natura mediului lichid de lucru (compoziție chimică, densitate, modul, etc.);
- x_7 - IL - modul de introducere a lichidului de lucru în spațiul de lucru (imersie sau jet);
- x_8 - Me - materialul OT;
- x_9 - FOT - forma OT (disc, bandă, fir);
- x_{10} - g [mm] - grosimea OT.

Principalele mărimi de ieșire, respectiv principalii indicatori de performanță care interesează în cazul prelucrării prin

EEC sunt:

- Q_p [mm^3/min] - productivitatea prelucrării definită ca volumul de material prelevat din OP în unitatea de timp;
- Q_e [mm^3/min] - debitul uzării, definit ca volumul de material prelevat din OT în unitatea de timp;
- R_a [μm] - calitatea suprafeței exprimată prin rugozitate ca abatere medie aritmetică a profilului real față de linia mijlocie;
- H_s [μm] - adâncimea stratului modificat termic inclusiv adâncimea microfisurilor care apar în procesul de prelucrare, ca urmare a efectului termic al DEI;
- s_l [mm] - interstițiul lateral, adică distanța dintre OT și marginea suprafeței prelucrate, măsurată paralel cu axa de rotație a OT, importantă mai ales la operații de profilare, dar și la operații de debitare, având în vedere consumul de material (coeficientul de utilizare a materialului OP);
- v_e [mm/min] - viteza de avans, măsurată pe direcția de avans, ea fiind de fapt viteza liniară de eroziune.

3.1.2 Intocmirea chestionarului

Chestionarul (formularul de anchetă) trebuie să fie foarte clar, să nu dea loc la interpretări, să ofere suficiente informații dar să nu influențeze opiniile specialiștilor consultați.

Ele trebuie să fie într-un număr suficient pentru ca fiecărui specialist consultat să i se ofere câte un chestionar, care nu se mai prezintă altui specialist, pentru a nu influența rezultatele experimentului.

În chestionar, pentru ca parametrii indicați să fie cât mai clari, s-a realizat și o schemă a procesului de prelucrare.

După întocmirea chestionarelor, ele se înmânează, câte un exemplar, fiecărui specialist, cu instrucțiunile de completare. Specialiștii sunt rugați să acorde un punctaj fiecărui parametru, în ordine crescătoare, corespunzătoare influenței pe care o au parametrii asupra indicatorilor de performanță analizați. Astfel

cel mai important parametru va primi un punct, următorul două puncte, etc., până la epuizarea celor n parametri. De menționat că în cazul în care mai mulți parametri nu pot fi diferențiați între ei ca importanță, ei vor primi toți același rang.

În cazul prezentat, au fost consultați un număr $m = 20$ specialiști (s_j) de la Facultatea de Mecanică din Timișoara, toți specialiști având tangență cu domeniul prelucrării prin EEC.

3.1.3 Sinteza informațiilor

În tabelul 3.1 sunt sintetizate datele referitoare la Q_p , în tabelul 3.2 datele referitoare la Q_e , în tabelul 3.3 datele referitoare la R_a , în tabelul 3.4 datele referitoare la H_s , în tabelul 3.5 datele referitoare la s_1 și în tabelul 3.6 datele referitoare la v_e .

În tabelele 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 s-au făcut următoarele notații:

- x_i - parametrul reglabil de ordinul i ($i=1...10$);
- s_j - specialistul numărul j ($j=1...20$);
- a_{ij} - rangul parametrului x_i , dat de specialistul s_j ;
- $\sum a_{ij}$ - sumele rangurilor acordate fiecărui parametru;
- $e_j^{(1)}$ - ordinea de influență stabilită pentru prima etapă de prelucrare a rezultatelor.

3.1.4 Corecția și ponderarea valorilor primare

În cazul în care mai mulți parametri au primit același rang de influență din partea unor specialiști, se face corecția valorilor, ținând cont de locul real al parametrilor în șirul de ordonare. Tabelul utilizat este identic cu cel prezentat în tabelele anterioare, cu deosebirea că $e_j^{(1)}$ se înlocuiește cu $e_j^{(2)}$, adică cu ordinea de influență stabilită pentru etapa corectării valorilor primare.

În tabelele 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12 s-au prezentat datele corectate pentru Q_p , respectiv pentru Q_e , R_a , H_s , s_1 și v_e .

Date primare referitoare la Q_p Tab. 3.1

	p	v_r	R	L	C	LL	IL	Me	FOT	g
s_1	2	3	4	1	9	9	7	8	6	5
s_2	1	3	6	9	10	7	4	8	5	2
s_3	1	2	5	8	10	6	7	9	3	4
s_4	1	2	3	6	8	4	5	9	7	4
s_5	1	2	5	5	5	3	4	7	6	6
s_6	1	2	2	2	2	3	2	3	4	3
s_7	2	1	3	3	4	5	6	4	7	2
s_8	2	1	1	1	1	3	3	4	2	2
s_9	2	5	3	3	3	4	4	2	2	1
s_{10}	5	6	1	4	5	2	3	3	7	3
s_{11}	1	2	4	6	5	3	8	7	3	2
s_{12}	2	1	4	4	4	1	3	5	6	7
s_{13}	2	3	1	3	8	7	4	6	5	5
s_{14}	1	2	4	3	2	3	5	6	6	6
s_{15}	2	4	6	5	5	3	3	1	4	2
s_{16}	1	1	2	1	1	1	1	3	4	2
s_{17}	1	3	3	3	2	2	3	5	4	6
s_{18}	2	1	3	4	2	1	2	2	1	1
s_{19}	3	3	1	5	4	1	1	1	1	2
s_{20}	1	2	5	5	5	4	3	7	7	6
Σa_{ij}	34	49	66	82	96	71	76	99	90	71
$\theta_j^{(1)}$	1	2	3	7	9	4-5	6	10	8	4-5

Date corectate referitoare la Q_p Tabelul 3.7

	p	v_r	R	L	C	LL	IL	Me	FOT	g
s_1	2	3	4	1	9,5	9,5	7	8	6	5
s_2	1	3	6	9	10	7	4	8	5	2
s_3	1	2	5	8	10	6	7	9	3	4
s_4	1	2	3	7	9	4,5	6	10	8	4,5
s_5	1	2	6	6	6	3	4	10	8,5	8,5
s_6	1	4	4	4	4	8	4	8	10	8
s_7	2,5	1	4,5	4,5	6,5	8	9	6,5	10	2,5
s_8	6	2,5	2,5	2,5	2,5	8,5	8,5	10	6	6
s_9	3	10	6	6	6	8,5	8,5	3	3	1
s_{10}	7,5	9	1	6	7,5	2	4	4	10	4
s_{11}	1	2,5	6	8	7	4,5	10	9	4,5	2,5
s_{12}	3	1,5	6	6	6	1,5	4	8	9	10
s_{13}	2	3,5	1	3,5	10	9	5	8	6,5	6,5
s_{14}	1	2,5	6,5	6,5	4,5	2,5	4,5	8	9,5	9,5
s_{15}	2,5	6,5	10	8,5	8,5	4,5	4,5	1	6,5	2,5
s_{16}	3,5	3,5	7,5	3,5	3,5	3,5	3,5	9	10	7,5
s_{17}	1	5,5	5,5	5,5	2,5	2,5	5,5	9	8	10
s_{18}	6,5	2,5	9	10	6,5	2,5	6,5	6,5	2,5	2,5
s_{19}	7,5	7,5	3	10	9	3	3	3	3	6
s_{20}	1	2	6	6	6	4	3	9,5	9,5	8
Σa_{ij}	55,0	76,0	102,5	121,5	134,5	102,5	111,5	147,50	138,5	110,5
$\theta_j^{(2)}$	1	2	3-4	7	8	3-4	6	10	9	5

Date primare referitoare la Q_e Tab. 3.2

	p	v_r	R	L	C	LL	IL	Me	FOT	g
s_1	2	3	4	1	9	9	6	8	7	5
s_2	1	6	9	8	10	7	5	3	4	2
s_3	1	4	5	9	8	6	7	3	2	10
s_4	1	3	5	7	9	4	6	2	10	8
s_5	1	2	7	7	7	5	4	3	6	6
s_6	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
s_7	2	1	3	3	4	6	5	2	8	7
s_8	2	3	2	1	1	3	3	2	2	4
s_9	1	2	4	3	2	4	4	4	4	4
s_{10}	5	6	1	4	5	2	3	3	7	3
s_{11}	1	1	5	6	7	3	8	3	4	2
s_{12}	2	2	4	4	4	3	3	1	5	5
s_{13}	4	5	1	6	3	8	3	2	8	7
s_{14}	1	2	4	4	3	2	3	3	5	5
s_{15}	1	4	6	5	5	2	4	1	4	3
s_{16}	1	2	2	1	1	1	1	3	4	1
s_{17}	1	2	3	3	2	3	4	1	2	2
s_{18}	1	3	4	4	1	2	4	1	2	2
s_{19}	1	1	3	3	3	2	2	2	2	1
s_{20}	1	6	4	4	4	2	5	6	3	7
Σa_{ij}	31	59	77	84	89	75	81	54	91	86
$\theta_j^{(1)}$	1	3	5	7	9	4	6	2	10	8

Date corectate referitoare la Q_e Tabelul 3.8

	p	v_r	R	L	C	LL	IL	Me	FOT	g
s_1	2	3	4	1	9,5	9,5	6	8	7	5
s_2	1	6	9	8	10	7	5	3	4	2
s_3	1	4	5	9	8	6	7	3	2	10
s_4	1	3	5	7	9	4	6	2	10	8
s_5	1	2	9	9	9	5	4	3	6,5	6,5
s_6	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	9,5	9,5
s_7	2,5	1	4,5	4,5	6	8	7	2,5	10	9
s_8	4,5	8	4,5	1,5	1,5	8	8	4,5	4,5	10
s_9	1	2,5	7,5	4	2,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
s_{10}	7,5	9	1	6	7,5	2	4	4	10	4
s_{11}	1,5	1,5	7	8	9	4,5	10	4,5	6	3
s_{12}	2,5	2,5	7	7	7	4,5	4,5	1	9,5	9,5
s_{13}	5	6	1	7	3,5	9,5	3,5	2	9,5	8
s_{14}	1	2,5	7,5	7,5	5	2,5	5	5	9,5	9,5
s_{15}	1,5	6	10	8,5	8,5	3	6	1,5	6	4
s_{16}	3,5	7,5	7,5	3,5	3,5	3,5	3,5	9	10	3,5
s_{17}	1,5	4,5	8	8	4,5	8	10	1,5	4,5	4,5
s_{18}	2	7	9	9	2	5	9	2	5	5
s_{19}	2	2	9	9	9	5,5	5,5	5,5	5,5	2
s_{20}	1	9	5	5	5	2	7	8	3	10
Σa_{ij}	47,5	91,5	125	127	124,5	109,5	123	82	139,5	130,5
$\theta_j^{(2)}$	1	3	7	8	6	4	5	2	10	9

Date primare referitoare la R_a Tab. 3.3

	p	v_r	R	L	C	LL	IL	Me	FOT	g
s_1	2	3	4	1	9	9	5	6	7	8
s_2	1	2	3	4	5	7	6	8	9	10
s_3	4	2	5	3	1	7	6	8	9	10
s_4	2	1	5	3	4	6	7	8	9	10
s_5	3	2	7	7	7	1	4	6	5	5
s_6	2	2	1	1	3	3	3	3	4	4
s_7	3	1	2	3	1	5	6	4	8	7
s_8	3	2	3	1	1	3	2	4	4	4
s_9	1	4	4	3	2	4	4	4	4	4
s_{10}	5	4	1	2	3	2	3	6	8	7
s_{11}	4	1	2	2	2	3	8	5	6	7
s_{12}	6	4	7	1	1	3	2	5	7	7
s_{13}	1	2	1	3	2	5	5	4	5	5
s_{14}	1	1	2	1	2	4	4	3	5	4
s_{15}	1	2	3	2	2	3	6	4	5	3
s_{16}	1	2	2	1	1	2	2	3	4	4
s_{17}	1	1	2	2	2	3	4	5	6	6
s_{18}	1	1	5	3	1	2	5	1	3	4
s_{19}	3	3	3	1	1	5	2	2	2	4
s_{20}	1	2	7	6	5	3	4	10	9	8
Σa_{ij}	46	42	69	50	53	80	87	98	117	121
$\theta_j^{(1)}$	2	1	5	3	4	6	7	8	9	10

Date primare referitoare la H_s Tab. 3.4

	p	v_r	R	L	C	LL	IL	Me	FOT	g
s_1	3	2	5	1	9	9	4	8	6	7
s_2	1	2	3	4	5	7	6	9	8	10
s_3	2	3	7	8	6	5	4	1	10	9
s_4	1	2	4	3	5	7	6	8	9	10
s_5	1	2	5	5	5	4	3	7	6	6
s_6	2	2	2	2	1	2	3	3	3	3
s_7	3	2	3	3	1	3	3	3	5	4
s_8	2	2	2	1	1	3	3	4	3	4
s_9	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3
s_{10}	6	5	1	2	3	4	3	5	7	5
s_{11}	3	4	2	2	2	1	6	5	7	7
s_{12}	5	3	4	2	2	6	1	7	7	7
s_{13}	1	2	1	4	4	5	3	5	5	5
s_{14}	1	1	2	2	2	4	3	4	3	3
s_{15}	2	2	3	3	1	4	6	6	5	5
s_{16}	1	1	2	1	1	3	3	4	4	4
s_{17}	2	3	1	1	1	5	4	8	7	6
s_{18}	4	5	1	2	4	4	1	4	3	4
s_{19}	2	2	2	1	1	2	3	1	1	3
s_{20}	3	1	2	2	2	5	4	6	7	8
Σa_{ij}	46	48	54	51	59	85	71	101	109	113
$\theta_j^{(1)}$	1	2	4	3	5	7	6	8	9	10

Date corectate referitoare la R_a Tabelul 3.9

	p	v_r	R	L	C	LL	IL	Me	FOT	g
s_1	2	3	4	1	9,5	9,5	5	6	7	8
s_2	1	2	3	4	5	7	6	8	9	10
s_3	4	2	5	3	1	7	6	8	9	10
s_4	2	1	5	3	4	6	7	8	9	10
s_5	3	2	9	9	9	1	4	7	5,5	5,5
s_6	4,5	4,5	2	2	2	7,5	7,5	7,5	7,5	10
s_7	4,5	1,5	3	4,5	1,5	7	8	6	10	9
s_8	6	3,5	6	1,5	1,5	6	3,5	9	9	9
s_9	1	7	7	3	2	7	7	7	7	7
s_{10}	7	6	1	2,5	4,5	2,5	4,5	8	10	9
s_{11}	6	1	3	3	3	5	10	7	8	9
s_{12}	7	5	9	1,5	1,5	4	3	6	9	9
s_{13}	1,5	3,5	1,5	5	3,5	8,5	8,5	6	8,5	8,5
s_{14}	2	2	4,5	2	4,5	8	8	6	10	8
s_{15}	1	3	6	3	3	6	10	8	9	6
s_{16}	2	5,5	5,5	2	2	5,5	5,5	8	9,5	9,5
s_{17}	1,5	1,5	4	4	4	6,5	6,5	8	9	10
s_{18}	2,5	2,5	9,5	6,5	2,5	5	9,5	2,5	6,5	8
s_{19}	7	7	7	1,5	1,5	10	4	4	4	9
s_{20}	1	2	7	6	5	3	4	10	9	8
Σa_{ij}	66,5	65,5	100	68	70,5	122	127,5	140	165,5	172,5
$\theta_j^{(2)}$	2	1	5	3	4	6	7	8	9	10

Date corectate referitoare la H_s Tabelul 3.10

	p	v_r	R	L	C	LL	IL	Me	FOT	g
s_1	3	2	5	1	9,5	9,5	4	8	6	7
s_2	1	2	3	4	5	7	6	9	8	10
s_3	2	3	7	8	6	5	4	1	10	9
s_4	1	2	4	3	5	7	6	8	9	10
s_5	1	2	6	6	6	4	3	10	8,5	8,5
s_6	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	1	4,5	9	9	9
s_7	5,5	2	5,5	5,5	1	5,5	5,5	5,5	10	9
s_8	4	4	4	1,5	1,5	7	7	9,5	7	9,5
s_9	1	3,5	3,5	3,5	3,5	8	8	8	8	8
s_{10}	9	7	1	2	3,5	5	3,5	7	10	7
s_{11}	5	6	3	3	3	1	8	7	9,5	9,5
s_{12}	6	4	5	2,5	2,5	7	1	9	9	9
s_{13}	1,5	3	1,5	5,5	5,5	8,5	4	8,5	8,5	8,5
s_{14}	1,5	1,5	4	4	4	9,5	7	9,5	7	7
s_{15}	2,5	2,5	4,5	4,5	1	6	9,5	9,5	7,5	7,5
s_{16}	2,5	2,5	5	2,5	2,5	6,5	6,5	9	9	9
s_{17}	4	5	2	2	2	7	6	10	9	8
s_{18}	7	10	1,5	3	7	7	1,5	7	4	7
s_{19}	6,5	6,5	6,5	2,5	2,5	6,5	9,5	2,5	2,5	9,5
s_{20}	5	1	3	3	3	7	6	8	9	10
Σa_{ij}	73,5	74	79,5	71,5	78,5	125	110,5	155	160,5	172
$\theta_j^{(2)}$	1	2	5	3	4	7	6	8	9	10

Date primare referitoare la s_l Tab. 3.5

	p	v_r	R	L	C	LL	IL	Me	FOT	g
s_1	3	2	5	1	9	9	4	8	6	7
s_2	1	4	5	1	6	7	8	9	2	3
s_3	4	5	8	9	7	1	2	6	3	10
s_4	1	1	5	2	4	3	3	8	6	7
s_5	4	1	7	7	7	2	3	6	5	5
s_6	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
s_7	2	1	4	5	3	6	6	4	8	7
s_8	1	1	3	2	2	2	4	3	4	4
s_9	2	1	3	2	1	3	3	3	3	3
s_{10}	3	3	2	3	4	1	1	4	3	2
s_{11}	3	6	5	5	4	2	7	1	2	1
s_{12}	5	6	6	5	5	1	1	2	3	4
s_{13}	5	1	3	3	5	2	1	4	1	4
s_{14}	1	1	4	4	4	4	2	4	3	2
s_{15}	2	3	1	1	1	3	5	5	4	3
s_{16}	1	1	2	1	1	3	3	4	4	4
s_{17}	1	3	2	2	1	2	3	5	3	4
s_{18}	4	5	3	1	4	4	2	4	5	5
s_{19}	4	4	4	1	1	2	2	3	3	2
s_{20}	4	2	1	1	1	5	3	6	7	8
$\sum a_{ij}$	52	52	74	57	71	63	63	92	76	87
$\theta_j^{(1)}$	1-2	1-2	7	3	6	4-5	4-5	10	8	9

Date corectate referitoare la s_l Tabelul 3.11

	p	v_r	R	L	C	LL	IL	Me	FOT	g
s_1	3	2	5	1	9,5	9,5	4	8	6	7
s_2	1,5	5	6	1,5	7	8	9	10	3	4
s_3	4	5	8	9	7	1	2	6	3	10
s_4	1,5	1,5	7	3	6	4,5	4,5	10	8	9
s_5	4	1	9	9	9	2	3	7	5,5	5,5
s_6	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	8,5	8,5	8,5	8,5
s_7	2	1	4,5	6	3	7,5	7,5	4,5	10	9
s_8	1,5	1,5	7,5	4,5	4,5	4,5	4,5	9,5	7,5	9,5
s_9	3,5	1,5	7,5	3,5	1,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
s_{10}	6,5	6,5	3,5	6,5	9,5	1,5	1,5	9,5	6,5	3,5
s_{11}	5	9	7,5	7,5	6	3,5	10	1,5	3,5	1,5
s_{12}	7	9,5	9,5	7	7	1,5	1,5	3	4	5
s_{13}	9,5	2	5,5	5,5	9,5	4	2	7,5	2	7,5
s_{14}	1,5	1,5	8	8	8	8	3,5	8	5	3,5
s_{15}	4	6	2	2	2	6	9,5	9,5	8	6
s_{16}	2,5	2,5	5	2,5	2,5	6,5	6,5	9	9	9
s_{17}	1,5	7	4	4	1,5	4	7	10	7	9
s_{18}	5,5	9	3	1	5,5	5,5	2	5,5	9	9
s_{19}	9	9	9	1,5	1,5	4	4	6,5	6,5	4
s_{20}	6	4	2	2	2	7	5	8	9	10
$\sum a_{ij}$	82,5	88	117	85,5	106	99,5	103	149	125	138
$\theta_j^{(2)}$	1	3	7	2	6	4	5	10	8	9

Date primare referitoare la v_e Tab. 3.6

	p	v_r	R	L	C	LL	IL	Me	FOT	g
s_1	3	2	4	1	9	9	5	8	6	7
s_2	2	3	6	9	10	7	4	8	5	1
s_3	1	2	3	10	9	8	7	6	4	5
s_4	1	2	3	6	7	7	5	8	7	4
s_5	1	2	7	7	7	4	3	5	6	6
s_6	1	1	1	1	1	2	1	3	3	2
s_7	2	1	3	3	4	5	6	4	7	2
s_8	1	3	2	1	1	4	3	4	2	2
s_9	1	1	3	3	2	4	4	4	4	4
s_{10}	4	5	1	4	5	2	2	3	6	3
s_{11}	2	1	5	5	5	3	7	6	4	2
s_{12}	2	6	6	6	6	4	5	3	1	2
s_{13}	1	2	1	3	3	6	4	6	5	5
s_{14}	1	1	4	4	2	4	2	4	3	3
s_{15}	1	3	2	2	2	4	4	3	5	6
s_{16}	1	1	2	1	1	1	1	3	2	2
s_{17}	2	2	3	3	1	4	5	3	4	3
s_{18}	5	2	1	2	5	5	3	5	4	2
s_{19}	1	1	1	3	4	2	3	4	4	2
s_{20}	1	2	5	5	5	4	3	7	7	6
$\sum a_{ij}$	34	43	63	79	89	89	77	97	89	69
$\theta_j^{(1)}$	1	2	3	6	7-8-9	7-8-9	5	10	7-8-9	4

Date corectate referitoare la v_e Tabelul 3.12

	p	v_r	R	L	C	LL	IL	Me	FOT	g
s_1	3	2	4	1	9,5	9,5	5	8	6	7
s_2	2	3	6	9	10	7	4	8	5	1
s_3	1	2	3	10	9	8	7	6	4	5
s_4	1	2	3	6	8	8	5	10	8	4
s_5	1	2	9	9	9	4	3	5	6,5	6,5
s_6	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	7,5	3,5	9,5	9,5	7,5
s_7	2,5	1	4,5	4,5	6,5	8	9	6,5	10	2,5
s_8	2	7,5	5	2	2	9,5	7,5	9,5	5	5
s_9	1,5	1,5	4,5	4,5	3	8	8	8	8	8
s_{10}	6,5	8,5	1	6,5	8,5	2,5	2,5	4,5	10	4,5
s_{11}	2,5	1	7	7	7	4	10	9	5	2,5
s_{12}	2,5	8,5	8,5	8,5	8,5	5	6	4	1	2,5
s_{13}	1,5	3	1,5	4,5	4,5	9,5	6	9,5	7,5	7,5
s_{14}	1,5	1,5	8,5	8,5	3,5	8,5	3,5	8,5	5,5	5,5
s_{15}	1	5,5	3	3	3	7,5	7,5	5,5	9	10
s_{16}	3,5	3,5	8	3,5	3,5	3,5	3,5	10	8	8
s_{17}	2,5	2,5	5,5	5,5	1	8,5	10	5,5	8,5	5,5
s_{18}	8,5	3	1	3	8,5	8,5	5	8,5	6	3
s_{19}	2	2	2	6,5	9	4,5	6,5	9	9	4,5
s_{20}	1	2	6	6	6	4	3	9,5	9,5	8
$\sum a_{ij}$	50,5	65,5	94,5	112	123,5	135,5	115,5	154	141	108
$\theta_j^{(2)}$	1	2	3	5	7	8	6	10	9	4

Ponderearea opiniile specialiștilor se face proporțional cu nivelul de pregătire profesională, experienței în domeniul studiat, seriozității și interesului față de anchetă. Pentru aceasta o parte din specialiști au fost rugați să-i ierarhizeze pe toți participanții la anchetă, funcție de criteriile de mai sus, acordând un punctaj asemănător ca în prima etapă.

După însumarea rangurilor acordate fiecărui specialist, specialistul cu suma rangurilor $\sum a_{ij}$ cea mai mică i s-a acordat coeficientul de pondere $\delta = 1$, iar celui cu suma rangurilor $\sum a_{ij}$ cea mai mare i s-a acordat coeficientul de pondere $\delta = 2$.

Celorlalți specialiști s_i li s-au acordat coeficienți de pondere δ_i , pe criteriul proporțional, cuprinși între 1 și 2 ($1 \leq \delta_i \leq 2$). Coeficienții de pondere δ_i astfel obținuți au fost sintetizați în tabelul 3.13.

Coeficienții de pondere corespunzători specialiștilor consultați

Tabelul 3.13

s_i	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8	s_9	s_{10}	s_{11}	s_{12}	s_{13}	s_{14}	s_{15}	s_{16}	s_{17}	s_{18}	s_{19}	s_{20}
δ_i	2,00	1,83	1,82	1,69	1,69	1,56	1,39	1,28	1,27	1,27	1,12	1,60	1,81	1,04	1,04	1,07	1,04	1,00	1,02	1,00

Se înmulțesc apoi valorile corectate din tabelele 3.7 - 3.12 cu coeficienții de pondere δ_i , obținându-se tabelele 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19 pentru cei șase indicatori de performanță analizați: Q_p , Q_e , R_a , H_s , s_1 respectiv v_e .

Se remarcă faptul că parcurgerea ultimelor două etape (corectarea, respectiv ponderarea valorilor obținute din chestionare), nu este obligatorie, prelucrările ulterioare ale datelor putându-se aplica oricărei etape. Crește însă precizia dacă calculele se efectuează după etapa ultimă.

3.1.5 Verificarea gradului de consens al specialiștilor

Gradul de consens al specialiștilor se verifică prin compararea frecvențelor reale ale opiniilor specialistilor cu frecvența medie a opiniilor cu ajutorul criteriului χ^2 . Dacă χ_c^2 calculat este mai mare decât χ_t^2 tabelat, opiniile specialiștilor

Date ponderate referitoare la Q_p Tabelul 3.14

	p	v_r	R	L	C	LL	IL	Me	FOT	g
s_1	4,00	6,00	8,00	2,00	19,00	19,00	14,00	16,00	12,00	10,00
s_2	1,83	5,49	10,98	16,47	18,30	12,81	7,32	14,64	9,15	3,66
s_3	1,82	3,64	9,10	14,56	18,20	10,92	12,74	16,38	5,46	7,28
s_4	1,69	3,38	5,07	11,83	15,21	7,605	10,14	16,90	13,52	7,605
s_5	1,69	3,38	10,14	10,14	10,14	5,07	6,76	16,90	14,365	14,365
s_6	1,56	6,24	6,24	6,24	6,24	12,48	6,24	12,48	15,60	12,48
s_7	3,475	1,39	6,255	6,255	9,035	11,12	12,51	9,035	13,90	3,475
s_8	7,68	3,20	3,20	3,20	3,20	10,88	10,88	12,80	7,68	7,68
s_9	3,81	12,70	7,62	7,62	7,62	10,795	10,795	3,81	3,81	1,27
s_{10}	9,525	11,43	1,27	7,62	9,525	2,54	5,08	5,08	12,70	5,08
s_{11}	1,12	2,80	6,72	8,96	7,84	5,04	11,20	10,08	5,04	2,80
s_{12}	4,80	2,40	9,60	9,60	9,60	2,40	6,40	12,80	14,40	16,00
s_{13}	3,62	6,335	1,81	6,335	18,10	16,29	9,05	14,48	11,765	11,765
s_{14}	1,04	2,60	6,76	6,76	4,68	2,60	4,68	8,32	9,88	9,88
s_{15}	2,60	6,76	10,40	8,84	8,84	4,68	4,68	1,04	6,76	2,60
s_{16}	3,745	3,745	8,025	3,745	3,745	3,745	3,745	9,63	10,70	8,025
s_{17}	1,04	5,72	5,72	5,72	2,60	2,60	5,72	9,36	8,32	10,40
s_{18}	6,50	2,50	9,00	10,00	6,50	2,50	6,50	6,50	2,50	2,50
s_{19}	7,65	7,65	3,06	10,20	9,18	3,06	3,06	3,06	3,06	6,12
s_{20}	1,00	2,00	6,00	6,00	6,00	4,00	3,00	9,50	9,50	8,00
Σa_{ij}	70,195	99,36	134,97	162,095	193,555	150,135	154,50	208,795	190,11	150,985
$\theta_j^{(3)}$	1	2	3	7	9	4	6	10	8	5

Date ponderate referitoare la Q_e Tabelul 3.15

	p	v_r	R	L	C	LL	IL	Me	FOT	g
s_1	4,00	6,00	8,00	2,00	19,00	19,00	12,00	16,00	14,00	10,00
s_2	1,83	10,98	16,47	14,64	18,30	12,81	9,15	5,49	7,32	3,66
s_3	1,82	7,28	9,10	16,38	14,56	10,92	12,74	5,46	3,64	18,20
s_4	1,69	5,07	8,45	11,83	15,21	6,76	10,14	3,38	16,90	13,52
s_5	1,69	3,38	15,21	15,21	15,21	8,45	6,76	5,07	10,985	10,985
s_6	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	14,82	14,82
s_7	3,475	1,39	6,255	6,255	8,34	11,12	9,73	3,475	13,90	12,51
s_8	5,76	10,24	5,76	1,92	1,92	10,24	10,24	5,76	5,76	12,80
s_9	1,27	3,175	9,525	5,08	3,175	9,525	9,525	9,525	9,525	9,525
s_{10}	9,525	11,43	1,27	7,62	9,525	2,54	5,08	5,08	12,70	5,08
s_{11}	1,68	1,68	7,84	8,96	10,08	5,04	11,20	5,04	6,72	3,36
s_{12}	4,00	4,00	11,20	11,20	11,20	7,20	7,20	1,60	15,20	15,20
s_{13}	9,05	10,86	1,81	12,67	6,335	17,195	6,335	3,62	17,195	14,48
s_{14}	1,04	2,60	7,80	7,80	5,20	2,60	5,20	5,20	9,88	9,88
s_{15}	1,56	6,24	10,40	8,84	8,84	3,12	6,24	1,56	6,24	4,16
s_{16}	3,745	8,025	8,025	3,745	3,745	3,745	3,745	9,63	10,70	3,745
s_{17}	1,56	4,68	8,32	8,32	4,68	8,32	10,11	1,56	4,68	4,68
s_{18}	2,00	7,00	9,00	9,00	2,00	5,00	9,00	2,00	5,00	5,00
s_{19}	2,04	2,04	9,18	9,18	9,18	5,61	5,61	5,61	5,61	2,04
s_{20}	1,00	9,00	5,00	5,00	5,00	2,00	7,00	8,00	3,00	10,00
Σa_{ij}	65,755	122,09	165,635	172,67	178,52	158,215	164,315	110,08	193,775	183,645
$\theta_j^{(3)}$	1	3	6	7	8	4	5	2	10	9

Date ponderate referitoare la R_a

Tabelul 3.16

	P	V _r	R	L	C	LL	IL	Me	FOT	g
S ₁	4,00	6,00	8,00	2,00	19,00	19,00	10,00	12,00	14,00	16,00
S ₂	1,83	3,66	5,49	7,32	9,15	12,81	10,98	14,64	16,47	18,30
S ₃	7,28	3,64	9,10	5,46	1,82	12,74	10,92	14,56	16,38	18,20
S ₄	3,38	1,69	8,45	5,07	6,76	10,14	11,83	13,52	15,21	16,90
S ₅	5,07	3,38	15,21	15,21	15,21	1,69	6,76	11,83	9,295	9,295
S ₆	7,02	7,02	3,12	3,12	3,12	11,70	11,70	11,70	11,70	15,60
S ₇	6,255	2,085	4,17	6,255	2,085	9,73	11,12	8,34	13,90	12,51
S ₈	7,68	4,48	7,68	1,92	1,92	7,68	4,48	11,52	11,52	11,52
S ₉	1,27	8,89	8,89	3,81	2,54	8,89	8,89	8,89	8,89	8,89
S ₁₀	8,89	7,62	1,27	3,175	5,715	3,175	5,715	10,16	12,70	11,43
S ₁₁	6,72	1,12	3,36	3,36	3,36	5,60	11,20	7,84	8,96	10,08
S ₁₂	11,20	8,00	14,40	2,40	2,40	6,40	4,80	9,60	14,40	14,40
S ₁₃	2,715	6,335	2,715	9,05	6,335	15,385	15,385	10,86	15,385	15,385
S ₁₄	2,08	2,08	4,68	2,08	4,68	8,32	8,32	6,24	10,40	8,32
S ₁₅	1,04	3,12	6,24	3,12	3,12	6,24	10,40	8,32	9,36	6,24
S ₁₆	2,14	5,885	5,885	2,14	2,14	5,885	5,885	8,56	10,165	10,165
S ₁₇	1,56	1,56	4,16	4,16	4,16	6,76	6,76	8,32	9,36	10,40
S ₁₈	2,50	2,50	9,50	6,50	2,50	5,00	9,50	2,50	6,50	8,00
S ₁₉	7,14	7,14	7,14	1,53	1,53	10,20	4,08	4,08	4,08	9,18
S ₂₀	1,00	2,00	7,00	6,00	5,00	3,00	4,00	10,00	9,00	8,00
Σ a _{ij}	90,77	88,205	136,46	93,68	102,545	170,345	172,725	193,48	227,675	238,815
θ _j ⁽³⁾	2	1	5	3	4	6	7	8	9	10

Date ponderate referitoare la H_s

Tabelul 3.17

	p	V _r	R	L	C	LL	IL	Me	FOT	g
S ₁	6,00	4,00	10,00	2,00	19,00	19,00	8,00	16,00	12,00	14,00
S ₂	1,83	3,66	5,49	7,32	9,15	12,81	10,98	16,47	14,64	18,30
S ₃	3,64	5,46	12,74	14,56	10,92	9,10	7,28	1,82	18,20	16,38
S ₄	1,69	3,38	6,76	5,07	8,45	11,83	10,14	13,52	15,21	16,90
S ₅	1,69	3,38	10,14	10,14	10,14	6,76	5,07	16,90	14,365	14,365
S ₆	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	1,56	7,02	14,04	14,04	14,04
S ₇	7,645	2,78	7,645	7,645	1,39	7,645	7,645	7,645	13,90	12,51
S ₈	5,12	5,12	5,12	1,92	1,92	8,96	8,96	12,16	8,96	12,16
S ₉	1,27	4,445	4,445	4,445	4,445	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16
S ₁₀	11,43	8,89	1,27	2,54	4,445	6,35	4,445	8,89	12,70	8,89
S ₁₁	5,60	6,72	3,36	3,36	3,36	1,12	8,96	7,84	10,64	10,64
S ₁₂	9,60	6,40	8,00	4,00	4,00	11,20	1,60	14,40	14,40	14,40
S ₁₃	2,715	5,43	2,715	9,955	9,955	15,385	7,24	15,385	15,385	15,385
S ₁₄	1,56	1,56	4,16	4,16	4,16	9,88	7,28	9,88	7,28	7,28
S ₁₅	2,60	2,60	4,68	4,68	1,04	6,24	9,88	9,88	7,80	7,80
S ₁₆	2,675	2,675	5,35	2,675	2,675	6,955	6,955	9,63	9,63	9,63
S ₁₇	4,16	5,20	2,08	2,08	2,08	7,18	6,24	10,40	9,36	8,32
S ₁₈	7,00	10,00	1,50	3,00	7,00	7,00	1,50	7,00	4,00	7,00
S ₁₉	6,63	6,63	6,63	2,55	2,55	6,63	9,69	2,55	2,55	9,69
S ₂₀	5,00	1,00	3,00	3,00	3,00	7,00	6,00	8,00	9,00	10,00
Σ a _{ij}	94,875	96,35	112,105	102,12	116,70	172,87	145,045	212,57	224,22	237,85
θ _j ⁽³⁾	1	2	4	3	5	7	6	8	9	10

Date ponderate referitoare la s_l

Tabelul 3.18

	P	v_r	R	L	C	LL	IL	Me	FOT	g
s_1	6,00	4,00	10,00	2,00	19,00	19,00	8,00	16,00	12,00	14,00
s_2	2,745	9,15	10,98	2,745	12,81	14,64	16,47	18,30	5,49	7,32
s_3	7,28	9,10	14,56	16,38	12,74	1,82	3,64	10,92	5,46	18,20
s_4	2,535	2,535	11,83	5,07	10,14	7,605	7,605	16,90	13,52	15,21
s_5	6,76	1,69	15,21	15,21	15,21	3,38	5,07	11,83	9,295	9,295
s_6	5,46	5,46	5,46	5,46	5,46	5,46	13,26	13,26	13,26	13,26
s_7	2,78	1,39	6,255	8,34	4,17	10,425	10,425	6,255	13,90	12,51
s_8	1,92	1,92	9,60	5,76	5,76	5,76	5,76	12,16	9,60	12,16
s_9	4,445	1,905	9,525	4,445	1,905	9,525	9,525	9,525	9,525	9,525
s_{10}	8,255	8,255	4,445	8,255	12,065	1,905	1,905	12,065	8,255	4,445
s_{11}	5,60	10,08	8,40	8,40	6,72	3,92	11,20	1,68	3,92	1,68
s_{12}	11,20	15,20	15,20	11,20	11,20	2,40	2,40	4,80	6,40	8,00
s_{13}	17,195	3,62	9,955	9,955	17,195	7,24	3,62	13,575	3,62	13,575
s_{14}	1,56	1,56	8,32	8,32	8,32	8,32	3,64	8,32	5,20	3,64
s_{15}	4,16	6,24	2,08	2,08	2,08	6,24	9,88	9,88	8,32	6,24
s_{16}	2,675	2,675	5,35	2,675	2,675	6,955	6,955	9,63	9,63	9,63
s_{17}	1,56	7,28	4,16	4,16	1,56	4,16	7,28	10,40	7,28	9,36
s_{18}	5,50	9,00	3,00	1,00	5,50	5,50	2,00	5,50	9,00	9,00
s_{19}	9,18	9,18	9,18	1,53	1,53	4,08	4,08	6,63	6,63	4,08
s_{20}	6,00	4,00	2,00	2,00	2,00	7,00	5,00	8,00	9,00	10,00
Σa_{ij}	112,81	114,24	165,51	124,985	158,04	135,335	137,715	205,63	169,305	191,13
$\theta_j^{(3)}$	1	2	7	3	6	4	5	10	8	9

Date ponderate referitoare la v_e

Tabelul 3.19

	p	v_r	R	L	C	LL	IL	Me	FOT	g
s_1	6,00	4,00	8,00	2,00	19,00	19,00	10,00	16,00	12,00	14,00
s_2	3,66	5,49	10,98	16,47	18,30	12,81	7,32	14,64	9,15	1,83
s_3	1,82	3,64	5,46	18,20	16,38	14,56	12,74	10,92	7,28	9,10
s_4	1,69	3,38	5,07	10,14	13,52	13,52	8,45	16,90	13,52	6,76
s_5	1,69	3,38	15,21	15,21	15,21	6,76	5,07	8,45	10,985	10,985
s_6	5,46	5,46	5,46	5,46	5,46	11,70	5,46	14,82	14,82	11,70
s_7	3,475	1,39	6,255	6,255	9,035	11,12	12,51	9,035	13,90	3,475
s_8	2,56	9,60	6,40	2,56	2,56	12,16	9,6	12,16	6,40	6,40
s_9	1,905	1,905	5,715	5,715	3,81	10,16	10,16	10,16	10,16	10,16
s_{10}	8,255	10,795	1,27	8,255	10,795	3,175	3,175	5,715	12,70	5,715
s_{11}	2,80	1,12	7,84	7,84	7,84	4,48	11,20	10,08	5,60	2,80
s_{12}	4,00	13,60	13,60	13,60	13,60	8,00	9,60	6,40	1,60	4,00
s_{13}	2,715	5,43	2,715	8,145	8,145	17,195	10,86	17,195	13,575	13,575
s_{14}	1,56	1,56	8,84	8,84	3,64	8,84	3,64	8,84	5,72	5,72
s_{15}	1,04	5,72	3,12	3,12	3,12	7,80	7,80	5,72	9,36	10,40
s_{16}	3,745	3,745	8,56	3,745	3,745	3,745	3,745	10,70	8,56	8,56
s_{17}	2,60	2,60	5,72	5,72	1,04	8,84	10,40	5,72	8,84	5,72
s_{18}	8,50	3,00	1,00	3,00	8,50	8,50	5,00	8,50	6,00	3,00
s_{19}	2,04	2,04	2,04	6,63	9,18	4,59	6,63	9,18	9,18	4,59
s_{20}	1,00	2,00	6,00	6,00	6,00	4,00	3,00	9,50	9,50	8,00
Σa_{ij}	66,515	89,855	129,255	156,905	178,88	190,955	156,36	210,635	188,85	146,49
$\theta_j^{(3)}$	1	2	3	6	7	9	5	10	8	4

concordă, diferențele de opinie nefiind semnificative.

În caz contrar, abaterile față de media frecvențelor opiniilor specialiștilor sunt semnificative statistic, ceea ce reflectă lipsa lor de consens. În acest caz se poate renunța la opiniile acelor specialiști care sunt cei mai îndepărtați față de media opiniilor. Se reverifycă gradul de consens după eliminare, trecându-se la etapa următoare.

Pentru a parcurge această etapă se calculează următoarele mărimi:

$$\Delta_j = \sum_{i=1}^m a_{ij} * \delta_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m a_{ij} * \delta_i \quad (3.1)$$

$$a_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m a_{ij} * \delta_i \quad (3.2)$$

$$M_j = \frac{\sum_{i=1}^m a_{ij} * \delta_i}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m a_{ij} * \delta_i} \quad (3.3)$$

$$R_j = (a_{ij} * \delta_i)_{\max} - (a_{ij} * \delta_i)_{\min} \quad (3.4)$$

În relațiile de mai sus, semnificațiile notațiilor sunt:

- m - numărul specialiștilor consultați;
- n - numărul parametrilor reglați considerați în experiment
- δ_i - coeficientul de pondere al specialistului s_i ;
- a_{ij} - rangul acordat de specialistul s_j parametrului de reglare x_j ;

Cu ajutorul relațiilor prezentate mai sus se completează pentru Q_p , Q_e , R_a , H_s , s_1 și v_e , tabelele 3.20, 3.21, 3.22, 3.23, 3.24, respectiv 3.25.

Cu datele din tabelele 3.20, 3.21, 3.22, 3.23, 3.24, respectiv 3.25 se calculează criteriul χ_c^2 , utilizând relația:

$$\chi_c^2 = m * (n - 1) * W \quad (3.5)$$

Valorile principalelor mărimi statistice referitoare la q_p Tabelul 3.20

	p	v_r	R	L	C	LL	IL	Me	FOT	g
Δj	81,275	52,11	16,5	10,625	42,085	1,335	3,03	57,325	38,64	0,485
Δj^2	6605,63	2715,45	272,25	112,89	1771,15	1,78	9,18	3286,16	1493,05	0,24
a_j	3,51	4,97	6,75	8,10	9,68	7,51	7,73	10,44	9,51	7,55
M_i	0,046	0,066	0,089	0,107	0,128	0,099	0,102	0,138	0,126	0,100
R_j	8,525	11,31	9,71	14,47	16,40	16,6	11,00	15,86	13,10	13,095

Valorile principalelor mărimi statistice referitoare la q_e Tabelul 3.21

	p	v_r	R	L	C	LL	IL	Me	FOT	g
Δj	85,715	29,38	14,165	21,20	27,05	6,745	12,845	41,39	42,305	32,175
Δj^2	7347,06	863,18	200,65	449,44	731,70	45,50	164,99	1713,13	1789,71	1035,23
a_j	3,29	6,10	8,28	8,63	8,93	7,91	8,22	5,50	9,69	9,18
M_i	0,046	0,086	0,117	0,122	0,126	0,112	0,116	0,078	0,137	0,130
R_j	8,525	10,04	15,20	14,46	17,08	17,0	8,995	14,44	14,195	16,16

Valorile principalelor mărimi statistice referitoare la R_a Tabelul 3.22

	p	v_r	R	L	C	LL	IL	Me	FOT	g
Δj	60,7	63,265	15,01	57,79	48,925	18,875	21,255	42,01	76,205	87,345
Δj^2	3684,49	4002,46	225,30	3339,68	2393,66	356,27	451,78	1764,84	5807,20	7629,15
a_j	4,54	4,41	6,83	4,68	5,13	8,52	8,64	9,67	11,38	11,94
M_i	0,064	0,062	0,096	0,066	0,072	0,120	0,122	0,137	0,161	0,169
R_j	10,20	7,77	13,94	13,68	13,68	17,31	11,385	12,14	12,39	12,06

Valorile principalelor mărimi statistice referitoare la H_a Tabelul 3.23

	p	v_r	R	L	C	LL	IL	Me	FOT	g
Δj	56,595	55,12	39,365	49,35	34,77	21,40	6,425	61,10	72,75	86,38
Δj^2	3202,99	3038,21	1549,60	2435,42	1208,95	457,96	41,28	3733,21	5292,56	7461,50
a_j	4,74	4,82	5,61	5,11	5,84	8,64	7,25	10,63	11,21	11,89
M_i	0,067	0,068	0,079	0,072	0,082	0,122	0,102	0,150	0,158	0,168
R_j	10,16	7,89	11,47	12,64	17,96	17,88	9,48	15,08	15,65	11,30

Valorile principalelor mărimi statistice referitoare la s_l Tabelul 3.24

	P	v_r	R	L	C	LL	IL	Me	FOT	g
Δj	38,66	37,23	14,04	26,485	6,57	16,135	13,755	54,16	17,835	39,66
Δj^2	1494,60	1386,08	197,12	701,46	43,16	260,34	189,20	2933,31	318,09	1572,92
a_j	5,64	5,71	8,28	6,25	7,90	6,77	6,89	10,28	8,47	9,56
M_i	0,074	0,075	0,109	0,083	0,104	0,089	0,091	0,136	0,112	0,126
R_j	15,635	8,69	13,21	15,38	17,47	17,18	14,565	16,62	9,90	16,58

Valorile principalelor mărimi statistice referitoare la v_e Tabelul 3.25

	P	v_r	R	L	C	LL	IL	Me	FOT	g
Δj	84,955	61,615	22,215	5,435	27,41	39,485	4,89	59,165	37,38	4,98
Δj^2	7217,35	3796,41	493,51	29,54	751,31	1559,07	23,91	3500,50	1397,26	24,80
a_j	3,33	4,49	6,46	7,85	8,94	9,55	7,82	10,53	9,44	7,32
M_i	0,044	0,059	0,085	0,104	0,118	0,126	0,103	0,139	0,125	0,097
R_j	7,155	12,49	14,21	14,47	17,96	15,825	9,74	11,48	12,30	12,17

unde: m - numărul specialiștilor consultați ($m = 20$); n - numărul parametrilor reglați considerați în experiment ($n=10$); W - coeficient de concordanță calculat cu relația:

$$W = \frac{12 * m * \sum_{j=1}^n \Delta^2 j}{\left[m(n^3 - n) - \sum_{i=1}^m T_i \right] \left(\sum_{i=1}^m \delta_i \right)^2} \quad (3.6)$$

i - coeficientul de pondere al specialistului s_i

$$T_i = \sum_{j=1}^k (t_j^3 - t_j) \quad (3.7)$$

t_j - numărul parametrilor reglabili care au același rang.
Valorile lui T_i sunt date în tabelul 3.26.

Valorile lui T_i

Tabelul 3.26

s_i	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8	s_9	s_{10}	s_{11}	s_{12}	s_{13}	s_{14}	s_{15}	s_{16}	s_{17}	s_{18}	s_{19}	s_{20}	
Q_p	6	0	0	6	30	144	18	90	54	30	12	30	12	24	24	216	66	120	126	30	1038
Q_e	6	0	0	0	30	504	12	96	216	30	12	42	12	42	36	216	90	72	108	24	1548
R_a	6	0	0	0	30	90	12	60	336	12	24	30	72	54	48	90	36	72	54	0	1026
H_s	6	0	0	0	30	234	210	60	180	30	30	30	72	60	24	90	24	126	90	24	1320
s_l	6	6	0	12	30	270	12	84	222	84	24	36	42	132	54	90	54	84	60	24	1326
v_e	6	0	0	0	30	222	18	60	132	24	30	66	24	84	36	234	72	84	60	30	1212

Pentru cei șase indicatori de performanță analizați, valorile concrete calculate sunt sintetizate în tabelul 3.27.

Din [91], pentru $f = n - 1 = 9$ grade de libertate și un nivel de încredere $\alpha = 0,05$, valoarea tabelată χ_t^2 este:

$$\chi_t^2 = 16,916 \quad (3.8)$$

Tabelul 3.27

Valorile coeficienților de concordanță și a valorii calculate a coeficientului χ_c^2

Nr. crt	Caractristica tehnologică	W	χ_c^2	Observații
1	Q_p	0,274367	49,386	$\chi_c^2 > \chi_t^2$
2	Q_e	0,248622	44,752	$\chi_c^2 > \chi_t^2$
3	R_a	0,499830	89,969	$\chi_c^2 > \chi_t^2$
4	H_s	0,486666	87,599	$\chi_c^2 > \chi_t^2$
5	s_l	0,155807	28,045	$\chi_c^2 > \chi_t^2$
6	v_e	0,319935	57,590	$\chi_c^2 > \chi_t^2$

Deoarece în toate cazurile:

$$\chi_c^2 > \chi_t^2 \quad (3.9)$$

rezultă că ipoteza concordanței opiniilor specialiștilor referitoare la toate cele șase caracteristici tehnologice ale prelucrării

rii este confirmată.

3.1.6 Reprezentări grafice

Rezultatele experimentului se prezintă sub forma unor histograme în care se reprezintă, pentru fiecare din indicatorii de performanță analizați, dependența:

$$\sum_{i=1}^m a_{ij} \cdot \delta_i = f(x_j)$$

În figurile 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 se prezintă respectiv histogramele pentru Q_p , Q_e , R_a , H_S , s_1 și v_e .

3.1.7 Gruparea factorilor pe grupe de influență

Gruparea factorilor pe grupe de influență se realizează utilizând criteriul K . Conform criteriului K , dacă pentru un număr v de factori, K_c calculat este mai mic decât K_t tabelat, atunci cei v factori sunt de același rang de influență, în caz contrar între cei v factori existând cel puțin unul care este de rang diferit de ceilalți.

Valoarea calculată K_c este dată de relația:

$$K_c = \frac{v \cdot R_{aj}}{\sum R_j} \quad (3.10)$$

unde: v - numărul de factori analizați; $R_{aj} = a_j \max - a_j \min$ pentru cei v factori selectați, $a_j \max$ și $a_j \min$ fiind luați din tabelele 22-26; $\sum R_j$ - suma celor v factori, luați de asemenea din tabelele 22-26.

Aplicând relația (3.10) pentru cei șase indicatori de performanță analizați, valorile concrete obținute sunt prezentate în tabelul 3.28.

Coefficientul tabelat K_t a fost extras din [91, pag.283], pentru un coeficient de încredere de $\alpha = 0,05$ și un număr $n = 20$.

Valorile coeficientului K_c pentru indicatorii de performanță analizați Tabelul 3.28

Nr. crt	Caractristica tehnologică	R_{aj}	ΣR_j	v	K_c	K_t	Observații
1	q_p	6,93	130,070	10	0,532	0,54	Toti factorii analizați sunt factori primari
2	q_e	6,40	136,095	10	0,470	0,54	Toti factorii analizați sunt factori primari
3	R_a	7,53	124,255	10	0,606	0,54	Se elimină valorile corespunzătoare lui g
		6,97	112,195	9	0,559	0,59	g este factor secundar, restul fiind factori primari
4	H_s	7,15	129,51	10	0,552	0,54	Se elimină valorile corespunzătoare lui g
		6,47	118,21	9	0,493	0,59	g este factor secundar, restul fiind factori primari
5	s_l	4,64	145,23	10	0,319	0,54	Toti factorii analizați sunt factori primari
6	v_e	7,20	127,80	10	0,563	0,54	Se elimină valorile corespunzătoare lui Me
		6,97	112,195	9	0,559	0,59	Me este factor secundar, restul fiind factori primari

3.1.8. Interpretarea rezultatelor

În realizarea experimentului psihologic prezentat am selectat cei mai importanți factori din proces, care pot fi efectiv utilizați în conducerea procesului. Se remarcă însă absența a doi factori „de marcă”, cu siguranță cei mai importanți din proces și anume tensiunea pe spațiul de lucru U și curentul din spațiul de lucru I , factori funcție de care se realizează practic toate sistemele de avans. „Lipsa” acestora din experiment se datorează faptului că mărimile de intrare trebuie obligatoriu să fie factori independenți, ori toți factorii analizați influențează prelucrarea prin modificarea tocmai a valorilor tensiunii și curentului din spațiul de lucru sau măcar a distribuției energiei în impuls. Deci prin introducerea acestor mărimi de intrare (U și I) s-ar fi pierdut tocmai independența restului factorilor prezentați.

Luat global se observă clar că cel mai important factor din proces (dintre cei analizați) este presiunea p dintre OP și OT , urmată de viteza relativă v_r dintre OT și OP , ceilalți schimbându-și valoarea funcție de criteriul de optimizare urmărit.

Pentru că este greu de analizat global influența factorilor de intrare asupra procesului de prelucrare, se va realiza această analiză în funcție de indicatorul de performanță impus.

a) Productivitatea prelucrării Q_p este influențată în primul rând de presiunea p dintre OP și OT, lucru perfect explicabil prin faptul că această presiune determină, în ultimă instanță,

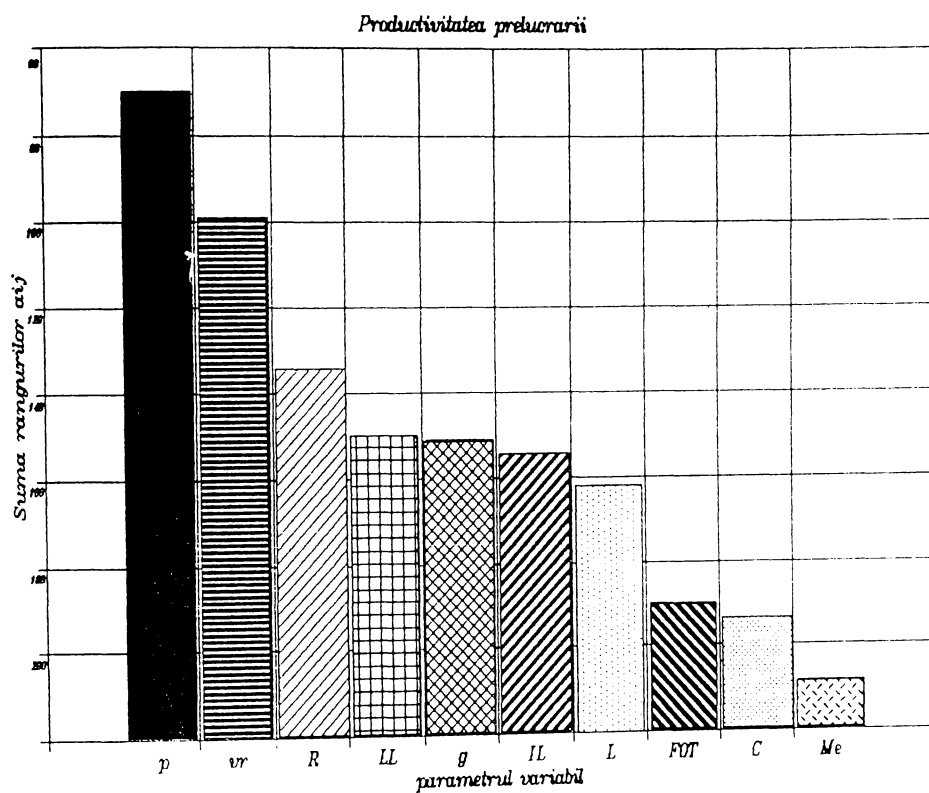


Fig.3.1 Histograma corespunzătoare ordinii de influență a factorilor de intrare asupra productivității prelucrării Q_p

mărimea ariei reale de contact și prin aceasta curentul din spațiul de lucru, implicit densitatea de curent și deci energia descărcării.

În ordine urmează ca al doilea factor de influență viteza relativă v_r dintre OP și OT, care de asemenea impune caracterul mai accentuat sau mai puțin accentuat de impuls al descărcării electrice stabilind durata de existență a DEI și prin aceasta utilizarea cât mai completă a energiei descărcării în vederea prelevării de material din OP.

Al treilea factor de influență este rezistența R , ca element concentrat, din circuitul electric de alimentare a spațiului de lucru care limitează efectele nefavorabile ale scurtcircuitelor accidentale din proces, permițând însă și realizarea unui curent optim de prelucrare.

Urmează un grup de trei parametri a căror influență este aproximativ egală, și anume:

- lichidul de lucru utilizat, fapt care atestă importanța lui în prelucrarea prin EEC, prin proprietățile PP realizată în proces;

- grosimea g a OT care influențează productivitatea prin micșorarea pierderilor de energie, respectiv prin concentrarea într-o măsură cât mai mare a energiei de prelucrare;

- modul de introducere IL a lichidului de lucru în spațiul de lucru care determină desfășurarea corespunzătoare a proceselor fundamentale din spațiul de lucru;

Cu o influență ceva mai mică se situează în continuare, pe locul șapte, inductivitatea L din circuitul electric de alimentare a spațiului de lucru.

Un grup de doi parametri care urmează se referă la FOT și la parametrul concentrat capacitate C din circuitul electric de alimentare a spațiului de lucru, care însă, deși sunt parametri de importanță primară, influențează mai puțin productivitatea prelucrării.

În final, tot cu o participare mai puțin pregnantă asupra productivității prelucrării se situează M_e , care poate îmbunătăți caracteristicile DEI, în principal printr-o amorsare mai bună a DEI.

Important este însă de reținut faptul că toți cei zece factori analizați sunt de importanță primară în privința produc-

tivității prelucrării prin EEC, și, obligatoriu trebuie ținut cont de ei.

b) Debitul uzării Q_e , este influențat cel mai puternic de presiunea p dintre OT și OP, datorită influenței asupra forței de

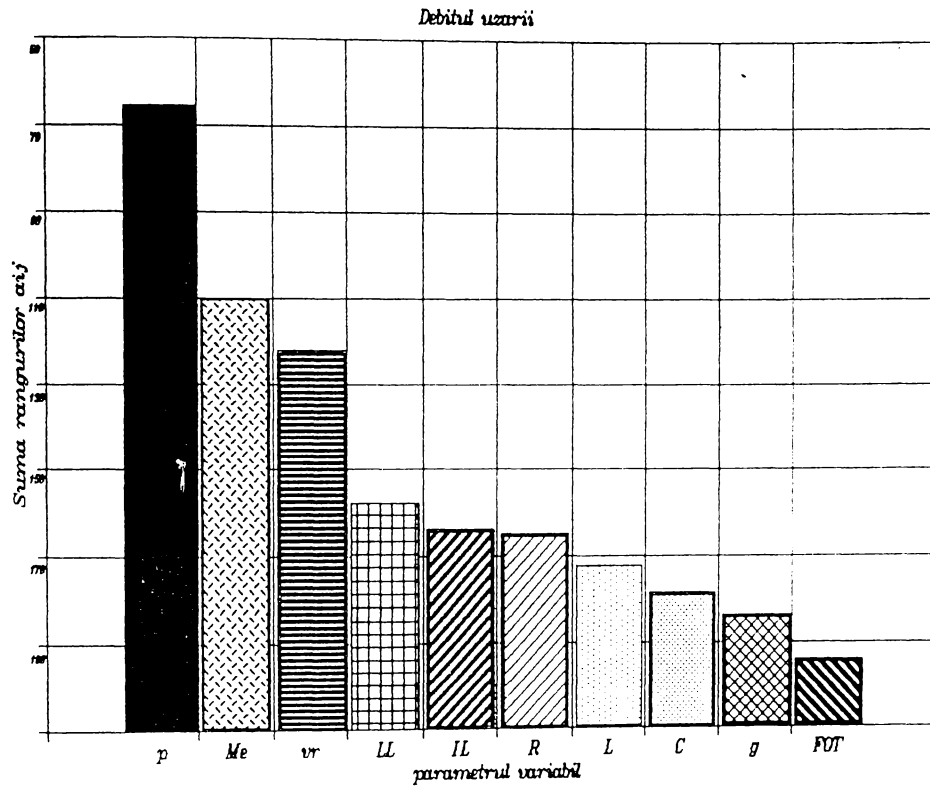


Fig.3.2 Histograma corespunzătoare ordinii de influență a factorilor de intrare asupra debitului uzării Q_e

frecare dintre OT și OP și implicit asupra uzurii OT prin abraziune, în primul rând, și în al doilea rând prin modificarea energiei DEI, în condițiile desfășurării normale a proceselor elementare de prelucrare.

Se remarcă pe locul doi, cu o pondere însemnată din acest punct de vedere, materialul OT, lucru extrem de important pentru

operațiile în care precizia dimensională este ridicată (profilare, rectificare, ascuțire, etc.). Se aleg în acest caz materiale rezistente la uzură prin frecare și rezistente la uzură termică.

Urmează, în ordine, viteza relativă v_r dintre OP și OT, și lichidul de lucru LL, cu explicații similare cazului productivității Q_p .

Un grup de cinci factori care urmează au, practic, influențe cam de același rang, în ordine :

- modul de introducere a lichidului de lucru IL în spațiul de lucru, cu cea mai mare influență din cei cinci;
- rezistența R din circuitul electric de alimentare cu energie a spațiului de lucru;
- inductivitatea L introdusă în circuitul electric de alimentare cu energie a spațiului de lucru;
- capacitatea C, introdusă în circuitul electric de alimentare cu energie a spațiului de lucru;
- grosimea g a OT.

Se remarcă însă faptul că, deși și acești cinci parametri sunt parametrii primari, totuși ei au o influență mult mai mică decât primul parametru din această grupă, presiunea p dintre OP și OT.

Pe ultima treaptă, din acest punct de vedere, se situează FOT, ea influențând uzura OT prin scăderea frecărilor laterale dintre OP și OT.

c) Pentru rugozitatea suprafeței prelucrate R_a se observă în primul rând existența a două grupe de parametrii:

- nouă parametri primari (v_r , p, L, C, R, LL, IL, Me, FOT);
- un parametru secundar (g).

În analiza acestor factori se remarcă o serie de aspecte caracteristice.

Existența în frunte, a unui grup de patru parametrii, care practic au același grad de influență (v_r , p, L, C), toți parametrii amintiți determinând caracteristicile DEI, și prin aceasta direct rugozitatea suprafețelor prelucrate. În principal caracteristicile afectate ale DEI sunt:

- numărul DEI (în principal prin intermediul L și C);

- energia DEI (în principal prin L, C și p);
- distribuția energiei în DEI (în principal prin v_r , L și C)

Puțin surprinzător, pe locul cinci se situează rezistența R

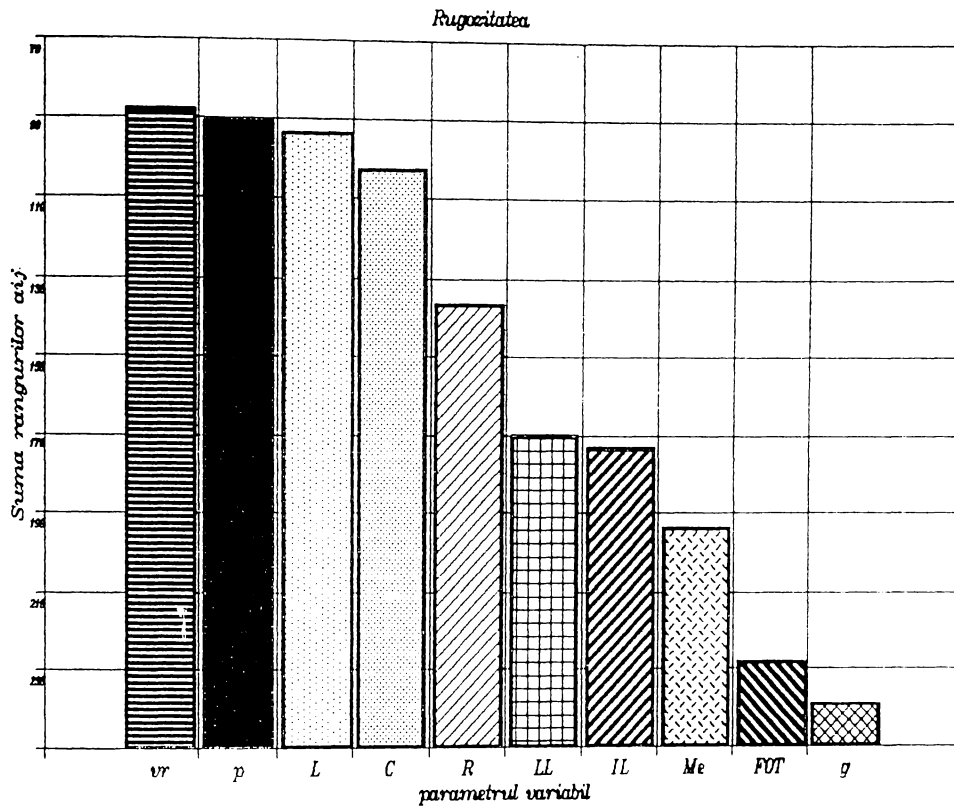


Fig.3.3 Histograma corespunzătoare ordinii de influență a factorilor de intrare asupra rugozității suprafeței prelucrate R_a

din circuitul de alimentare cu energie electrică a spațiului de lucru, care și ea are o importanță deosebită prin limitarea energiei maxime din circuit.

Explicațiile situării pe locurile 6, 7, 8, 9 a LL, IL, Me respectiv FOT sunt similare cu cele prezentate la indicatorii de

performanță analizată anterior, dar nu de mai mică importanță decât ceilalți.

Ultimul parametru (g), pe lângă faptul că este de importanță secundară pentru rugozitatea suprafeței prelucrate R_a , are și un grad mic de influență, raportat la primul grup de parametri.

d) In cazul adâncimii stratului modificat termic H_S , cum era și de așteptat, parametrii hotărâtori sunt tot cei care contro-

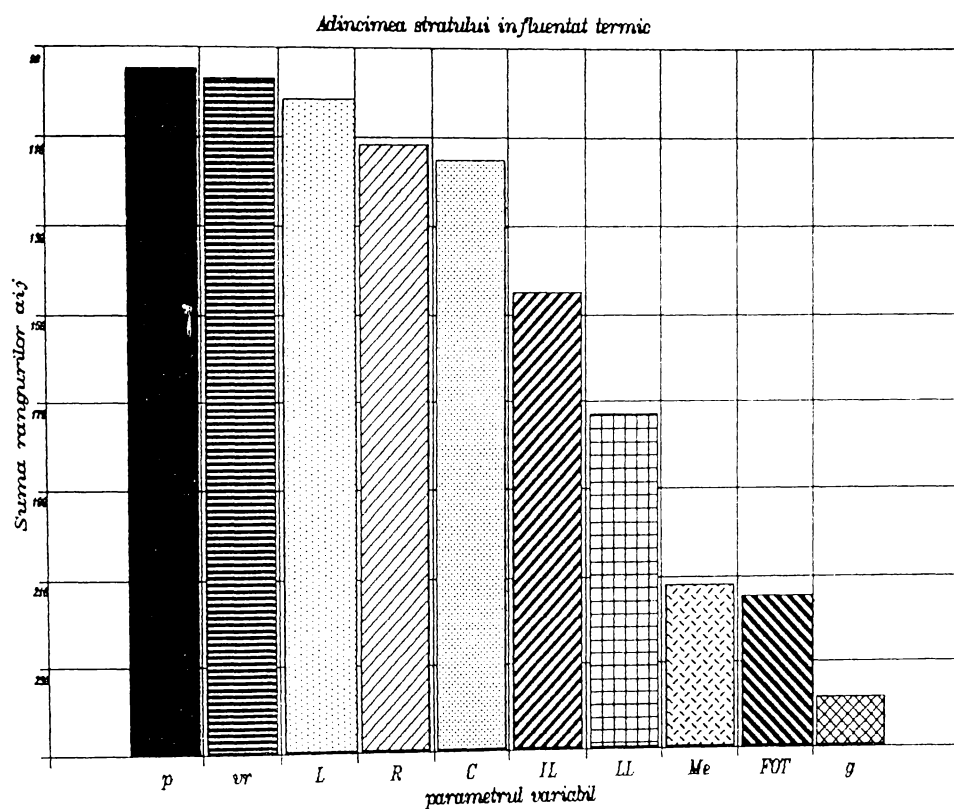


Fig.3.4 Histograma corespunzătoare ordinii de influență a factorilor de intrare asupra adâncimii stratului modificat termic H_S

lează energia și distribuția energiei în DEI, ca și în cazul rugozității suprafeței. Și aici se remarcă aproximativ aceiași

influență a aceluși parametri ca în cazul amintit anterior, la care se adaugă, după cum era și de așteptat, influența rezistenței R. Mai mult, și mărimea influențelor este similară cu distribuția observată în cazul rugozității suprafețelor prelucrate prin EEC.

Se observă apoi și o succesiune asemănătoare a factorilor cu cazul anterior, cum era de așteptat de altfel, inversându-se doar ordinea unora dintre ei.

Și în acest caz grosimea g a OT este un factor secundar, restul fiind factori primari.

e) În cazul mărimii interstițiului lateral s_1 se remarcă

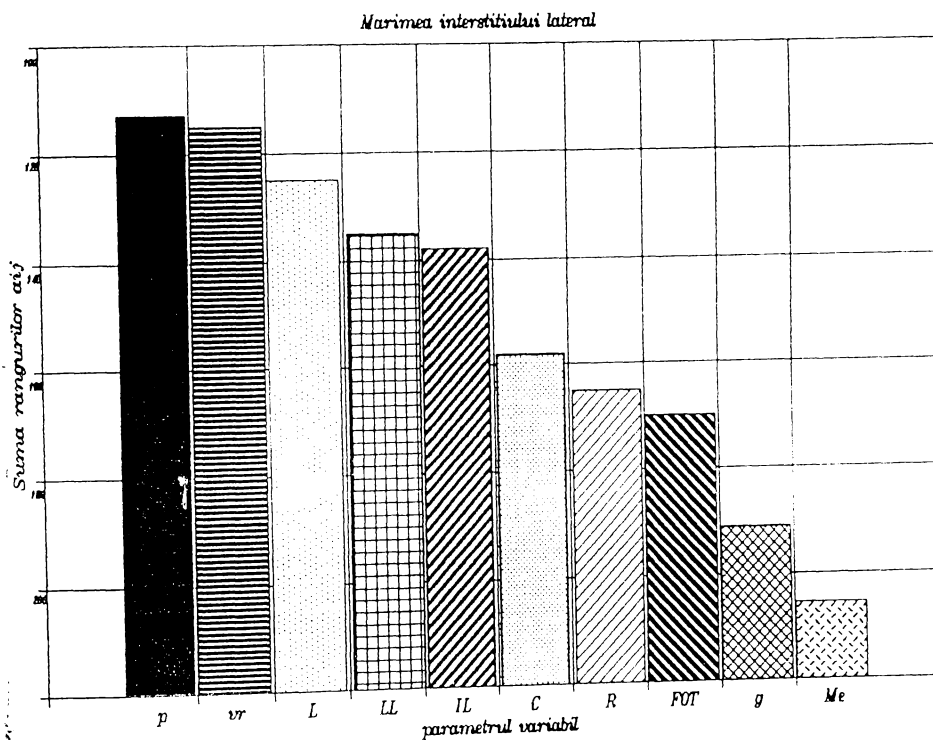


Fig.3.5 Histograma corespunzătoare ordinii de influență a factorilor de intrare asupra mărimii interstițiului lateral s_1

faptul că toți parametrii reglabili considerați în experiment sunt de importanță primară. În plus, analizând histograma din figura 3.5, se constată că deși cei zece factori analizați se aranjează într-o anumită ordine de importanță, diferențele dintre primii opt (p , v_r , L , LL , IL , C , R , FOT) sunt extrem de mici, putând să afirmăm că practic în mod obligatoriu în stabilirea tehnologiei de prelucrare trebuie să se țină seama de ei în mod egal, ca de altfel și de parametri g și Me , cu toate că influența lor asupra interstițiului lateral este mai mică.

f) În cazul vitezei de avans v_e , ne așteptăm la o variație asemănătoare cu cea obținută în cazul productivității Q_p . Deși

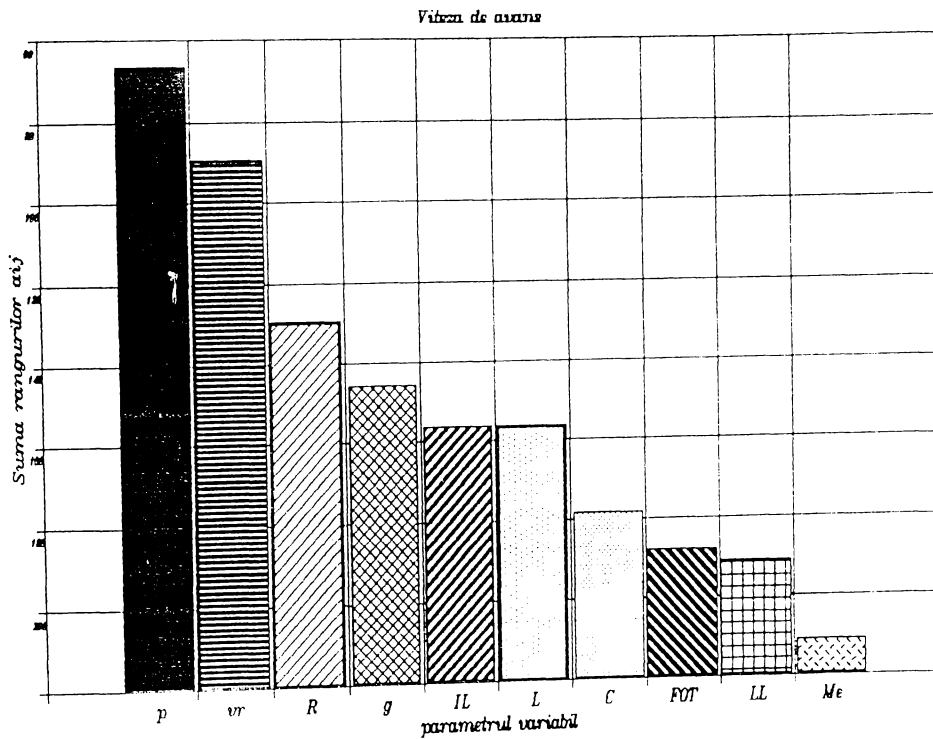


Fig.3.6 Histograma corespunzătoare ordinii de influență a factorilor de intrare asupra mărimii vitezei de avans v_e

asemănările sunt pregnante, totuși apar o serie de deosebiri, printre cele mai semnificative fiind:

- plasarea pe un loc frunțas 4 a grosimii g a OT, cu o influență semnificativă în productivitatea prelucrării Q_p ;
- influența mai scăzută a lichidului de lucru, în comparație cu ponderea sa asupra productivității prelucrării Q_p ;
- materialul OT este un factor secundar.

Ar fi interesant de realizat, alături de acest tip de experiment, un experiment de tip activ, care să permită obținerea unor relații matematice de legătură între factori, pe lângă ierarhizarea acestora.

3.2 Modelarea matematică prin experiment activ a procesului de prelucrare prin eroziune electrică complexă

Modelarea matematică prin experiment activ a procesului de prelucrare prin EEC, prin metode statistice, impune parcurgerea următoarelor etape:

a) premodelarea, realizată în vederea obținerii unor informații apriorice:

- variabilele de stare și parametri procesului;
- limitele de existență și intervalele de variație ale parametrilor procesului;
- gradul de legătură între variabilele de stare și parametri procesului.

b) modelarea, realizată pe baza experimentului factorial, prelucrarea datelor experimentale conducând la ecuațiile modelului matematic al procesului de prelucrare prin EEC.

3.2.1 Premodelarea

Prima etapă a premodelării constă în selectarea parametrilor și a variabilelor de stare care vor intra în structura modelului procesului.

La alegerea variabilelor de stare trebuie respectate urmâ-

toarele condiții [91,118,119,121,122]:

- să aibă o caracteristică cantitativă (să poată fi măsurată);
- să fie o măsură directă, nemijlocită a eficienței procedurii;
- să fie eficientă din punct de vedere statistic, adică să aibă, pe cât posibil, o dispersie cât mai mică în timpul experimentului.

La alegerea parametrilor trebuie să se satisfacă următoarele condiții:

- să fie reglabili pe modelul cercetat;
- să se cunoască precizia de măsurare.

Pentru parametrii și variabilele de stare se mai impun și alte condiții:

- să aibă domenii de determinare stabilite de limitările tehnologice sau de strategia conducerii procesului;
- să asigure o corespondență biunivocă.

A doua etapă a premodelării impune obținerea informației în experimentul preliminar. În această etapă informația poate fi obținută prin trei modalități:

- a) din literatura de specialitate și pe baza experienței specialiștilor care lucrează în domeniu;
- b) din experiențele anterioare efectuate pe utilajul respectiv;
- c) prin realizarea unui experiment de selecționare, cu un număr relativ mic de determinări.

Respectând toate restricțiile prezentate mai sus și ținând cont de particularitățile specifice procesului de prelucrare a fantelor prin EEC, variabilele de stare alese sunt:

- durata prelucrării t [min];
- uzura radială a discului obiect de transfer [mm].

Având în vedere posibilitățile concrete de dirijare din exterior a procesului eroziv în condițiile practice de prelucrare a fantelor, parametrii procesului de prelucrare prin EEC stabiliți pentru acest experiment sunt:

- treapta tensiunii de mers în gol U_g [V];

- treapta rezistenței suplimentare R_s [Ω];
- grosimea discului OT g [mm];
- tensiunea pe spațiul de lucru U [V].

Stabilirea mărimii parametrilor procesului, respectiv a variabilelor de stare, s-a realizat pe baza punctelor a și c, prezentate anterior, adică atât din literatura de specialitate, din experiența unor specialiști, cât și din experimentări realizate special în acest scop, drept criteriu acceptându-se stabilitatea procesului.

În urma acestor cercetări s-au stabilit condițiile de prelucrare pentru cazul concret analizat (material OP - oțel inoxidabil; material OT - OL37; lichid de lucru - silicat de sodiu în soluție apoasă cu densitatea $\rho = 1,24 \text{ g/cm}^3$, $M = 3$) și anume:

- tensiunea $U = 22-30 \text{ V}$;
- viteza relativă OT-OP $v_r = 20-25 \text{ m/s}$;
- natura circuitului electric de alimentare - rezistiv;
- presiunea dintre OP și OT $p = 0,1 \dots 0,3 \text{ N/mm}^2$;
- forma OT - disc;
- introducerea lichidului de lucru în zona de prelucrare cu jet;
- grosimea OT $g = 1-3 \text{ mm}$;
- sistem de reglare automată a avansului, utilizând ca element de execuție un cilindru hidraulic;

3.2.2 Modelarea matematică prin experiment activ

Utilizarea în practica tehnologică a unor modele determinate statistic a fost acceptată sub toate aspectele deoarece metodologia determinării modelelor este riguroasă sub aspect matematic, rezultatele obținute satisfac necesitățile uzuale, iar metoda de interferență statistică limitează substanțial numărul experiențelor.

În cadrul procesului de modelare matematică a prelucrării prin EEC s-a urmărit determinarea legăturilor existente între cei patru parametri reglabili ai procesului și cei doi indicatori tehnico-economici, legătură statistică denumită de corelație.

3.2.2.1 Programul de experimentare

S-au realizat câte un experiment factorial pentru prelucrarea fantelor deschise prin EEC în bare din oțel inoxidabil W14541 (10TiNiCr180 STAS 3583-80) cu diametrele de 45, 50, 65, 90, și 100 mm.

S-a admis un model matematic liniar de forma:

$$y = b_0 + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + \dots + b_i * x_i + \dots + b_n * x_n \quad (3.11)$$

unde: y - funcția de răspuns urmărită; x_1, x_2, \dots, x_n - factorii independenți ai procesului; b_0, b_1, \dots, b_n - coeficienții de regresie de valoare constantă care urmează să fie determinați pe baza experimentului.

Pentru barele cu diametrul de 90 mm s-a proiectat și realizat un experiment factorial complet cu un număr $N = 2^4 = 16$ încercări experimentale cu trei replici la fiecare nivel, iar pentru barele de diametru 45, 50, 65 și 100 mm, s-au proiectat și realizat câte un experiment factorial incomplet, fracționat la $1/2$ cu un număr de $N = 2^{4-1} = 8$ încercări experimentale. De asemenea pentru determinarea dispersiei reproductibilității s-au realizat câte trei experimentări într-un punct median al spațiului factorial.

Introducând nivelele de variație ale factorilor independenți exprimați în unități convenționale (-1 pentru nivelul inferior și +1 pentru nivelul superior al fiecărui factor), se obțin matricile program destinate cercetării experimentale efective a proceselor de prelucrarea fantelor prin EEC în bare din oțel inoxidabil:

a) pentru barele de diametru 45, 50, 65 și 100 mm, matricea program este dată în tabelul 3.29:

În tabelul 3.29 semnificațiile notațiilor sunt următoarele:

- x_1 - treapta tensiunii de mers în gol U_g [V];
- x_2 - treapta rezistenței suplimentare R_s [Ω];
- x_3 - grosimea discului OT g [mm];
- x_4 - tensiunea pe spațiul de lucru U [V];

Tabelul 3.29

Matricea program pentru experimentul factorial incomplet

Nr exp.	x_1	x_2	x_3	x_4	Y_1	Y_2
1	-1	-1	1	-1		
2	+1	-1	-1	+1		
3	-1	+1	-1	+1		
4	+1	+1	-1	-1		
5	-1	-1	+1	+1		
6	+1	-1	+1	-1		
7	-1	+1	+1	-1		
8	+1	+1	+1	+1		

- Y_1 - durata prelucrării t [min];

- Y_2 - uzura radială a OT [mm].

Valorile concrete pentru fiecare caz în parte se vor prezenta într-un capitol următor.

b) pentru barele de diametru 90 mm matricea program este dată în tabelul 3.30.

Tabelul 3.30

Matricea program pentru experimentul factorial complet

Nr exp.	x_1	x_2	x_3	x_4	Y_1	Y_2
1	+1	-1	-1	-1		
2	-1	-1	-1	-1		
3	+1	+1	-1	-1		
4	-1	+1	-1	-1		
5	+1	-1	+1	+1		
6	-1	-1	+1	-1		
7	+1	+1	+1	-1		
8	-1	+1	+1	-1		
9	+1	-1	-1	+1		
10	-1	-1	-1	+1		
11	+1	+1	-1	+1		
12	-1	+1	-1	+1		
13	+1	-1	+1	+1		
14	-1	-1	+1	+1		
15	+1	+1	+1	+1		
16	-1	+1	+1	+1		

Semnificațiile mărimilor din tabelul 3.30 sunt identice cu

cele prezentate în tabelul 3.29, cu excepția lui x_3 , care în acest caz este valoarea inductivității L din circuitul electric de alimentare a spațiului de lucru.

3.2.2.2 Conducerea experimentului și analiza rezultatelor obținute

După programarea experimentului se trece la efectuarea lui. Pentru îndepărtarea greșelilor sistematice, ordinea desfășurării experiențelor se alege conform succesiunilor întâmplătoare a numerelor.

Atât pentru experimentul factorial complet, cât și pentru cel fracționat s-au rulat datele cu câte un program pe calculator, metoda de calcul fiind canalizată în principal spre determinarea coeficienților ecuației de regresie, iar apoi spre verificarea concordanței modelului liniar propus cu modelul experimental.

Algoritmul de calcul este prezentat în figura 3.7, semnificațiile notațiilor din figură fiind următoarele:

- y - variabila de stare (calculată);
- x_i - factorii procesului;
- b_i - coeficienții ecuației de regresie;
- n - numărul factorilor;
- y_n - valoarea experimentală medie a variabilei de stare;
- N - numărul punctelor experimentale;
- S_u^2 - dispersia determinărilor paralele;
- y_{uk} - variabila de stare (în determinări paralele);
- C_o - valoarea calculată a criteriului Cochran;
- r - numărul de determinări paralele;
- $C_{o, 0,05}(y, n)$ - valoarea tabelată a criteriului Cochran;
- S_o^2 - eroarea experimentală (dispersia reproductibilității);
- S_{bi}^2 - dispersia coeficienților;
- $S_{t, 0,05}(y)$ - valoarea tabelată a criteriului Student;
- S_{conc}^2 - dispersia de concordanță;
- F_{ic} - valoarea calculată a criteriului Fischer;

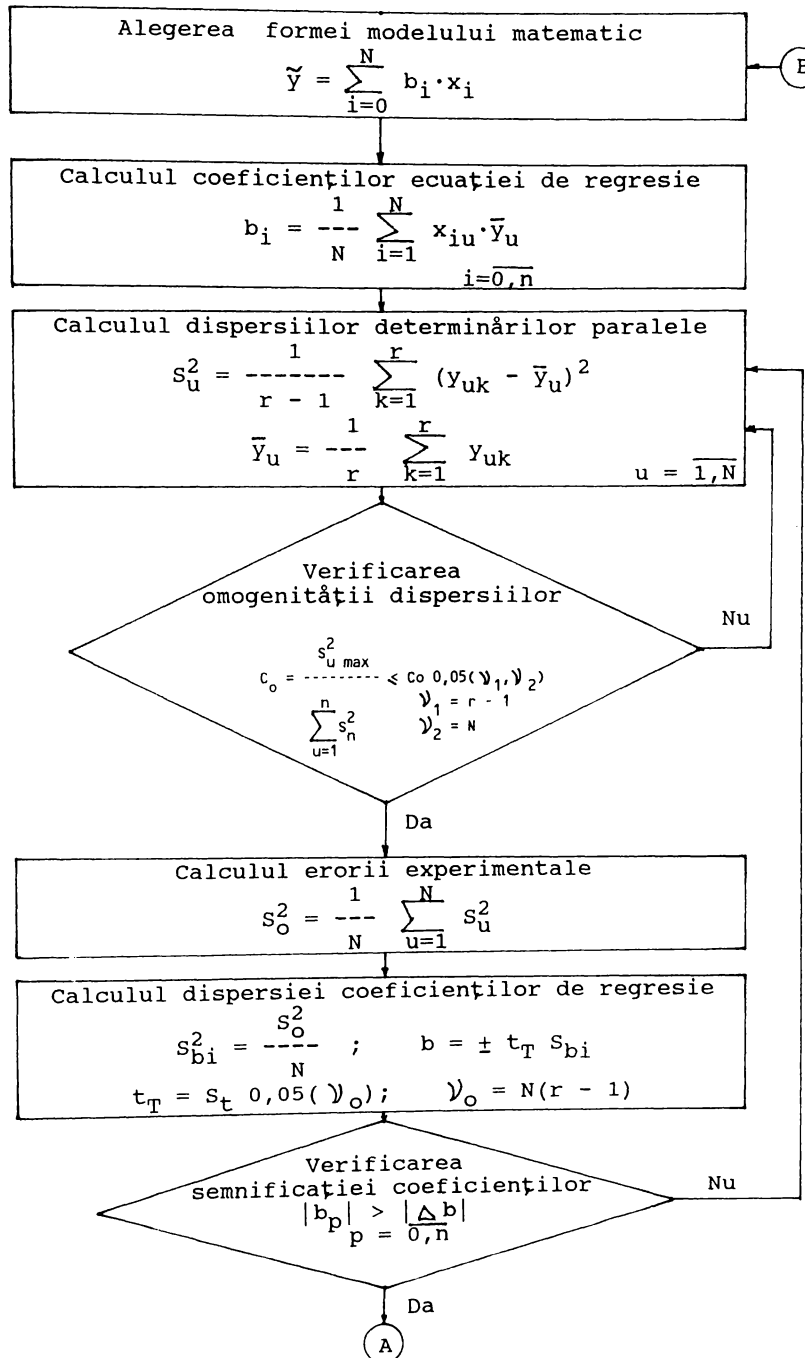


Fig.3.7 Algoritmul de calcul pentru prelucrarea datelor experimentale

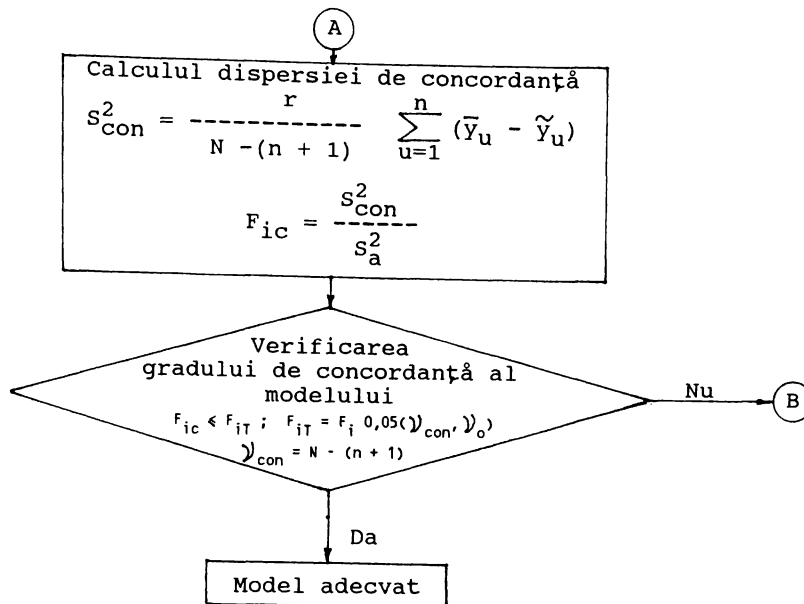


Fig.3.7 Algoritm de calcul pentru prelucrarea datelor experimentale (continuare)

- F_{iT} - valoarea tabelată a criteriului Fischer.

Se prezintă în continuare rezultatele și interpretarea lor pentru fiecare diametru în parte (inclusiv matricea program completă, obținută în condițiile prezentate anterior).

În tabelele 3.31, 3.32, 3.33, 3.34 se prezintă matricile

Tabelul 3.31

Matricea program pentru experimentul factorial incomplet în cazul prelucrării barei cu diametrul de 45 mm

Nr exp.	x_1	x_2	x_3	x_4	Y_1	Y_2
1	-1	-1	-1	-1	4,0	0,9
2	+1	-1	-1	+1	3,0	0,7
3	-1	+1	-1	+1	4,0	0,8
4	+1	+1	-1	-1	1,5	0,9
5	-1	-1	+1	+1	7,0	0,7
6	+1	-1	+1	-1	2,1	0,4
7	-1	+1	+1	-1	2,5	0,5
8	+1	+1	+1	+1	1,33	0,3

Tabelul 3.32
Matricea program pentru experimentul factorial incomplet în cazul prelucrării barei cu diametrul de 50 mm

Nr exp.	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	Y ₁	Y ₂
1	-1	-1	-1	-1	3,5	0,8
2	+1	-1	-1	+1	2,25	0,9
3	-1	+1	-1	+1	3,0	0,9
4	+1	+1	-1	-1	1,6	0,9
5	-1	-1	+1	+1	8,0	0,8
6	+1	-1	+1	-1	3,0	0,7
7	-1	+1	+1	-1	2,6	0,6
8	+1	+1	+1	+1	2,33	0,8

Tabelul 3.33
Matricea program pentru experimentul factorial incomplet în cazul prelucrării barei cu diametrul de 65 mm

Nr exp.	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	Y ₁	Y ₂
1	-1	-1	-1	-1	7,25	1,3
2	+1	-1	-1	+1	3,33	1,4
3	-1	+1	-1	+1	7,25	1,4
4	+1	+1	-1	-1	2,66	1,3
5	-1	-1	+1	+1	19,0	1,3
6	+1	-1	+1	-1	4,25	0,9
7	-1	+1	+1	-1	4,5	1,3
8	+1	+1	+1	+1	4,0	0,9

program complete, inclusiv valorile obținute pentru indicatorii de performanță urmăriți, în cazul realizării fantelor în barele de oțel inoxidabil de diametre 45, 50, 65 și 100 mm.

Valorile concrete ale parametrilor prezentați în tabelele

3.31, 3.32 și 3.33 sunt:

- x_1 - treapta tensiunii de mers în gol U_g [V];
 $x_1 = +1$ pentru treapta 3 ($U_g = 37$ V);
 $x_1 = -1$ pentru treapta 2 ($U_g = 30$ V);
- x_2 - treapta rezistenței suplimentare R_s [Ω];
 $x_2 = +1$ pentru treapta 16 ($R_s = 0,10\Omega$)
 $x_2 = -1$ pentru treapta 15 ($R_s = 0,11\Omega$)
- x_3 - grosimea discului OT g [mm];
 $x_3 = +1$ pentru $g = 1,5$ mm
 $x_3 = -1$ pentru $g = 1,0$ mm
- x_4 - tensiunea pe spațiul de lucru U [V];
 $x_4 = +1$ pentru $U = 26$ V
 $x_4 = -1$ pentru $U = 24$ V

Tabelul 3.34

Matricea program pentru experimentul factorial incomplet în cazul prelucrării barei cu diametrul de 100 mm

Nr exp.	x_1	x_2	x_3	x_4	Y_1	Y_2
1	-1	-1	-1	-1	8,82	2,05
2	+1	-1	-1	+1	6,0	2,15
3	-1	+1	-1	+1	34,5	2,3
4	+1	+1	-1	-1	7,5	2,2
5	-1	-1	+1	+1	11,75	2,1
6	+1	-1	+1	-1	6,5	1,9
7	-1	+1	+1	-1	16,45	2,0
8	+1	+1	+1	+1	15,50	1,8

Valorile concrete ale parametrilor prezentați în tabelul 3.34 sunt:

- x_1 - treapta tensiunii de mers în gol U_g [V];
 $x_1 = +1$ pentru treapta 4 ($U_g = 44$ V);
 $x_1 = -1$ pentru treapta 3 ($U_g = 37$ V);

- x_2 - treapta rezistenței suplimentare R_S [Ω];
 $x_2 = +1$ pentru treapta 14 ($R_S = 0,15\Omega$)
 $x_2 = -1$ pentru treapta 16 ($R_S = 0,10\Omega$)
- x_3 - grosimea discului OT g [mm];
 $x_3 = +1$ pentru $g = 2,0$ mm
 $x_3 = -1$ pentru $g = 1,5$ mm
- x_4 - tensiunea pe spațiul de lucru U [V];
 $x_4 = +1$ pentru $U = 30$ V
 $x_4 = -1$ pentru $U = 26$ V

In tabelul 3.35 este dată matricea program pentru experimen-

Tabelul 3.35

Matricea program pentru experimentul factorial complet în cazul prelucrării barei cu diametrul de 90 mm

Nr exp.	x_1	x_2	x_3	x_4	Y_1	Y_2
1	-1	-1	-1	-1	6,5	1,2
2	+1	-1	-1	-1	4,0	1,6
3	-1	+1	-1	-1	12,0	1,1
4	+1	+1	-1	-1	6,1	1,2
5	-1	-1	+1	-1	6,5	1,3
6	+1	-1	+1	-1	4,0	1,2
7	-1	+1	+1	-1	8,665	1,25
8	+1	+1	+1	-1	9,25	1,2
9	-1	-1	-1	+1	7,0	1,3
10	+1	-1	-1	+1	4,75	1,5
11	-1	+1	-1	+1	14,5	1,8
12	+1	+1	-1	+1	7,1	1,35
13	-1	-1	+1	+1	7,665	1,3
14	+1	-1	+1	+1	4,25	1,4
15	-1	+1	+1	+1	11,5	1,7
16	+1	+1	+1	+1	7,0	1,3

tul factorial complet în cazul realizării fantelor în bare din oțel inoxidabil cu diametrul de 90 mm, semnificațiile și valorile folosite în tabel fiind:

- x_1 - treapta tensiunii de mers în gol U_g [V];
 $x_1 = +1$ pentru treapta 4 ($U_g = 44$ V);
 $x_1 = -1$ pentru treapta 3 ($U_g = 37$ V);
- x_2 - treapta rezistenței suplimentare R_s [Ω];
 $x_2 = +1$ pentru treapta 14 ($R_s = 0,15\Omega$)
 $x_2 = -1$ pentru treapta 16 ($R_s = 0,10\Omega$)
- x_3 - valoarea inductanței suplimentare (L_s);
 $x_3 = +1$ pentru $L_s = 1,4$ mH
 $x_3 = -1$ pentru $L_s = 0$ mH
- x_4 - tensiunea pe spațiul de lucru U [V];
 $x_4 = +1$ pentru $U = 28$ V
 $x_4 = -1$ pentru $U = 24$ V

În tabelul 3.36 sunt centralizate principalele date rezultate în urma prelucrării matematice a datelor culese din experimentele realizate.

Tabelul 3.36
Rezultatele obținute în urma prelucrării datelor experimentale

$\phi 45$		$\phi 50$		$\phi 65$		$\phi 90$		$\phi 100$	
Y_1	Y_2	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2
Prag de semnificație									
0,215	0,020	0,407	0,027	0,813	0,062	0,577	0,137	1,242	0,081
Fisher calculat									
15,35	16,22	8,67	2,56	17,84	4,86	2,77	1,14	18,30	1,87
Fischer tabelat									
19,16	19,16	19,16	19,16	19,16	19,16	2,82	2,60	19,16	19,16
Ordinea de influență									
x_1	x_3	x_1	x_3	x_1	x_3	x_2	x_3	x_2	x_3
x_2	x_1	x_2	x_1	x_2	x_1	x_1	x_4	x_1	x_1
x_4	x_2	x_3	x_4	x_4	x_4	x_4	x_1	x_4	x_4
x_3	x_4	x_4	x_2	x_3	x_2	x_3	x_2	x_3	x_2

Observație. În toate cazurile, modelul ales este concordant.

Ecuatiile de regresie obtinute sunt:

- pentru $\phi 45$ mm:

$$Y_1 = 3,18 - 1,20 x_1 - 0,85 x_2 + 0,05 x_3 + 0,65 x_4 \quad (3.12)$$

$$Y_2 = 0,65 - 0,08 x_1 - 0,03 x_2 - 0,18 x_3 - 0,02 x_4 \quad (3.13)$$

- pentru $\phi 50$ mm:

$$Y_1 = 3,29 - 0,99 x_1 - 0,90 x_2 + 0,70 x_3 + 0,61 x_4 \quad (3.14)$$

$$Y_2 = 0,80 + 0,03 x_1 + 0,00 x_2 - 0,08 x_3 + 0,05 x_4 \quad (3.15)$$

- pentru $\phi 65$ mm:

$$Y_1 = 6,53 - 2,97 x_1 - 1,93 x_2 + 1,41 x_3 + 1,87 x_4 \quad (3.16)$$

$$Y_2 = 1,23 - 0,10 x_1 + 0,00 x_2 - 0,13 x_3 + 0,03 x_4 \quad (3.17)$$

- pentru $\phi 90$ mm:

$$Y_1 = 7,55 - 1,74 x_1 + 1,97 x_2 - 0,20 x_3 + 0,42 x_4 \quad (3.18)$$

$$Y_2 = 1,36 - 0,01 x_1 + 0,01 x_2 - 0,03 x_3 + 0,10 x_4 \quad (3.19)$$

- pentru $\phi 100$ mm:

$$Y_1 = 13,6 - 4,24 x_1 + 5,37 x_2 - 1,07 x_3 + 3,32 x_4 \quad (3.20)$$

$$Y_2 = 2,06 - 0,05 x_1 + 0,01 x_2 - 0,11 x_3 + 0,03 x_4 \quad (3.21)$$

Se remarcă deci, în toate cazurile, obținerea unor modele liniare de variație, atât pentru durata prelucrării, cât și pentru uzura radială a OT.

Cele mai importante influențe sunt pentru timpul de prelucrare din partea treptei de rezistență suplimentară, respectiv a treptei de tensiune de mers în gol, iar pentru uzura OT, a grosimii OT, a treptei de tensiune de mers în gol, cu excepția barei cu diametrul de 90 mm, la care primordiale sunt valoarea inductivității din circuitul electric de alimentare a spațiului de lucru, respectiv a tensiunii pe spațiul de lucru.

Prin rezultatele obținute se confirmă studiile și cercetările teoretice prezentate în fundamentarea teoretică a proceselor fundamentale prin EEC.

4 CONTRIBUTII LA OPTIMIZAREA PROCESULUI DE PRELUCRARE A FANTELOR PRIN EROZIUNE ELECTRICA COMPLEXA

Analiza tehnico-economică a modului particular de realizare a fanțelor prin EEC relevă importanța deosebită a câtorva indicatori de performanță.

Din punct de vedere economic, un indicator semnificativ îl reprezintă timpul de prelucrare, tinzându-se spre minimizarea lui. Deși am fi tentați să credem că, în anumite condiții date, timpul de prelucrare scade odată cu creșterea puterii introduse în spațiul de lucru, acest lucru se întâmplă doar pînă la o valoare critică a puterii, după care timpul de prelucrare crește. Experimental (fig.4.1 și fig.4.2) s-a constatat că variația timpului de prelucrare în funcție de puterea introdusă în spațiul de lucru are o variație cu minim, adică, peste o anumită limită, deși consumul energetic crește, efectele economice rezultate sunt negative.

Explicația acestei variații o reprezintă existența unei densități de curent maxim admisibile, peste care DEI își pierde caracterul de impuls, transformându-se în descărcări în arc staționar, cu toate efectele negative legate de aceasta (scăderea cantității de material prelevat în unitatea de timp, înrăutățirea calității suprafețelor prelucrate, instabilitate a procesului de prelucrare, creșterea uzurii OT, etc.).

Pentru o prelucrare economică este deci necesar să se lucreze în zona de minim a timpului de prelucrare.

Un alt indicator de performanță care afectează direct precizia fanțelor realizate este uzura OT. Pe lângă controlul direct al lungimii fanțelor prelucrate prin EEC (fig.5.8), uzura OT are influențe și asupra construcției sistemului de avans automat (prin condițiile necesare pentru compensarea, continuă sau inter-

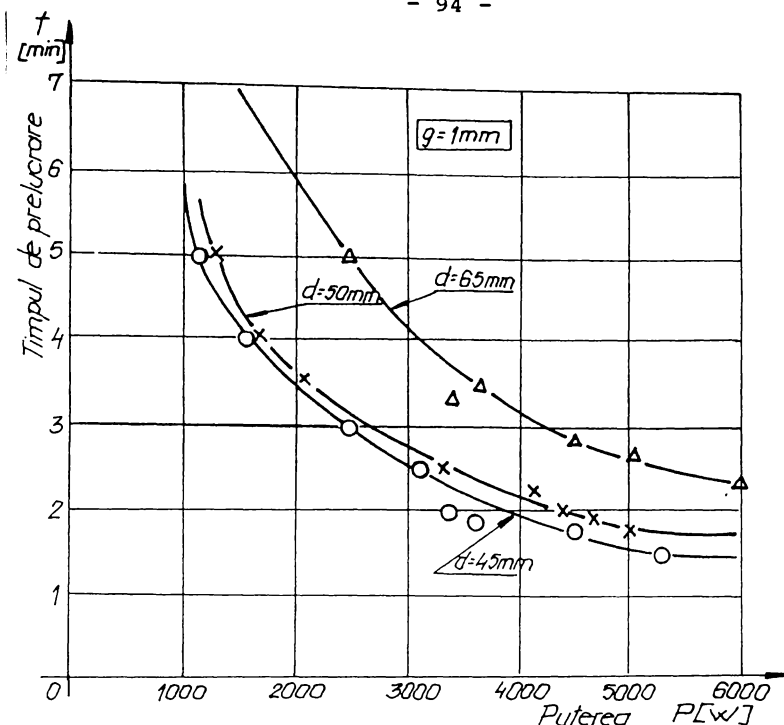


Fig.4.1 Variația timpului de prelucrare t în funcție de puterea introdusă în spațiul de lucru pentru grosimea OT de 1 mm

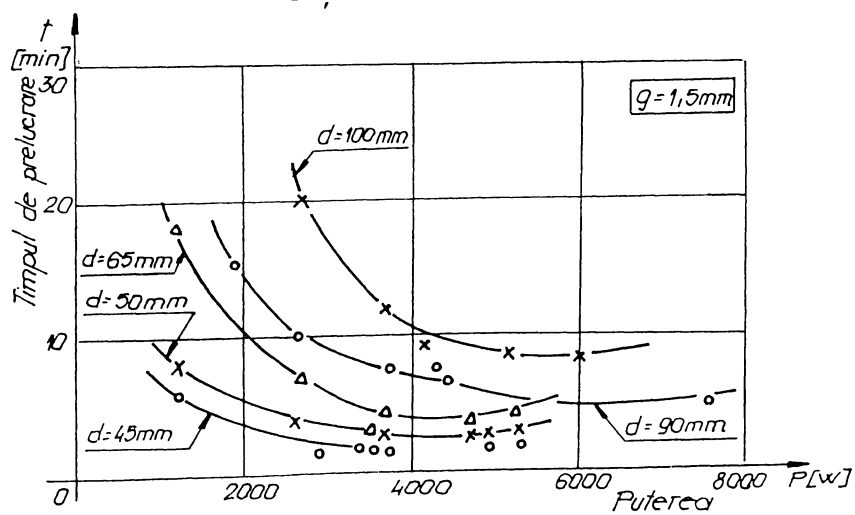


Fig.4.2 Variația timpului de prelucrare t în funcție de puterea introdusă în spațiul de lucru pentru grosimea OT de 1,5 mm

mitentă, a uzurii) și asupra pretului unei fante, prin scăderea numărului de fante posibil de realizat cu un OT și prin creșterea timpului auxiliar necesar schimbării OT uzat cu altul nou.

Și în acest caz, variația uzurii OT în funcție de puterea introdusă în spațiul de lucru este o variație cu minim (fig.4.3 și fig.4.4). La energii mici ale DEI, efectul abraziv este mare, iar la energii mari ale DEI se ajunge în zona arcului staționar.

Un al treilea indicator de performanță extrem de important în cazul realizării fantelor prin EEC este lățimea fantei. În anumite condiții date (LL, grosimea, materialul și precizia OT, tensiunea pe spațiul de lucru impusă de sistemul de reglare automată a avansului în condiții de stabilitate a procesului, utilajul tehnologic de prelucrare, etc.), lățimea fantei realizate depinde exclusiv de modul de spălare a spațiului de lucru (jet sau imersie) și de curentul de prelucrare (fig.2.13).

Determinarea și prezentarea expresiilor analitice de dependență dintre puterea introdusă în spațiul de lucru și timpul de prelucrare sau uzura OT, respectiv dintre curentul din spațiul de lucru și lățimea fantei, permite determinarea rapidă a acestora, diminuând numărul încercărilor experimentale necesare stabilirii tehnologiilor de prelucrare. De asemenea, se poate stabili zona optimă de prelucrare în care se obțin timpi minimi de prelucrare, respectiv uzuri minime ale OT în condițiile unor consumuri energetice economice.

4.1 Model matematic privind determinarea funcțiilor de răspuns în cazul prelucrării fantelor prin eroziune electrică complexă

Pentru construirea modelului matematic al dependenței timpului de prelucrare, respectiv a uzurii OT, în funcție de puterea introdusă în spațiul de lucru s-au folosit datele experimentale cuprinse în figurile 4.1, 4.2, 4.3 și 4.4.

Prin testări anterioare se deduce că alura curbelor care

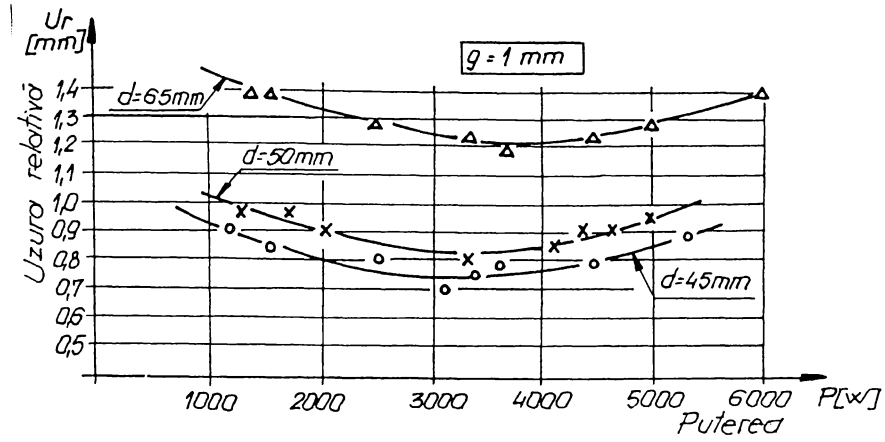


Fig.4.3 Variația uzurii OT U_{OT} în funcție de puterea introdusă în spațiul de lucru pentru grosimea OT de 1 mm

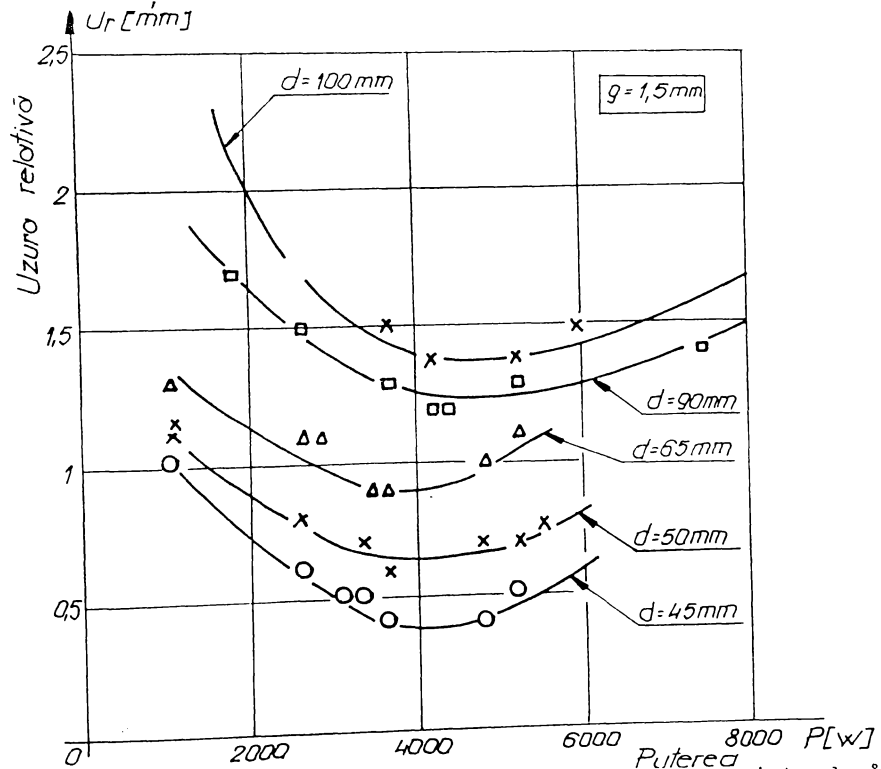


Fig.4.4 Variația uzurii OT U_{OT} în funcție de puterea introdusă în spațiul de lucru pentru grosimea OT de 1,5 mm

exprimă dependența timpului de prelucrare t în funcție de puterea P introdusă în spațiul de lucru $t = f(P)$, respectiv uzura OT U_{OT} în funcție de puterea P introdusă în spațiul de lucru $U_{OT} = f(P)$, pot fi modelate printr-o funcție polinomială de ordinul trei, exprimată sub forma:

$$M(x) = a_0x^3 + a_1x^2 + a_2x + a_3 \quad (4.1)$$

în care x este puterea introdusă în spațiul de lucru $P[W]$, iar $M(x)$ este indicatorul de performanță urmărit (timpul de prelucrare sau uzura OT).

Având în vedere numărul relativ mare de puncte care determină curba, pentru a alege cele mai reprezentative perechi de puncte se pune condiția ca pătratul diferenței dintre valorile calculate $M(x_i)$ și cele determinate experimental y_i , pentru fiecare coeficient a_i , să fie minim, adică:

$$a = \min \sum_{i=0}^m (M(x_i) - y_i)^2 \quad (4.2)$$

Calculând derivatele parțiale în raport cu coeficienții a_i

$$\frac{\partial a}{\partial a_0} = 2 \sum_{i=0}^m (M(x_i) - y_i) x^3 \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial a}{\partial a_1} = 2 \sum_{i=0}^m (M(x_i) - y_i) x^2 \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial a}{\partial a_2} = 2 \sum_{i=0}^m (M(x_i) - y_i) x^1 \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial a}{\partial a_3} = 2 \sum_{i=0}^m (M(x_i) - y_i) x^0 \quad (4.6)$$

și făcând înlocuirile necesare se obține:

$$a_0 \sum_{i=1}^m x_i^6 + a_1 \sum_{i=1}^m x_i^5 + a_2 \sum_{i=1}^m x_i^4 + a_3 \sum_{i=1}^m x_i^3 = \sum_{i=0}^m y_i x_i^3 \quad (4.7)$$

$$a_0 \sum_{i=1}^m x_i^5 + a_1 \sum_{i=1}^m x_i^4 + a_2 \sum_{i=1}^m x_i^3 + a_3 \sum_{i=1}^m x_i^2 = \sum_{i=0}^m y_i x_i^2 \quad (4.8)$$

$$a_0 \sum_{i=1}^m x_i^4 + a_1 \sum_{i=1}^m x_i^3 + a_2 \sum_{i=1}^m x_i^2 + a_3 \sum_{i=1}^m x_i = \sum_{i=0}^m y_i x_i^1 \quad (4.9)$$

$$a_0 \sum_{i=1}^m x_i^3 + a_1 \sum_{i=1}^m x_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^m x_i + a_3 \sum_{i=1}^m x_i^0 = \sum_{i=0}^m y_i x_i^0 \quad (4.10)$$

În relațiile de mai sus semnificațiile notațiilor sunt: m - numărul punctelor obținute în experiment; a_i - coeficienții funcției polinomiale; y_i - valoarea funcției de răspuns determinată experimental pentru puterea x_i introdusă în spațiul de lucru.

Prin rezolvarea sistemului format de relațiile (4.7), (4.8), (4.9) și (4.10) se obțin valorile coeficienților a_i din relația (4.1).

Pentru rezolvarea sistemului s-a folosit sistemul de programare MathCAD, elaborat de firma Mathsoft.Inc.Cambridge, MA, SUA [114], rulat pe un microcalculator compatibil IBM.

După obținerea funcțiilor polinomiale care reflectă modelul fizic cercetat, prin anularea derivatelor de ordinul unu se obține valoarea optimă (timp de prelucrare sau uzură a OT minimă).

Experimentările, atât pentru stabilirea timpului de prelucrare t , cât și pentru uzura radială U_r , s-au realizat utilizând două tipuri de OT, cu grosimile de 1 mm, respectiv 1,5 mm, grosimea OP variind în trepte distincte între 45 mm și 100 mm.

4.1.1 Stabilirea modelelor matematice pentru timpul de prelucrare

Atât datele de intrare, cât și rezultatele obținute în urma prelucrării datelor experimentale s-au centralizat în tabelele 4.1 ... 4.8. Datele experimentale au fost obținute în urma unor

prelucrări pe mașina MEC 100, utilizându-se ca LL o soluție de silicat solubil de sodiu cu modulul $M = 3$ și densitatea de $1,24 \text{ g/cm}^3$, un OT de grosime 1 mm sau 1,5 mm, având o viteză periferică de 25 m/s. În fiecare tabel se precizează și condițiile concrete de prelucrare. Pentru fiecare caz în parte se reprezintă grafic curba obținută prin modelare, cât și punctele obținute prin experimentări.

În tabele și figuri s-au făcut următoarele notații:

- P [W] - puterea introdusă în spațiul de lucru, notată în modelarea matematică cu x_i ;

- t [min] - timpul de prelucrare, notat în modelarea matematică cu y_i ;

- $M(x_i)$ - valoarea timpului de prelucrare, calculată cu expresia determinată prin modelare, pentru valoarea x_i , notată în experiment cu b_i ;

- e [%] - eroarea relativă procentuală a mărimilor calculate față de mărimile obținute în experiment, în punctul considerat.

Tabelul 4.1

Rezultatele obținute în cazul grosimii OT $g = 1 \text{ mm}$ și diametrul OP de 45 mm

Nr. crt.	Puterea P [W] (x_i)	Timpul de prelucrare măsurat t [min] (y_i)	Timpul de prelucrare calculat $M(x_i)$ (b_i)	Eroarea e [%]
1.	1200	5,010	4,941	1,370
2.	1560	4,110	4,237	-3,080
3.	2640	2,930	2,802	4,363
4.	3120	2,480	2,416	2,574
5.	3300	2,230	2,300	-3,157
6.	3360	2,180	2,265	-3,889
7.	4800	1,700	1,664	2,145
8.	5280	1,460	1,475	-1,032

$$M(x) = -5,276 \cdot 10^{-11} \cdot x^3 + 7,221 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 - 4 \cdot 10^{-3} \cdot x + 8,37$$

Timpul de prelucrare minim se obține pentru $P = 4497 \text{ W}$

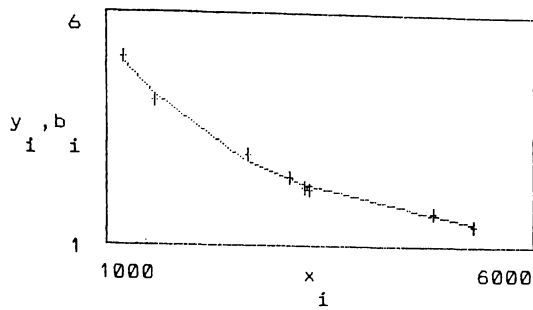


Fig.4.5 Curba timpului de prelucrare obținută prin modelare matematică și punctele obținute în experiment pentru grosimea OT de 1 mm și diametrul OP de 45 mm

Tabelul 4.2

Rezultatele obținute în cazul grosimii OT $g = 1$ mm și diametrul OP de 50 mm

Nr. crt.	Puterea P [W] (x_i)	Timpul de prelucrare măsurat t [min] (y_i)	Timpul de prelucrare calculat $M(x_i)$ (b_i)	Eroarea e[%]
1.	1170	5,030	5,043	-0,266
2.	1600	4,000	3,947	1,324
3.	2080	3,540	3,578	-1,080
4.	3360	2,530	2,539	-0,367
5.	4160	2,250	2,177	3,252
6.	4320	2,000	2,109	-5,436
7.	4800	1,980	1,885	4,814
8.	5040	1,700	1,752	-3,048

$$M(x) = -6,427 \cdot 10^{-11} \cdot x^3 + 7,894 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 - 4 \cdot 10^{-3} \cdot x + 8,34$$

Timpul de prelucrare minim se obține pentru $P = 4526$ W

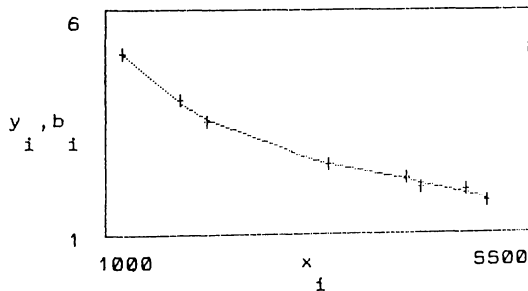


Fig.4.6 Curba timpului de prelucrare obținută prin modelare matematică și punctele obținute în experiment pentru grosimea OT de 1 mm și diametrul OP de 50 mm

Tabelul 4.3

Rezultatele obținute în cazul grosimii OT $g = 1$ mm și diametrul OP de 65 mm

Nr. crt.	Puterea P [W] (x_i)	Timpul de prelucrare măsurat t [min] (y_i)	Timpul de prelucrare calculat M(x_i) (b_i)	Eroarea e[%]
1.	1140	7,290	7,471	-2,484
2.	1560	7,015	6,752	3,746
3.	2680	5,010	4,962	0,961
4.	3380	3,840	4,002	-4,223
5.	3600	3,640	3,735	-2,619
6.	4680	2,793	2,731	2,212
7.	5040	2,660	2,529	4,916
8.	6000	2,320	2,385	-2,798

$$M(x) = 2,299 \cdot 10^{-11} \cdot x^3 - 5,017 \cdot 10^{-8} \cdot x^2 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot x + 9,444$$

Timpul de prelucrare minim se obtine pentru P = 5303 W

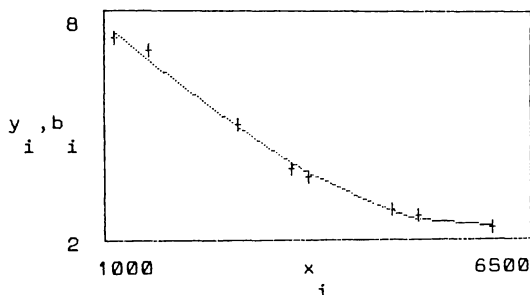


Fig.4.7 Curba timpului de prelucrare obținută prin modelare matematică și punctele obținute în experiment pentru grosimea OT de 1 mm și diametrul OP de 65 mm

Tabelul 4.4

Rezultatele obținute în cazul grosimii OT $g = 1,5$ mm și diametrul OP de 45 mm

Nr. crt.	Puterea P [W] (x_i)	Timpul de prelucrare măsurat t [min] (y_i)	Timpul de prelucrare calculat M(x_i) (b_i)	Eroarea e[%]
1.	1560	6,320	6,324	-0,065
2.	2880	2,730	2,696	1,242
3.	3120	2,510	2,494	0,640
4.	3360	2,330	2,390	-2,562
5.	4800	2,890	2,861	0,997
6.	5280	3,010	3,025	-0,498

$$M(x) = -2,066 \cdot 10^{-10} \cdot x^3 + 2,784 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 12 \cdot 10^{-3} \cdot x + 18,997$$

Timpul de prelucrare minim se obtine pentru P = 3550 W

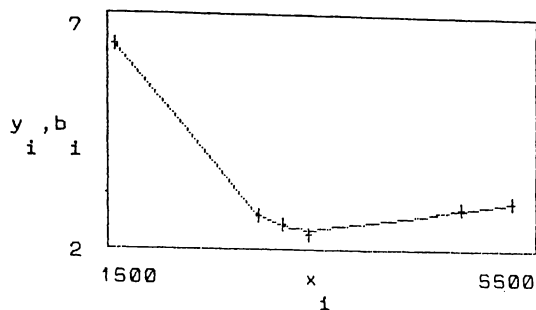


Fig.4.8 Curba timpului de prelucrare obținută prin modelare matematică și punctele obținute în experiment pentru grosimea OT de 1,5 mm și diametrul OP de 45 mm

Tabelul 4.5

Rezultatele obținute în cazul grosimii OT $g = 1,5$ mm și diametrul OP de 50 mm

Nr. crt.	Puterea P [W] (x_i)	Timpul de prelucrare măsurat t [min] (y_i)	Timpul de prelucrare calculat $M(x_i)$ (b_i)	Eroarea e[%]
1.	1560	8,020	8,026	-0,070
2.	2640	4,050	4,023	0,669
3.	3600	2,830	2,878	-1,707
4.	4320	2,940	2,921	0,663
5.	4800	3,200	3,158	1,323
6.	5040	3,260	3,295	-1,073

$$M(x) = -1,767 \cdot 10^{-10} \cdot x^3 + 2,611 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 12 \cdot 10^{-3} \cdot x + 21,503$$

Timpul de prelucrare minim se obține pentru $P = 3779$ W

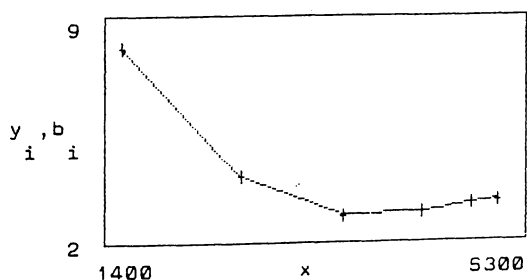


Fig.4.9 Curba timpului de prelucrare obținută prin modelare matematică și punctele obținute în experiment pentru grosimea OT de 1,5 mm și diametrul OP de 50 mm

Tabelul 4.6
Rezultatele obținute în cazul grosimii OT $g = 1,5$ mm și diametrul OP de 65 mm

Nr. crt.	Puterea P [W] (x_i)	Timpul de prelucrare măsurat t [min] (y_i)	Timpul de prelucrare calculat M(x_i) (b_i)	Eroarea e[%]
1.	1560	17,630	17,601	0,165
2.	2640	6,800	6,925	-1,845
3.	3600	3,900	3,718	4,655
4.	4320	3,710	3,747	-1,008
5.	4800	4,320	4,387	-1,549
6.	6000	6,080	6,061	0,316

$$M(x) = -4,331 \cdot 10^{-10} \cdot x^3 + 6,586 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 32 \cdot 10^{-3} \cdot x + 52,654$$

Timpul de prelucrare minim se obține pentru $P = 3919$ W

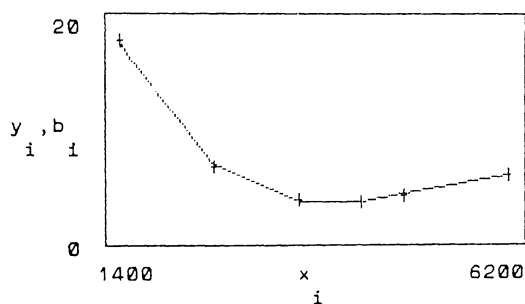


Fig.4.10 Curba timpului de prelucrare obținută prin modelare matematică și punctele obținute în experiment pentru grosimea OT de 1,5 mm și diametrul OP de 65 mm

Tabelul 4.7
Rezultatele obținute în cazul grosimii OT $g = 1,5$ mm și diametrul OP de 90 mm

Nr. crt.	Puterea P [W] (x_i)	Timpul de prelucrare măsurat t [min] (y_i)	Timpul de prelucrare calculat M(x_i) (b_i)	Eroarea e[%]
1.	1960	14,510	14,419	0,626
2.	2640	10,880	11,064	-1,694
3.	3640	7,660	7,609	0,665
4.	4200	6,400	6,322	1,221
5.	6720	4,250	4,327	-1,808
6.	7560	4,400	4,359	0,935

$$M(x) = -6,181 \cdot 10^{-11} \cdot x^3 + 1,389 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 10^{-2} \cdot x + 29,806$$

Timpul de prelucrare minim se obține pentru $P = 6056$ W

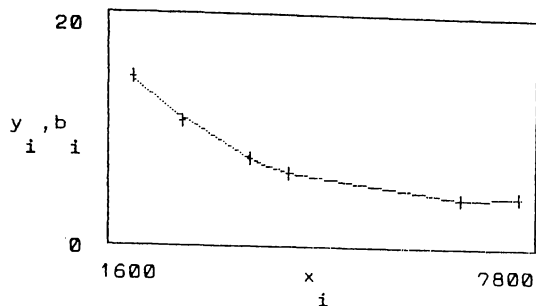


Fig.4.11 Curba timpului de prelucrare obținută prin modelare matematică și punctele obținute în experiment pentru grosimea OT de 1,5 mm și diametrul OP de 90 mm

Tabelul 4.8

Rezultatele obținute în cazul grosimii OT $g = 1,5$ mm și diametrul OP de 100 mm

Nr. crt.	Puterea P [W] (x_i)	Timpul de prelucrare măsurat t [min] (y_i)	Timpul de prelucrare calculat $M(x_i)$ (b_i)	Eroarea e[%]
1.	2860	19,910	19,900	0,049
2.	3640	11,600	11,579	0,179
3.	4160	8,790	8,886	-1,097
4.	5500	8,400	8,070	3,926
5.	6000	8,170	8,574	-4,941
6.	6480	8,880	8,740	1,574

$$M(x) = -6,688 \cdot 10^{-10} \cdot x^3 + 1,135 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 - 63 \cdot 10^{-3} \cdot x + 123,334$$

Timpul de prelucrare minim se obține pentru $P = 4895$ W

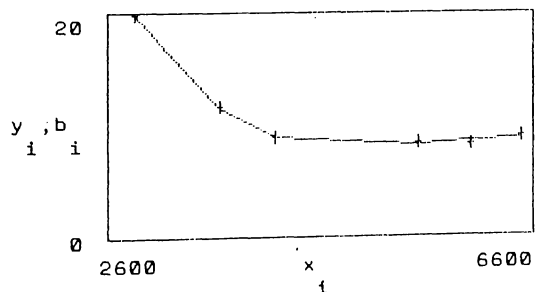


Fig.4.12 Curba timpului de prelucrare obținută prin modelare matematică și punctele obținute în experiment pentru grosimea OT de 1,5 mm și diametrul OP de 100 mm

În urma analizei datelor din tabele și graficele prezentate se observă o foarte bună corespondență între valorile experimentale și modelul matematic propus, erorile nedepășind valoarea de 5% decât într-un singur punct, marea majoritate fiind sub 3%.

4.1.2 Stabilirea modelelor matematice pentru uzura obiectului de transfer

Prelucrarea datelor experimentale s-a realizat în condiții asemănătoare cazului timpului de prelucrare, rezultatele obținute fiind prezentate în tabelele 4.9...4.16 și figurile 4.13...4.20.

În tabele și figuri s-au făcut următoarele notații:

- P [W] - puterea introdusă în spațiul de lucru, notată în modelarea matematică cu x_i ;
- U_r - uzura radială a OT, măsurată pe diametru, notată în modelarea matematică cu y_i ;
- $M(x_i)$ - valoarea uzurii radiale, calculată cu expresia determinată prin modelare, pentru valoarea x_i , notată în experiment cu b_i ;
- e [%] - eroarea relativă procentuală a mărimilor calculate față de mărimile obținute în experiment, în punctul considerat.

Tabelul 4.9

Rezultatele obținute în cazul grosimii OT $g = 1$ mm și diametrul OP de 45 mm

Nr. crt.	Puterea P [W] (x_i)	Uzura radială a OT măsurată U_r [mm] (y_i)	Uzura radială a OT calculată $M(x_i)$ (b_i)	Eroarea e[%]
1.	1200	0,930	0,912	1,977
2.	1560	0,840	0,869	-3,410
3.	2640	0,780	0,764	2,022
4.	3120	0,706	0,738	-4,531
5.	3300	0,740	0,733	1,006
6.	3360	0,760	0,731	3,772
7.	4800	0,790	0,812	-2,841
8.	5280	0,910	0,897	1,408

$$M(x) = 5,829 \cdot 10^{-12} \cdot x^3 - 1,573 \cdot 10^{-8} \cdot x^2 - 1,094 \cdot 10^{-4} \cdot x + 1,056$$

Uzura minimă se obține pentru $P = 3632$ W

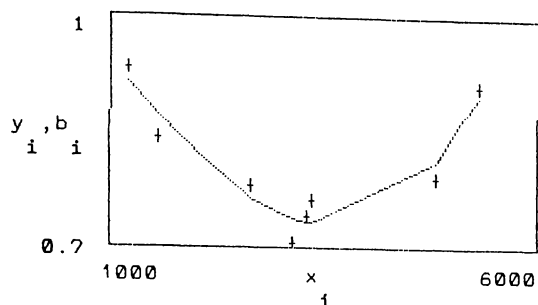


Fig.4.13 Curba uzurii OT obținută prin modelare matematică și punctele obținute în experiment pentru grosimea OT de 1 mm și diametrul OP de 45 mm

Tabelul 4.10

Rezultatele obținute în cazul grosimii OT $g = 1$ mm și diametrul OP de 50 mm

Nr. crt.	Puterea P [W] (x_i)	Uzura radială a OT măsurată U_r [mm] (y_i)	Uzura radială a OT calculată $M(x_i)$ (b_i)	Eroarea e[%]
1.	1170	0,980	0,988	-0,844
2.	1800	0,970	0,945	2,613
3.	2080	0,910	0,922	-1,287
4.	3360	0,820	0,839	-2,298
5.	4160	0,850	0,850	-0,004
6.	4320	0,890	0,862	3,146
7.	4800	0,906	0,922	-1,809
8.	5040	0,970	0,968	0,196

$$M(x) = 1,138 \cdot 10^{-11} \cdot x^3 - 7,138 \cdot 10^{-8} \cdot x^2 + 6,636 \cdot 10^{-5} \cdot x + 0,99$$

Uzura minimă se obține pentru $P = 3895$ W

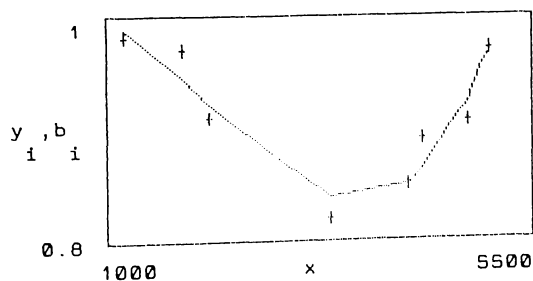


Fig.4.14 Curba uzurii OT obținută prin modelare matematică și punctele obținute în experiment pentru grosimea OT de 1 mm și diametrul OP de 50 mm

Tabelul 4.11
Rezultatele obținute în cazul grosimii OT $g = 1$ mm și diametrul OP de 65 mm

Nr. crt.	Puterea P [W] (x_i)	Uzura radială a OT măsurată U_r [mm] (y_i)	Uzura radială a OT calculată $M(x_i)$ (b_i)	Eroarea e[%]
1.	1140	1,380	1,391	-0,768
2.	1560	1,373	1,362	0,769
3.	2680	1,303	1,279	1,812
4.	3380	1,230	1,239	-0,755
5.	3600	1,200	1,231	-2,593
6.	4680	1,240	1,239	0,068
7.	5040	1,290	1,265	1,942
8.	6000	1,400	1,409	-0,649

$$M(x) = 6,197 \cdot 10^{-12} \cdot x^3 - 3,795 \cdot 10^{-8} \cdot x^2 + 1,278 \cdot 10^{-6} \cdot x + 1,429$$

Uzura minimă se obtine pentru $P = 4519$ W

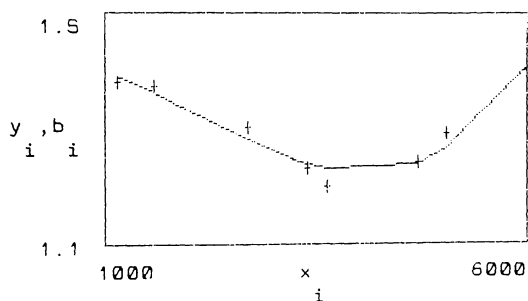


Fig.4.15 Curba uzurii OT obținută prin modelare matematică și punctele obținute în experiment pentru grosimea OT de 1 mm și diametrul OP de 65 mm

Tabelul 4.12
Rezultatele obținute în cazul grosimii OT $g = 1,5$ mm și diametrul OP de 45 mm

Nr. crt.	Puterea P [W] (x_i)	Uzura radială a OT măsurată U_r [mm] (y_i)	Uzura radială a OT calculată $M(x_i)$ (b_i)	Eroarea e[%]
1.	1560	0,950	0,949	0,110
2.	2640	0,605	0,615	-1,682
3.	3120	0,510	0,488	4,231
4.	3300	0,450	0,449	0,317
5.	3360	0,423	0,436	-3,176
6.	4800	0,390	0,391	-0,360
7.	5280	0,520	0,519	0,185

$$M(x) = 2,058 \cdot 10^{-11} \cdot x^3 - 1,218 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 - 7,578 \cdot 10^{-5} \cdot x + 1,285$$

Uzura minimă se obtine pentru $P = 4464$ W

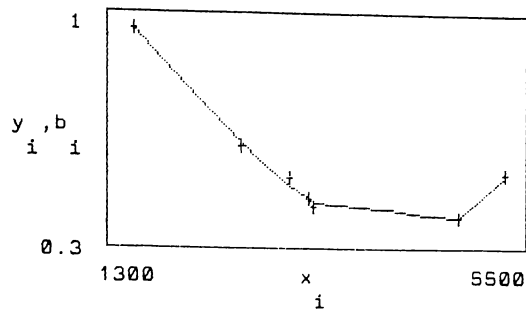


Fig.4.16 Curba uzurii OT obținută prin modelare matematică și punctele obținute în experiment pentru grosimea OT de 1,5 mm și diametrul OP de 45 mm

Tabelul 4.13

Rezultatele obținute în cazul grosimii OT $g = 1,5$ mm și diametrul OP de 50 mm

Nr. crt.	Puterea P [W] (x_i)	Uzura radială a OT măsurată U_r [mm] (y_i)	Uzura radială a OT calculată $M(x_i)$ (b_i)	Eroarea e[%]
1.	1560	1,105	1,108	-0,257
2.	2380	0,790	0,767	2,885
3.	3380	0,693	0,703	-1,433
4.	3600	0,663	0,685	-3,324
5.	4680	0,700	0,682	2,538
6.	5040	0,710	0,710	-0,048
7.	5500	0,760	0,765	-0,712

$$M(x) = -2,752 \cdot 10^{-12} \cdot x^3 + 9,268 \cdot 10^{-8} \cdot x^2 - 6,277 \cdot 10^{-4} \cdot x + 1,872$$

Uzura minimă se obține pentru $P = 4130$ W

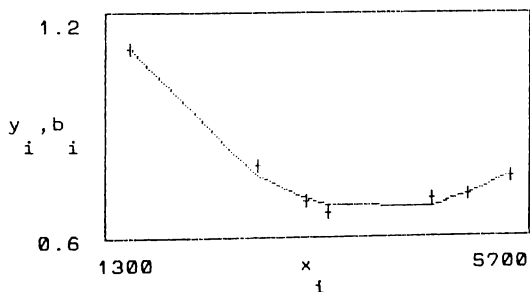


Fig.4.17 Curba uzurii OT obținută prin modelare matematică și punctele obținute în experiment pentru grosimea OT de 1,5 mm și diametrul OP de 50 mm

Tabelul 4.14
Rezultatele obținute în cazul grosimii OT $g = 1,5$ mm și diametrul OP de 65 mm

Nr. crt.	Puterea P [W] (x_i)	Uzura radială a OT măsurată U_r [mm] (y_i)	Uzura radială a OT calculată $M(x_i)$ (b_i)	Eroarea e[%]
1.	1560	1,310	1,314	-0,308
2.	2640	1,100	1,094	0,509
3.	2880	1,060	1,032	2,618
4.	3380	0,890	0,921	-3,428
5.	3600	0,870	0,886	-1,891
6.	4680	1,020	0,978	4,091
7.	5040	1,123	1,147	-2,144

$$M(x) = 4,947 \cdot 10^{-11} \cdot x^3 - 3,924 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 + 7,756 \cdot 10^{-4} \cdot x + 0,871$$

Uzura minimă se obține pentru $P = 4313$ W

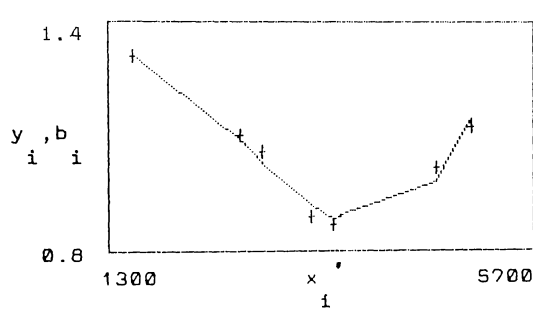


Fig.4.18 Curba uzurii OT obținută prin modelare matematică și punctele obținute în experiment pentru grosimea OT de 1,5 mm și diametrul OP de 65 mm

Tabelul 4.15
Rezultatele obținute în cazul grosimii OT $g = 1,5$ mm și diametrul OP de 90 mm

Nr. crt.	Puterea P [W] (x_i)	Uzura radială a OT măsurată U_r [mm] (y_i)	Uzura radială a OT calculată $M(x_i)$ (b_i)	Eroarea e[%]
1.	1960	1,730	1,746	-0,935
2.	2640	1,503	1,473	1,972
3.	3640	1,310	1,280	2,307
4.	4080	1,220	1,255	-2,845
5.	4200	1,210	1,253	-3,540
6.	5040	1,320	1,284	2,736
7.	7560	1,440	1,442	-0,156

$$M(x) = -1,354 \cdot 10^{-11} \cdot x^3 + 2,351 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 + 10^{-3} \cdot x + 3,427$$

Uzura minimă a OT se obține pentru $P = 4138$ W

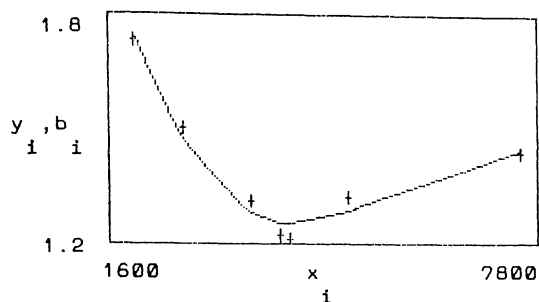


Fig.4.19 Curba uzurii OT obținută prin modelare matematică și punctele obținute în experiment pentru grosimea OT de 1,5 mm și diametrul OP de 90 mm

Tabelul 4.16

Rezultatele obținute în cazul grosimii OT $g = 1,5$ mm și diametrul OP de 100 mm

Nr. crt.	Puterea P [W] (x_i)	Uzura radială a OT măsurată U_r [mm] (y_i)	Uzura radială a OT calculată $M(x_i)$ (b_i)	Eroarea e[%]
1.	1960	2,100	2,099	0,027
2.	2640	1,750	1,758	-0,448
3.	3640	1,510	1,475	2,306
4.	4080	1,390	1,418	-2,010
5.	5040	1,390	1,398	-0,554
6.	6000	1,480	1,470	0,673
7.	7560	1,623	1,625	-0,115

$$M(x) = -1,171 \cdot 10^{-11} \cdot x^3 + 2,272 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 - 10^{-3} \cdot x + 3,981$$

Uzura minimă a OT se obține pentru $P = 4701$ W

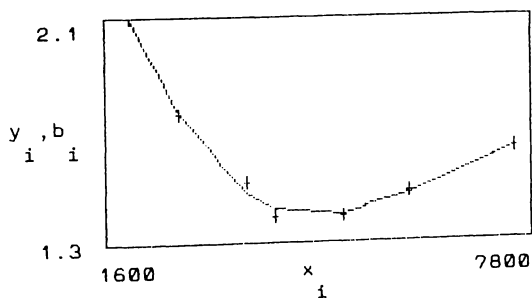


Fig.4.20 Curba uzurii OT obținută prin modelare matematică și punctele obținute în experiment pentru grosimea OT de 1,5 mm și diametrul OP de 100 mm

4.1.3 Stabilirea modelelor matematice pentru lățimea fantei

Așa cum s-a precizat, în condiții determinate de prelucrare, s-a constatat că lățimea fantei este determinată esențial de modul de spălare a spațiului de lucru și de curentul de prelucrare, în condițiile în care ceilalți factori de intrare sunt impuși din alte condiții de lucru.

Și în acest caz s-a propus un model matematic sub forma unei funcții polinomiale de ordinul trei, de forma prezentată în relația (4.1).

S-a aplicat aceeași metodologie de calcul ca în cazurile anterioare, rezultatele fiind prezentate în tabelul 4.17 pentru cazul spălării spațiului de lucru prin jet, respectiv în tabelul 4.18 pentru cazul spălării spațiului de lucru prin imersie.

Rezultatele prezentate în tabelele 4.17 și 4.18 se completează cu reprezentările grafice din figurile 4.21 și 4.22, în care se prezintă curba obținută prin modelarea matematică și punctele obținute prin experimentări.

Rezultatele experimentale prezentate în tabelele 4.17 și 4.18 s-au obținut menținând constante ceilalți factori de intrare și anume: LL utilizat a fost o soluție de silicat solubil de sodiu cu modulul $M = 3$ și densitatea de $1,24 \text{ g/cm}^3$, tensiunea pe spațiul de lucru $U = 22 \text{ V}$, OT din tablă de OL37 cu grosimea 1 mm , viteza periferică a OT de 23 m/s .

În tabele 4.17, 4.18 și figurile 4.21 și 4.22 s-au făcut următoarele notații:

- $I \text{ [A]}$ - curentul din spațiul de lucru, notat în modelarea matematică cu x_i ;

- $l \text{ [mm]}$ - lățimea fantei, notată în modelarea matematică cu y_i ;

- $M(x_i)$ - valoarea lățimii fantei, calculată cu expresia determinată prin modelare, pentru valoarea x_i , notată în experiment cu b_i ;

- $e \text{ [%]}$ - eroarea relativă procentuală a mărimilor calculate față de mărimile obținute în experiment, în punctul considerat.

Tabelul 4.17

Rezultatele modelării matematice pentru lățimea fantei, în condițiile spălării spațiului de lucru prin jet

Nr. crt.	Intensitatea I [A] (x_i)	Lățimea fantei măsurată l [mm] (Y_i)	Lățimea fantei calculată M(x_i) (b_i)	Eroarea e[%]
1.	50	2,300	2,305	-0,217
2.	75	2,400	3,380	0,833
3.	100	2,500	2,530	-1,200
4.	125	2,700	2,680	0,741
5.	150	2,750	2,755	-0,182

$$M(x) = -8,1 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 + 2,4 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 - 17 \cdot 10^{-3} \cdot x + 2,68$$

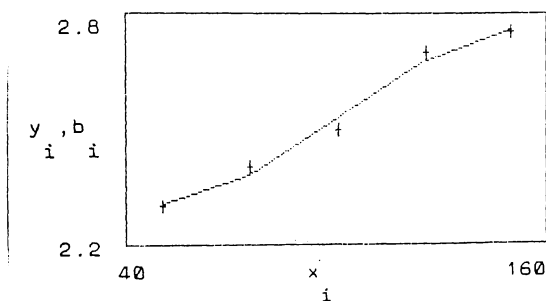


Fig.4.21 Curba lățimii fantei obținută prin modelare matematică și punctele obținute în experiment pentru spălarea spațiului de lucru prin jet

Tabelul 4.18

Rezultatele modelării matematice pentru lățimea fantei, în condițiile spălării spațiului de lucru prin imersie

Nr. crt.	Intensitatea I [A] (x_i)	Lățimea fantei măsurată l [mm] (Y_i)	Lățimea fantei calculată M(x_i) (b_i)	Eroarea e[%]
1.	50	1,250	1,251	-0,057
2.	75	1,300	1,297	0,220
3.	100	1,320	1,324	-0,325
4.	125	1,350	1,347	0,212
5.	150	1,380	1,381	-0,052

$$M(x) = 1,6 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 - 5,143 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 6 \cdot 10^{-3} \cdot x + 1,04$$

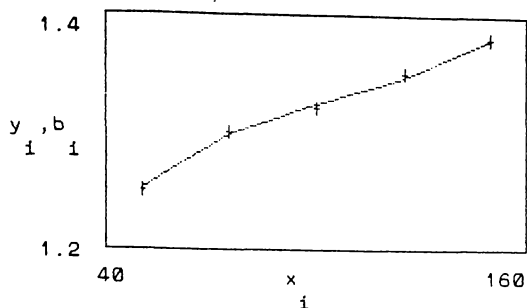


Fig.4.22 Curba lăţimii fantei obţinută prin modelare matematică şi punctele obţinute în experiment pentru spălarea spaţiului de lucru prin imersie

Şi în acest caz fidelitatea modelului matematic propus este remarcabilă, erorile apărute nedepăşind valoarea de 1,2%.

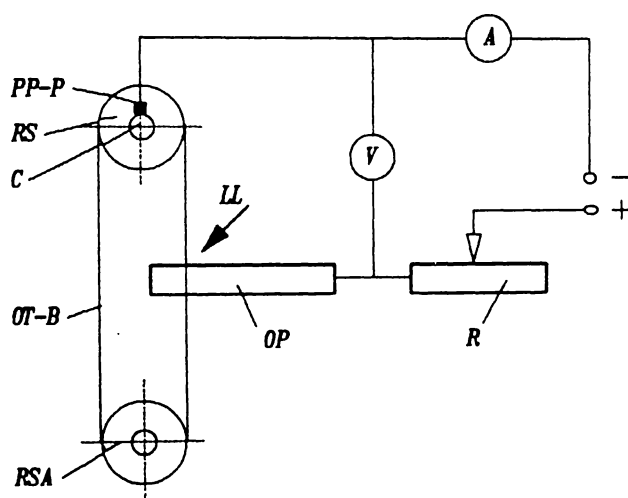
Funcţiile polinomiale determinate îşi găsesc utilitatea în determinarea rapidă a parametrilor de prelucrare în condiţii date, pentru a obţine o lăţime impusă a fantei.

Pentru a verifica corectitudinea modelelor matematice, dispersia reproductibilităţii măsurărilor s-a comparat cu dispersia de adecvanţă între şirul valorilor măsurate şi cel al valorilor calculate, cu ajutorul criteriului Fischer, pentru un prag de semnificaţie $\alpha = 0,05$, rezultând o diferenţă ne semnificativă între cele două dispersii. Deci modelele găsite aproximează valorile măsurate cu o siguranţă de cel puţin 95 %.

5 UTILAJE DE PRELUCRARE A FANTELOR PRIN EROZIUNE
ELECTRICA COMPLEXA

Analizând schemele principale ale diferitelor operații de prelucrare prin EEC [85, 89], se constată că din punct de vedere teoretic, pentru realizarea fanțelor s-ar putea aborda următoarele variante de prelucrare :

a) prelucrarea cu bandă, conform schemei din figura 5.1, în



care notațiile utilizate au următoarea semnificație: OT-P - obiect de transfer bandă; OP - obiect de prelucrat; RS - rolă de sprijin; PP-P - sistem portperieperie; C - colector; A - ampermetru; V - voltmetru; LL - lichid de lucru; R - rezistență variabilă.

Fig.5.1 Schema realizării fanțelor prin EEC cu OT bandă

Datorită însă cinematiei particulare a procedeu-

lui, prin această variantă de prelucrare nu se pot realiza decât fante marginale deschise.

b) prelucrarea profilată după contur cu electrod filiform, conform schemei din figura 5.2[51]. Semnificațiile notațiilor din figură sunt identice cu cele din figura 5.1, apărând suplimentar următoarele notații: RG - role de ghidare, OT-F - obiect de

transfer filiform. Datorită problemelor tehnologice care apar la

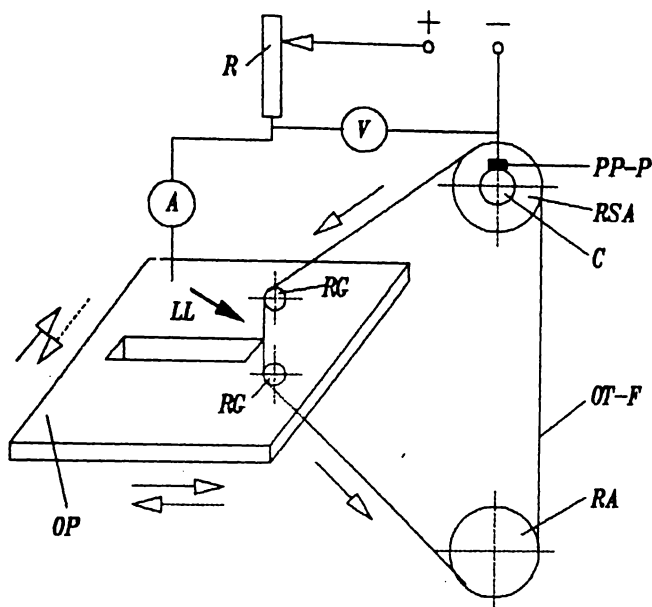


Fig.5.2 Schema realizării fantelor prin EEC cu OT filiform

această variantă de prelucrare, ea se aplică extrem de rar, și mai ales la operații de finisare. În plus, pentru realizarea prelucrării este necesar un alezaj inițial de pornire, care trebuie realizat anterior fie prin așchiere (dacă aceasta este posibil), fie prin procedee de prelucrare neconvențională. Necesitatea realizării acestui alezaj

duce la imposibilitatea aplicării variantei prezentate în marea majoritate a cazurilor.

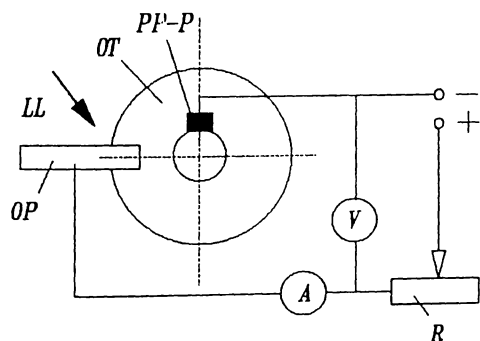


Fig.5.3 Realizarea fantelor deschise prin EEC cu OT disc

c) prelucrarea cu obiect de transfer disc, singura care poate duce la realizarea fantelor prin EEC în condiții tehnologice favorabile, se realizează pentru fantele deschise conform figurii 5.3, iar pentru fantele închise conform figurii 5.4.

Pentru cazul concret al prelucrării fantelor prin EEC s-au conceput și realizat

utilaje speciale de prelucrare. Având în vedere cerințele concrete de producție, dar și

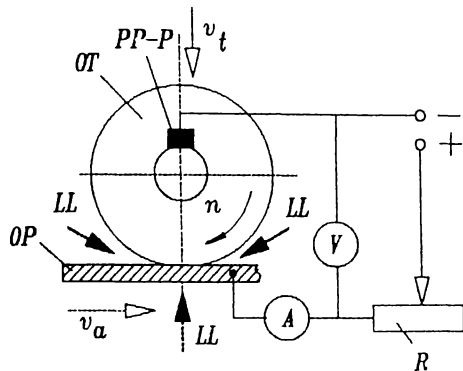


Fig.5.4 Realizarea fantelor închise prin EEC cu OT disc

și necesitatea realizării unor utilaje cât mai universale, primele utilaje realizate se adresează prelucrării fantelor în semifabricate tubulare, care însă prin modificări minime, pot executa fante și în semifabricate plane.

Aplicația practică amintită se referă la realizarea filtrelor tubulare utilizate în alimentarea cu apă potabilă (fig.5.5).

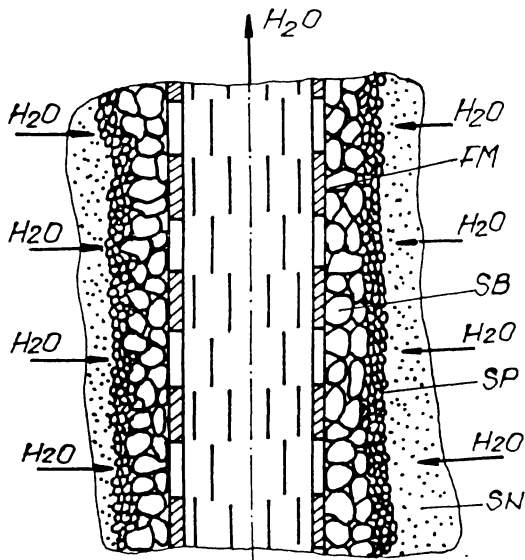


Fig.5.5 Structura unui filtru pentru apă potabilă

După depistarea și localizarea surselor de apă se realizează un foraj, rezultând un puț, cu un diametru mai mare decât al filtrului metalic FM. Se introduce apoi filtrul metalic în puț, care se înconjoară, începând de la filtrul metalic, cu straturi succesive de bolovâniș SB, pietriș SP și apoi nisip SN, obținându-se un excelent filtru pentru potabilizarea apei subterane. Apa, din care s-au separat suspensiile solide ajunge în interiorul filtrului metalic de unde este extrasă cu ajutorul unor

pompe submersibile.

Unele sisteme de filtrare din industria chimică și petrochimică utilizează similar filtre metalice cu fantă, prezentând următoarele caracteristici:

- filtrele metalice se introduc în aparate fixe sub presiune, înconjurându-se de materiale filtrante sau chiar materiale active chimic, la care prin trecerea fluidelor se realizează filtrarea sau reacțiile chimice necesare;

- lățimea fantelor este în general mai mică, iar calitatea materialelor utilizate pentru filtrele metalice superioară din cauza condițiilor de exploatare mai severe.

Structura generală a unui utilaj de prelucrare prin EEC (prezetată la punctul 3.2.2) se regăsește integral și în construcția mașinii de prelucrare a fantelor în semifabricate tubulare.

Operația se execută conform schemei din figura 5.4 (variantea cu jet). Din cauza modului particular de realizare a prelucrării (viteza de avans perpendiculară pe suprafața de prelucrat) și mărimii ridicate a suprafeței active de prelucrare, accesul lichidului de lucru în spațiul de lucru devine extrem de dificil, fiind necesară amplasarea suplimentară a unei noi duze de dirijare a lichidului de lucru în zona de ieșire a OT. După momentul străpungerii semifabricatului (OP), accesul lichidului de lucru este mult mai dificil, fiind necesară o altă duză, în partea inferioară.

Aceste noi duze duc la creșterea debitului lichidului de lucru (deci pompe mai mari), precum și la complicarea utilajului de prelucrare. În plus, în cazul prelucrării fantelor în țevi de lungime mare, amplasarea duzei în interiorul obiectului de prelucrat devine chiar imposibilă.

În această situație este obligatorie realizarea prelucrării cu imersia semifabricatului.

5.1 Sistemul mecanic și sistemul pentru electrolit

Schema de principiu a utilajului de prelucrare a fantelor

prin EEC, conform schemei din figura 5.4, se prezintă în figura 5.6.

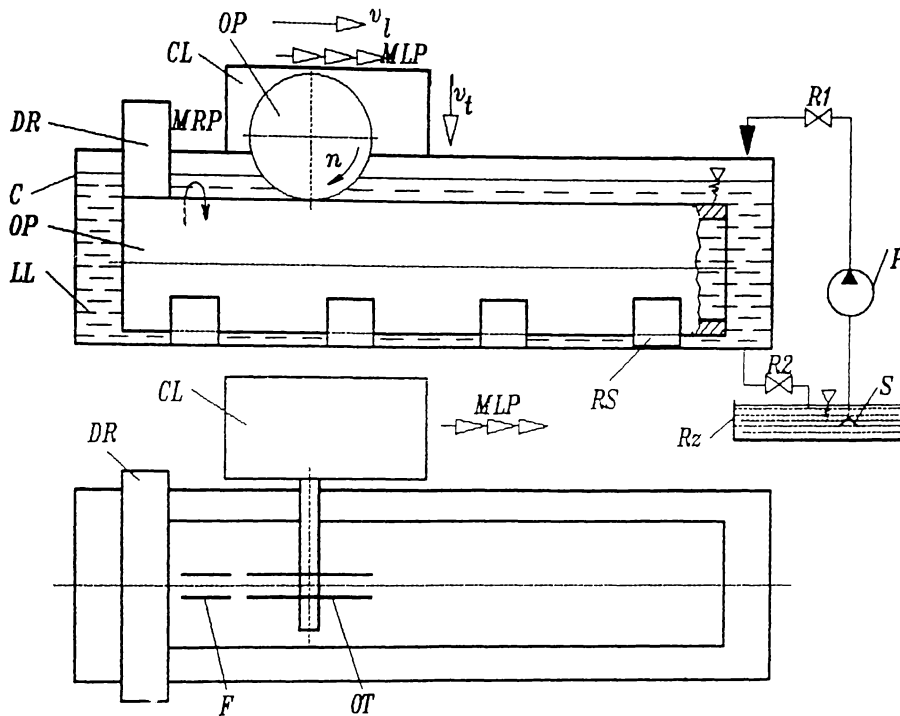


Fig.5.6 Schema mașinii de prelucrare a fantelor prin EEC în semifabricate tubulare

OP este fix axial în timpul prelucrării, fiind complet imersat în cuva de lucru C. Capul de lucru CL se deplasează de-a lungul cuvei, printr-o mișcare de poziționare MLP în cazul realizării fantelor succesive, sau mișcarea de lucru cu avans longitudinal cu viteza v_l , în cazul realizării fantelor de lungime foarte mare.

Semifabricatul tubular se sprijină pe rolele RS, care favorizează mișcarea de rotație de poziționare MPP, realizată cu dispozitivul de rotire și divizare DR. Această mișcare este necesară

sară pentru a aduce noi generatoare ale OP în planul discurilor OT care să fie prelucrate.

Instalația se completează cu sistemul de recirculare a LL, format din rezervorul Rz, sorbul S, robinetele pentru reglarea debitelor R_1 , R_2 , pompa centrifugală P, conductele de legătură CL.

Pe lângă mișcarea de rotație n a OT, ciclul de lucru al utilajului (fig.5.7) mai cuprinde următoarele mișcări:

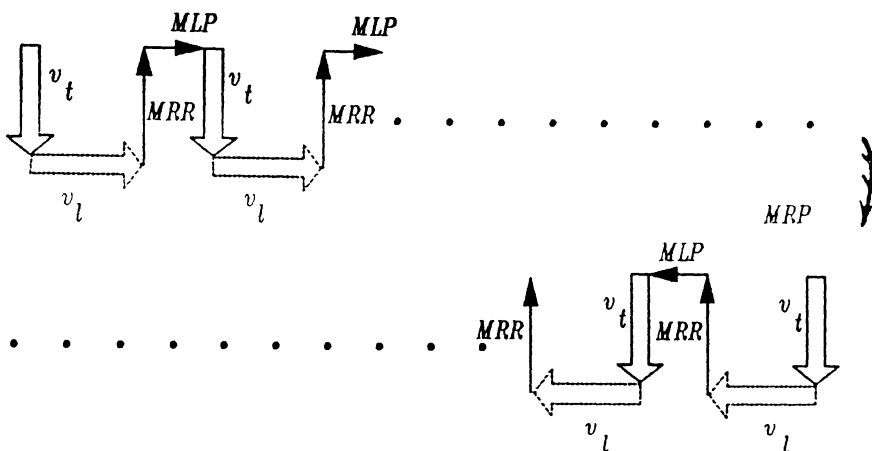


Fig.5.7 Ciclul de lucru pentru realizarea fantelor în semifabricate tubulare

- mișcarea de avans de lucru vertical cu viteza v_t ;
- mișcarea de avans de lucru orizontal cu viteza v_l , executată de capul de lucru, care apare doar în cazul unui raport mare între lungimea fantei l_f și diametrul OT d_{OT} ;
- mișcarea de retragere rapidă a OT, MRR;
- mișcarea de poziționare orizontală a capului de lucru MLP;
- mișcarea de poziționare de rotire a OP, MRP.

Din cauza complicațiilor care apar la utilizarea a două avansuri de lucru, vertical și orizontal, chiar succesive, se preferă utilizarea unor diametre mai mari ale OT.

Cu toate că mărirea diametrului OT este avantajoasă din mai

multe puncte de vedere, acest lucru este limitat, din consideren-

te mecanice, la valori de 700...800 mm. In aceste condiții, totuși pentru fante foarte lungi este obligatorie prevederea avansului longitudinal al capului de lucru.

Pornind de la schema de prelucrare (fig.5.8), în care s-a marcat situația limită de prelucrare, condiția de utilizare numai a avansului vertical, pentru un diametru prestabilit al OT, se exprimă sub forma:

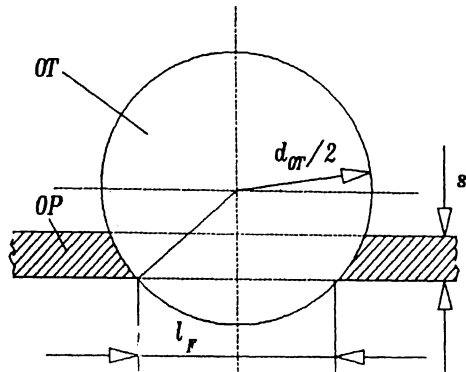


Fig.5.8 Schema de calcul a lungimii maxime a fantei în funcție de diametrul OT

$$\alpha = \arcsin \frac{l_F}{d_{OT}} < \alpha_{\max} \quad (5.1)$$

valoarea maximă a unghiului α calculându-se cu relația:

$$\alpha_{\max} = \arccos \frac{2(d_{F1}/2 + s + 5)}{d_{OT}} \quad (5.2)$$

unde semnificațiile notațiilor sunt: d_{F1} - diametrul flanșei de fixare a OT; s - grosimea peretelui în care se realizează fanta; d_{OT} - diametrul OT; l_F - lungimea necesară a fantei.

In cazul în care condiția (5.1) nu este satisfăcută, prelucrarea fantei nu se poate realiza numai cu avans vertical, fiind necesar și avansul de lucru longitudinal al capului de lucru. Mărimea cursei a_1 a capului de lucru pentru avansul longitudinal va fi:

$$a_1 = l_F - d_{OT} \sin \alpha_{\max} \quad (5.3)$$

unde mărimile din relație au semnificațiile prezentate anterior.

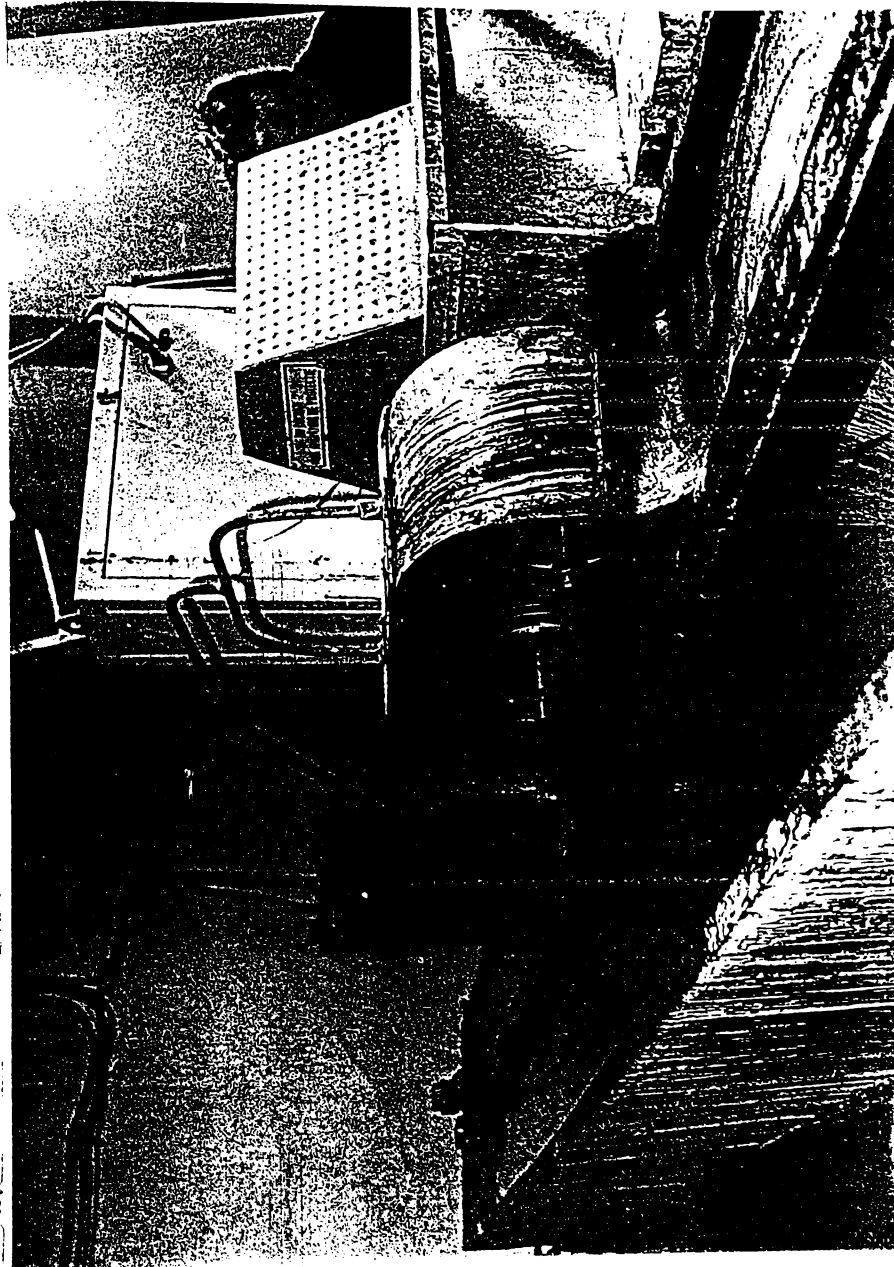


Fig.5.9 Vedere a utilajului de prelucrare a fantelor montat la
Baza Complexa Caracal

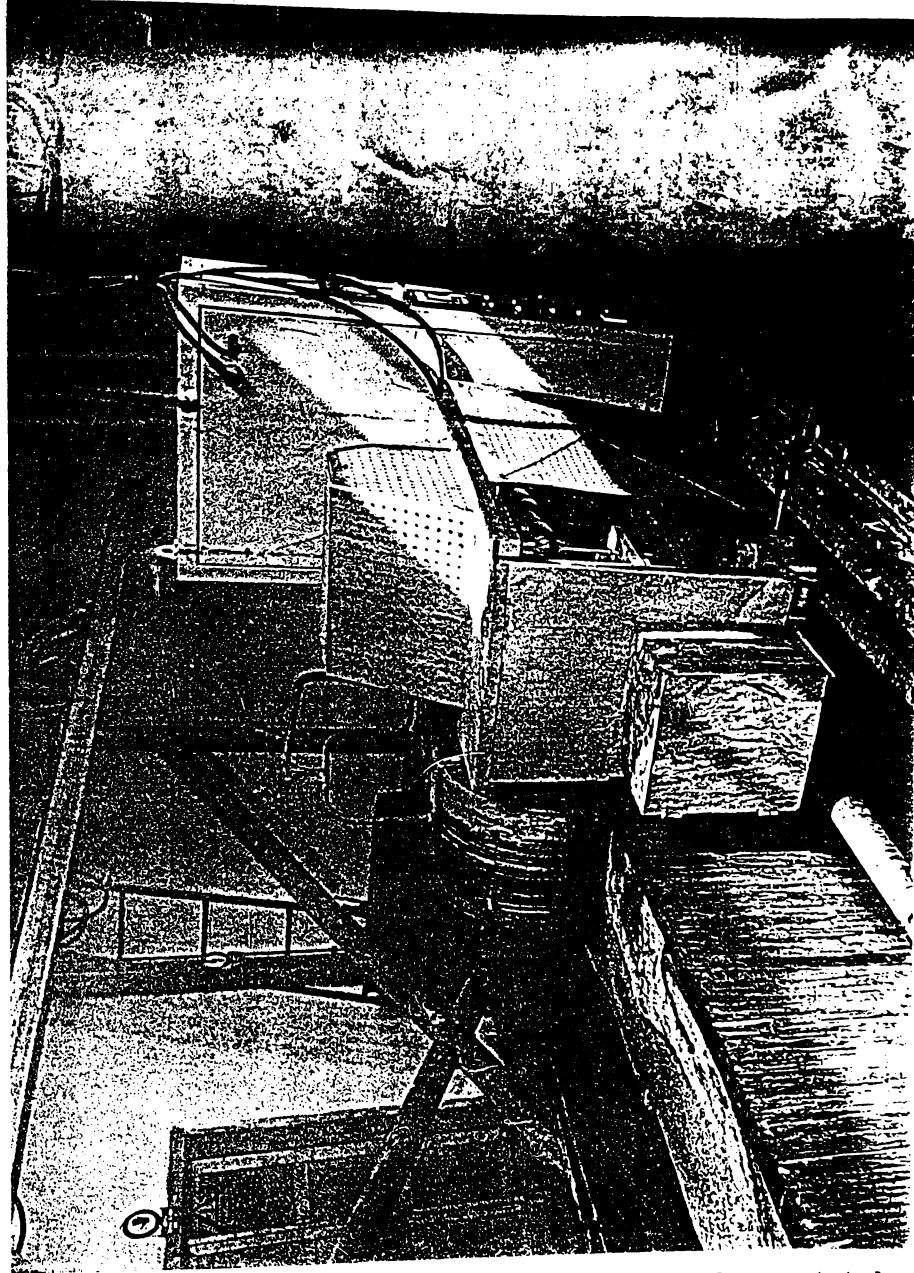


Fig.5.10 Vedere a utilajului de prelucrare a fantelor montat la S.C. Safar Bucuresti, Baza Complexa Caracal

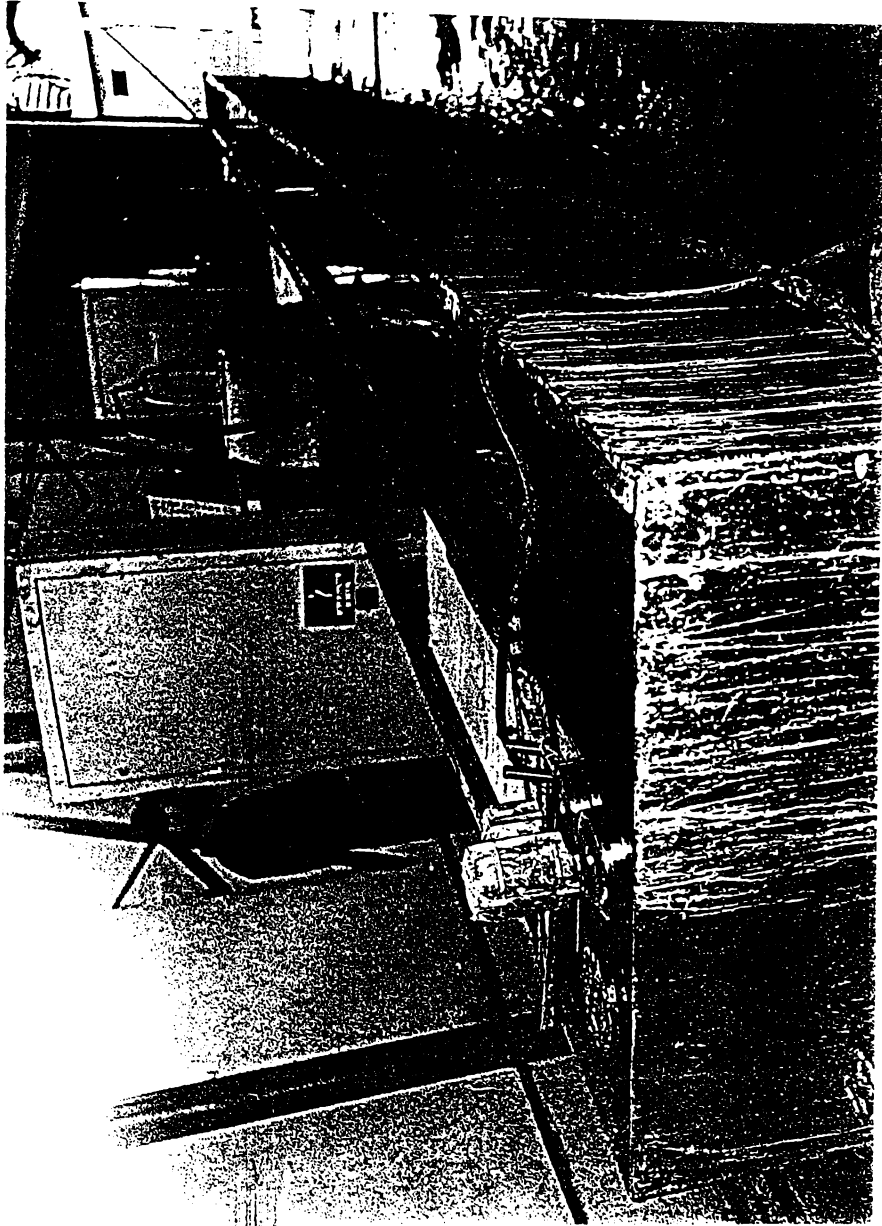


Fig.5.11 Vedere a utilajului de prelucrare a fantelor montat la
S.C. Safar Bucuresti, Baza Complexa Caracal

Un alt element important de care trebuie să se țină cont în realizarea mașinilor se referă la faptul că lungimea fantei fiind direct dependentă de diametrul OT, și că OT se uzează în timpul prelucrării, se impune corectarea valorii curselor de lucru funcție de condițiile cerute de prelucrare.



Fig.5.12 Vedere a unui filtru metalic fabricat prin EEC

diametre ale țevilor cuprinse în intervalul 160...320 mm; grosime a peretelui semifabricatului tubular 8...12 mm;

- caracteristicile dimensionale ale fantelor dispuse pe generatoarea semifabricatului tubular: lățime cuprinsă între 0,5...3 mm și lungimi de 100...120 mm.

Fată de schemele prezentate anterior, pentru creșterea pro-

Pornind de la schemele prezentate și de la o mașină realizată anterior [81], dar care funcționa integral în regim manual, pe baza unui contract cu IAFAA București (S.C. „Safar”) s-a proiectat și realizat o mașină care funcționează în regim industrial, fiind montată și pusă în funcție la „Baza Complexă” din Caracal. În figurile 5.9, 5.10 și 5.11 se prezintă imagini ale utilajului montat la Caracal, iar în figura 5.12 un fragment dintr-un filtru realizat pe această mașină.

Caracteristicile principale ale instalației de prelucrare amintită sunt:

- dimensiunile semifabricatului tubular sunt: lungime maximă 9000 mm;

ductivității, în construcția acestui utilaj s-au folosit următoarele soluții constructive:

- în cazul realizării fantelor în semifabricate de tip tablă sau în țevi de diametru mare cu distanța dintre fante relativ mică, se poate utiliza un OT cu discuri multiple (fig.5.13).

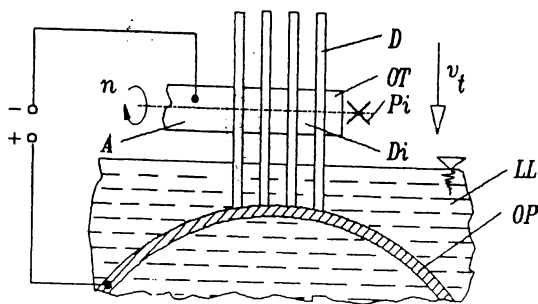


Fig.5.13 Obiect de transfer cu discuri multiple

Numărul maxim de discuri care se pot monta pe un arbore este limitat de următoarele restricții: diametrul OP (pentru semifabricate tubulare), precizia de poziționare a fantelor în raport cu direcția radială corespunzătoare, puterea electrică maximă disponibilă.

- utilizarea unui cap de lucru dotat cu doi arbori în paralel, obținând astfel o dublare practic a productivității;

- dispunerea a două capete de lucru identice, care prelucrează același semifabricat (având în vedere că lungimea semifabricatelor poate ajunge la 9000 mm) sau două semifabricate separate. Se precizează că cele două capete de lucru folosesc aceeași cale de rulare, aceeași cuvă și același sistem de lichid de lucru. Fiecare cap de lucru este dotat cu surse de curent continuu și sisteme automate de avans separate (fig.5.14).

Semnificațiile notațiilor din figura 5.14 sunt: T - tablou de distribuție; $D_1, 2$ - dulap electric aferent postului 1, respectiv 2; $S_1, 2$ - surse de curent continuu; $r_1, 2$ - rezistori de limitare; $OT_1, 2$ - obiectele de transfer ale celor două capete de lucru; OP - obiect de prelucrat; GE - Grup electroлит.

Schema capului de lucru este prezentată în figura 5.15.

Capul de lucru CL se poate deplasa (cu mișcarea de avans de lucru s_1 sau mișcarea de poziționare MLP) în lungul semifabricatului tubular pe calea de rulare CR, prin intermediul rozelor de

rulare RR.

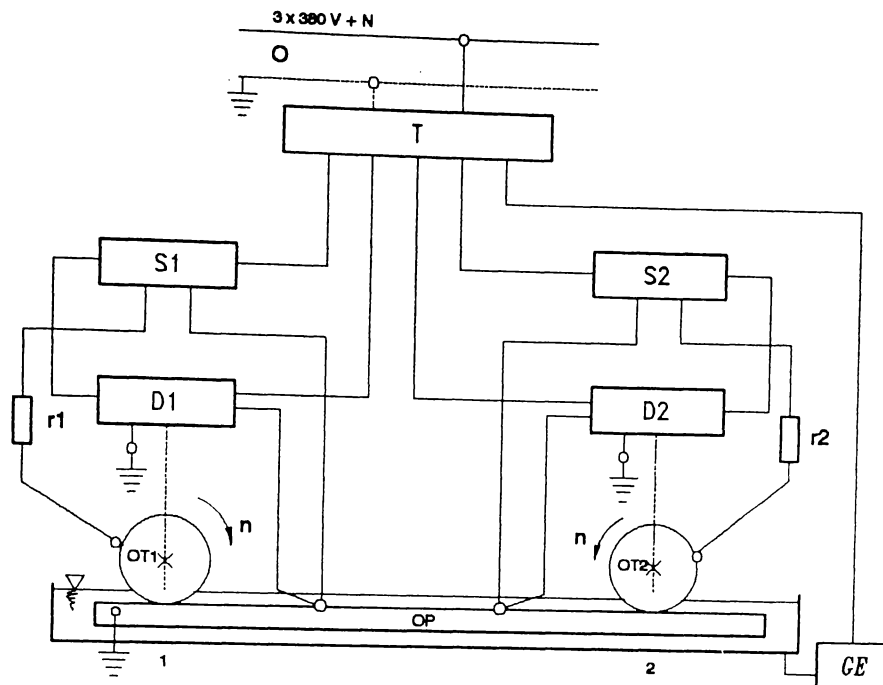


Fig.5.14 Scema bloc a instalatiei de prelucrare a fantelor prin EEC

Obiectele de transfer multiple OT, montate pe cei doi arbori portsculă A (sprijiniți pe lagărele de rostogolire LR), execută o mișcare de rotație cu turația n și o mișcare de translație verticală împreună cu placa mobilă PM (mișcare cu avans de lucru s_t sau mișcare de retragere rapidă MRR). Antrenarea OT în mișcare de rotație se realizează de către motorul de curent alternativ MCA, prin intermediul unei transmisii cu curele TC. Deplasarea verticală a plăcii mobile PM se face prin intermediul unui motor de curent continuu MCC, a unui reductor melcat Red (melcul M și roata melcată RM) și a unui mecanism șurub-piuliță MSP. Pe placa de bază PB se mai fixează coloanele de ghidare CG, care împreună

cu bușele cu bile BG realizează ghidarea plăcii mobile. În

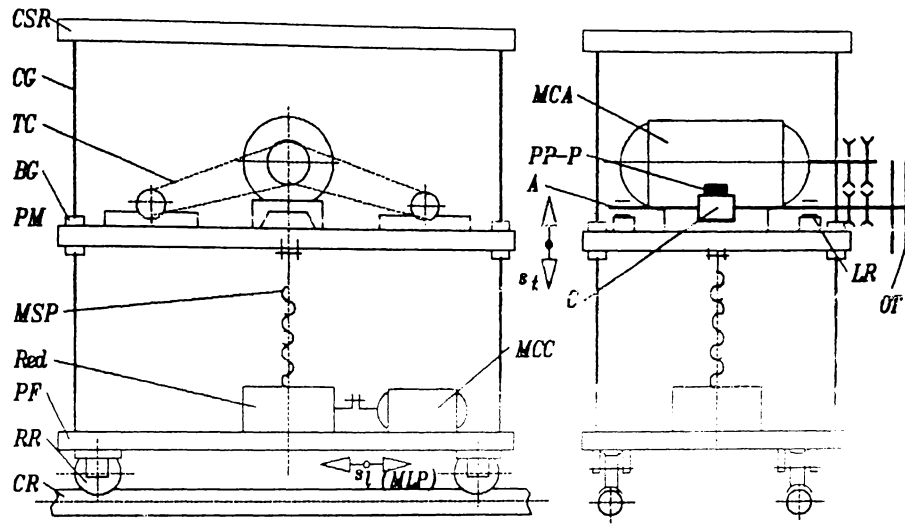


Fig.5.15 Schema capului de lucru

partea superioară, coloanele de ghidare sunt fixate prin cadrul de rigidizare CSR. OT se leagă electric la polul negativ al sursei de curent prin intermediul colectorului C, fixat pe arbore, și a sistemului portperii-perii PP-P. Arborele este izolat electric față de placa mobilă.

Un detaliu al sistemului de avans al capului de lucru este dat în figura 5.16.

Dispozitivul de rotire care realizează mișcarea de poziționare MPR a OP, în acest caz are o construcție foarte simplă, având în vedere că semifabricatele sunt într-o gamă tipodimensională redusă (doar patru tipodimensiuni). Astfel, pentru fiecare diametru de țevă se realizează o coroană dintată (roată melcată) care se fixează pe țevă înaintea începerii prelucrării printr-un

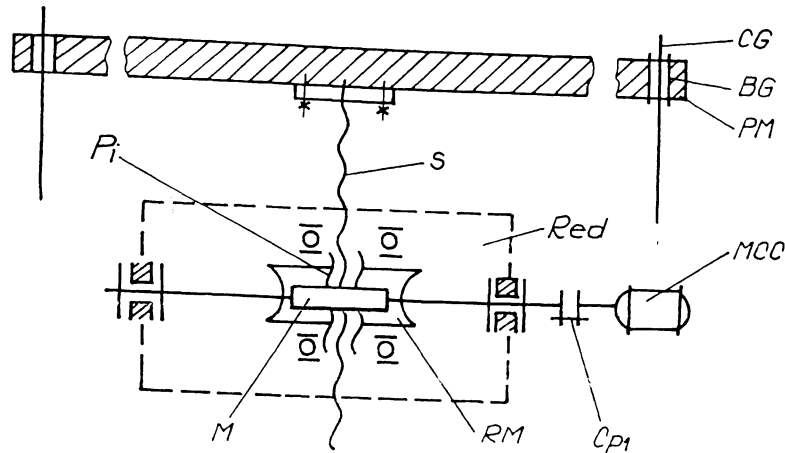


Fig.5.16 Detaliu al capului de lucru

stem rapid de prindere. In dreptul ei, pe cuvã se monteazã un .c prevãzut cu o manetã pentru antrenare manualã. Pe arborele .cat se monteazã un dispozitiv de marcare a cursei unghiulare a

Tot din considerente de simplitate constructivã, avãnd in lere uniformitatea caracteristicilor dimensionale a fantelor alizate, și sistemul de deplasare a capului de lucru de-a ngul semifabricatului tubular (OP) este tot manual. Unul dintre isiderentele de bazã care au stat la alegerea acestei soluții a st faptul cã, datoritã lungimilor mici ale fantelor nu este ne-sarã realizarea unei deplasãri cu avans de lucru longitudinal.

Constructiv, **sistemul de deplasare a capului de lucru** se mpune dintr-un arbore (lãgãruit corespunzãtor), pe care se ceazã la o extremitate o roatã de lanț, iar la cealaltã o ivelã. Roata de lanț angreneazã cu un lanț (pe post de amalierã), fixat și întins pe un profil montat de-a lungul rei de lucru.

In cazul extinderii domeniului de utilizare a utilajului, ce evident cã modificarea lui este extrem de simplã, inlocuin-se acționarea manualã cu un sistem de acționare electromeca-

nic, cuplat cu un mecanism simplu de indexare (de exemplu de tip cui indexor).

Sistemul de lichid de lucru este format dintr-un rezervor de capacitate corespunzătoare volumului cuvei, montat în subsolul atelierului, și din două circuite separate de circulație a LL. Unul, dotat cu o pompă P_1 de debit mare, asigură umplerea rapidă a cuvei de lucru, iar al doilea, dotat cu o pompă P_2 de debit mic are un rol dublu: de a asigura un debit suplimentar de LL în zona de intrare a OT în contact cu OP, iar al doilea de a asigura un nivel constant în cuva de lucru, compensând eventualele scurgeri de lichid spre rezervor. Nivelul se poate regla prin intermediul unui dispozitiv cu pereți mobili. Sistemul se completează cu conducte de legătură și robinete pentru reglarea debitelor.

Se precizează că rezervorul este astfel conceput încât să asigure curățirea LL prin decantare.

Cuva de lucru este realizată din tablă în construcție sudată fiind dotată cu un dispozitiv cu perete mobil de reglare a nivelului LL. Ca o anexă la cuva de lucru, instalația mai este prevăzută cu o cuvă auxiliară în care se realizează spălarea cu apă caldă a filtrului după terminarea prelucrării fantelor, imediat după scoaterea lui din cuva de lucru.

5.2 Sistemul de alimentare cu energie electrică a spațiului de lucru

Sistemul de alimentare cu energie electrică utilizat în instalația de prelucrare a fantelor în semifabricate tubulare este un redresor trifazat.

Din cauză că în țară nu se fabrică surse speciale pentru mașinile de prelucrare prin EEC, s-a ales utilizarea unei surse folosită uzual la sudare, de tip RSC 400, destinată sudării în mediu de CO_2 . Este fabricată la întreprinderea „Electromagnetica” București, asigurând tensiuni de mers în gol în cinci trepte de tensiune: 25, 30, 37, 44 și 51 V și curenți în intervalul 0...400 A (300 A la DA 100% și 400 A la DA 60%).

Pentru asigurarea spațiului de lucru cu energia necesară,

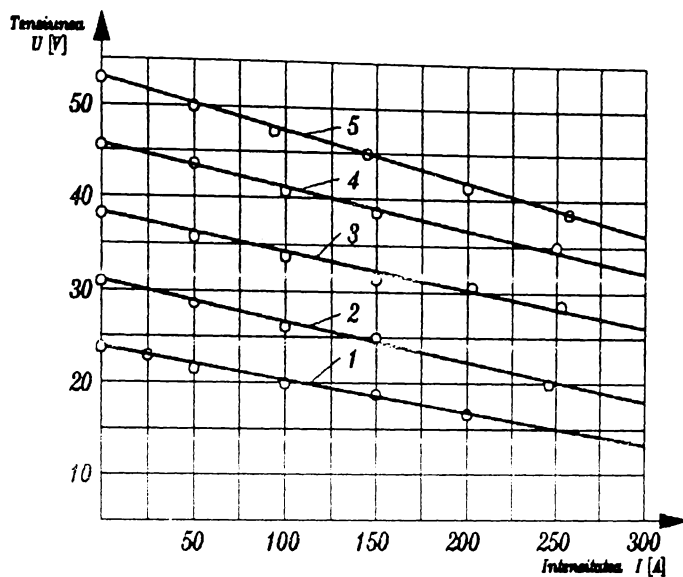


Fig.5.17 Caracteristicile externe $U = f(I)$ pentru redresorul RSC 400

din generator se utilizează numai partea redresată a buclei de forță, la care caracteristica externă $U = f(I)$, pentru cele cinci trepte este dată în figura 5.17.

Se observă că, prin prisma valorilor extreme posibil de utilizat la prelucrarea fantelor prin EEC, practic se pot utiliza nu-

mai treptele 2, 3 și 4.

Pentru treapta a doua de reglare se poate asigura un domeniu de tensiuni pe spațiul de lucru situate între $U_1 = 20$ V și $U_1 = 24$ V (fig.5.18). Corespunzător acestui domeniu, cu familia de caracteristici naturale (la bornele sursei) - domeniul dintre curbele I și II, reglabile prin curentul de comandă I_c - se pot obține curenți $I = 50 \dots 400$ A. Pentru limitarea curentului maxim de lucru și a celui de scurtcircuit este necesară modificarea caracteristicii prin inserierea unui rezistor de balast r_s . Pentru $r_s = 0,05 \Omega$, rezultă caracteristicile corespunzătoare III și IV, curenții fiind în domeniul $35 \dots 130$ A.

În mod similar, pentru treapta a treia (fig.5.19), pentru $r_s = 0,07 \Omega$ se poate lucra în domeniul $22 \dots 26$ V cu curenți $60 \dots 160$ A. Cu treapta a patra (fig.5.20) se pot realiza pentru $r_s = 0,08 \Omega$ tensiuni de $23 \dots 30$ V și curenți de $85 \dots 250$ A.

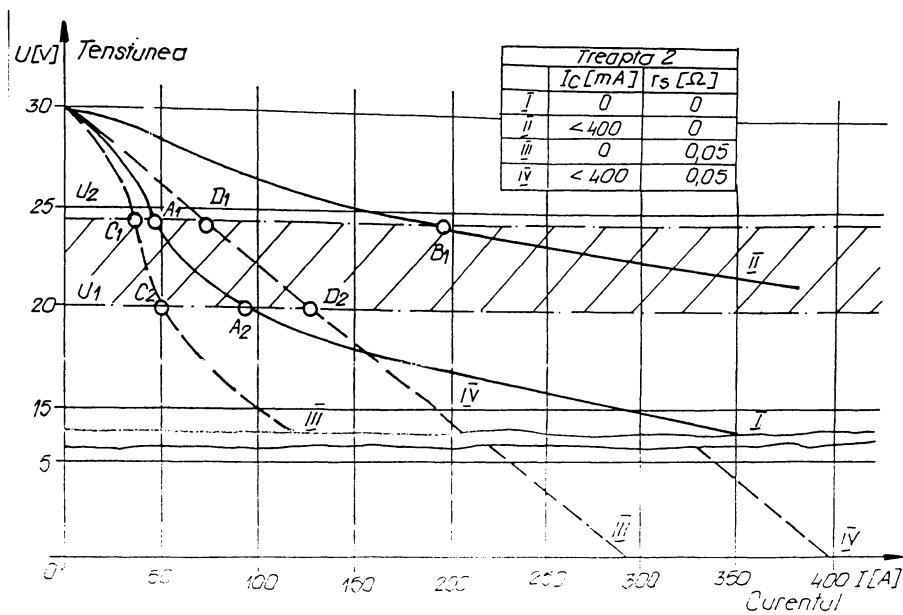


Fig.5.18 Caracteristicile naturale și modificate pentru treapta 2

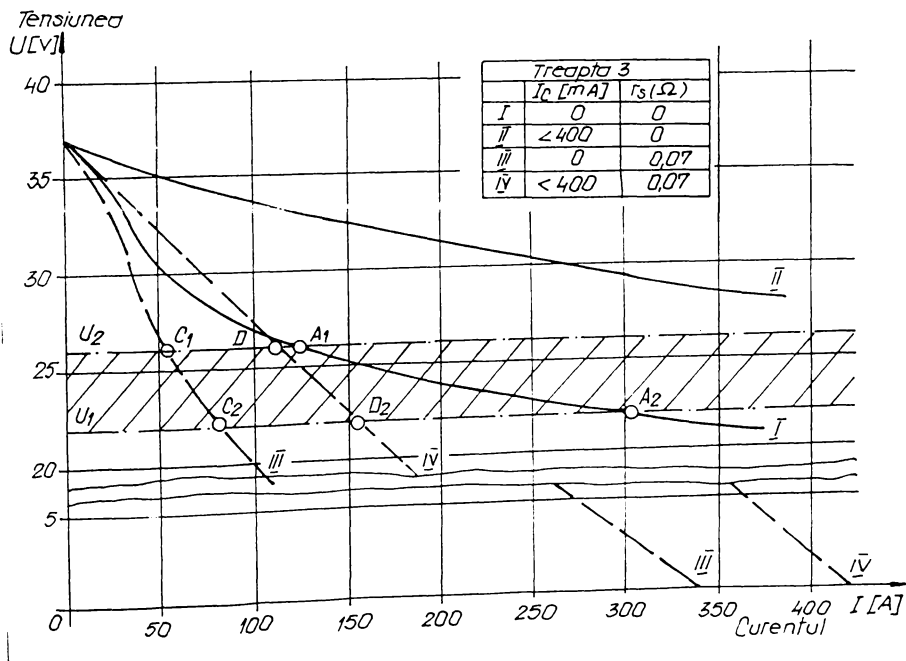


Fig.5.19 Caracteristicile naturale și modificate pentru treapta 3

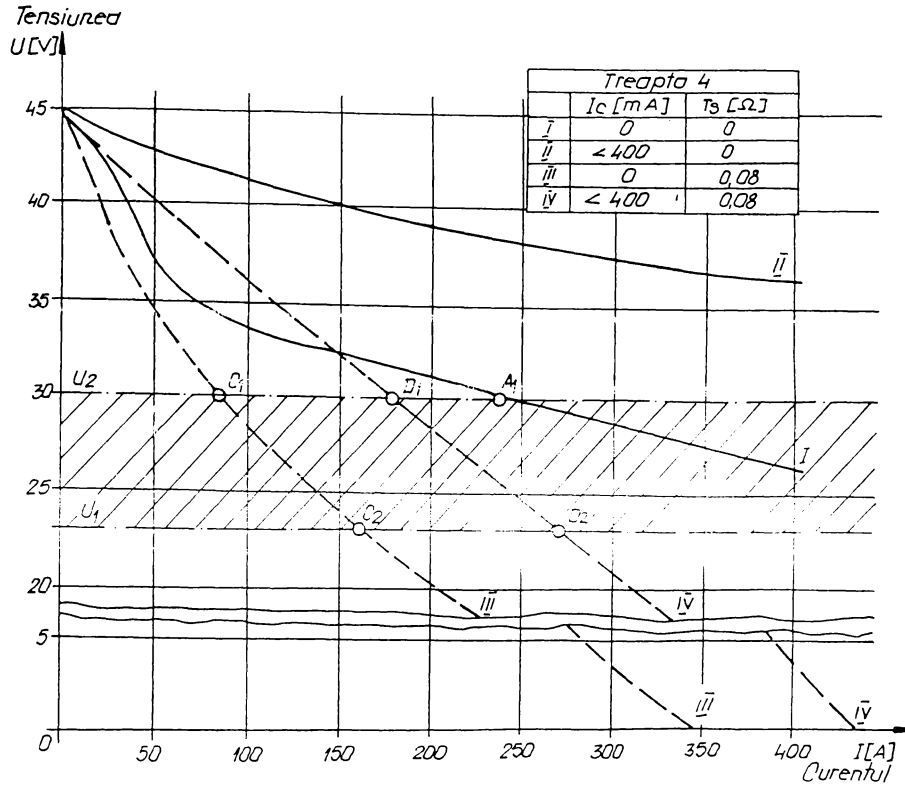


Fig.5.20 Caracteristicile naturale și modificate pentru treapta 4

Deci regimul electric de prelucrare dorit se poate asigura astfel:

- tensiunea prin selectarea treptei de regim și prin prescrierea tensiunii medii, care va fi menținută constantă de către sistemul de avans;

- curentul corelat cu treapta de tensiune prin stabilirea unei caracteristici exterioare globale (la bornele spațiului de lucru), prin curentul de comandă I_c și rezistorul de balast r_s .

Pentru cazul când se folosesc regimuri electrice intense, este utilă modificarea caracteristicii în proces. La începutul prelucrării, când secțiunea efectivă este mică, se impune limitarea densității de curent prin stabilirea punctului de funcționare

pe o caracteristică care să asigure, la tensiunea prescrisă, un curent mult mai mic decât cel nominal. Ulterior, crescând secțiunea efectivă de prelucrare, punctul de funcționare trebuie deplasat pe o caracteristică care să asigure curentul nominal prescris. O modalitate de rezolvare a acestei probleme constă în variația curentului de comandă de la valoarea zero la începutul prelucrării, la o valoare prestabilită, după un anumit interval de timp, printr-un releu de timp, acționat automat, printr-un circuit specializat cuprins în schema de automatizare.

5.3 Sistemul de reglare automată a avansului

Deplasarea relativă dintre OT și OP pe direcția și în sensul de prelucrare (avansul de lucru de fapt) este necesară pentru asigurarea unui contact electric corespunzător unei presiuni de contact de $0,1 \dots 0,3 \text{ N/mm}^2$ în limitele prescrise.

Acționarea automată a avansului reprezintă primul nivel de automatizare a prelucrării și este necesară atât pentru asigurarea unor caracteristici tehnologice ridicate și constante a prelucrării, cât și pentru evitarea necesității supravegherii permanente a prelucrării de către operatorul uman.

Urmărirea automată a forței de reacțiune care se exercită asupra elementelor cinematice ale sistemului de avans poate asigura menținerea constantă a presiunii de contact doar pentru suprafețe de mărime constantă, neputându-se aplica acolo unde suprafețele de contact variază cu adâncimea de pătrundere.

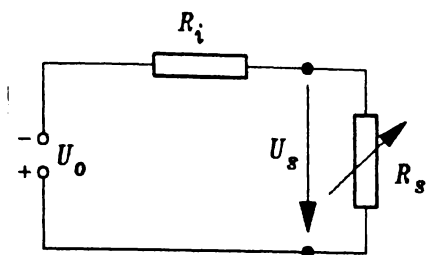
Soluția optimă de automatizare a avansului este aceea de urmărire a parametrilor electrici ai prelucrării și anume:

- căderea de tensiune pe interstițiu U_s [V];
- curentul prin interstițiu I [A];
- densitatea de curent în interstițiu [A/mm^2].

Primii doi factori sunt disponibili direct, densitatea de curent fiind o mărime derivată care ridică probleme deosebite pentru obținerea ei.

S-a demonstrat [52], că starea interstițiului de lucru poate

fi perfect definită ca o rezistență electrică R_s . Simplificat, circuitul electric al prelucrării prin EEC (fig.5.21), pune în evidență legăturile dintre parametrii electrici:



$$U_s = \frac{U_0}{1 + R_i/R_s} \quad (5.4)$$

Fig.5.21 Schema electrică simplificată a prelucrării prin EEC

unde U_0 - tensiunea de la bornele sursei de curent continuu; U_s - căderea de tensiune pe spațiul de lucru; R_i - rezistența exterioră a circuitului electric. Este evident că luând în considerare ca parametru reglat tensiunea pe spațiul de lucru U_s se ține cont prin intermediul rezistenței R_s de un număr extrem de mare de factori ai procesului (presiunea de contact, viteza de avans, conductivitatea electrică a mediului din interstițiu, materialele OT și OP, etc.).

Mentținerea constantă a valorii U_s se face printr-o buclă închisă de reglare, în care valoarea lui U_s este comparată cu o tensiune de referință U_{ref} .

Mentținerea constantă a valorii U_s se face printr-o buclă închisă de reglare, în care valoarea lui U_s este comparată cu o tensiune de referință U_{ref} .

Pornind de la schema bloc generală a buclei principale cu reacție de tensiune (fig.5.22), s-a concretizat schema bloc de

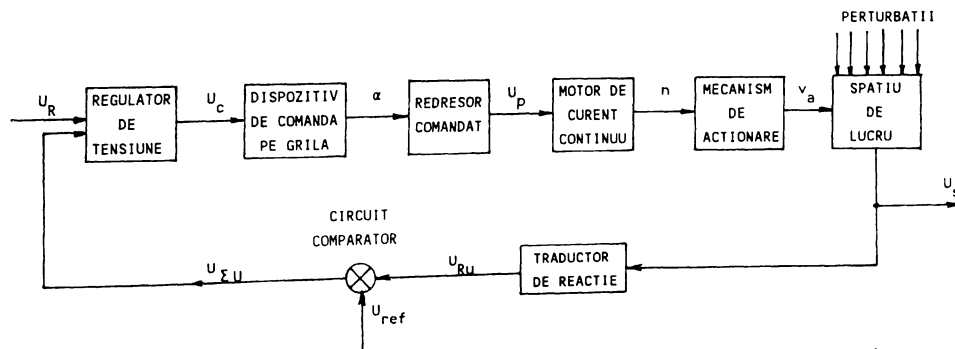


Fig.5.22 Schema bloc a buclei principale cu reacție de tensiune

reglaj pentru instalația de prelucrare a fantelor prin EEC din figura 5.23, utilizând variatoarele de tip VRM.

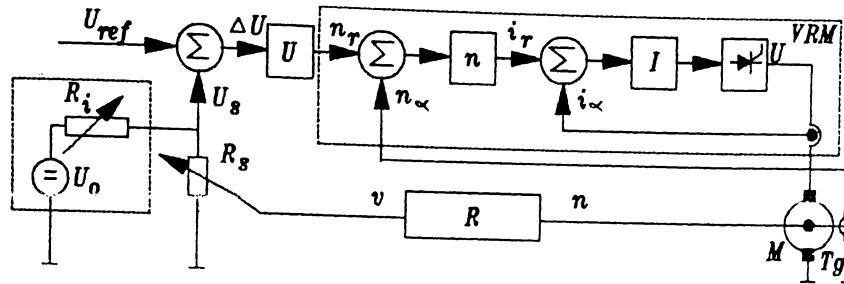


Fig.5.23 Sistemul de reglare a avansului din componenta instalației de prelucrare a fantelor

Un motor de curent continuu M alimentat printr-un variator de tip VRM, antrenează, printr-un reductor melcat și un mecanism șurub-piuliță R, OT în mișcarea de avans cu viteza v . Variatorul asigură o reducere a turației de 1:1000, în ambele sensuri. Referința de tensiune pentru comanda variatorului se obține de la regulatorul de tensiune U, în care se prelucrează semnalul diferență dintre tensiunea U_s și referința de tensiune U_{ref} .

Un astfel de sistem de avans automat satisface toate cerințele impuse pentru mașinile de prelucrat prin EEC (sensibilitate, precizie de reglare, viteză de reacție, stabilitate, putere a elementului de execuție).

5.4 Determinarea funcției de transfer a sistemului de reglare automată a avansului

Pentru analiza mai amănunțită a structurii și proprietăților sistemului de reglare automată a avansului adoptat, și mai ales în vederea analizei stabilității sistemului, o importanță foarte mare o are funcția de transfer a sistemului de avans [10,48,70,74]. Această funcție de transfer este definită de funcțiile de transfer ale elementelor ce compun sistemul, elemente care se pot

lega în serie sau paralel.

Funcțiile de transfer ale elementelor componente ale sistemului de reglare automată a avansului, prezentate în schema bloc informațională din figura 5.24 se determină în modul următor:

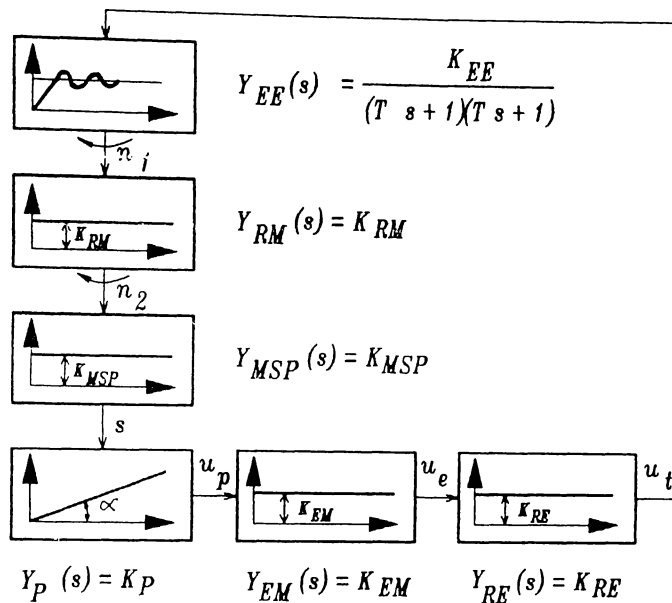


Fig.5.24 Schema bloc informațională a sistemului de avans automat

5.4.1 Funcția de transfer a procesului (P)

Având în vedere numărul mare de parametri care intervin în procesul de prelucrare, determinarea funcției de transfer se realizează pe cale experimentală prin analiza dependenței $U_{med} = f(I)$, care în intervalul optim de prelucrare are o evoluție liniară [52], caracterizată de funcția de transfer:

$$Y_P(s) = K_P = 0,45 \text{ V/mm/min} \quad (5.5)$$

5.4.2 Funcția de transfer a elementului de măsurare (EM)

Elementul de măsurare utilizat este un circuit electric sim-

plu, de tip rezistiv, a cărui funcție de transfer este de forma:

$$Y_{EM}(s) = K_{EM} = 0,3 \text{ V/V} \quad (5.6)$$

5.4.3 Funcția de transfer a regulatorului electronic (RE)

Regulatorul utilizat este de tip proporțional, care, pentru valorile concrete ale elementelor pasive, are funcția de transfer:

$$Y_{RE}(s) = K_{RE} = 10 \text{ V/V} \quad (5.7)$$

5.4.4 Funcția de transfer a elementului de execuție (EE)

Elementul de execuție în cazul analizat este un motor de curent continuu, la care funcția de transfer are expresia:

$$Y_{EE}(s) = \frac{1}{K_e(T_m \cdot s + 1) \cdot (T \cdot s + 1)} = \frac{K_{EE}}{(T_m \cdot s + 1) \cdot (T \cdot s + 1)} \quad (5.8)$$

unde: K_e - constanta electrică determinată cu relația:

$$K_e = \frac{U_n - I_n \cdot R_r}{n_n} = 0,01504 \frac{\text{V}}{\text{rot/min}} \quad (5.9)$$

U_n , I_n și n_n fiind tensiunea, curentul, respectiv turația nominală a motorului, iar R_r rezistența rotorică; T - constanta de timp electrică a indusului, definită de relația:

$$T = L/R = 0,04196 \text{ s} \quad (5.10)$$

L și R fiind inductivitatea, respectiv rezistența indusului motorului și a bobinei de filtrare; T_m - constanta de timp electromecanică, definită prin:

$$T_m = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{R}{C_e \cdot C_m} = 0,0038 \text{ s} \quad (5.11)$$

unde: GD^2 - momentul de inerție; R - rezistența totală a circuitului rotoric; $C_e = U_n/v = 0,146 \text{ V/rot/min}$ - factorul tensiunii

contraelectromotoare la mersul în gol; $C_m = M_m/I_n = 0,072 \text{ daN}\cdot\text{m/A}$
- factorul cuplului de rotație a motorului.

5.4.5 Funcția de transfer a reductorului melcat (RM)

Funcția de transfer a reductorului este considerată, sub formă simplificată, ca fiind dată de raportul de transmitere i :

$$Y_{RM}(s) = K_{RM} = 1/i = 1/40 \quad (5.12)$$

5.4.6 Funcția de transfer a mecanismului șurub-piuliță (MSP)

Funcția de transfer a mecanismului șurub-piuliță, sub formă simplificată, este exprimată prin relația:

$$Y_{MSP}(s) = K_{MSP} = p = 4 \text{ mm} \quad (5.13)$$

5.4.7 Modelul matematic al sistemului de reglare automată a avansului

În funcție de scopul urmărit, se pot determina atât modelul matematic al sistemului automat deschis $Y_d(s)$, cât și al sistemului automat închis $Y(s)$. Deoarece în acest caz scopul modelării îl reprezintă analiza stabilității dinamice a sistemului automat prezentat, este suficientă numai expresia sistemului automat deschis.

Pentru calea directă a buclei de reglare, modelul matematic se obține prin produsul:

$$Y_d(s) = Y_p(s) \cdot Y_{EM}(s) \cdot Y_{RE}(s) \cdot Y_{EE}(s) \cdot Y_{RM}(s) \cdot Y_{MSP}(s) \quad (5.14)$$

în care, prin înlocuirea funcțiilor de transfer ale elementelor componente cu expresiile stabilite anterior, se obține:

$$Y_d(s) = \frac{K}{(T_m \cdot s + 1) \cdot (T \cdot s + 1)} \quad (5.15)$$

unde: K este o constantă determinată cu relația:

$$K = K_p \cdot K_{EM} \cdot K_{RE} \cdot K_{EE} \cdot K_{RM} \cdot K_{MSP} \quad (5.16)$$

Modelul matematic obținut descrie, cu suficientă precizie, funcționarea în ciclu automat a instalației analizate și servește la verificarea teoretică a comportării dinamice a sistemului de reglare automată a avansului, prin aplicarea unor metode specifice de studiu.

5.5 Analiza stabilității sistemului de reglare automată a avansului

Determinarea teoretică a stabilității sistemului de reglare automată a avansului din structura mașinii pentru prelucrarea fantelor prin EEC se realizează prin analiza acestuia în regim dinamic.

Pentru a stabili dacă un sistem automat este stabil în regim dinamic, se studiază variația răspunsului sistemului pentru o valoare a perturbației externe. Sistemul este stabil, dacă, după încetarea perturbației externe, acesta tinde spre un regim staționar. Verificarea stării de stabilitate se realizează cel mai frecvent prin două metode: analiza zerourilor ecuației caracteristice, respectiv cu ajutorul criteriului grafic Nyquist.

Pe baza modelului matematic al sistemului de reglare automată a avansului exprimat de relația (5.15), se obține caracteristica de răspuns la frecvență prin înlocuirea variabilei complexe s ($s = \sqrt{-1}$) cu variabila frecvențială $j \cdot F$ ($F = \omega$ - frecvența de lucru), rezultând:

$$Y_d(jF) = \frac{K}{(T_m \cdot j \cdot F + 1) \cdot (T \cdot j \cdot F + 1)} \quad (5.17)$$

în care, prin multiplicarea fracției cu conjugata numitorului, și separarea părților reale de cele imaginare, se obține:

$$Y_d(jF) = \frac{K(1 - TT_m F^2)}{(1 - TT_m F^2)^2 + F^2(T + T_m)^2} - j \frac{KF(T + T_m)}{(1 - TT_m F^2)^2 + F^2(T + T_m)^2} \quad (5.18)$$

unde prin notațiile simplificatoare:

$$N(F) = (1 - TT_m F^2)^2 + F^2(T + T_m)^2 \quad (5.19)$$

$$R(F) = K(1 - TT_m F^2)/N \quad (5.20)$$

$$Q(F) = -KF(T + T_m)/N \quad (5.21)$$

se ajunge la forma:

$$Y_d(jF) = R(F) + jQ(F) \quad (5.22)$$

Analiza stabilității teoretice a sistemului de reglare automată, modelată și prezentată prin caracteristica de frecvență (5.18) se realizează cu ajutorul criteriului grafic Nyquist [74].

Determinarea coordonatelor grafice pe planul complex ($R, 0, jQ$) se face prin programare pe calculator, după un program prezentat în schema logică din figura 5.25.

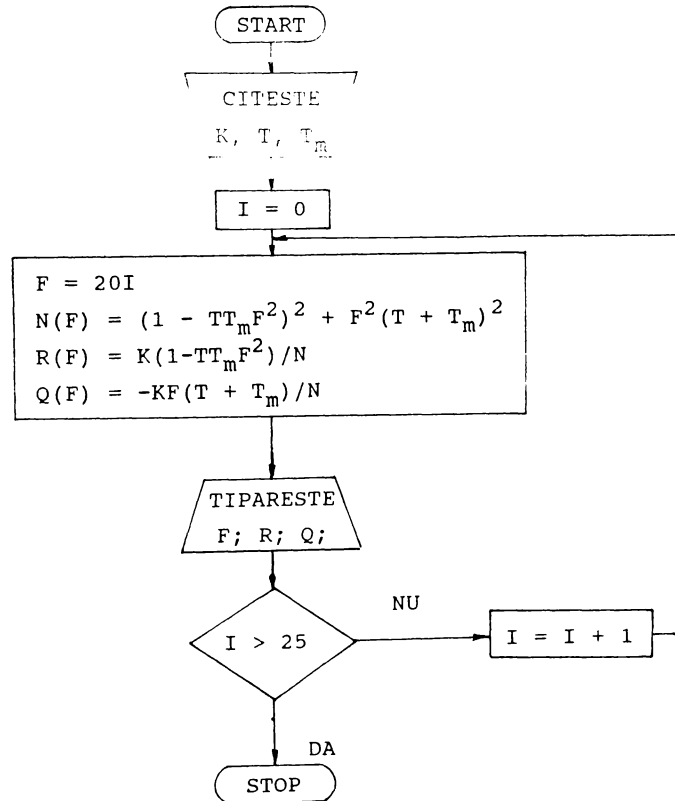


Fig.5.25 Schema logică pentru calculul coordonatelor grafice a hodografului Nyquist

Programul utilizat are structura:

```
10 REM "CALCULUL STABILITATII SISTEMULUI SRA"
20 LET K = 8.9761
30 LET T = .04196
40 LET TM = .0038
50 DIM R(20)
60 DIM Q(20)
70 DIM N(20)
80 FOR I = 0 TO 25
90 LET F = 20 * I
100 LET N = (1 - T * TM * F ^ 2) ^ 2 + F ^ 2 * (T + TM) ^ 2
110 LET R = K * (1 - T * TM * F ^ 2) / N
120 LET Q = -K * F * (T + TM) / N
130 LPRINT TAB(5); "F="; F; TAB(15); "R="; R; TAB(40); "Q="; Q
140 NEXT I
```

Calcululele sunt efectuate pentru o gamă largă de frecvențe F, rezultatele obținute fiind reprezentate numeric în tabelul 5.1, sau într-o reprezentare grafică prin construirea caracteristicii atenuare-frecvență numită și hodograful Nyquist (fig.5.26).

Tabelul 5.1

Valorile părților reală R și imaginară Q a caracteristicii atenuare-frecvență

Nr. crt.	Frecvența F	Partea reală R(F)	Partea imaginară Q(F)
0	1	2	3
1	0	8.976100	0
2	5	8.560303	-1.966436
3	10	7.499796	-3.487514
4	15	6.178480	-4.398716
5	20	4.902637	-4.792559
6	25	3.813226	-4.845176
7	30	2.936406	-4.706496
8	35	2.248271	-4.474881
9	40	1.712107	-4.207157
10	45	1.293497	-3.933688
11	50	0.964522	-3.669605
12	55	0.703797	-3.421712

Tabelul 5.1 (continuare)

0	1	2	3
13	60	0.495312	-3.192418
14	65	0.327154	-2.981892
15	70	0.190439	-2.789226
16	75	-0.078502	-2.613055
17	80	-0.013708	-2.451874
18	85	-0.090051	-2.304199
19	90	-0.153511	-2.168645
20	95	-0.206416	-2.043955
21	100	-0.250601	-1.929004
22	105	-0.287530	-1.822797
23	110	-0.318375	-1.724457
24	115	-0.344090	-1.633211
25	120	-0.365453	-1.548378
26	140	-0.418711	-1.262216
27	160	-0.438375	-1.041450
28	180	-0.438906	-0.867759
29	200	-0.428401	-0.729041
30	220	-0.411653	-0.616945
31	240	-0.391601	-0.525490
32	260	-0.370082	-0.450272
33	280	-0.348244	-0.387974
34	300	-0.326799	-0.336044
35	320	-0.306174	-0.292505
36	340	-0.286609	-0.255801
37	360	-0.268223	-0.224700
38	380	-0.251057	-0.198216
39	400	-0.235098	-0.175559
40	420	-0.220307	-0.156088
41	440	-0.206625	-0.139283
42	460	-0.193981	-0.124719
43	480	-0.182304	-0.112048
44	500	-0.171502	-0.100982

Analizând caracteristica atenuare-frecvență din figura 5.26, se constată că aceasta nu înconjoară punctul critic $(-1, 0j)$ din planul complex, motiv pentru care se apreciază că sistemul automat analizat are o evoluție dinamică stabilă, respectiv prezintă o importantă rezervă de stabilitate în fază și în modul.

O altă metodă de studiu a stabilității sistemului de avans automat este metoda analitică, care se realizează prin analiza polilor zerouri ai ecuației caracteristice realizate din funcția de transfer a sistemului $Y_d(s)$. Ecuația caracteristică este:

$$(1 + s \cdot T_m)(1 + s \cdot T) = 0 \quad (5.23)$$

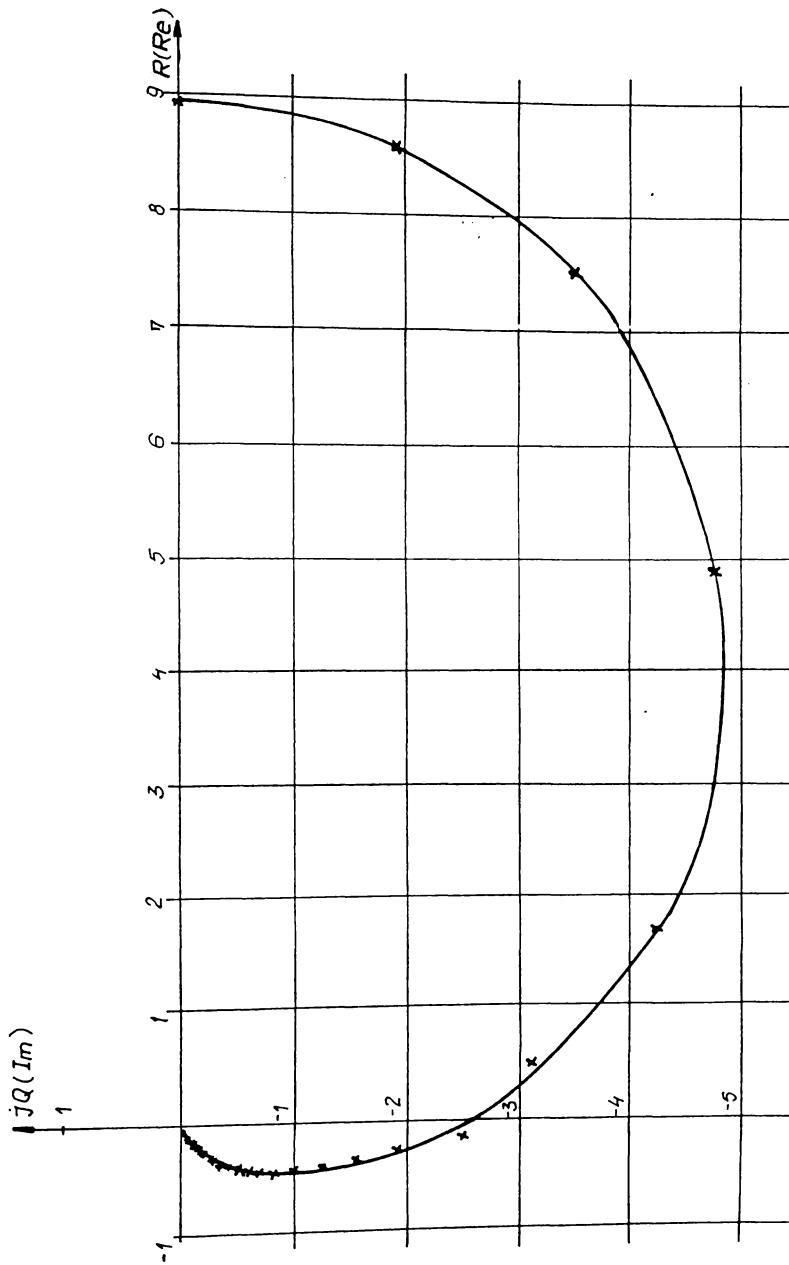


Fig.5.26 Hodograful Nyquist

Se constată că toate zerourile ecuației caracteristice sunt situate în planul stâng al planului complex s (fig.5.27), având valorile:

$$s_1 = -1/T_m \qquad s_2 = 1/T \qquad (5.24)$$

$$s_1 = -263,158 \qquad s_2 = -23,83 \qquad (5.25)$$

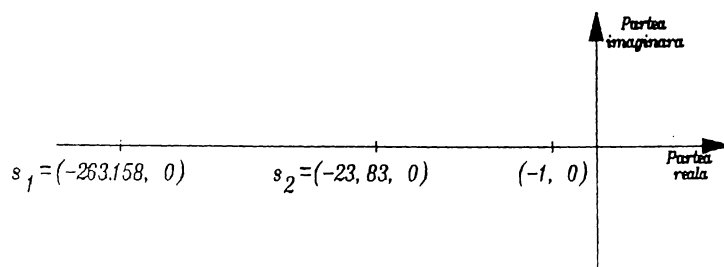


Fig.5.27 Poziția zerourilor ecuației caracteristice

Deci se pune în evidență și în acest mod faptul că sistemul analizat este stabil și are o rezervă de stabilitate corespunzătoare, rezultate confirmate și de analiza grafică a stabilității.

5.6 Realizarea fantelor transversale

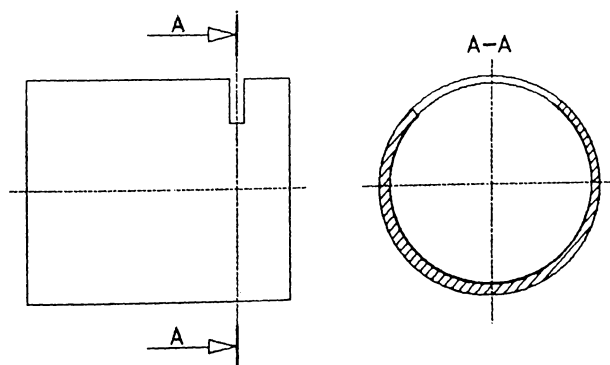
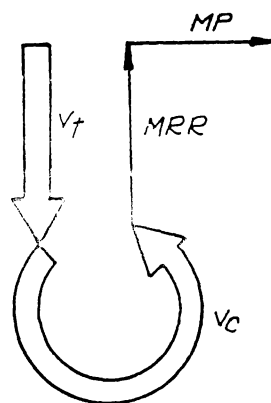


Fig.5.28 Fantă transversala practică într-un semifabricat tubular

O dezvoltare a procedurii de realizare a fantelor longitudinale în semifabricate tubulare o constituie realizarea fantelor transversale (fig.5.28). Problemele care apar la prelucrarea acestor tipuri de fante sunt aceleași ca și în cazul fantelor longitudinale, cu obser-

vația că suprafața comună de contact maximă dintre OP și OT din timpul prelucrării este mai mică decât în cazul echivalent al fantelor longitudinale, realizându-se deci un timp de prelucrare ceva mai scăzut.

Importantă însă este o extindere a procedurii de realizare a fantelor transversale, prin care se realizează debitarea semifabricatelor tubulare după ciclul de lucru prezentat în figura 5.29.



Se realizează mai întâi un avans liniar de lucru cu viteza v_t până la străpungerea semifabricatului tubular, depășindu-l cu o valoare foarte mică, pentru a compensa uzura radială a OT. În acest moment, avansul de lucru liniar al OT ia valoarea zero, începând avansul de lucru circular al OP cu viteza v_c , semifabricatul tubular realizând o rotire cu un unghi $\varphi < 360^\circ$, unghi care depinde de diametrele OP și OT și de grosimea peretelui OP. Apoi se realizează o mișcare de retragere rapidă MRR executată de OT.

Fig.5.29 Ciclul de lucru la debitarea tevilor

La încetarea acestei mișcări se comandă mișcarea de poziționare MP care, în funcție de construcția mașinii poate să fie executată fie de capul de lucru (OT), fie

de semifabricatul tubular (OP).

În cazul când avansul de poziționare MP este realizat de OT, construcția mașinii este similară cu cea prezentată în figura 5.6, cu următoarele observații:

- dispozitivul de rotire asigură, în locul mișcării circulare de poziționare MRP, mișcarea de avans de lucru circular cu viteza v_c ;

- OT se poziționează cu axa de rotație paralelă cu axa OP.

Având în vedere aceste aspecte, instalația a cărei schemă este prezentată în figura 5.6 se poate realiza cu completări minime pentru realizarea a două scopuri:

- realizarea fantelor;
- debitarea filtrului de lungime mare pe tronsoane cu lungimea necesară.

Aceiași instalație se poate însă folosi și numai pentru debitarea semifabricatelor tubulare. În acest ultim caz este mai economică realizarea unei mașini specializate în acest sens, cu structura din figura 5.30.

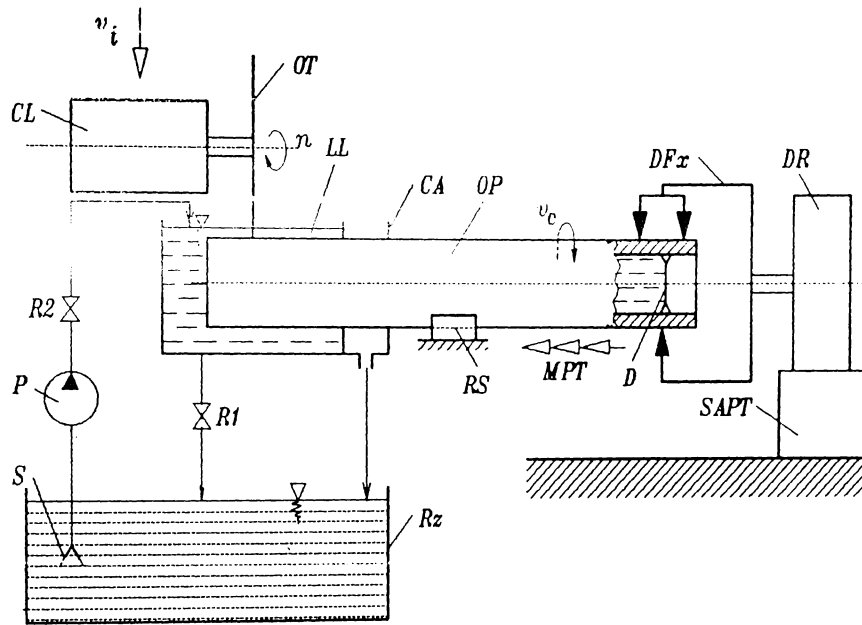


Fig.5.30 Schema mașinii de debitare a țevilor prin EEC

Principalele părți componente ale instalației sunt:

- CL - capul de lucru care asigură mișcarea de rotație a OT și avansul de lucru vertical cu viteza v_t ;
- C - cuva de lucru care asigură nivelul necesar al LL;
- CA - cuva auxiliară care preia surplusul de LL și scurge-rile provenite de la etanșarea dintre OP și cuva C;
- RS - role de sprijin pentru OP;
- DFx - dispozitiv de fixare a semifabricatului tubular OP;

- D - dop care împiedică scurgerea în exterior a LL;
- DR - dispozitiv de rotire a OP în mișcare de avans de lucru circular cu viteza v_c ;
- SAPT - sistem de asigurare a avansului de poziționare transversal MPT;
- Rz - rezervor pentru stocarea LL;
- S - sorb;
- P - pompă centrifugă;
- R1, R2 - robinete pentru reglarea debitului LL.

Ca avantaje deosebite ale acestor instalații de debitare a semifabricatelor tubulare se remarcă:

- posibilitatea utilizării unor OT de diametru foarte mic (eventual chiar cele care nu se mai pot utiliza din cauza dimensiunilor la realizarea fantelor) pentru debitarea unor țevi de diametru oricât de mare;

- realizarea unor utilaje universale pentru debitarea semifabricatelor tubulare, având cuve de lucru relativ mici, chiar pentru diametre foarte mari ale semifabricatelor.

Acest procedeu se poate aplica, cu adaptări specifice, și la alte operații, cum ar fi debitarea semifabricatelor pline de tip bară, realizarea unor canale circulare cu un anumit profil pe semifabricate tubulare sau pline, de secțiune circulară.

Pe baza considerațiilor prezentate în acest subcapitol, în cadrul unui contract de cercetare științifică cu IAFAA București (SC „Safar”) s-a conceput, proiectat și realizat o instalație de debitare a semifabricatelor de tip țeavă, cu diametre până la 500 mm, și lungimi de maxim 9000 mm.

5.7 Proiectarea tehnologiei de prelucrare în cazul realizării fantelor prin eroziune electrică complexă

La elaborarea procesului tehnologic de prelucrare dimensională a fantelor prin EEC se au în vedere următoarele elemente:

- caracteristicile constructive și dimensionale ale piesei care urmează a fi prelucrată;
- materialul OP;

- condițiile de precizie dimensională și de formă impuse;
- rugozitatea suprafețelor prelucrate;
- utilajul tehnologic de prelucrare disponibil.

Proiectarea tehnologiei de prelucrare impune stabilirea următoarelor elemente:

- stabilirea concretă a utilajului tehnologic de prelucrare;
- stabilirea sistemului de alimentare cu lichid de lucru (jet sau imersie);
- stabilirea densității de curent posibil de realizat;
- stabilirea curentului de prelucrare și a tensiunii optime pe spațiul de lucru;
- stabilirea naturii circuitului electric de alimentare și a valorilor parametrilor electrici concentrați R și L introduși;
- stabilirea vitezei periferice, respectiv a turăției OT;
- stabilirea materialului, a modului de obținere, a preciziei geometrice și dimensionale a OT;
- stabilirea presiunii dintre OP și OT.

De remarcat că după stabilirea concretă a tuturor parametrilor de prelucrare, este obligatorie verificarea tehnologiei proiectate prin încercări experimentale și realizarea, pe această bază, a unor corecții.

5.7.1 Alegerea utilajului tehnologic de prelucrare

Alegerea utilajului tehnologic de prelucrare se face în funcție de posibilitățile tehnologice care le poate oferi, de formă și dimensiunile pieselor în care se practică fanta. Eventual, mașina se poate completa cu dispozitive care să-i lărgescă domeniul de prelucrare. Utilajul specializat în realizarea fantelor prezentat în acest capitol, permite instalarea unor semifabricate cu dimensiuni de gabarit 400 X 400 X 9000 mm. În cazul când semifabricatul este diferit de forma tubulară, este necesară proiectarea sau alegerea unor dispozitive de fixare speciale.

5.7.2 Stabilirea sistemului de alimentare cu lichid de lucru

Practic, la ora actuală, se utilizează ca lichid de lucru

aproape exclusiv soluția de silicat solubil de sodiu ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$), deoarece realizează cele mai ridicate performanțe. Se recomandă o densitate $\rho = 1,1 \dots 1,25 \text{ g/cm}^3$ și un modul $M' = 2,8 \dots 3,2$. Având însă în vedere că nu oferă cele mai bune caracteristici tehnologice, rămâne un teren vast pentru cercetări ulterioare în vederea găsirii unui alt lichid de lucru, care să dea rezultate mult mai bune.

Lichidul de lucru poate fi introdus în spațiul de lucru fie prin imersie, fie prin jet. Criteriile și modul de alegere a variantei de prelucrare, din acest punct de vedere, se prezintă detaliat în subcapitolul 2.2.

La prelucrarea prin imersie sistemul de alimentare cu LL este prevăzut cu pompe adecvate pentru umplerea rapidă a cuvei de lucru, și cu un sistem de pompe pentru menținerea constantă a nivelului LL în timpul procesului de prelucrare.

5.7.3 Stabilirea densității de curent

Principalele influențe pe care le are densitatea de curent asupra caracteristicilor tehnologice ale prelucrării s-au prezentat în subcapitolul 1.3.1. Se recomandă în cazul realizării fantelor densități de curent de $1,5 \dots 3 \text{ A/mm}^2$.

5.7.4 Stabilirea curentului de prelucrare și a tensiunii optime pe spațiul de lucru

În cazul în care condițiile de prelucrare se încadrează în condițiilor restrictive impuse în determinarea modelelor matematice prezentate în capitolele 3 și 4 se recomandă utilizarea funcțiilor obținute și prezentate în capitolele respective.

În caz contrar, se calculează curentul de prelucrare I cu relația:

$$I = j \cdot S \quad [\text{A}] \quad (5.26)$$

unde: j [A/mm^2] - densitatea de curent determinată anterior; S -

aria de interacțiune între OP și OT.

Tensiunea pe spațiul de lucru, în acest caz se recomandă în intervalul 20...28 V, funcție de grosimea peretelui în care se realizează fanta (valori mai mici pentru grosimi ale peretelui mai mici, respectiv mai mari pentru grosimi ale peretelui mai mari).

5.7.5 Stabilirea naturii circuitului electric de alimentare

Legat de influența naturii circuitului de alimentare se fac următoarele precizări:

- rezistențele electrice introduse în circuit au rolul de a modifica caracteristica externă a sursei de alimentare, respectiv limitarea curenților maximi de scurtcircuit (vezi subcapitolul 5.2). Introducerea lor are un efect energetic negativ, de aceea trebuie bine analizată oportunitatea introducerii lor;

- capacitățile introduse au un efect global negativ, înrăutățind, în general, calitatea suprafeței. După unele aprecieri [52], introducerea lor în circuit nu afectează esențial procesul, dar este un consumator energetic;

- inductivitățile au cea mai mare influență asupra caracteristicilor tehnologice (îmbunătățirea calității suprafețelor fără afectarea productivității, scăderea turăției OT, îmbunătățirea calității stratului superficial, etc.) [52]. Ca valori concrete, inductivitățile introduse sunt de ordinul zecilor sau sutelor de mH, oportunitatea introducerii lor fiind analizată pentru fiecare caz în parte.

5.7.6 Stabilirea vitezei periferice a obiectului de transfer

Pentru circuitele de alimentare nemodificate din punct de vedere electric (fără capacități sau inductivități suplimentare), viteza relativă între OP și OT optimă este $v_r = 20...25$ m/s. În cazul introducerii inductivităților, viteza relativă poate cobori până la valori de $v_r \text{ min} = 2$ m/s.

5.7.7 Stabilirea materialului, a modului de obținere și a preciziei geometrice și dimensionale a obiectului de transfer

În aproape toate cazurile de prelucrare a fantelor prin EEC se preferă ca material pentru OT oțelul, care, deși are o uzură relativă ridicată, totuși prin prețul de cost redus compensează acest defect. În cazuri excepționale se poate analiza oportunitatea realizării OT din cupru, alamă sau fontă, care realizează o creștere a indicatorilor de performanță ai prelucrării, însă au un cost foarte ridicat, nerecomandându-se din punct de vedere economic.

Referitor la modul de obținere a OT se recomandă utilizarea ștanțării obișnuite, eventual cuplată cu operații suplimentare de îndreptare (planare).

5.7.8 Stabilirea presiunii dintre obiectul de prelucrat și obiectul de transfer

Funcție de natura perechii de materiale OP-OT, de mărimea zonei de interacțiune dintre cele două obiecte, presiunea se alege în limitele $0,1 \dots 0,3 \text{ N/mm}^2$.

6 CONCLUZII

Pentru realizarea temei abordate în prezenta teză de doctorat, s-a acționat în următoarele direcții:

- elucidarea unor aspecte ale intimității proceselor fundamentale din spațiul de prelucrare, lucru necesar pentru o conducere corespunzătoare a procesului de prelucrare;

- cunoașterea și aplicarea corectă a tehnologiilor de prelucrare prin EEC;

- elaborarea de noi tehnologii de prelucrare prin EEC, în vederea realizării unor caracteristici de prelucrare cât mai avantajoase, cu scăderea consumului de energie și materiale, creșterea productivității, și în final, cu costuri minime de prelucrare;

- conceperea și realizarea unor noi utilaje de prelucrare, asigurându-se îmbunătățirea caracteristicilor funcționale, în sensul creșterii performanțelor acestora și a gradului de automatizare.

Incercările autorului de a participa la rezolvarea acestor probleme s-au concretizat în prezenta lucrare de doctorat, prin următoarele contribuții originale:

A. În domeniul cercetării fundamentale:

1. Stabilirea unor clasificări a fantelor după criteriile dimensionale, tehnologice, de materiale, de utilizare, etc.;

2. Realizarea unei scheme complete a factorilor de intrare, a factorilor de ieșire și a parametrilor de proces, cu evidențierea celor mai importante corelații;

3. Evidențierea teoretică și verificarea experimentală a unei noi ipoteze privind formarea peliculei pasive în procesul de prelucrare prin EEC;

4. Realizarea unor încercări experimentale care să permită

alegerea modului de spălare a interstițiului de lucru (jet sau imersie), cu prezentarea tuturor condițiilor restrictive;

5. Realizarea unui experiment psihologic care a dus la ierarhizarea principalilor 12 factori de intrare asupra a șase din cele mai importante caracteristici tehnologice de prelucrare (Q_p - productivitatea prelucrării, Q_e - debitul uzării, R_a - calitatea suprafeței exprimată prin rugozitate, H_s - adâncimea stratului modificat termic inclusiv adâncimea microfisurilor, s_1 - interstițiul lateral, v_e - viteza de avans);

6. Realizarea unor experimente factoriale de prelucrare pentru două funcții de răspuns foarte importante pentru prelucrarea fantelor prin EEC (timpul de prelucrare și uzura radială a OT);

7. Pe baza experimentelor menționate s-au stabilit modelele matematice ale influenței factorilor reglabili analizați (treapta tensiunii de mers în gol U_g ; treapta rezistenței suplimentare R_s ; grosimea g a OT; tensiunea pe spațiul de lucru U) asupra unor funcții de răspuns (timpul de prelucrare și uzura radială a OT), modele care permit alegerea optimă în continuare a parametrilor reglabili;

8. Realizarea unor experimente pe baza cărora s-au conceput modelele matematice ale timpului de prelucrare și uzurii OT în funcție de puterea introdusă în spațiul de lucru, modele utilizate la optimizarea procesului de prelucrare;

9. Realizarea unui experiment necesar modelării matematice a lățimii fantei, pentru corelarea, în procesul de fabricare, a parametrilor de reglare a utilajului cu condițiile dimensionale impuse fantelor.

B. În domeniul cercetării aplicative:

1. Determinarea structurii și a schemelor cinematice ale instalației pentru prelucrarea fantelor în semifabricate tubulare;

2. Stabilirea condițiilor concrete pentru sursa de curent continuu aferentă instalației;

3. Stabilirea schemei de avans automat pentru instalația amintită anterior, determinarea funcției de transfer și analiza stabilității lui;

4. Pe baza studiilor și cercetărilor efectuate s-a proiectat și realizat în cadrul Catedrei „Tehnologie mecanică”, pe baza unui contract de cercetare cu IAFAA București (S.C. „Safar”), a unei instalații pentru prelucrarea fantelor longitudinale în semifabricate tubulare, care funcționează în condiții industriale la Baza Complexa Caracal;

5. Plecând de la instalația prezentată la punctul 4, prin extindere s-a proiectat și realizat efectiv o instalație necesară prelucrării fantelor transversale în semifabricate tubulare, respectiv debitării țevilor prin EEC, cu rotirea semifabricatului;

6. S-au conceput și realizat o serie de experimente, inclusiv dispozitivele necesare, pentru modelările matematice prezentate la punctul A;

7. O parte din soluțiile adoptate au fost brevetate (nr.148911 OSIM), altele au obținut certificate de inovație (nr.758 din 09.03.1988, nr.759 din 09.03.1988, nr.887 din 05.07.1988), iar altele au fost depuse la OSIM pentru brevetare (cererile cu numerele 1703/90, 0081/91, 0082/91).

Prin prezenta lucrare, fără a avea pretenția unei cuprinderi exhaustive a problematicii abordate, s-a urmărit elucidarea unor aspecte teoretice și practice privind prelucrarea prin EEC a materialelor, în scopul implementării într-o măsură cât mai largă în industrie a acestei tehnologii neconvenționale de prelucrare.

Având în vedere modul de realizare a cercetării din prezenta lucrare de doctorat, o parte din metodele teoretice și experimentale aplicate, din modelele matematice deduse, respectiv din rezultatele experimentale obținute pot fi utilizate și extinse și la alte operații de prelucrare prin EEC.

BIBLIOGRAFIE

1. Achimescu, N., Sistemul de acțiune tehnologică la prelucrarea prin eroziune electrică, A-4-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1983.
2. Artamanov, V.V, ș.a., Rezmernaia elektriceskaia obrabotka metallov, "Vísaiia skola", Moskva 1978.
3. Bagiu, L, Sporea, I., Dreucean, A., Popovici, I., Lâncrângean, Z., Herman, R., Reviczky, A., Paulescu, Gh., Gavrilă, F., Influența ZIT a unor oțeluri debitate prin rupere de contact și eroziune electrică complexă asupra posibilităților de prelucrare prin aşchiere, Noutăți în domeniul tehnologiilor și utilajelor pentru prelucrarea la cald, vol.2, Braşov, 1986.
4. Botez, E., Maşini-unelte - bazele teoretice ale proiectării, vol I, II, Editura Tehnică, Bucureşti, 1978.
5. Brătianu, C., Olariu, V., Modelarea numerică cu elemente finite, Editura Tehnică, Bucureşti, 1986.
6. Ciocîrdia, C., Ungureanu, I., Bazele cercetării experimentale în tehnologia construcțiilor de maşini, Bucureşti, Editura Didactică și Pedagogică, Bucureşti, 1983.
7. Drăghici, I., Tehnica sudării prin topire a metalelor și aliajelor, Editura Tehnică, Bucureşti, 1983.
8. Drăghici, Gh., Bazele teoretice ale proiectării proceselor tehnologice în construcția de maşini, Editura Tehnică, Bucureşti, 1971.
9. Drăghici, Gh., Tehnologia construcției de maşini, Editura Didactică și Pedagogică, Bucureşti, 1984.
10. Dragomir, T.L., Preitl, St., Elemente de teoria sistemelor și reglaj automat, vol I, II, IPTV, Timișoara, 1986.
11. Drimer, D., Asupra izvoarelor și resurselor științifice ale tehnologiilor neconvenționale, A-4-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1983.
12. Gafițeanu, M., ș.a., Elemente finite și de frontieră cu aplicații la calculul organelor de maşini, Editura Tehnică, Bucureşti, 1987.
13. Gavrilaş, I., Marinescu, I.N., Prelucrări neconvenționale în construcția de maşini, Editura Tehnică, Bucureşti, 1991.
14. Gavrilaş, I., ș.a., Prelucrarea prin electroeroziune și eroziune electrochimică abrazivă, Editura Tehnică, Bucureşti, 1980.
15. Gavrilaş, I., Prelucrări electrice în construcția de maşini, Editura Tehnică, Bucureşti, 1991.
16. Herman R., Botea T., Cicală E., Model matematic al duratei debitării prin eroziune complexă obținut prin experiment factorial de ordinul I", A-6-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1993.
17. Herman, R., Cap de lucru pentru realizarea fantelor longitudinale în conducte prin eroziune electrică complexă, Sesiunea de comunicări tehnico-științifice pentru tineret "Tehnic 2000", Timișoara, 1989.

8. Herman, R., Cicală, E., Botea, T., Ierarhizarea factorilor de influență asupra duratei prelucrării prin eroziune complexă a oțelului inoxidabil utilizând metoda bilanțului aleator", A-6-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1993.
9. Herman, R., Considerații asupra domeniilor de utilizare și a tehnologiilor de fabricație a pieselor cu fante în industrie, A-6-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1993.
10. Herman, R., Contribuții la teoria prelevării de material la prelucrarea prin eroziune electrică complexă, Referat doctorat 2, Universitatea Tehnică din Timișoara, 1992.
11. Herman, R., Gavrilă, F., Sistem de stropire a spațiului de lucru la prelucrări prin eroziune complexă, pentru discuri cu diametrul pînă la 200 mm, Certificat de inovator nr. 758/03.12.1987.
12. Herman, R., Gavrilă, F., Sistem de stropire a spațiului de lucru la prelucrări prin eroziune complexă, pentru discuri cu diametrul mai mare de 200 mm, Certificat de inovator nr. 759/03.12.1987.
13. Herman, R., Fleșer, T., Analiza prin metoda experimentului psihologic a principalelor influențe asupra rugozității suprafețelor la prelucrarea prin eroziune electrică complexă, Primul Colocviu Național Tehnic Interdisciplinar, Brăila, 1993.
14. Herman, R., Fleșer, T., Considerații privind unele domenii de aplicare eficientă a prelucrării prin eroziune electrică complexă, Primul Colocviu Național Tehnic Interdisciplinar, Brăila, 1993.
15. Herman, R., Fleșer, T., Influența parametrilor de lucru asupra adâncimii stratului modificat termic la prelucrarea prin eroziune electrică complexă, Al VII-lea Simpozion "Tehnologii și produse noi în construcția de mașini", Suceava, 1993.
16. Herman, R., Fleșer, T., Mnerie, D., Unele aspecte tehnico-economice pentru realizarea fantelor, A-6-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1993.
17. Herman, R., Fleșer, T., Posibilitați de realizare a fantelor prin eroziune electrică complexă, Al VII-lea Simpozion "Tehnologii și produse noi în construcția de mașini", Suceava, 1993.
18. Herman, R., Influența principalilor parametri reglabili asupra vitezei de avans la prelucrarea prin eroziune electrică complexă, A-6-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1993.
19. Herman, R., Lăncrângean, Z., Mărcușanu, A., Contribuții la realizarea fantelor în piese tubulare, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Oradea, 1991.
20. Herman, R., Lăncrângean, Z., Mărcușanu, A., Influența structurii circuitelor electrice pur rezistive asupra fenomenelor fundamentale în procesul prelucrării prin eroziune electrică complexă, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Oradea, 1992.

31. Herman, R., Lăncrângean, Z., Mărcușanu, A., Lăncrângean, S., Considerații asupra realizării fantelor prin eroziune electrică complexă, A-6-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1993.
32. Herman, R., Lăncrângean, Z., Mărcușanu, A., Modelarea statistică prin metoda experimentului psihologic a uzurii obiectului de transfer la prelucrarea prin eroziune electrică complexă, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Oradea, 1993.
33. Herman, R., Lăncrângean, Z., Mărcușanu, A., Prelucrarea prin eroziune electrică complexă a oțelurilor inoxidabile - aspecte tehnologice, Simpozion de tehnologii neconvenționale SITNEC 1, Birlad, 1988.
34. Herman, R., Lăncrângean, Z., Mărcușanu, A., Stabilirea ordinii de influență a principalilor parametri reglabili asupra productivității la prelucrarea prin eroziune electrică complexă, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Oradea, 1993.
35. Herman, R., Lăncrângean, Z., Mărcușanu, A., Studiu comparativ asupra debitării materialelor prin eroziune electrică complexă utilizând variantele de prelucrare cu jet sau imersie, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Oradea, 1992.
36. Herman, R., Lăncrângean, Z., New processing domains by electrical complex erosion, Sixth Israel materials engineering conference IMEC VI, 1993.
37. Herman, R., Mărcușanu, A., Lăncrângean, Z., Contribuții privind debitarea semifabricatelor cu diametre mai mari de 100 mm prin eroziune electrică complexă, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Oradea, 1991.
38. Herman, R., Mălaimare, G., Mărcușanu, A., Sistem de avans automat electrohidraulic pentru mașinile de prelucrat prin eroziune electrică complexă, Sesiunea jubiliară de comunicări tehnico-științifice a Universității Reșița, Reșița, 1993.
39. Herman, R., Mărcușanu, A., Mălaimare, G., Analiza principalelor influențe asupra interstițiului lateral la prelucrarea prin eroziune electrică complexă, Sesiunea jubiliară de comunicări tehnico-științifice a Universității Reșița, Reșița, 1993.
40. Herman, R., Mărcușanu, A., Mălaimare, G., Sistem de avans automat electromecanic pentru mașinile de prelucrat prin eroziune electrică complexă, Sesiunea jubiliară de comunicări tehnico-științifice a Universității Reșița, Reșița, 1993.
41. Herman, R., Mnerie, D., Fleșer, T., Considerații asupra variației forțelor la debitarea prin eroziune electrică complexă, A-6-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1993.
42. Herman, R., Olariu, M., Considerații privind portanța suprafețelor prelucrate prin eroziune electrică complexă, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Oradea, 1993.

43. Herman, R., Olariu, M., Marinceu, D., Rezultate experimentale privind debitarea oțelurilor rapide prin eroziune electrică complexă cu imersionarea obiectului de prelucrat, Sesiunea de comunicări tehnico-științifice pentru tineret "Tehnic 2000", Timișoara, 1986.
44. Herman, R., Stadiul actual al metodelor și procedeele de realizare a fantelor, Referat doctorat 1, Universitatea Tehnică din Timișoara, 1991.
45. Herman, R., Utilaje și tehnologii pentru prelucrarea fantelor prin eroziune electrică complexă, Referat doctorat 3, Universitatea Tehnică din Timișoara, 1992.
46. Herman, R., Vasilescu, M., Botis, M., Considerații asupra unor scheme de prelucrare la debitarea prin eroziune electrică complexă, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Oradea, 1993.
47. Herman, R., Vasilescu, M., Cercetări asupra tehnologiei și utilajului de debitat bare din oțel inoxidabil prin eroziune electrică complexă, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Oradea, 1992.
48. Hortopan, G., Aparate electrice, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1984.
49. Iliescu, C., Tehnologia ștanțării și matritării la rece, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1977.
50. Kruglov, A.I., Kruglova, S.K., Nekotorye svedenya o mehanizme razrgoda pri clektroiskovom razrezanii metallov, Izd.Acad. Nauk, Moskva, 1962.
51. Kunk, J., Electroerosion metal cutting in CSR, Primul simpozion internațional de prelucrări electrice a metalelor, Praga, 1960.
52. Lâncrângean, Z., Contribuții la prelucrarea corpurilor de revoluție prin eroziune electrică complexă, Teză de doctorat, IPTV, Timișoara, 1986.
53. Lâncrângean, Z., Herman, R., Aspecte ale cercetării experimentale privind debitarea oțelurilor bogat aliate și refractare prin eroziune electrică complexă, A V-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale în prelucrarea metalelor CNTN 89, Timișoara, 1989.
54. Lâncrângean, Z., Mărcușanu, A., Herman, R., Aspecte tehnologice ale debitării oțelurilor inoxidabile prin eroziune electrică complexă, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Oradea, 1991.
55. Lâncrângean, Z., Herman, R., Mărcușanu, A., Cercetări experimentale privind debitarea prin eroziune electrică complexă a barelor obținute prin metalurgia pulberilor, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Oradea, 1991.
56. Lâncrângean, Z., Herman, R., Mărcușanu, A., Model matematic pentru determinarea funcțiilor de răspuns la prelucrarea prin eroziune electrică complexă pentru circuite rezistive, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Oradea, 1993.
57. Lâncrângean, Z., Herman, R., Mărcușanu, A., Model matematic pentru determinarea funcțiilor de răspuns la prelucrarea prin eroziune electrică complexă pentru circuite inductive, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Oradea, 1993.

58. Lăncrângean, Z., Mărcușanu, A., Herman, R., Influența modificării circuitului electric cu capacități asupra fenomenelor fundamentale în procesul prelucrării prin eroziune electrică complexă, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Oradea, 1992.
59. Lăncrângean, Z., Mărcușanu, A., Herman, R., Influența modificării structurii circuitului electric cu inductivități asupra fenomenelor fundamentale în procesul prelucrării prin eroziune electrică complexă, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Oradea, 1992.
60. Lăncrângean, Z., Popovici, I., Herman, R., Reviczky, A., Gavrilă, F., Influența tensiunii din spațiul de lucru asupra timpului de debitare prin eroziune electrică complexă a oțelurilor bogat aliate cu crom, A-4-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1983.
61. Lăncrângean, Z., Popovici, I., Herman, R., Reviczky, A., Gavrilă, F., Influența curentului din spațiul de lucru asupra timpului de debitare și a productivității prelucrării oțelurilor bogat aliate cu crom prin eroziune electrică complexă, A-4-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1983.
62. Lăncrângean, Z., Popovici, V., Mărcușanu, A., Herman, R., Pop, V., Instalație automată de debitat semifabricate metalice dure, Cerere pentru brevet de invenție nr. 82/1991, Institutul Politehnic "Traian Vuia", Timișoara.
63. Marinescu, I.N., ș.a., Tehnologii de prelucrare a sculelor din materiale dure și extradure, Editura Tehnică, București, 1985.
64. Măgureanu, R., Mașini electrice speciale pentru sisteme automate, Editura Tehnică, București, 1980.
65. Mărcușanu, A., Herman, R., Lăncrângean, Z., Determinarea modelului matematic al structurii de automatizare din componența mașinii de debitat prin eroziune electrică complexă, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Oradea, 1992.
66. Mărcușanu, A., Herman, R., Lăncrângean, Z., Studiul stabilității sistemului de reglare automată a avansului la instalația de debitat bare din wolfram prin eroziune electrică complexă, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Oradea, 1991.
67. Mărcușanu, A., Herman, R., Lăncrângean, Z., Studiul stabilității sistemelor de reglare automată a avansului integrate în mașina de debitat prin eroziune electrică complexă, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Oradea, 1992.
68. Mărcușanu, A., Herman, R., Marințeu, D., Slavici, T., Contribution sur le débitage par érosion électrique complexe des demi-produits tubulaires, Buletinul științific și tehnic al Universității Tehnice Timișoara, seria Mecanică, Timișoara, 1991.
69. Mărcușanu, A., Lăncrângean, Z., Herman, R., Instalație automată pentru debitarea barelor sinterizate din wolfram prin eroziune electrică complexă, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, Oradea, 1991.

70. Mărcușnu, A., Sistem de avans automat cu motor pas cu pas la mașinile de prelucrat prin eroziune electrică, Teză de doctorat, IPTV, Timișoara, 1986.
71. Melnikov, S.V., ș.a., Planiovonie experimenta v issledovan-niyah selskohoziastvennyh protsessov, Kolas, Lenin-grad, 1980.
72. Micloși, V., ș.a., Bazele proceselor de sudare, Editura Di-dactică și Pedagogică, București, 1982.
73. Mihail, R., Introducere în strategia experimentării cu apli-cații în tehnologia chimică, Editura Științifică și En-ciclopedică, București, 1986.
74. Mihoc, D., Iliescu, S.St., Teoria și elementele sistemelor de reglare automată, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1984.
75. Nanu, A., Fundamentarea teoretică a principalelor fenomene constatate experimental la prelucrarea anodo-mecanică a metalelor, Buletinul tehnic și științific al IPTV, Timișoara, Tom 8/9, 1961.
76. Nanu, A., Herman, R., Olariu, M., Considerații asupra meto-delor matematice la stabilirea parametrilor optimi la prelucrarea prin eroziune electrică complexă, A-6-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1993.
77. Nanu, A., Lăncrângean, Z., Dependența parametrilor tehnolo-gici de natura circuitului electric la prelucrarea prin eroziune electrică complexă, A-4-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1983.
78. Nanu, A., Lăncrângean, Z., Dependența caracteristicilor de structura circuitului electric în cazul prelucrării prin eroziune electrică complexă, Simpozionul "Tehnolo-giile neconvenționale, mijloc de ridicare a eficienței tehnico-economice în construcția de mașini, Timișoara, 1986.
79. Nanu, A., Realizări în domeniul tehnologiilor neconvenționa-le în România, A-4-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1983.
80. Nanu, A., ș.a., Manualul inginerului mecanic, Editura Tehni-că, București, 1972.
81. Nanu, A., Nichici, Al., Instalație pentru executarea fante-lor în materiale electroconductoare, Brevet de invenție nr.65322 din 22.12.1973, OSIM București.
82. Nanu, A., Nichici, Al., Popa, H., O nouă concepție asupra noțiunii de prelucrare dimensională prin eroziune, Con-ferința națională de tehnologii neconvenționale, Timi-șoara, 1971.
83. Nanu, A., Popovici, V., Influența formei și dimensiunilor e-lectrodului sculă și piesă asupra productivității la debitarea electroerozivă anodo-mecanică, Rev. Construc-ția de mașini nr.6, București, 1965.
84. Nanu, A., Popovici, V., Determinarea condițiilor de reglare automată a avansului la debitarea electroerozivă, Bule-tinul științific și tehnic, Tom 9 (23), IPTV, Timișoa-ra, 1964.
85. Nanu, A., Tehnologia materialelor, Editura Didactică și Pe-dagogică, București, 1983.

86. Nanu, A., Tehnologiile neconvenționale. Prezent și perspective, Conferința națională de tehnologii neconvenționale, Sibiu, 1982.
87. Nichici, Al., Aspecte energetice ale tehnologiilor de prelucrare prin eroziune, A-4-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1983.
88. Nichici, Al., Aspectul structural al acțiunii tehnologice de prelucrare prin eroziune, Buletinul științific și tehnic, Seria Mecanică, Fasc. 2 Tom 23 (37), IPTV, Timișoara, 1978.
89. Nichici, Al., Popovici, V., ș.a., Prelucrarea prin eroziune în construcția de mașini, Editura Facla, Timișoara, 1983.
90. Nichici, Al., Tehnologia materialelor, IPTV, Timișoara, 1980.
91. Novik, F., ș.a., Optimizaciya processov tehnologii metalov metodami planirovaniya experimentaov, Masinostroenie, Moskva, 1980.
92. Olariu, M., Herman, R., Influența modului de spălare a interstițiului tehnologic asupra rugozității suprafețelor obținute prin eroziune electrică complexă, Comunicările celei de-a V-a Conferințe de procese și utilaje de prelucrare la rece, Timișoara, 1986.
93. Olariu, M., Modelarea statistică a interstițiului tehnologic prin metoda experimentului psihologic la prelucrarea prin eroziune electrică, Sesiunea de comunicări tehnico-științifice a Universității din Brașov, 1985.
94. Olariu, M., Stadiul actual al optimizării prelucrării prin eroziune electrică, Referat doctorat, Universitatea Tehnică din Timișoara, 1993.
95. Papilov, L.A., Osnovi elektrotehnologii i novie eio raznovosti, v Masinostroenie, Moskva, 1971.
96. Picoș, C., ș.a. Normarea tehnică pentru prelucrări prin așchiere, vol I, Editura Tehnică, București, 1979.
97. Picoș, C., ș.a. Normarea tehnică pentru prelucrări prin așchiere, vol II, Editura Tehnică, București, 1982.
98. Picoș, C., ș.a., Proiectarea tehnologiilor de prelucrare mecanică prin așchiere, vol. I, II, Editura Universitas, Chișinău, 1992.
99. Picoș, C., Tehnologia construcțiilor de mașini, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1975.
100. Popescu, I., Optimizarea procesului de așchiere, Editura Scrisul Românesc, Craiova, 1987.
101. Popovici, V., Comportarea unor sorturi de carburi metalice la prelucrarea prin eroziune complexă, Revista "Cercetări metalurgice", vol.18, București, 1977.
102. Popovici, V., Contribuții la studiul fenomenelor fundamentale la prelucrarea prin eroziune electrică complexă, Teză de doctorat, IPTV, Timișoara, 1970.
103. Popovici, V., Corelația dintre proprietățile fizico-mecanice și prelucrabilitatea carburilor metalice prin eroziune complexă, A-4-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1983.
104. Popovici, V., Herman, R., Nicolcescu, I., Cîrciu, Z., Cap de lucru pentru tăiere prin eroziune electrică complexă, certificat de inovator nr.878/05.07.1988.

105. Popovici, V., Lăncrângean, Z., Mărcușanu, A., Marinceu, D., Herman, R., Reviczky, A., Slavici, T., Instalație de debitat prin eroziune electrică complexă, Cerere pentru brevet de invenție nr. 0081/1991, Institutul Politehnic "Traian Vuia", Timișoara.
106. Popovici, V., Lăncrângean, Z., Mărcușanu, A., Herman, R., Marinceu, D., Reviczky, A., Instalație semiautomată destinată realizării fantelor longitudinale în semifabricate tubulare, Cerere pentru brevet de invenție nr. 0083/1991, Institutul Politehnic "Traian Vuia", Timișoara.
107. Popovici, V., Probleme privind influența naturii surselor de alimentare și a circuitelor de lucru anterioare asupra prelevării de material la prelucrarea prin procedeul eroziv anodo-mecanic, Școala Politehnică Dresda, 1968.
108. Popovici, V., Reglarea interstițiului de lucru, factor de optimizare la prelucrarea prin eroziune complexă, A-4-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1983.
109. Rosinger, St., Procese și scule de presare la rece, Editura Facla, Timișoara, 1987.
110. Sălăgean, T., ș.a., Optimizarea sudării cu arcul electric, Editura Tehnică, București, 1988.
111. Sălăgean, T., Sudarea cu arcul electric, Editura Facla, Timișoara, 1977.
112. Sălăgean, T., Tehnologia procedeelor de sudare cu arc, Editura Tehnică, București, 1985.
113. Sălăgean, T., Tehnologia sudării metalelor cu arcul electric, Editura Tehnică, București, 1986.
114. Scheiber, E., Lixsândroiu, D., MathCAD. Prezentare și probleme rezolvate. Editura Tehnică, București, 1994.
115. Schenk, H., Teoriya iazenerskogo eksperimenta, Idz.Mir., 1972.
116. Semionov, V.M., Tateev, N.K., Electronnaia obrabotka materialov, nr.1/84, Moskva.
117. Slavici, T., Marinceu, D., Herman, R., Dumitru, E., Analiza unui sistem de alimentare și orientare a semifabricatelor la mașina de prelucrare prin eroziune complexă, Sesiunea de comunicări tehnico-științifice pentru tineret "Tehnic 2000", Timișoara, 1988.
118. Taloi, D., Optimizarea proceselor metalurgice, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983.
119. Taloi, D., Optimizarea proceselor tehnologice, Editura Academiei, București, 1987.
120. Teodorescu, M., ș.a., Elemente de proiectare a ștanțelor și matrițelor, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1977.
121. Tiron, M., Prelucrarea statistică și informațională a datelor de măsurare, Editura Tehnică, București, 1977.
122. Todoran, I., Tratatul matematică a datelor experimentale. Funcții empirice. Editura Academiei, București, 1976.
123. Vaș, A., ș.a., Aplicații industriale ale plasmelor termice, Editura Facla, Timișoara, 1979.
124. Vasile, I., Cădăriu, Gh., Tâierea cu flacără a materialelor metalice, Editura Tehnică, București, 1978.
125. Vitlin, V.B., Davidov A.S., Elektrofizicheskie metody obrabotki v metalurghiceskon mettalov, Masinostroenie, 1971.

126. Vlase, A., ș.a., Regimuri de aşchiere, adaosuri de prelucrare și norme tehnice de timp, vol.I, Editura Tehnică, București, 1983.
127. Vlase, A., ș.a., Regimuri de aşchiere, adaosuri de prelucrare și norme tehnice de timp, vol.II, Editura Tehnică, București, 1985.
128. *** Acționări electrice pentru avansuri și roboți industriali realizate cu variatoare tip VRM și VMA, Intreprinderea Electromagnetica, București, 1986.
129. *** Instalație de debitat prin eroziune electrică complexă bare din oțel inoxidabil cu $\varnothing_{\max} = 100$ mm și $\varnothing_{\max} = 100$ mm, Protocol cu IEPAM Birlad, Timișoara, 1988.
130. *** Instalație de șlițuire a burlanelor de foraj prin eroziune electrică complexă, Protocol cu IAFAA București, 1989.
131. *** Refertivnii jurnal, 14 Tehnologhia. Maschinostroiemye, 1985-1990.
132. *** Sistemul internațional de unități (SI), Editura Academiei, București, 1989.