

CONTRIBUȚII LA OPTIMIZAREA CU CALCULATORUL A MAȘINILOR DE PRELUCRARE PRIN EROZIUNE ELECTRICĂ CU FIR

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea "Politehnica" din Timișoara
în domeniul INGINERIE MECANICĂ
de către

Ing. Alin Vasile MNERIE

Conducător științific: prof.univ.dr.doc.st.dhc.ing. Aurel NANU
Referenți științifici: prof.univ.dr. *Nicolae MARINESCU*
prof.univ.dr.ing.ec. *Mihail JÎȚU*
prof.univ.dr.ing.ec. *Titus SLAVICI*

Ziua susținerii tezei: 30.09.2010

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|------------------------|---|
| 1. Automatică | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie | 8. Inginerie Industrială |
| 3. Energetică | 9. Inginerie Mecanică |
| 4. Ingineria Chimică | 10. Știința Calculatoarelor |
| 5. Inginerie Civilă | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 6. Inginerie Electrică | |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2006

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221
e-mail: editura@edipol.upt.ro

Cuvânt înainte

Studiile complexe realizate pe parcursul tezei au necesitat cercetări teoretice, interpretări fenomenologice, punerea în practică a rezultatelor obținute prin realizarea reconstrucției și modernizării unei mașini de prelucrat prin eroziune electrică cu fir din generația anilor 80' folosind metode și rezultate obținute în cadrul programului experimental personal propus și realizat pe parcursul tezei.

Au fost elaborate în cadrul acestui capitol concluzii atât generale cât și contribuții aduse în domeniul teoretic și mai ales în domeniul practic.

În final sunt prezentate anexele ce cuprind listingul programelor realizate pentru conducerea sistemului atât cele pentru calculator cât și cele pentru microcontrolerul plăcii de dezvoltare. Sunt prezentate și extrase din fișele de catalog ale părților electronice folosite. La anexe mai sunt prezentate imagini ale utilajelor, imagini din timpul cercetărilor, rezultate experimentale, date de catalog, capturi ale programelor, etc.

Realizarea tezei de doctorat presupune, încă de la alegerea temei justificarea acesteia și integrarea în stadiul cercetărilor actuale, o coordonare fermă, coerentă și foarte bine structurată în timp. Rezultatele prezentate în lucrare sunt rodul activității desfășurate în catedra de Tehnologie Mecanică din cadrul Facultății de Mecanică, a Universității „POLITEHNICA” din Timișoara, locul considerat drept începutul tehnologiilor neconvenționale din România, având drept coordonator „părintele spiritual” - distinsul Prof.dr.doc.st.dhc.ing. Aurel NANU.

De aceea cuvintele de mulțumire pentru ajutorul oferit în elaborarea tezei se îndreaptă, în primul rând, către distinsul Prof.dr.doc.st.dhc.ing. Aurel NANU, a cărui competență științifică este de neegalat, personalitatea distinsului profesor fiind completată de bunătatea și înțelegerea de care a dat dovadă pe parcursul anilor petrecuți în catedră.

Elaborarea tezei de doctorat presupune, pe lângă coordonarea conducătorului științific și experiență, ajutor științific și material. De aceea, îmi exprim recunoștința și mulțumirea pentru sprijinul acordat de-a lungul acestor ani întregului colectiv al catedrei de Tehnologie Mecanică, din Facultatea de Mecanică.

Mulțumesc în mod special comisiei de examinare a tezei de doctorat.

Mulțumesc tuturor aceluia care m-au ajutat în mod direct și indirect, mulțumesc colaboratorilor mei, prietenilor și nu în ultimul rând familiei pentru răbdare, înțelepciune și sprijin acordat pe perioada elaborării tezei.

Timișoara, septembrie 2010

Ing. Alin Vasile MNERIE

Dedic această lucrare

Familiei și prietenilor mei,

Tuturor colaboratorilor pentru sprijinul acordat.

Mnerie, Alin Vasile

Contribuții la optimizarea cu calculatorul a mașinilor de prelucrare prin eroziune electrică cu fir

Teze de doctorat ale UPT, Seria 9, Nr. YY, Editura Politehnica, 2010, 216 pagini, 112 figuri, 21 tabele.

ISSN:uuuu-vvvv

ISBN (10):; ISBN (13):

Cuvinte cheie:

eroziune electrică, electrod filiform, mașini de prelucrare, optimizare, precizie dimensională, rugozitate, microcontroler, comanda procesului, sisteme expert, hardware și software, modelare.

Rezumat,

Având în vedere tendințele industriei actuale este evidentă promovarea unor procedee tehnologice de prelucrare mai puțin convenționale denumite în literatura de specialitate „tehnologii neconvenționale”.

Teza de doctorat se încadrează în contextul preocupărilor actuale în domeniul prelucrărilor prin eroziune electrică cu fir prin oferirea unor soluții moderne, practice și reale pentru conducerea mașinii de prelucrat prin eroziune electrică cu fir prin dezvoltarea unui sistem tehnologic modern bazat pe comanda cu ajutorul unui calculator precum și interfațarea acestuia cu mașina de prelucrat. Această preocupare este justificată de nevoia de precizie dimensională în condițiile unor costuri reduse și mai ales în condițiile unui timp de prelucrare redus.

În acest sens au fost urmărite mai multe obiective : identificarea prin cercetare bibliografică și experimentală a unor parametri de proces ce pot fi optimizați prin comanda cu calculatorul a mașinii de prelucrat prin eroziune electrică cu fir; identificarea experimentală a valorilor optime a unor parametri atât de proces precum impulsuri generator, viteză de rulare fir cât și rezultați în urma procesului rugozitate, productivitate, consum și integrarea acestora într-un sistem expert în vederea generării unor parametri pentru comanda mașinii; proiectarea unui sistem de comandă numerică bazat pe calculator cu toate avantajele actuale ale acestuia (hardware, software) dar și pe modalitatea de interfațare a acestuia cu mașina de prelucrat; elaborarea unui software pentru monitorizarea și comanda mașinii de prelucrat prin eroziune electrică cu fir; elaborarea unui software pentru placa de dezvoltare cu microcontroler pentru monitorizarea atentă, pas cu pas, a poziționării firului pe conturul piesei de prelucrat.

În final sunt prezentate anexele ce cuprind listingul programelor realizate pentru conducerea sistemului atât cele pentru calculator cât și cele pentru microcontrolerul plăcii de dezvoltare. Sunt prezentate și extrase din fișele de catalog ale părților electronice folosite. La anexe mai sunt prezentate imagini ale utilajelor, imagini din timpul cercetărilor, rezultate experimentale, date de catalog, capturi ale programelor etc.

CUPRINS

Cuvânt înainte	3
Cuprins	5
Abrevieri	8
Lista figurilor	10
Lista de tabele	14
1. Oportunitatea și obiectivele tezei	15
1.1. Generalități	15
1.2. Obiectivele tezei de doctorat	15
1.3. Structura tezei de doctorat	16
2. Aspecte actuale ale prelucrărilor prin eroziune electrică cu fir	19
2.1. Principiul prelucrării dimensionale prin eroziune electrică	19
2.2. Clasificarea variantelor procedurii de prelucrare prin eroziune electrică ..	24
2.2.1. Prelucrarea prin eroziune electrică cu descărcări amorsate prin străpungerea unui mediu dielectric	24
2.2.2. Prelucrarea prin eroziune electrică cu impulsuri amorsate prin ruperea unor microcontacte electrice	25
2.3. Fenomene fizice fundamentale la prelucrarea prin eroziune electrică cu descărcări amorsate prin străpungere	26
2.3.1. Teorii referitoare la mecanismul fizic de îndepărtare de material la prelucrarea prin eroziune electrică	26
2.3.2. Teoria termoelectrică de prelucrare dimensională prin eroziune electrică	29
2.4. Sistemul tehnologic de prelucrare prin eroziune electrică cu fir	48
2.5. Principii tehnologice la prelucrarea prin eroziune electrică cu fir	53

2.6. Elemente de automatizare utilizate la prelucrarea dimensională prin eroziune electrică cu fir	55
2.6.1. Generatoare de impulsuri	55
2.6.2. Sisteme de reglare automată a interstițiului eroziv	59
2.6.3. Sisteme de poziționare pe traiectorie a electrodului	67
2.7. Resurse materiale pentru cercetare	68
2.7.1. Mașina de prelucrat Elerofil	68
2.7.2. Mașina de prelucrat prin eroziune electrică Sodick AQ300L.....	70
2.8. Concluzii	71
3. Contribuții la modernizarea arhitecturii procesului de prelucrarea dimensională prin eroziune electrică cu fir	73
3.1. Integrarea arhitecturilor hardware și software și interfațarea acestora în procesul de prelucrare prin eroziune electrică cu fir	73
3.2. Soluții hardware de conducere a procesului cu ajutorul calculatorului	75
3.2.1. Microcontrollerul PIC16F877A	75
3.2.2. Placa de dezvoltare PICPLC16	77
3.2.3. Configurarea calculatorului pentru comanda procesului de prelucrare	82
3.3. Soluții software de conducere a procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu fir	83
3.3.1. Soluții software pentru comanda și supravegherea procesului și a mașinii de la distanță	83
3.3.2. Arhitecturi software pentru generarea traiectoriei firului	84
3.3.3. Arhitecturi Delphi pentru comanda mașinii	92
3.4. Realizarea unui sistem expert pentru optimizarea regimului de prelucrare	96
3.4.1. Caracteristicile sistemelor expert	97
3.4.2. Arhitectura sistemelor expert	98
3.4.3. Medii de dezvoltare a sistemelor expert. Limbajul de programare	104
3.4.4. Sistem expert pentru controlul mașinii de debitat prin eroziune electrică	106
3.5. Concluzii	113

4. Cercetări experimentale	115
4.1. Studiul asupra factorilor de influență asupra rugozității	116
4.2. Studiul asupra factorilor de influență asupra timpului de prelucrare.....	120
4.3. Studiul asupra factorilor de influență asupra preciziei dimensionale.....	122
4.4. Studiul asupra factorilor de influență asupra uzurii firului	142
4.5. Concluzii	149
5. Prelucrarea datelor experimentale și modelarea matematică în vederea optimizării sistemului.....	151
5.1. Modelarea matematică a sistemului de factori de influență	151
5.2. Optimizarea sistemului tehnologic de prelucrare prin eroziune electrică cu fir	161
6. Concluzii și contribuții personale	163
6.1. Contribuții în domeniul teoretic	164
6.2. Contribuții în domeniul practic	165
Anexe	167
Bibliografie	207
Sinteză privind lucrările proprii	215

LISTA DE TABELE

Tabelul 2.1.	Mărimi relevante ale unora dintre teoriile care încearcă să elucideze mecanismul elementar de îndepărtare de material la prelucrarea prin eroziune electrică
Tabelul 4.1.	Evoluția parametrului rugozitate în funcție de viteza de rulare a firului.
Tabelul 4.2.	Evoluția parametrului rugozitate în funcție de variația timpilor ON/OFF ai unei perioade de impuls.
Tabelul 4.3.	Evoluția parametrului timp de prelucrare în funcție de viteza de rulare a firului.
Tabelul 4.4.	Valorile experimentale obținute pentru stabilirea influenței vitezei de rulare a firului asupra preciziei dimensionale.
Tabelul 4.5.	Valorile experimentale obținute pentru stabilirea influenței tensiunii de lucru asupra preciziei dimensionale
Tabelul 4.6.	Valorile experimentale obținute pentru stabilirea influenței timpilor de generare a impulsurilor dați de generator asupra preciziei dimensionale.
Tabelul 4.7.	Pozițiile relative la piesă pentru citirea pozițiilor firului în timpul prelucrării prin eroziune electrică cu fir – piesa 1.
Tabelul 4.8.	Pozițiile relative la piesă pentru citirea pozițiilor firului în timpul prelucrării prin eroziune electrică cu fir – piesa 2.
Tabelul 4.9.	Evoluția parametrului greutate fir în funcție de viteza de rulare a firului
Tabel 4.10.	Evoluția parametrului greutate fir în funcție de variația timpilor ON/OFF ai unei perioade de impuls
Tabel 4.11.	Extras din datele experimentale referitoare la variația parametrului greutate fir în funcție de tensiunea generatorului.
Tabelul 5.1.	Rezultate experimentale obținute în urma prelucrărilor
Tabelul 5.2.	Tabel pentru transformarea valorilor de pe axele OX și OY ale suprafețelor de răspuns
Tabelul 5.3.	Tabel ANOVA pentru rugozitate
Tabelul 5.4.	Tabel ANOVA pentru timpul de prelucrare
Tabelul 5.5.	Tabel ANOVA pentru gfir
Tabelul 5.6.	Rezultate experimentale obținute în urma prelucrărilor
Tabelul 5.7.	Tabel ANOVA pentru rugozitate
Tabelul 5.8.	Tabel ANOVA pentru timpul prelucrării
Tabelul 5.9.	Tabel ANOVA pentru masa firului

ABREVIERI

A	[μm]	- interstițiul mecanic;
A,S	[m^2]	- aria, suprafața;
\dot{C}	[W/K]	- fluxul capacității termice;
c	[J/kgK]	- capacitate termică masică;
D,d	[m]	- diametru;
d_e	[m]	- diametru echivalent;
D	[m^2/s]	- coeficientul de difuziune;
e	[J/kg]	- energie masică;
E	[J]	- energie;
E	[V/m]	- momentul dezvoltării câmpului electric;
F	[N]	- forța;
i	[A]	- curentul descărcării;
i_d	[A]	- intensitatea curentului descărcării;
I	[A]	- intensitate/curent;
I_d	[A]	- intensitatea curentului descărcării;
I_M	[A]	- valorile curentului în timpul descărcării;
k	[W/ m^2K]	- coeficientul de transfer termic total;
k_1	[$\mu\text{m}/\text{V}$]	- constantă pentru lichidul dielectric;
k_2	[$\mu\text{m}/\text{J}^{0.4}$]	- constantă de material pentru OP;
l,L	[m]	- lungimea, dimensiunea caracteristică;
l	[J/kg]	- lucru mecanic masic;
L	[J]	- lucru mecanic;
M_s	[g/ cm^3]	- masa specifică;
m	[kg]	- masa;
p	[N/ m^2]	- presiunea;
p_b	[N/ m^2]	- presiunea barometrică;
P_d	[N/ m^2]	- presiunea dinamică;
\dot{q}	[W/ m^2]	- densitatea fluxului termic;
Q	[J]	- energia termică;

\dot{Q}	[W]	- fluxul termic;
S	[m ²]	- secțiunea;
t	[°C]	- temperatura (în grade Celsius);
t _{iu}	[s]	- durata impulsurilor de tensiune;
t _{ii}	[s]	- durata impulsurilor de curent;
t _a	[s]	- timpul de amorsare a descărcărilor;
t _p	[s]	- durata pauzei dintre impulsuri;
T	[s]	- perioada impulsurilor;
T	[K]	- temperatura absolută;
U	[V]	- tensiune;
U _a	[V]	- tensiunea de amorsare a descărcărilor;
U _d	[V]	- tensiunea descărcării;
U _M	[V]	- valorile tensiunii în timpul descărcării;
v	[m ³ /kg]	- volum masic;
V	[m ³]	- volum;
w	[m/s]	- viteza;
α	[W/m ² K]	- coeficientul de transfer termic;
β	[1/K]	- coeficientul de dilatare liniară;
δ	[m]	- grosimea;
δ	[mm]	- dimensiunea liniară a interstițiului eroziv;
γ	[μS]	- conductivitate reziduală;
ε	[-]	- coeficient de emisie;
η _t	[-]	- randament termic;
η _f	[-]	- randamentul arderii în focar;
λ	[W/mK]	- conductivitatea termică;
ρ	[kg/m ³]	- masa specifică;
τ	[s]	- timpul;

LISTA FIGURILOR

- Fig.2.1. Schema de principiu a prelucrării dimensionale prin eroziune electrică
- Fig.2.2. Variația tensiunii U și a curentului I în timpul descărcărilor electrice în impuls
- Fig.2.3. Generarea suprafețelor cu generatoare și directoare materializate
- Fig.2.4. Generarea suprafețelor cu generatoare materializată și directoare cinematică
- Fig.2.5. Fenomene fizico – chimice caracteristice prelucrării dimensionale prin eroziune electrică
- Fig.2.6. Începutul formării canalului filiform
- Fig.2.7. Suprapunerea câmpurilor electrice proprii peste câmpul inițial
- Fig.2.8. Formarea strimerilor
- Fig.2.9. Microcratere formate la o descărcare singulară de scurtă durată (20 μ s)
- Fig.2.10. Suprafața formată de acțiunea unei descărcări singulare de lungă durată (500 μ s)
- Fig.2.11. Forma ideală ($r=h$) a craterului la o descărcare singulară și curba calitativă de variație a căldurii cu raza r
- Fig.2.12. Cratere pe suprafața obiectului supus prelucrării . a - forma circulară cu strat alb repartizat uniform; b – formă circulară cu strat alb repartizat neuniform c, d - forme cvasicirculare
- Fig.2.13. Câmpul termic și structura zonei influențate termic la prelucrarea prin eroziune electrică.
- Fig.2.14. Zona influențată termic la suprafața OP. a – strat alb continuu îngust, b – strat alb cu sufluri, c, d – strat alb cu incluziuni și sufluri.
- Fig.2.15. Zona influențată termic la suprafața OP. a – strat alb continuu îngust, b – strat alb cu sufluri, c, d – strat alb cu incluziuni și sufluri.
- Fig.2.16. Tipuri de descărcări.
- Fig.2.17. Descărcare fictivă între două particule gazoase sau solide din interstițiu.
- Fig.2.18. Apariția scurtcircuitului între electrod și obiectul prelucrării datorită aglomerării de particule prelevate și neîndepărtate din interstițiu.
- Fig.2.19. Apariția scurtcircuitului între electrod și obiectul prelucrării datorită aglomerării de particule prelevate și neîndepărtate din interstițiu.
- Fig.2.20. Diametrul particulelor determinate experimental.
- Fig.2.21. Distribuția distanțelor de expulzare a particulelor din crater.
- Fig.2.22. Evacuări artificiale ale produselor eroziunii.
- Fig.2.23. Zona refulată la marginea craterului.
- Fig.2.24. Modelul sistemului tehnologic specific de prelucrare prin eroziune electrică cu electrod filiform.

- Fig.2.25. Principiul prelucrării prin eroziune electrică cu electrod filiform.
- Fig.2.26. Principiul constructiv a variantei cu montant a sistemului tehnologic de prelucrare cu electrod filiform.
- Fig.2.27. Principiul constructiv a variantei portal a sistemului tehnologic de prelucrare cu electrod filiform.
- Fig.2.28. Principiul sistemului de rulare-derulare a electrodului filiform. 1,2 – role de rulare, derulare; 3 – role de întindere; 4 – palpator pentru sesizarea ruperii firului; 5 – elemente de ghidare; 6 – element de alimentare cu energie electrică.
- Fig.2.29. Reprezentarea schematică a tăieturii cu electrod filiform.
- Fig.2.30. Evoluția intensității curentului de descărcare și a diametrului electrodului la prelucrarea prin eroziune electrică cu electrod filiform.
- Fig.2.31. Evoluția intensității grosimii maxime a pieselor la prelucrarea prin eroziune electrică cu electrod filiform.
- Fig.2.32. Evoluția rezistenței electrice a electrodului la prelucrarea prin eroziune electrică cu electrod filiform.
- Fig.2.33. Generator de impulsuri de relaxare: a - schema; b - diagrama de tensiune și cure.
- Fig.2.34. Generator de impulsuri de relaxare cu generator de curent constant: a - schema; b - diagrama de tensiuni.
- Fig.2.35. Schema bloc a unui generator de impulsuri de comdate modern.
- Fig.2.36. Curentul rezidual la prelucrarea prin eroziune electrică cu electrod filiform: a.- cazul impulsurilor unipolare; b.- curent rezidual nul pentru impulsuri bipolare.
- Fig.2.37. Schema generatorului de impulsuri bipolar.
- Fig.2.38. Schema bloc a SRA.
- Fig.2.39. Parametri interstițiului eroziv.
- Fig.2.40. Structura geometrică a interstițiului.
- Fig.2.41. Determinarea valorilor medii ale tensiunii pentru impulsuri comandate.
- Fig.2.42. Caracteristica statică liniară a interstițiului.
- Fig.2.43. Variația duratei întârzierii la amorsare cu grosimea interstițiului.
- Fig.2.44. Dependetele frecvențelor relative ale impulsurilor și a vitezei de erodare cu mărimea interstițiului.
- Fig.2.45. Interacțiunea parametrilor impulsurilor la reglarea interstițiului.
- Fig.2.46. Ghidarea electrodului filiform.
- Fig. 2.47. Mașina de prelucrat prin eroziune electrică cu fir de tipul Elerofil, aflată în dotarea laboratorului de eroziune electrică
- Fig. 2.48. CNC LN1W folosit la comanda mașinii prin eroziune electrică AQ300L
- Fig. 2.47. Mașina de prelucrat prin eroziune electrică cu fir Sodick AQ300L
- Fig. 3.1. Analiza greutatea firului folosit în funcție de viteza firului
- Fig. 3.2. Analiza rugozității în funcție de viteza firului
- Fig.3.3. Variația timpului de prelucrare în funcție de viteza firului

- Aspecte ale firului uzat în urma prelucrării dimensionale
 a) Fir nou b) 0.4195 g/ml c) 0.4007 g/ml d) 0.3855 g/ml
 Fig. 3.4. d) 0.3770 g/ml d) 0.3318 g/ml
- Fig. 3.5. Microscop optic Olympus SZX7
- Fig. 3.6. Evoluția timpului de prelucrare în funcție de timpul Ton
 Evoluția greutatei firului în funcție de timpul Ton
- Fig. 3.7
- Fig. 3.8. Evoluția rugozității suprafeței prelucrate în funcție de timpul Ton
- Fig. 3.9. Evoluția parametrilor rugozitate, timp de prelucrare și greutate fir
- Fig. 3.10. Evoluția timpului de prelucrare în funcție de timpul Toff
- Fig. 3.11 a. Evoluția rugozității, b. Greutatea firului uzat în raport cu timpul Toff
- Fig. 3.12. Evoluția rugozității în raport cu variația nivelului tensiunii
- Fig. 3.13. Evoluția timpului de prelucrare în raport cu nivelul tensiunii
- Fig. 3.14. Variația greutatei firului în raport cu tensiunea
- Fig. 3.15. Piesa realizată în primul experiment
- Fig. 3.16. Variația dimensiunii a în funcție de viteza firului
- Fig. 3.17. Variația dimensiunii b în funcție de viteza firului
- Fig. 3.18. Variația dimensiunii c în funcție de viteza firului
- Fig. 3.19. Piesa realizată în al doilea experiment
- Fig. 3.20. Variația dimensiunii a în funcție de tensiunea de lucru
- Fig. 3.21. Variația dimensiunii b în funcție de tensiunea de lucru
- Fig. 3.22. Variația dimensiunii c în funcție de tensiunea de lucru
- Fig. 3.23. Variația dimensiunii a în funcție de Timpul Ton și Toff ai generatorului
- Fig. 3.24. Variația dimensiunii b în funcție de Timpul Ton și Toff ai generatorului
- Fig. 3.25. Variația dimensiunii c în funcție de Timpul Ton și Toff ai generatorului
- Fig. 3.26. Variația dimensiunii a în funcție de Timpul Toff; Ton=9[us]
- Fig. 3.27. Variația dimensiunii b în funcție de Timpul Toff; Ton=9[us]
- Fig. 3.28. Variația dimensiunii c în funcție de Timpul Toff; Ton=9[us]
- Fig. 3.29. Reprezentarea punctelor înregistrate ca poziție fir în procesul de prelucrare – piesa 1, vederea ansamblu.
- Fig. 3.30. Reprezentarea punctelor înregistrate ca poziție fir în procesul de prelucrare – piesa 1, vederea detaliu a.
- Fig. 3.31. Reprezentarea punctelor înregistrate ca poziție fir în procesul de prelucrare – piesa 1, vederea detaliu b
- Fig. 3.32. Reprezentarea punctelor înregistrate ca poziție fir în procesul de prelucrare – piesa 2, vederea ansamblu
- Fig. 3.33. Diagrama Pareto și funcția de răspuns estimată pentru rugozitate
- Fig. 3.34. Diagrama Pareto și funcția de răspuns estimată pentru timpul de prelucrare
- Fig. 3.35. Diagrama Pareto și funcția de răspuns estimată pentru greutatea firului folosit la prelucrarea prin eroziune electrică cu fir.

- Fig. 3.36. Diagrama Pareto și funcția de răspuns estimată pentru rugozitate
- Fig. 3.37. Diagrama Pareto și funcția de răspuns estimată pentru variația greutatea firului.
- Fig. 4.1. Schema logică a microcontrollerului PIC16F877A
- Fig. 4.2. Semnificația pinilor microcontrollerului PIC16F877A
- Fig. 4.3. Placa de dezvoltare PICPLC16
- Fig. 4.4. Conectorul PS2
- Fig. 4.5. Schema de conectare a tastaturii PS2 la porturile microcontrolerului
- Fig. 4.6. Conectorii pentru accesul direct la porturile microcontrolerului
- Fig. 4.7. Accesul direct la porturile microcontrolerului
- Fig. 4.8. Schema modului de alimentare pentru placa de dezvoltare
- Fig. 4.9. Modulul de comunicare serială RS232
- Fig. 4.10. Aplicația Team Viewer
- Fig. 4.11. Webcam folosit pentru monitorizarea vizuală a mașinii
- Fig. 4.12. Schema de principiu a prelucrării dimensionale prin eroziune electrică
- Fig. 4.13. Schema bloc de realizare a unui modul de reglare automată a interstițiului eroziv pentru o mașină de eroziune electrică cu fir pentru două axe folosind microcontroler
- Fig. 4.14. Analogia dintre expertul uman și sistemul expert.
- Fig. 4.15. structura generală a unui sistem expert
- Fig. 4.16. Structura unui sistem expert specializat în operații de conducere
- Fig. 4. 17. Arhitectura generală și interfețele unui sistem expert
- Fig. 4.18. Lista cu variabilele folosite.
- Fig. 4.19. Fereastră de introducere a regulilor
- Fig. 4.20. Blocurile logice implementate în cadrul sistemului expert: a) Blocul de decizie; b) Blocul de raport.
- Fig. 4.21. Blocul de comandă intitulat „Blocul de execuție”.
- Fig. 4.22. Captură din fișierul de tip .txt care conține setările pentru mașina de debitat.
- Fig. 4.23. Ecran de setare a conținutului și aspectului ferestrei cu rezultate.
- Fig. 4.24. Fereastră care conține titlul sistemului expert.
- Fig. 4.25. Fereastră cu întrebări și răspunsuri posibile
- Fig. 4.27. Explicativă pentru noțiunea de echidistanță
- Fig. 4.28. Realizarea unei echidistanțe cu colț
- Fig. 4.29. Realizarea unei echidistanțe cu racordare
- Fig. 4.30. Ecran capturat din aplicația elerofil 2010

1. OPORTUNITATEA ȘI OBIECTIVELE TEZEI

1.1. Generalități

Având în vedere tendințele industriei actuale este evidentă promovarea unor procedee tehnologice de prelucrare mai puțin convenționale denumite în literatura de specialitate „tehnologii neconvenționale”.

Aceste tehnologii sunt caracterizate de faptul că folosesc ca și scule pentru îndepărtarea materialului excedentar de pe obiectul de prelucrat „scule energetice” cum ar fi energia electrică, termică, fascicule de ioni sau electroni, unde ultrasonice, etc. [Nanu A, 2003], [Nanu A, 2004].

Cu alte cuvinte pot fi numite „tehnologii neconvenționale” și pentru faptul că folosesc „scule” de o duritate scăzută pentru a prelucra materiale cu o duritate ridicată și foarte ridicată. Acest fapt constituie și un mare avantaj economic întrucât de cele mai multe ori este mai ieftină producerea energiei decât procurarea diferitelor materiale de o duritate foarte ridicată pentru folosirea drept scule (materiale consumabile) pentru prelucrarea altor materiale.

Totuși, dacă producerea energiei folosită în tehnologiile neconvenționale este de cele mai multe ori relativ ușor și ieftin, mașinile pentru prelucrarea prin tehnologii neconvenționale sunt foarte complexe devenind astfel și foarte scumpe.

De departe cea mai folosită tehnologie neconvențională este eroziunea electrică. La ora actuală eroziunea electrică este întâlnită într-un fel sau altul în mai toate ramurile industriei fiind de multe ori considerată ca și tehnologie convențională.

Des utilizată în industrie eroziunea electrică s-a bucurat de o atenție ridicată din partea cercetătorilor fiind foarte atent analizate multiplele fenomene complexe care apar în timpul procesului de eroziune. Concluziile studiilor realizate conduc spre faptul că procesul de eroziune electrică este un proces foarte complex, cu fenomene multiple și complexe și tot odată foarte greu de controlat apărând astfel în timpul prelucrării o serie de erori.

Plecând de la această idee, imposibilitatea controlării în întregime a procesului de eroziune electrică, lucrarea de față dorește să ofere soluții practice și reale pentru conducerea mașinilor pentru prelucrarea prin eroziune electrică cu fir oferind posibilitatea reducerii erorilor dimensionale apărute din cauza procesului de eroziune electrică prin poziționarea exactă cu ajutorul calculatorului a firului pe traiectoria conturului piesei de prelucrat.

1.2. Obiectivele tezei de doctorat

Teza de doctorat se încadrează în contextul preocupărilor actuale în domeniul prelucrărilor prin eroziune electrică cu fir prin oferirea unor soluții moderne, practice și reale pentru conducerea mașinii de prelucrat prin eroziune electrică cu fir prin dezvoltarea unui sistem tehnologic modern bazat pe comanda cu ajutorul unui calculator precum și interfațarea acestuia cu mașina de prelucrat.

Această preocupare este justificată de nevoia de precizie dimensională în condițiile unor costuri reduse și mai ales în condițiile unui timp de prelucrare redus.

În acest sens au fost urmărite mai multe obiective :

- identificarea prin cercetare bibliografică și experimentală a unor parametri de proces ce pot fi optimizați prin comanda cu calculatorul a mașinii de prelucrat prin eroziune electrică cu fir;
- identificarea experimentală a valorilor optime a unor parametri atât de proces precum impulsuri generator, viteză de rulare fir cât și rezultați în urma procesului rugozitate, productivitate, consum și integrarea acestora într-un sistem expert în vederea generării unor parametri pentru comanda mașinii;
- proiectarea unui sistem de comandă numerică bazat pe calculator cu toate avantajele actuale ale acestuia (hardware, software) dar și pe modalitatea de interfațare a acestuia cu mașina de prelucrat;
- elaborarea unui software pentru monitorizarea și comanda mașinii de prelucrat prin eroziune electrică cu fir;
- elaborarea unui software pentru placa de dezvoltare cu microcontroler pentru monitorizarea atentă, pas cu pas, a poziționării firului pe conturul piesei de prelucrat.

1.3. Structura tezei de doctorat

Teza de doctorat, extinsă pe 216 pagini, este structurată pe 6 capitole, anexe, o listă bibliografică și conține 112 figuri și 21 tabele. Lista bibliografică reunește 142 de titluri de articole, cărți reprezentative și site-uri web publicate în țară sau în străinătate. În bibliografie sunt menționate și cele 24 lucrări proprii ale autorului elaborate în calitate de autor sau coautor.

Capitolul 1 conține o introducere în actualitatea tezei, justificarea temei alese și totodată structura tezei de doctorat. Teza de doctorat se încadrează în contextul preocupărilor actuale în domeniul prelucrărilor prin eroziune electrică cu fir prin oferirea unor soluții moderne, practice și reale pentru conducerea mașinii de prelucrat prin eroziune electrică cu fir prin dezvoltarea unui sistem tehnologic modern bazat pe comanda cu ajutorul unui calculator precum și interfațarea acestuia cu mașina de prelucrat. Astfel fiind urmărite mai multe obiective.

Capitolul 2 prezintă situația actuală a sistemelor de prelucrare prin eroziune electrică cu accent deosebit pe prelucrarea prin eroziunea electrică cu fir. Tot odată este făcută și o integrare în domeniul prelucrărilor neconvenționale a prelucrării prin eroziune electrică cu fir. Sunt prezentate fenomenele ce intervin în procesul de prelucrare prin eroziune și anumiți parametri ce intervin și pot modifica considerabil procesul eroziv în cazul eroziunii electrice. Este descris stadiul actual al mașinilor de eroziune electrică cu fir aflate în dotarea laboratorului de eroziune electrică a catedrei de Tehnologie Mecanică din cadrul universității de Mecanică, Universitatea „Politehnica” din Timișoara, locul unde au fost realizate majoritatea experimentelor, interpretărilor rezultatelor dar și implementarea rezultatelor obținute.

Capitolul 3 conține o descriere a contribuțiilor personale proiectate și implementate practic, funcționale, pentru automatizarea procesului, creșterea preciziei dimensionale, optimizarea programelor folosite pentru mașina de prelucrat precum și o metodă de comandă și monitorizare a mașinii de prelucrat la distanță. Capitolul descrie soluțiile moderne hardware și software pentru implementarea soluțiilor propuse și realizate pentru comanda cu ajutorul calculatorului a mașinilor moderne de prelucrat prin eroziune electrică.

Pentru comanda cu ajutorul calculatorului a procesului de prelucrare în general și în special a poziționării firului pe traiectoria conturului piesei de prelucrat este nevoie de un calculator optimizat și configurat hardware pentru astfel de procese, fiind ajutat de software proiectat și realizat având scop principal comanda mașinii, urmărirea procesului dar și comanda și monitorizarea mașinii de prelucrat prin eroziune electrică cu fir de la distanță. Acest aspect fiind analizat și propus ca și metodă didactică pentru laboratorul de eroziune electrică.

Una dintre realizările practice în urma tezei de doctorat este reconstrucția și modernizarea mașinii de prelucrare prin eroziune electrică cu fir de tipul Elerofil din cadrul laboratorului de eroziune electrică al catedrei. Tot în acest capitol fiind prezentate principalele îmbunătățiri aduse mașinii rezultate și în urma studiilor făcute în cadrul tezei de doctorat.

În finalul capitolului este prezentat un model de sistem expert realizat în urma rezultatelor experimentale care propune anumiți parametri precum nivelul tensiunii de prelucrare dat de generator, viteza firului, viteza de avans, offsetul necesar deplasării firului față de conturul piesei, eroare critică de la care se poate abate firul față de conturul proiectat.

Capitolul 4 tratează programul experimental, propus și realizat de autor.

Au fost realizate multiple experimente pe oțel și aluminiu pentru a analiza calitatea suprafețelor prelucrate, influența timpilor de prelucrare. Este analizată și uzura firului prelucrat și influența acesteia asupra procesului. La începutul capitolului se prezintă câteva analize ale comportamentului firului în procesul de prelucrare, analize ce au la bază uzura firului în funcție de parametrii procesului impuși de generator pe de o parte, iar pe de altă parte comandați de mașină dați de viteza de rulaj a firului.

În finalul capitolului sunt analizate abaterile dimensionale datorită interstițiului.

Capitolul 5 realizează o interpretare a datelor experimentale, analizând efectele procesului de prelucrare în diferite condiții, efectele sunt analizate atât din punct de vedere al consumurilor, timp cât și din punct de vedere al preciziei dimensionale.

Tot în acest capitol este prezentat și un model matematic pentru definirea influenței parametrilor generator asupra procesului și calității suprafețelor prelucrate. În finalul capitolului se identifică parametri optimi pentru fiecare regim de prelucrare.

Capitolul 6 cuprinde concluziile generale ale tezei, sinteza contribuțiilor personale precum și perspectivele oferite de lucrarea de față pentru punerea în practică a rezultatelor obținute dar și pentru continuarea cercetărilor.

Studiile complexe realizate pe parcursul tezei au necesitat cercetări teoretice, interpretări fenomenologice, punerea în practică a rezultatelor obținute prin realizarea reconstrucției și modernizării unei mașini de prelucrat prin eroziune

electrică cu fir din generația anilor 80' folosind metode și rezultate obținute în cadrul programului experimental personal propus și realizat pe parcursul tezei.

Au fost elaborate în cadrul acestui capitol concluzii atât generale cât și contribuții aduse în domeniul teoretic și mai ales în domeniul practic.

În final sunt prezentate anexele ce cuprind listingul programelor realizate pentru conducerea sistemului atât cele pentru calculator cât și cele pentru microcontrolerul plăcii de dezvoltare. Sunt prezentate și extrase din fișele de catalog ale părților electronice folosite. La anexe mai sunt prezentate imagini ale utilajelor, imagini din timpul cercetărilor, rezultate experimentale, date de catalog, capturi ale programelor, etc.

Realizarea tezei de doctorat presupune, încă de la alegerea temei justificarea acesteia și integrarea în stadiul cercetărilor actuale, o coordonare fermă, coerentă și foarte bine structurată în timp. Rezultatele prezentate în lucrare sunt rodul activității desfășurate în catedra de Tehnologie Mecanică din cadrul Facultății de Mecanică, a Universității „POLITEHNICA” din Timișoara, locul considerat drept începutul tehnologiilor neconvenționale din România, având drept coordonator „părintele spiritual” - distinsul Prof.dr.doc.st.dhc.ing. Aurel NANU.

De aceea cuvintele de mulțumire pentru ajutorul oferit în elaborarea tezei se îndreaptă, în primul rând, către distinsul Prof.dr.doc.st.dhc.ing. Aurel NANU, a cărui competență științifică este de neegalat, personalitatea distinsului profesor fiind completată de bunătatea și înțelegerea de care a dat dovadă pe parcursul anilor petrecuți în catedră.

Elaborarea tezei de doctorat presupune, pe lângă coordonarea conducătorului științific și experiență, ajutor științific și material. De aceea, îmi exprim recunoștința și mulțumirea pentru sprijinul acordat de-a lungul acestor ani întregului colectiv al catedrei de Tehnologie Mecanică, din Facultatea de Mecanică.

Mulțumesc în mod special comisiei de examinare a tezei de doctorat.

Mulțumesc tuturor aceluia care m-au ajutat în mod direct și indirect, mulțumesc colaboratorilor mei, prietenilor și nu în ultimul rând familiei pentru răbdare, înțelegere și sprijin acordat pe perioada elaborării tezei.

2. ASPECTE ACTUALE ALE PRELUCRĂRILOR PRIN EROZIUNE ELECTRICĂ CU FIR

Acest capitol conține o descriere a situației actuale a sistemelor de prelucrare prin eroziune electrică cu accent deosebit pe prelucrarea prin eroziunea electrică cu fir. Tot odată aici se face și o integrare în domeniul prelucrărilor neconvenționale a prelucrării prin eroziune electrică cu fir. Sunt prezentate fenomenele ce intervin în procesul de prelucrare prin eroziune și anumiți parametri ce intervin și pot modifica considerabil procesul eroziv în cazul eroziunii electrice.

2.1. Principiul prelucrării dimensionale prin eroziune electrică

Prelucrarea dimensională prin eroziune electrică este procedeul metodei de prelucrare cu energii concentrate la care îndepărtarea surplusului de material la suprafața obiectului supus prelucrării se bazează pe efectele erozive complexe, discontinue și localizate a unor descărcări electrice în impuls, amorțate în mod repetat între obiectul prelucrării și un obiect de transfer (electrodul – sculă), în condițiile respectării unor condiții fizice privind existența descărcărilor, localizarea efectelor acestora cât și asigurării continuității desfășurării procesului eroziv.

Plasarea acestui procedeu în ierarhia tehnologică a procedeelor de prelucrare dimensională este determinată pe de o parte de caracteristicile tehnologice relativ scăzute, iar pe de altă parte de posibilitățile de generare foarte ușoară a unor suprafețe de complexități ridicate cu precizii de execuție foarte bune și de independența relativă a caracteristicilor tehnologice de proprietățile mecanice ale obiectului de prelucrat. Aceste caracteristici tehnologice plasează prelucrarea dimensională prin eroziune electrică spre zonele în care restricțiile prelucrării prin așchiere sunt depășite, sau se află în apropierea acestora sau când prelucrarea prin așchiere are eficiență economică redusă (duritate ridicată a obiectului supus prelucrării, imposibilitatea sau dificultăți de generare a suprafeței, rigiditate scăzută a unuia din elementele sistemului tehnologic). Astfel, prelucrarea prin eroziune electrică a devenit o tehnologie complementară – alternativă, care și-a demonstrat necesitatea, fiind în prezent cea mai utilizată tehnologie din grupul celor de prelucrare dimensională cu energii concentrate.

Efectul eroziv al descărcărilor electrice în impuls și localizarea acestor efecte se realizează prin existența celor două corpuri cu proprietăți electroconductoare – obiectul supus prelucrării și electrodul – sculă, al doilea poziționat spațial corect față de primul și între care se află spațiul de grosime foarte mică – interstițiul eroziv umplut cu mediul dielectric – electroizolant (Fig. 2.1).

Dacă cele două corpuri sunt supuse unei diferențe de potențial suficient de mare ca să fie capabilă să realizeze străpungerea interstițiului apare descărcarea electrică care prin mecanismele elementare specifice conduce la îndepărtarea unei cantități mici de material la suprafața celor două obiecte în interacțiune.

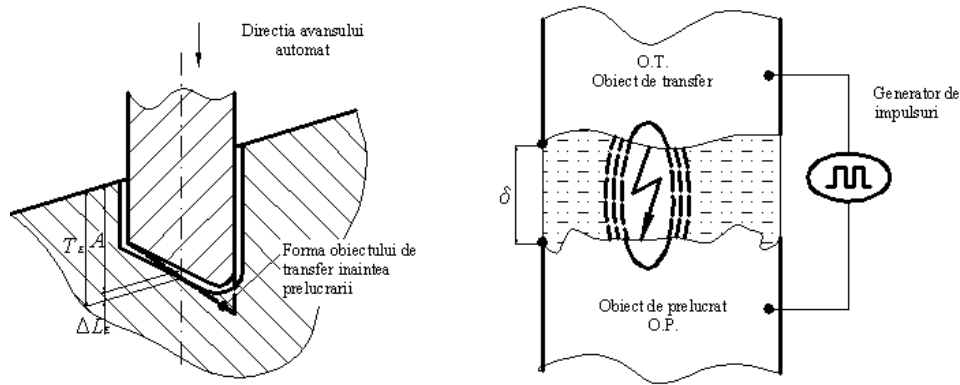


Fig.2.1. Schema de principiu a prelucrării dimensionale prin eroziune electrică.

Repetarea acestor acțiuni cu o frecvență foarte mare, având la origine generarea în impulsuri a alimentării electrice, determină realizarea globală a prelucrării. Descărcarea electrică în impuls parcurge mai multe stadii dintre care de interes tehnologic sunt ultimele – descărcarea în scânteie și descărcarea în arc electric nestaționar, localizate temporar la sfârșitul perioadei de descărcare și cu o durată proprie de cca 10^{-4} secunde. [Nanu A, 2003], [Nanu A, 2004].

Condiții fizice necesare pentru realizarea prelucrării dimensionale prin eroziune electrică

Pentru ca descărcările electrice în impuls să poată realiza îndepărtarea de material la suprafața obiectului supus prelucrării și pentru ca aceste descărcări să aibă eficiența scontată sistemul tehnologic de prelucrare prin eroziune electrică trebuie să îndeplinească mai multe condiții:

- introducerea directă a energiei electrice în interstițiul eroziv

Pentru satisfacerea acestei condiții materialele din care sunt confecționate obiectul de prelucrat și electrodul – sculă trebuie să prezinte proprietăți electroconductoare sau trebuie ca pe parcursul prelucrării să li se imprime astfel de proprietăți. Această condiție trebuie privită ca o restricție a procedurii de prelucrare prin eroziune electrică, dar care probabil că într-un viitor mai mult sau mai puțin îndepărtat va putea fi depășită. În prezent literatura de specialitate semnalează încercări de prelucrare electroerozivă a unor materiale electroizolante.

- dozarea temporară în impuls a energiei electrice

Condiția se impune pentru localizarea acțiunii energiei de efect în zona de interacțiune electrod – agent eroziv – obiect de prelucrat. Prin realizarea acestei condiții se produce practic îndepărtarea de material la suprafețele celor două obiecte în interacțiune. La o dozare continuă a energiei electrice, efectul termic al descărcării se propagă treptat în întregul volum al obiectului de prelucrat (cazul mecanismului fizic elementar la sudarea electrică) și prelevarea nu mai poate fi localizată. Din această cauză, durata descărcărilor electrice în impuls se limitează la valori sub 10^{-1} secunde. Această condiție este realizată de către generatorul de impulsuri sau de ruperea micro-contactelor electrice prin mișcări relative între cele

două obiecte în interacțiune. Datorită mecanismului amorsării descărcărilor și a caracteristicilor circuitului de alimentare, variațiile tensiunii și curentului nu sunt simultane. Este deci necesară distingerea impulsurilor de tensiune de cele de curent, mărimile caracteristice ale descărcărilor în impuls amorsate prin străpungere fiind prezentate în Fig.2.2 (mărimi similare intervin în cazul descărcărilor amorsate prin ruperea unui contact electric).

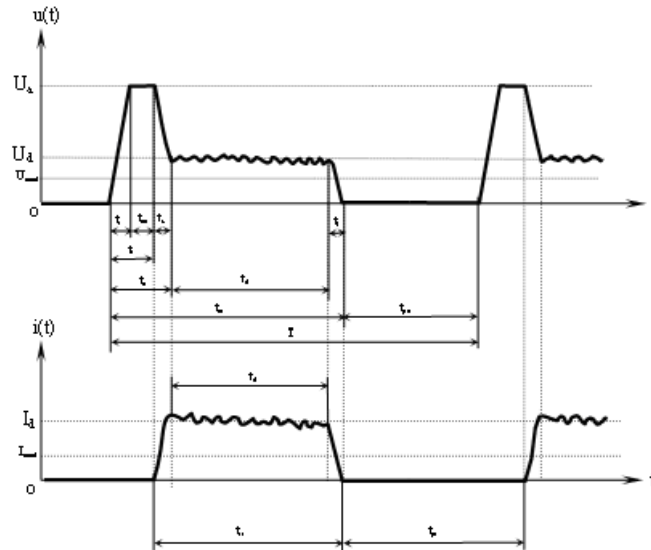


Fig.2.2. Variația tensiunii U și a curentului I în timpul descărcărilor electrice în impuls:
 t_{iu} , t_{if} – durata impulsurilor de tensiune respectiv curent; t_a – timpul de amorsare a descărcărilor;
 t_p – durata pauzei dintre impulsuri; $T = t_{iu} + t_p$ – perioada impulsurilor; U_a – tensiunea de amorsare a descărcărilor; U_M , I_M – valorile tensiunii, respectiv ale curentului în timpul descărcării.

Pentru ca descărcările să aibă loc separat, este necesar ca durata pauzei dintre impulsuri să fie mai mare decât timpul necesar pentru deionizarea punții conductoare a descărcării și decât duratele proceselor electrice tranzitorii determinate de caracterul capacitiv sau inductiv al circuitului de alimentare. [Nanu A, 2003], [Nanu A, 2004].

- asigurarea unui caracter polarizat al descărcărilor electrice în impuls

Mecanismele elementare care se desfășoară în interstițiul eroziv conduc la acțiuni de îndepărtare de material atât la suprafața obiectului prelucrării (productivitatea procedurii) cât și la suprafața electrodului – sculă (uzura volumică a electrodului – sculă). Cum, în mod normal tendința urmărită este de maximizare a productivității și de minimizare a uzurii condiția pretinde măsuri severe de dirijare a procesului pentru satisfacerea tendințelor amintite. Printre măsurile posibile pot fi enumerate: conectarea obiectului prelucrării și a electrodului – sculă la polarități corespunzătoare, confecționarea electrodului – sculă din materiale cu rezistențe erozive mari, formarea pe acesta a unor pelicule protectoare cu mare rezistență la uzare s.a. Satisfacerea acestei condiții se realizează atât prin alegerea corespunzătoare a materialului din care se confecționează electrodul – sculă, cât și prin intermediul generatorului de impulsuri la care se poate realiza conectarea electrică optimă și care la care se poate regla un regim energetic, care să favorizeze formarea peliculelor protectoare.

- restabilirea continuă a stării inițiale în interstițiul eroziv

Reproductibilitatea descărcărilor electrice în impuls este o cerință energetică de primă importanță în vederea planificării corespunzătoare a prelucrărilor. Pentru realizarea ei sunt necesare condiții identice de desfășurare a tuturor descărcărilor care sunt active în interstițiul eroziv. Cum fiecare descărcare în parte și cu atât mai pronunțat un grup de descărcări produc modificări majore ale stării interstițiului, modificări atât de stare cât și dimensionale este evident că următoarele descărcări electrice în impuls întâlnesc alte condiții de desfășurare și astfel vor prezenta parametri energetici diferiți, cu efecte tehnologice modificate. Pentru restabilirea stării generale a interstițiului eroziv principalele acțiuni se îndreaptă spre evacuarea cât mai bună, eficientă a produselor eroziunii formate și acumulate în interstițiu de descărcările electrice anterioare. Această evacuare are loc pe cale naturală, prin unele mecanisme elementare care se desfășoară în interstițiul eroziv, dar ele nu au totdeauna eficiența necesară asigurării unei stări corecte, normale pentru descărcările următoare.

Pentru a asigura, totuși condițiile optime de descărcare se poate interveni prin sistemul de circulație a lichidului dielectric care poate îndeplini funcții de evacuare forțată a produselor eroziunii din interstițiu. Restabilirea dimensională a interstițiului eroziv este o necesitate prin creșterea lui, ca urmare a îndepărtării de material la suprafața celor două obiecte în interacțiune. Aceasta poate fi imaginată ca o îndepărtare în straturi succesive și care, evident măresc dimensiunea interstițiului cu menținerea constantă a diferenței de potențial între obiectul prelucrării și electrodul - sculă. Dar, această mărire determină înrăutățirea condițiilor de dezvoltare a descărcărilor în impuls electric, îmbunătățire care poate ajunge chiar la imposibilitatea amorsării unor noi impulsuri.

Pentru menținerea constantă a interstițiului eroziv sistemul tehnologic de prelucrare prin eroziune electrică trebuie să dispună de un subsistem care să îndeplinească acest rol – sistemul de reglare automată a interstițiului eroziv. Din imaginarea îndepărtării de material în straturi succesive completată cu necesitatea menținerii constante a dimensiunii interstițiului rezultă imaginea modului principal de generare a suprafețelor la prelucrarea prin eroziune electrică, care trebuie acceptată ca o generare cu generatoare și directoare materializate. Practic, între cele două obiecte în interacțiune este necesară o singură mișcare rectilinie alternativă prin care interstițiul eroziv este menținut în limite dimensionale optime pentru amorsarea descărcărilor electrice în impuls. Prin respectarea acestei condiții este posibil ca o formă spațială oarecare, pe care o are electrodul – sculă caracterizat prin (2.1):

$$F_{ES} = F_{ES}(x_1, y_1, z_1) \quad (2.1)$$

să fie reprodusă la nivelul obiectului de prelucrat, reproducerea caracterizându-se prin (2.2):

$$F_{OP} = F_{OP}(x_2, y_2, z_2) \quad (2.2)$$

La finele operației de reproducere, forma electrodului – sculă este modificată, datorită acțiunii descărcărilor electrice care acționează și în direcția lui. Forma finală a electrodului – sculă poate fi descrisă prin funcția (2.3):

$$F_{ESf} = F_{ESf}(x_2, y_2, z_2) \quad (2.3)$$

În aceste condiții poate fi definită condiția de reproductibilitate a electrodului – sculă în obiectul prelucrării la prelucrarea prin eroziune electrică (2.4):

$$F_{OP} = K \cdot F_{ES} = K' \cdot F_{ESf} \quad (2.4)$$

Condiția de reproductibilitate (2.4) trebuie înțeleasă calitativ, coeficienții K și K' fiind coeficienți de corecție (subunitari) care relevă existența necesară a interstițiului eroziv (K), respectiv rezistența la eroziune a materialului din care este confecționat electrodul – sculă (Fig.2.3). [Nanu A, 2004], [Nanu A, 2003].

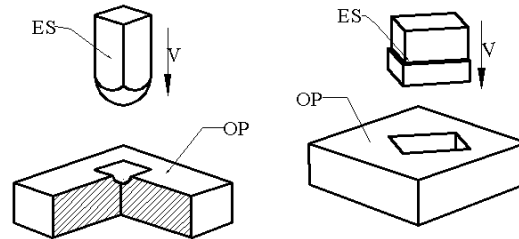


Fig.2.3. Generarea suprafețelor cu generatoare și directoare materializate.

Din cele prezentate mai sus se poate desprinde o concluzie tehnologică de primă importanță: precizia de execuție a electrodului – sculă condiționează precizia geometrică a prelucrării la nivelul obiectului de prelucrat. Utilizarea exclusivă a acestei variante de generare a suprafețelor prezintă pe lângă marele avantaj al simplității și un dezavantaj determinat de limitele acestei generări. Prin suprapunerea peste mișcarea principală 1 (rectilinie alternativă), necesară realizării dimensiunii generatoarei a unei mișcări suplimentare 2 de rotație cu scopul de obținere a directoarei, posibilitățile tehnologice ale procedurii cresc foarte mult (Fig.2.4). Dimensiunea directoarei este realizată de mișcarea 3, iar compensarea uzurii electrodului – sculă este asigurată de mișcarea 4. Mișcările suplimentare pot fi executate fie de subsamblate existente constructiv în structura utilajului de prelucrare prin eroziune electrică sau pot fi realizate de dispozitive specifice atașabile utilajului.

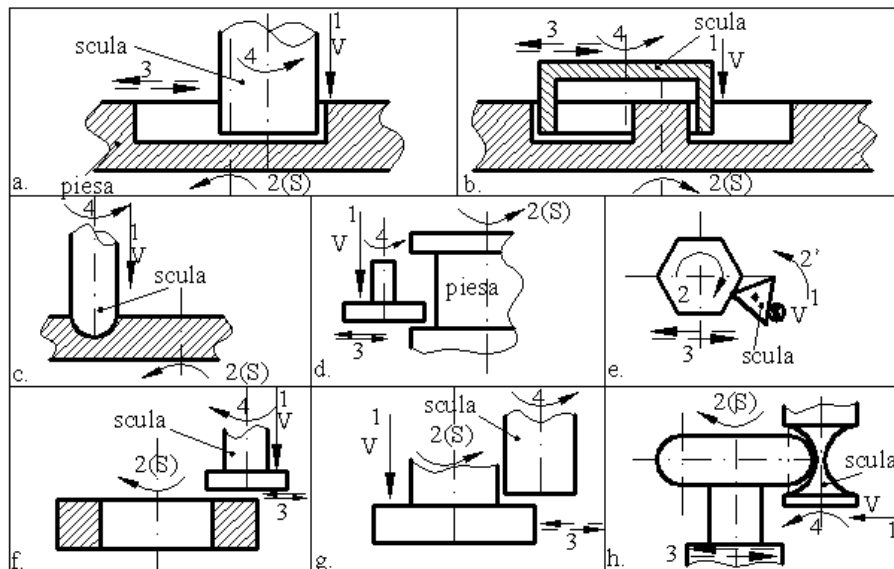


Fig.2.4. Generarea suprafețelor cu generatoare materializată și directoare cinematică realizate.

2.2. Clasificare variantelor procedului de prelucrare prin eroziune electrică

Criteriile care stau la baza clasificării variantelor procedului de prelucrare prin eroziune electrică sunt impuse pe de o parte de modul de amorsare de durată și forma descărcărilor electrice în impuls iar pe de altă parte de forma electrodului – sculă utilizat pentru prelucrare. Privit prin prisma modului de amorsare a descărcărilor electrice procedul de prelucrare prin eroziune electrică se clasifică în:

- prelucrarea prin eroziune electrică cu descărcări amorsate prin străpungerea unui mediu dielectric;
- prelucrarea prin eroziune electrică cu impulsuri amorsate prin ruperea unor micro-contacte electrice (eroziunea electrică cu rupere de contact - EERC).

[Nanu A, 2004], [Nanu A, 2003].

2.2.1. Prelucrarea prin eroziune electrică cu descărcări amorsate prin străpungerea unui mediu dielectric

Varianta se caracterizează prin lipsa contactului nemijlocit între obiectul de prelucrat și electrodul – sculă. Dimensiunea interstițiului eroziv este menținută constant la o valoare adecvată, determinată de tensiunea de mers în gol a sursei (tensiunea de amorsare a impulsului) de către sistemul de avans automat al sistemului tehnologic de prelucrare. Această dimensiune are valori cuprinse între 0,01 ... 0,5 mm, fiind dependentă de condițiile de lucru și de parametrii de reglare. În momentul conectării celor două obiecte la sursa de alimentare cu energie electrică spațiul izolator format din lichidul dielectric din interstițiu va fi străpuns formându-se descărcarea electrică cu caracter de impuls determinat de sursa de alimentare, a cărei energie se transformă preponderant în energie termică și mecanică.

Componenta termică a energiei este așa de mare încât conduce la topiri și vaporizări locale ale unor microvolume de material la suprafața celor două obiecte aflate în interacțiune, dar prin dirijarea corespunzătoare a procesului eroziv îndepărtarea preponderantă de material are loc la suprafața obiectului supus prelucrării.

Componenta mecanică a energiei disruptive determină expulzarea fazelor lichide formate ca urmare a acțiunilor anterioare, cu formarea unor cratere specifice la suprafața obiectelor în interacțiune. Succesiunea selectivă a acestor secvențe conduce la formarea unor mulțimi de cratere repartizate statistic – uniform pe toată suprafața în interacțiune a celor două obiecte. Acest mod de îndepărtare de material explică caracterul anizotrop al rugozității suprafeței prelucrate prin eroziune electrică, spre deosebire de caracterul direcționat, isotropic al suprafeței prelucrate prin așchiere. Din punct de vedere a formei electrodului – sculă eroziunea electrică cu impulsuri amorsate prin străpungerea interstițiului eroziv se subclasifică în:

- eroziunea electrică cu electrod masiv (eroziunea electrică cu copierea formei electrodului), la care forma finală la nivelul obiectului supus prelucrării se obține prin copierea formei conjugate realizate la nivelul electrodului – sculă. În cazul prelucrărilor fără echipamente suplimentare de generare avansului automat al electrodului – sculă, realizat de subsistemul specific, asigură pătrunderea acestuia în obiectul supus prelucrării prin simpla mișcare de avans rectiliniu. În cazul utilizării echipamentelor suplimentare de generare se menține același

principiu de avans automat peste care se suprapun mișcări suplimentare într-o dependență logică de mișcarea principală de avans;

- eroziunea electrică cu electrod filiform la care electrodul sub formă filiformă cu diametrul mic (sub 0,5 mm) și în mișcare axială, este condus (de regulă prin calculatoare de proces) după un anumit contur. Cum acest contur poate fi programat cu destul de mare ușurință și cu restricții minime el poate avea și forme de complexitate mare, fără a influența parametrii prelucrării.

Din punct de vedere al duratei impulsurilor de curent eroziunea electrică cu impulsuri amorțate prin străpungerea interstițiului eroziv poate fi:

- prelucrarea cu descărcări prin scântee cu durata impulsurilor de curent $t_{ij} = 10^{-4} \dots 10^{-7}$ secunde și coeficient de umplere $K_i < 0,1 \dots 0,2$;
- prelucrarea cu descărcări în arc electric nestaționar, cu durata impulsurilor de curent $t_{ij} = 10^{-1} \dots 10^{-4}$ secunde și coeficient de umplere $K_i > 0,2$, înțelegând prin coeficient de umplere raportul (exprimabil și procentual) dintre durata impulsului de curent și întreaga perioadă a impulsului. Între variantele de prelucrare determinate de durata impulsurilor de curent nu există o demarcație tehnologică netă, în primul caz descărcările în impuls ajungând în stadiul de scântee sau scântee – arc, iar în cel de al doilea caz ele ajungând până în stadiul de arc electric nestaționar.

Prima variantă are o utilizare tehnologică preponderentă la prelucrările de finisare și semifinisare, iar cea de a doua se aplică cu precădere la prelucrările de degroșare. Această variantă a procedurii de prelucrare prin eroziune electrică este la ora actuală varianta care are o utilizare industrială extrem de largă prin dezvoltarea excepțională a sistemului tehnologic de prelucrare. Se poate afirma că astăzi prelucrarea prin eroziune electrică cu impulsuri amorțate prin străpungerea interstițiului eroziv este procedeul neconvențional cu cea mai largă utilizare industrială, reușind prin parametric tehnologici realizați să concureze procedeele tehnologice clasice, chiar la prelucrarea unor obiective încadrabile în cele „normale”. [Nanu A, 2003], [Nanu A, 2004].

2.2.2. Prelucrarea prin eroziune electrică cu impulsuri amorțate prin ruperea unor micro-contacte electrice (eroziunea electrică cu rupere de contact - EERC)

În acest caz descărcările electrice sunt amorțate prin ruperea contactelor electrice parcurse de curent, stabilite temporar între electrodul sculă și obiectul supus prelucrării și între care trebuie să existe o mișcare relativă. Spre deosebire de varianta precedentă la prelucrarea prin EERC este necesară, în mod obligatoriu, exercitarea unei presiuni de contact între cele două obiecte în interacțiune – obiectul supus prelucrării și electrodul sculă, respectiv asigurarea unei mișcări relative între aceste două obiecte.

Această variantă este prezentată în literatura de specialitate ca fiind cea care stă la originea procedurii de prelucrare prin eroziune electrică. Identificată, din punct de vedere teoretic, a efectelor posibile încă din 1770 de cercetătorul englez Priestley, ea este menționată în 1941 de cercetătorii ruși Boris și Natalia Lazarenko, care o aplică efectiv pentru prelevarea de material. La această variantă descărcarea electrică ia naștere prin realizarea periodică a unor micro-contacte electrice care vor fi întrerupte prin mișcările relative între obiectul de prelucrat și cel

de transfer. În urma formării contactelor electrice (efect Joule - Lenz) și apoi a întreruperii lor (arc electric nestaționat) la suprafața obiectului de prelucrat se formează o „pată termică” de cca. 10^{-1} mm² cu o densitate energetică mare (1KW/mm²) care conduce la topiri și /sau vaporizări ale unor microvolumuri de material. Îndepărtarea acestor microvolumuri de material topit se realizează atât datorită componentei mecanice a energiei distructive cât și datorită mișcărilor relative între obiectul supus prelucrării și obiectul de transfer.

Cu toate că, această variantă a stat la baza dezvoltării procedurii de prelucrare prin eroziune electrică și cu toate că se caracterizează prin cantități mari de material îndepărtate în unitatea de timp la suprafața obiectului de prelucrat ea nu a avut o dezvoltare industrială substanțială, determinată, probabil, de starea suprafeței rezultate în urma prelucrării caracterizată prin rugozități ridicate și modificări structurale apreciabile, provocate de microsursele termice foarte intense. Cercetările întreprinse în ultima perioadă au reușit să elimine unele dintre aceste dezavantaje, direcționând aplicarea variantei la prelucrarea materialelor puțin sensibile la acțiunile microsursele termice și la identificarea unor regimuri energetice care să asigure obținerea unor suprafețe cu parametri de rugozitate încadrați în limite admisibile. [Nanu A, 2003], [Nanu A, 2004].

2.3. Fenomene fizice fundamentale la prelucrarea dimensională prin eroziune electrică cu descărcări amorsate prin străpungere

2.3.1. Teorii referitoare la mecanismul fizic de îndepărtare de material la prelucrarea prin eroziune electrică

Prelucrarea materialelor electroconductoare prin eroziune electrică este un fenomen complex, dependent de un număr foarte mare de parametri. Numărul acestora, spațiul foarte mic în care se desfășoară precum și vitezele foarte ridicate a fenomenelor din spațiul de lucru au determinat ca până în prezent să nu existe o teorie unitară a procesului de eroziune electrică.

Se cunosc un număr destul de mare de teorii care încearcă să lămurească fenomenele fundamentale ale eroziunii electrice. În descrierea fenomenelor fizice din spațiul de lucru teoriile cunoscute sunt fie contradictorii, fie se completează reciproc. În general, teoriile asupra proceselor fundamentale din spațiul de lucru se pot clasifica în patru mari categorii:

- teorii care explică mecanismul prelevării de material prin forțe ale câmpului electric;
- teorii care explică mecanismul prelevării de material prin efectul termic al curentului electric;
- teorii care explică mecanismul prelevării de material prin forțe determinate de dilatarea termică a materialelor (teorii termomecanice);
- teorii care explică mecanismul prelevării de material prin efectul cumulat al fenomenelor de natură electrică, termică și mecanică (teorii termoelectrice).

În continuare se prezintă o sinteză a principalelor teorii care explică prelevarea de material prin forțele câmpului electric, prin efectul termic al curentului electric și prin efecte termomecanice. Trebuie subliniat însă, că aceste teorii accentuează importanța anumitor fenomene din interstițiul eroziv, neglijând total

sau parțial contribuția celorlalte fenomene care se desfășoară în spațiul elementar de lucru.

Conform acestor teorii s-au stabilit formule pentru calculul adâncimii craterului, cât și a densității de curent necesară extragerii unei particule. Rezultatele experimentale se suprapun cu suficientă precizie peste cele teoretice până la timpi de impuls de 1000 μ s. Experimentările efectuate cu $t_i > 1000 \mu$ s prezintă abateri substanțiale față de rezultatele teoretice.

O altă teorie care are la bază aceleași forțe de natură electrică a fost dezvoltată de Kurr, Schierholt ș.a. Ei presupun procesul de prelevare defalcat în trei faze, care în esență se caracterizează prin alternarea de efecte Skin cu efecte Pinch. În teoria lor acești cercetători țin totuși cont de topirea și vaporizarea metalului la suprafața electrozilor.

Modele de referință care explică mecanismul fizic de prelevare de material prin intermediul efectului termic al curentului electric

La rândul lor, aceste teorii se pot clasifica și ele în două categorii determinate de modul în care se consideră transformarea energiei electrice în energie termică. [Nanu A, 2003], [Nanu A, 2004],.

A. Îndepărtarea de material datorită efectului Joule-Lenz

Teoria aparține cercetătorilor I. G. Nekrashevich și I. A. Bakuto. Conform acesteia, craterul format la o descărcare este determinat de suprapunerea mai multor cratere elementare. Într-un timp foarte scurt curentul circulă printr-o fracțiune a coloanei de plasmă, rezultând un contact punctiform care se deplasează pe toată secțiunea canalului. Contactul produce cratere elementare de volum V_0 și suprafață S_0 . Densitatea curentului electric depășește 10^7 A/cm². Timpul unui impuls singular este așa de mic încât se poate neglija cantitatea de căldură transmisă masei electrozilor. Tot materialul din crater se topește datorită efectului Joule-Lenz.

B. Prelevarea de material datorită transformării energiei cinetice a sarcinilor electrice în mișcare în energie termică

Majoritatea cercetătorilor îmbrățișează teoria prelevării termice chiar dacă între presupunerile lor există deosebiri. Teoria prelevării de material la prelucrarea prin eroziune electrică, dezvoltată de Zingerman presupune că întreaga energie din canalul descărcării se transmite asupra electrozilor și materialul ajunge în stare topită.

În teoria sa Zingerman nu a ținut cont de energia necesară expulzării materialului din crater și nici de faptul că materialul poate să ajungă și în stare de vapori în zona de contact cu coloana descărcării (experimental este stabilit că pentru topirea a 1 g Cu este necesară o energie de 649 J, iar pentru vaporizarea aceleași cantități 6402 J).

Suprapunerea rezultatelor experimentale obținute de Zingerman peste cele teoretice se datorează mulțimii de factori luați în considerare, factori însă determinați pe cale experimentală. În modelul propus de Van Dijck se presupune că energia din canalul descărcării este utilizată pentru topirea și vaporizarea metalului la suprafața electrozilor, cât și pentru îndepărtarea acestuia din crater. În presupunerile sale, bazate pe un bilanț energetic între anod și catod, el consideră căldura obținută prin efect Joule-Lenz neglijabilă.

Pentru calculul dimensiunilor craterului produs la impactul unui impuls electric Van Dijck se bazează pe ipoteza că marginile craterului coincid cu planul

izoterm corespunzător temperaturii de topire a materialului. Planul izoterm respectiv este determinat la sfârșitul impulsului. Pentru calcule s-a adoptat un model care constă dintr-o sursă circulară care acționează asupra electrozului.

Cercetările efectuate de Zolotîh au arătat că în mecanismul eroziunii electrice principalul rol îl au următoarele procese: procesul de eliberare a energiei la electrod și în interstițiu; procesul nestaționar de dezvoltare superficială a căldurii în electrozi; procese aero- și hidrodinamice în interstițiu; procese termomecanice pe electrozi.

Se stabilește că energia acumulată de electroni, respectiv ioni (5 ... 15 eV) nu este suficientă pentru a pătrunde în structura materialului. Ei cedează energia la suprafața electrozilor, formându-se astfel surse de căldură. Zolotîh arată că sursele de căldură sunt atât de natură superficială, cât și de natură volumică, principalul rol în procesul de eroziune avându-l însă primele.

Complexul fenomenelor eroziunii electrice cuprinde și fenomenele de evacuare a produselor eroziunii. Pentru urmărirea și clarificarea acestora, Zolotîh (ca de altfel și Hockenberry) utilizează aparate de luat vederi cu viteze foarte ridicate, putând constata existența în interstițiu a unei zone gazoase. Se constată că încă din momentul apariției descărcării se formează o „bulă” de gaz având o presiune internă de $10^1 \dots 10^2$ daN/mm². În timp, bula de gaz atinge o dimensiune maximă, presiunea scăzând, ajungând la valori subatmosferice. Acesta este momentul în care începe evacuarea metalului topit din crater.

Problema dinamicii procesului de eroziune electrică a stat și stă în atenția multor cercetători.

În studiile efectuate de Afanasiev se determină importanța deosebită a presiunii asupra procesului de evacuare. Se constată că, pe lângă impulsul termic, suprafața electrozilor este supusă și unui impuls de presiuni determinat de bula de gaz. Impulsul de presiune acționează asupra fazei lichide a produselor eroziunii. Valoarea presiunii este cu atât mai mare cu cât volumul bulei este mai mic. Influența impulsului de presiune asupra îndepărtării metalului topit din crater este cu atât mai favorabilă cu cât presiunea este mai mare (deci bula de gaz mai mică). Se ajunge însă la o valoare critică după care îndepărtarea este îngreunată sau chiar oprită prin redepunerea materialului prelevat pe suprafața electrozului. Presupunerea au fost confirmate de rezultate experimentale obținute cu descărcări singulare în aer și petrol la diferite presiuni.

Dinamica dezvoltării canalului de descărcare a fost studiată și de Zimany. Din filmări cu viteze foarte mari a unei descărcări în impuls dreptunghiular de 100 μ s și 40 A la un interstițiu de 50 μ m în petrol s-a constatat că în faza inițială canalul descărcării se dezvoltă cu viteze mai mari decât viteza sunetului, fenomenul fiind însoțit de unde de șoc. Canalul plasmă se dezvoltă în primele 2 ... 3 μ s cu viteza de cca. 1650 m/s. Presiunea în canal este foarte mare, parte din ea se cedează lichidului care este îndepărtat. Foarte repede presiunea scade la valori subatmosferice, dezvoltarea canalului devine mai lentă (viteze mai mici decât viteza sunetului) și se creează un spațiu între coloana de plasmă și lichid determinat de inerția masei lichidului. După terminarea descărcării, sistemul bulă de gaz-lichid păstrează o mișcare oscilatorie. Aceste oscilații au o influență favorabilă asupra evacuării produselor eroziunii din crater. În același timp însă, oscilațiile influențează negativ coloana plasmă provocând deplasări ale acesteia, fracționări sau chiar ruperi, deci stingeri ale descărcării. [Nanu A, 2003], [Nanu A, 2004].

Modele de referință care explică prelevarea de material prin forțe determinate de dilatarea termică a materialului

Și în acest grup de teorii se întâlnesc mai multe puncte de vedere, care au însă în comun faptul că prin încălzire materialele au dilatări diferențiate, respectiv dinamica dilatărilor este diferită.

Mehlhorn studiază mecanismul evacuării produselor eroziunii din punct de vedere al coeficientului de dilatație termică a materialului.

Metalul topit la un impuls suferă o dilatație termică și își mărește volumul cu ΔV

Direcția dilatării este evident spre exteriorul electrodului. Dacă se consideră diferite volume elementare se constată că acestea parcurg diferite spații deci vor avea și viteze de deplasare diferite (timp constant). Vitezele volumelor elementare nefiind constante în timp vor apare accelerații diferite. Ca urmare a timpului foarte scurt de topire-solidificare a masei de metal și a faptului că volumele elementare prezintă accelerații diferite, apare o forță de inerție F cu efect de extragere a masei de metal.

Teoria termomecanică de îndepărtare de material la suprafața obiectului supus prelucrării prin eroziune electrică elaborată de profesorul român Gheorghe Obaciu are la bază mecanisme asemănătoare cu precedenta teorie prezentată și anume coeficienți de dilatare diferiți. Curentul impulsului I_i parcurge medii diferite, cristale și spații intercristaline, care se caracterizează prin proprietăți electrice, respectiv prin rezistențe electrice diferite. Presupunând încălziri instantanee diferite și având în vedere coeficienții de dilatare diferiți, în zonele de separație a cristalelor se produc tensiuni mecanice interne ridicate. Ca urmare, apar fisuri între cristale în care pătrunde plasma formată în canalul de descărcare și aceasta topește cristalul sau grupul de cristale.

Teoriile altor cercetători, ca Livșit, Konnerth, Schumacher Lazarenko, Albinski, Ganser, De Bruyn ș.a., se încadrează și ele în cele două mari categorii specificate. În Tabelul 2.1. se prezintă sintetic unele mărimi relevante, calculabile ale unora dintre teoriile care încearcă să elucideze mecanismul elementar de îndepărtare de material la prelucrarea prin eroziune electrică. [Nanu A, 2004].

2.3.2. Teoria termoelectrică de prelucrare dimensională prin eroziune electrică

Prelucrarea metalelor prin eroziune electrică se realizează în principal prin transformarea energiei electrice aplicată celor doi electrozi în energie termică. La aplicarea diferenței de potențial U ia naștere un câmp electric intens și se formează canalul ionizat al descărcării. Prin canal, care se poate considera ca fiind format dintr-un mediu de plasmă, se face transportul energetic, cu efect de îndepărtare a unei cantități de material de la suprafața electrozilor și evacuarea acestuia.

La suprafața obiectului de prelucrat are loc o încălzire bruscă a unor porțiuni limitate de metal, ca urmare a transformării energiei cinetice a sarcinilor electrice în mișcare și mai puțin în urma efectului Joule-Lenz prin metal. În funcție de caracteristicile impulsurilor și de constantele termofizice ale sistemului, aceste mici porțiuni pot să ajungă la temperatura de topire sau chiar de vaporizare și sunt expulzate în interstițiu, pe suprafața obiectului formându-se o serie de cratere. Zonele învecinate care nu au fost prelevate sunt afectate de șocul termic, producându-se modificări structurale și fisuri.

Tabelul 2.1. Mărimi relevante ale unora dintre teoriile care încearcă să elucideze mecanismul elementar de îndepărtare de material la prelucrarea prin eroziune electrică.

Teoria	Mărimea calculată	Relația de calcul propuse	Semnificația notațiilor utilizate
Williams	Prelevarea de material la o descărcare singulară	$Q_{wI} = \frac{0,44 \cdot 10^{-6}}{\sigma_a} \cdot i^{3/2} \cdot t_i$	σ_a – tensiune admisibilă; i – curentul descărcării; t_i – durata impulsului.
Nekrashevich și Bakuto	Masa de material erodat	$m = \beta \cdot A \cdot i_d^2 \cdot t_{ii}$ $m = k \cdot I_d^2 \cdot t_{ii}$	β, A – coeficienți ce țin cont de condițiile de prelucrare; i_d, I_d – intensitatea curentului descărcării; t_{ii} – durata impulsului de curent; k – constantă ce depinde de materialul electrodului; f – frecvența impulsurilor; k_{ii} – coeficientul de umplere a impulsurilor de curent
	Productivitate a prelucrării	$Q_w = k \cdot f \cdot I_d^2 \cdot k_{ii}$	
Zingerman	Diametrul craterului	$d = K \cdot P_d \cdot t_{ii} \cdot f(s)$	K – coeficientul dependent de forma impulsului; P_d – puterea medie dezvoltată pe palierul impulsului; t_{ii} – durata impulsului de curent; s – mărimea interstițiului; $f(s)$ – funcție care descrie proprietatea de selectivitate a procesului; L, M și N – constante ce depind de materialul electrozilor și de natura și starea lichidului de lucru.
	Selectivitatea procesului	$f(s) = \frac{L}{s^{M+0,5 \cdot N}}$	
Mehlorn	Forța de extracție	$F = m \cdot \frac{\alpha' \cdot h}{2 \cdot 10^2 \cdot t_{ii}^2}$	m – masa de metal topit; α' – coeficient de dilatație termică; h – adâncimea zonei de metal topit; t_{ii} – durata impulsului de curent.
Termoelectrică	Energia cedată interstițiului	$W_i = U_d \cdot I_d \cdot t_{ii} =$ $= U_d \cdot I_d \cdot k_i \cdot \frac{1}{f}$	U_d – tensiunea descărcării; I_d – intensitatea curentului descărcării; k_i – coeficientul de umplere a impulsurilor; f – frecvența impulsurilor

Din cercetările întreprinse asupra fenomenului intim al eroziunii electrice s-a constatat existența a trei faze:

- faza formării canalului conductor între electrozi;
- faza propriu – zisă de transmitere a energiei și de îndepărtare a materialului prelevat;
- faza evacuării materialului prelevat din canalul descărcării.

Privit prin prisma microsistemului tehnologic de prelucrare fenomenele fizice fundamentale se desfășoară la nivelul celor trei subsisteme elementare: obiectul de prelucrat, electrodul – sculă și interstițiul eroziv. Contribuția celor trei subsisteme elementare la desfășurarea celor trei faze ale mecanismului de îndepărtare de material este diferențiată, având ponderi determinate de diferitele momente ale procesului intim.

Principalele procese fizico-chimice care au loc sub acțiunea descărcării electrice în impuls sunt redată în Fig.2.5.

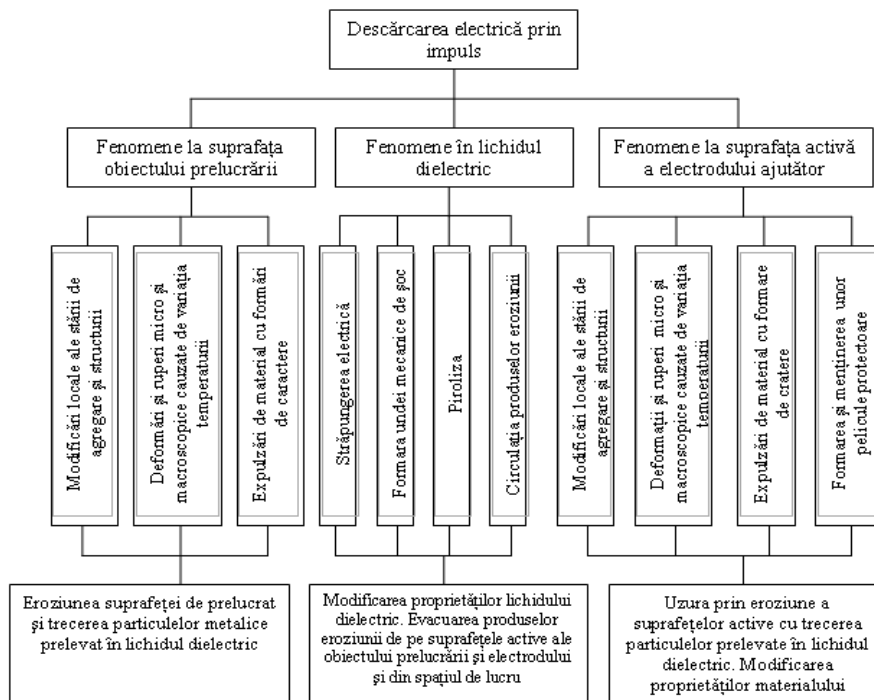


Fig.2.5. Fenomene fizico – chimice caracteristice prelucrării dimensionale prin eroziune electrică.

Faza formării canalului conductor între electrozi [NanuA, 2003], [NanuA, 2004].

Prima fază a descărcării electrice în impuls este determinantă pentru îndepărtarea eficientă a materialului la suprafața obiectului de prelucrat, prin faptul că ea creează condițiile necesare pentru desfășurarea tuturor celorlalte procese elementare. Cu cât această fază se desfășoară mai repede și cu un consum energetic mai mic, cu atât descărcarea electrică în impuls va determina o îndepărtare mai pronunțată de material.

Momentul aplicării la nivelul electrozilor a diferenței de potențial $U[V]$ coincide cu momentul dezvoltării câmpului electric $E[V/m]$ (2.5) și apariția celor trei zone specifice – zona catodică, zona anodică și coloana descărcării (arcului).

$$U = E \cdot \delta \quad (2.5)$$

unde δ reprezintă dimensiunea liniară a interstițiului eroziv [mm].

Dimensiunile foarte mici ale zonelor catodice și anodice determină câmpuri electrice cu intensități ridicate.

Câmpul electric intens al zonei catodice poate imprima unor electroni liberi din zona periferică a metalului catodului energii, care pot depăși energia de legătură a acestora cu rețeaua cristalină. Acumularea acestor energii provoacă mișcări amplificate ale electronilor liberi cu posibilitatea ca ei să părăsească zona catodică și să intre sub influența câmpului electric al coloanei de descărcare, fenomen cunoscut sub denumirea de autoemisie electronică.

Fenomenul extracției de electroni liberi din catod este favorizat de existența micro-neregularităților geometrice ale suprafeței acestuia, în proximitatea cărora câmpul electric are intensități superioare valorii medii din interstițiu.

În spațiul dintre electrozi (echivalent cu coloana descărcării umplut cu lichid dielectric), pot apărea două fenomene determinate de câmpul electric. Primul fenomen constă în apariția emisiei electronice secundare determinată de electronii inițiali emiși de catod, care prin ciocnirea cu atomii existenți în mediul dielectric.

Electronii primari emiși de catod și cei secundari obținuți prin ciocniri se deplasează accelerat spre anod pe traiectorii care urmăresc liniile câmpului electric. În lichid drumul liber mijlociu al electronilor este mic astfel încât aceștia nu reușesc, între două ciocniri succesive cu atomii dielectricului să acumuleze energia cinetică necesară ionizării acestora. Impactul cu moleculele și/sau atomii mediului lichid va avea însă ca efect creșterea locală a temperaturii putându-se ajunge până la punctul de fierbere. În acest fel în dielectric se formează mici volume de vapori. Electronii care se vor deplasa în aceste micro-incinte gazoase vor avea un drum liber mijlociu substanțial mărit putând astfel acumula energii suficiente pentru ionizarea atomilor cu care intră în coliziune. Se admit astfel electroni secundari, terțiari, etc. care, accelerați în câmpul electric vor crea prin ciocniri alți electroni și ioni, procesul dobândind caracter de avalanșă.

Prin aceste mecanisme, de pe suprafața catodului începe să se formeze, în direcția liniilor câmpului electric, un canal filiform, conținând electroni și ioni (Fig.2.6). Aceasta evoluează spre anod, în mod accelerat prin creșterea intensității câmpului electric determinată de creșterea distanței nestrăpunsă l_{ns} . Al doilea fenomen este determinat de proprietățile dielectrice ale moleculelor. Fenomenul de polarizare în câmp electric este propriu tuturor moleculelor și se manifestă fie prin inducție sau deplasare, fie prin orientare.

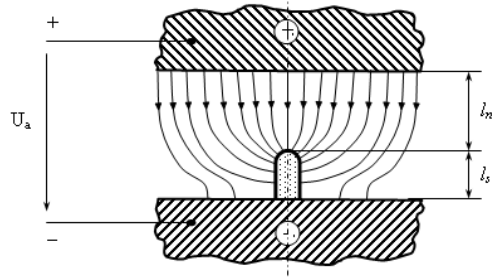


Fig.2.6. Începutul formării canalului filiform.

Dacă moleculele substanței posedă dipoli permanenți, aceștia se orientează sub influența câmpului electric, orientare a cărei intensitate este direct dependentă de câmp. La substanțele nepolare câmpul electric produce o deplasare a sarcinilor pozitive și negative din moleculă în urma căreia molecula devine polară. La intensități suficiente ale câmpului electric dipolul se poate scinda, formându-se atomi, ioni pozitivi și negativi.

În cazul lichidului dielectric real, caracterizat prin existența în suspensie a unor produse ale eroziunii sub formă de micro-particule metalice sau a altor particule solide, interstițiul este divizat în mici zone izolatoare cuprinse între particule conductoare, structură echivalentă unor lanțuri de microcondensatori înseriați între anod și catod. Străpungerea unei astfel de structuri se bazează pe aceleași mecanisme descrise anterior dar mult mai rapid și la intensități medii ale câmpului electric mult inferioare celor necesare străpungerii dielectricilor puri.

În urma acestor fenomene în coloana de descărcare există concomitent electroni, ioni negativi, ioni pozitivi și particule neutre din punct de vedere electric. Între aceste particule elementare au loc neîntrerupt procese de excitare-dezexcitare, ionizare-recombinare, atingându-se la o stare cvasistaționară caracterizată prin temperatură un anumit grad de ionizare și o anumită presiune. Din acest motiv coloana de descărcare poate fi considerată ca fiind formată din plasmă.

În urma acestor fenomene în coloana de descărcare există concomitent electroni, ioni negativi, ioni pozitivi și particule neutre din punct de vedere electric. Între aceste particule elementare au loc neîntrerupt procese de excitare-dezexcitare, ionizare-recombinare, atingându-se la o stare cvasistaționară caracterizată prin temperatură un anumit grad de ionizare și o anumită presiune. Din acest motiv coloana de descărcare poate fi considerată ca fiind formată din plasmă.

Câmpul electric acționează asupra particulelor încărcate electric prin forțe de natură coulombiană, determinând circulația dirijată a acestora în canalul de descărcare. În faza inițială de formare a canalului descărcării (2 ... 3 μ s) mișcarea ionilor pozitivi și negativi este lentă, putându-se neglija. Este evidentă deci existența curentului electronic, întreținut de emisia electronică primară și secundară. Ajungând în zona anodică electronii intră sub influența câmpului anodic, mult mai intens decât cel din coloană și viteza lor crește. La atingerea suprafeței anodului energia cinetică acumulată de electroni este cedată acestuia. Parte din energie contribuie la ionizarea suprafeței periferice a anodului. Cea mai importantă parte se transformă în energie termică, provocând topiri și vaporizări a unor volume elementare din suprafața anodului.

Considerând existența în această fază numai a curentului electronic, liniile de curent determinate de mișcarea electronilor se resping, apărând efectul Skin. Circulația particulelor se face numai în zona periferică, în centrul coloanei începând formarea bulei de gaz cu efecte dinamice asupra procesului.

Faza propriu – zisă de transmitere a energiei și de îndepărtare a materialului prelevat

Aceasta este principala fază a fenomenului de prelucrare prin eroziune electrică. În cadrul ei au loc procese complexe, de diferite naturi, dintre care principalele sunt: procese electrice, termice, dinamice și mecanice.

Procesele electrice sunt determinate de circulația sub influența câmpului electric a particulelor încărcate electric. Începutul acestei faze se poate localiza la câteva microsecunde de la aplicarea impulsului de curent, adică la începerea descărcării cu intensitate de curent constantă.

După formarea canalului de plasmă între electrozi, existența electronilor este asigurată pe de o parte prin diversificarea fenomenului de emisie electronică la suprafața catodului, iar pe de altă parte prin amplificarea emisie secundare, terțiare, etc. prin creșterea volumului gazos al canalului.

În această fază a descărcărilor emisia catodică de electroni este susținută de:

- autoemisia electronică sub acțiunea câmpului electric;
- impactul ionilor pozitivi formați în canalul de plasmă și accelerați spre catod cu eliberarea unor electroni secundari;
- creșterea temperaturii locale a catodului ceea ce conduce pe de o parte la apariția termoemisie electronice care devine preponderentă, iar pe de altă parte „ușurează” condițiile de desfășurare a autoemisie electronice.

Existența certă a acestor purtători de sarcină și condițiile deosebit de particulare, determinate de spațiul foarte redus, de timpii deosebit de scurți de desfășurare a procesului și de imposibilitatea „vizualizării” fenomenelor a condus la necesitatea formulării unor teorii bazate pe efectele „măsurabile” ale lor.

Una dintre teoriile care descrie amply procesele electrice din canalul de descărcare este teoria avalanșelor electronice ale lui Townsend. La baza acestei teorii stă circulația purtătorilor de sarcină electrică într-un canal unic (teoria monocanal) și impactul acestora cu suprafața celor doi electrozi aflați în interacțiune – obiectul prelucrării și electrozidul – sculă. Energia cinetică acumulată de purtătorii de sarcină electrică este cedată electrozilor sub formă de energie distructivă, preponderent de natură termică.

Rămân însă, o serie de aspecte constatate experimental sau pe cale teoretică la care teoria Townsend nu mai este capabilă să ofere lămuriri corespunzătoare. Astfel prin teoria avalanșelor electronice nu se dau explicații suficiente asupra oscilațiilor de înaltă frecvență pe palierul impulsului de tensiune și al impulsului de curent în faza cvasistaționară a descărcării (fenomene înregistrate cu ajutorul oscilografelor), nu se poate motiva satisfăcător efectul de polaritate (efect pregnant la prelucrarea prin eroziune electrică). Alte limitări a teoriei Townsend sunt determinate de imposibilitatea motivării formării unor serii de canale luminoase, filiforme, ramificate aproape haotic, multe dintre ele fiind mai scurte decât distanța dintre electrozi (constatare realizată cu ajutorul descărcărilor singulare), de faptul că timpul de formare al canalului filiform al descărcării este cu câteva ordine de mărime mai mic decât timpul necesar ionilor pozitivi să străbată distanța anod-catod (determinare realizată pe cale teoretică, etc.).

Datorită acestor limitări ale teoriei avalanșelor electronice ale lui Townsend s-au dezvoltat și alte teorii prin care pot fi explicate, mai mult sau mai puțin complet aspectele nelămurite ale mecanismelor elementare care concură la prelucrarea prin eroziune electrică.

O astfel de teorie este teoria multicanal prin care se consideră că descărcarea electrică corespunzătoare unui impuls generează o succesiune rapidă de microcanale de descărcare, fiecare generând o pereche de microcratere pe suprafața electrozilor. Craterelor de eroziune, respectiv de uzare sunt rezultatul efectului cumulat al acestor microdescărcări. Teoria are la bază ipoteza că, în momentul formării unei perechi de microcratere, lungimea microcanalului crește, intensitatea câmpului electric scăzând sub valoarea limită pentru menținerea plasmei în canal. Astfel micro-descărcarea electrică încetează. Ca urmare, tensiunea pe interstițiu eroziv crește, determinând creșterea intensității câmpului electric care determină amorsarea unei noi micro-descărcări în zona învecinată celei precedente, unde distanța dintre electrozi este mai mică iar mediul este favorabil ionizării rapide.

Ipoteza multicanal dă o explicație existenței oscilațiilor de înaltă frecvență pe zonele de palier ale impulsurilor, dar nu poate explica efectul de polaritate.

O teorie mai evoluată care poate lămuri multe aspecte, încă neclare ale mecanismului de formare a descărcării electrice este teoria strimerilor.

La baza acestei teorii stă faptul că ionizarea spațiului de descărcare poate avea loc și datorită fotonilor emiși de avalanșa electronică inițială. Totodată, teoria descărcărilor în gaze admite faptul că la presiuni în ordinul de mărime a presiunii atmosferice, avalanșa electronică inițială are o sarcină spațială proprie așa de mare încât câmpul electric al ei să fie capabil să modifice mult câmpul local existent și prin aceasta să modifice însăși procesele de ionizare din zona respectivă.

Dacă se presupune (teoretic) că toți purtătorii de sarcină negativă se concentrează într-o sferă cu diametrul oarecare, iar purtătorii de sarcină pozitivă realizează același lucru, într-o poziție oarecare din interstițiul respectiv cele două sfere se vor suprapune parțial (Fig.2.7).

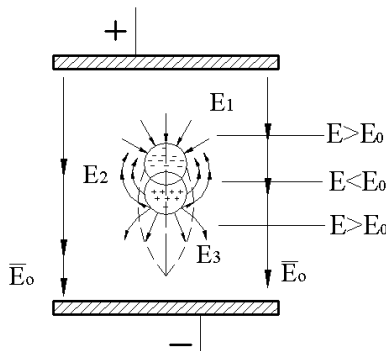


Fig.2.7. Suprapunerea câmpurilor electrice proprii peste câmpul inițial.

Între sfera de electroni și anod, câmpul sferei (E_1) este de același sens cu câmpul electric inițial (E_0) astfel încât câmpul rezultat este mai mare decât câmpul local ($E = E_0 + E_1$). Situația este similară la nivelul sferei de ioni care creează propriul câmp electric E_3 . Câmpul rezultat este și aici mai mare decât cel local ($E = E_0 + E_3$)

Câmpul electric rezultat dintre cele două sfere este mai mic decât cel inițial deoarece câmpul propriu (E_2) are sens contrar cu câmpul electric local ($E = E_0 - E_2$). Creșterea locală a câmpului electric conduce pe de o parte la creșterea vitezei de deplasare a sarcinilor iar pe de altă parte la creșterea concentrației sarcinilor în capul avalanșei.

Se admite că la populații mari de purtători de sarcină se emit fotoni energici în număr destul de mare. În acest fel în gazul din jurul avalanșei se creează (prin efect fotoelectric), noi electroni și ioni cu rol important în dezvoltarea avalanșei.

Cum direcția de propagare a fotonilor nu trebuie să coincidă cu direcția liniilor câmpului electric este posibilă apariția ramificațiilor, avalanșe secundare. Deoarece însă avalanșa principală poate absorbi unele avalanșe secundare se poate ajunge la o amplificare și mai accentuată a sarcinii spațiale. Gazul devine superionizat și este capabil să emită și mai mulți fotoni energici care creează noi avalanșe și strimerul se dezvoltă rapid (Fig.2.8).

Viteza de propagare a strimerilor, acceptată la valori foarte mari (10^5 m/s) este mult mai mare decât viteza de deplasare a particulelor electrice în avalanșele

simple Townsend din cauza „avansului” creat de fotoni care au viteza luminii. Acești fotoni favorizează și mecanismul străpungerii nefiind obligatorie existența electronilor primari la catod, deci străpungerea nu este condiționată de proprietățile materialului din care este confecționat catodul și nici de starea suprafeței lui.

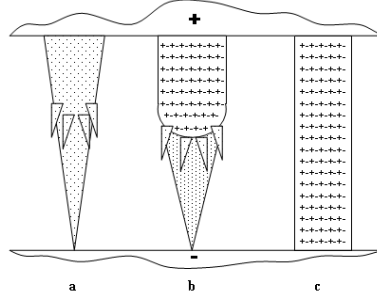


Fig.2.8. Formarea strimerilor.

Ca urmare a apariției strimerilor și după direcții diferite de cele ale liniilor de câmp electric aspectul descărcării este cel al unui fascicul de fire subțiri, strălucitoare, nestaționare și având o mișcare în zig-zag. Aceste canale de gaz ionizat au, în general, o viață mai scurtă decât descărcarea în ansamblu, ele putând apărea și reapărea haotic, plecând fie de la electrozi, fie de la oricare punct al interstițiului eroziv. De multe ori unele fire nici nu ajung la suprafața electrozilor ci se sfârșesc brusc într-un punct oarecare (situație specifică descărcărilor de foarte scurtă durată). [NanuA, 2003], [NanuA, 2004].

Existența acestor ramificații ale descărcărilor au putut fi evidențiate prin utilizarea descărcărilor singulare. Pe suprafața obiectului supus acțiunii unei singure descărcări electrice în impuls de durată scurtă ($20 \mu\text{s}$) s-au putut identifica mai multe microcratere având o arie de răspândire destul de mică (Fig.2.9).

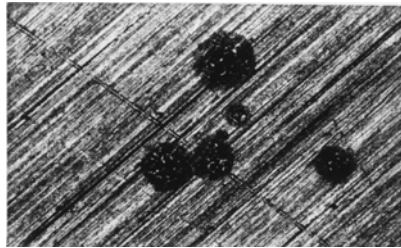


Fig.2.9. Microcratere formate la o descărcare singulară de scurtă durată ($20 \mu\text{s}$).

În cazul în care descărcarea singulară a fost de lungă durată ($500 \mu\text{s}$) numărul descărcărilor ramificate poate crește ajungându-se chiar la suprapunerea efectelor lor, imaginea finală la suprafața obiectului supus prelucrării fiind reprezentată de o microsuprafață cu contururi neregulate și material resolidificat cu o repartiție oarecare (Fig.2.10).

Prin această teorie se pot explica principalele mecanisme care determină îndepărtarea de material prin eroziune electrică atât la suprafața obiectului supus prelucrării cât și la suprafața electrodului-sculă. Ea poate da explicații satisfăcătoare și pentru unele fenomene conexe cum ar fi efectul de polaritate.



Fig.2.10. Suprafața formată de acțiunea unei descărcări singulare de lungă durată (500 μ s).

Propagarea strimerului anodic se datorează atât accelerării electronilor în câmpul electric amplificat dintre capul avalanșei primare și anod cât și generării de avalanșe secundare prin fotoionizări în fața avalanșei. Aceste fenomene se desfășoară cu viteze mult mărite față de deplasarea purtătorilor de sarcină din canalul de descărcare exclusiv sub acțiunea forțelor coulombiene. Concomitent este acceptat faptul că viteza strimerului pozitiv este aproximativ egală cu cea a strimerului negativ. În aceste condiții duratele de parcurgere a interstițiului eroziv de către cele două categorii de purtători de sarcină coincid. Acțiunea lor asupra suprafeței electrozilor va fi determinată, în aceste condiții, doar de parametrii de mișcare induși purtătorilor de sarcină de către câmpul electric inițial.

Modelul de descărcare multicanal cu evoluția avalanșă-strimer explică cu suficiente detalii toate amănunțele mecanismului fizic al prelucrării prin eroziune electrică dar deoarece el nu este pe deplin justificat științific de către fizicieni nici măcar în domeniul macrodescărcărilor el trebuie încă acceptat cu rezervă.

Procesele termice sunt determinate de cedarea bruscă a energiei cinetice a sarcinilor electrice în mișcare la impactul cu suprafețele obiectului de prelucrat și a electrodului sculă. Funcție de valoarea acestor energii, îndepărtarea de material poate avea loc sub formă de: topire lentă sau violentă (rapidă), vaporizare liniștită sau rapidă, sau prin topire și vaporizare.

Procesele termice provoacă diferite efecte în sistem, dintre care principalele sunt: efectul de îndepărtare de material la suprafața electrozilor, efecte chimice de piroliză a lichidului dielectric și influențarea termică a zonei periferice a electrozilor. Fiecare descărcare, respectiv ramificație a descărcării care ajunge pe suprafața electrozilor determină transformările de fază descrise anterior și datorită efectelor dinamice și mecanice care însoțesc descărcarea electrică din interstițiul eroziv în zona de impact se formează un crater eroziv definit prin raza r și adâncimea h (Fig.2.11). Și în realitate craterele au forme apropiate de cea circulară (fig.2.12.a) unde se poate remarca existența materialului topit resolidificat care, datorită martensitei fine formată are, ca urmare a atacului metalografic o nuanță foarte deschisă.

Se remarcă repartiția uniformă la periferia craterului a stratului alb ceea ce denotă acțiuni dinamice și inexistența unor perturbații în imediata apropiere. Lipsa acestor perturbații este însă o excepție, deoarece în interstițiul eroziv se localizează o multitudine de fenomene care în mod normal se pot influența reciproc. Un astfel de crater cu repartiția neuniformă a stratului alb se prezintă în Fig.2.12.b.

Se remarcă o deplasare a materialului resolidificat spre axa centrală a craterului, fapt determinat de acțiuni exterioare descărcării electrice care a

determinat formarea craterului (descărcări electrice concomitente în imediata apropiere, particule în mișcare ș.a.).

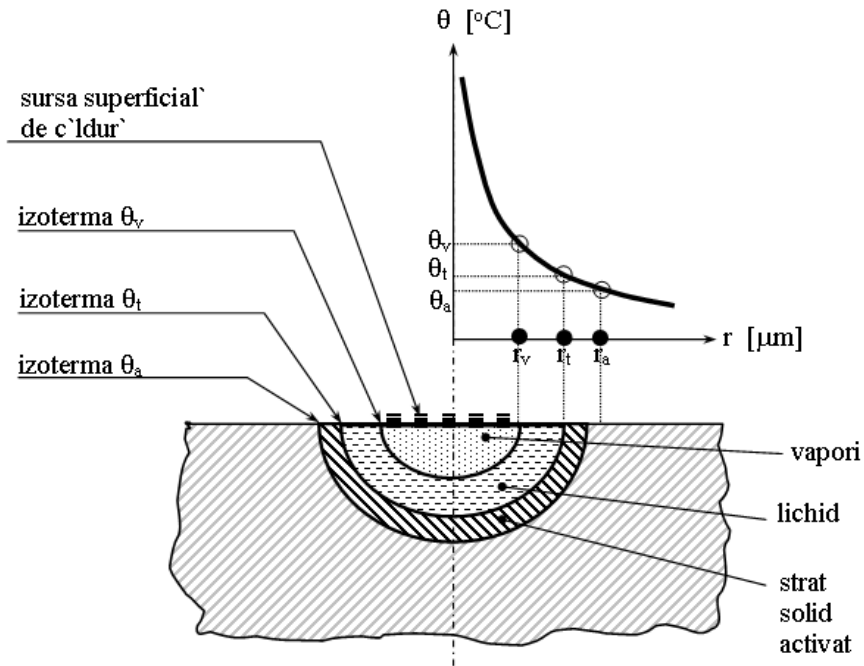


Fig.2.11. Forma ideală ($r=h$) a craterului la o descărcare singulară și curba calitativă de variație a căldurii cu raza r , VM – vapori de metal, MT – metal topit, SMT – strat modificat termic.

Dacă în timpul resolidificării materialului topit și neevacuat unele particule care se deplasează haotic în interstițiul eroziv ajung în contact cu craterul pot să fie înglobate mai mult sau mai puțin în masa stratului alb (Fig.2.12.c și d).

Multitudinea de impulsuri care se dezvoltă în interstițiul eroziv formează pe suprafața electrozilor o mulțime de craterule și astfel zona prelucrată prin eroziune electrică prezintă un aspect mat, cu toate că rugozitatea poate fi foarte bună, fiind caracterizată printr-un izotropism pronunțat.

În timpul procesului eroziv temperaturile ridicate ale descărcărilor provoacă modificări structurale ale stratului de suprafață.

Transformările structurale care se produc se datorează pe de o parte efectului termic al descărcărilor prin scânteie iar pe de altă parte efectului de răcire rapidă datorită contactului cu lichidul dielectric. Grosimea zonei în care apar transformări structurale depinde în principal de compoziția chimică a materialului ce se prelucra și de energia și durata impulsurilor de curent (grosimea zonei respective crește la mărirea energiei și a duratei impulsurilor). Natura transformărilor structurale depinde de distribuția câmpului termic pe secțiune, de compoziția chimică și de starea structurală a materialului supus prelucrării.

În Fig.2.13 se prezintă distribuția câmpului termic și structura metalografică a zonei influențate termic pentru un oțel cu cca. 0,5% C, la sfârșitul perioadei de

încălzire (a) respectiv la sfârșitul perioadei de răcire (b). [NanuA, 2003], [NanuA, 2004].

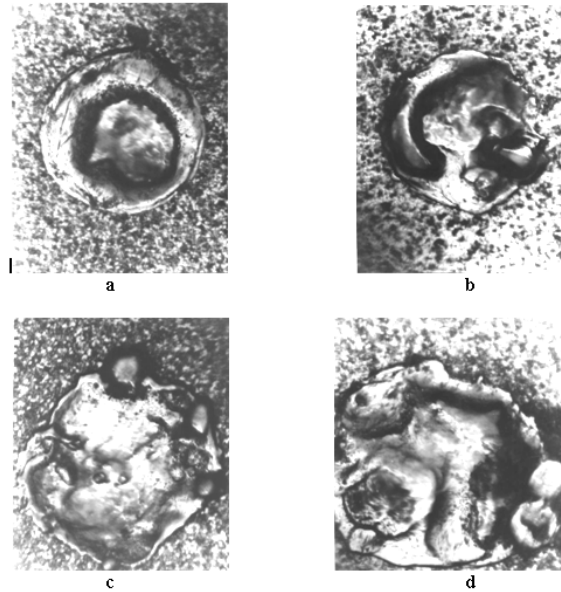


Fig.2.12. Cratere pe suprafața obiectului supus prelucrării . a - forma circulară cu strat alb repartizat uniform; b - formă circulară cu strat alb repartizat neuniform c, d - forme cvasicirculare.

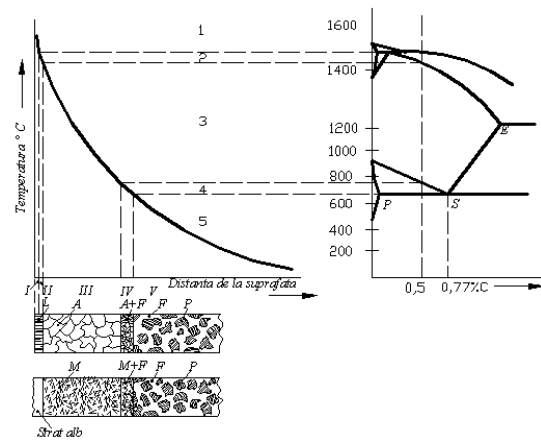


Fig.2.13. Câmpul termic și structura zonei influențate termic la prelucrarea prin eroziune electrică.

În esență, se constată existența a trei zone (straturi):

- stratul alb cu structură preponderent martensitică și cu aspect foarte deschis la culoare, datorită rezistenței mari la atacul metalografic. El este format în esență de materialul topit și neevacuat;

- substratul alb cu structură în care se găsește martensită, austenită reziduală, cementită preeutectoidă și ferită;
- materialul de bază încălzit sub temperaturile care să determine transformări, unde pot fi identificate eventuale recrystalizări parțiale, astfel că structura și caracteristicile mecanice inițiale ale materialului rămân practic neschimbate.

Grosimea zonei influențată termic (ZIT) este determinată de condițiile energetice ale descărcării electrice în impuls și de starea de impurificare a lichidului dielectric din interstițiul eroziv (Fig.1.14).

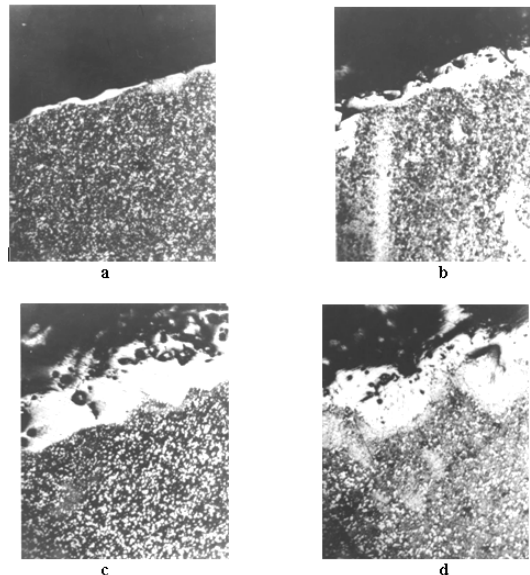


Fig.2.14. Zona influențată termic la suprafața OP. a – strat alb continuu îngust, b – strat alb cu sufluri, c, d – strat alb cu incluziuni și sufluri.

Sursele de căldură de mare intensitate de la suprafața electrozilor conduc la o solicitare elastic-plastică a materialelor. Solicitățile pot determina tensiuni interne suficiente de intense și chiar microfisuri (Fig.1.15). La formarea microfisurilor s-a constatat existența a două faze. Prima fază se caracterizează prin faptul că energia contribuie la formarea rupturii în locuri cu concentratori de tensiune inițiali. Faza a doua apare când există un surplus de energie, față de cea din faza întâi transformată în zona rupturii în energie potențială. Diferența de energie susmenționată se va transforma în energie cinetică și faza a doua de formare a microfisurilor devine dinamică.

Încercările de localizare temporară a formării microfisurilor au condus la concluzii pertinente care evidențiază suprapunerea fazei cvasistaționare a ruperii cu faza de transmitere propriu-zisă a energiei prin canalul de descărcare deja format. Pentru faza dinamică a ruperii și deci formarea microfisurii, momentul inițial se localizează după atingerea maximumului stării de tensiune și a absorbției energiei specifice de rupere a suprafeței, care poate fi admis la sfârșitul fazei de evacuare a produselor eroziunii. Formarea microfisurilor poate însă continua și se acceptă că este definitiv încheiată după o durată de cca. 10ti de la întreruperea impulsului de curent.

Mecanismul de formare a microfisurilor este ușurat de existența la suprafața obiectului supus prelucrării sau în stratul imediat învecinat cu grosimea comparabilă cu adâncimea substratului alb a unor defecte cum ar fi sufluri, incluziuni sau chir microfisuri.

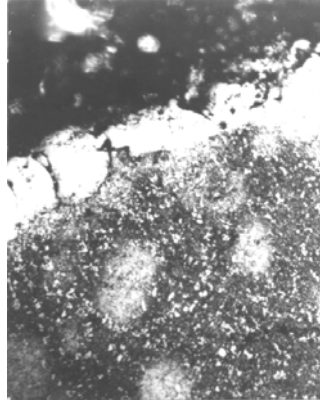


Fig.2.15. Zona influențată termic la suprafața OP. a – strat alb continuu îngust, b – strat alb cu sufluri, c, d – strat alb cu incluziuni și sufluri.

După cum s-a arătat, procesele termice au rolul determinant în prelevarea de material. Rezultă deci că prelucrabilitatea diferitelor materiale poate fi caracterizată prin proprietățile lor termo-fizice. În acest scop se poate utiliza criteriul de proporționalitate a timpului de topire a unui volum de metal la celelalte condiții de prelucrare constante (criteriul lui Palatnik).

$$\tau = c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \theta^2 \quad (2.6)$$

în care: c este căldura specifică; ρ - densitatea; λ - coeficientul de conductivitate termică; θ - temperatura absolută de topire.

Prelucrabilitatea prin eroziune electrică a unui material este invers proporțională cu criteriul lui Palatnik.

Acest criteriu de stabilire a prelucrabilității prin eroziune electrică nu este singurul prin care s-a încercat evaluarea acestei caracteristici tehnologice. Și celelalte criterii formulate țin cont de proprietățile tehnice ale materialului, de conductivitatea electrică și de comportarea mecanică, dar prezintă forme mai greoaie în utilizare.

Procesele chimice sunt determinate de canalul descărcării aflat la o temperatură înaltă, care provoacă la suprafața de contact cu lichidul dielectric piroliza acestuia. În urma pirolizei se produc gaze care conțin 60 ... 70% H_2 și 15 ... 25% acetilenă, restul fiind formate din hidrocarburi parafinoase, olefine inferioare etc.

Reacțiile chimice consumă cca 4 ... 15% din energia repartizată canalului descărcării. Substanțele asfalto-rășinoase ale pirolizei se pot depune pe particulele de metal dispersate în mediul lichid. Produsele gazoase se ridică la suprafață datorită forțelor ascensionale. Produsele pirolizei pot avea o influență favorabilă la formarea stratului protector al electrodului. Stratul protector având la bază grafit cristalizat acționează în sens invers eroziunii, contribuind la durabilitatea sculei. Formarea stratului este condiționat de trei factori:

- temperatura porțiunii corespunzătoare de electrod trebuie să fie mai mică decât temperatura formării peliculei (cca 700°C);

- în zona considerată a electrodului trebuie să existe în cantități suficiente produsele pirolizei;
- trebuie să se dispună de timp suficient pentru ca pe porțiunea considerată să se poată depune pelicula de grosime suficientă.

Procesul pirolizei are o influență favorabilă și asupra amorsării descărcării, prin produsele ce se formează, măbind numărul de molecule polare sau nepolare din interstițiu.

Procesele dinamice sunt determinate în special de temperatura înaltă a canalului de descărcare. Piroliza provoacă apariția unui mediu gazos cu coeficient de dilatare termică superior mediului lichid. Acest fapt conduce la deplasarea coloanei de lichid din vecinătatea coloanei de descărcare spre diametre mai mari, într-un interval de timp extrem de scurt. Pe de altă parte, efectele electrice (dimensionale) ale descărcării (Skin-Pinch) provoacă dilatări și constrângeri ale coloanei de descărcare, care la rândul lor provoacă deplasări ale mediului dielectric. Timpii extrem de scurți în care se desfășoară aceste procese fac să apară o situație apropiată de explozie, apărând unde de șoc.

Pe de altă parte, datorită gradientilor mari de temperatură și a timpului scurt al desfășurării procesului de piroliză, proces insolit de formarea unei cantități mari de gaze sub presiune, se creează o situație apropiată de explozie. În acest mod, acțiunea termică a descărcării electrice asupra lichidului dielectric determină apariția unui salt brusc de presiune, care se propagă cu viteză mare în interstițiu. Se formează astfel unda de șoc mecanică, a cărui centru este canalul ionizat al descărcării și care antrenează în mișcare produsele solide și gazoase ale eroziunii.

Unda de șoc poate fi provocată și de descărcările accidentale. Acestea au efecte negative asupra prelucrării, consumând energie fără a produce prelevare sau degradând suprafața electrozilor (Fig.2.16).

Descărcarea normală (Fig.2.16.a) are loc la valori ale interstițiului

$$s = \frac{U}{E_s} \quad (2.7)$$

în care: s este valoarea interstițiului; U - tensiunea aplicată celor doi electrozi; E_s - rigiditatea dielectrică a mediului din interstițiu. Energia descărcării va provoca prelevarea la suprafața obiectului prelucrării și unda de șoc care îndepărtează produsele eroziunii din interstițiu.

Descărcarea în gol are loc la valori ale interstițiului:

$$s > \frac{U}{E_s} \quad (2.8)$$

Acestea nu provoacă prelevare, consumând însă energie datorită faptului că valoarea curentului nu este nulă existând o anumită circulație de particule. Undele de șoc provocate sunt neglijabile. Descărcarea fictivă are loc între particulele gazoase sau solide încărcate electric (Fig.2.17).

Considerând două particule G_1 și G_2 , încărcate la potențialele V_1 și V_2 și care se află la distanța d , descărcarea electrică va apărea când este satisfăcută inegalitatea:

$$\frac{V_1 - V_2}{d} = E_{12} \geq E_s \quad (2.9)$$

Acestea consumă energie electrică, datorită existenței unui curent care însă are valori mai mici decât curentul electric normal. Unda de șoc influențează mișcarea particulelor în interstițiu.

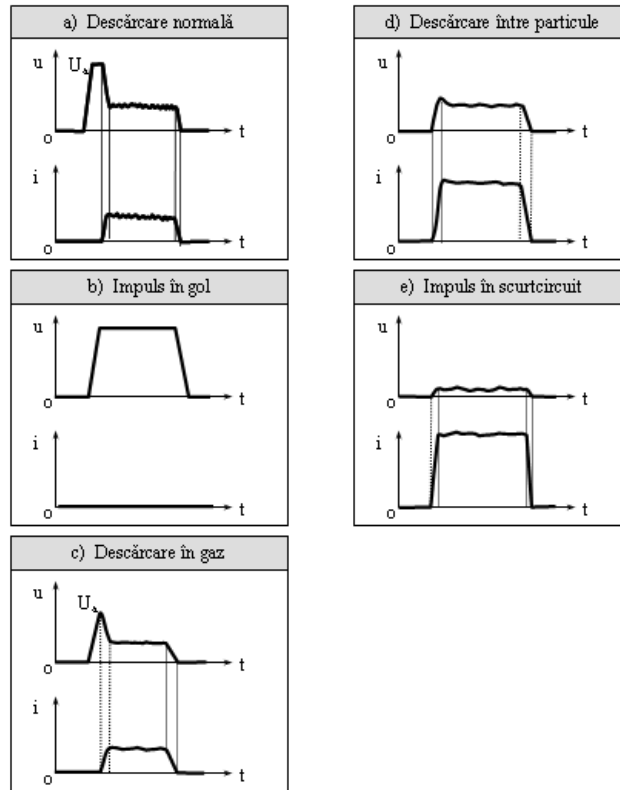


Fig.2.16. Tipuri de descărcări.

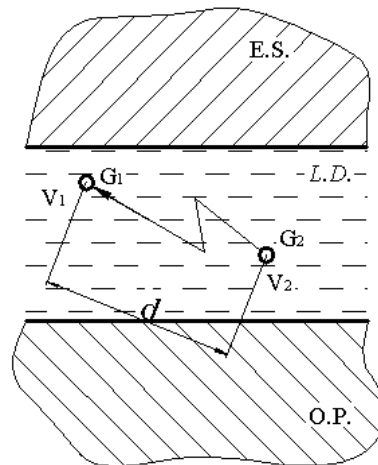


Fig.2.17. Descărcare fictivă între două particule gazoase sau solide din interstițiu.

Descărcarea în scurtcircuit are loc fie în cazul în care mărimea interstițiului este nulă, fie în cazul în care în interstițiu apar aglomerări de particule prelevate dar neîndepărate (Fig.2.18). Descărcarea se transformă în arc staționar, valoarea curentului depășind mult valoarea necesară prelucrării. Teoretic se poate considera $U \approx 0$. Datorită acestor descărcări pe suprafața electrozilor apar arsuri, transformări structurale și fisuri de nedorit. Unda de șoc este neglijabilă, datorită absenței situației explozive.

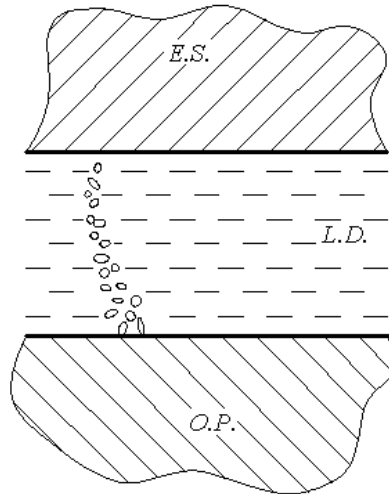


Fig.2.18. Apariția scurtcircuitului între electrod și obiectul prelucrării datorită aglomerării de particule prelevate și neîndepărate din interstițiu.

Repartiția statistică a locului de amorsare (deci și a locului de apariție a undei de șoc), precum și interferența acțiunilor diferitelor unde de șoc determină un caracter dezordonat mișcării produselor eroziunii în interstițiu. Aceste mișcări au totuși o direcție predominantă și anume, direcția în care rezistența hidraulică este minimă - deci spre ieșirea din interstițiu.

Deplasarea unei particule este caracterizată prin mărimea deplasării libere a ei, l_m , înțelegând prin aceasta distanța medie la care se poate deplasa sub acțiunea undei de șoc, fără a se ciocni cu o altă particulă (Fig.2.19).

Se pot considera două situații limită:

$$l_m > R_e \quad (2.10)$$

și

$$l_m \leq R_e \quad (2.11)$$

Dacă este îndeplinită relația (2.10), evacuarea produselor eroziunii decurge în bune condiții, interstițiul neaglomerându-se cu impurități. În cazul în care este îndeplinită relația (2.11), particulele nu pot părăsi interstițiul creând aglomerări care conduc la descărcări fictive sau chiar la descărcări în scurtcircuit.

Evacuarea este ușurată și de forțele ascensionale.

Pentru ca procesul de prelevare să fie stabil, este necesar ca volumul de produse ale eroziunii, transportat sub acțiunea undelor de șoc în afara interstițiului într-un anumit timp, să fie egal cu volumul de produse ale eroziunii care rezultă în timpul respectiv. În caz contrar, procesul decurge instabil, având loc periodic

aglomerări de produse și scurtcircuitări ale electrozilor. Produsele lichide sau dizolvate ale pirolizei se deplasează împreună cu lichidul de lucru, formând un tot cu acesta și schimbându-i treptat proprietățile.

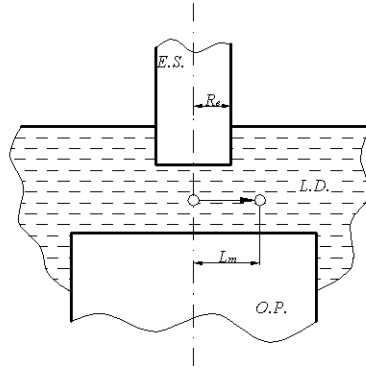


Fig.2.19. Apariția scurtcircuitului între electrod și obiectul prelucrării datorită aglomerației de particule prelevate și neîndepărtate din interstițiu.

Din studiile efectuate asupra desfășurării undelor de șoc se constată că ele își au originea în axa canalului de descărcare și se dezvoltă cu viteză supersonică spre exterior. În timp, unda de șoc pierde din intensitate. Canalul descărcării se găsește astfel mult timp într-un mediu gazos a cărui presiune descrește de la câteva atmosfere la valori subatmosferice.

Undele de șoc, care în apropierea canalului (câțiva mm) ating viteze supersonice, determină mișcări ale lichidului din imediata apropiere a canalului, mișcări care în faza inițială sunt turbulente, devenind însă în timp laminare. Pe măsură ce se îndepărtează de canalul descărcării undele de șoc se transformă în unde acustice. În mișcarea lor undele de șoc pot antrena fie particule existente în interstițiu de la descărcările anterioare, fie particule noi. Din acest punct de vedere undele de șoc pot fi de două feluri: unde de prelevare și unde de evacuare.

Cele prezentate determină concluzia că procesele dinamice ale descărcării sunt de importanță majoră, ele creând premisele unei evacuări naturale bune ale produselor eroziunii din interstițiu, deci contribuie la revenirea la condițiile inițiale în interstițiu. Se poate conchide că în timpul prelucrării este absolut necesară pauza dintre impulsuri, în timpul căreia se dezvoltă procesele dinamice cu efect de îndepărtare a produselor eroziunii din interstițiu.

Procesele mecanice sunt efecte ale încălzirii înalte, locale a suprafeței electrozilor, cât și a undelor de șoc din interstițiu.

Procesele mecanice ca efecte ale încălzirii înalte locale a suprafeței electrozilor sunt: formarea zonelor cu modificări structurale; formarea microfisurilor, expulzarea de material datorită forțelor de inerție ale masei de metal topit din crater și formarea particulelor de material îndepărtat la contactul topiturii expulzate din crater cu lichidul dielectric rece, la contactul cu alte particule existente în interstițiul eroziv sau cu suprafețele celor doi electrozi aflați în interacțiune. Primele două au fost descrise în cadrul proceselor termice.

Cercetările experimentale efectuate arată că diametrul particulelor este o mărime dependentă pe de o parte de materialul din care este confecționat obiectul supus prelucrării (sau a electrodului-sculă) și pe de altă parte, după cum s-a mai arătat de nivelul energetic al descărcării. În Fig.2.20 se prezintă mărimea

particulelor prelevate din 3 materiale (oțel C120, aliaje dure sintetizate K10 și P30). Se constată că, pentru toate regimurile energetice utilizate dimensiunile maxime ale particulelor sunt puternic influențate de proprietățile termo-fizice ale materialului fiind mai mari la prelucrarea oțelului C120 (φ până la 80 μm) și mai mici la prelucrarea aliajelor dure sintetizate (φ până la 50 μm pentru K10 și φ până la 25 μm pentru P30). În cazul dimensiunilor minime valorile diametrelor sunt apropiate fapt determinat de existența impulsurilor de fărâmițare (mărunțire). Tot datorită acțiunii impulsurilor de fărâmițare apare o deplasare a valorii medii a diametrelor spre valorile mici.

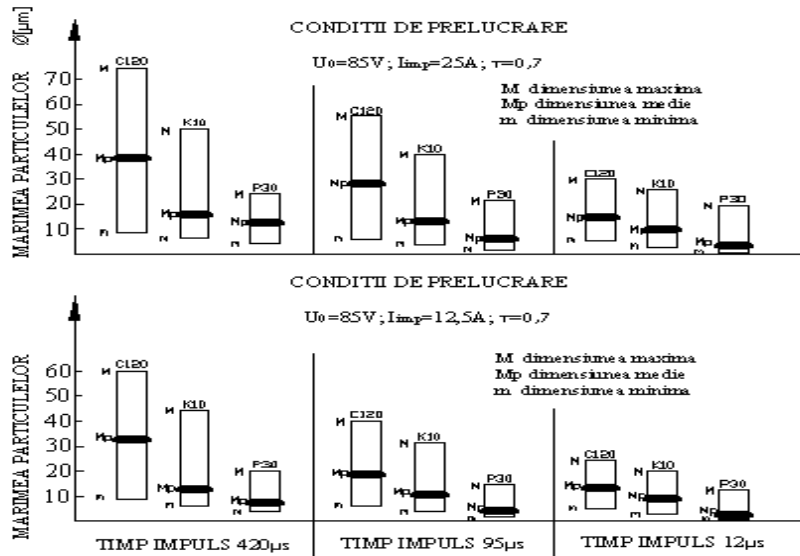


Fig.2.20. Diametrul particulelor determinate experimental.

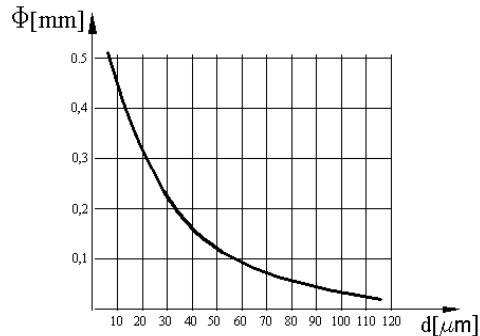


Fig.2.21. Distribuția distanțelor de expulzare a particulelor din crater.

Din punct de vedere a formei s-a observat că forma sferică este majoritară dar există și particule cu forme care se abat, mai mult sau mai puțin de la sfericitate, fiind chiar de formă poligonală. Aceste forme sunt determinate de răcirea foarte rapidă a materialului expulzat sub formă topită din cratere (formă sferică) și de întâlnirea în timpul solidificării a unor obstacole (particule, pereții obiectului

prelucrării sau electrodului-sculă, etc.) sau de depunerea în timpul solidificării a unor materiale aflate în suspensie în dielectricul din interstițiul eroziv.

Volumul de particule expulzate din crater se distribuie în jurul acestuia după o lege logaritmică normală. În Fig.2.21 se prezintă distribuția distanțelor de expulzare a particulelor pentru o energie a descărcării de 4,32 J.

Pentru cazul studiat, distanța medie statistică de expulzare a particulelor din crater este 13,8 mm, iar distanța maximă cca 35 mm. Mișcarea de deplasare a particulelor sub acțiunea undelor de șoc au direcția predominantă spre medii cu rezistență hidraulică minimă, deci spre exteriorul interstițiului.

Faza evacuării materialului prelevat din interstițiul de lucru

Ultima fază a fenomenului eroziv este localizată la sfârșitul descărcării. Curentul prezintă din nou o variație pronunțată, liniile de curent prezentând tendința de respingere (efect Skin). Canalul de descărcare își mărește diametrul și presiunea din interiorul său scade. În această fază canalul de descărcare explodează și undele de șoc devin foarte puternice. Procesul mecanic de evacuare a produselor eroziunii capătă un ritm intens, continuând și după stingerea descărcării. Vâscozitatea lichidului dielectric are o importanță deosebită la evacuarea particulelor. Ea prezintă valoare optimă când numărul de particule captate este maxim. Spațiul dintre electrozi este umplut cu particule încărcate electric și este necesar un timp pentru ca procesul de deionizare să aibă loc. În caz contrar ar putea apare o descărcare staționară, ceea ce conduce la distrugerea electrozilor.

Evacuarea particulelor are loc pe cale naturală sub acțiunea proceselor dinamice care însoțesc descărcarea electrică în impuls. Dar, această evacuare nu este totdeauna suficientă, fiind necesare și evacuări forțate. Acestea se realizează pe cale artificială prin intermediul sistemului tehnologic. În Fig.2.22 sunt prezentate sintetic modalitățile de evacuare artificială a produselor eroziunii din interstițiul eroziv, care se aplică în mod curent la prelucrarea prin eroziune electrică.

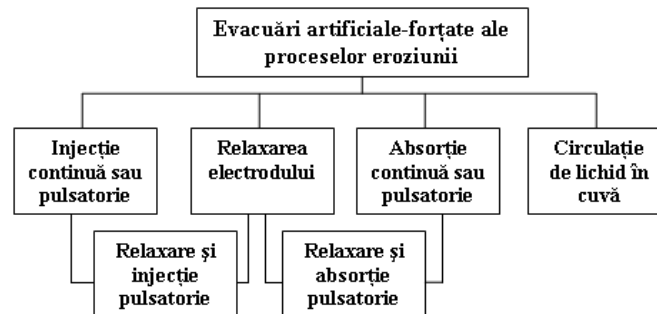


Fig.2.22. Evacuări artificiale ale produselor eroziunii.

Se constată că la marginea craterului se formează, pentru anumite energii, refulări de material (Fig.2.23). [Oprean, 1985], [Nanu A, 2003], [Nanu A, 2004].

Refulările pot apare ca urmare a efectului Skin din această fază a descărcării. Densitatea de curent concentrându-se în pereții cilindrici ai canalului de descărcare influențează numai zona periferică a craterului. Timpul foarte scurt de acțiune a acestor curenți poate conduce la deformări elasto-plastice la marginea craterului, fără a avea însă timp de încălzire până la temperaturi de topire sau vaporizare. Răcirea bruscă determină solidificarea zonei circulare de la marginea craterului și se formează zona refulată.

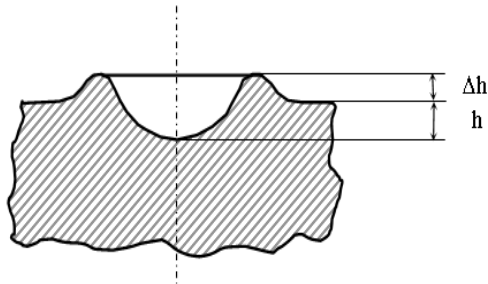


Fig.2.23. Zona refulată la marginea craterului.

Înălțimea zonei de refulare depinde exponențial de energia descărcării.

Forțele din canalul de descărcare produc forțe de reacțiune, care având originea la baza craterului pot depăși cu câteva unități forțele din proces.

În afara fenomenelor și proceselor descrise în cazul prelucrării prin eroziune electrică pot fi prezente și altele.

În general, se poate constata că procesul de prelucrare prin eroziune electrică este un complex de multe fenomene particulare într-o strictă dependență, dintre care însă fenomenul termic este preponderent.

Complexitatea fenomenelor eroziunii electrice crește prin suprapunerea efectelor numărului mare de descărcări în unitatea de timp dintre cei doi electrozi. [Oprean, 1985], [NanuA, 2004].

2.4. Sistemul tehnologic de prelucrare prin eroziune electrică cu fir

Evoluție deosebit de ascendentă, încă de la primele utilizări în anul 1969 și până în prezent. Se poate sublinia, în special domeniul de prelucrare a ștanțelor, care, fără a exagera poate fi considerat revoluționat prin acest procedeu tehnologic de prelucrare.

Modelul structural tehnologic specific prelucrării prin eroziune electrică cu electrod filiform se prezintă în Fig.2.24, unde sunt evidențiate principalele subsisteme din componența acestor sisteme tehnologice.

Deosebirea principială între eroziunea electrică cu electrod masiv și cea cu electrod filiform constă în modul de generare a suprafețelor și adecvat acestuia forma constructivă a electrodului-sculă.

Prelucrarea prin eroziune electrică cu electrod filiform este caracterizată de utilizarea unui electrod-sculă sub forma unui fir din materia cu conductivitate electrică ridicată, care se deplasează axial ghidat și tensionat între două brațe de susținere. Piesa de prelucrat se prinde în consolă între cele două brațe de susținere a electrodului filiform, astfel încât brațul inferior să poată avea acces sub piesă (Fig.2.25).

Pe parcursul prelucrării electrodul filiform definește o dreaptă (d), la nivelul unui segment de dreaptă cuprins între ghidajele montate pe brațele de susținere. Piesa de prelucrat se poziționează în raport cu un plan de așezare (P) paralel cu masa de lucru a utilajului. Dreapta (d) constituie curba generatoare, iar în planul (P) se definește curba directoare, care se urmărește prin deplasarea programată a electrodului filiform în raport cu două direcții reciproc perpendiculare din același plan (P).

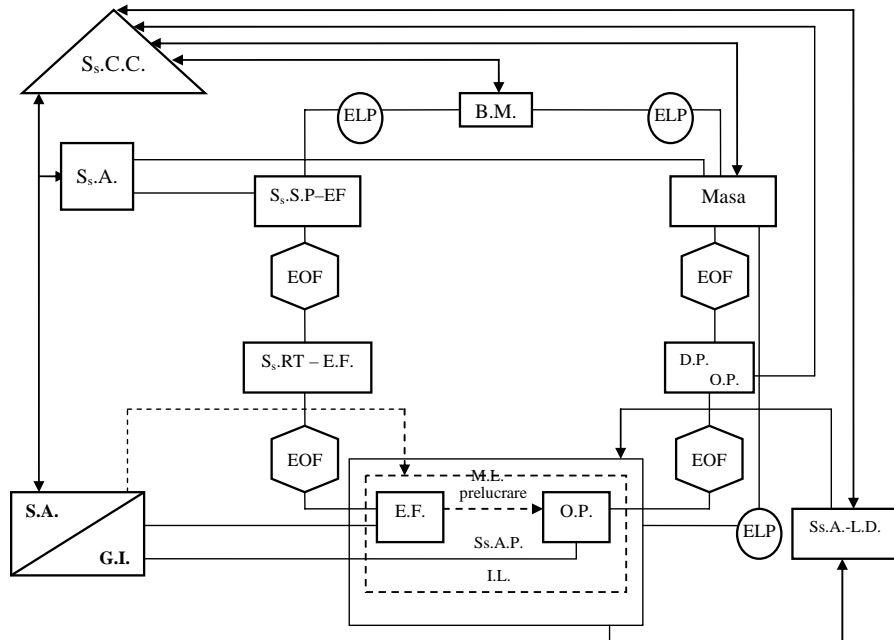


Fig.2.24. Modelul sistemului tehnologic specific de prelucrare prin eroziune electrică cu electrod filiform.

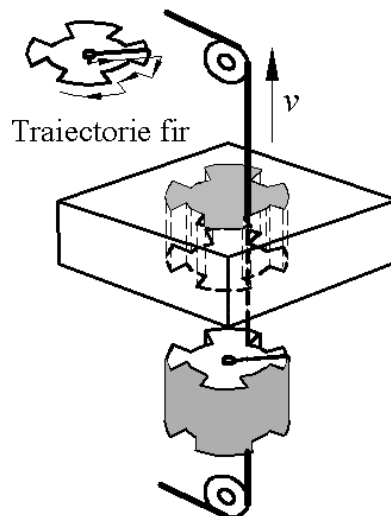


Fig.2.25. Principiul prelucrării prin eroziune electrică cu electrod filiform.

Compunerea sistemului tehnologic de prelucrare definește principial aceleași componente ca și sistemul de prelucrare cu copierea formei electrodului-sculă

(batiu, generator de impulsuri, sistem de circulație a lichidului dielectric), dar prezintă și anumite componente specifice, cum ar fi: sistemul de comandă pentru deplasarea electrodului filiform, sistemul de tensionare ghidare și rulare a electrodului filiform și sistemul de conducere operațională a procesului eroziv. [Nanu A, 2004],

Părții mecanice a sistemului tehnologic i se pun condiții asemănătoare de funcționare ca și în cazul sistemelor tehnologice de prelucrare cu electrod masiv, la care apare suplimentar necesitatea unei rigidități superioare pentru a evita posibilele vibrații ale electrodului filiform. Principal se identifică aceleași variante constructive ca și la copierea formei: varianta constructivă cu montant (Fig.2.26) și varianta constructivă portal (Fig.2.27).

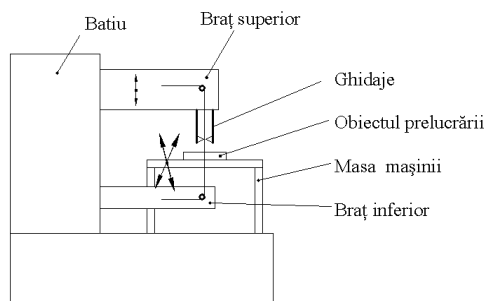


Fig.2.26. Principiul constructiv a variantei cu montant a sistemului tehnologic de prelucrare cu electrod filiform.

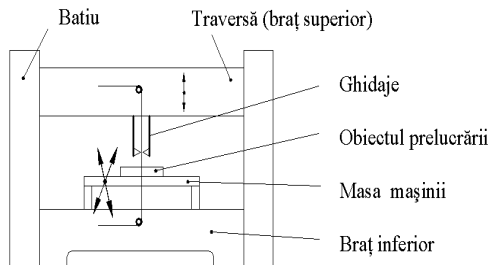


Fig.2.27. Principiul constructiv a variantei portal a sistemului tehnologic de prelucrare cu electrod filiform.

Generatoarele de impulsuri utilizate la prelucrarea prin eroziune electrică cu electrod filiform nu diferă principal față de cele utilizate la prelucrarea cu copierea formei electrodului. Și la această aplicație sunt frecvent utilizate generatoarele de impulsuri cu relaxare sau, tot mai des în ultima perioadă cele cu impulsuri comandate. [Reviczky, 1999b], [Nanu A, 2004].

Sistemele pentru circulația lichidului dielectric sunt adaptate lichidului specific prelucrărilor prin eroziune electrică cu electrod filiform – apa deionizată. Ele au în componență subsisteme cu funcții identice cu cele ale instalațiilor pentru circulația lichidelor dielectrice ale mașinilor de prelucrare prin eroziune electrică cu copierea formei electrodului-sculă (sistem de răcire, sistem de filtrare, sistem de recirculare) dar trebuie să asigure și funcții specifice de preparare a lichidului dielectric prin sistemul de deionizare a apei. Utilizarea apei ca lichid dielectric la

prelucrarea prin eroziune electrică cu electrod filiform este justificată prin faptul că ea asigură un interstițiu eroziv mărit în comparație cu hidrocarburile specifice prelucrării cu electrod masiv, datorită conductivității electrice mărite a apei. Prin mărirea interstițiului eroziv se reduce posibilitatea de apariție a scurtcircuitelor între obiectul supus prelucrării și electrodul filiform, fenomen deosebit de nociv la această variantă de prelucrare.

Sistemul de comandă pentru deplasarea electrodului filiform asigură traiectoria de deplasare a electrodului filiform în raport cu obiectul supus prelucrării, determinând astfel decupări cu complexități în conformitate cu cerințele impuse. La începutul utilizării eroziunii electrice cu electrod filiform aceste sisteme se bazau pe cititoare de desene care transmiteau comenzile de deplasare a mesei în coordonate unor motoare electrice, de regulă pas cu pas. Aceste motoare se utilizează și astăzi, doar că la mașinile ultimelor generații comanda pentru deplasarea electrodului filiform se realizează cu ajutorul comenzilor numerice. Programarea deplasărilor se face de către operator și se înmagazinează în memoria unui calculator. Calculatorul poate fi unul specializat (la modelele mai vechi) sau unul compatibil PC (la modelele actuale).

Datorită condițiilor particulare de prelucrare, care sunt specifice acestei variante de prelucrare – interstiții erozive foarte mici, frecvențe de lucru foarte mari, complexitate, uneori foarte mare a traiectoriei și rigiditate scăzută a electrodului-sculă, condițiile care trebuie să le îndeplinească aceste subsisteme sunt foarte severe:

- precizie de deplasare foarte ridicată pentru a putea asigura pe de o parte menținerea constantă a interstițiului eroziv foarte mic, iar pe de altă parte pentru a putea asigura precizia de prelucrare mare impusă, de regulă acestor prelucrări;
- viteza de reacție foarte mare pentru a se putea adapta concret la gradul înalt de rezoluție necesar acestor prelucrări;
- flexibilitate foarte ridicată pentru a putea face față deselor schimbări de direcții sau sensuri de deplasare necesare descrierii traiectoriilor de prelucrare impuse, dar și pentru a putea răspunde comenzilor de natură tehnologică suprapuse celor de natură geometrică;
- necesitatea controlului riguros și permanent a traiectoriei, corelat cu vizualizarea continuă a poziției electrodului filiform în raport cu obiectul supus prelucrării.

Pentru îndeplinirea acestor cerințe elementele în mișcare ale subsistemului trebuie să se realizeze cu frecări de rostogolire, care permit eliminarea eficientă a jocurilor și necesită elemente de antrenare cu cupluri reduse.

Sistemul de tensionare ghidare și rulare a electrodului filiform are o influență esențială la asigurarea unei stabilități adecvate a prelucrării. În timpul prelucrării electrodul filiform este supus unor acțiuni complexe determinate atât de procesul eroziv propriu-zis, cât și de specificul prelucrării cu această variantă a eroziunii electrice. Astfel, electrodul filiform este supus unei uzuri, care raportată la diametrul acestuia (uzual 0,25...0,5mm, dar pentru microprelucrări 0,02...0,08mm) are o pondere destul de mare, iar forțele care acționează asupra lui în timpul procesului de prelucrare pot conduce la deformații pronunțate ale acestuia și deci, la instabilități ale procesului eroziv. Pentru a asigura continuitatea și stabilitate procesului eroziv la prelucrarea prin eroziune electrică cu electrod filiform, sistemul de tensionare ghidare și rulare a electrodului filiform trebuie să îndeplinească mai multe condiții, dintre care principalele sunt:

- deplasarea axială a electrodului filiform cu o viteză mai mare decât viteza de uzare a lui, astfel încât în zona activă de prelucrare să existe tot timpul

porțiuni de electrod cu secțiune constantă, egală cu cea inițială (se admit reduceri ale secțiunii electrodului filiform de max. 10%). Pentru realizarea acestei condiții, mașinile de prelucrare prin eroziune electrică cu electrod filiform au în componență un sistem de rulare-derulare a firului, care asigură o deplasare axială ascendentă sau descendentă a acestuia cu o viteză de ordinul zecilor de mm/s, (pot ajunge, în anumite cazuri de prelucrare și la valori de cca. 150 mm/s). Pentru realizarea acestor mișcări, utilajele de prelucrare prin eroziune electrică cu electrod filiform sunt prevăzute cu sisteme de role de rulare, derulare, sisteme de ghidare a firului și sisteme de alimentare cu energie electrică a electrodului filiform cât mai aproape și simetric față de obiectul supus prelucrării (conectare catodică a electrodului filiform) (Fig.2.28).

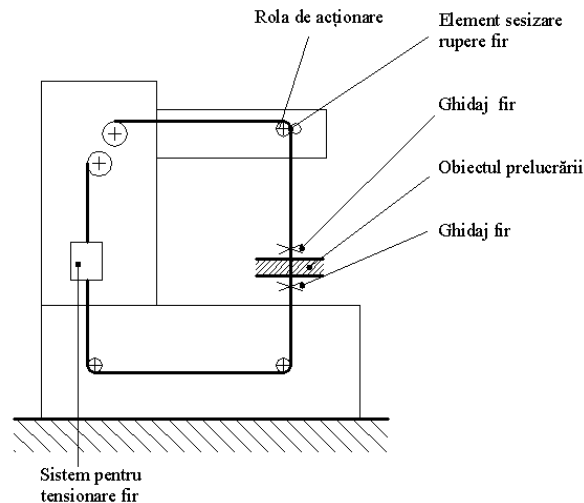


Fig.2.28. Principiul sistemului de rulare-derulare a electrodului filiform. 1,2 – role de rulare, derulare; 3 – role de întindere; 4 – palpator pentru sesizarea ruperii firului; 5 – elemente de ghidare; 6 – element de alimentare cu energie electrică.

- asigurarea unei tensiuni axiale a electrodului filiform în vederea evitării deformării acestuia sub acțiunea forțelor din procesul eroziv. Acestea pot conduce la apariția unor vibrații, care conduc la o formă specifică a tăieturii (Fig.2.29). Pentru a măări forțele axiale de tensionare a electrodului filiform se utilizează materiale cu rezistențe ridicate la tracțiune, fiind preferat aliajele de tip alamă, chiar dacă ele au proprietăți de rezistență la eroziune inferioare cuprului.

În ultimul timp au fost realizate fire cu diametre foarte mici (0,02...0,08mm) din materiale cu rezistență la tracțiune mare (cca.3000 N/mm²), cu ajutorul cărora se pot realiza tăieri cu precizii foarte mari (erori de ordinul 1...3 μm). Pentru a putea asigura atât proprietăți de rezistență mare la tracțiune, cât și proprietăți de rezistență mare la eroziune au fost realizați electrozi filiformi stratificați, cu miez din material rezistent la tracțiune (de ex. oțel) și cu strat exterior din material rezistent la eroziune (de exemplu depunere electrochimică de cupru). Rezultatele tehnologice obținute cu acești electrozi filiformi sunt foarte bune, dar aspectele economice, determinate de realizarea lor conduc, încă la utilizări limitate.

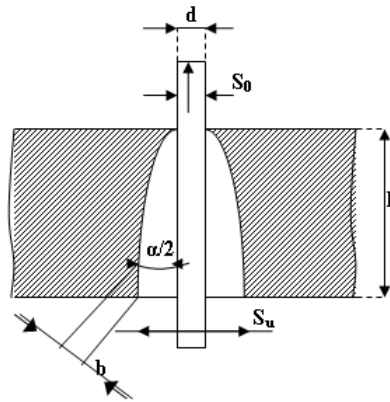


Fig.2.29. Reprezentarea schematică a tăieturii cu electrod filiform.

- Asigurarea unor poziții spațiale înclinate a electrodului filiform în raport cu obiectul supus prelucrării pentru a putea extinde posibilitățile de aplicare a procedurii. În mod curent sistemele tehnologice de prelucrare prin eroziune electrică cu electrod filiform permit înclinări de $\pm 30^\circ$, dar ultime cercetări prezintă soluții la care înclinările pot depăși această limită.
 - Asigurarea unei înfilări rapide și automate a electrodului filiform în alezajele tehnologice executate în obiectul supus prelucrării.
- [NanuA, 2004], [Reviczky, 1999b].

2.5. Principii tehnologice la prelucrarea prin eroziune electrică cu fir

Prelucrarea prin eroziune electrică cu electrod filiform a cunoscut o dezvoltare intensă prin facilitățile pe care le oferă, dar și prin perfecționările continue a sistemelor tehnologice. Dacă din punct de vedere al fenomenelor fundamentale care conduc la îndepărtarea de material, deci la procesul de prelucrare, nu există diferențe față de prelucrarea cu copierea formei electrodului-sculă, prin modul de aplicare tehnologică a procedurii deosebiri între cele două variante de prelucrare prin eroziune electrică sunt substanțiale.

În primul rând electrodul-sculă de formă filiformă, cu secțiune constantă și mobil pentru a înlătura uzura nu mai are aceleași influențe tehnologice ca și electrodul-sculă masiv, prin eliminarea importanței uzurilor. Pe de altă parte, prin îmbunătățirea proprietăților electrice, geometrice și fizico-mecanice ale electrozilor filiformi se elimină și restricțiile determinate de aceste verigi ale sistemului tehnologic. Practic, varianta tehnologică de prelucrare prin eroziune electrică cu electrod filiform se aplică aproape exclusiv pentru prelucrări de debitare - decupare, deci prelucrări la care este necesară conducerea mișcării relative dintre obiectul de prelucrat și electrodul filiform, după un anumit contur (liniar, circular, eliptic sau alte curbe - închis sau deschis). Datorită acestor limitări aria secțiunii active a prelucrării (secțiunea unde se desfășoară procesul eroziv) este, de regulă, constantă (determinată de înălțimea piesei).

În aceste condiții, se poate admite că din punct de vedere a îmbunătățirilor tehnologice problemele se rezumă la măsuri care să conducă la creșteri de productivitate, la creșteri ale gamei de grosimi la care se poate aplica varianta tehnologică, la îmbunătățirea calității suprafețelor prelucrate s.a., corelat cu perfecționarea subsistemelor de conducere a electrodului filiform, deci la mărirea preciziei de prelucrare prin corecții eficiente ale traseului descris de electrodul filiform. Nu în ultimul rând, se acționează spre creșterea siguranței în exploatare prin îmbunătățiri ale electrodului filiform, atât din punct de vedere constructiv (material, structură, dimensiuni, etc.) dar și prin creșterea posibilităților de încărcare a lui, corelată cu o reducere a timpilor necesari eliminării unor incidente de prelucrare nedorite.

Principalele performanțe tehnologice atinse de prelucrarea prin eroziune electrică cu electrod filiform se referă, la creșteri substanțiale ale intensității curentului de descărcare (Fig.2.30), la creșteri pronunțate ale grosimilor pieselor ce se pot prelucra cu această variantă tehnologică (Fig.2.31) și la îmbunătățirea parametrilor electrici ai electrodului filiform (Fig.2.32).

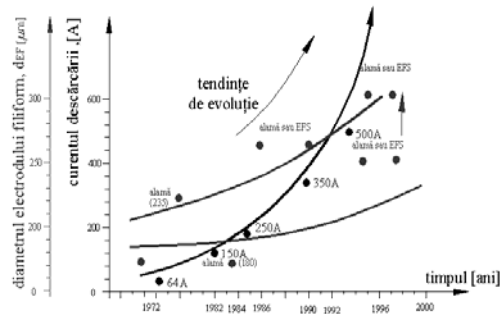


Fig.2.30. Evoluția intensității curentului de descărcare și a diametrului electrodului la prelucrarea prin eroziune electrică cu electrod filiform.

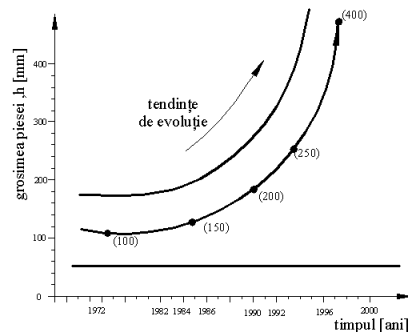


Fig.2.31. Evoluția intensității grosimii maxime a pieselor la prelucrarea prin eroziune electrică cu electrod filiform.

Sistemele de conducere a electrodului filiform sunt, la ora actuală, exclusiv sisteme cu comenzi numerice (în ultimii ani numai compatibile PC), care asigură precizii de deplasare a electrodului filiform de ordinul 0,001mm. Prin facilitățile combinatorice de integrare a comenzilor de deplasare a electrodului filiform

(geometrie), cu comenzile de autoreglare a parametrilor tehnologici (tehnologie) și cu cei de conducere a funcțiilor executive ale sistemului tehnologic (autoadaptare), corelate cu posibilitățile de interconectare a sistemului tehnologic de prelucrare cu sistemele numerice de proiectare, intervenția umană este redusă la un minim acceptat de actualul stadiu de dezvoltare și întregul ansamblu tehnologic capătă o independență majoră, ceea ce permite o utilizare ușoară, precisă și sigură.

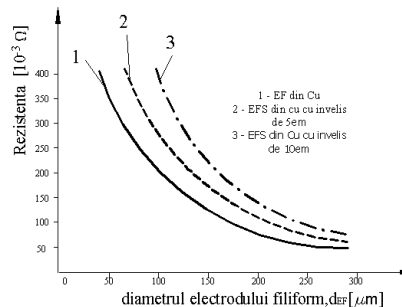


Fig.2.32. Evoluția rezistenței electrice a electrodului la prelucrarea prin eroziune electrică cu electrod filiform.

[Nanu A, 2003], [Nanu D, 2004].

2.6. Elemente de automatizare utilizate la prelucrarea dimensională prin eroziune electrică cu fir

2.6.1. Generatoare de impulsuri

Prelucrarea prin eroziune electrică cu electrod filiform prezintă, la nivelul spațiului de lucru, diferențe notabile față de prelucrarea prin eroziune electrică cu electrod masiv cu copierea formei electrodului). Ca urmare, impulsurile aplicate pe interstițiu trebuie să fie adaptate următoarelor particularități:

- aria secțiunii transversale a electrodului este mică, uzual $0,005...0,07 \text{ mm}^2$, corespunzând unor diametre de $0,08...0,3 \text{ mm}$;
- aria suprafeței aflate momentan în fază de prelucrare este de asemenea foarte mică, uzual $0,0025...2,5 \text{ mm}^2$;
- rugozitatea impusă suprafeței prelucrate mică, cu valori $Ra = 1...1,2 \mu\text{m}$;
- grosime mică a interstițiului ($0,05...0,1 \text{ mm}$);
- utilizarea drept lichid dielectric a apei (deionizate, demineralizate) sau a unor soluții sau suspensii apoase.

Corespunzător acestor valori caracteristice, parametri electrici și cei temporali (energetici) ai impulsurilor trebuie să respecte următoarele restricții:

- tensiunea de amorsare a descărcării trebuie să fie mare ($150...300\text{V}$), pentru a se obține distanțe de scânteiere mari, în raport cu energia impulsurilor;
- intensitatea medie a curentului trebuie limitată la valori mici ($1...5\text{A}$) pentru a nu produce ruperea electrodului filiform, urmare a unor suprasolicitări termice;

- energia impulsurilor mică (1...10 mJ), cerută de calitatea (rugozitatea) suprafeței prelucrate;
- amplitudinea impulsului de curent să fie mare (100...200A), pentru a se obține productivități acceptabile;
- durată a impulsurilor mică (0,1...5 μs), impusă de energia mică necesară procesului de prelucrare.

Generatoarele de impulsuri tipice utilizate la mașinile de prelucrare prin eroziune electrică cu electrod filiform sunt cele cu acumulare-relaxare comandate, construite după schema de principiu prezentată în Fig.2.33. Performanțele acestor tipuri de generatoare se situează sub nivelul generatoarelor de impulsuri comandate, cu toate acestea ele sunt încă folosite întrucât comanda activă a acumulării energiei în condensatoare și relaxarea comandată a acestei energii pe interstițiu oferă posibilitatea controlului asupra parametrilor descărcării electrice. La generatorul din Fig.2.33, baza de timp, prin semnalul x_{inc} , comandă încărcarea condensatorului C de la sursa U_0 prin închiderea contactorului static K1. Condensatorul se încarcă prin rezistorul R_i la tensiunea:

$$U_C = U_0(1 - e^{-t/\tau_i}) [V] \quad (2.12)$$

unde $\tau_i = R_i C$ este cu constanta de timp [s]. Pentru o durată $t = t_{inc} \gg \tau_i$, condensatorul se va încărca până la tensiunea de mers în gol: $U_C = U_0$ și va acumula energia:

$$w_i = \frac{1}{2} C U_C^2 [J] \quad (2.13)$$

unde C este capacitatea condensatorului [F].

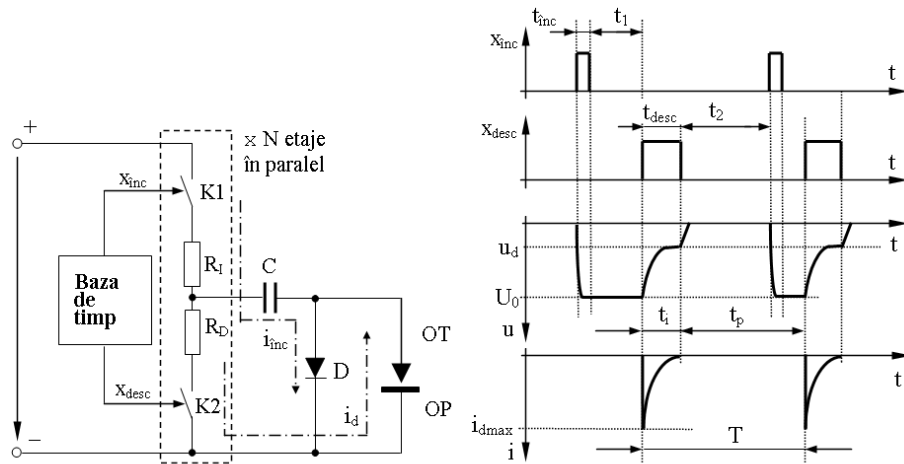


Fig.2.33. Generator de impulsuri de relaxare: a - schema; b - diagrama de tensiune și cure.

Din momentul terminării încărcării, după un interval de timp prescris t_1 , baza de timp va genera semnalul x_{desc} , care comandă contactorul K2, pentru o durată t_{desc} , stabilit până la descărcarea condensatorului C pe interstițiu. Tensiunea de pe condensator variază conform relației:

$$u_C = U_C e^{-t/\tau_d} [V] \quad (2.14)$$

unde $\tau_d = (R_D + R_E) C$ este cu constanta de timp a circuitului de descărcare (R_E este rezistența echivalentă neliniară a interstițiului). În această fază a ciclului de funcționare a generatorului energia înmagazinată în condensator w_i va fi relaxată în interstițiu și se va transforma în energie de efect repartizată neuniform la suprafețele OP și OT și în canalul descărcării. Ceilalți parametri ai descărcărilor sunt:

- curentul maxim în impuls, care apare în momentul amorsării descărcării:

$$i_{max} = \frac{U_C}{R_D} [A] \quad (2.15)$$

- curentul mediu pe o perioadă:

$$I_m = \frac{1}{T} \int_0^T i dt [A] \quad (2.16)$$

- puterea medie pe o perioadă:

$$P_m = \frac{w_i}{T} = \frac{1}{2T} C U_C^2 [W] \quad (2.17)$$

- durata impulsului de curent:

$$t_i \approx 5\tau_d [s] \quad (2.18)$$

Posibilitatea comandării individuale a contactoarelor statice K1 și K2 oferă posibilitatea controlului curentului atât pe durata încărcării cât și pe durata descărcării condensatorului. Astfel, prin impunerea duratei de descărcare a condensatorului, durata impulsului de curent și implicit energia descărcării poate fi controlată de la valoarea maximă la zero, ceea ce permite evitarea, respectiv întreruperea descărcărilor în arc și ale scurtcircuitelor.

O variantă de generator de relaxare comandat utilizează, în locul rezistorului de încărcare al condensatorului o sursă de curent constant GU (Fig.2.34.a). Tensiunea pe condensator crește discontinuu, în trepte, în urma acumulării de sarcini electrice furnizate, în durate prestabilite, de către generatorul de curent GU (fig.2.34.b).

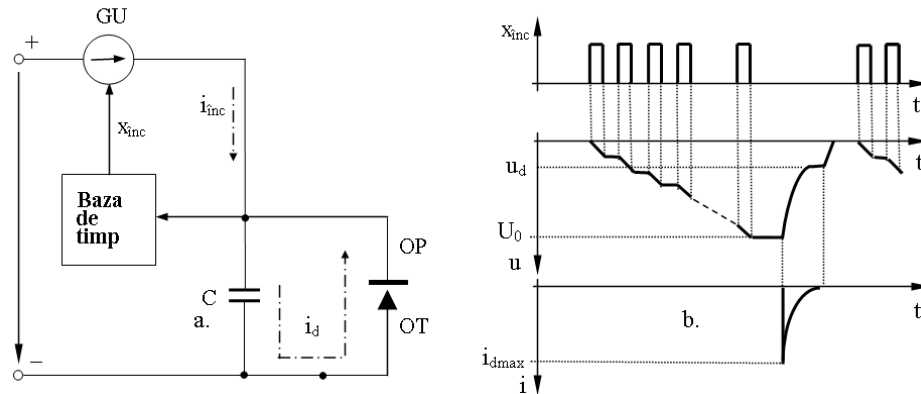


Fig.2.34. Generator de impulsuri de relaxare cu generator de curent constant: a - schema; b - diagrama de tensiuni.

Prin modularea impulsurilor de încărcare a condensatorului se realizează controlul energiei în interstițiu, atât la nivelul descărcărilor individuale cât și la

nivelul trenului de impulsuri, de la valoarea maximă până la zero. Situațiile anormale, descărcări în arc și în scurtcircuit, pot fi astfel prevenite și eliminate înainte de a produce daune electrodului sau piesei.

Generatoarele de relaxare, inclusiv cele comandate, generează impulsuri cu coeficienți de umplere mici ($k_i = t_i/T = 0,1...0,2$), ceea ce conduce la productivități, respectiv viteze de tăiere mici (aria prelucrată în unitatea de timp $150 \text{ mm}^2/\text{min}$).

Necesitatea creșterii productivității prelucrării a impulsionat dezvoltarea generatoarelor de impulsuri comandate, cu caracteristici ale impulsurilor adecvate proceselor de prelucrare prin eroziune electrică cu electrod filiform. Evoluția contactoarelor statice, în special ale celor realizate cu tranzistoare MOSFET a permis realizarea unor generatoare de impulsuri comandate cu durate de impuls de curent scurte, de ordinul sutelor de nanosecunde, cu amplitudini de $100...200 \text{ A}$ și fronturi de creștere și de cădere de ordinul zecilor de nanosecunde. În ultimii ani s-au construit generatoare comandate cu forme complexe ale impulsului de curent, cu coeficienți de umplere mari, cu frecvențe de repetiție $f_i = 200...400 \text{ kHz}$, ceea ce a permis obținerea unor creșteri substanțiale ale productivității, până la cca. $500 \text{ mm}^2/\text{min}$.

Sistemul de comandă al generatoarelor de impulsuri comandate asigură realizarea următoarelor comenzi:

- comanda duratelor impulsurilor de curent și ale pauzelor între impulsuri;
- controlul amplitudinii impulsului de curent, inclusiv modularea în timp a acestuia;
- testarea continuă a stării interstițiului și generarea de comenzi pentru evitarea situațiilor de descărcare în arc și scurtcircuit, respectiv pentru minimizarea duratelor de mers în gol;
- generarea semnalelor de comandă către sistemul automat de avans al electrodului;
- comunicarea cu sistemul de comandă automată a mașinii, realizat cu calculatoare dedicate sau compatibile IBM PC.

Schema bloc a unui generator de impulsuri comandate modern este prezentată în Fig.2.35.

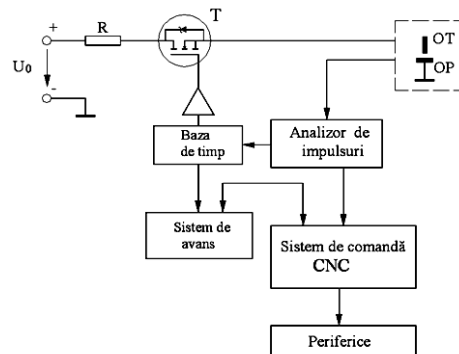


Fig.2.35. Schema bloc a unui generator de impulsuri de comandate modern.

O problemă caracteristică prelucrării prin eroziune electrică cu electrod filiform derivă de la utilizarea apei, respectiv a soluțiilor/emulsiilor apoase, care prezintă o conductivitate reziduală γ [μS], controlată în mod activ. Ca urmare, fenomenul de eroziune cu scânteii electrice este însoțit și de o ușoară eroziune

electrochimică, datorată componentei medii diferite de zero a impulsurilor de tensiune, respectiv de curent, aplicate pe interstițiu. Această situație, care poate afecta negativ calitatea suprafeței piesei se poate evita (sau cel puțin reduce foarte mult) prin aplicarea pe interstițiu a unei tensiuni medii cu valoarea zero. Principiul metodei este prezentat în Fig.2.36.

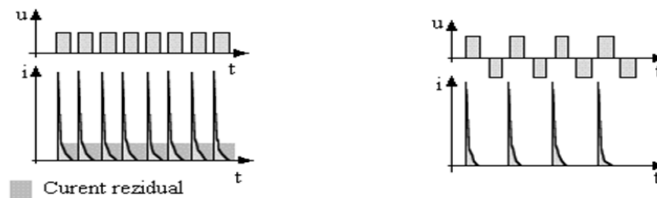


Fig.2.36. Curentul rezidual la prelucrarea prin eroziune electrică cu electrod filiform: a.- cazul impulsurilor unipolare; b.- curent rezidual nul pentru impulsuri bipolare.

Componenta medie a curentului, în cazul aplicării impulsurilor unipolare fig.4.4.a se poate anula prin aplicarea, în pauzele dintre impulsurile de erodare a unor impulsuri de tensiune de polaritate opusă. Acestea vor produce în lichidul de lucru impulsuri de curent, care, însumate cu impulsurile de lucru vor conduce la o valoare medie apropiată de zero (valoarea componentei medii va fi măsurată continuu și va comanda caracteristicile impulsurilor de polaritate inversă). Acest tip de generator, bipolar, numit și antielectrolitic, este construit după schema din Fig.2.37. [Nanu A, 2003], [Nanu D, 2004].

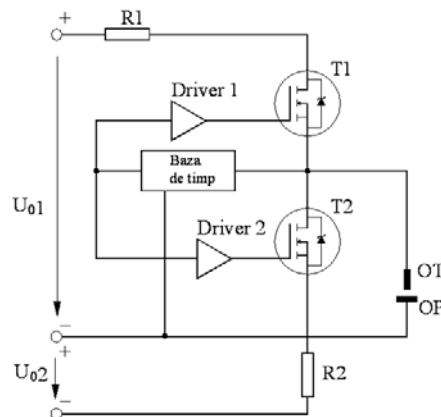


Fig.2.37. Schema generatorului de impulsuri bipolar.

2.6.2. Sisteme de reglare automată a interstițiului eroziv

În cadrul utilajului de prelucrare prin eroziune electrică, reglarea interstițiului se face prin sistemul de reglare a avansului (SRA), care imprimă o mișcare relativă între obiectul de transfer (OT) și obiectul de prelucrat (OP), în urma căreia se asigură menținerea (cvasi)constantă a grosimii interstițiului pe toată durata prelucrării.

Pe lângă acest prim rol, în cadrul utilajelor moderne, SRA asigură și generarea cinematică a suprafeței prelucrate, prin realizarea avansului pe două sau mai multe axe (conturare plană, prelucrare spațială), cu utilizarea echipamentelor de comandă numerică.

Structura SRA.

SRA reprezintă un sistem de reglare automată funcție de abatere, realizat după schema bloc prezentată în Fig.2.38. Obiectul supus reglării este interstițiul eroziv, caracterizat în două moduri:

- static, prin grosimea stabilită de poziția relativă dintre OT și OP;
- dinamic, prin viteza de variație a acestei poziții, urmare a proceselor erozive.

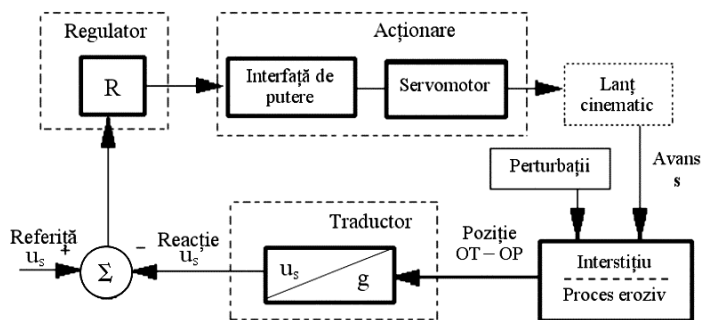


Fig.2.38. Schema bloc a SRA.

Sub acest aspect, SRA poate fi caracterizat în mod dual, ca fiind un sistem de reglare a vitezei sau un sistem de reglare a poziției. Considerarea SRA ca fiind un sistem de reglare a poziției oferă o viziune mai generală, justificată prin următoarele considerente:

- variația interstițiului, urmare a proceselor de prelevare este discontinuă și se datorează straturilor de material prelevate succesiv;
- atât poziția relativă OT-OP, care se reglează din motive fenomenologice cât și pozițiile absolute ale acestora față de un sistem de coordonate sunt variabile în timp;
- conceptul de reglare a poziției include și reglarea vitezei după o lege prestabilită.

Caracterizarea globală a unui SRA se face uzual după elementul de execuție utilizat în sistemul de acționare, identificându-se SRA de tip electromecanic (cu motoare electrice de curent continuu, pas cu pas și speciale), electrohidraulic (cu hidromotor liniar), electromagnetic (solenoidal), magnetostrictiv, piezoelectric, electrotermic etc. [Nanu A, 2003], [Nanu D, 2004].

Construcțiile elementelor de acționare și ale lanțului cinematic aferent trebuie să asigure:

- momente sau forțe rezistente mici, pentru reducerea zonelor de insensibilitate;
- inerție redusă, pentru obținerea unor caracteristici dinamice cât mai bune;
- jocuri reduse (practic nule) în angrenaje, pentru reducerea (eliminarea) timpului mort;
- rigiditate ridicată, pentru asigurarea preciziei de deplasare a obiectului antrenat;
- randament ridicat.

Un loc special în cadrul structurii unui SRA îl ocupa traductorul de reacție (senzorul stării interstițiului), care prelucrează convenabil sistemului de comandă semnalul de reacție din proces.

Regulatorul prelucrează semnalul de eroare rezultat din însumarea algebrică a unei mărimi de prescriere cu semnalul de reacție, furnizând semnalul de comandă al acționării. Împreună cu traductorul de reacție, acesta constituie practic blocul de comandă și reprezintă componenta cea mai dinamică a SRA, supus unui proces continuu de perfecționare.

Interstițiul ca obiect al reglării automate.

Interstițiul, ca spațiu de desfășurare a fenomenelor elementare caracteristice eroziunii electrice, poate fi considerat ca un sistem complex a cărui evoluție în timp caracterizează transformările geometrice și fizico-chimice ale unei mulțimi de parametri de intrare de natură cinematică, electrică și substanțială (Fig.2.39).

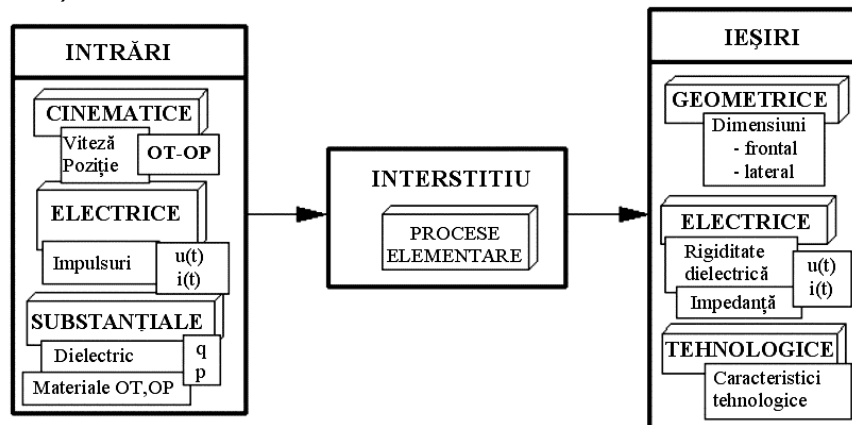


Fig.2.39. Parametri interstițiului eroziv.

În cadrul sistemului tehnologic de prelucrare prin eroziune electrică, interstițiul este supus unei reglări automate, finalitatea urmărită fiind în toate cazurile extremizarea valorilor caracteristicilor tehnologice ale prelucrării (productivitate, uzură a electrodului etc.). [Nanu A, 2003], [Nanu D, 2004].

Caracterizarea geometrică a interstițiului.

Structura idealizată a interstițiului este prezentată în Fig.2.40 în care se remarcă cele două zone esențiale:

- interstițiul activ – frontal g_{fr} și lateral g_{la} ;
- interstițiul pasiv, g_{lp} .

Interstițiul activ, în care descărcările electrice sunt amorsate preponderent între suprafețele electrozilor are grosimi stabilite în urma procesului de reglare automată pe durata prelucrării.

Interstițiul pasiv se stabilește în urma descărcărilor amorsate între electrozi prin intermediul deșeurilor conductoare care îl străbat în cursul procesului de evacuare din interstițiul activ.

În concluzie, caracterizarea interstițiului se face prin:

- parametri geometrici – grosimea în zonele active;
- parametri electrici, stabiliți în urma evoluției impulsurilor electrice aplicate interstițiului.

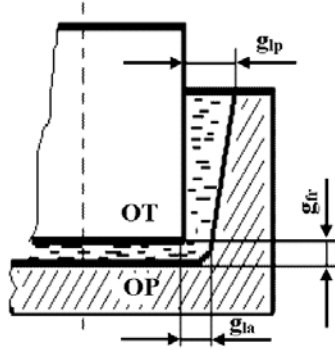


Fig.2.40. Structura geometrică a interstițiului.

Aplicând o tensiune U_0 pe electrozi, între aceștia se stabilește un câmp electric E , cu intensitatea:

$$E = \frac{U_0}{g} [V/m] \quad (2.19)$$

Condiția de străpungere este:

$$E \geq E_s \quad (2.20)$$

unde: E_s - rigiditatea dielectrică a interstițiului.

Pe baza relației (2.20) se poate calcula grosimea interstițiului

$$g = \frac{U_0}{E_s} [m] \quad (2.21)$$

g_a - interstițiu activ; g_i - interstițiu pasiv

În cazurile practice, mărimile U_0 și E_s sunt fixe și sunt caracteristice utilajului de prelucrare (generatorului, respectiv lichidului dielectric folosit). Ca urmare, grosimea interstițiului activ poate lua valori între două limite:

$$g_{min} < g < g_{max}$$

în care: g_{min} reprezintă o grosime minimă fizic realizabilă, în condițiile concrete din interstițiu și care conduce la scurtcircuit între electrozi; g_{max} - grosimea calculată cu relația (2.21) pentru U_0 și E_s dați.

În realitate, stabilirea grosimii interstițiului prin aplicarea relației (2.21) nu se aplică, deoarece suprafețele reale ale electrozilor, în majoritatea cazurilor, au o configurație spațială complexă și sunt rugoase, ceea ce conduce la o neuniformitate a câmpului electric în interstițiu. Pe de altă parte, rigiditatea E_s a dielectricului este variabilă, funcție de conținutul de impurități, de parametri de circulație, de temperatură etc.

În condițiile derulării procesului de eroziune electrică, grosimea interstițiului activ g_a se poate calcula cu relația:

$$g_a = k_1 \cdot U_0 + k_2 \cdot w_i^{0.4} + a [\mu m] \quad (2.22)$$

în care: k_1 - constantă pentru lichidul dielectric [$\mu\text{m}/\text{V}$], k_2 - constantă de material pentru OP [$\mu\text{m}/\text{J}^{0.4}$], a - interstițiul mecanic [μm].

În cazul general, grosimea interstițiului se poate exprima printr-o funcție de mai multe variabile:

$$g = f(U_0, w_i, p, A, h, k_1, k_2) \quad (2.23)$$

în care: U_0 - tensiunea de mers în gol a generatorului; w_i - energia impulsurilor; p - parametrul circulației dielectricului; A - aria suprafeței prelucrate; h - adâncimea de prelucrare; k_1, k_2 - constante pentru materialele OT și OP.

Măsurarea directă, în proces, a grosimii interstițiului frontal în scopul reglării mărimii acestuia, deși în principiu posibilă, nu se aplică în practică, întrucât pentru ansamblul procesului de prelucrare este mai importantă cunoașterea stării fizice a interstițiului decât a dimensiunii geometrice momentane și locale. Pentru aceasta, se dispune de semnalele electrice direct măsurabile care pot caracteriza atât starea momentană cât și tendința de evoluție a interstițiului.

Caracterizarea interstițiului prin mărimi direct măsurabile.

Pentru caracterizarea globală (geometrică și fizică) a interstițiului este necesară utilizarea unei relații de forma:

$$x_g = f(g) \quad (2.24)$$

unde x_g este un parametru direct măsurabil în proces sau determinat prin prelucrarea în timp real a unor mărimi măsurabile și care trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

- să caracterizeze biunivoc interstițiul, din punct de vedere al proceselor elementare;
- să fie ușor de măsurat și prelucrat;
- să fie cât mai puțin dependent de parametri regimului de prelucrare;
- să ofere posibilitatea identificării stării optime a interstițiului.

Considerând x_g drept un semnal de reacție din proces, se poate defini sensibilitatea S a semnalului:

$$S = \frac{dx_g}{dg} \quad (2.25)$$

Semnalele x_g de natură electrică cele mai utilizate sunt reprezentate de variația în timp a tensiunii pe interstițiu, $u(t)$, uneori alături de variația curentului, $i(t)$.

Caracterizarea interstițiului prin valori ale tensiunii.

În cazul utilizării generatorului de impulsuri comandate se pot evidenția următoarele valori medii ale tensiunii (Fig.2.41).

1. Tensiunea medie pe impuls:

$$U_i = \frac{1}{t_u} \int_0^{t_u} u(t) \cdot dt \quad (2.26)$$

2. Tensiunea medie pe descărcare:

$$U_d = \frac{1}{t_i} \int_0^{t_i} u(t) \cdot dt = \frac{1}{t_u - t_a} \int_{t_u - t_a}^{t_u} u(t) \cdot dt \quad (2.27)$$

3. Tensiunea medie pe interstițiu:

$$U_m = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot dt = \frac{1}{t_u + t_p} \int_0^T u(t) \cdot dt \quad (2.28)$$

Caracteristica statică a interstițiului, exprimată prin funcția: $U_m=f(g)$ pentru parametri U_0 , t_i , t_p , constanți este prezentată în Fig.2.42.

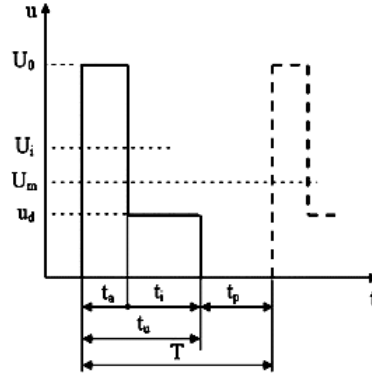


Fig.2.41. Determinarea valorilor medii ale tensiunii pentru impulsuri comandate.

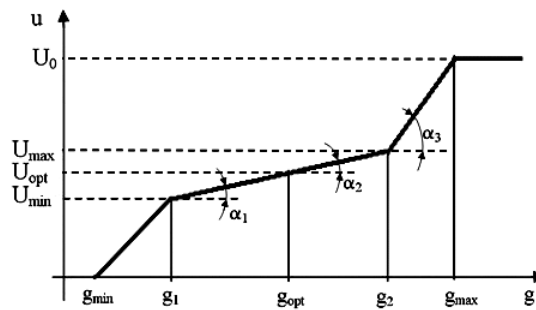


Fig.2.42. Caracteristica statică liniară a interstițiului.

Avantajul oferit de acest semnal este cel al simplității, ceea ce-l recomandă pentru utilajele de mică complexitate, respectiv în cazul utilizării generatoarelor de relaxare. [Nanu A, 2003], [Nanu D, 2004].

Dezavantajele sunt multiple, și anume:

- sensibilitatea $S_i = \tan \alpha_i$ ($i = 1, 2, 3$) este relativ mare pentru grosimi ale interstițiului g apropiate de limitate intervalului $[g_{\min}, g_{\max}]$, dar este scăzută în domeniul (g_1, g_2) , în care se găsește valoarea optimă g_{opt} . Grosimea optimă nu se poate determina decât prin încercări;
- tensiunea medie este influențată de coeficientul de umplere al impulsurilor de tensiune, $k_u = t_u/T$. Utilizarea variantelor U_i , U_d complică circuitele de prelucrare ale semnalelor, care în acest caz trebuie să fie conduse printr-o bază de timp pentru delimitarea intervalelor de măsurare.

Parametri temporali ai impulsurilor de tensiune.

Caracterizarea dinamică a interstițiului impune evidențierea variațiilor parametrilor impulsurilor la nivel individual și de grup. Astfel, se poate utiliza faptul că între momentul aplicării impulsului de tensiune pe interstițiu și momentul amorsării descărcării se scurge intervalul de timp t_a , a cărui mărime se exprima prin:

$$t_a = K \cdot \frac{g}{\gamma \cdot E^2} = K \cdot \frac{g^3}{\gamma \cdot U^2} [s] \quad (2.29)$$

în care: k – constantă, g – grosimea interstițiului (m), γ – conductivitatea electrică $(\Omega m)^{-1}$, E – intensitatea câmpului electric (V/m).

Întrucât condițiile de amorsare ale descărcărilor variază aleator, parametrul care oferă o informație utilizabilă este întârzierea medie la amorsare, t_{am} , (2.30) a cărei dependență de grosimea interstițiului este prezentată în Fig.2.43.

$$t_{am} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{t_{ai}}{t_{ui}} \cdot 100 [\%] \quad (2.30)$$

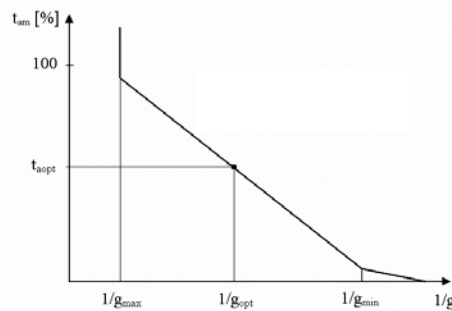


Fig.2.43. Variația duratei întârzierii la amorsare cu grosimea interstițiului.

Caracterizarea interstițiului prin parametri de grup ai impulsurilor electrice.

Prelevarea este realizată în principal de impulsurile efective (normale), în timp ce impulsurile de mers în gol și cele anormale (fictive și în scurtcircuit) afectează negativ desfășurarea procesului de prelevare.

După cum s-a precizat anterior, scopul reglării interstițiului este maximizarea prelevării de material din OP, deci maximizarea productivității. Numeroase cercetări au evidențiat dependențele dintre productivitatea prelucrării Q_p (respectiv viteza de prelevare v_p), mărimea interstițiului și caracteristicile de grup ale impulsurilor. Un exemplu este prezentat în Fig.2.44, în care se observă corelația puternică dintre viteza de prelevare și frecvența relativă a impulsurilor normale. Ca urmare, maximizarea vitezei de prelevare se poate atinge prin maximizarea frecvenței impulsurilor efective, o cale fiind reglarea grosimii interstițiului.

Între frecvențele parțiale ale impulsurilor de pe interstițiu există relațiile:

$$f_i = f_0 + f_n + f_{an} [s^{-1}] \quad (2.31)$$

respectiv:

$$f_0' + f_n' + f_{an}' = 1 \quad (2.32)$$

Abaterea grosimii g a interstițiului de la mărimea optimă g_{opt} conduce la scăderea vitezei de prelevare și implică la scăderea frecvenței relative f_n' ale

impulsurilor efective. Conform relației (2.31), acest fapt conduce la variații ale frecvențelor f_0' și f_{an}' ale impulsurilor în gol și ale celor anormale, sensurile variațiilor fiind dependente de sensul de variație a mărimii interstițiului. Un echipament de calcul va determina, în timp real, abaterile survenite și va emite comenzi pentru restabilirea mărimii interstițiului la valoarea optimă.

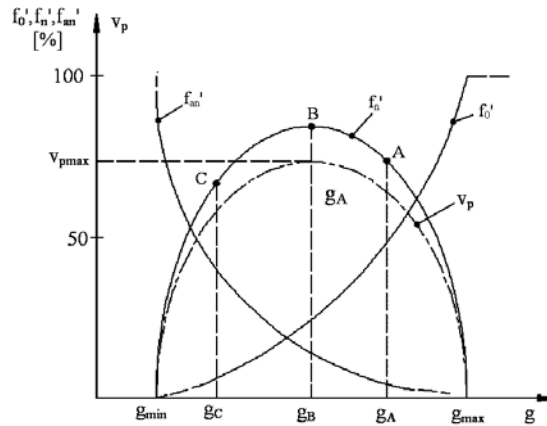


Fig.2.44. Dependentele frecvențelor relative ale impulsurilor și a vitezei de erodare cu mărirea interstițiului.

O sinteză a posibilităților de caracterizare a stării interstițiului este prezentată în Fig.2.45. [Nanu A, 2003], [Nanu D, 2004].

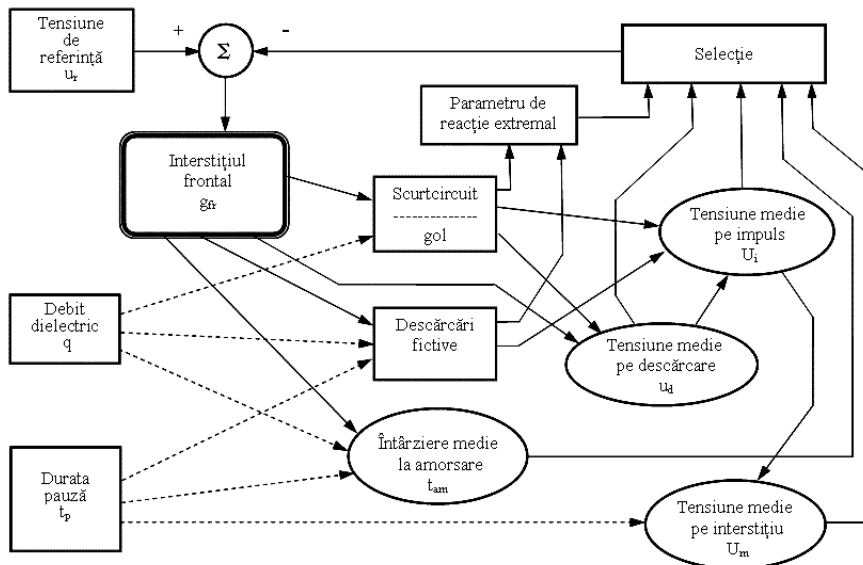


Fig.2.45. Interacțiunea parametrilor impulsurilor la reglarea interstițiului.

2.6.3. Sisteme de poziționare pe traiectorie a electrodului

Probleme generale privitoare la comanda traiectoriei electrodului filiform.

Prelucrarea suprafețelor în cadrul sistemelor tehnologice de prelucrare prin eroziune electrică cu electrod filiform (EF) se face exclusiv pe cale cinematică, spre deosebire de prelucrările cu electrod masiv, la care se poate folosi metoda copierii formei sau profilului electrodului. Traiectoria EF este stabilită prin traiectoria (traiectoriile) ghidajelor acestuia, în raport cu semifabricatul, așa cum se vede în Fig.2.46. Ghidajele inferior și superior, poziționate în originile O și O' ale sistemelor de axe X-Y și U-V aflate în cele două planuri din figură pot fi deplasate în mai multe moduri:

- independent, în care caz se pot genera suprafețe riglate oarecare și se identifică 4 axe comandate (X-Y, U-V);
- împreună (ghidajele rigidizate), când există două axe comandate (X-Y) și în care caz se generează suprafețe riglate paralele;
- unul dintre ghidaje ocupă o poziție fixă (de exemplu O') iar celălalt execută mișcări pe două axe comandate (X-Y) și în care caz se generează suprafețe particulare (de exemplu conice).

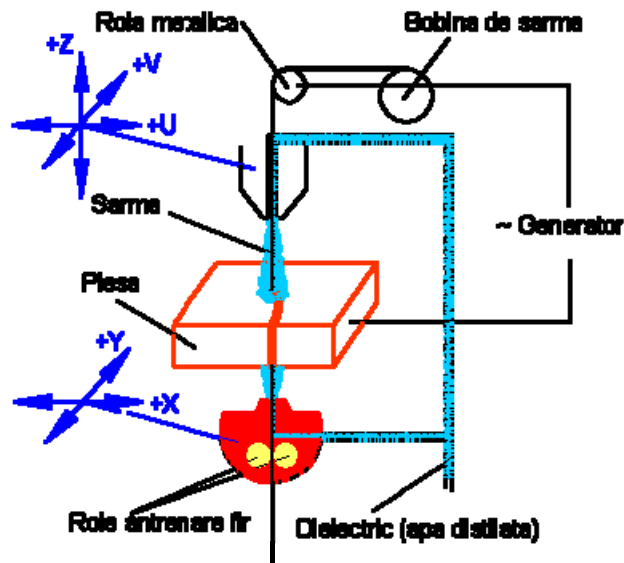


Fig.2.46. Ghidarea electrodului filiform.

Poziționarea relativă a ghidajelor pe axa Z se face pentru adaptarea lungimii ghidate la grosimea semifabricatului. Există și posibilitatea de executare a rotirii axei Z (într-un sens) după una din axele U sau V, în care caz numărul de axe comandate crește la 4½.

Comanda de deplasare a EF pe o traiectorie se poate realiza prin:

- urmărirea profilului unui șablon (copiere mecanică);
- urmărirea conturului unui desen (copiere optică);

- comanda sistemelor de acționare ale deplasărilor ghidajelor cu echipament de conducere CNC (comandă după program).

Primele două metode sunt depășite și prezintă doar interes istoric, în prezent fiind generalizată conducerea traiectoriei electrozudului după program. Creșterea numărului de axe comandate permite prelucrarea prin eroziune electrică cu EF a unor suprafețe din ce în ce mai complexe, dar în același timp crește complexitatea sistemului de comandă după program. Pentru prezentarea problemelor de principiu care stau la baza generării traiectoriilor EF se vor face referiri în continuare la sistemele de comandă pe două axe. [Nanu A, 2003], [Nanu D, 2004].

2.7. Resurse materiale pentru cercetare

Pe lângă numeroase resurse bibliografice, pentru cercetarea a fost folosite, în primul rând, resursele materiale ale laboratoarelor facultății de mecanică din cadrul universității „Politehnica” din Timișoara. Experimente de prelucrări dimensionale au fost realizate și în cadrul mai multor societăți comerciale din Timișoara cu specific mecanic dotate cu diferite tipuri de mașini de prelucrat prin eroziune electrică.

Prelucrările în afara laboratoarelor au avut ca scop creșterea experienței în domeniul electroeroziunii, studiul impactului avut de această tehnologie în industrie, împărtășirea experienței practice a operatorilor în domeniu, identificarea problemelor cu caracter practic întâlnite în fabricile cu specific mecanic din Timișoara și nu numai.

Rezultatele experimentale au fost obținute folosind mașinile de prelucrat prin eroziune electrică dar și instrumentele de măsură aflate în dotarea laboratorului.

În dotarea laboratorului se află o mașină de prelucrat prin eroziune electrică produsă în România în perioada anilor 1980, cu îmbunătățiri aduse la nivelul conducerii prin integrarea unui sistem de calcul în perioada anilor 1997-2000. Rezultatele experimentale au fost folosite, în scop practic, la îmbunătățirea sistemului de comandă a mașinii. A doua mașină este o mașină modernă, dotarea laboratorului a fost făcută în 2009, mașina fiind produsă de firma Sodick.

În cele ce urmează se descrie stadiul mașinilor și principalele caracteristici ale acestora.

2.7.1. Mașina de prelucrat Elerofil

Mașina de prelucrat prin eroziune electrică de tipul Elerofil (fig.2.47) face parte din laboratorul de eroziune electrică a facultății de mecanică.

Mașina a fost realizată în perioada 1985, fiind adusă în cadrul laboratorului în scopuri educative dar și datorită problemelor existente la sistemul de comandă.

Mașina a fost dotată cu un sistem de comandă numerică bazată pe calculator fiind echipată cu traductori optici de poziție pentru citirea poziției firului. La acestea au mai fost adăugate următoarele : interfață construită pe baza circuitelor integrate primare (porți logice, comparatoare, tranzistori, etc.) menită să adapteze semnalele de la calculator la componentele mașinii. Sistemul de calcul fiind un sistem vechi (sfârșitul anilor 90) este un sistem ce ridică probleme mari de întreținere, sistemul de operare MS-Dos făcea aproape imposibilă preluarea și prelucrarea datelor.

Motoarele folosite pentru conducerea firului pe traiectorie sunt motoare pas cu pas, acestea sunt acționate prin intermediul unor drivere speciale care pot genera impulsurile de comandă ale motoarelor prin două semnale : un semnal pentru tact, acesta realizează efectiv pași motorului și un semnal pentru direcție, acesta stabilește sensul de deplasare al motorului și implicit sensul firului.

Conducerea firului se realizează cu două astfel de motoare, cu drivere independente comandate de la portul paralel al calculatorului. Acest lucru poate cauza scăderea productivității, întrucât portul paralel este un port cu o viteză redusă față de noile tehnologii de transmisie a datelor.

Citirea poziției firului este citită de la cei doi traductori optici care transmit semnale către o placă de prelucrare montată în interiorul calculatorului, această placă înregistrează impulsurile primite memorându-le în numărătoarele acesteia. Placa funcționa pe portul ISA a plăcii de bază.

Cu toate că anumite părți ale mașinii sunt părți întâlnite pe mașinile mai recente, dotările hardware ale comenzi sunt uzate moral. Pe lângă aceste dotări hardware de tehnologie învechită, soft-ul mașinii re tehnologizate la sfârșitul anilor 1999, deși realizat pe structuri stabile și algoritmi consacrați, fiind construit pe o platformă considerată învechită a devenit o problemă în întreținerea și funcționarea mașinii.

Aceste elemente au făcut ca mentenanța mașinii de prelucrat prin eroziune electrică să fie foarte dificilă. Defectarea unui modul presupunea luni de înlocuire, portul ISA este un port foarte rar întâlnit chiar și la calculatoarele de tipul Pentium I, astfel fiind imposibilă citirea datelor de la senzori de poziție ai firului. Schimbarea unei plăci de bază poate duce la nevoia de înlocuire a plăcii de achiziție a datelor de la traductori, implicit este nevoie de schimbarea soft-ului, programatorii pentru aplicații dezvoltate pe sistemele de operare MS-Dos fiind foarte greu de găsit.



Figura 2.47 – Mașina de prelucrat prin eroziune electrică cu fir de tipul Elerofil, aflată în dotarea laboratorului de eroziune electrică

În figura 2.47. este reprezentată o fotografie a mașinii de tipul Elerofil, mașină descrisă anterior. În partea dreaptă a fotografiei este reprezentat sistemul de comandă numerică. La începerea tezei de doctorat mașina de prelucrat se afla în stadiul de nefuncționare. [Reviczky, 1999b], [Slavici, 2006b], [Gubencu, 2009].

2.7.2. Mașina de prelucrat prin eroziune electrică Sodick AQ300L

Sodick AQ300L (fig. 2.49), este o mașină de prelucrat prin eroziune electrică cu fir, aflată în laboratorul de eroziune electrică din cadrul catedrei de Tehnologie Mecanică a facultății de Mecanică, universitatea „Politehnica” din Timișoara.

Mașina a fost folosită pentru îndeplinirea etapei experimentale, dintre caracteristicile principale se enumeră :

- 5 axe de prelucrare : X,Y,U,V și axa Z
- Axele X,Y,U și V sunt acționate cu motoare liniare, fiind astfel eliminate jocul gol, întârzierile de răspuns și vibrațiile crescând astfel precizia dimensională
- Acționarea este făcută cu un CNC seria LN1W (fig.2.48)
- Avansul după axa X,Y,Z este 300x200x200 mm
- Avansul după axele U,V este de 80x80
- Putând fi prelucrate piese de dimensiuni până la 500x300x200 cu greutate maximă de 300 Kg.
- Firul folosit este de 0,25mm

Mașina oferă posibilitatea monitorizării în timp real al parametrilor procesului, poziția firului, parametrii de prelucrare, timpii de prelucrare, viteza de avans, informații legate de generator.

Informațiile oferite de mașină în timpul procesului au ajutat la o mai bună culegere de date implicit la o calitate ridicată a datelor.

Mașina de prelucrat prin eroziune electrică cu fir Sodick AQ300L este o mașină modernă, dotată cu toate tehnologie nouă, pe lângă funcțiile consacrate standarde în comanda oricărei mașini de prelucrare cu comandă numerică funcții noi, preluarea comenzilor poate fi realizată cu ajutorul ecranului touch screen care prin apăsarea directă pe monitor poate prelua direct comenzile, telecomandă industrială pentru poziționarea cât mai exactă a firului în timpul poziționării manuale.



Figura 2.48. CNC LN1W folosit la comanda mașinii prin eroziune electrică AQ300L

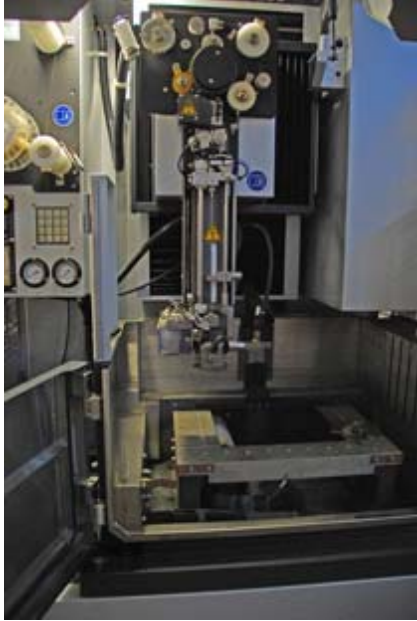


Figura 2.47. Mașina de prelucrat prin eroziune electrică cu fir Sodick AQ300L

Pe lângă aceste facilități, sunt și facilități pentru proiectarea pieselor, preluarea acestor programe piesă printr-o rețea, CNC-ul mașinii comportându-se ca un calculator obișnuit în rețea, astfel pot fi încărcate datele. Programele pentru prelucrarea pieselor pot fi introduse și prin intermediul altor mijloace precum memorii externe prin portul USB.

Constatăm astfel mari diferențe de tehnologie. Deși îndeplinesc aceleași funcții în primul caz se vorbește de port ISA, MS-DOS, în acest caz se vorbește de touch screen, rețea, port USB, etc.

2.8. Concluzii

În cadrul acestui capitol au fost prezentate și analizate o serie de noțiuni fundamentale legate de tematica tezei: probleme generale privind procesul tehnologic, încadrarea temei de cercetare în domeniul ingineriei mecanice și al prelucrărilor neconvenționale, descrierea procesului tehnologic de prelucrare prin eroziune electrică în general și în special cel cu fir, istoricul privind dezvoltarea proceselor de prelucrare prin eroziune electrică cu fir, stadiul actual privind mașinile de prelucrare prin eroziune electrică cu fir.

În mod deosebit, în acest capitol, s-a analizat problematica procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu fir, printr-un vast studiu bibliografic. După cum se observă acest studiu a fost împărțit pe probleme de cercetare, punându-se accentul pe modurile de caracterizare și clasificare a proceselor de prelucrare.

Concluziile studiului bibliografic sunt:

- evoluția prelucrării prin eroziune electrică a cunoscut o dezvoltare intensă în ultimul timp;
- fenomenele prelucrării prin eroziune electrică sunt foarte complexe și imposibil de controlat în totalitate;

- cercetarea prelucrărilor prin eroziune electrică se bucură de un real interes din partea cercetătorilor dar mai ales din partea industriei;
- așteptările ramurilor din industrie ce folosesc tehnologia modernă de prelucrare prin eroziune electrică sunt din ce în ce mai mari;
- prelucrare prin eroziune electrică, atât cea cu fir cât și cea cu electrod masiv, deși considerată tehnologie neconvențională, este atât de des folosită în anumite domenii de activitate, ajungându-se astfel să fie considerată „tehnologie convențională”;
- dezvoltarea calculatoarelor și domeniului IT a făcut ca precizia prelucrărilor să fie foarte mare, teoretic atingându-se precizii sub 1 μ m;
- automatizarea proceselor de prelucrare prin eroziune electrică au dus la creșteri semnificative ale productivității, iar fiecare dezvoltare făcută în domeniu, este ușor acceptată în industrie, crescând de fiecare dată productivitatea.

În continuare se prezintă o sinteză privind contribuțiile personale din cadrul acestui capitol:

- prezentarea într-o manieră personală a principalelor noțiuni privind definirea și standardizarea procesului de prelucrare prin eroziune electrică;
- Identificarea elementelor considerate învechite pe mașina de tipul Elerofil, a celor care pot fi considerate actuale sau care pot îndeplini funcțiile în parametrii acceptabili în cazul dezvoltării sistemului de comandă numerică
- Identificarea elementelor de noutate la mașina Sodick AQ300L și care pot fi implementate la re tehnologizarea mașinii vechi
- sinteza noțiunilor generale privind prelucrarea dimensională, realizată printr-un studiu bibliografic intens și de dimensiuni mari;
- analiza critică pe baza de date IEEE, privind studiul eroziunii electrice din punct de vedere a problemelor generale, dar mai ales extragere și analiza mai detaliată a principalelor articole legate de tematica acestei teze.

3. CONTRIBUȚII LA MODERNIZAREA ARHITECTURII PROCESULUI DE PRELUCRARE DIMENSIONALĂ PRIN EROZIUNE ELECTRICĂ CU FIR

Acest capitol conține o descriere a contribuțiilor personale aduse aspectelor practice pentru automatizarea procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu fir.

Capitolul începe prin prezentarea soluțiilor moderne hardware și software pentru implementarea funcțiilor propuse și realizate pentru comanda cu ajutorul calculatorului a mașinilor moderne de prelucrat prin eroziune electrică.

Pentru comanda cu ajutorul calculatorului a procesului de prelucrare în general și în special a poziționării firului pe traiectoria conturului piesei de prelucrat este nevoie de un calculator optimizat și configurat hardware pentru astfel de procese, fiind ajutat de software proiectat și realizat având scop principal comanda mașinii, urmărirea procesului dar și comanda și monitorizarea mașinii de prelucrat prin eroziune electrică cu fir de la distanță. Acest aspect fiind analizat și propus ca și metodă didactică pentru laboratorul de eroziune electrică.

Una dintre realizările practice în urma tezei de doctorat este reconstrucția și modernizarea mașinii de prelucrare prin eroziune electrică cu fir de tipul Elerofil din cadrul laboratorului de eroziune electrică al catedrei. Tot în acest capitol fiind prezentate principalele îmbunătățiri aduse mașinii rezultate și în urma studiilor făcute în cadrul tezei de doctorat.

În finalul capitolului este prezentat un model de sistem expert realizat în urma rezultatelor experimentale care propune anumiți parametri precum

3.1. Integrarea arhitecturilor hardware și software și interfațarea acestora în procesul de prelucrare prin eroziune electrică cu fir

Amintindu-ne ce înseamnă interstițiul eroziv (capitolul 2, fig. 2.1.) spunem că: „Efectul eroziv al descărcărilor electrice în impuls și localizarea acestor efecte se realizează prin existența celor două corpuri cu proprietăți electroconductoare – obiectul supus prelucrării și electrodul – sculă, al doilea poziționat spațial corect față de primul și între care se află spațiul de grosime foarte mică – interstițiul eroziv umplut cu mediul dielectric – electroizolant.

Dacă cele două corpuri sunt supuse unei diferențe de potențial suficient de mare ca să fie capabilă să realizeze străpungerea interstițiului apare descărcarea electrică care prin mecanismele elementare specifice conduce la îndepărtarea unei cantități mici de material la suprafața celor două obiecte în interacțiune.

Repetarea acestor acțiuni cu o frecvență foarte mare, având la origine generarea în impulsuri a alimentării electrice, determină realizarea globală a prelucrării. Descărcarea electrică în impuls parcurge mai multe stadii dintre care de interes tehnologic sunt ultimele – descărcarea în scânteie și descărcarea în arc

electric netaționar, localizate temporar la sfârșitul perioadei de descărcare și cu o durată proprie de cca 10^{-4} secunde.” [Nanu A, 2004].

Astfel putem spune că reglarea spațiului dintre obiectul de prelucrat și electrod se poate realiza cu ajutorul unui modul având la bază microcontrolerul. Acest modul va fi proiectat pentru a poziționa exact electrodul atât pe contur cât și la distanța necesară realizării procesului de eroziune electrică.

Schema bloc propusă pentru sistemul de poziționarea pe contur folosind un sistem cu microcontroler este prezentată în fig. 3.1.

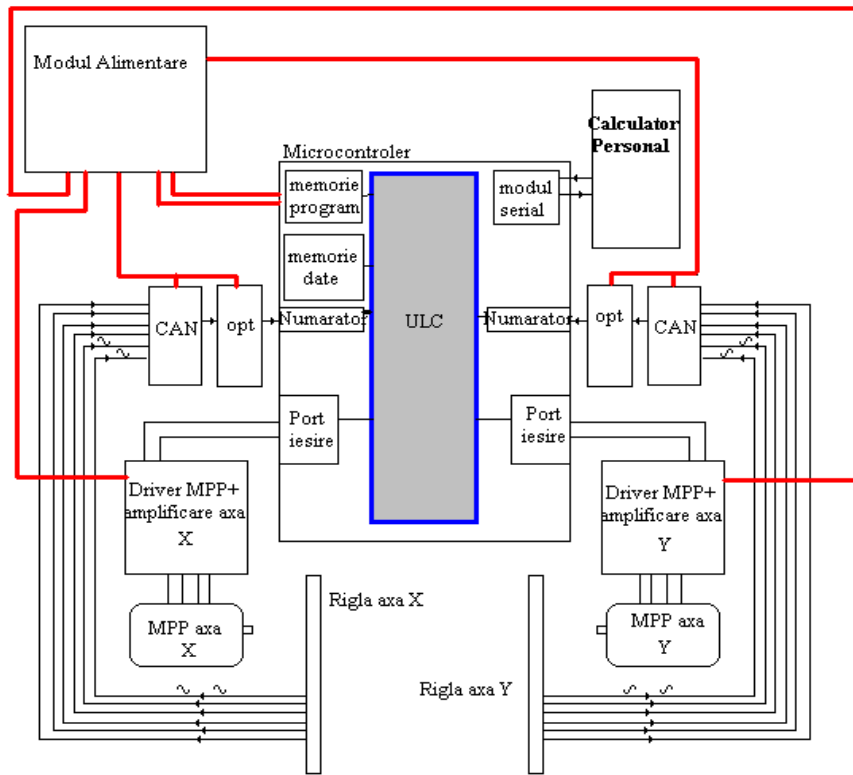


Fig. 3.1. – Schema bloc de realizare a unui modul de reglare automată a interstițiului eroziv pentru o mașină de eroziune electrică cu fir pentru două axe folosind microcontroler

În schema propusă se observă în centru existența unui microcontroler care are subliniate principalele module folosite de aplicația noastră, anume :

- modulul serial – este folosit pentru comunicarea cu un calculator personal, care are rolul de a proiecta piesa dorită, de a genera coordonatele intermediare ale firului în descrierea conturului piesei și de urmărire a procesului.

- Memoria de date – este folosită pentru depozitarea datelor primite de la calculator, precum și de depozitare a datelor necesare bunei funcționări.
- Porturile ieșire – folosite pentru generarea semnalelor de comandă a motoarelor pas cu pas în vederea deplasării firului pe conturul piesei. Semnalele de la pinii microcontrolerului sunt preluate de driverul motorului pas cu pas și transmis la bornele motorului. Astfel putem cu ajutorul a doi pini (unul pentru semnal de avans și unul pentru semnal de direcție) să comandăm un motor de putere mai mare.
- Numărătoarele – sunt folosite pentru a afla poziția firului. Semnalele primite la pinii numărătoarelor unui microcontroler sunt generate de riglele de poziție X și Y, acestea generând un semnal sinusoidal care este apoi prelucrat și transformat în semnal digital.

Pe lângă microcontroler cu modulele incorporate prezentate mai sus se mai observă modulul numit „opt” care este un modul format de optocuploare având rolul de a proteja porturile microcontrolerului de eventualele semnale parazite și de o intensitate mare care ar putea distruge microcontrolerul.

Modulul de alimentare are rolul de a alimenta întregul sistem. Este de subliniat că acest modul generează tensiuni diferite pentru fiecare modul în parte, în funcție de necesitatea acestuia.

3.2. Soluții hardware de conducere a procesului cu ajutorul calculatorului.

Pentru reconstrucția și modernizarea mașinii de prelucrare prin eroziune electrică cu fir, mașină construită în anii '80 și re tehnologizată la sfârșitul anilor '99, au fost nevoie de echipamente electronice moderne, care să îndeplinească funcțiile impuse de noile tehnologii de conducere a procesului de prelucrare.

Situația mașinii de eroziune electrică cu fir de tipul Elerofil, aflată în dotarea laboratorului de eroziune electrică a Facultății de Mecanică, prezentată în capitolul 2.7, a fost modernizată conform schemei bloc prezentată în fig. 3.1.

În cele ce urmează sunt prezentate modulele electronice și echipamentele hardware folosite în conducerea cu calculatorul a procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu fir, precum și modul de configurare și programare a acestora.

3.2.1. Microcontrolerul PIC16F877A

În acest paragraf vom prezenta doar succint câteva caracteristici principale ale acestui microcontroler, documentația tehnică a acestuia întinzându-se pe mai bine de două sute de pagini.

Unitatea centrala de procesare :

- doar 35 de instrucțiuni
- toate instrucțiunile se execută într-un singur ciclu, cu excepția celor de ramificare a programelor, care se execută în două cicluri
- viteza de lucru : 20 Mhz / 200 ns per instrucțiune
- până la 8K x 14 cuvinte de memorie flash de program
- până la 368 x 8 octeți de memorie de date RAM

- până la 256 x 8 octeți de memorie de date EEPROM
- compatibil pin la pin cu alte microcontrolere de 28, 40 sau 44 de pini

Periferice :

- timer0 : contor pe 8 biți cu preîncărcare
- timer1 : contor pe 16 biți, cu preîncărcare, poate fi incrementat din exterior chiar și în modul Sleep
- timer2: contor pe 8 biți cu preîncărcare
- port serial sincron cu SPI și I²C
- USART cu adresare pe 9 biți
- port paralel pe 8 biți cu linii externe RD, WR și CS
- circuit de resetare la brown-out

Caracteristici analogice :

- convertor analog numeric, până la 8 canale, precizie de 10 biți
- modul comparator analog cu :
 - o două comparatoare analogice
 - o modul programabil de tensiune de referință
 - o ieșirile comparatoarelor sunt accesibile din exterior

Caracteristici speciale ale microcontrolerului :

- 100.000 de cicluri de ștergere / scriere a memoriei Flash
- 1.000.000 de cicluri de ștergere / scriere a memoriei EEPROM
- perioadă de reținere a informațiilor în EEPROM mai mare de 40 de ani
- autoprogramabil prin soft
- programare serială în circuit prin doi pini
- circuit basculant RC propriu pentru watchdog
- protecție programabilă a programului
- mod de economisire a energiei
- depanare în circuit prin doi pini

Tehnologie CMOS:

- Flash / EEPROM de viteză mare, consum mic
- domeniu de alimentare 2.0 – 5.5 V
- domenii de temperaturi comerciale sau industriale
- consum redus de energie

Configurarea și programarea microcontrolerului a fost făcută folosindu-se funcțiile de programare implementate pe placa de dezvoltare PICPLC16.

Memoria de date este organizată pe 4 bancuri. În fiecare din cele 4 bancuri există zonă rezervată pentru registrele speciale ale microcontrolerului și o zonă utilizabilă pentru variabilele programului (registrele generale). Selectarea bancului curent se face cu ajutorul a 2 biți din registrul de stare (RP0 și RP1). Prin

intermediul registrelor speciale se poate să se controleze funcționarea circuitului și poate să acceseze (să citească și să scrie) diversele componente interne, în speță interfețe. De exemplu registrele PORTA (adr. 05H), PORTB (adr. 06h), PORTC (adr. 07h) și PORTD (adr. 08H) permit citirea și scrierea celor 4 porturi paralele ale circuitului, iar registrele TMR0, TMR1L, TMR1H și TMR2 controlează contoarele 0, 1 și 2. În mod similar fiecare resursă a circuitului are registre speciale asociate, unele pentru citirea/scrierea datelor propriu-zise, altele pentru programarea și configurarea acestora.

În conducerea procesului de prelucrare microcontrolerul PIC16F877A se programează pentru citirea și numărarea impulsurilor primite de la traductorii de poziție. Comanda motoarelor este dată de comanda directă a porturilor și de două semnale pentru stabilirea sensului de deplasare pe fiecare din axă. Memoria RAM este folosită pentru variabile, pozițiile succesive ale firului ce urmează a fi parcurse și pentru implementarea stivelor de poziție folosite în cazul revenirilor din scurtcircuit. Situațiile de scurtcircuit sunt întâlnite atunci când firul este atins accidental de piesă sau scurtcircuitele pot fi sesizate când firul se apropie foarte mult de piesa, astfel interstițiul eroziv devine prea mic.

Programarea microcontrolerului a fost realizată cu aplicația MicroPascal și MicroC, aplicații folosite exclusiv microcontrolerelor de tipul PIC, având structura codului și funcțiile preluate din limbajele de programare Pascal respectiv C++.

3.2.2. Plăci de dezvoltare

Pentru o aplicație reală, un microcontroler singur nu este de ajuns. În afară de microcontroler, avem nevoie de un program pe care să-l execute, și alte câteva elemente ce constituie o interfață spre mediul înconjurător.

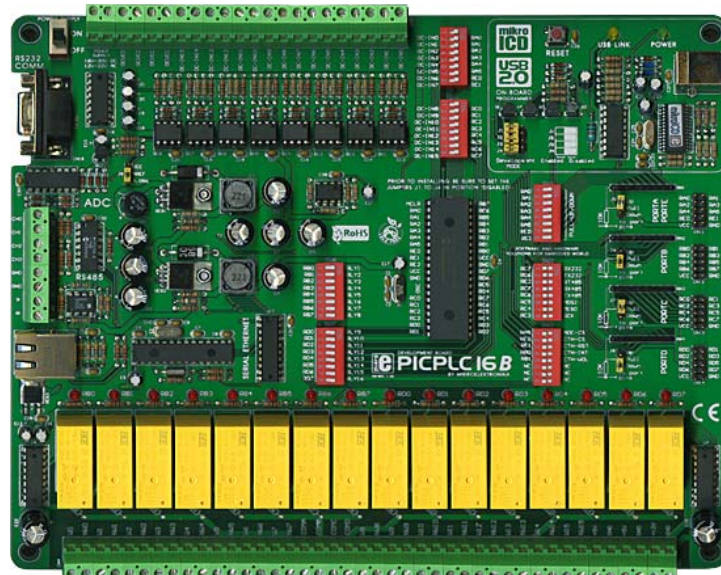


Fig. 3.2 – Placă de dezvoltare PICPLC16

Similar cum un microcontroler este o colecție de piese care se atașează în mod obișnuit unui microprocesor, similar o placă de dezvoltare este o colecție de componente externe microprocesorului, care se folosesc în mod uzual împreună cu acesta pentru un anumit scop.

La dezvoltarea aplicației pentru conducerea cu calculatorul a sistemului de prelucrat prin eroziune electrică cu fir se folosește placa de dezvoltare PICPLC16.

Placa de dezvoltare PICPLC16 este o placă de dezvoltare industrială, oferind facilități industriale sistemului de conducere.

Această placă de dezvoltare ne oferă o modalitate foarte simplă de a comanda 16 consumatori de putere relativ mare, prin relee, în concordanță cu anumite semnale de putere relativ mică. Pentru aceasta, placa dispune de 16 căi de ieșire, prin relee și de 16 căi de intrare, prin optocuploare.

Pe scurt, celelalte caracteristici sunt :

- dispune de programator pe USB integrat
- depanare în circuit
- port RS-232
- port RS-485
- jumperi pentru legarea rezistențelor fie la masă, fie la alimentare
- configurare ușoară folosind micro-întrerupătoarele integrate
- convertor analog numeric
- porturi IDC10 care permit extinderea capacităților plăcii

Placa de dezvoltare PICPLC16, a fost folosită pentru a realiza interfața între mașina de prelucrat și calculator. Această placă a fost aleasă în urma mai multor încercări experimentale atât de programare software cât și de fiabilitate în timpul procesului, proces considerat industrial.

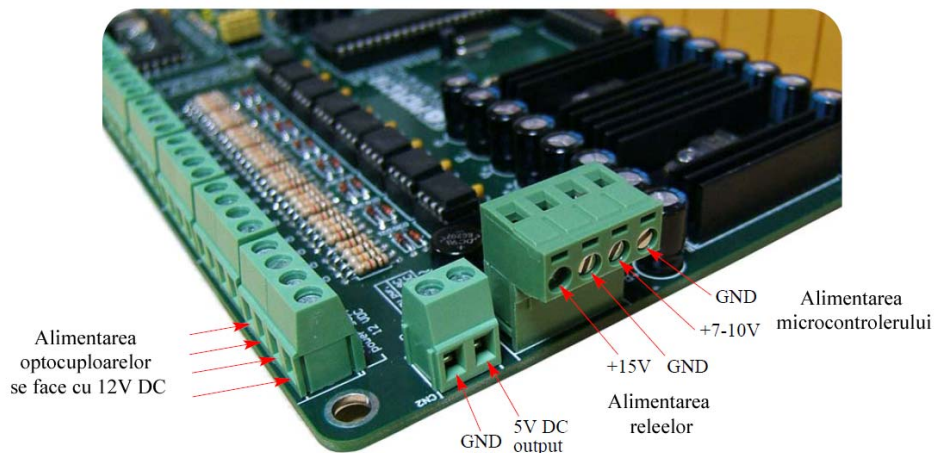


Fig. 3.3. Modulul de alimentare al plăcii de dezvoltare PICPLC16

Alimentare plăci de dezvoltare este foarte importantă. Aceasta putându-se face în două feluri

- de la portul USB. Avantajul este că nu e nevoie de o sursă separată de alimentare, dar totodata este obligatorie legatura între placa de dezvoltare și un calculator personal.

- extern, de la o sursă separată de 12V AC/DC. Acest mod de alimentare este unul avantajos după ce programarea microcontrolerului, precum și setările întregii plăci sunt făcute pentru o aplicație specifică, iar placa nu mai este conectată la un PC cu ajutorul modului de programare pe portul USB.

Pentru comanda cu procesului placa de dezvoltare a fost alimentată de la o sursă ATX a unui PC. Modul de alimentare este făcut ca în figura 3.3. Tensiunile folosite fiind în principal 0-12V.

Sursa folosită pentru alimentare, fiind o sursă ATX, furnizează tensiuni stabile, fără fluctuații care ar putea afecta procesul de prelucrare și, nu în ultimul rând, aceasta este capabilă de a furniza curentul necesar releelor și microcontrolerului.

Pentru a putea implementa funcțiile plăcii de dezvoltare este nevoie de studierea acestora în detaliu. Nu toate facilitățile plăcii de dezvoltare au fost folosite în această aplicație.

Pentru conducerea procesului, este nevoie de citirea anumitor parametri precum citirea numărătoarelor pentru aflarea poziției firului, citirea stărilor de scurtcircuit, pornire generator, starea apei. Aceste citiri se fac prin configurarea porturilor ca și intrări, porturile folosite sunt porturi protejate prin optocuploarele plăcii.

Accesul direct la porturile microcontrolerului prin intermediul plăcii de dezvoltare.

Pentru a putea dezvolta mai multe tipuri de aplicații, mikroelektronika, a dotat această placă de dezvoltare cu conectori pentru a putea trimite orice semnal de la un echipament extern direct la portul microcontrolerului.

Există patru conectori, pentru porturile A,B,C și D în parte, fiecare având 10 pini, unul de masă, unul de alimentare și cei 8 pini pentru fiecare bit în parte al portului.

Pentru conducerea procesului au fost folosiți portul B și D pentru date, semnalizare evenimente, acționare motoare, iar pentru citirea informațiilor de la traductori a fost folosit portul C.

Pentru a putea avea acces la porturi acestea trebuie inițializate. Inițializarea portului RB ca fiind port de ieșire și pinul 3 de la portul C să fie de intrare s-a realizat conform următoarelor linii de cod MicroC:

```
void main(){
    TRISB = 0; // setare port B pentru ieșire
    TRISC3_bit = 1; // setare port C.3 pentru intrare
}
```

Comunicarea serială prin porturi RS232

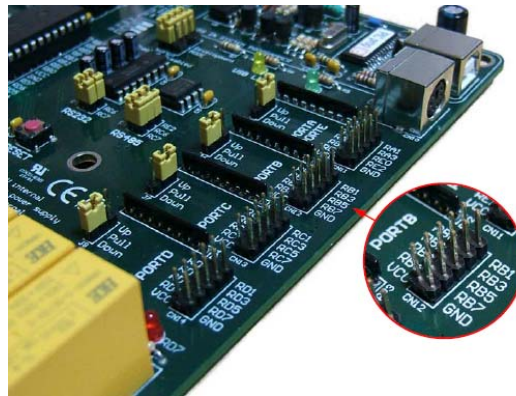


Fig. 3.4. – Conectorii pentru accesul direct la porturile microcontrolerului

Comunicare cu alte echipamente electronice este foarte importantă, de aceea placa de dezvoltare PICPLC16 vine dotată cu un port pentru comunicare punct-la-punct serială – RS232.

Cu ajutorul acestor două porturi RS232 se pot realiza comunicări cu dispozitive performante de achiziție de date, prelucrare primară a datelor achiziționate iar apoi trimiterea datelor către un calculator personal.

În figura 3.5 este prezentat portul de comunicare.

Se observă că transferul se realizează cu ajutorul unui circuit integrat, standar pentru acest tip de aplicații, MAX232, iar semnalele RX și TX ajung la porturile microcontrolerului printr-un comutator SW3. Astfel existând posibilitatea stabilirii sau inactivării comunicării seriale.

La prelucrarea prin eroziune electrică modulul serial a fost folosit pentru comunicare cu calculatorul pentru transmiterea de informații referitoare la starea procesului, poziția firului dar și pentru preluarea următoarelor poziții ale firului. Comunicarea a fost inițializată la o viteză de 9600 bps, o viteză suficient de mare pentru o astfel de aplicație.

Programarea portului serial și o secvență de cod care realizează citirea informațiilor de la calculator și transmiterea altor informații se face conform următorului cod MicroPascal.

```
begin
  UART1_Init(9600);
  Delay_ms(100);
  UART1_Write_Text('-= CNC =-');
  UART1_Write(10);
  UART1_Write(13);
  UART1_Write_Text('CNC initializat');
  while (TRUE) do
    begin
      if (UART1_Data_Ready() <> 0) then
        begin
          informatie:=UART1_Read();
        end;
    end;
  end.
```

Un alt modul foarte important și folosit în dezvoltarea aplicației este modulul de programare.

Programarea microcontrolerului se face prin realizarea programului MicroC sau Micropascal, anumite funcții fiind realizate, unele chiar experimental, în Microc,

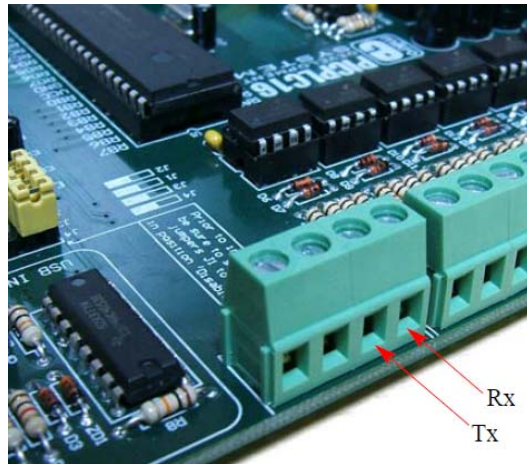


Fig. 3.5. – Modulul de comunicare serială RS232

majoritatea programelor și chiar programul final fiind realizat în Micropascal. După realizarea programului se compilează, fiind specificate tipul microcontrolerului, configurări referitoare la frecvențe de lucru, etc. Se generează un fișier ce ulterior prin portul USB cu ajutorul unui soft pentru programarea microcontrolerelor de tip PC (PicFlash2) și datorită modului de programare integrat pe placa de dezvoltare, programul este încărcat în memoria program a microcontrolerului. Astfel acesta este rulat de fiecare dată când placa este alimentată cu energie electrică.

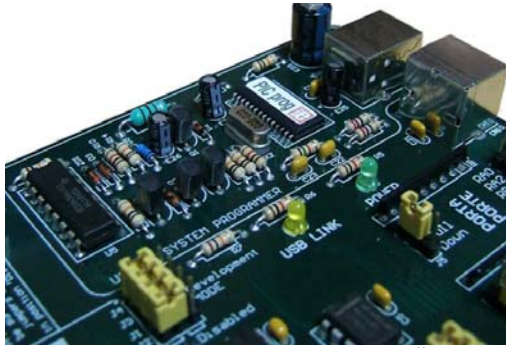


Fig. 3.6. Modulul de programare al plăcii de dezvoltare PICPLC16

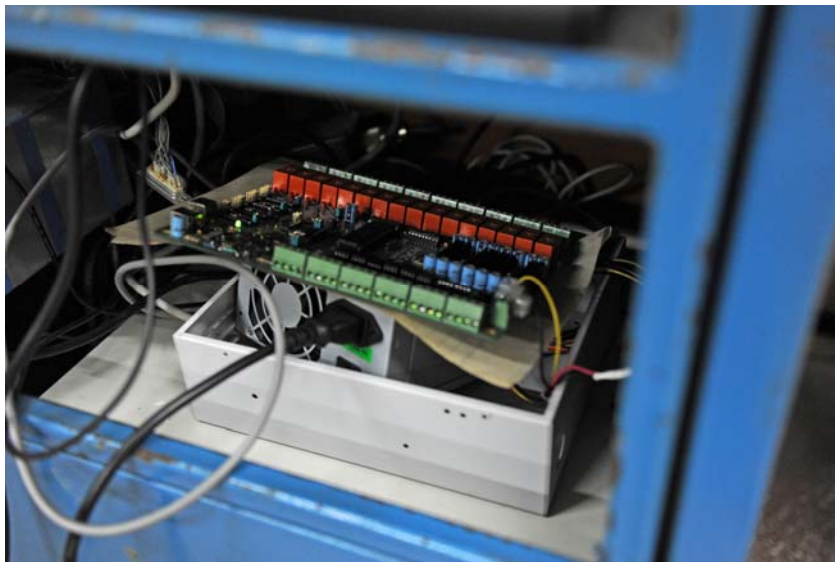


Fig. 3.7. Placa de dezvoltare montată în mașina de prelucrare prin eroziune electrică cu fir

3.2.3. Configurarea calculatorului pentru comanda procesului de prelucrare

Ca și stand experimental s-a realizat o mașină prin eroziune electrică cu fir în cadrul laboratoarelor facultății de mecanică. Această mașină a fost realizată prin re-echiparea unei mașini vechi cu sistemul experimental dezvoltat în prezenta teză.

Pentru punerea în practică a studiilor realizate și a rezultatelor obținute a fost realizat un software complex, acesta fiind instalat pe un sistem PC. Pentru a putea realiza conducerea procesului și monitorizarea mașinii de eroziune electrică cu fir a fost necesar de un sistem având următoarele cerințe minime.

- procesor Pentium IV, minim 1.5Ghz, acesta fiind necesar pentru a putea executa operațiile necesare calculului traiectoriei firului pe conturul piesei în timp real. Pe lângă această necesitate a fost realizat un spor de putere pentru a putea îndeplini funcțiile de supraveghere a mașinii cu ajutorul unei camere video. S-a ținut cont și de eventuala uzură morală.

- două porturi seriale. Fiind necesare unul pentru monitorul dotat cu touch-screen pentru comanda mai ușoară a mașinii. A doilea port fiind necesar pentru comunicarea cu placa de dezvoltare PICPLC16

- un port game-port pentru a putea fi folosit un game-pad pentru poziționarea firului în modul manual. Acesta fiind un element mobil, face posibilă urmărirea atentă a poziției firului, vizual, îndeplinind funcția și de telecomandă industrială.

- pentru comanda de la distanță a mașinii de prelucrat prin eroziune electrică cu fir, a fost instalat un sistem consacrat pentru supravegherea sistemelor de calcul de la distanță TeamViewer. Aceasta realizează cu ajutorul internetului o captura a ecranului pc-ului și o transmite la distanță. Comanda este preluată de la sistemul aflat la distanță prin tastatură, mouse,etc.

- Webcam, destinat urmării mașinii sau a procesului. Această funcție fiind foarte utilă la operarea de la distanță.

- aplicația Elerofil 2010, fiind aplicația proiectată și realizată destinată să realizeze conducerea și monitorizarea mașinii de prelucrat prin eroziune electrică cu fir cu ajutorul echipamentelor hardware și software studiate, proiectate, executate și descrise în prezenta teză de doctorat.

- memorie 512 MB.

- porturi PS2 pentru conectarea tastaturii și al mouse-ului.

- placă rețea 100Mbps.

- sistem de operare windows XP.

- existența diferitelor programe de proiectare asistată de calculator, gen Autocad, Katia, etc, fiind opționale.

3.3. Soluții software de conducere a procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu fir

3.3.1 Soluții software pentru comanda și supravegherea procesului și a mașinii de la distanță



Fig. 3.8. Aplicația Team Viewer

TeamViewer este o soluție ieftină și rapidă pentru a controla computerul unui alt utilizator. Se poate transfera fișiere sau se poate afla ce probleme are computerul respectiv. Pentru a se conecta la alt computer este nevoie să fie instalat TeamViewer pe ambele calculatoare. Conexiunea se realizează folosind ID-ul generat automat al partenerului și conexiunea se va realiza instantaneu. Având peste 60 de milioane de user-i TeamViewer este una dintre standardele pentru a acorda asistență și suport calculatoarelor aflate la distanță. De menționat că această aplicație nu a mai fost folosită în comanda unei astfel de mașini. Aplicația a răspuns pozitiv necesarului de comandă la distanță întrucât a permis efectuarea comenzilor de la calculatorul aflat de la distanță prin intermediul tastaturii și mouse-ului acestuia.

Pentru vizualizarea prelucrării și a mașinii de prelucrat prin eroziune electrică cu fir, la distanță, a fost folosit un webcam conectat pe portul USB al calculatorului.

Datorită webcam-ului, driverelor acestuia și a aplicației Elerofil 2010, aplicație realizată special pentru comanda mașinii, pe ecranul monitorului este afișat video procesul de prelucrare. Prin intermediul aplicației teamviewer desktopul calculatorului este preluat și transmis la distanță calculatorului de pe care, acum, se face comanda.

Pentru a putea crește performanțele sistemului de monitorizare a fost folosit un webcam cu o calitate ridicată a imaginii, iar acesta este dotat cu un sistem de prindere care ajută la amplasarea acestuia în diferite poziții în funcție de interesul dorit.

Sistemul este un sistem experimental, care s-a dovedit funcțional, care poate fi folosit mai ales în activitatea de predare, atunci când ar fi indicată activitatea de predare în alt loc decât prelucrarea efectivă, aceasta producând uneori un nivel ridicat de zgomot. Sistemul poate fi îmbunătățit prin adăugarea de alte elemente de comandă, mai multe camere, camere speciale orientabile de la

Pentru a putea realiza comanda la distanță a mașinii de prelucrat prin eroziune electrică cu fir s-a folosit o aplicație foarte des folosită de administratorii de rețea pentru a putea remedia diferitele probleme apărute într-un anumit sistem din rețea.



Fig. 3.9. Webcam folosit pentru monitorizarea vizuală a mașinii

calculator. Sistemul experimentat poate fi folosit și în cazul unor prelucrări prin eroziune electrică desfășurate într-un mediu toxic.

3.3.2. Arhitecturi software pentru generarea traiectoriei firului

Datorită importanței covârșitoare pe care o au algoritmi de interpolare folosiți la realizarea preciziei poziționărilor și traiectoriilor se prezintă bazele algoritmice utilizate la elaborarea pachetelor de programe.

S-au considerat următorii algoritmi:

- algoritmi de tip ADN

- algoritmi bazați pe calculul unui discriminant, în funcție de semnul căruia se apreciază poziția punctului curent al traiectoriei approximate față de curba reală;

- algoritmul diferenței coordonatelor, bazat pe emiterea de impulsuri pe cele două axe cu o frecvență comandată după o anumită lege;

- algoritmi cu calculul direct al funcției prin metoda octanților.

În continuare se abordează algoritmul bazat pe calculul unui discriminant, algoritm utilizat cu bune performanțe la conducerea cu calculatorul a mașinilor de prelucrare prin electroeroziune cu electrod filiform . [Reviczky, 1999b], [Reviczky, 2004]. [Slavici, 2006b], [Gubencu, 2009].

Interpolarea liniară

Fundamentul acestui algoritm este calculul unui discriminant D adecvat, al cărui semn precizează poziția punctului curent al traiectoriei față de conturul nominal de prelucrat.

Schema de principiu este prezentată în *figura 3.10* în care s-au utilizat aceleași notații cu cele utilizate în cadrul sursei în limbajul C, prezentate la sfârșitul acestei lucrări.

x_{54} , y_{54} - coordonatele punctului inițial (punctul de început al interpolării liniare);

x_{64} , y_{64} - coordonatele punctului final (punctul de sfârșit al interpolării liniare);

Coeficientul unghiular al dreptei definite astfel prin două puncte este evident $panta = \arctg (= (y_{64} - y_{54}) / (x_{64} - x_{54}))$;

Se definește variabila suplimentară sm care are valoarea:

1 - în cazul în care $panta < 0$, corespunzând deci unghiului cu valori în intervalul (90, 180) grade;

-1 - în cazul în care $panta \geq 0$, corespunzând deci unghiului cu valori cuprinse în intervalul [0, 90] grade;

Se consideră un punct curent P , de coordonate x_{20} , y_{20} , propunându-ne în continuare să determinăm poziția acestuia față de segmentul $PinPfin$; evident ca să se poate defini un nou segment de dreaptă $PinP$, al cărei coeficient unghiular m este definit de relația:

$$m = \arctg (= (y_{20} - y_{54}) / (x_{20} - x_{54}))$$

Mecanismul interpolării liniare impune testarea continuă a poziției punctului P și corectarea poziției sale cu pași astfel determinați încât să se asigure readucerea pe segmentul nominal Pin , $Pfin$; în cazul punctului P , este evident că această readucere se face prin intermediul unui segment dx paralel cu axa x ; pentru

3.3. Soluții software de conducere a procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu fir 85

comparație se prezintă pe aceeași figură cazul unei poziții P', la care readucerea pe segmentul PinPfin se face prin intermediul unui segment dy, paralel cu axa y.

Se pune problema determinării unui criteriu de apreciere a necesității de a se face corecția pe axa x sau axa y;

Se definește discriminantul

$$\begin{aligned} \text{delta} = \\ \text{delta} = sm * ((x64 - \\ x54) * (y20 - y54) - (y64 - \\ y54) * (x20 - x54)); \end{aligned}$$

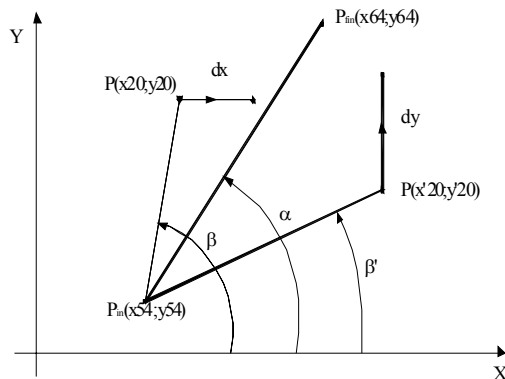


Fig. 3.10 Interpolarea liniară

În cazurile în care $\text{delta} > 0$ sau segmentul de interpolare este paralel cu axa y, se comandă efectuarea unui pas pe axa y, în caz contrar comandându-se efectuarea unui pas pe axa x.

Observație: sensul mișcării se determină aprioric lansării algoritmului de interpolare prin setarea unor variabile de sens, aferente celor două axe, și anume:

se1=1 pentru $x54 < x64$ și -1 în caz contrar

se2=1 pentru $y54 < y64$ și -1 în caz contrar

[Reviczky, 1999b], [Reviczky, 2004]. [Slavici, 2006b], [Gubencu, 2009].

Interpolarea circulară

Schema de principiu este prezentată în fig. 3.11

Problema este asemănătoare cu interpolarea liniară, dar în această situație trebuie determinat un alt criteriu care să determine condiția de efectuare a unui pas pe axa x sau axa y. Criteriul utilizat va fi comparația distanței de la punctul studiat la centrul cercului cu raza acestuia:

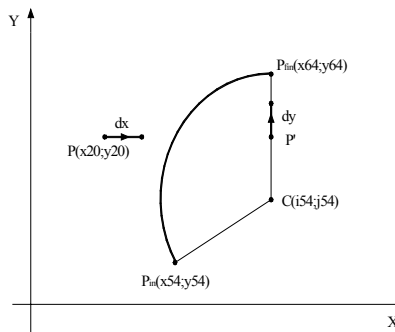


Fig. 3.11. Interpolarea circulară

- astfel în cazul punctului P, de coordonate x_{20}, y_{20} , distanța P_c este mai mare decât raza cercului impunându-se efectuarea unui pas de corecție dx paralel cu axa x ;

- în cazul punctului P', distanța sa până la centrul C al cercului este mai mică decât raza, și în această situație se impune efectuarea unui pas de corecție dy paralel cu axa y ;

Aceste raționamente au condus la determinarea următoarei expresii pentru discriminatul delta:

$$\text{delta} = ((x_{20} - i_{54}) * (x_{20} - i_{54}) - (x_{54} - i_{54}) * (x_{54} - i_{54}) + (y_{20} - j_{54}) * (y_{20} - j_{54}) - (y_{54} - j_{54}) * (y_{54} - j_{54})) * \text{cadran};$$

Interpretarea semnului delta este identică cu situația interpolării liniare;

În cazul prelucrării prin eroziune cu electrod filiform conducerea adaptivă a avansului are o importanță excepțională însăși în condiționarea și continuitatea procesului de prelucrare în principal, și de asemenea determină productivitatea prelucrării și precizia suprafețelor; dependent de tipul de generator utilizat informația asupra stării intesității este preluată și prelucrată în diferite moduri determinând și condiționând efectuarea în continuare a mărimii de avans.

În cazul studiilor efectuate s-au utilizat generatoare de tip GEP, la care condiționarea avansului este dată de prezența unui tren de impulsuri emise de generator; frecvența impulsurilor este o măsură a mărimii avansului posibil, practic generatorul incorporând un convertor tensiune-frecvență.

a) mișcarea de avans

În cadrul algoritmului elaborat, trenul de impulsuri generat de generator atacă intrarea unui numărător; starea acestui numărător este citită periodic în cadrul programului cu instrucțiuni C de tipul:

```
nou = import (ADRESA_BAZA + deplasament);
```

în care adresa de bază este adresa văzută de calculator pentru placa care conține numărătorul, iar deplasamentul este adresa registrului component al numărătorului. Această valoare întregă este comparată cu valoarea ultimei citiri și este permisă efectuarea în continuare a avansului numai în situația în care există diferența $\text{nou} \# \text{vechi}$ printr-o instrucțiune de tipul:

```
if (nou != vechi)
```

```
{ se desfășoară mișcarea de avans }
```

Din examinarea relației de mai sus este evident că în lipsa impulsurilor de la generator nu se poate desfășura în continuare mișcarea de avans intrându-se într-o buclă de așteptare cu testarea în continuare a stării numărătorului

Se analizează în continuare comanda directă a convertoarelor de putere pentru MPP. În această situație semioctetul necesar pentru comanda convertorului are următoarea componentă;

- bit 0(4) - s_x = avansul pe axa x , egal cu 1 pentru sens pozitiv și 0 pentru sens negativ x ;
- bit 1(5) - s_y = avansul pe y cu aceeași codificare
- bit 2(6) - t_x = tactul pe axa x , valoarea 1 reprezentând palier la nivelul 1 logic, iar valoarea 0 palier la nivelul 0 logic;
- bit 3(7) - t_y = tactul pe axa y , cu aceeași semnificație;

Conform acestei codificări, de exemplu mișcarea pe axa $y+$ presupune următoarea succesiune de semiocteți transmiși spre convertor:

```
outport ( o | 0x60 & 0x7f);
```

3.3. Soluții software de conducere a procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu fir 87

- push1 (o & 0xdf);
- outport (0 & 0xdf);
outport (o | 0x60 & 0x7f);
- push1 (o & 0xdf);
- outport (0 & 0xdf)
-

S-a notat cu o valoare curentă a octetului, observându-se prezența unor operații logice la nivel de bit înainte de transmiterea datelor spre convertor în scopul setării numai a biților specifici și neafectarea celorlalți; astfel la primul outport s-au utilizat două etape:

- sau logic cu 0x60 = 0110 0000 cu efect de setare pe 1 a lui sy semnificând alegerea sensului + pe y și de asemenea tx=1 cu rol de a inhiba un eventual tact nedorit pe axa x;

- etapa doua, corespunzând unui și logic cu 0x7f=0111 1111, cu efect de forțare ty=0 corespunzătoare primului front corespunzător unui tact;

A doua instrucțiune este push1 (o & 0xdf), punându-se deci în stivă 1(se va justifica la punctul următor unde se vor trata revenirile din scurtcircuit) octetul curent dar după efectuarea funcției și logic cu 0xdf= 1101 1111. [Reviczky, 1999b], [Reviczky, 2004], [Slavici, 2006b], [Gubencu, 2009].

b) retragerea în cazul existenței unui scurtcircuit

Prezența unui scurtcircuit este detectată prin interogarea unui bit (deci efectuarea unui pooling), bit component al unuia dintre registrele componente ale interfeței paralele LPT a calculatorului; ciclul de retragere din scurtcircuit are deci următoarea transcriere în cod sursă C:

```
while (scurt !=)0 {  
    scurt = (( inport(0x379) & 0x80)  
    .  
    desfășurare avans  
    .....  
}
```

Problema de maximă importanță care se pune în cadrul retragerii din scurtcircuit este ca traiectoria de retragere să fie identică cu cea generată în cazul mișcării precedente de avans; dintre soluțiile utilizate s-a optat pentru salvarea într-o stivă a codurilor tuturor pașilor efectuați în mișcarea de avans.

Sucesiunea de instrucțiuni în această situație este următoarea:

f2=pop1(); extragerea din stiva creată la mișcarea de avans, urmată de transmiterea octetului spre convertorul de putere;

```
outport(adr,f2);  
PUSH2(F2^0X30);
```

f2=pop1(); urmează al doilea grup de trei instrucțiuni corespunzătoare celui de-al doilea front component al unui tact

```
outport(adr,f2);  
PUSH2(F2^0X30);
```

[Reviczky, 1999b], [Reviczky, 2004], [Slavici, 2006b], [Gubencu, 2009].

c) mișcarea de revenire în situații speciale

La acest punct se tratează situația delicată în cazul în care retragerea în urma unui scurtcircuit a generat situația nedorită de a se reveni în fraza precedentă; în cazul multor

echipamente de comandă numerică tradiționale apariția unui scurtcircuit în cazul trecerii de la o frază la precedenta conduce în multe situații la erori inadmisibile. Acest caz este detectat în program de prezența valorii negative a indicelui global $i1p$; algoritmul este următorul:

extragere din stiva creată la deplasarea în cazul scurtcircuitului și trimiterea spre convertor în cazul primului front component al tactului;

```

while (i1p<0) {
    f2=pop2();
    outport(adr, f2);
    f2=pop2();
    outport(adr,f2);
    .....
}

```

Din considerente de utilizare industrială s-au impus trei posibilități de lucru:

- prelucrare propriu-zisă - în care se comandă elementele de execuție avansul fiind stabilit adaptiv în funcție de desfășurarea procesului;
- desenare - caz în care comanda se realizează cu un avans constant ; se utilizează pentru verificarea în regim de comandă utilaj a programului;
- verificare - situație în care nu se comandă efectiv utilajul ci numai desenarea pe displayul calculatorului.

Din punct de vedere soft diferențierea între cele trei variante se realizează prin utilizarea unor variabile întregi astfel:

- variabila timp care are valoare 0 în cazul desenării și vizualizării și o valoare întreagă pozitivă în cazul prelucrării propriu-zise; ea se determină în corelație cu structura hard a blocului de avans specific generatorului;

- variabila syncro=0 în cazul prelucrării propriu-zise și egală cu 1 în celelalte situații; apare în cadrul instrucțiunii

nou = vechi + syncro;

în care nou și vechi sunt conținuturile actual și anterior a registrului numărător de impulsuri primite de la generator;

- variabila scurt=0 în cazul desenării și vizualizării pentru a elimina chiar și teoretic posibilitatea de a apariție a scurtului, evident în cazul prelucrării efectuându-se un pooling asupra unui bit special.

Este evident că datorită lucrului în bucla închisă de poziție se pune problema de a efectua reglajul de poziție conform legilor specifice reglării automate prin comparația poziției prescrise (w)

cu cea reală (reacția r); problema se încadrează în teoria generală a sistemelor de reglare automată, sistemul prezentat făcând parte din categoria sistemelor de reglare automată numerice (SRAN);

Conform teoriei SRAN trebuie determinate două elemente specifice reglajului numeric: [Reviczky, 1999b], [Reviczky, 2004], [Slavici, 2006b], [Gubencu, 2009].

- a) legea de reglare** - în urma studiului teoretic dar și a încercărilor experimentale - s-a optat pentru o lege neliniară de tipul tripozițional (*figura 3.12*). Această lege asigură o variație a abaterii între două limite amîn și amax impuse din considerente de precizie dimensională.

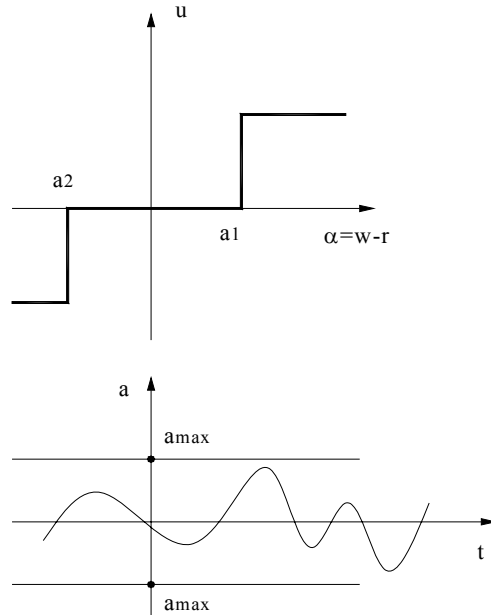


Fig. 3.12. Lege neliniară de tipul tripozițional

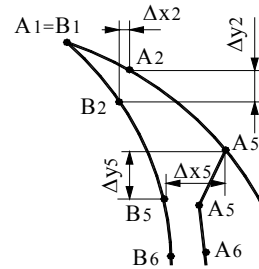


Fig. 3.13. Traiectoria nominală

Concretizând cele expuse anterior se prezintă în figura 3.13 traiectoria nominală marcată prin punctele A1,A2, ...A5 și cea efectivă marcată prin punctele B1,B2,...B5...; perechile de puncte Ak,Bk corespund câte unei eșantionări respectiv câte unei citiri a traductorului de poziție; în fiecare situație se calculează diferențele $\Delta x = x_{nominal} - x_{efectiv}$ și $\Delta y = y_{nominal} - y_{efectiv}$;

În situația în care delta x sau delta y sunt mai mari decât o valoare admisă se efectuează corecția traiectoriei prin întreruperea algoritmului de interpolare și executarea unui segment de corecție; în fig.6.5 s-au prezentat două situații:

- în cazul poziției A2, $\Delta x_2, \Delta y_2 <$ valoarea admisă și deși există o eroare de traiectorie se apreciază că aceasta se încadrează în zona de toleranță și nu se efectuează nici o corecție;

- în cazul poziției A5, Δx_5 sau Δy_5 sunt mai mari decât eroarea admisă și în consecință corecția de traiectorie se va manifesta prin executarea segmentului A5A'5 de readucere pe traiectoria nominală, poziția A'5 fiind la limita identică cu poziția B5, dar real și segmentul de corecție A5A'5 este însoțit de erori.

În programul elaborat segmentul de corecție este tratat ca orice segment care generează o interpolare liniară, fiind posibile cele trei faze tehnologice de lucru analizate la anterior și anume: mișcare de avans (a), retragere din scurtcircuit (b), revenire după scurtcircuit în cazuri speciale (c). În cadrul experimentărilor efectuate s-au testat diferite valori ale valorii maxim admisibile ale erorii în domeniul 0.004 -

0.012 mm; o valoare prea mică a erorii admise conduce la o executare prea frecventă a segmentului de corecție generând o instabilitate a procesului.

[Reviczky, 1999b], [Reviczky, 2004], [Slavici, 2006b], [Gubencu, 2009].

b) timpul de eșantionare - este o caracteristică foarte importantă sistemelor de reglare numerice, în acest context al reglării poziției având o semnificație deosebită în cazul reglării poziției; se impune realizarea unui compromis productivitate,

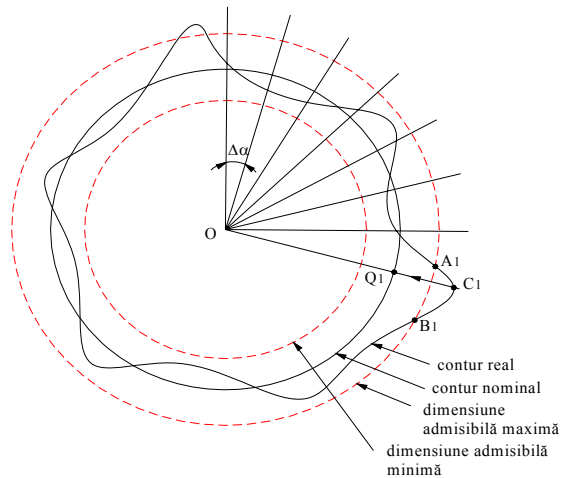


Fig. 3.14 Interpolare circulară cu corecție

precizie de prelucrare, un timp de eșantionare prea mic generând o bună precizie dar scăzând productivitatea datorită prezenței prea multor segmente de corecție; în cadrul programelor elaborate timpul de eșantionare nu are o valoare absolută, ci este raportat ca un multiplu la numărul de pași teoretici efectuați; s-au experimentat valori ale lui n cuprinse în domeniul $(100,300)^*$ timpul pe pas elementar (teoretic); în figura 3.14 este prezentată situația unei interpolări

circulară, măsura timpului de eșantionare fiind data convertită în mărimea unghiului $\Delta\alpha$ la care se efectuează citirea traductorilor.

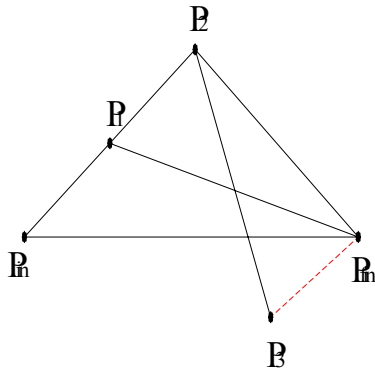


Fig. 3.15 Interpolare circulară, corecție

Observație: în faza finală a cercetărilor s-a elaborat un algoritm de corectare a traiectoriei mai performant schematizat în figura 3.15; astfel în cazul unei interpolări liniare se propune realizarea segmentului

3.3. Soluții software de conducere a procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu fir 91

definit de punctele PinPfin; conform timpului de eșantionare stabilit se face prima citire a traductorilor de poziție depistându-se poziția punctului P1; indiferent de eroarea de poziție a acestuia nu se va mai efectua un segment de corecție ci în continuare interpolatorul își va propune executarea segmentului P1Pfin; similar la următoarele citiri interpolatorul își va propune executarea segmentelor P2Pfin, P3Pfin deși practic se vor executa segmentele: PinP1, P1P2, P2P3, Pn-1Pfin.

[Reviczky, 1999b], [Reviczky, 2004], [Slavici, 2006b], [Gubencu, 2009].

Gestiunea poziției nominale (utilizarea stivelor de poziție).

O problemă de maximă importanță în gestiunea preciziei poziției este gestionarea corectă a poziției teoretice, prescrise în generarea unei traiectorii; problema abordată în cadrul de față este total diferită de problema corectării traiectoriei prin exploatarea informațiilor primite de la traductori, referindu-se practic la corectitudinea conducerii în buclă deschisă.

Dificultatea problemei constă în coexistența celor trei tipuri de mișcări: prelucrare propriu-zisă(a), retragere din scurt (b), revenire după scurt.

În scopul rezolvării problemei s-au creat un număr de patru stive de poziție (câte două pentru fiecare axă x și y), care se gestionează în paralel cu stivele de memorare a codurilor transmise spre convertoarele de putere utilizate pentru comanda MPP. Stivele create sunt implementate software la nivelul plăcii de dezvoltare PICPLC16.

a) prelucrare propriu-zisă

În această situație se salvează în stivele 3 și 5 (figura 3.16) valorile prescrise pentru pozițiile pe axele x și y, dezvoltându-se stivele respective; cele două stive sunt de tipul circular, în sensul că după salvarea în stiva a unui număr de poziții (de exemplu 1000), salvarea noilor poziții se vor face peste cele vechi cu pierderea evidentă a acestora. Simultan are loc și incrementarea contorului teoretic care supravezează generarea teoretică a traiectoriei

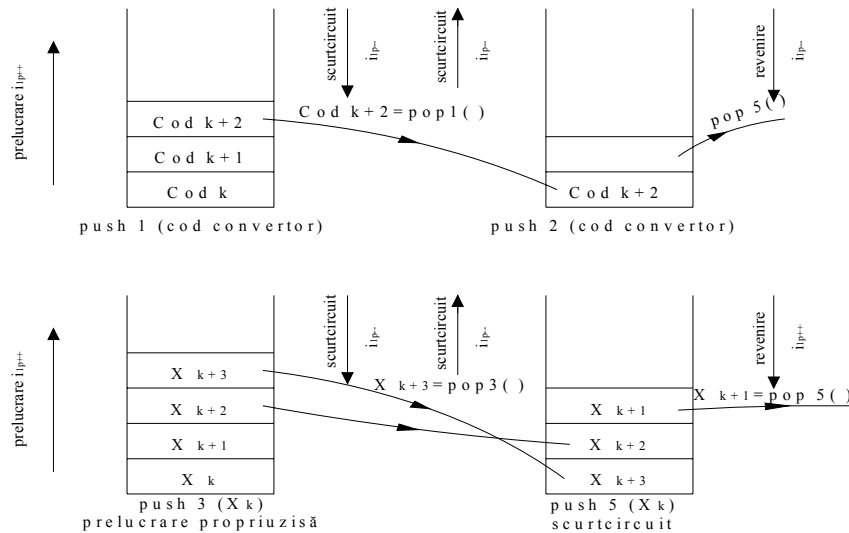


Fig. 3.16 Stive circulare

b) retragerea din scurtcircuit

Conform figurii se realizează o extragere din stivele 3 și 4 create la punctul a) concomitent cu executarea pașilor respectivi și decrementarea contorului global; noi pași efectuați sunt salvați în o a doua pereche de stive 5 și 6 care vor fi exploatate la punctul c;

c) revenirea după scurt-circuit

Simultan cu incrementarea contorului teoretic, se realizează extragerea valorilor pozițiilor din perechea de stive 5 și 6, create în cazul existenței unui scurtcircuit.

La realizarea sistemului a fost nevoie de dezvoltarea a două aplicații software care să comunice între ele.

O aplicație software a fost dezvoltată pentru placa de dezvoltare având următoarele funcții :

1. comanda directă a driverelor motoarelor pas cu pas
2. înregistrarea impulsurilor primite de la traductoarele de poziție în număratoarele microcontrolerului
3. comunicarea cu ajutorul portului serial cu calculatorul
4. recepționarea unei matrici de la calculator în care se cunoaște poziția firului, direcția de mers și următorii 8 pași de prelucrat.
5. conducerea firului pre traiectoria celor 8 pași
6. reducerea erorilor apărute în urma citirii numărătorului ce determină poziția reală a firului
7. implementarea și folosirea stivelor în cazul aparițiilor de scurtcircuite
8. analiza depășirii conturului critic
9. cererea noilor date la terminarea matricii actuale de prelucrat [Reviczky, 1999b], [Reviczky, 2004], [Slavici, 2006b], [Gubencu, 2009].

3.3.3. Arhitecturi Delphi pentru comanda mașinii

Rezultatele obținute în urma cercetărilor experimentale au fost interpretate și folosite în realizarea unui sistem de prelucrare prin eroziune electrică cu fir, sistem implementat și funcțional pe mașina de prelucrare prin eroziune electrică, producție a anilor 80, actualmente modernizată și dotată cu un sistem CNC realizat cu ajutorul unu calculator compatibil IBM PC.

La realizarea sistemului a fost nevoie de dezvoltarea a două aplicații software care să comunice între ele.

Aplicația realizată pentru placa de dezvoltare cu microcontroler de tip PIC trebuie să fie coordonată de calculator. Pentru asta a fost dezvoltat un software cu ajutorul aplicației Delphi 7 prin care se realizează următoarele :

1. comunicarea cu operator uman. Această comunicare se realizează prin mai multe variante :
 - a. tastatură
 - b. mouse
 - c. ecran touch screen
 - d. folosind internetul, acces remote

3.3. Soluții software de conducere a procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu fir 93

2. Primirea de comenzi și soft pentru piesă de la operatorul uman, totodată informarea acestuia de etapele de lucru, procesele desfășurate și, datorită faptului că mașina realizată nu oferă posibilitatea în mod automat a selectării regimului de lucru al generatorului sau reglarea automată a vitezei firului, atunci aplicația informează operatorul de setările ce trebuie făcute.
3. Analiza piesei, calcularea traiectoriei piesei, adaptarea conturului în vederea obținerii calității la nivelul suprafeței prelucrate dar și la nivelul preciziei dimensionale.
4. comunicarea permanentă cu placa de dezvoltare
5. comunicarea permanentă cu restul perifericelor gamepad, webcam, etc.

În figura 3.17 este prezentat un ecran din aplicația Elerofil 2010.

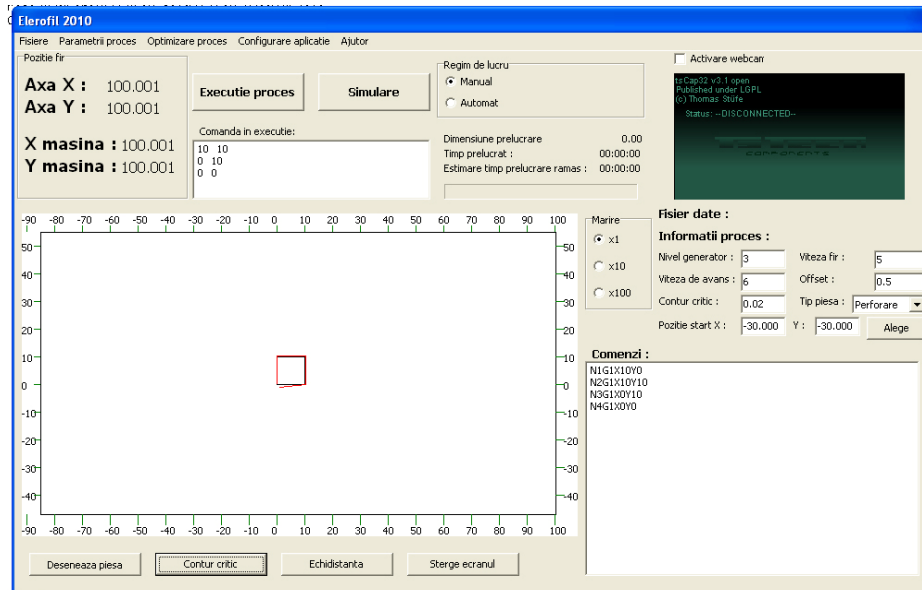


Fig. 3.17. Ecran capturat din aplicația Elerofil 2010

Aplicația permite salvarea și deschiderea fișierelor cu date referitoare la programul de generare al piesei dar și informații referitoare la procesul tehnologic. Extensia stabilită pentru fișierul de date este .FLR, iar structura fișierului de date este conform exemplului următor :

```
generator:3;fir:5;avans:6;offset:0.5;critic:0.02;piesa:1;  
x:-30.000;y:-30.000;  
N1G1X-90.00Y0.00  
N2G1X0.00Y0.00  
N3G1X0.00Y-50.00  
N4G1X0.00Y0.00
```

Fișierul este un fișier standard text, primele două linii ale fișierului sunt informații referitoare la proces, nivelul de tensiune al generatorului, viteza firului,

viteza de avans, abaterea critică, tipul de contur și poziția de start a firului relativă la piesă. În continuare sunt liniile de cod ale programului.

În limbajul Delphi funcția de deschidere a fișierului de date este următoarea:

```

TForm1.Fisiernou1Click(Sender: TObject);
var
  F: TextFile;
  S,t: string;
  a,b : integer;
begin
  if OpenFileDialog1.Execute then { Display Open dialog box }
  begin
    AssignFile(F, OpenFileDialog1.FileName); { File selected in
dialog box }
    Reset(F);
    memo1.Lines.Clear;
    while not eof(F) do
      begin
        Readln(F, S); { Read the first line out of the
file }
        memo1.Lines.Add (S); { Put string in a TEdit
control }
      end;
    CloseFile(F);
    end;
    s:=memo1.Lines.Strings[0];
    //generator
    t:=s;a:=pos('generator',t);delete(t,1,a+9);b:=pos('; ',t);edit1.
Text :=copy(t,0,b-1);
    //avans
    t:=s;a:=pos('avans',t);delete(t,1,a+5);b:=pos('; ',t);edit2.Text
:=copy(t,0,b-1);
    //viteza fir
    t:=s;a:=pos('fir',t);delete(t,1,a+3);b:=pos('; ',t);edit4.Text
:=copy(t,0,b-1);
    //Offset
    t:=s;a:=pos('offset',t);delete(t,1,a+6);b:=pos('; ',t);edit5.Text
:=copy(t,0,b-1);
    //Critic
    t:=s;a:=pos('critic',t);delete(t,1,a+6);b:=pos('; ',t);edit3.Text
:=copy(t,0,b-1);
    //Piesa
    t:=s;a:=pos('piesa',t);delete(t,1,a+5);b:=pos('; ',t);

    val(copy(t,0,b-1),b,a);
    combobox1.ItemIndex:=b;

    s:=memo1.Lines.Strings[1];
    //generator

```

3.3. Soluții software de conducere a procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu fir 95

```
t:=s;a:=pos('x',t);delete(t,1,a+1);b:=pos('; ',t);edit6.Text
:=copy(t,0,b-1);
//avans
t:=s;a:=pos('y',t);delete(t,1,a+1);b:=pos('; ',t);edit7.Text
:=copy(t,0,b-1);
memo1.Lines.Delete(0);
memo1.Lines.Delete(0);
label7.Caption:= extractfileName(OpenDialog1.FileName);
end;
```

Un detaliu important este supravegherea procesului de prelucrare și a mașinii în ansamblu cu ajutorul camerei de tipul WebCam. Pentru îndeplinirea acestei funcții a fost folosit o bibliotecă specială tscap32_rt. Afișarea sau ascunderea informațiilor vizuale asupra procesului se realizează cu ajutorul unui control de tipul CheckBox conform secvenței următoare :

```
TForm1.CheckBox1Click(Sender: TObject);
begin
if checkbox1.Checked then
begin
// checkbox1.Checked := false;
checkbox1.Caption := 'Dezactivare webcam';
tsCap321.Connected := true;
end else
begin
// checkbox1.Checked := true;
checkbox1.Caption := 'Activare webcam';
tsCap321.Connected := false;
end;
end;
```

Comunicarea cu placa de dezvoltare se realizează prin intermediul portului serial, configurat la o viteză de 9600 bps. O structură Delphi pentru trimiterea informațiilor către portul serial COM1 este următoarea :

```
procedure TDD28F1.SendChar(sToSend:string);
begin
CommPort := 'COM1';          (***** 4 start *)
hCommFile := CreateFile(PChar(CommPort),
    GENERIC_WRITE,
    0,
    nil,
    OPEN_EXISTING,
    FILE_ATTRIBUTE_NORMAL,
    0);
WriteFile(hCommFile,
    PChar(sToSend)^,
    Length(sToSend),
    NumberWritten,
    nil);          (***** 4 end *)
```

```
CloseHandle(hCommFile);          (***** 5 *)  
end;
```


3.4. Realizarea unui sistem expert pentru generarea parametrilor pentru mașina de prelucrat prin eroziune electrică

Sub denumirea de "sistem expert" se află acele programe de inteligență artificială sau mașini bazate pe cunoașterea de nivel înalt, comparabilă cu cea a celor mai competenți specialiști dintr-un domeniu aplicativ și în care, aceste programe, pot realiza performanțe de gândire și intuiție similare experților umani. Dintre metodele și paradigmele specifice Inteligenței artificiale, sistemele expert, sunt cele mai "consacrate", fiind primele care s-au impus în practica, depășind cadrul cercetării teoretice; în aprecierea autorului caracterul avangardist, de noutate, neconvențional al sistemelor expert este oarecum perimat, apartenența la domeniul "inteligenței artificiale" fiind în acest moment contestabilă. Rațiunile prezenței acestui capitol în lucrarea de față, ținând cont că elementele de noutate și contribuția originală a autorului sunt nesemnificative, sunt următoarele:

- caracterul unitar și minime pretenții de exhaustivitate ale lucrării;
- conceperea unor sisteme hibride, în care sistemele expert sunt o componentă;

Elementul central al prelucrării inteligente îl constituie raționamentul artificial, capabil să imite raționamentul uman. Sistemele expert reproduc raționamentul experților umani asupra cunoștințelor puse la dispoziția lor într-o anumită manieră, multiplică eventual aceste cunoștințe și explică liniile proprii de raționament. (Figura 3.18).

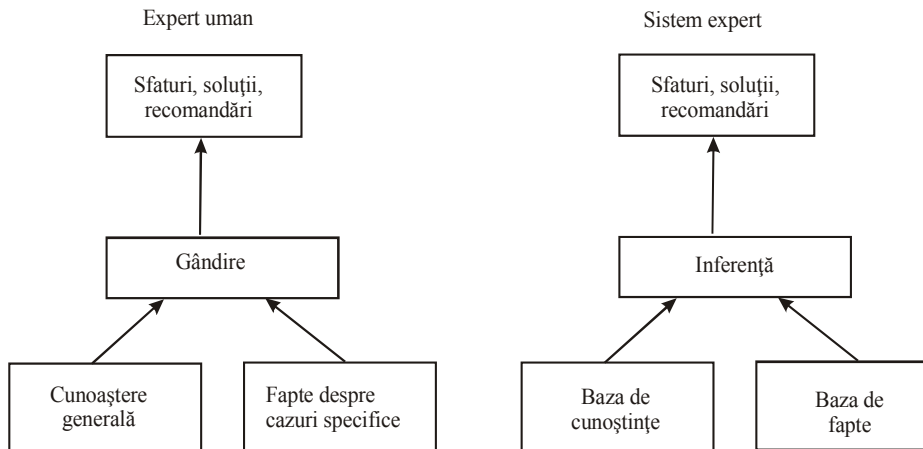


Fig. 3.18. Analogia dintre expertul uman și sistemul expert.

Termenul de "sistem expert" se utilizează cu un înțeles identic termenului "sistem expert bazat pe cunoștințe" (Knowledge-Based Expert System), fiind preferat din cauza pronunției mai ușoare.

Definițiile noțiunii de sistem expert sunt, în majoritatea lor, pragmatice, funcționale: [Slavici, 2009c], [Slavici, 2006a].

"Program inteligent pentru calculatorul electronic, care utilizează cunoașterea și proceduri de inferență pentru soluționarea problemelor, care sunt suficient de dificile pentru a necesita o expertiză umană semnificativă pentru soluționarea lor"(Edward Feigenbaum).

"Sistemele expert sunt programe dar pot fi tot atât de bine mașini cu software, destinate să înlocuiască sau să asiste specialistul în domeniile unde este recunoscută necesitatea expertizei umane"(H. Farreny).

"Un sistem expert constă în programe pentru calculator care emulează sau clonează raționamentul unui expert uman din domeniul problemei"(E.M. Awad).

"Un sistem expert este un sistem expert care emulează abilitatea de a lua decizii a expertului uman. Termenul emulează înseamnă că sistemul este menit să acționeze în toate privințele ca expertul uman.

Emularea este ceva mai mult decât simularea, care cere doar să se acționeze prin imitarea condițiilor realizate. Sistemele expert acționează foarte bine în domenii bine delimitate "(J. Giarratano și J. Riley – NASA). [Slavici, 2006a]. [Slavici, 2009c].

3.4.1. Caracteristicile sistemelor expert

Se disting patru caracteristici de bază ale sistemelor expert:

Expertiza.

Principală caracteristică a unui sistem expert este să dispună de expertiză, fapt care-i conferă abilitatea de a executa cel puțin la nivelul expertului uman o muncă bine determinată. Expertiza include nu numai capacitatea de a soluționa o problemă ci și efectuarea acestui lucru într-un timp cât mai scurt posibil (mai mic decât ar face-o expertul uman). Totodată tezaurul de cunoștințe despre domeniul problemei pe care îl posedă sistemul expert trebuie să fie atotcuprinzător și profund.

Din aceste motive unui sistem expert i se cere să fie robust, adică să nu aibă îndemnare numai într-o problemă anume, ci să folosească metode de rezolvare și cunoștințe generale pentru a infera după principii proprii atunci când i se oferă fapte, date și alte cunoștințe incomplete sau incerte. Gradul său de calificare trebuie să fie la nivel de expert.

Raționament simbolic.

Când un sistem expert soluționează o problemă, el o face prin manipularea simbolurilor și nu prin calcule matematice propriu-zise. Un sistem expert este

considerat un șir de caractere utilizate pentru un concept, proces, obiect etc. din domeniul problemei.

Profunzime.

Profunzimea (adâncimea) sistemelor expert se referă la abilitatea de a extinde cunoașterea existentă pentru a infera noi cunoștințe. Experții față de începătorii într-un domeniu, au o mare profunzime a cunoștințelor în domeniul în cauză, situație în care experiența devine un factor major. Pentru a soluționa problemele reale, sistemul expert trebuie să dovedească această profunzime în soluționarea problemelor dificile, complexe.

Autocunoaștere.

Autocunoașterea este prezentă numai când sistemul expert posedă metacunoașterea. Multe sisteme expert sunt dotate cu capacitatea de a explica utilizatorului cum? sau de ce? au ajuns în raționamentele lor la anumite concluzii. Dar, abilitatea de a explica este numai o mică parte din cea ce se numește autocunoaștere. Viitoarele sisteme expert vor avea capacitatea de a-și reformula strategiile inferențiale în vederea operării mai eficiente pentru derivarea de noi cunoștințe.

Transparența – puterea de a explica soluția oferită prin indicarea cunoștințelor utilizate în raționamente.

Flexibilitatea – posibilitatea adăugării, schimbării și eliminării cunoștințelor;

Competența – capacitatea de a soluționa probleme precum expertul uman;

În cazul actual, sistemele expert prezintă și alte caracteristici:

- abilitatea de a asista utilizatorii mașinilor de prelucrat prin eroziune electrică cu fir la stabilirea parametrilor procesului de prelucrare;
- abilitatea de a sensibiliza operatorul asupra schimbării operațiilor și a relațiilor dintre influențe ale parametrilor asupra procesului;
- integrarea sistemului de colectare a datelor cu modulele operaționale și procedurile cu specific inteligent pentru analiza procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu fir.

[Slavici, 2009c], [Slavici, 2006a].

3.4.2. Arhitectura sistemelor expert

a. Baza de cunoștințe - este în fapt o structură de date care conține ansamblul cunoștințelor introduse de către specialistul uman; fiind o structură de date, ar trebui tratată asemenea structurilor specifice algoritmilor și tehnicilor de programare fundamentale: stive, liste, cozi, arbori, grafuri, tabele și tablouri; într-adevăr prin modul de organizare a împrumutat numeroase elemente din structurile de date clasice, dar există și elemente distinctive care o individualizează. Cunoștințele stocate sunt în principal descripții de obiecte în conjuncție cu relațiile dintre acestea; forma de stocare trebuie să asigure mai multe modalități de căutare:

- prin simboluri identificatoare,
- indirect prin proprietăți asociate sau valori atribuite acestora ;
- prin inferențe sau lanțuri inferențiale ce pornesc de la alte piese de cunoaștere;

b. Mecanismul de inferență - exploatează în fapt baza de cunoștințe, fiind utilizat pentru construirea raționamentului. Obiectivele principale urmărite sunt:
- alegerea strategiei de control în funcție de problema concretă de rezolvat;
- elaborează planul de rezolvare a problemei după necesitate;
- execută comutarea de la o strategie la alta;
- execută acțiunile prevăzute în planul de rezolvare a problemei;
- constituie informațiile de control pentru mecanismele fundamentale ale mecanismului de inferență;

În ansamblu este compus dintr-un ansamblu de proceduri și funcții, fiind în esență o resursă soft; totuși modalitatea de utilizare a cunoștințelor este relativ atipică, fiind condiționat de datele și cunoștințele pe care le posedă;

c. baza de fapte - este în fapt o memorie auxiliară care conține datele utilizatorului și rezultatele intermediare produse în cursul deducției; conținutul este păstrat în memoria principală RAM

Alături de cele trei module principale mai există unele module auxiliare, în unele situații acestea având un rol opțional;

d. modulul de comunicație - destinat pentru furnizarea interfețelor specifice pentru utilizatorii sistemului și pentru achiziția de cunoștințe; se compune din procesoare specifice limbajelor, inclusiv limbaje de comunicare cu utilizatorul, pentru achiziția cunoștințelor, procesoare pentru comunicarea internă între sistemul expert și echipamente auxiliare pentru stocarea cunoașterii, procesoare speciale pentru I/O. (intrări / ieșiri);

e. interfața utilizator - asigură dialogul între utilizator și sistem, de asemenea comunică mecanismului de inferență cererile utilizatorului, rezultatul acestora fiind comunicat utilizatorului

f. modulul de achiziție a cunoștințelor - preia cunoștințele specializate furnizate de expertul uman sau inginerul de cunoștințe într-o formă încă nespecifică reprezentării interne; o serie de cunoștințe pot fi furnizate prin fișiere specifice bazelor de date sau alte programe externe

g. modulul de explicații - permite trasarea drumului urmat în raționament de către sistemul rezolutiv și emiterea justificărilor pentru soluțiile obținute;
În fig. 3.19 se prezintă structura generală a unui sistem expert, această formă generală va avea anumite particularități dependente de activitatea și specificul aplicației pentru care este proiectat; astfel în fig.3.20 se prezintă structura unui sistem expert specializat în operații de conducere. [Slavici, 2009c], [Slavici, 2006a].

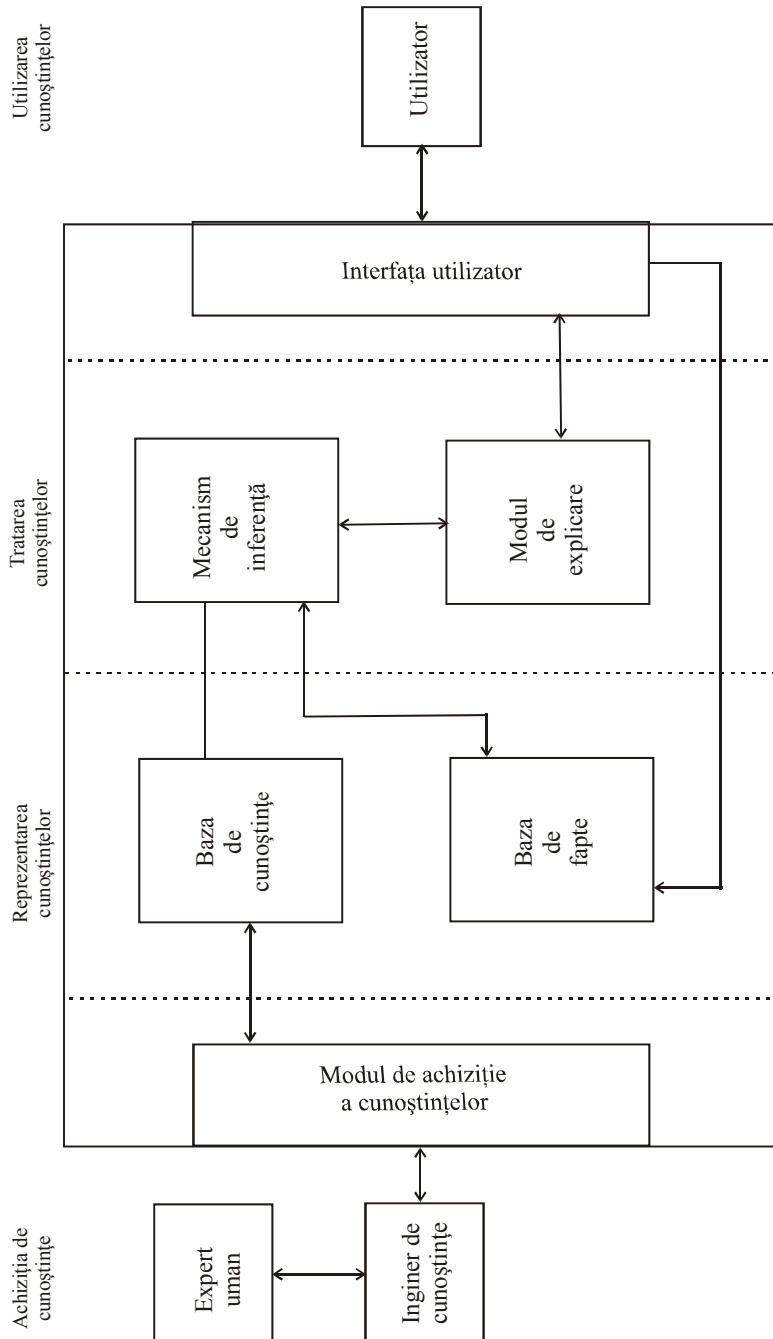


Fig. 3.19. Structura generală a unui sistem expert

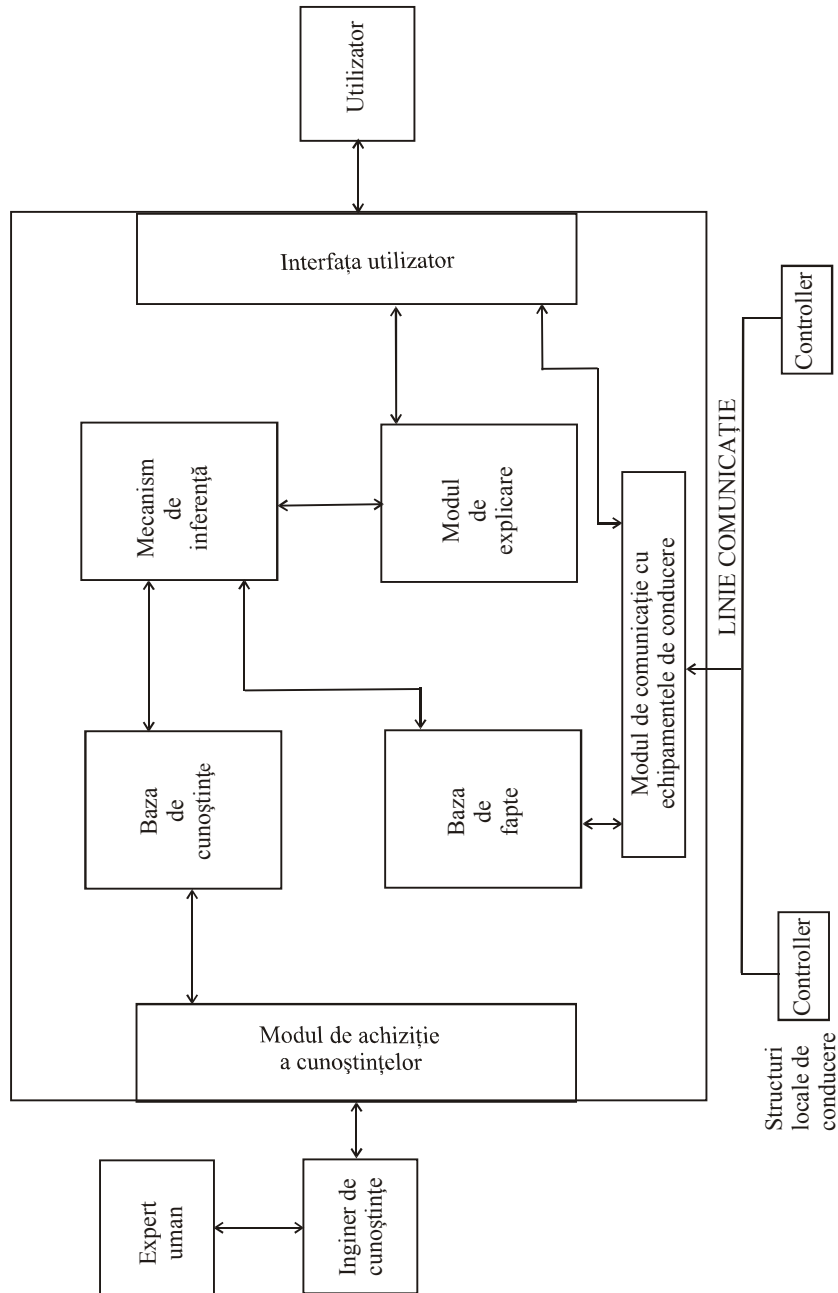


Fig. 3.20 Structura unui sistem expert specializat în operații de conducere

Elemente fundamentale ale sistemelor expert și interconexiunile dintre ele

Originalitatea tehnologiei sistemelor expert constă în existența celor cinci componente și a relațiilor dintre ele.

Este vorba despre trei componente de bază:

- Baza de cunoștințe
- Motorul de inferențe
- Interfața de dialog cu utilizatorii.

La acestea se adaugă încă două componente suplimentare și anume:

- Modulul de achiziționare a cunoașterii;
- Modulul explicativ.

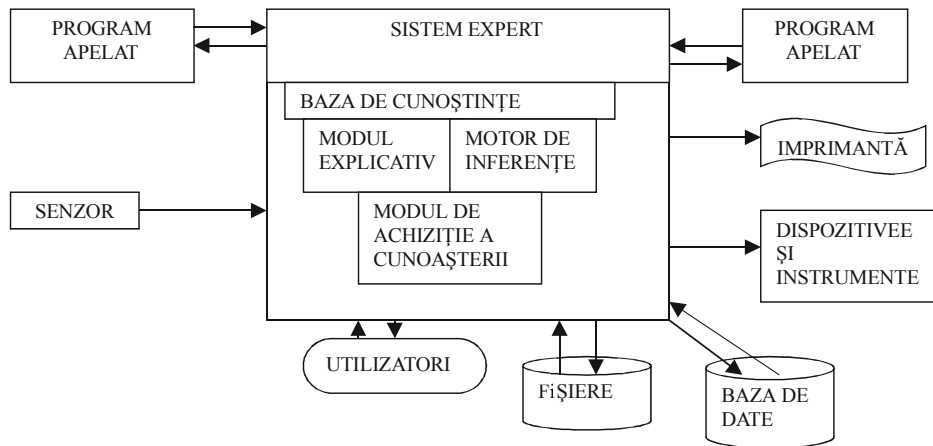


Fig. 3. 21. Arhitectura generală și interfețele unui sistem expert

Toate acestea corespund celor trei obiective principale și celor trei obiective derivate stabilite de către metodologiile de dezvoltare a sistemelor expert și anume:

Obiective principale:

1. Achiziționarea ușoară a cunoașterii prin exprimarea cât mai direct posibilă a expertizei obținută de la experții umani;
2. Exploatarea eficientă a colecției de cunoștințe prin:
 - 2.1. Combinarea și înlănțuirea cunoștințelor pentru a infera noi cunoștințe prin judecăți, planuri, demonstrații, decizii și prejudecăți;
 - 2.2. Luarea în seamă a modului în care sunt inferate cunoștințele noi;
3. Să suporte cu ușurință gama operațiilor asupra cunoștințelor (adăugarea, modificarea și eliminarea lor).

Obiectivele derivate:

- Reducerea riscurilor;
- Creșterea creativității;
- Învățarea

[Slavici, 2006a], [Slavici, 2009c], [Molnar, 2010], [MnerieA, 2010a].

Baza de cunoștințe, servește pentru stocarea tuturor pieselor de cunoaștere specifice unui domeniu aplicativ fiind creată și organizată pentru satisfacerea obiectivului nr.3. Ea conține expertiza preluată de la experții umani în legătură cu domeniul problemei, care descrie situații evidente, reale sau ipotetice precum și euristice. Atunci când cunoașterea este memorată sub forma regulilor de producție, baza de cunoștințe conține două componente: baza de reguli și motorul de inferențe, care se mai numește interpretor de reguli (în engleză scheduler).

Motorul de inferențe este un program care conține cunoașterea de control, procedurală sau operatorie, care exploatează baza de cunoștințe și este destinat satisfacerii obiectivului 2.1. El este un program sau chiar un circuit integrat microprogramat care dispune de mecanisme inferențiale generale pentru prelucrarea cunoștințelor cu raționamente dintre cele mai diverse, determinând modificarea cunoașterii în scopul soluționării problemei. În principiu, mecanismele inferențiale sunt cele care oferă în final rapoarte, texte, grafice și liste afișate pe ecran sau la imprimantă care reprezintă un diagnostic, sfaturi, explicații, planuri de acțiune, variante decizionale, concluzii precum și alte rezultate utile persoanelor care consultă sistemul expert.

Interfața de dialog cu utilizatorii, dispune de un limbaj de exprimare a cunoașterii achiziționată de la experții umani. Prin intermediul său este posibil accesul utilizatorilor la faptele și cunoștințele de bază deoarece permite achiziția cunoașterii de la experți precum și dialogul cu ceilalți utilizatori în timpul sesiunii de consultare și uneori chiar cu alte sisteme. Sistemul solicită răspunsuri la întrebări cu un singur sau chiar mai multe răspunsuri, iar utilizatorul răspunde prin tastare sau prin selecția cu mouse-ul a răspunsului corespunzător. Multe sisteme expert dispun și de o funcție de **help**, care explică orice întrebare adresată de sistem și pe care utilizatorul n-o înțelege. Comanda **What?** este aceea care determină sistemul să afișeze explicația adecvată. După finalizarea procesului inferențial, se afișează soluția pe ecran însoțită de factorul de certitudine. Dacă sistemul nu a ajuns la o soluție, el va comunica acest lucru tot prin a afișare. Interfața de dialog este foarte importantă, fără ea sistemul expert nu este transparent. Din aceste motive, interfața trebuie să fie naturală și prietenoasă, să folosească un limbaj cât mai apropiat de limbajul natural, cu texte, imagini grafice și rapoarte afișate cu o viteză confortabilă pentru utilizatori.

Modulul de achiziție al cunoașterii ajută utilizatorul expert să introducă cunoștințe într-o formă recunoscută de către sistem și să actualizeze baza de cunoștințe. Anumite sisteme expert folosesc și o bază de date rațională în care sunt memorate explicit obiecte, variante, fapte și evenimente, pentru o mai bună flexibilitate a memorării și regăsirii. În acest caz, în structura sistemului expert trebuie să existe și o interfață pentru date.

Modulul explicativ (în engleză justifier) urmărește obținerea de explicații asupra desfășurării proceselor inferențiale, asupra soluțiilor obținute în sesiunile de consultare, cu evidențierea cunoștințelor care lipsesc sau sunt inconștiente ori eronate sau poate chiar evidențierea cauzelor unor eșecuri, etc. Sistemul expert nu acționează izolat de celelalte componente ale mediului exterior în care este instalat. El poate fi apelat de către alte programe externe sau poate trimite rezultate către alte programe. Majoritatea sistemelor expert sunt interactive

În sensul că interfața lor oferă mijloace de comunicații cu utilizatorii umani, asigură obținerea datelor și informațiilor de la senzori speciali, de la sisteme de gestiune a bazelor de date, de la sisteme de calcul tabelar sau chiar de la programul care gestionează sisteme clasice.

Dezvoltarea interfeței și integrarea cu mediul lor de acțiune nu sunt aceleași pentru toate sistemele expert. De aceea sunt necesare interfețe diferite în funcție de intrările și ieșirile necesare mediului în care operează.

În timp ce noțiunea de sistem expert s-a observat că este simplă, crearea/dezvoltarea unui sistem expert este o muncă de mare complexitate deoarece implică două activități importante și dificile:

- extragerea cunoașterii de la experți împreună cu metodele utilizate de către aceștia în soluționarea problemelor;
- reformularea cunoașterii conform metodelor într-o formă organizată, în vederea utilizării lor ulterioare.

Aceste activități de extragere și reformulare (formulare) se numesc achiziția și reprezentarea cunoașterii, cea mai complexă activitate și cea mai mare consumatoare de timp.

[Slavici, 2006a], [Slavici, 2009c], [Molnar, 2010], [MnerieA, 2010a].

3.4.3. Medii de dezvoltare a sistemelor expert. Limbajul de programare

Exsys este produs al unei companii americane cu același nume, și a fost lansat pe piață încă din anul 1989. Cea mai nouă versiune a sa poartă numele de Exsys Corvid 5.1 și funcționează în medii grafice controlate cu sistemul de operare Windows, toate versiunile.

a. Caracteristici:

Exsys Corvid s-a dovedit unul dintre cele mai robuste și mai flexibile medii de dezvoltare bazate pe reguli de producție, recunoscut în întreaga lume, pentru faptul că:

- permite dezvoltarea aplicațiilor inteligente direct din arbori decizionali sau din reguli de producție;
- face posibilă înțelegerea și interpretarea ușoară a limbajului natural și a sintaxei algebrice;
- puternicul său motor de inferențe analizează logica și relevanța răspunsurilor la întrebări;
- este dotat cu ambele strategii de control ale raționamentelor (Forward și Backward chaining);
- conține proceduri care asigură validarea automată și completă a sistemelor expert, fără să implice necesitatea unor testări foarte complexe;
- dispune de 6 moduri de lucru cu incertitudinea: YES/NO (0 sau 1); 0-10; de la -100 la +100; Increment/Decrement, Custom Formula (formulă personalizată); Logica Fuzzy;
- interfața de dialog este ușor de utilizat;
- dispune de posibilități de comunicație cu numeroase tipuri de programe externe;

- opțiunile sale de configurare oferă posibilitatea particularizării extinse a aplicațiilor;
- dispune de posibilitatea inserării de note și referințe multiple în reguli;
- actualizează valorile factorilor de certitudine atașați rezultatelor după cele înscrise într-o tabelă de calcul;
- generatorul de rapoarte permite sistemelor expert să genereze ieșiri către rețeaua Web via componenta Exsys Web Runtime;
- poate fi executat pe server și interacționează cu utilizatorul final prin intermediul unui browser;

b. componente:

EXSYS CORVID este destinat cu deosebire celor ce doresc să-și creeze aplicații proprii foarte rapid. Are în structura sa cinci componente de bază și trei componente avansate:

COMPONENTE DE BAZĂ

1. Sistemul de set-up;
2. Generatorul propriu-zis sau editorul de reguli, dotat cu interfață vizuală pentru arbori decizionali, pentru crearea și /modificarea unei baze de cunoștințe;
3. Componenta RUNTIME proprie sau "de consultare", care permite utilizarea bazei de cunoștințe create anterior;
4. Componenta de validare;
5. Motorul de inferențe;

COMPONENTE AVANSATE

1. Comenzile, pentru controlul înlănțuirii regulilor, obținerea datelor din surse externe, execuția programelor externe și alte sarcini;
2. Opțiunile de configurare, pentru personalizarea sistemului;
3. Generatorul de rapoarte, care creează ieșirile imprimate sau afișate pentru utilizator.

Înainte de a dezvolta un sistem expert cu ajutorul generatorului EXSYS CORVID se recomandă o scurtă recapitulare a noțiunilor mai importante.

Sistemele expert generate cu EXSYS Developer conțin fapte individuale încorporate în piese de cunoaștere necesare procesului de luare a deciziilor. Aceste piese sunt folosite în reprezentarea cunoașterii cu ajutorul metodei regulilor de producție și arborilor de decizie.

Regulile de producție sunt de forma IF-THEN-ELSE, însă cea mai folosită formă utilizată este IF-THEN.

Sistemele expert se folosesc pentru a ajunge la o concluzie, o soluție sau la o recomandare. EXSYS CORVID utilizează pentru aceste concluzii / recomandări noțiunea de GOALS (alternative-scopuri).

La execuția regulilor în vederea obținerii concluziilor/recomandărilor sunt necesare răspunsuri, ce vor fi preluate de la utilizatori prin interfețe specializate sau prin interfețe cu alte programe externe. Aceste cunoștințe ale sistemului sunt stocate și ulterior evaluate prin intermediul regulilor.

Dacă permisia din partea de IF a unei reguli este adevărată se vor activa piesele de cunoaștere aferente părții THEN, în caz contrar se vor activa piesele de cunoaștere din partea de ELSE. În cazul în care partea de ELSE lipește se va ree la următoarea regulă din arborele decizional.

EXSYS CORVID utilizează două tipuri de fapte (piese de cunoaștere): întrebări (Questions) și variabile (Variables). [Slavici, 2009c], [Slavici, 2006a], [Molnar, 2010].

3.4.4. Sistem expert pentru controlul mașinii de debitat prin eroziune electrică

Crearea unei baze de cunoștințe

Ne propunem să creăm un prototip de sistem expert pentru a decide modul de setare a unor parametri ai mașinii de debitat; prototipul se va numi **DEBITARE** având în vedere subiectul bazei de cunoștințe. Din acest moment se poate proceda la crearea unei noi baze de cunoștințe ori la consultarea sau actualizarea celei deja existente.

Din experiența noastră și respectând principiile general valabile proiectării de produse informatice recomandăm ca pe baza analizei problemei de soluționat să se procedeze la introducerea următoarelor piese de cunoaștere: scopuri, întrebări și variabile specifice generatorului EXSYS CORVID.

Din analiza sumară a domeniului și a problemei de rezolvat avem următoarele piese de cunoaștere:

Scopuri:

- 1 Generator
- 2 Viteză fir
- 3 Avans
- 4 Offset

Întrebări:

- 1 Ce tip de material doriți să debitați?
- 2 Care este grosimea materialului?
- 3 Cat este timpul de procesare doriți?
- 4 Care este nivelul de rugozitate pe care doriți să îl obțineți?

Pentru rezolvarea acestei probleme se folosesc mai multe tipuri de variabile (Fig.3.18):

1 *Static list* (listă din care se pot alege varianta corespunzătoare): Tip_material, Grosime_Material, Timp_procesare, Rugozitate;

2 *Continuous – Numeric value* (valori numerice): Generator, Viteza_Fir, Avans, Offset;

3 *Collection* (variabila tip listă în care se poate adăuga șiruri de caractere): Raport;

4 *Confidence* (variabilă care exprimă gradul de încredere): indice.

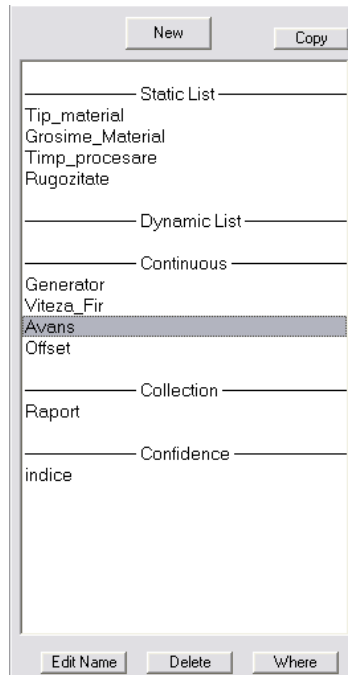


Fig.3.22. Lista cu variabilele folosite.

Construirea regulilor presupune activarea paginii *Logical Block*, care ne permite să adăugăm, să modificăm, să ștergem și să mutăm o regulă. În urma activării unui buton corespunzător din această pagină, în funcție de unde dorim să introducem regula, se obține o machetă de preluare a pieselor de cunoaștere în cadrul componentelor IF-THEN. Ecranul de lucru se prezintă în Fig.3.22. După cum se poate observa și din Fig.3.23 este obligatoriu de completat partea de IF și cea de THEN. Această fereastră are mai multe zone:

- o zonă de selectare și editare a numelui blocului logic;
- o bara de editare a textului cu comenzi uzuale (Copy, Cut, Paste, etc.);
- zona de editare a regulilor;
- zona de butoane pentru introducerea componentelor IF-THEN, respectiv pentru căutarea unei reguli scrise.

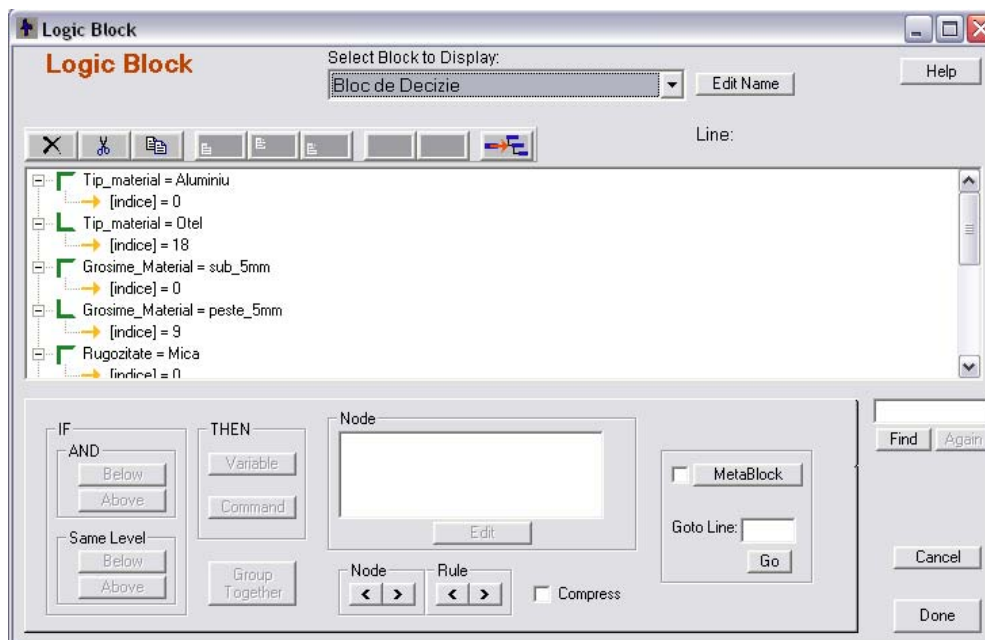


Fig.3.23. Fereastră de introducere a regulilor

În categoria premiselor putem avea piese de cunoaștere sub forma întrebărilor, variabilelor, scopuri (pentru cazul în care se dorește testarea nivelului atins de factorii de certitudine). Aceleași componente se regăsesc și în categoria concluziilor, cu precizarea că scopurile sunt urmate de o atribuire a unei valori pentru factorul de certitudine după una din variantele precizate în panoul de control a parametrilor.

În cadrul acestui sistem s-au utilizat două blocuri logice:

- un bloc denumit „Bloc de decizie” (Fig.3.24.a);
- un bloc denumit „Bloc de raport” (Fig.3.24.b);

Blocul de decizie conține reguli care au la bază interogarea utilizatorului în ceea ce privește dorințele acestuia privind procesul de prelucrare, stabilindu-se astfel un grad de încredere pentru o anumită setare.

Blocul de raport a fost realizat pentru a se putea prelua informațiile de setare a parametrilor mașinii dintr-un fișier de tip txt. Acest fișier reprezintă baza de cunoștințe cu privire la setările mașinii în funcție de condițiile debitării. Această bază de cunoștințe este creată de către autor pe baza experienței proprii, precum și pe baza măsurătorilor experimentale.

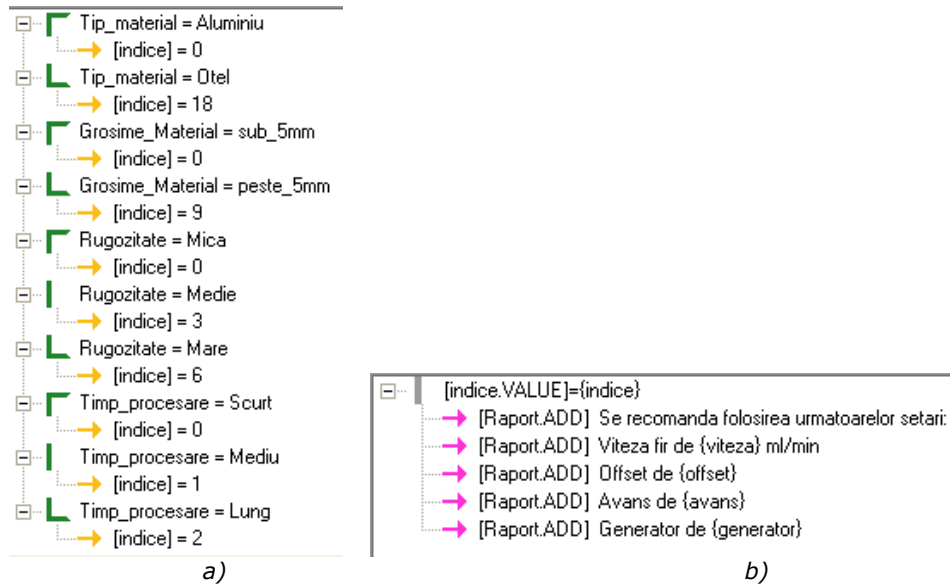


Fig.3.24. Blocurile logice implementate în cadrul sistemului expert: a) Blocul de decizie; b) Blocul de raport.

Construirea blocului de execuție se realizează prin crearea unui bloc de comandă. Astfel, în Fig.3.25 se prezintă un bloc de comandă intitulat „Blocul de execuție”.

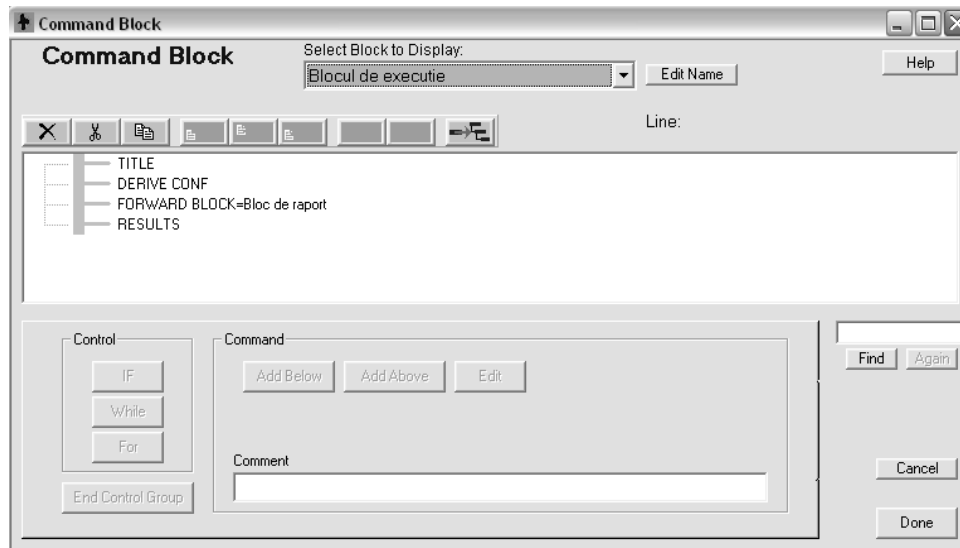


Fig.3.25. Blocul de comandă intitulat „Blocul de execuție”.

În cadrul acestui bloc se trec pe rând procesele care se doresc a fi executate. Astfel pentru aplicația de față procesele selectate sunt următoarele:

- TITLE (titlu): reprezintă primul proces care va fi executat și are ca și rezultat apariția unei ferestre care conține titlul sistemului expert;
- DERIVE CONF: reprezintă procesul care urmărește variabilele selectate. În cadrul acestui sistem s-a selectat urmărirea variabilei de tip *Confidence* intitulată „indice”. În momentul în care aceasta este apelată, ea apelează primul bloc logic în care se găsește și anume *Bloc de Decizie*;
- FORWARD BLOCK=Bloc de raport: după finalizarea procesului anterior se apelează acest proces, ceea ce înseamnă că se activează blocul logic intitulat *Bloc de raport*. Pe baza variabilei de încredere, blocul de raport citește dintr-un fișier de tip .txt (Fig.3.26) valorile recomandate ale parametrilor ce vor fi setați la mașina de debitat;

File	Edit	Options	Help		
				indice	generator
				0	5
				1	4
				2	4
				3	7
				4	5
				5	5
				6	6
				7	5
				8	*
					2
					7
					0.01
					0.01
					0.01
					0.03
					0.02
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3
					8
					0.01
					0.03
					0.02
					*
					3

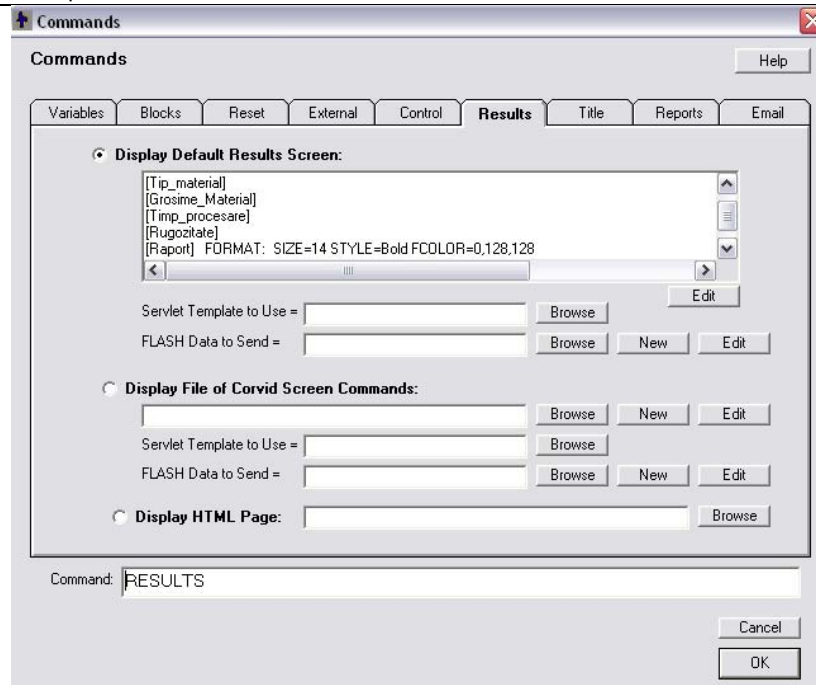


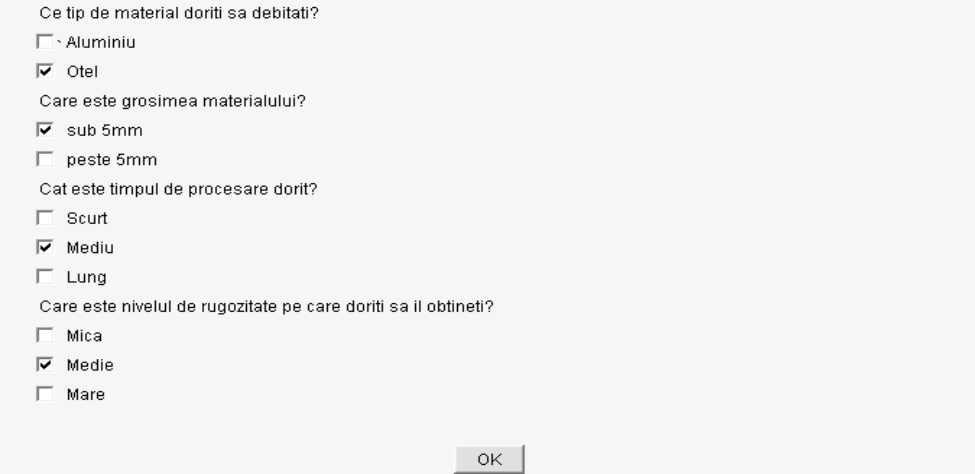
Fig.3.27. Ecran de setare a conținutului și aspectului ferestrei cu rezultate.

După finalizarea pașilor enumerați anterior se generează un fișier de tip .html, care conține sistemul expert. Pentru rularea acestuia este necesar utilizarea unui program de acces la internet. La pornirea programului va apărea o fereastră (Fig.3.28) care conține titlul sistemului expert.



Fig.3.28. Fereastră care conține titlul sistemului expert.

La activarea butonului OK, se trece la următoarea fereastră care conține întrebările adresate de către sistemul expert, precum și răspunsurile selectate de către utilizator (Fig.4.29). În acest caz particular s-au putut grupa toate întrebările și răspunsurile pe o pagină. În cazuri mai complexe, în care există mai multe întrebări sau în care întrebarea ce urmează depinde de răspunsul selectat la întrebarea curentă, se folosesc mai multe pagini cu întrebări. [Mnerie A, 2010a].



Ce tip de material doriti sa debitati?

Aluminiu

Otel

Care este grosimea materialului?

sub 5mm

peste 5mm

Cat este timpul de procesare dorit?

Scurt

Mediu

Lung

Care este nivelul de rugozitate pe care doriti sa il obtineti?

Mica

Medie

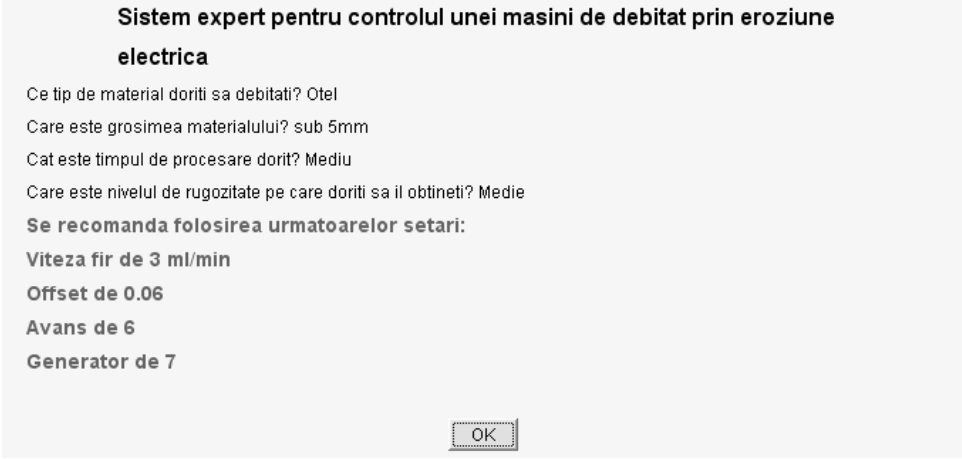
Mare

OK

Fig.3.29. Fereastră cu întrebări și răspunsuri posibile.

În final, în urma interpretării răspunsurilor selectate de către utilizator, va apărea fereastra cu rezultate (Fig.3.30), din care rezultă și setările realizate pentru această pagină, prezentate în Fig.3.27, și anume:

- pe primul rând apare titlul sistemului expert utilizat;
- următoarele rânduri conțin întrebările puse de către sistemul expert precum și răspunsul selectat de către utilizator;
- în final se afișează recomandările furnizate de sistemul expert în ceea ce privește setările pentru parametrii mașinii de debitat, în funcție de condițiile de lucru selectate.



Sistem expert pentru controlul unei masini de debitat prin eroziune electrica

Ce tip de material doriti sa debitati? Otel

Care este grosimea materialului? sub 5mm

Cat este timpul de procesare dorit? Mediu

Care este nivelul de rugozitate pe care doriti sa il obtineti? Medie

Se recomanda folosirea urmatoarelor setari:

Viteza fir de 3 ml/min

Offset de 0.06

Avans de 6

Generator de 7

OK

Fig.3.30. Fereastră rezultate.

Una dintre cele mai importante proprietăți ale sistemului expert realizat este acela că el poate genera raportul cu recomandări într-un fișier de tip .txt, .csv sau .pdf. În cazul în care pe calculatorul pe care rulează sistemul expert există o bază de date, acesta poate fi setat să genereze rezultatele direct în baza de date.

3.5. Concluzii

Placa de dezvoltare PICPLC16, a fost folosită pentru a realiza interfața între mașina de prelucrat și calculator. Această placă a fost aleasă în urma mai multor încercări experimentale atât de programare software cât și de fiabilitate în timpul procesului, proces considerat industrial.

Deși având un număr redus de instrucțiuni microcontrolerul folosit a reușit să îndeplinească funcțiile necesare prelucrării în sistemul proiectat

Soluția proiectată și realizată a presupus investiții relativ mici obținându-se rezultate incontestabile, realizarea unei mașini de prelucrat prin eroziune electrică cu fir modernă.

Pe lângă concluziile parțiale trebuie menționate și contribuțiile personale în cadrul acestui capitol :

- Proiectarea sistemului de monitorizare și comandă a mașinii de prelucrat prin eroziune electrică cu fir
- Elaborarea unui studiu matematic pentru definirea traiectoriei firului pentru creșterea preciziei dimensionale
- Elaborarea unui algoritm pentru monitorizarea atentă, pas cu pas, a poziției exacte a firului în timpul prelucrării
- Introducerea în algoritmul de conducere a unui parametru „contur critic” bazat în principal pe acceptarea erorilor și introducerea unei toleranțe.
- Proiectarea software-ului pentru comanda mașinii de prelucrat prin eroziune electrică cu fir
- Realizarea software-ului pentru comanda mașinii de prelucrat prin eroziune electrică cu fir atât pentru calculator cât și pentru placa de dezvoltare cu microprocesor
- Implementarea unor tehnologii IT moderne precum touch-screen, monitorizare la distanță folosind internetul, monitorizarea vizuală a procesului și mașinii bazate pe camere video, telecomanda pentru poziționarea firului, etc., în realizarea reconstrucției și modernizării mașinii de prelucrat cu eroziune electrică cu fir din cadrul laboratoarelor catedrei.
- Implementarea unei soluții de conturare a piesei de prelucrat pe baza unor algoritmi proprii
- Realizarea unui sistem expert pentru stabilirea parametrilor pentru prelucrare în baza materialului de prelucrat, grosimii acestuia și în condițiile impunerii unei anumite productivități



Fig. 3.31. Mașina de prelucrare prin eroziune electrică cu fir Elerofil 2010

4. CERCETĂRI EXPERIMENTALE

Cercetările experimentale au avut la bază un program ordonat după obiectivele tezei prezentate în capitolul 1. Astfel, s-au realizat experimente în scopul analizei uzurii firului prelucrat și influența acesteia asupra procesului, pornind de la câteva analize ale influențelor procesului asupra rugozității, respectiv analiza productivității dată de timpul de prelucrare. Un alt aspect urmărit a fost analiza abaterilor dimensionale datorate interstițiului eroziv și recalcularea traiectoriei în vederea reducerii erorilor dimensionale.

Odată stabilite influențele mai sus menționate se poate realiza și o analiză a comportării firului în procesul de prelucrare, experiment care are la bază uzura firului în funcție de parametrii procesului impuși de generator pe de o parte, iar pe de altă parte parametrii comandați de mașină, ca efect al vitezei de rulaj a firului.

Prelucrarea prin eroziune este bazată pe impulsuri electrice de diferite durate. Cu cât e mai scurt impulsul cu atât se dezvoltă temperaturi mai înalte în canalul de descărcare. La impulsuri scurte puterea instantanee este foarte mare și, ca urmare a frânării electronilor, o mare parte din energie se debitează sub formă de căldură la anod. Temperatura anodului crește brusc și poate atinge 10000 °C. În aceste condiții are pondere mai mare vaporizarea metalului. La același material al piesei și electrodului, în cazul de față firul, se va distruge mai intens electrodul legat la plusul sursei de curent (anodul). De aceea electrodul, la utilizarea impulsurilor scurte de curent, se plasează la catod. În acest caz nu se poate realiza o reducere însemnată a uzurii electrodului prin alegerea unui material cu temperatură de topire cât mai ridicată (din cauză că se dezvoltă o temperatură foarte înaltă).

La impulsurile de mare durată, puterea descărcării și temperatura în canalul descărcării sunt de obicei mult mai joase.

Productivitatea prelucrării prin electroeroziune și rugozitatea suprafeței depind de energia, durata și frecvența repetării impulsurilor. Cu cât este mai mare energia impulsului unitar, cu atât va fi mai mare cantitatea de metal îndepărtat de către el, cu atât va fi mai mare dimensiunea cavității formate, și deci cu atât mai mare rugozitatea suprafeței. În funcție de regimul de prelucrare se pot obține rugozități de orice clasă. Intervalul dintre electrozi trebuie să fie curățat prin trecerea lichidului de uzinare la o mare presiune. Regimurile grosiere de prelucrare sunt caracterizate printr-o mare energie a impulsurilor, și o mică frecvență a repetării lor. Pentru prelucrarea pieselor din aliaje dure și alte materiale greu fuzibile, care tind la formarea crăpăturilor în cazul răcirii rapide, se recomandă impulsurile de mică durată.

Parametrii ce caracterizează procesul de prelucrare, momentan, se obțin prin prelevarea de informații direct disponibile sub forma unor semnale electrice. Astfel parametrii de ieșire ai procesului de prelucrare sunt caracterizați de două tipuri de valori :

1. Rezultatul prelucrării
2. Parametrii de stare

Astfel rezultatul prelucrării este dat de :

- a. Productivitatea prelucrării
- b. Uzura firului
- c. Calitatea prelucrării (precizia dimensională, rugozitate, duritate, etc.)
- d. Mărimea interstițiului
- e. Costul prelucrării

Parametrii de stare :

- a. Caracteristici ale impulsurilor (tensiune, curent, etc.)
- b. Numărul de impulsuri, frecvență
- c. Coeficienții de eficiență ai prelucrării
- d. stabilitatea prelucrării
- e. Altele (emisii, temperatură, etc)

Prezenta teză are ca scop optimizarea cu calculatorul a mașinilor de prelucrare prin eroziune electrică cu fir, astfel scopul principal este poziționarea cât mai precisă a firului în apropierea piesei de prelucrat, în urma procesului, obținându-se o prelucrare cât mai exactă din punct de vedere dimensional, dar fără a compromite foarte mult suprafața rezultată în urma prelucrării.

Dintre parametrii enumerați anterior, de interes pentru realizarea obiectivelor tezei sunt cei ce țin de productivitatea prelucrării, care depinde de anumiți parametri ai impulsurilor și calitatea prelucrării prin analiza rugozității, dată în primul rând de timpii generatorului *Ton* și *Toff*, parametrii reglabili definiți ca durata impulsurilor de tensiune, *Ton* și durata pauzei dintre impulsurile de tensiune, *Toff*, dar și de înălțimea impulsurilor.

Așadar, pentru a putea optimiza parametrii prelucrării pentru mașina de prelucrat prin eroziune electrică cu fir în așa fel încât suprafața prelucrată să rămâne de o calitate superioară, este nevoie de analiza firului și de analiza parametrilor generatorului (tensiune, frecvență).

A fost realizat un plan experimental în acest sens urmărindu-se

- calitatea suprafeței piesei prelucrate-prin parametrul rugozitate;
- productivitatea, dată de timpul de prelucrare
- uzura firului, determinată de scăderea în greutate a firului în urma procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu fir.

Pentru analiza parametrilor de ieșire prezentați anterior au fost variați parametri controlabili stabiliți la începutul procesului de prelucrare. Acești parametri sunt :

- viteza de rulare a firului
- impulsurile generatorului
- erorile dimensionale apărute la piese în urma procesului de

prelucrare

4.1. Studiul asupra factorilor de influență asupra rugozității

Măsurarea rugozității s-a realizat în laboratorul catedrei de Tehnologie Mecanică a Facultății de Mecanică din cadrul Universității „Politehnica” din Timișoara. Măsurarea rugozității s-a realizat cu ajutorul rugozimetrului de tipul Surtronic 25.

Principalele caracteristici ale rugozimetrului folosit sunt :

- rezoluția de $0.01 \mu\text{m}$
- precizia de 2%
- alimentarea se realizează de la baterie de 9V



Fig. 4.1. Rugozimetrul Surtronic 25 folosit la măsurarea rugozității suprafețelor prelucrate

Piesele prelucrate în diferite regimuri de prelucrare au fost pregătite pentru măsurători, fixate bine pe o suprafață solidă, întrucât piesele sunt de dimensiuni mici există posibilitatea instabilității și de aici apariția unor erori la măsurare.

În urma planului experimental efectuat a fost extras tabelul 4.1. Tabel ce prezintă valorile obținute experimental în urma măsurătorilor efectuate pentru analiza parametrilor de interes în cadrul analizei în domeniul tezei și care sunt influențați de viteza firului.

Tabelul 4.1. Evoluția parametrului rugozitate în funcție de viteza de rulare a firului.

Nr. Crt.	Viteza fir [ml/min]	Rugozitate [μm]
1	40	3,1
2	70	2,8
3	100	2,9
4	130	5,25
5	160	8
6	190	6,6
7	220	2,5

Interpretând rezultatele experimentale se observă că, așa cum s-a presupus inițial, viteza firului influențează uzura acestuia, dar și rugozitatea suprafeței de prelucrat.

Rezultatele prezentate în tabelul 4.1. sunt informații extrase din lista de experimente realizate, acestea fiind alese pentru prezentare, întrucât se observă o creștere a rugozității până la un anumit punct după care la viteze foarte mari ale firului această rugozitate începe să scadă.

Scăderea rugozității la viteze mari ale firului a fost constatată și în cazul altor experimente, și poate fi pusă pe uzura foarte mică a firului.

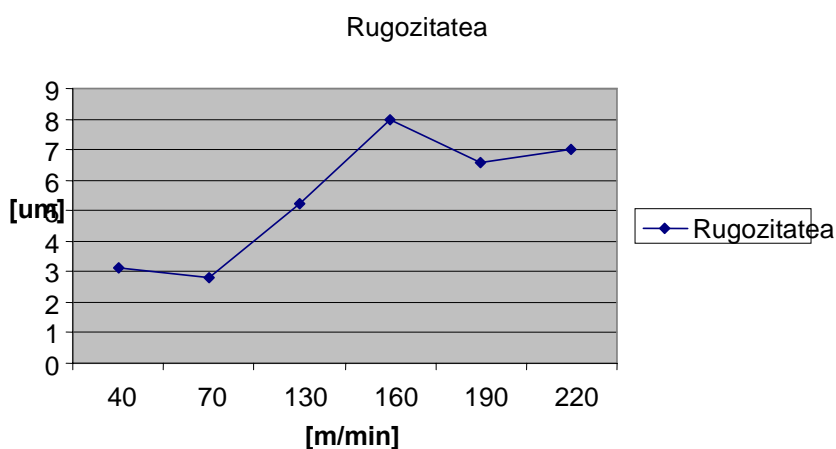


Fig. 4.2. Analiza rugozității în funcție de viteza firului

Pentru o interpretare mai exactă a rezultatelor experimentelor, au fost realizate trei grafice care reprezintă variația rugozității în funcție de viteza firului, timpul de prelucrare în funcție de viteza firului, aici se observă ușoară creștere a timpului de prelucrat, și uzura firului folosit la prelucrarea prin eroziune electrică cu fir determinată prin greutatea acestuia în funcție de viteza de rulaj a firului.

Tabel 4.2. Evoluția parametrului rugozitate în funcție de variația timpilor ON/OFF ai unei perioade de impuls.

Nr. crt	Timp ON [μs]	Timp OFF [μs]	Rugozitate [μm]
1	9	15	2,9
2	7	15	2,9
3	5	15	2,3
4	3	15	1,8
5	11	15	rupere
6	15	15	rupere excesiva
7	9	9	5,2
8	7	9	2,5

9	5	9	3
10	3	9	2,3
11	11	9	rupere
12	15	9	rupere
13	15	7	rupere
14	11	7	rupere
15	9	7	rupere
16	7	7	3
17	6	7	2,4
18	3	7	2,1
19	9	20	2,1
20	9	30	2,1
21	15	20	RUPERE
22	15	30	RUPERE

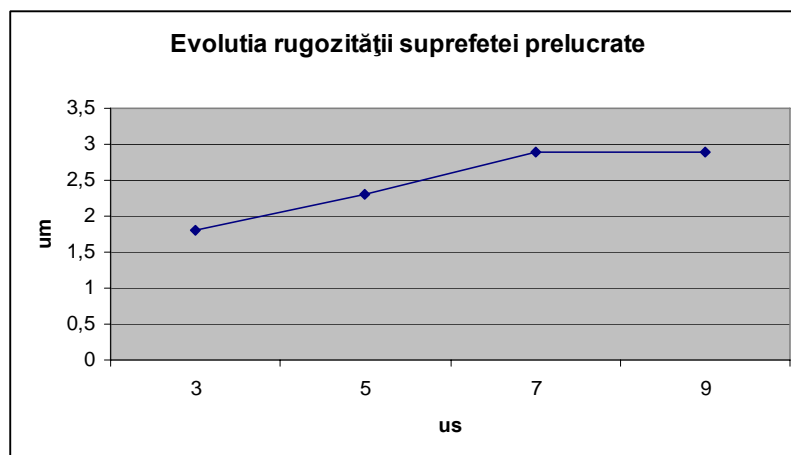


Fig. 4.3. Evoluția rugozității suprafeței prelucrate în funcție de timpul Ton

Evoluția rugozității suprafeței pieselor prelucrate în funcție de timpul ON arată că odată cu creșterea timpului rezultă o rugozitate crescută.

Un alt parametru important al generatoarelor de impulsuri folosite în procesul de prelucrare dimensională prin eroziune electrică cu fir este tensiunea impulsurilor.

În graficul prezentate în continuare sunt prezentate rezultatele experimentale în condițiile în care timpul ON este de 9 μ s și timpul OFF este de 15 μ s iar parametrul ce variază este tensiunea.

Tensiunea este codificată pe o scară de la 1 la 9 și conține valori între 1 și 80V. Astfel se observă o variație foarte mică a rugozității, aceasta fiind ușor mai scăzută în cazul tensiunilor mai mici.

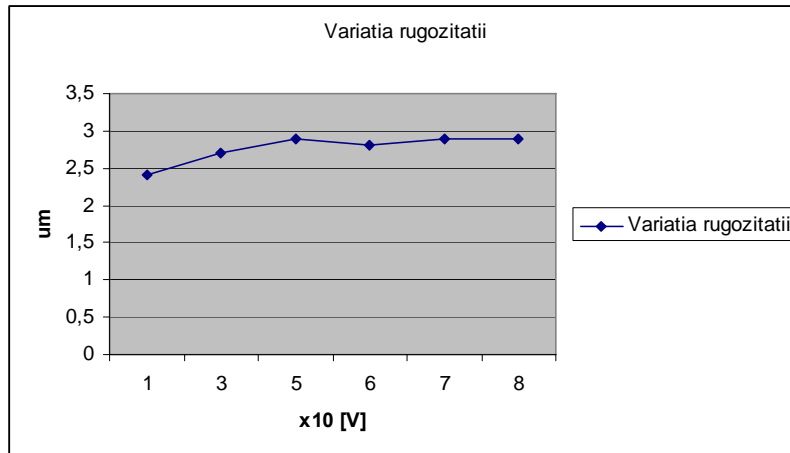


Fig. 4.4. Evoluția rugozității în raport cu variația nivelului tensiunii

4.2. Studiul asupra factorilor de influență asupra timpului de prelucrare

În urma planului experimental efectuat a fost extras tabelul 4.3. Tabel ce prezintă valorile obținute experimental în urma măsurărilor efectuate pentru analiza parametrilor de interes în cadrul analizei în domeniul tezei și care sunt influențați de viteza firului.

Tabelul 4.3. Evoluția parametrului timp de prelucrare în funcție de viteza de rulare a firului.

Nr. Crt.	Viteza fir [ml/min]	timp de prelucrare [min]
1	40	2,02
2	70	2,04
3	100	2,04
4	130	2,07
5	160	2,09
6	190	2,19
7	220	2,15

Rezultatele prezentate în tabelul 4.3. sunt informații extrase din lista de experimente realizate, acestea fiind alese pentru prezentare, întrucât se observă o ușoară creștere a timpului de prelucrat în funcție de viteza de rulaj a firului.

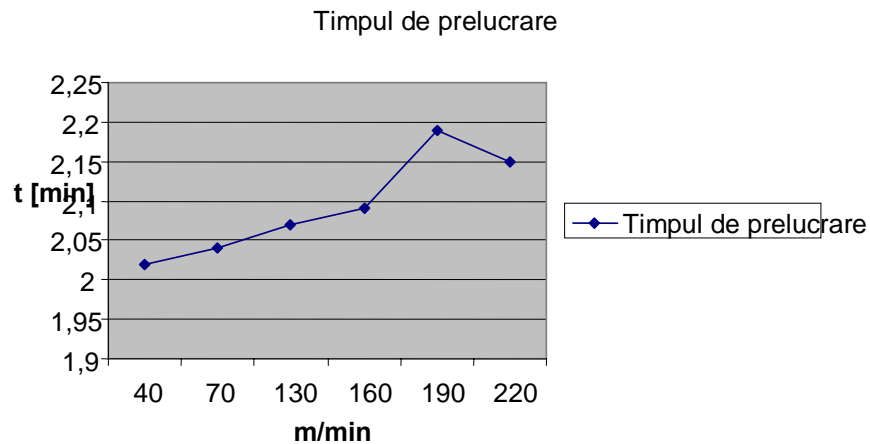


Fig. 4.5. Variația timpului de prelucrare în funcție de viteza firului

Pentru a putea interpreta variația timpului de prelucrare în funcție de viteza de rulare a firului, a fost realizat graficul din figura 4.5. în care se observă că timpul de prelucrare crește pe măsură ce crește viteza de rulare a firului, dar această creștere este foarte mică, astfel pe domeniul experimental s-a constatat o creștere de 15 secunde. Această variație pentru studiul prezentei teze poate fi ignorată.

Totuși aceste mici variații pot fi date ca și în cazul rugozității de variații foarte mici ale firului la viteze mari de rulare datorită fenomenelor necontrolabile dezvoltate în timpul prelucrării prin eroziune electrică.

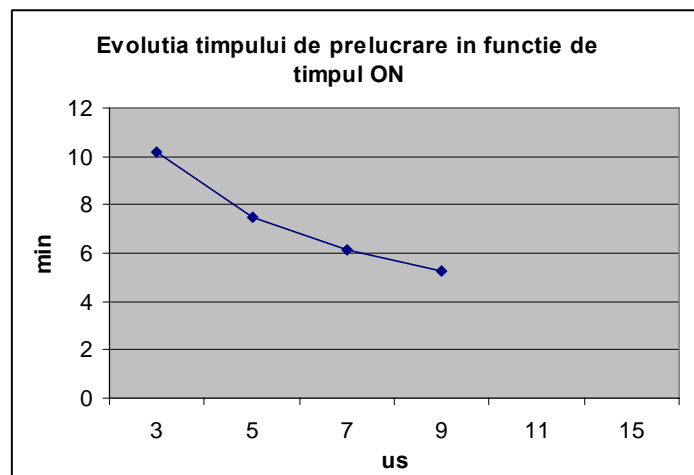


Fig. 4.6. Evoluția timpului de prelucrare în funcție de timpul T_{on}

Creșterea timpului de prelucrare în funcție de scăderea timpului ON din perioada unui impuls. Timpul OFF al impulsurilor este $15\mu\text{s}$.

Scăderea timpului ON sub $9\mu\text{s}$ duce la instabilitatea procesului, rezultând ruperea firului.

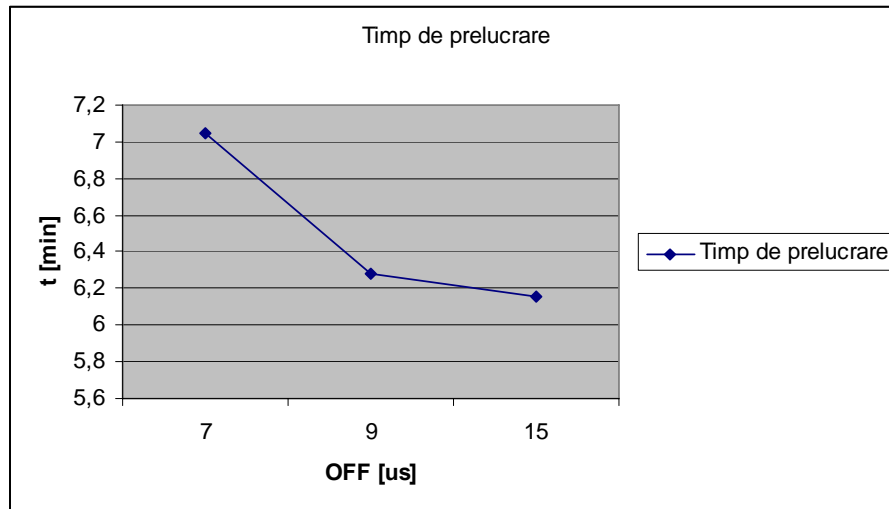


Fig. 4.7. Evoluția timpului de prelucrare în funcție de timpul Toff

Scăderea timpului de prelucrare în funcție de creșterea timpului OFF din perioada unui impuls. Timpul ON al impulsurilor este $07\mu\text{s}$.

4.3. Studiul asupra factorilor de influență asupra preciziei dimensionale

Precizia dimensională este un parametru important al prelucrărilor dimensionale prin eroziune electrică cu fir.

Poziționare exactă a firului pe traiectoria piesei s-a dovedit o problemă ușor rezolvabilă din punct de vedere al automatizării și electronicii. Această problemă a fost rezolvată aproape complet pentru situația în care poziționarea trebuie făcută „la rece” în afara procesului.

Astfel cu ajutorul unui CNC având la bază un calculator compatibil IBM PC și o serie de interfațări electronice pot fi comandate motoare pas cu pas care printr-un lanț cinematic realizează poziționarea firului în apropierea piesei de prelucrat, precizia poziționării fiind foarte exactă și depinzând doar de tehnologia folosită pentru realizarea motoarelor, reductorilor și întreg lanțul cinematic.

Dacă poziționarea firului poate fi exactă, datorită procesului de prelucrare, precizia prelucrării poate fi compromisă.

Procesul de prelucrare prin eroziune electrică are la bază fenomene complexe imposibil de controlat, arcul electric în urma căruia se realizează prelucrarea poate fi controlabil până la o anumită limită, apariția erorilor fiind inevitabilă.

Erorile dimensionale apărute pot fi minimizate prin intuirea efectului prelucrării și poziționarea firului cu o abatere față de conturul exact al piesei.

Pentru identificarea factorilor care pot introduce erori dimensionale în urma procesului au fost realizate o serie de experimentări, care au avut drept prelucrare aceeași formă a piesei, dar parametrii procesului au fost modificați.

Experimentele realizate au fost efectuate pe o mașină Sodick AQ300L dotată cu un CNC Sodick LN1W, dielectricul folosit fiind apa deionizată.

În timpul prelucrării dimensionale prin eroziune electrică, datorită nesincronizării diferiților pași ce trebuie parcuri pentru prelucrare pot apărea și atingeri ale firului de piesă, producând astfel scurtcircuit. Acesta poate apărea chiar și în cazul apropierilor destul de mari față de piesă, nu doar atingerea accidentală a acesteia.

Scurtcircuitul trebuie tratat prin revenirea pe traiectoria firului cu un pas înaintea. Astfel pot apărea și alte erori care pot conduce la abateri de la prelucrare.

Apariția scurtcircuitului provoacă pe lângă erori dimensionale și rugozități ridicate la suprafața piesei.

Minimizarea erorilor în astfel de situații presupune o coordonare precisă a firului, nu numai pe traiectorie dar și adaptarea noii traiectorii datorată erorilor din proces. Parametrii procesului sunt parametri stabiliți la începerea procesului, aceștia nu pot fi adaptați în timpul prelucrării, astfel că singurul mod în care se poate corecta o eroare dimensională este prin corecția traiectoriei firului în timpul procesului. Această corecție este făcută de CNC-ul mașinii și mai exact de calculatorul din dotarea acestuia.

Experimentele realizate presupun realizarea unor prelucrări prin care se va decupa aceeași formă, cu un contur simplu și exact folosind diferiți parametri ai procesului. Rezultatele obținute se folosesc la proiectarea unui sistem de comandă cu calculatorul a unei mașini de prelucrat prin eroziune electrică cu fir, de producție a anilor 1980, dar modernizată prin realizarea unei comenzi cu calculatorul a întregului proces de prelucrare, această mașină fiind una din realizările personale în urma tezei de doctorat.

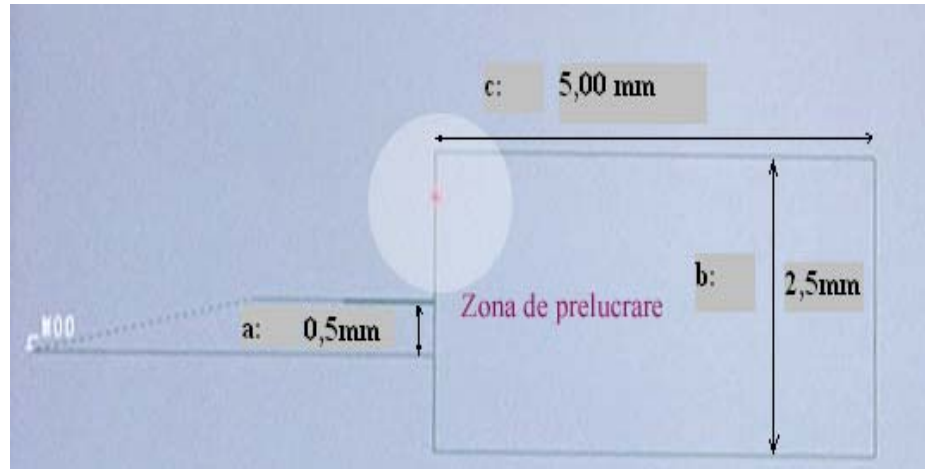


Fig. 4.8. Piesa realizată în primul experiment

În primul experiment realizat a fost prelucrată o piesă din oțel de 4mm grosime având conturul dat de programul următor :

```
G41M000G01X-0,3438Y1,25
G01X0.0Y2.5
G01X5,0Y2,5
G01X5,0Y0,0
G01X0,0Y0,0
G01X0,0Y0,75
G40N0X-5,0Y0,75
```

Execuția programului mai sus menționat duce la realizarea unei piese conform figurii 4.8

Pentru această figură au fost realizate mai multe experimente în care a fost urmărită influența vitezei de rulare a firului asupra preciziei dimensionale.

Tabelul 4.4. conține câteva valori experimentale obținute în urma procesului de prelucrare, astfel a fost menținut raportul timpilor generatorului Ton și Toff la o valoare optimizată în capitolele anterioare. Pentru a analiza mai bine erorile dimensionale a fost folosit un regim mai dur de prelucrare, fiind folosit un nivel maxim al tensiunii de prelucrare.

Pentru a putea identifica influența vitezei de rulare a firului am folosit în acest caz, pentru parametru variabil, viteza de rulare a firului de la 4,0m/minut, viteză minimă folosită în cadrul întregului program experimental până la 22,0 m/minut, viteză maximă folosită în planul experimental.

Tabelul 4.4. Valorile experimentale obținute pentru stabilirea influenței vitezei de rulare a firului asupra preciziei dimensionale.

Nr. Crt.	Timp ON [μs]	Timp OFF [μs]	V [V]	Viteza fir [m/min]	Dimensiunea A [mm]	Dimensiunea B [mm]	Dimensiunea C [mm]
1	9	15	8	4,0	0,29	2,54	5,01
2	9	15	8	7,0	0,29	2,5	5,01
3	9	15	8	13,0	0,23	2,47	5,02
4	9	15	8	16,0	0,3	2,56	5,04
5	9	15	8	19,0	0,28	2,49	4,99
6	9	15	8	22,0	0,3	2,48	5

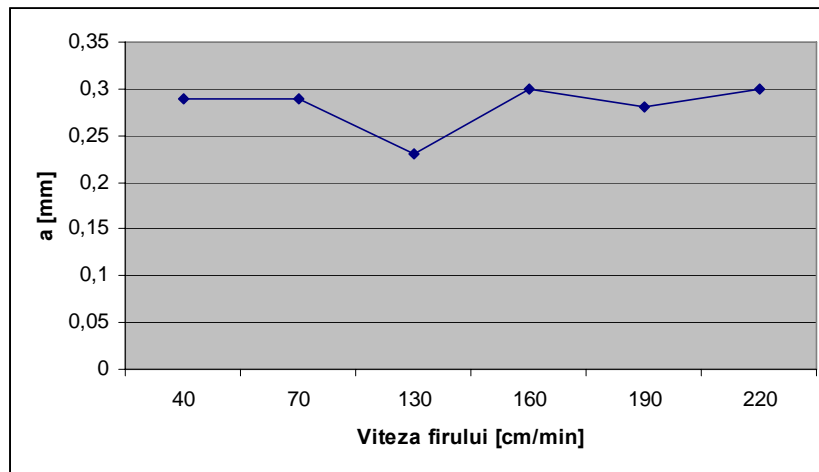


Fig. 4.8. Variația dimensiunii a în funcție de viteza firului

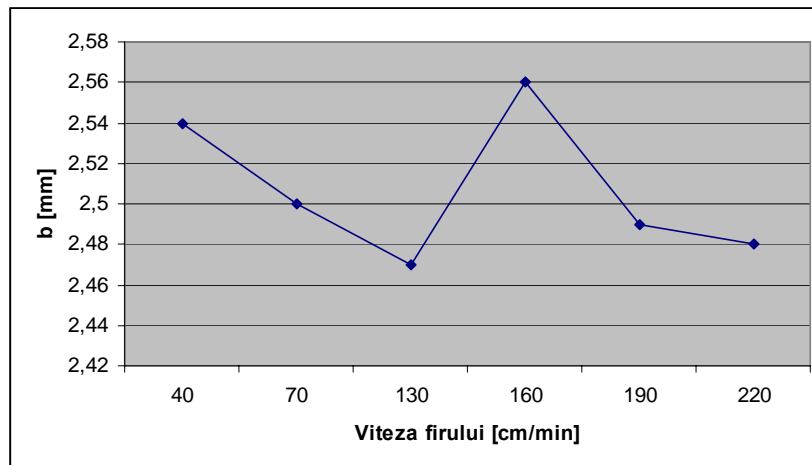


Fig. 4.9. Variația dimensiunii b în funcție de viteza firului

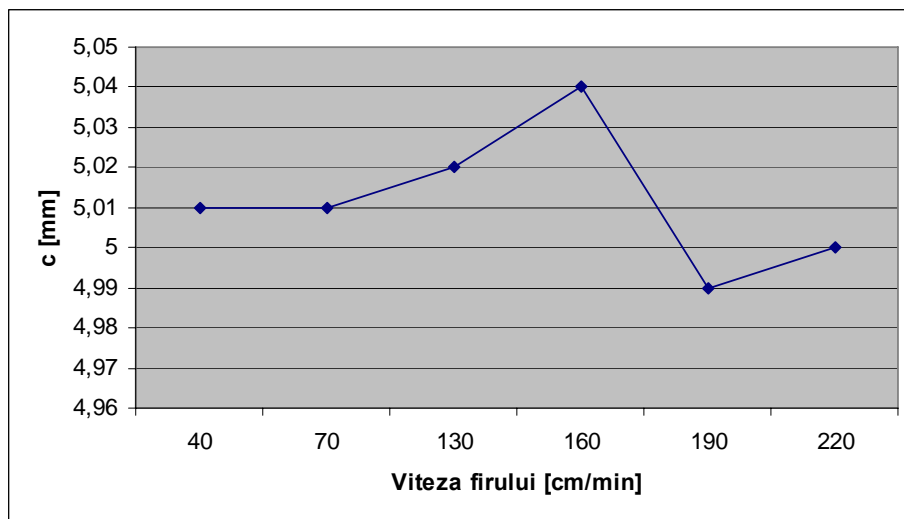


Fig. 4.10. Variația dimensiunii c în funcție de viteza firului

Analizând datele obținute în urma experimentelor, ținând cont de valoarea impusă pentru offset de 0,1580 rezultă că vitezele mici ale firului duc la un control mai precis asupra dimensiunii. O viteză mai mare a acestuia conduce la creșterea abaterilor dimensionale și cel mai important lucru duce la instabilitatea procesului, mai exact la scăderea preciziei dimensionale. Această scădere a preciziei este determinată și de instabilitatea firului la viteze mari.

Se observă că creșterea vitezei peste 13 m/minut duce la variație nedeterminată a preciziei, astfel că dacă se dorește compensarea erorilor în urma procesului, acestea ar putea fi nedeterminate, întrucât erorile apărute la viteze mari ale firului sunt aleatorii.

La viteze mici de derulare a firului se constată că deși există o eroare dimensională, aceasta poate fi determinată, fiind constantă sau crescând ușor odată cu mărirea vitezei firului. Această eroare dimensională poate fi calculată și introdusă în algoritmul de conducere a firului pe traiectoria piesei de prelucrat, astfel încât precizia piesei rezultate să fie mare.

Eroarea dimensională dată de viteza firului, se calculează ca fiind rezultatul dimensiunii din proiect din care se scade dimensiunea reală și offsetul dat de grosimea firului. Această valoare este înmulțită cu o constantă dată de lățimea piesei pentru care s-a făcut experimentarea, în cazul de față valoarea poate fi dată o medie a celor trei dimensiuni a, b, c .

În urma calculelor se poate stabili o eroare dată de viteza firului asupra preciziei dimensionale.

Se recomandă folosirea vitezelor reduse ale firului, acestea conduc la o precizie dimensională crescută. Scăderea excesivă a vitezei firului poate duce la ruperea acestuia, implicit oprirea procesului, reluarea acestuia conduce de cele mai multe ori la compromiterea piesei.

Nu se recomandă viteze mari ale firului, doar în cazul în care crește grosimea piesei de prelucrat, acest lucru ducând la uzura excesivă a firului și implicit la ruperea acestuia.

În al doilea experiment realizat a fost prelucrată o piesă din oțel de 4mm grosime având conturul dat de programul următor :

```
G41M000G01X-0,3438Y1,25
```

```
G01X0.0Y5,0
```

```
G01X10,0Y5,0
```

```
G01X0,0Y-5,0
```

```
G01X0,0Y0,75
```

```
G40N0X-5,0Y0,75
```

Execuția programului mai sus menționat duce la realizarea unei piese conform figurii 4.11

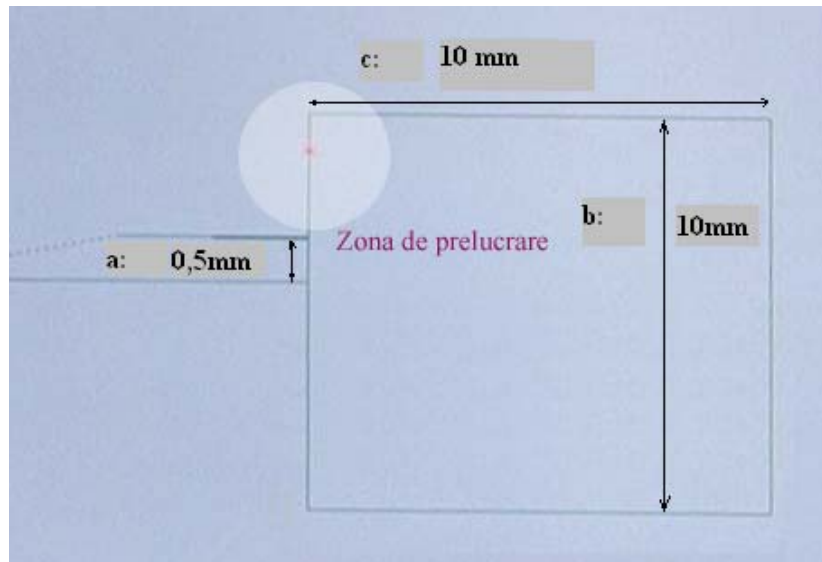


Fig. 4.11. Piesa realizată în al doilea experiment

Pentru această figură au fost realizate mai multe experimente în care a fost urmărită influența vitezei de rulare a firului asupra preciziei dimensionale.

Tabelul 4.5. conține câteva valori experimentale obținute în urma procesului de prelucrare, astfel a fost menținut raportul timpilor generatorului Ton și Toff la o valoare optimizată în capitolele anterioare. Pentru a analiza mai bine erorile dimensionale a fost folosită o viteză de rulare a firului optimă la 10,0 m/minut, fiind variată tensiunii de prelucrare.

Pentru a putea identifica influența tensiunii de prelucrare am folosit în acest caz, pentru parametru variabil, nivelul tensiunii de alimentare pentru procesul de prelucrare. În ambele experimente a fost folosit un offset de 0.1580 pentru ajustarea poziției firului în raport cu piesa, ajustare dată de grosimea firului folosit.

A fost nevoie de creșterea dimensiunii piesei și aducerea la aceleași dimensiuni întrucât se așteaptă erori dimensionale diferite pe axa X față de axa Y.

Tabelul 4.5. Valorile experimentale obținute pentru stabilirea influenței tensiunii de lucru asupra preciziei dimensionale.

Nr. Crt.	Timp ON [μs]	Timp OFF [μs]	V [V]	Viteza fir [ml/min]	Dimensiunea A [mm]	Dim. B [mm]	Dimensiunea C [mm]
1	9	15	8	10,0	0,2	9,99	9,99
2	9	15	7	10,0	0,21	10,03	9,99
3	9	15	5	10,0	0,28	10,03	10,01
4	9	15	3	10,0	0,23	10,02	10,02

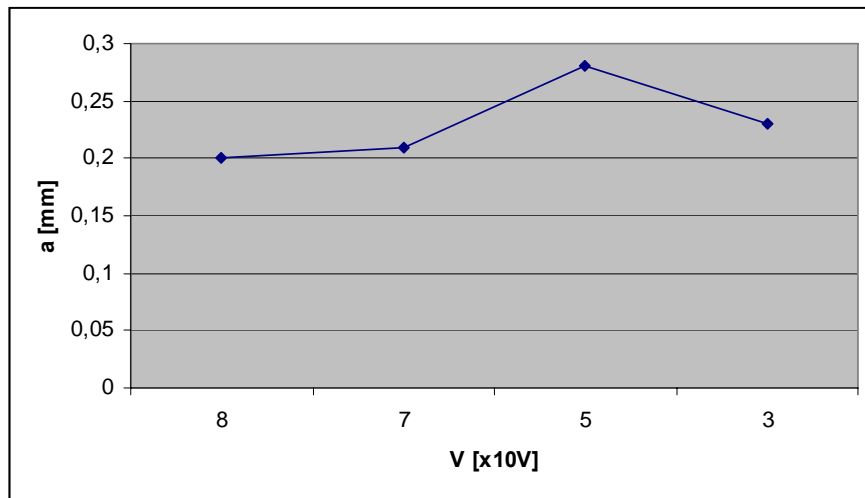


Fig. 4.12. Variația dimensiunii a în funcție de tensiunea de lucru

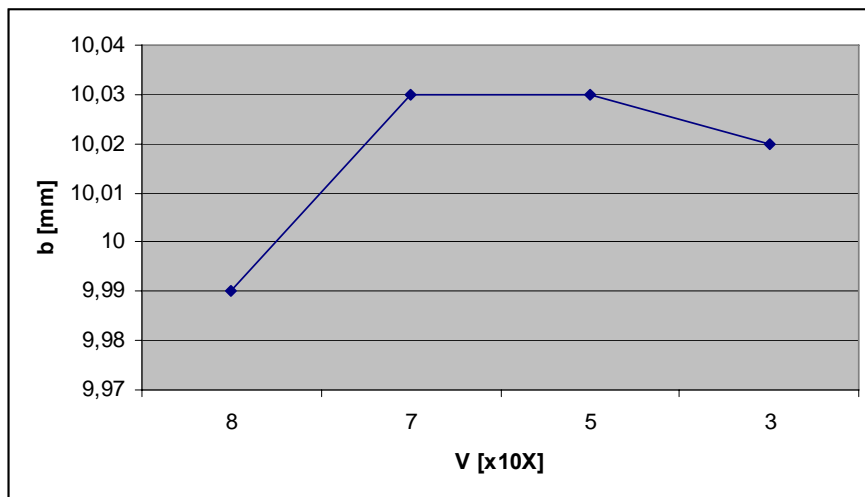


Fig. 4.13. Variația dimensiunii b în funcție de tensiunea de lucru

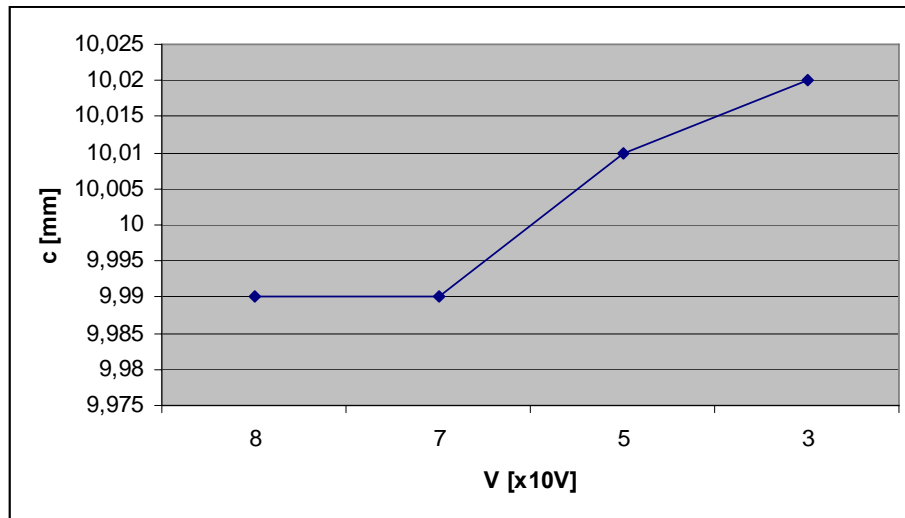


Fig. 4.14. Variația dimensiunii c în funcție de tensiunea de lucru

În cazul studiului variațiilor dimensionale în funcție de tensiunea de lucru se constată o variație determinabilă a dimensiunilor, putându-se calcula un indice de corecție pentru variația tensiunii de lucru.

În literatură se întâlnește observația că creșterea tensiunii de lucru crește interstițiul dintre piesă și fir, astfel prelucrarea piesei este mai mare în situația în care nivelul tensiunii de prelucrare este crescut.

Se poate calcula pentru fiecare nivel al tensiunii un factor de corelație al poziției firului prin scăderea din piesa proiectată a valorii rezultate la aceasta se adaugă de două ori offsetul inclus la prelucrare, valoarea rezultată trebuie corelată cu nivelul tensiunii la care s-a făcut prelucrarea.

Se constată că la tensiuni mari de prelucrare piesa dorită a fost obținută cu abateri mari la nivelul dimensiunilor.

Se observă că aceste prelucrări dimensionale în cazul de față au suferit modificări dimensionale diferite pe axa X față de axa Y. Astfel pentru o prelucrare exactă trebuie analizat și calibrat procesul de prelucrare diferit față de cele două axe.

Tensiunile mici de prelucrare determină precizie mare de prelucrare, iar ajustarea offset-ului trebuie refăcută, în cazurile de față apare o eroare dimensională suplimentară, astfel că piesele prelucrate sunt mai mari față de cele proiectate.

Se poate opta pentru astfel de prelucrări în cazul în care se mai execută cel puțin un proces de prelucrare având ca scop corecția dimensională și reducerea rugozității suprafețelor pieselor prelucrate.

Totuși, se constată că variațiile tensiunii determină erori dimensionale, care pot fi ușor corectate fără a presupune afectarea procesului.

Pentru a putea menține parametrii de corecție obținuți este obligatoriu ca generatorul să furnizeze permanent același nivel de tensiune, indiferent de interstițiul existent între piesa de prelucrat și fir.

Tabelul 4.6. conține câteva valori experimentale obținute în urma procesului de prelucrare, astfel a fost folosită o viteză de rulare a firului optimă la 10,0 m/minut și o tensiune de lucru maximă pentru a amplifica efectele erorilor dimensionale apărute la piesă în urma prelucrărilor.

Pentru a putea identifica influența raportul timpilor generatorului Ton și Toff am folosit în acest caz, pentru parametru variabil, raportul timpilor generatorului Ton și Toff pentru procesul de prelucrare. Și în acest caz a fost folosit un offset de 0.1580 pentru ajustarea poziției firului în raport cu piesa, ajustare dată de grosimea firului folosit.

Tabelul 4.6. Valorile experimentale obținute pentru stabilirea influenței timpilor de generare a impulsurilor dați de generator asupra preciziei dimensionale.

Nr. Crt.	Timp ON [μs]	Timp OFF [μs]	V [V]	Viteza fir [ml/min]	Dimensiunea A [mm]	Dim. B [mm]	Dimensiunea C [mm]
1	9	15	8	10,0	0,2	9,99	9,99
2	7	15	8	10,0	0,22	10	10
3	5	15	8	10,0	0,26	10,01	10,06
4	3	15	8	10,0	0,21	10,02	9,98
5	9	9	8	10,0	0,23	10,04	9,98
6	7	9	8	10,0	0,21	9,99	9,99
7	5	9	8	10,0	0,23	10,07	10
8	3	9	8	100	0,23	10	10
9	7	7	8	100	0,21	9,99	10
10	6	7	8	100	0,21	10,06	9,98
11	9	20	8	100	0,21	9,98	9,98
12	9	30	8	100	0,17	9,95	9,94

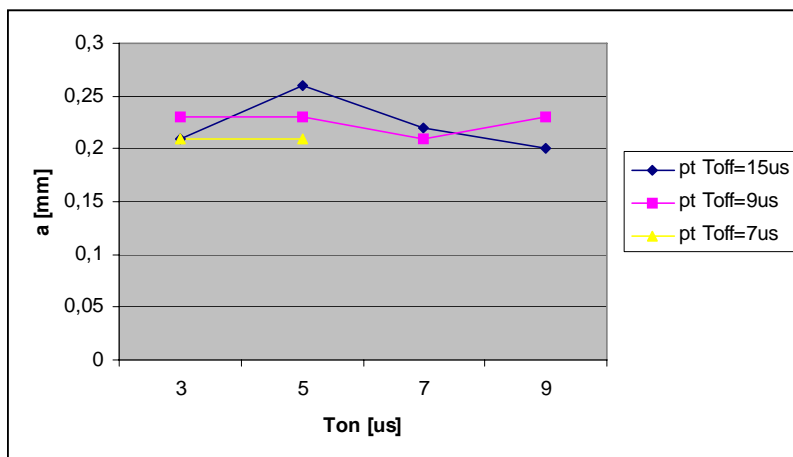


Fig. 4.15. Variația dimensiunii a în funcție de Timpii Ton și Toff ai generatorului

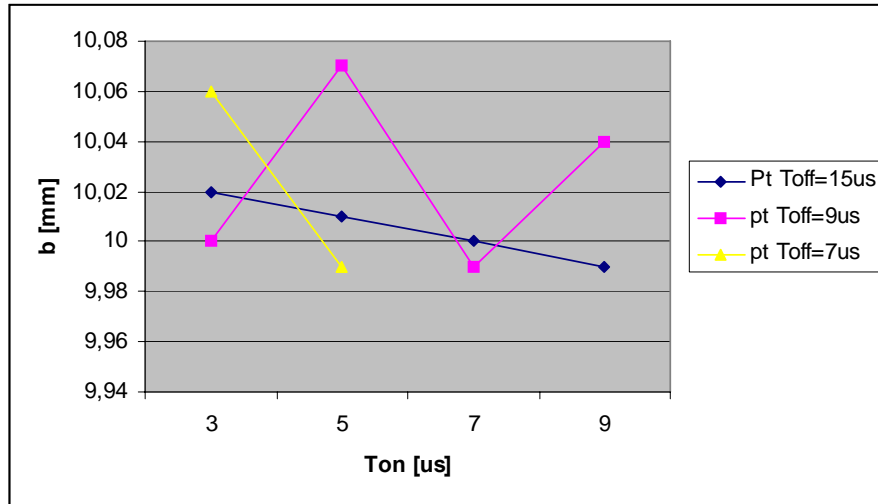


Fig. 4.16. Variația dimensiunii b în funcție de Timpul T_{on} și T_{off} ai generatorului

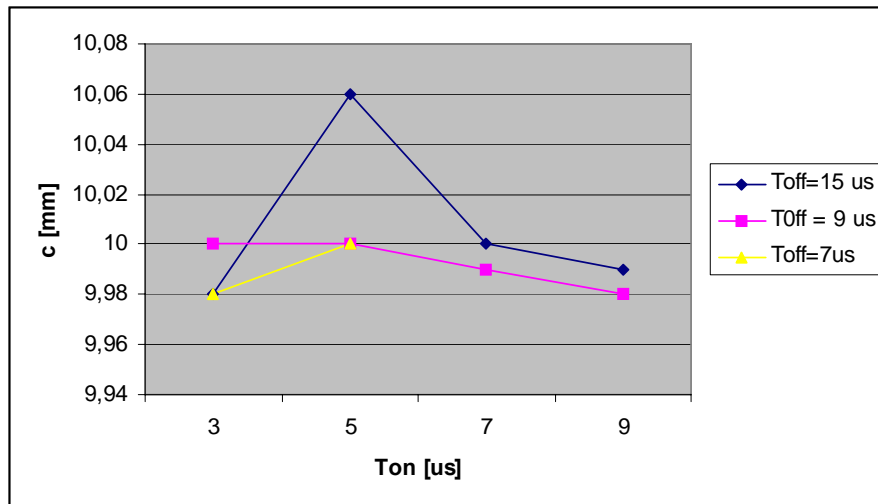


Fig. 4.17. Variația dimensiunii c în funcție de Timpul T_{on} și T_{off} ai generatorului

Se observă, din graficele anterioare, că creșterea timpului T_{off} duce la o stabilitate a procesului, procesul putând fi analizat în funcție de timpul T_{on} .

Deși în literatură a fost întâlnită observația că timpul T_{on} scurt determină o descărcare mai puternică, astfel obținându-se erori dimensionale mai mari, s-a constatat că abaterile dimensionale există pe tot domeniul experimental.

În urma acestor experimente, la fel ca și în cazul celorlalte raportul timpului T_{on} în funcție de T_{off} , optim, este de 1 la 2, observându-se că pentru un timp T_{on} de 7-9 us și un timp T_{off} de 15 us procesul este cel mai stabil, erorile dimensionale fiind foarte mici și ușor predictibile.

Pentru a întări afirmațiile anterioare a mai fost realizat încă un experiment la care a fost menținut timpul T_{on} constant la 9us iar timpul T_{off} a fost variat de la un raport de 1 la 1 până la un raport de aproximativ 1 la 3, astfel timpul T_{off} a parcurs un interval între 9us până la 30us.

Figurile următoare prezintă evoluția dimensională în funcție de timpul T_{off} . Pentru aceste cazuri timpul T_{on} este constant, menținut la valoare de 9us iar restul parametrilor ai procesului sunt menținuți constanți, fiind urmărită doar influența parametrului T_{off} .

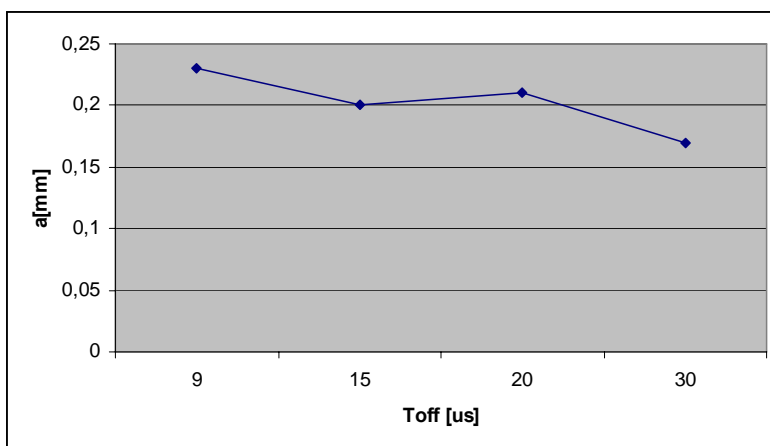


Fig. 4.18. Variația dimensiunii a în funcție de Timpul Toff; $T_{on}=9[us]$

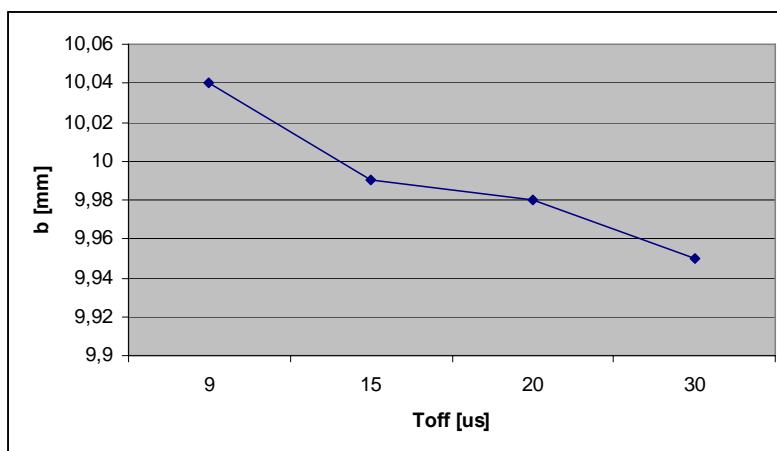


Fig. 4.19. Variația dimensiunii b în funcție de Timpul Toff; $T_{on}=9[us]$

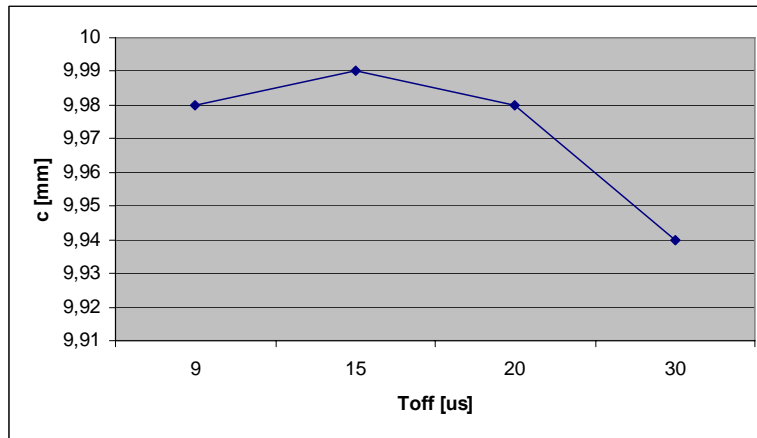


Fig. 4.20. Variația dimensiunii c în funcție de Timpul Toff; $T_{on}=9[us]$

Se constată că variația timpului Toff în funcție de timpul Ton determină erori dimensionale, acestea sunt predictibile, putând fi generată o funcție pentru reducerea acestor erori.

Au fost executate măsurători folosind indicatorii de poziție ai mașinii asupra poziției piesei. Poziția firului indicată de mașina de prelucrat prin eroziune electrică, valoarea proiectată și rezultatul dimensional al piesei constituie un studiu realizat în cadrul tezei, rezultatele obținute au fost și ele proiectate și implementate pe noua mașina de prelucrat.

Pentru a urmări în timp real poziția firului au fost înregistrate poziții ale firului în timpul prelucrării diferitelor forme.

Tabelul 4.7. Pozițiile relative la piesă pentru citirea pozițiilor firului în timpul prelucrării prin eroziune electrică cu fir – piesa 1.

X	14,2114	14,2762	14,3452	14,4007	14,4599	14,5297	14,5996	14,6605
Y	1,2989	1,2704	1,2431	1,2234	1,2045	1,1849	1,1683	1,1560
X	14,7305	14,7926	14,8625	14,9341	14,9962	15,0576	15,0954	15,1123
Y	1,1445	1,1365	1,1301	1,1262	1,1250	1,1259	1,1274	1,1286
X	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250
Y	1,1292	1,1199	1,1032	1,0869	1,0677	1,0512	1,0321	1,0157
X	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250
Y	0,9992	0,9954	0,9915	0,9678	0,9414	0,9088	0,8710	0,8193
X	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250
Y	0,7689	0,7055	0,6304	0,5655	0,5005	0,4247	0,3598	0,2841
X	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250
Y	0,2185	0,1541	0,0784	0,0135	-0,0517	-0,1271	-0,1919	-0,2682
X	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250
Y	-0,3328	-0,4085	-0,4732	-0,5388	-0,6139	-0,6788	-0,7552	-0,8197
X	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250
Y	-0,8954	-0,9601	-1,0257	-1,1007	-1,1659	-1,2421	-1,3064	-1,3822
X	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250
Y	-1,4362	-1,5228	-1,5879	-1,6527	-1,7287	-1,7829	-1,8688	-1,9337
X	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1198	15,1034	15,0842
Y	-2,0096	-2,0635	-2,1084	-2,1231	-2,1250	-2,1250	-2,1250	-2,1250

Punctele măsurate prin intermediul informațiilor oferite de mașina de prelucrat prin eroziune electrică, reprezintă poziții relative ale firului la piesa de prelucrat. Din tabelele rezultate au fost extrase valori pentru îmbunătățirea traiectoriei firului la mașina de prelucrat prin eroziune electrică cu fir producție veche și îmbunătățită prin dotarea cu calculator pregătit pentru conducerea procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu fir.

Pentru a simula repetarea prelucrării piesei prin eroziune electrică, datele înregistrate au fost introduse într-un program matematic pentru redesenarea conturului piesei.

În figura 4.21. este prezentată figura generată de punctele înregistrate. Se constată că frecvența punctelor înregistrate nu este constantă, și crește în apropierea locurilor unde urmează schimbarea direcției.

Pentru o analiză mai detaliată au fost mărite anumite zone de interes și prezentate în figurile 4.22, 4.23.

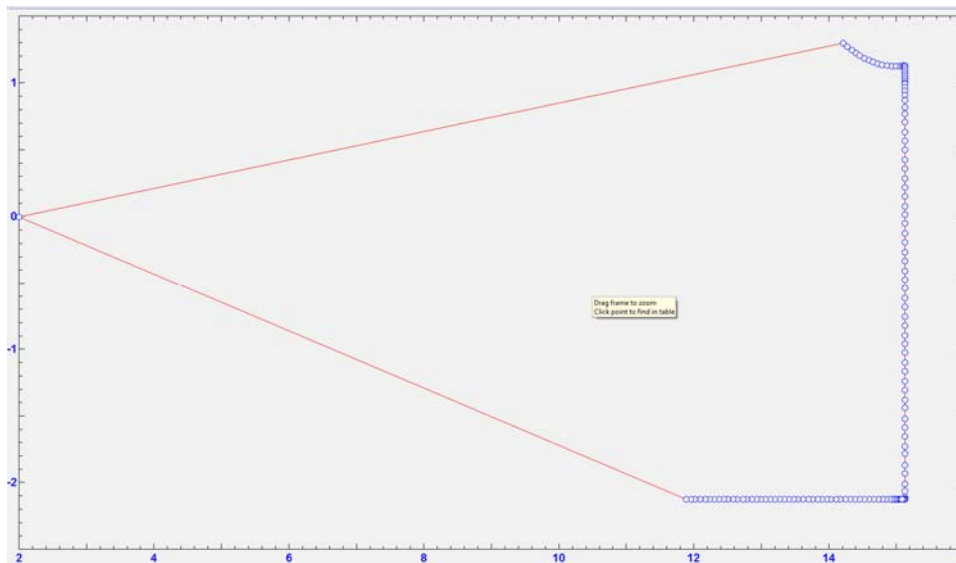


Fig. 4.21. Reprezentarea punctelor înregistrate ca poziție fir în procesul de prelucrare – piesa 1, vederea ansamblu.

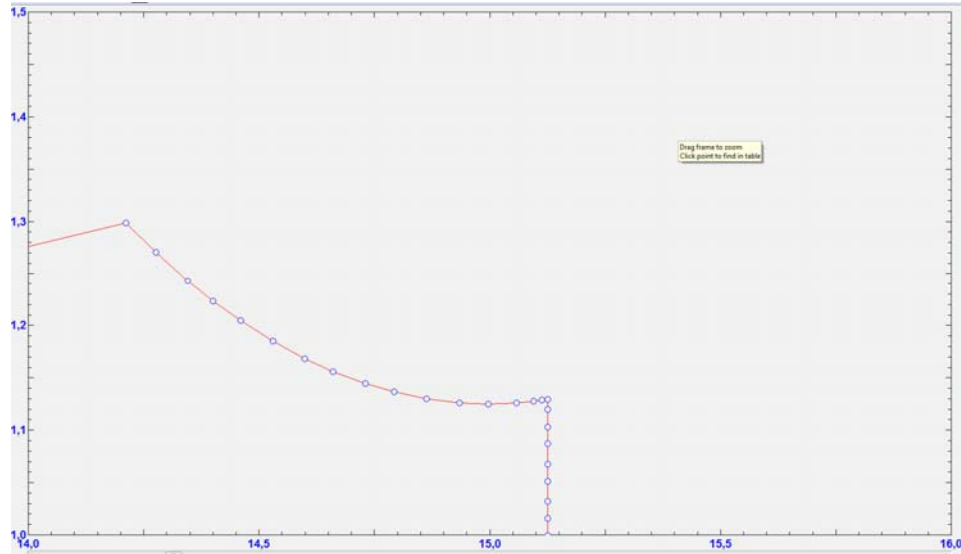


Fig. 4.22. Reprezentarea punctelor înregistrate ca poziție fir în procesul de prelucrare – piesa 1, vedere detaliu a.

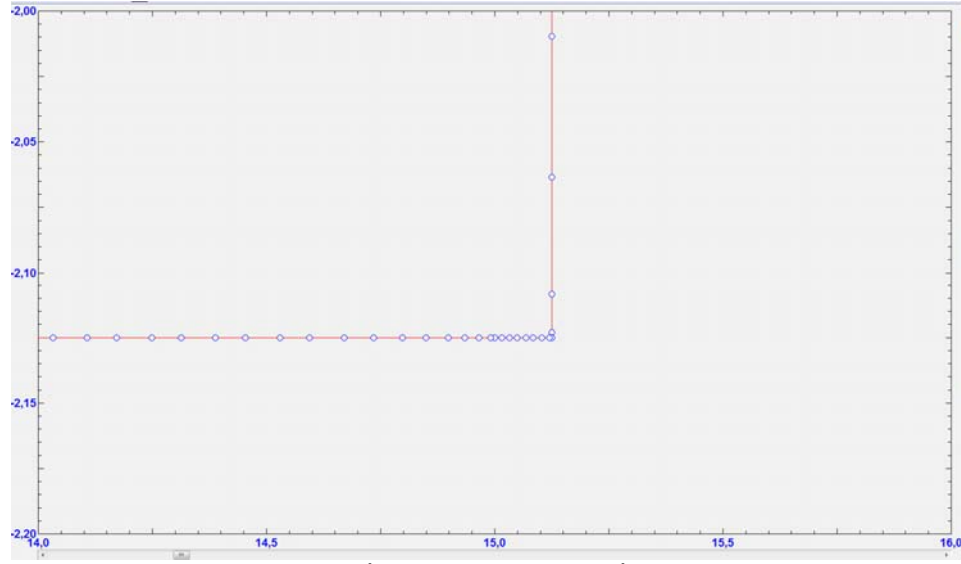


Fig. 4.23. Reprezentarea punctelor înregistrate ca poziție fir în procesul de prelucrare – piesa 1, vedere detaliu b

În figurile prezentate se observă foarte mici variații sau erori în timpul prelucrărilor, erori date de parametrii procesului, scurtcircuit sau alte tipuri de erori, chiar și erori software de poziționare a firului.

La prelucrare piesei 2 au fost întâlnite astfel de erori, situații interesante și analizate în scopul reducerii apariției unor astfel de erori.

Tabelul 4.8. Pozițiile relative la piesă pentru citirea pozițiilor firului în timpul prelucrării prin eroziune electrică cu fir – piesa 2.

X	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250	15,1250
Y	5,1983	5,1333	5,0574	4,9926	4,9928	4,9288	4,8896	4,8708
X	15,1208	15,1037	15,0848	15,0686	15,0486	15,0490	15,0355	15,0137
Y	4,8711	4,8721	4,8730	4,8737	4,8737	4,8743	4,8746	4,8749
X	14,9972	14,9914	14,9894	14,9755	14,9480	14,9166	14,8721	14,8365
Y	4,8750	4,8750	4,8750	4,8748	4,8742	4,8731	4,8706	4,8678
X	14,7965	14,7348	14,6630	14,6032	14,5322	14,4750	14,4042	14,3476
Y	4,8639	4,8561	4,8845	4,8325	4,8157	4,8000	4,7778	4,7778
X	14,3476	14,2803	14,2150					
Y	4,7578	4,7313	4,7027					

În figura 4.24. sunt reprezentate pozițiile firului înregistrate în timpul prelucrărilor. Se observă două erori apărute în timpul prelucrării dimensionale prin eroziune electrică cu fir. Aceste erori pot influența dimensiunea piesei atunci când ele nu sunt corectate corespunzător sau de cele mai multe ori influențează rugozitatea suprafeței piesei prelucrate.

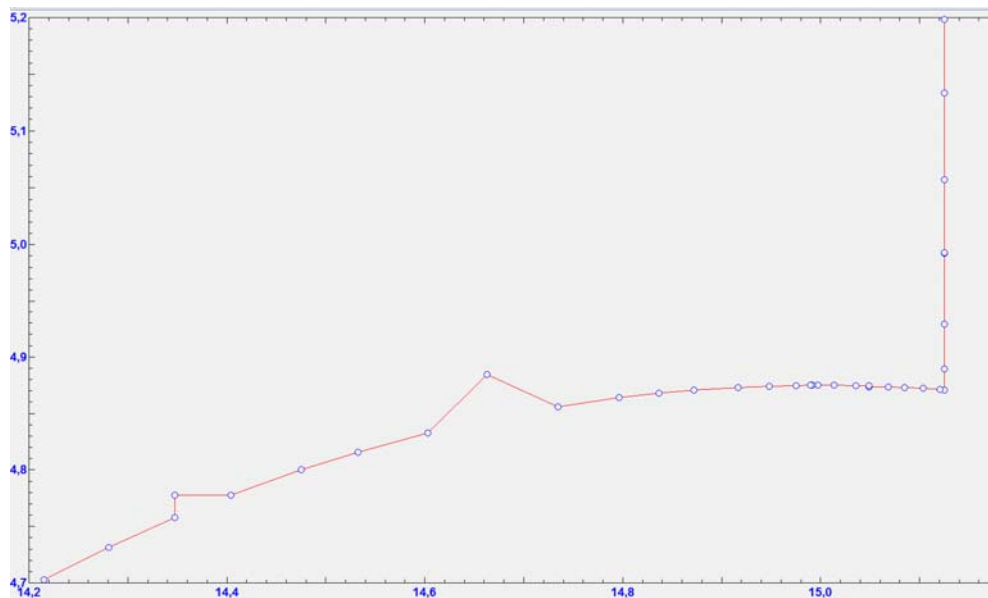


Fig. 4.24. Reprezentarea punctelor înregistrate ca poziție fir în procesul de prelucrare – piesa 2, vederea ansamblu

Analiza grafică arată că abaterea față de traiectoria inițială a firului este destul de mare, ajungând chiar la aproximativ, 0,06 mm în primul caz și de aproximativ de 0,03 mm în cel de al doilea caz.

Astfel de erori pot fi ignorate în cazul în care precizia dimensională nu este un parametru foarte strict al piesei de prelucrat.

Totuși apariția unor astfel de erori, în mod repetat cresc rugozitatea suprafeței prelucrate. În acest caz aceste erori pot determina rugozitate de până la 40-60 um.

Apariția erorilor poate fi determinată de mai mulți factori :

- viteza ridicată a firului, determină variații ale interstițiului eroziv inducând starea de scurtcircuit, softul CNC-ului, încercând să remedieze eroare poate retrage firul de pe traiectorie astfel provocând erori și mai mari
- calitatea lichidului dielectric,
- curățirea interstițiului
- erori apărute la citirea poziției firului; o eroare introdusă la citirea poziției influențează algoritmul de generare a traiectoriei firului, astfel se dorește reducerea erorii de poziție realizându-se astfel o eroare mai mare, aceea de precizie.

Introducerea informațiilor rezultate în urma experimentelor în sistemul de comandă al mașinii de prelucrat prin eroziune electrică cu fir de tipul Elerofil, au fost efectuate cercetări în scopul optimizării preciziei dimensionale, care au avut ca obiect studiul procesului de prelucrare existând posibilitatea soft de a analiza procesul la nivelul fiecărui pas; [Slavici, 2006a], [Slavici, 2009c].

Aceste rezultate au fost obținute datorită facilităților oferite de programul C, care realizează comanda automată a echipamentului de prelucrare; În acest scop se deschide un fișier fpo.txt chiar în cursul prelucrării în care se salvează succesiv diferite informații asupra procesului de prelucrare; mai concret în varianta utilizată sunt salvate următoarele trei categorii de informații:

a) rezultatele citirilor periodice ale traductorilor de poziție și care se înscriu în variabilele reale x21 și y21; pentru comparație sunt prezentate de asemenea și valorile omoloage ale acestora rezultate în urma calculelor specifice interpolării x20 și y20; perioada de eșantionare între diferitele citiri este un parametru al programului (variabila de intrare) existând un optim în alegerea sa;

b) modalitatea de efectuare a segmentului de corecție, în cazul în care diferența dintre valorile comandate x20,y20 și cele citite de către traductori x21,y21 depășesc o anumită valoare de prag impusă; în această situație se indică modalitatea de efectuare a fiecărui pas, incluzând valorile calculate pentru x20,y20;

c) modalitatea de efectuare a revenirii în cazul depistării unui scurtcircuit; evident în această situație revenirea trebuie să se facă după exact aceeași traiectorie ca și în cazul prelucrării; fiind memorat fiecare pas al revenirii se pot trage concluzii asupra duratei revenirii din scurtcircuit, exprimată în număr de pași necesari la retragere; [Slavici, 2009c], [Slavici, 2006a].

În continuare este prezentat un segment din cadrul unui fișier generat de o deplasare după un arc de cerc; succesiunea generică a deplasărilor de tipul a,b sau

c sunt sugerate de dispunerea prezentate în figura 4.25. În figură se disting cele trei tipuri de segmente posibil de executat:

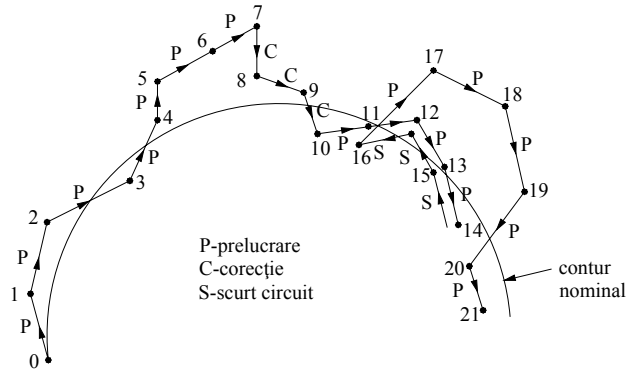


Fig. 4.25. Interpretarea unui segment de date recepționat de la traductori

a) segmente în care se realizează prelucrarea propriu-zisă notate cu indicativul p; în figura menționată exemple de astfel de segmente sunt succesiunile: 0-1-2-3-4-5-6-7... 10-11-12-13-14.....

16-17-18-19-20-21....

b) segmente prin intermediul cărora se realizează corecția traiectoriei, în sensul readucerii punctului curent al traiectoriei peste conturul nominal, aceste segmente fiind notate cu indicativul c; în cazul figurii precizate se exemplifică succesiune 7-8-9-10; (și în cazul corecției există posibilitatea de a apărea scurtcircuite deci micro-segmente sc care nu sunt notate în figură);

c) segmente prin intermediul cărora se realizează retragerea în cazul depistării unui scurtcircuit; aceste segmente sunt indicate prin prezența indicativului s în figură fiind exemplificate astfel segmentele 14-15-16;

În continuare este listată o secvență din fișierul amintit:

```

citiri x21=0.080 y21=0.004 x20=0.084 y20=0.001
citiri x21=0.164 y21=0.004 x20=0.168 y20=0.001
citiri x21=0.249 y21=0.004 x20=0.253 y20=0.001
citiri x21=0.333 y21=0.004 x20=0.338 y20=0.001
citiri x21=0.418 y21=0.004 x20=0.423 y20=0.001
citiri x21=0.502 y21=0.004 x20=0.508 y20=0.001
prel ci1p=1 delta=0.000 x20=0.502 y20=0.004
prel ci1p=2 delta=0.000 x20=0.502 y20=0.004
prel ci1p=3 delta=-0.000 x20=0.503 y20=0.004

```

```
prel ci1p=4 delta=0.000 x20=0.503 y20=0.003
prel ci1p=5 delta=-0.000 x20=0.504 y20=0.003
prel ci1p=6 delta=-0.000 x20=0.504 y20=0.003
prel ci1p=7 delta=0.000 x20=0.504 y20=0.002
prel ci1p=8 delta=-0.000 x20=0.505 y20=0.002
prel ci1p=9 delta=-0.000 x20=0.505 y20=0.002
prel ci1p=10 delta=0.000 x20=0.505 y20=0.002
prel ci1p=11 delta=-0.000 x20=0.506 y20=0.002
citiri x21=0.583 y21=0.002 x20=0.584 y20=0.000
citiri x21=0.649 y21=0.002 x20=0.646 y20=0.000
citiri x21=0.732 y21=0.002 x20=0.729 y20=0.000
citiri x21=0.815 y21=0.002 x20=0.814 y20=0.000
citiri x21=0.899 y21=0.002 x20=0.899 y20=0.000
citiri x21=0.982 y21=0.002 x20=0.984 y20=0.000
citiri x21=1.066 y21=0.002 x20=1.068 y20=-0.000
citiri x21=1.151 y21=0.002 x20=1.152 y20=-0.000
citiri x21=1.238 y21=0.002 x20=1.237 y20=-0.000
citiri x21=1.322 y21=0.002 x20=1.321 y20=-0.000
citiri x21=1.405 y21=0.002 x20=1.406 y20=-0.000
citiri x21=1.486 y21=0.002 x20=1.491 y20=-0.000
citiri x21=1.570 y21=0.002 x20=1.575 y20=-0.000
citiri x21=1.653 y21=0.002 x20=1.660 y20=-0.000
prel ci1p=1 delta=0.000 x20=1.653 y20=0.002
prel ci1p=2 delta=0.000 x20=1.653 y20=0.002
prel ci1p=3 delta=-0.000 x20=1.654 y20=0.002
prel ci1p=4 delta=-0.000 x20=1.654 y20=0.002
prel ci1p=5 delta=-0.000 x20=1.655 y20=0.002
prel ci1p=6 delta=0.000 x20=1.655 y20=0.001
prel ci1p=7 delta=-0.000 x20=1.655 y20=0.001
prel ci1p=8 delta=-0.000 x20=1.656 y20=0.001
prel ci1p=9 delta=-0.000 x20=1.656 y20=0.001
prel ci1p=10 delta=0.000 x20=1.656 y20=0.000
prel ci1p=11 delta=-0.000 x20=1.657 y20=0.000
citiri x21=1.739 y21=0.001 x20=1.740 y20=-0.000
citiri x21=1.827 y21=0.001 x20=1.825 y20=-0.000
citiri x21=1.915 y21=0.001 x20=1.910 y20=-0.000
citiri x21=1.999 y21=0.001 x20=1.994 y20=-0.000
citiri x21=2.004 y21=0.080 x20=2.004 y20=0.084
citiri x21=2.007 y21=0.161 x20=2.007 y20=0.165
citiri x21=2.011 y21=0.242 x20=2.013 y20=0.245
citiri x21=2.017 y21=0.319 x20=2.020 y20=0.322
citiri x21=2.028 y21=0.395 x20=2.028 y20=0.398
citiri x21=2.040 y21=0.469 x20=2.039 y20=0.472
citiri x21=2.050 y21=0.541 x20=2.050 y20=0.544
citiri x21=2.060 y21=0.611 x20=2.063 y20=0.615
citiri x21=2.079 y21=0.681 x20=2.078 y20=0.684
citiri x21=2.093 y21=0.749 x20=2.094 y20=0.752
citiri x21=2.114 y21=0.814 x20=2.111 y20=0.819
citiri x21=2.129 y21=0.880 x20=2.130 y20=0.884
citiri x21=2.150 y21=0.945 x20=2.149 y20=0.948
popscurt i1p=2310 index1=0 noul virf=15d f2=b8 sc=200
```

popscurt i1p=2309 index1=0 noul virf=15c f2=b9 sc=184
popscurt i1p=2308 index1=0 noul virf=15b f2=a9 sc=185
popscurt i1p=2307 index1=0 noul virf=15a f2=99 sc=169
popscurt i1p=2306 index1=0 noul virf=159 f2=89 sc=153
popscurt i1p=2305 index1=0 noul virf=158 f2=8a sc=137
popscurt i1p=2304 index1=0 noul virf=157 f2=7a sc=138
popscurt i1p=2303 index1=0 noul virf=156 f2=6a sc=122
popscurt i1p=2302 index1=0 noul virf=155 f2=5a sc=106
popscurt i1p=2301 index1=0 noul virf=154 f2=5b sc=90
citiri x21=2.168 y21=1.003 x20=2.168 y20=1.007
citiri x21=2.192 y21=1.066 x20=2.190 y20=1.069
citiri x21=2.213 y21=1.129 x20=2.213 y20=1.131
citiri x21=2.238 y21=1.187 x20=2.237 y20=1.190
citiri x21=2.259 y21=1.246 x20=2.262 y20=1.250
citiri x21=2.288 y21=1.305 x20=2.287 y20=1.308
citiri x21=2.316 y21=1.362 x20=2.315 y20=1.365
citiri x21=2.340 y21=1.418 x20=2.342 y20=1.421
citiri x21=2.371 y21=1.472 x20=2.371 y20=1.476
citiri x21=2.402 y21=1.528 x20=2.400 y20=1.530
citiri x21=2.434 y21=1.580 x20=2.430 y20=1.584
citiri x21=2.461 y21=1.631 x20=2.462 y20=1.636
citiri x21=2.495 y21=1.683 x20=2.494 y20=1.687
citiri x21=2.528 y21=1.732 x20=2.526 y20=1.738
citiri x21=2.563 y21=1.783 x20=2.560 y20=1.788
citiri x21=2.598 y21=1.830 x20=2.594 y20=1.836
citiri x21=2.633 y21=1.878 x20=2.629 y20=1.884
citiri x21=2.667 y21=1.927 x20=2.666 y20=1.932
citiri x21=2.703 y21=1.974 x20=2.703 y20=1.979
citiri x21=2.739 y21=2.020 x20=2.741 y20=2.025
citiri x21=2.779 y21=2.066 x20=2.780 y20=2.070
citiri x21=2.818 y21=2.111 x20=2.820 y20=2.115
citiri x21=2.858 y21=2.155 x20=2.860 y20=2.159
citiri x21=2.899 y21=2.198 x20=2.901 y20=2.201
citiri x21=2.940 y21=2.240 x20=2.943 y20=2.243
citiri x21=2.982 y21=2.279 x20=2.984 y20=2.283
citiri x21=3.028 y21=2.320 x20=3.028 y20=2.323
citiri x21=3.073 y21=2.360 x20=3.072 y20=2.363
citiri x21=3.117 y21=2.398 x20=3.117 y20=2.402
citiri x21=3.162 y21=2.436 x20=3.162 y20=2.440
citiri x21=3.207 y21=2.474 x20=3.209 y20=2.477
citiri x21=3.254 y21=2.512 x20=3.257 y20=2.514
citiri x21=3.300 y21=2.546 x20=3.305 y20=2.549
citiri x21=3.354 y21=2.582 x20=3.354 y20=2.585
popscurt i1p=7955 index1=0 noul virf=3e1 f2=aa sc=186
popscurt i1p=7954 index1=0 noul virf=3e0 f2=ab sc=170
popscurt i1p=7953 index1=0 noul virf=3df f2=ac sc=171
popscurt i1p=7952 index1=0 noul virf=3de f2=9c sc=172
popscurt i1p=7951 index1=0 noul virf=3dd f2=9d sc=156
popscurt i1p=7950 index1=0 noul virf=3dc f2=8d sc=157
popscurt i1p=7949 index1=0 noul virf=3db f2=8e sc=141
popscurt i1p=7948 index1=0 noul virf=3da f2=8f sc=142

citiri x21=3.400 y21=2.614 x20=3.401 y20=2.616
popscurt i1p=8063 index1=0 noul virf=64 f2=6a sc=105
popscurt i1p=8062 index1=0 noul virf=63 f2=5a sc=106
popscurt i1p=8061 index1=0 noul virf=62 f2=5b sc=90
popscurt i1p=8060 index1=0 noul virf=61 f2=5c sc=91
popscurt i1p=8059 index1=0 noul virf=60 f2=4c sc=92
popscurt i1p=8058 index1=0 noul virf=5f f2=4d sc=76
popscurt i1p=8057 index1=0 noul virf=5e f2=3d sc=77
popscurt i1p=8056 index1=0 noul virf=5d f2=3e sc=61
citiri x21=3.447 y21=2.645 x20=3.449 y20=2.648
citiri x21=3.496 y21=2.678 x20=3.501 y20=2.680
citiri x21=3.550 y21=2.707 x20=3.552 y20=2.711
citiri x21=3.604 y21=2.737 x20=3.606 y20=2.742
citiri x21=3.656 y21=2.768 x20=3.660 y20=2.772
citiri x21=3.716 y21=2.797 x20=3.715 y20=2.801
citiri x21=3.825 y21=2.852 x20=3.828 y20=2.856
citiri x21=3.885 y21=2.878 x20=3.886 y20=2.882
citiri x21=3.941 y21=2.904 x20=3.944 y20=2.907
citiri x21=4.004 y21=2.928 x20=4.005 y20=2.931
citiri x21=4.064 y21=2.952 x20=4.066 y20=2.954
citiri x21=4.126 y21=2.974 x20=4.127 y20=2.976
citiri x21=4.190 y21=2.993 x20=4.189 y20=2.997
citiri x21=4.253 y21=3.014 x20=4.253 y20=3.017
citiri x21=4.319 y21=3.032 x20=4.317 y20=3.035
citiri x21=4.382 y21=3.049 x20=4.383 y20=3.052
citiri x21=4.451 y21=3.066 x20=4.450 y20=3.068
citiri x21=4.521 y21=3.081 x20=4.519 y20=3.083
citiri x21=4.589 y21=3.093 x20=4.586 y20=3.096
citiri x21=4.657 y21=3.105 x20=4.657 y20=3.108
citiri x21=4.726 y21=3.117 x20=4.725 y20=3.118
citiri x21=4.796 y21=3.125 x20=4.793 y20=3.127
citiri x21=4.858 y21=3.129 x20=4.861 y20=3.134
citiri x21=4.929 y21=3.136 x20=4.929 y20=3.139
citiri x21=4.999 y21=3.140 x20=4.998 y20=3.143
citiri x21=5.065 y21=3.144 x20=5.068 y20=3.146
citiri x21=5.136 y21=3.144 x20=5.140 y20=3.147
citiri x21=5.213 y21=3.144 x20=5.217 y20=3.146
citiri x21=5.411 y21=3.141 x20=5.415 y20=3.136
citiri x21=5.475 y21=3.139 x20=5.477 y20=3.130
prel ci1p=1 delta=0.000 x20=5.476 y20=3.139
prel ci1p=2 delta=0.000 x20=5.476 y20=3.138
prel ci1p=3 delta=0.000 x20=5.476 y20=3.138
prel ci1p=4 delta=0.000 x20=5.476 y20=3.138
prel ci1p=5 delta=0.000 x20=5.476 y20=3.137
prel ci1p=6 delta=0.000 x20=5.476 y20=3.137
prel ci1p=7 delta=-0.000 x20=5.476 y20=3.137
prel ci1p=8 delta=0.000 x20=5.476 y20=3.136
prel ci1p=9 delta=0.000 x20=5.476 y20=3.136
prel ci1p=10 delta=0.000 x20=5.476 y20=3.135
prel ci1p=11 delta=0.000 x20=5.476 y20=3.135

Conform celor expuse anterior s-au considerat mai multe variabile de intrare și s-au măsurat mai multe variabile de ieșire. [Slavici, 2006a], [Slavici, 2009c].

Se impun în acest cadru unele precizări asupra definirii următoarelor două variabile specifice algoritmului de conducere adoptat;

- pragul de eroare pozițională admis (traseul critic)- este definită ca abaterea admisibilă a traiectoriei reale față de cea nominală;

- perioada de eșantionare corespunzătoare citirii traductoarelor de poziție și simultan a verificării încadrării în zona de toleranță; aceasta perioadă este materializată în cazul exemplificării din figura, pentru a ușura perceptibilitatea acestei variabile sub forma unui pas unghiular $\Delta\alpha$.

În urma experimentărilor efectuate influența acestor două variabile are influențe substanțiale asupra stabilității procesului de prelucrare; astfel în cazul adoptării unei perioade de eșantionare mici și de asemenea a unei zone de toleranță redusă, deși se obține evident o precizie dimensională mai bună apar fenomene de instabilitate datorită proceselor de supra-reglaj; este afectată astfel stabilitatea procesului prin intercalarea prea multor segmente de corecție de tipul segmentului C1Q1 din figură; s-a observat chiar o influență defavorabilă a supra-reglajului asupra rugozității. Concluzionând se poate afirma de existența unui compromis necesar a fi realizat la impunerea valorilor pentru cele două variabile de intrare analizate. [Slavici, 2006a], [Slavici, 2009c].

4.4. Studiul asupra factorilor de influență asupra uzurii firului

Pentru a putea analiza firul a fost nevoie de multiple experimente la care firul folosit a fost recuperat și ulterior analizat. Analizele făcute asupra firului au fost:

- analiza greutatea firului, aceasta, deoarece viteza este teoretic constantă, este direct proporțională cu uzura firului.

Greutatea firului este exprimată în grame, cântărirea acestuia a fost realizată astfel : au fost extrase 4 segmente de fir uzat de câte un metru, acestea au fost cântărite cumulând greutatea, înmulțite cu un coeficient ulterior împărțite la 48.

$$g = \frac{12xg_1 + 6xg_2 + 4xg_3 + 3xg_4}{48} [g] \quad (4.1)$$

Unde g_1 – greutatea unui firului de 1 m
 g_2 – greutatea a două fire de 1 m
 g_3 – greutatea a trei fire de 1 m
 g_4 – greutatea a patru fire de 1 m

- analiză microscopică, urmărindu-se uzura acestuia prin analiza vizuală a craterelor apărute la suprafața firului folosit la prelucrarea prin eroziune electrică cu fir.

Analiza microscopică a avut ca scop urmărirea frecvenței craterelor sau vârfurilor apărute la nivelul firului, fără a dori monitorizarea exactă cantitativ. Se dorește doar o monitorizare la nivel de „crescut” sau „scăzut” al frecvenței apariției craterelor sau vârfurilor la nivelul suprafeței firului.



Fig. 4.26. Măsurarea masei firului uzat

În urma planului experimental efectuat a fost extras tabelul 4.9. Tabel ce prezintă valorile obținute experimental în urma măsurătorilor efectuate pentru analiza parametrilor de interes în cadrul analizei în domeniul tezei și care sunt influențați de viteza firului.

Tabelul 4.9. Evoluția parametrului greutate fir în funcție de viteza de rulare a firului.

Nr. Crt.	Viteza fir [ml/min]	Greutate fir [g/m]
1	40	0,331838
2	70	0,40339
3	100	0,368844
4	130	0,374477
5	160	0,384923
6	190	0,375075
7	220	0,409217

Interpretând rezultatele experimentale se observă că, așa cum s-a presupus inițial, viteza firului influențează uzura acestuia, dar și rugozitatea suprafeței de prelucrat.

Pentru o interpretare mai exactă a rezultatelor experimentelor, a fost realizat graficul din figura 4.27 care reprezintă uzura firului folosit la prelucrarea prin eroziune electrică cu fir determinată prin greutatea acestuia în funcție de viteza de rulaj a firului.

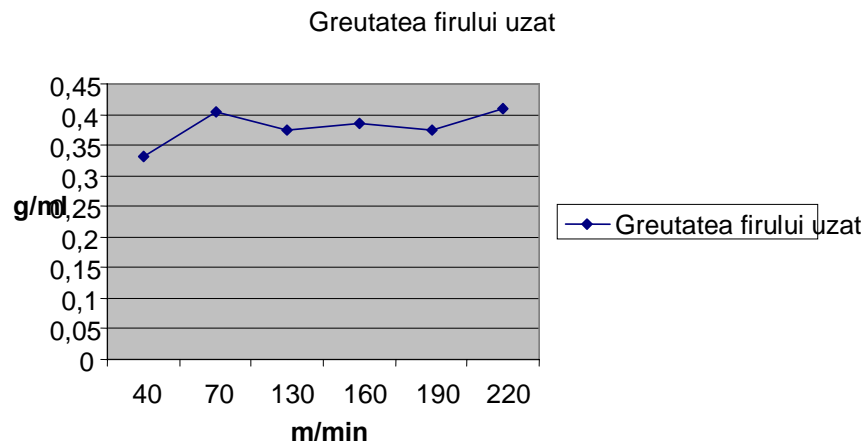
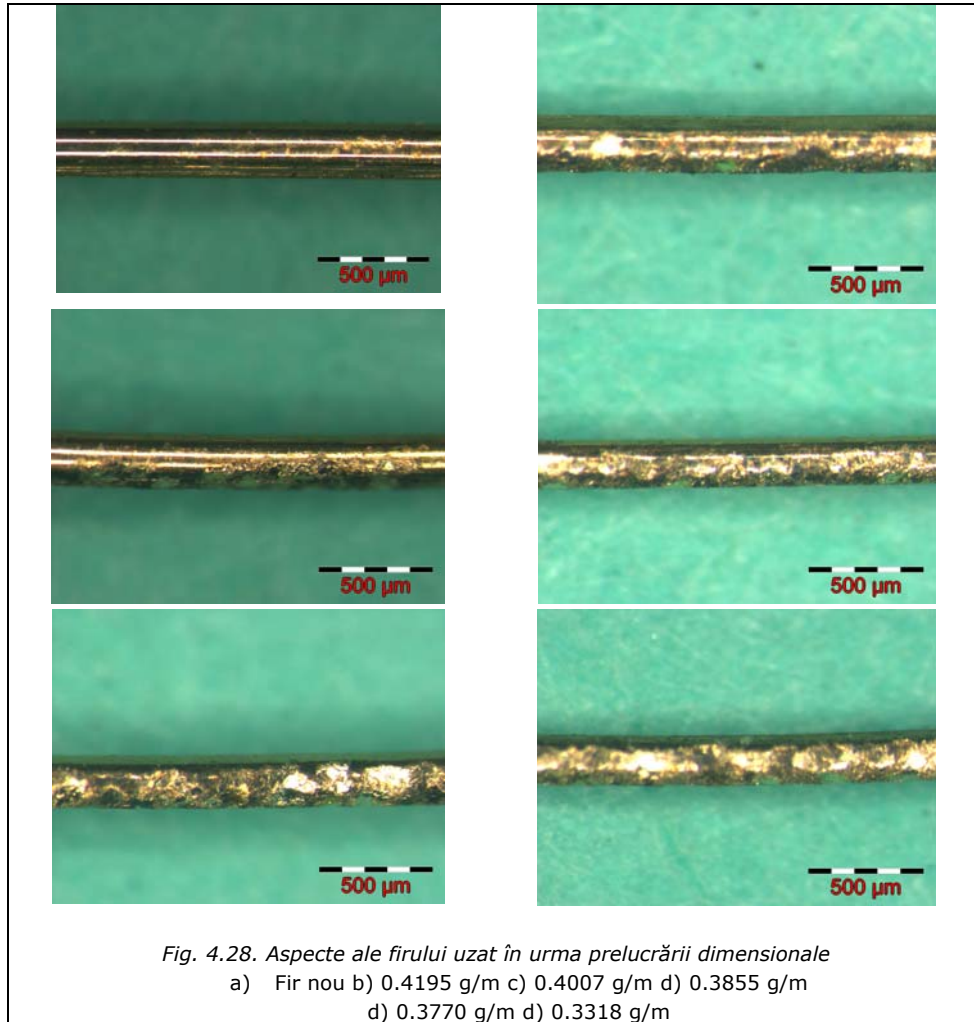


Fig. 4.27. Analiza greutateii firului folosit în funcție de viteza firului

În figura 4.27. este prezentată variația greutateii firului în raport cu viteza de rulare a firului. Greutatea firului scade pe măsură ce viteza de rulare a firului scade, întrucât odată cu o viteză scăzută a firului, acesta realizează mai mult timp prelucrări ale piesei, rezultând o uzură mai ridicată a firului. Aceasta provoacă o scădere în greutate a firului.

Cu cât viteza crește, cu atât timpul de prelucrare a segmentului de fir scade realizând, pe un segment mic de fir, un număr redus de descărcări electrice. Aceste descărcări electrice pe lângă realizarea prelucrării realizează și mici crateră la nivelul firului, aceste sunt mai reduse ca frecvență decât în cazul în care viteza firului este scăzută rezultând o scădere mai mică în greutate a segmentului de fir.

Deci, putem spune că prin creșterea vitezei firului scade frecvența craterelor de la nivelul suprafeței firului iar, deși adâncimea lor este la fel, scăderea în greutate este mai mică.



Analiza metalografică s-a prin intermediul microscopiei optice a probelor metalice cu ajutorul unui microscop optic OLYMPUS SYX7, în laboratoarele de Știința materialelor ale Facultății de Mecanică.

Microscopul optic OLYMPUS SYX7 asigură o magnitudine cuprinsă între 8x – 56x, rezoluție de 600 perechi de linii/mm, zoom 7:1, cu afișare pe monitor standard, cu diagonala de 19" LCD.



Fig. 4.29. Microscop optic Olympus SZX7

Evoluția greutateii firului folosit după prelucrarea dimensională în funcție de scăderea timpului ON din perioada unui impuls a fost urmărită, iar sinteza datelor este prezentată în tabelul 4.10. Timpul OFF al impulsurilor este 15 μ s.

Scăderea timpului ON sub 9 μ s duce la instabilitatea procesului, rezultând ruperea firului.

Tabel 4.10. Evoluția parametrului greutate fir în funcție de variația timpilor ON/OFF ai unei perioade de impuls.

Nr. crt	Timp ON [μ s]	Timp OFF [μ s]	Greutate fir uzat [g/m]
1	9	15	0,3688
2	7	15	0,3786
3	5	15	0,3783
4	3	15	0,3846
5	11	15	0,3665
6	15	15	0,0000
7	9	9	0,3705
8	7	9	0,4085
9	5	9	0,3803
10	3	9	0,4007
11	11	9	0,0000
12	15	9	0,0000
13	15	7	0,0000
14	11	7	0,0000

15	9	7	0,0000
16	7	7	0,3770
17	6	7	0,3855
18	3	7	0,3902
19	9	20	0,3451
20	9	30	0,4130
21	15	20	0,0000
22	15	30	0,0000

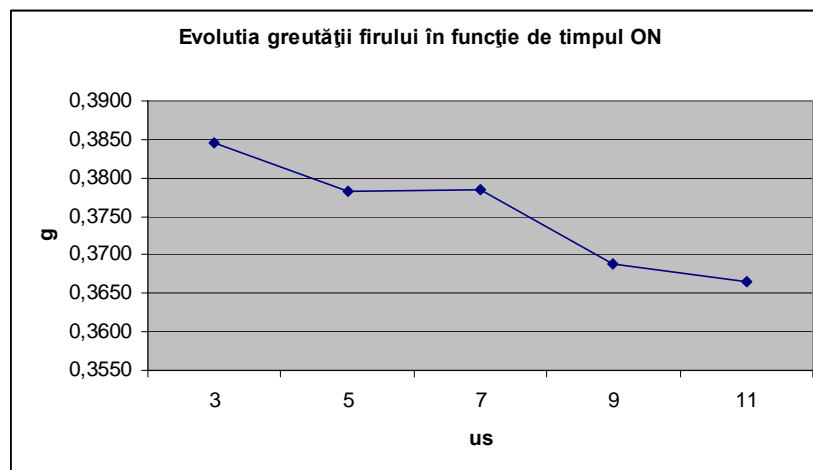


Fig. 4.30. Evoluția greutății firului în funcție de timpul Ton

Scăderea în greutate a firului folosit dovedește uzura firului, acest lucru este benefic în condițiile în care este urmărit consumul prelucrării.

Tabel 4.11. Extras din datele experimentale referitoare la variația parametrului greutate fir în funcție de tensiunea generatorului.

Nr. crt	V [V]	Greutate fir uzat [g/m]
1	1	0,392033
2	3	0,410854
3	5	0,385577
4	6	0,390365
5	7	0,382038
6	8	0,368844

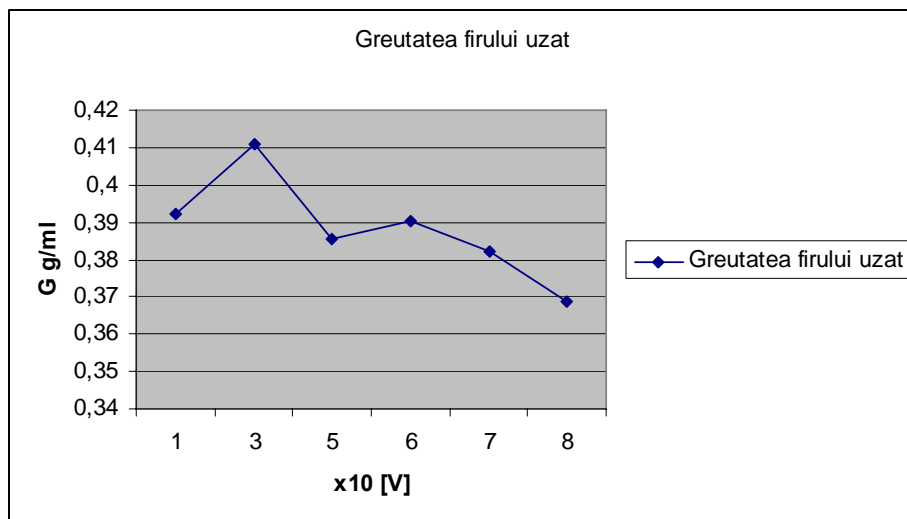


Fig. 4.31. Variația greutatea firului în raport cu tensiunea

Uzura firului prelucrat este invers proporțională cu scăderea în greutate a firului. Astfel se observă ca la tensiuni ridicate uzura firului este mai ridicată.

Din tabelul anterior și analizând graficele rezultate se poate spune că tensiunea impulsurilor poate afecta productivitatea dar nu poate afecta într-un mod categoric procesul în sine, adică procesul a fost stabil, nefiind compromis și piesa a fost debitată indiferent de variația tensiunii. Variația rugozității este foarte mică și se poate observa că aceasta scade cu scăderea tensiunii. Pentru optimizarea procesului de prelucrare și creșterea preciziei de prelucrare este indicat un nivel de tensiune scăzut odată cu aceasta va crește timpul de prelucrare. [Mnerie A, 2010a].

Rezultatele cercetărilor experimentale, unele sunt predictibile, sub aspectul determinărilor pe care le port avea în sistem, unele atenționează utilizatorii procedurii prin valorile obținute. Pentru a avea o rigurozitate a cercetării, s-au realizat măsurători cu aparatură performantă, cu precizie ridicată. Analiza uzurii firului prelucrat nu se realizează cu scopul refolosirii acesteia, ci dimpotrivă, pentru o utilizare a acesteia cât mai intens, cu efecte calitative asupra prelucrărilor cât mai avantajoase. S-a urmărit o corelare între viteza de avans a sârmei și calitatea suprafețelor rezultate din tăiere, măsura în care aceasta influențează întreg procesul. Interesul este, desigur, pentru obținerea unei rugozități cât mai mici, după restricțiile impuse prin tehnologia comandată. De asemenea, un criteriu de optimizare a procesului este și de a maximiza productivitatea, prin folosirea unui regim de lucru optim, legat și de mărimea timpului de prelucrare. Relevante sunt rezultatele legate de analiza abaterilor dimensionale, aflate într-o interdependență cu mărimea interstițiului eroziv. Sistemul de automatizare introdus realizează în fapt o recalculare a traiectoriei, cu un efect favorabil reducerii erorilor dimensionale.

Odată stabilite influențele mai sus menționate se poate realiza și o analiză a comportării firului în procesul de prelucrare, experiment care are la bază uzura firului în funcție de parametrii procesului impuși de generator pe de o parte, iar pe de altă parte parametrii comandați de mașină, ca efect al vitezei de rulaj a firului.

4.5. Concluzii

În cadrul acestui capitol au fost prezentat experimentările efectuate în baza programului prestabilit în concordanță cu obiectivele tezei.

Studiile complexe realizate pe parcursul acestui capitol au presupus cercetări teoretice, interpretări fenomenologice, pentru proiectarea și execuția operațiilor de modernizare și re tehnologizare a unei mașini de prelucrat prin eroziune electrică cu fir din generația anilor 80' folosind metode și rezultate obținute în cadrul programului experimental personal propus și realizat pe parcursul acestui capitol dar și în capitolele următoare.

În urma experimentelor efectuate se pot menționa anumite concluzii referitoare la rezultatele experimentale :

- Factorii principali care influențează precizia prelucrării dimensionale prin eroziune electrică cu fir sunt factori care țin de precizia poziționării firului în apropierea piesei, această precizie ar fi foarte mare în cazul poziționării în afara procesului și este dată construcția motoarelor și întreg lanțul cinematic. Pe lângă acești factori, care pot fi reduși ca și influență, întrucât precizia poziționării firului în afara procesului este foarte exactă, mai apar și alți factori de proces care influențează poziția datorată procesului. Printre acești factori se numără și viteza firului, parametrii procesului impuși de generator, prin timpii impulsurilor Ton și Toff, precum și amplitudinea impulsurilor, identificată cu tensiune de lucru.
- Precizia prelucrării poate fi mărită prin identificarea erorilor apărute din cauza parametrilor mai sus menționați
- Stabilirea unor parametrii eronați de proces pot duce la un control redus al preciziei și în cel mai rău caz la compromiterea prelucrării
- Stabilirea metodei și modului de reducere a erorilor dimensionale în urma prelucrării pot fi realizate în cazul în care parametrii procesului determină un proces stabil, erorile și calculele acestora trebuie să fie constante în timpul procesului
- Erorile mici nu pot influența grav precizia dimensională, ele pot afecta în schimb rugozitatea suprafeței piesei de prelucrat.

Dintre contribuțiile personale aduse în cadrul acestui capitol pot fi enumerate următoarele:

➤ Identificarea experimentală a valorilor optime a unor parametrii, atât de proces precum impulsuri generator, viteză de rulare fir, cât și rezultați în urma procesului rugozitate, productivitate, consum și integrarea acestora într-un sistem expert în vederea generării unor parametrii pentru comanda mașinii.

➤ Studiul experimental al interstițiului eroziv prin măsurarea distanțelor dintre poziția firului și forma rezultată a piesei

- Realizarea unui studiu experimental pentru reducerea consumului de fir, în funcție de parametrii procesului și de uzura firului folosit
- Identificarea influenței uzurii firului asupra suprafeței prelucrării
- Studiul experimental al formei, preciziei dimensionale precum și al conformității cu prelucrarea comandată/dorită, referitoare la conturul realizat de fir în timpul prelucrării prin eroziune electrică cu fir.
- Determinarea și studierea unor funcții obiectiv necesare pentru stabilirea direcțiilor de optimizare a procesului, după criteriile de calitate (formă, precizie dimensională, rugozitate) a piesei, respectiv de eficiență economică (productivitate maximă și costuri minime).
- Confirmarea corectitudinii unor principii folosite pentru conceperea, proiectarea și realizarea de hardware și software, prezentate în capitolul 3.

5. PRELUCRAREA DATELOR EXPERIMENTALE ȘI MODELAREA MATEMATICĂ ÎN VEDEREA OPTIMIZĂRII SISTEMULUI

O parte a prelucrărilor primare a datelor experimentale rezultate au fost cuprinse în capitolul anterior. Pentru definiție generalizată a influenței parametrilor generatorului de impulsuri asupra procesului și asupra calității suprafețelor prelucrate, este necesară determinarea unui model matematic adecvat, care să completeze șirul parametrilor optimi pentru proces: viteza firului, tensiunea de lucru a procesului și raportul optim al timpilor Ton și Toff ai impulsurilor generatorului.

5.1. Modelarea matematică a sistemului de factori de influență

Datele experimentale prezentate în tabelele din modelarea experimentală au permis selectarea a două planuri experimentale factoriale 2^2 . Acestea permit analiza simultană a variației a doi parametrii. Planul experimental factorial complet consideră un nivel maxim și unul minim pentru fiecare din parametrii.

Între nivelele se consideră combinații de tip „un nivel al unui factor cu toate nivelele celorlalți”. Considerarea unor experimentări suplimentare, cu valori ale parametrilor între nivele, permite studiul statistic al efectelor. Aceste experimentări suplimentare se nesc și experimentări în punctul central.

Planul experimental 2^2 conține 4 încercări experimentări și permite determinarea coeficienților de regresie pentru un model matematic care conține parametrii și interacțiunile dintre aceștia. În total 3 variabile și asociate cu 4 coeficienți de regresie. Formula conține un termen constant.

Interacțiunea între parametrii se reprezintă prin produsul parametrilor. Acest produs este proporțional cu valorile fiecărui parametru.

Pentru a fi prezentat unitar efectul parametrilor se cere ca aceștia să fie exprimați în aceleași unități de măsură. Pentru aceasta se trece de la valorile reale ale parametrilor într-un sistem codificat adimensional. Acesta are pentru nivelul superior valoarea +1 iar pentru nivelul inferior -1. Se vor prezenta formulele de transformare între cele două sisteme. Datele în sistemul codificat au fost prelucrate cu programul Statgrafics. Acesta permite prelucrări statistice și obținerea de modele matematice. În cele ce urmează vor fi analizate elementele obținute prin prelucrarea de date.

Modelul matematic reprezintă o relație între valorile parametrilor variației funcția obiectiv (care de obicei este o mărime direct măsurată). Modelul matematic, în cazul de față, este un polinom de gradul 2 cu două variabile, polinom incomplet deoarece lipsesc valorile parametrilor la pătrat.

Termenul de gradul doi este dat de interacțiunea între parametri.

Metoda de analiză ANOVA (Analyze of variance) prezintă o analiză comparativă între două tipuri de dispersii. Dispersia dată de un nivel și dispersia

generală dată de datele experimentale. Nivelele sunt asociate cu valorile parametrilor. Acestea vor fi denumite prin termenul de efecte. Pentru compararea celor două dispersii se va folosi testul Fisher, p.value. Valorile mai mici decât 0.05 sunt valori care arată un nivel de predicție care poate fi acceptat în tehnică. Efectele care pot fi apreciate cu această încredere vor fi numite semnificative din punct de vedere statistic. Acestea vor fi marcate pe diagrama Pareto ca efecte care depășesc linia punctată. Coeficienții de corelație prezentați arată nivelul de încredere care poate fi asociat cu modelul matematic. Datele prelucrării sunt prezentate în tabelul ANOVA.

Diagramele Pareto reprezintă o ierarhizare a efectelor. Ea are la bază valorile coeficienților din polinomul care reprezintă modelul matematic. Pentru expresia modelului matematic în sistemul codificat se poate realiza și analiza directă a coeficienților din modelul matematic polinomial. Diagramele Pareto arată :

- contribuția efectelor, prin înălțimea treptei
- tipul de efect asupra funcției obiectiv prin semnul asociat efectului respectiv
- semnificația statistică a efectelor prin linia punctată

Semnificația unui efect asupra funcției obiectiv va fi interpretată în ipoteza că efectul respectiv crește.

Suprafața de răspuns reprezintă o reprezentare grafică a modelului matematic. Aceasta este utilă pentru optimizarea procesului deoarece se pot identifica minime sau maxime care să fie asociate cu valorile favorabile pentru funcțiile obiectiv. Valorile de extrem pot fi identificate în centrul domeniului experimental sau la marginile acestuia.

Modelul matematic realizat permite realizarea unor suprafețe de răspuns care prezintă diferite îndoituri. Acestea nu prezintă minime și maxime pe domeniul experimental. Astfel punctele de extrem pot fi identificate numai la marginile domeniului experimental. Liniile unde suprafața de răspuns prezintă îndoituri pot reprezenta asociații între parametrii pentru care se mențin condiții favorabile în ceea ce privește valorile funcției obiectiv.

În primul experiment s-a urmărit o asociere între tensiune și viteza firului, tensiunea fiind un parametru foarte important de care depinde rugozitatea suprafeței prelucrate. Viteza firului nu poate fi foarte mică deoarece acesta poate ceda în urma descărcărilor electrice.

În al doilea experiment s-a analizat regimul de variație al tensiunii, dat de timpii Ton și Toff, care, de asemenea, prin generarea tensiunii și al frecvenței pot influența procesul de tăiere prin eroziune electrică cu fir.

Funcțiile obiectiv au fost :

- Rugozitatea suprafeței prelucrate. În general suprafața rezultată în urma prelucrării are o rugozitate destul de mare. Mașinile actuale, atunci când au ca scop tăiere, nu țin cont de rugozitate, oferind în datele de catalog parametrii pentru prelucrare rezultând o rugozitate acceptată chiar și de 20 μm . În urma optimizărilor parametrilor unor astfel de mașini s-au putut obține rugozități chiar și de 1.8 μm .

- Timpul de prelucrare, reprezintă un parametru foarte important întrucât s-a dorit pe lângă o prelucrare cât mai exactă a pieselor și o productivitate ridicată. Aceasta fiind invers proporțională cu timpul de prelucrare, trebuie optimizat procesul astfel încât timpul de prelucrare să fie cât mai redus, iar productivitatea să crească.

- Uzura firului, a fost calculată în funcție de cât de mult a scăzut masa firului. La fiecare strapungere electrică pe lângă prelucrarea piesei a fost

afectat și firul, parametrul măsurabil putând fi masa acestuia. Această masă a fost măsurată prin cântărirea cu o precizie foarte bună a fiecărui metru de fir uzat în diferitele prelucrări dimensionale, variind parametrii de interes.

Astfel modelul matematic este dat de relațiile și tabelele următoare :

Tabelul 5.1. Rezultate experimentale obținute în urma prelucrărilor

Nr. crt	Codificat		Real		Funcții obiectiv		
	A	B	V	Vfir	Rugozitate	timp prel	g fir
	V	Vfir	Unit.	m/min	μm	min	g/m
1	-1	-1	1	70	2.3	22.15	0.4163
2	+1	-1	8	70	2.8	5.2	0.4034
3	-1	+1	1	130	4.6	23.02	0.4030
4	+1	+1	8	130	5.25	5.23	0.3745
c	0.14	0	5	100	2.9	9.1	0.3856

Formulele de transformare între sistemul real și cel codificat

$$A = 0.285V - 1.285 [-] \quad (5.1)$$

$$B = 0.0333V_{fir} - 3.333 [-] \quad (5.2)$$

Formulele de transformare inverse

$$V = 3.508A + 4.508 [\text{unit}] \quad (5.3)$$

$$V_{fir} = 30B + 100 [\text{ml/min}] \quad (5.4)$$

Tabelul 5.2. Tabel pentru transformarea valorilor de pe axele OX și OY ale suprafețelor de răspuns

Codificat A,B	Real Calculat		Real Corectat	
	Tensiunea	Viteza fir	Tensiunea	Viteza fir
-1	1	70	1	70
-0.6	2.4032	82	2.4	82
-0.2	3.8064	94	3.8	94
0.2	5.2096	106	5.2	106
0.6	6.6128	118	6.6	118
1	8.016	130	8	130

Tabelul 5.3. Tabel ANOVA pentru rugozitate

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(tensiunea)	0.277	1	0.277	0.45	0.6288
B(viteza fir)	5.64	1	5.64	9.19	0.2001
AB	0.005	1	0.005	0.01	0.9401
Total error	0.613	1	0.613		
Total (corr)	6.538	4			

$R^2 = 0.90$	$R^2 (adj. for d.f.) = 0.62$
--------------	------------------------------

Rezultând rugozitatea dată de următoarea relație :

$$R = 3.56264 + 0.263019 \cdot A + 1.875 \cdot B + 0.0375 \cdot AB \quad (5.5)$$

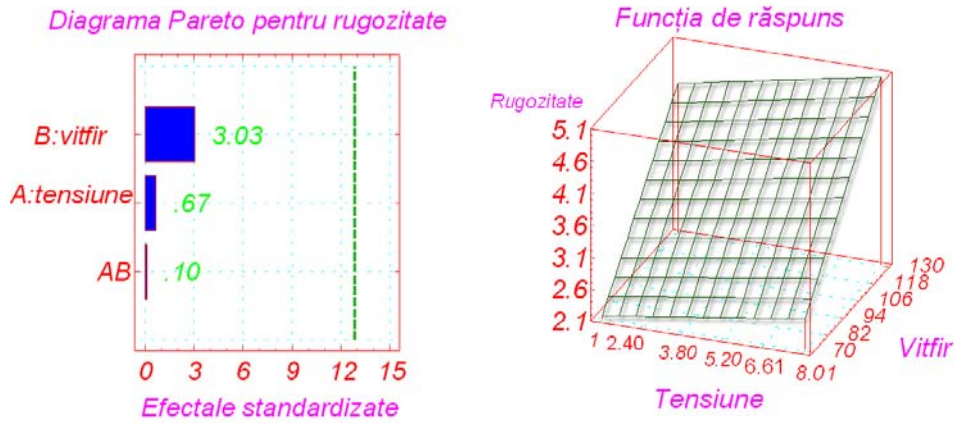


Fig. 5.1. Diagrama Pareto și funcția de răspuns estimată pentru rugozitate

În figura 5.1.a. este prezentată diagrama Pareto pentru rugozitatea suprafeței de tăiere. Efectul cel mai puternic în are viteza firului. Acesta este urmat de efectul tensiunii. Interacțiunea dintre viteza firului și nivelul tensiunii are un efect scăzut asupra rugozității. Se observă că toate cele trei efecte cresc rugozitatea. Se observă că efectul nu prezintă corelație statistică. Diagrama Pareto arată că viteza firului influențează puternic rugozitatea suprafeței tăieturii. Creșterea vitezei firului crește rugozitatea suprafeței tăieturii.

În figura 5.1.b. se prezintă suprafața de răspuns pentru variația rugozității suprafeței prelucrate cu tensiunea și viteza firului. Se observă că pe domeniul experimental rugozitatea crește puternic cu viteza firului. Există o creștere ușoară odată cu creșterea tensiunii.

Din punct de vedere tehnologic recomandate valorile minime ale rugozității. Acestea se obțin pentru valorile minime ale vitezei firului și ale tensiunii. Se recomandă utilizarea de valori minime sau moderate pentru viteza firului pentru a reduce rugozitatea suprafeței.

Modelul matematic pentru timpul de prelucrare este dat de relația :

$$t_{prel} = 13.186 - 8.78496 \cdot A + 0.225 \cdot B - 0.21 \cdot AB \text{ [min]} \quad (5.6)$$

Aceasta este asociată cu tabelul ANOVA, se observă că modelul matematic prezentat are coeficienții de corelație cu valori ridicate.

Tabelul 5.4. Tabel ANOVA pentru timpul de prelucrare

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(tensiunea)	309.912	1	309.912	30.28	0.1129
B(viteza fir)	0.202	1	0.202	0.02	0.9122
AB	0.176	1	0.176	0.02	0.9180
Total error	10.236	1	10.236		
Total (corr)	320.527	4			
$R^2 = 0.96$			$R^2 (adj. for d.f.) = 0.87$		

Diagrama Pareto pentru timpul de prelucrat

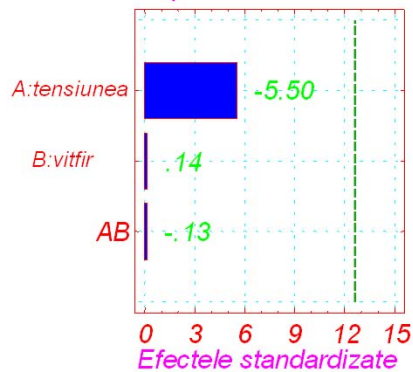


Fig. 5.2. Diagrama Pareto și funcția de răspuns estimată pentru timpul de prelucrare

În figura 5.2.a. se prezintă diagrama Pareto pentru timpul de prelucrare. Se observă că efectul principal asupra timpului de prelucrare îl are tensiunea. Efectul vitezei și cel al interacțiunii dintre tensiune și viteza virului sunt reduse. Se observă că timpul de prelucrare scade puternic odată cu creșterea nivelului tensiunii de lucru. Efectele prezentate nu ating pragul de semnificație statistică.

În figura 5.2.b. se prezintă suprafața de răspuns pentru variația timpului de prelucrare. Se arată că pe domeniul experimental timpul de prelucrare scade puternic cu tensiunea. Din punct de vedere tehnologic se recomandă valori minime pentru timpul de prelucrare. Acestea se obțin pentru valori ridicate ale tensiunii indiferent de viteza firului.

Modelul matematic pentru variația masei firului este dat de relația :

$$g_{\text{Fir}} = 0.3962 - 0.0114324 \cdot A + 0.00978 \cdot B - 0.00313 \cdot AB \quad [\text{g/m}] \quad (5.7)$$

Analiza variației efectelor prin metoda ANOVA este dată în tabelul următor.

Tabelul 5.5. Tabel ANOVA pentru gfir

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(tensiunea)	$5.248 \cdot 10^{-4}$	1	$5.248 \cdot 10^{-4}$	5.09	0.2619
B(viteza fir)	$3.829 \cdot 10^{-4}$	1	$3.829 \cdot 10^{-4}$	3.71	0.3004
AB	$0.391 \cdot 10^{-4}$	1	$0.391 \cdot 10^{-4}$	0.38	0.6532
Total error	$1.031 \cdot 10^{-4}$	1	$1.031 \cdot 10^{-4}$		
Total (corr)	$10.503 \cdot 10^{-4}$	4			
$R^2 = 0.90$		$R^2(\text{adj. for d.f.}) = 0.60$			

Se observă valori ridicate pentru coeficientul de corelație.

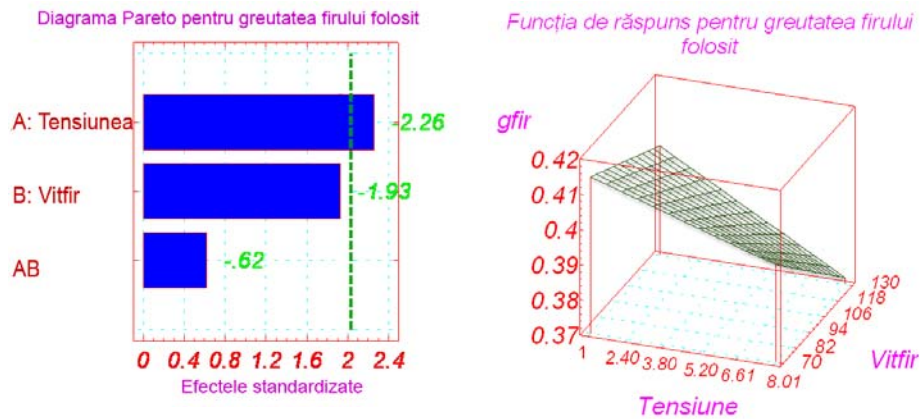


Fig. 5.3. Diagrama Pareto și funcția de răspuns estimată pentru masa firului folosit la prelucrarea prin eroziune electrică cu fir.

În figura 5.3.a. se prezintă diagrama Pareto pentru masa firului. Se observă că primul efect asupra uzurii firului îl are tensiunea. Al doilea efect îl are viteza firului. Se observă că tensiunea, viteza firului și interacțiunea dintre cele două scad cantitatea de material îndepărtat de pe fir. Se observă că atât tensiunea cât și viteza firului sunt efecte care au semnificație statistică. Efectul vitezei firului este important în raport cu cel al tensiunii.

În figura 5.3.b. se prezintă suprafața de răspuns pentru variația mesei firului în raport cu tensiunea și viteza firului.

Se observă că pe domeniul experimental masa firului scade atât cu tensiunea cât și cu viteza firului. Se observă că scăderea este mai puternică la valori mari ale tensiunii. Din punct de vedere tehnologic se urmărește ca valoarea greutateii firului să fie ridicată. Mășorarea uzurii firului duce la scăderea riscului de rupere a acestuia. Valorile maxime ale mesei firului se obțin pentru valori scăzute ale tensiunii și valori scăzute ale vitezei firului. Din punct de vedere tehnologic se recomandă valorile moderate apropiate de punctul centrului domeniului experimental.

Al doilea experiment a urmărit analiza regimul de variație al tensiunii, dat de timpii Ton și Toff, prin generarea tensiunii și al frecvenței pot influența procesul de tăiere prin eroziune electrică cu fir.

Astfel modelul matematic este dat de relațiile și tabelele următoare :

Tabelul 5.6. Rezultate experimentale obținute în urma prelucrărilor

Nr. crt	Codificat		Real		Funcții obiectiv		
	A	B	ton	toff	Rugozitate	timp prel	g fir
	[-]	[-]	μs	μs	μm	min	g/m
1	-1	-1	3	7	2.1	10	0.390208
2	+1	-1	7	7	3	7.05	0.376965
3	-1	+1	3	15	1.8	10.15	0.384581
4	+1	+1	7	15	2.9	6.16	0.378554
c	0	-0.5	5	9	3	7.36	0.380269

Formulele de trecere de la sistemul de unități de măsură reale la cel codificat

$$A = 0.5t_{on} - 2.5 [-] \quad (5.8)$$

$$B = 0.25t_{off} - 2.75 [-] \quad (5.9)$$

Formulele de transformare inverse

$$t_{on} = 2A + 5 [\mu s] \quad (5.10)$$

$$t_{off} = 4B + 11 [\mu s] \quad (5.11)$$

Tabelul 5.7. Tabel pentru transformarea valorilor de pe axele OX și OY ale suprafețelor de răspuns

Codificat A,B	Calculat real		Corectat Real	
	ton	toff	ton	toff
-1	3	7	3	7
-0.6	3.8	8.6	3.8	8.6
-0.2	4.6	10.2	4.6	10.2
0.2	5.4	11.8	5.4	11.8
0.6	6.2	13.4	6.2	13.4
1	7	15	7	15

Modelul matematic pentru rugozitate este dat de relația :

$$R = 2.54524 + 0.5 \cdot A - 0.147619 \cdot B + 0.05 \cdot AB [\mu m] \quad (5.12)$$

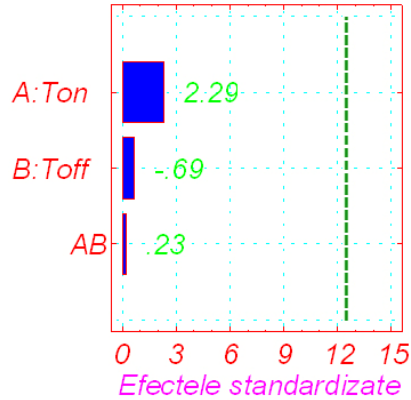
Aceasta este asociată cu tabelul ANOVA prezentat în continuare :

Tabelul 5.8. Tabel ANOVA pentru rugozitate

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(timpul on)	1	1	1	5.25	0.2583
B(timpul off)	0.091	1	0.091	0.48	0.62
AB	0.01	1	0.01	0.05	0.8586
Total error	0.19	1	0.19		

Total (corr)	1.292	4		
$R^2 = 0.85$		$R^2 (adj. for d.f.) = 0.41$		

Diagrama Pareto pentru rugozitate



Funcția de răspuns pentru rugozitate

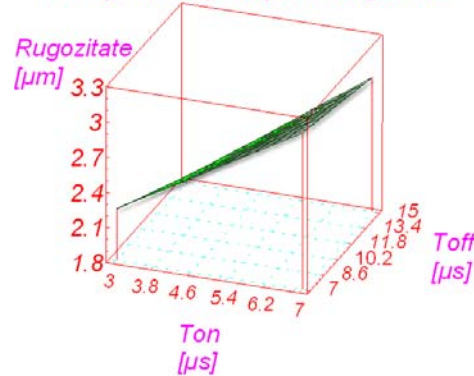


Fig. 5.4. Diagrama Pareto și funcția de răspuns estimată pentru rugozitate

În figura 5.4.a este prezentată diagrama Pareto pentru rugozitate. Se observă că efectul principal îl are Ton, acesta crește rugozitatea, Toff are o contribuție mai mică. Se observă că rugozitatea crește cu Ton și scade cu Toff. Interacțiunea dintre Ton și Toff este redusă dar este importantă pe ansamblu. Efectele prezentate nu prezintă semnificație statistică. Timpul Ton prezintă puterea activă a prelucrării care este asociată cu o creștere a rugozității la fel ca și tensiunea.

În figura 5.4.b. este prezentată suprafața de răspuns pentru variația rugozității cu Ton și Toff. Se observă că rugozitatea crește cu Ton pe tot domeniul experimental. Din punct de vedere tehnologic sunt recomandate valorile minime ale rugozității. Acestea se obțin pentru valori minime ale lui Ton indiferent de Toff.

Modelul matematic pentru timpul de prelucrat este dat de relația :

$$t_{prel} = 8.13571 - 1.735 \cdot A - 0.0828571 \cdot B - 0.26 \cdot AB \text{ [min]} \quad (5.13)$$

Aceasta este asociată cu tabelul ANOVA prezentat în continuare :

Tabelul 5.8. Tabel ANOVA pentru timpul prelucrării

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(timpul on)	12.04	1	12.04	13.74	0.1655
B(timpul off)	0.028	1	0.028	0.03	0.8873
AB	0.270	1	0.270	0.31	0.6820
Total error	0.876	1	0.876		
Total (corr)	13.216	4			
$R^2 = 0.93$		$R^2 (adj. for d.f.) = 0.73$			

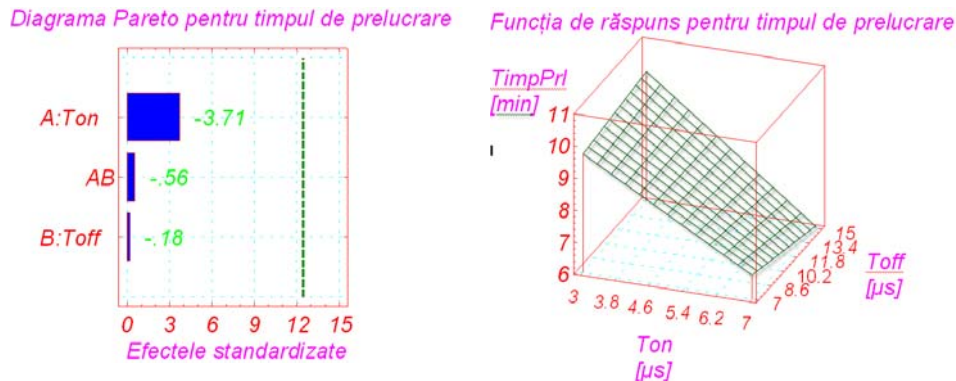


Fig. 5.5. Diagrama Pareto și funcția de răspuns estimată pentru timpul de prelucrare

În figura 5.5.a. este prezentată diagrama Pareto pentru timpul de prelucrat. Principalul efect este dat de Ton. Acest efect este considerabil în raport cu celelalte efecte. Al doilea efect aparține interacțiunii dintre Ton și Toff iar timpul Toff are un efect redus. Efectele prezentate nu au semnificație statistică. Se observă că atât Ton cât și Toff scad timpul de prelucrare. Aceasta înseamnă că creșterea frecvenței înseamnă creșterea timpului de prelucrare.

În figura 5.5.b. este prezentată suprafața de răspuns pentru variația timpului de prelucrare cu Ton și cu Toff. Se observă că pe domeniul experimental timpul de prelucrare scade cu Ton cât și cu Toff. Valoarea minimă pentru timpul de prelucrare se obține pentru valoarea maximă a lui Ton și respectiv Toff.

Din punct de vedere tehnologic se dorește ca timpul de prelucrare să fie minim.

Se recomandă utilizarea unor valori minime pentru Ton indiferent de valorile lui Toff.

Modelul matematic pentru timpul de prelucrat este dat de relația :

$$g_{\text{Fir}} = 0.381985 - 0.004825 \cdot A - 0.000754762 \cdot B + 0.001825 \cdot AB \text{ [g/m]} \quad (5.14)$$

Aceasta este asociată cu tabelul ANOVA prezentat în continuare :

Tabelul 5.9. Tabel ANOVA pentru masa firului

Effect	Sum of Squares	DF	Mean. Sq.	F-Ratio	P-val
A(timpul on)	$0.9312 \cdot 10^{-4}$	1	$0.9312 \cdot 10^{-4}$	15.18	0.1578
B(timpul off)	$0.0239 \cdot 10^{-4}$	1	$0.0239 \cdot 10^{-4}$	0.39	0.6499
AB	$0.1332 \cdot 10^{-4}$	1	$0.1332 \cdot 10^{-4}$	2.17	0.3738
Total error	$0.0613 \cdot 10^{-4}$	1	$0.0613 \cdot 10^{-4}$		
Total (corr)	$1.1497 \cdot 10^{-4}$	4			
$R^2 = 0.94$		$R^2(\text{adj. for d.f.}) = 0.78$			

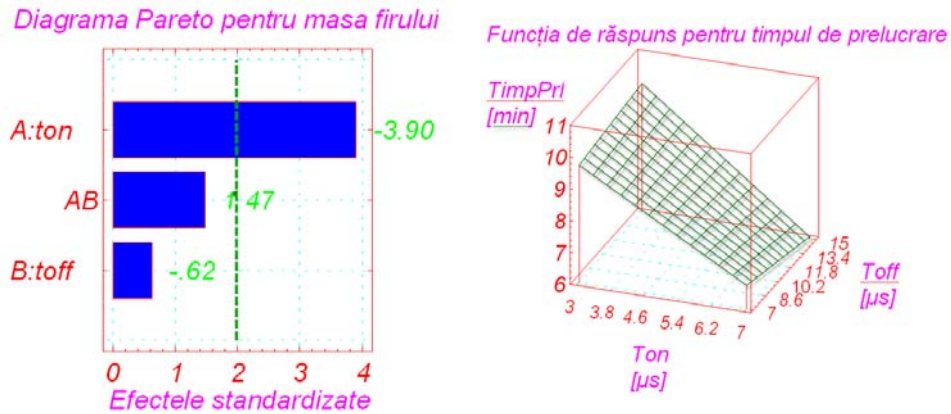


Fig. 5.6. Diagrama Pareto și funcția de răspuns estimată pentru variația greutateii firului.

Figura 5.6.a. reprezintă diagrama Pareto pentru gfir (masa firului folosit în procesul de prelucrare prin eroziune electrică cu fir). Se observă că primul efect îl are Ton. Acesta este singurul efect care are semnificație statistică. Al doilea efect este acela al interacțiunii dintre Ton și Toff. Ultimul efect este cel al lui Toff. Deși mai reduse efectele interacțiunii dintre Ton și Toff și efectul Toff sunt importante. Se observă că atât Ton cât și Toff scad masa firului uzat, astfel rezultând o uzură mai mare a firului. Creșterea lui gfir cu Ton arată consumarea firului în decursul prelucrării.

În figura 5.6.b. este prezentată suprafața de răspuns pentru variația gfir cu Ton și Toff. Se observă că pe domeniul experimental gfir scade cu Ton. Pentru Ton mic Toff produce scăderea lui gfir. Pentru valori mari ale lui Ton, Toff produce creșterea lui gfir.

Din punct de vedere tehnologic sunt dorite valori maxime pentru gfir. Acestea se obțin pentru valori minime ale lui Ton și Toff.

Se recomandă folosirea unor valori moderate atât pentru Ton cât și pentru Toff.

5.2. Optimizarea sistemului tehnologic de prelucrare prin eroziune electrică cu fir

În cadrul acestui capitol sunt prezentați parametrii optimi rezultați în urma planului experimental. Planul experimental este prezentat în capitolul 4 și este cuprins în cadrul studiilor desfășurate pe parcursul realizării tezei de doctorat.

Studiile complexe realizate pe parcursul acestui capitol au presupus cercetări teoretice, interpretări fenomenologice, pentru proiectarea și execuția operațiilor de modernizare și re tehnologizare a unei mașini de prelucrat prin eroziune electrică cu fir din generația anilor 80' folosind metode și rezultate obținute în cadrul programului experimental personal propus și realizat pe parcursul acestui capitol dar și în capitolele următoare.

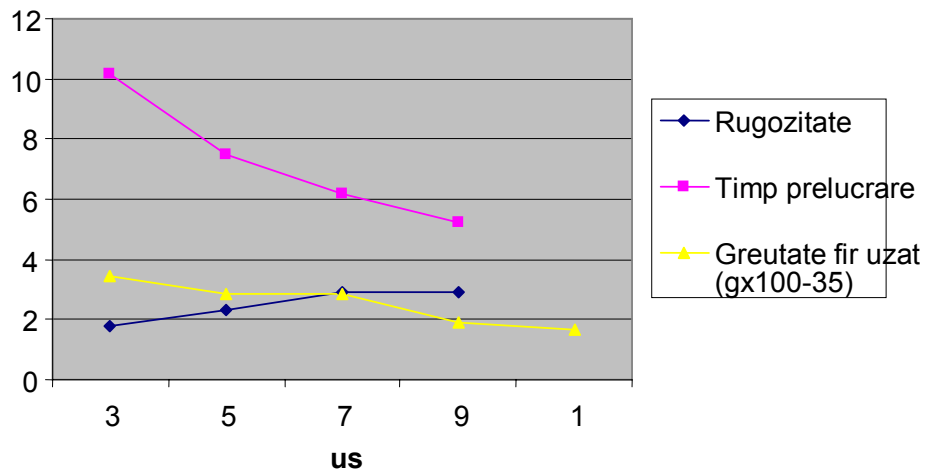


Fig. 5.7. Evoluția parametrilor rugozitate, timp de prelucrare și masa firului

În urma experimentelor efectuate se pot menționa anumite concluzii referitoare la rezultatele experimentale :

- Factorii principali care influențează precizia prelucrării dimensionale prin eroziune electrică cu fir sunt factori care țin de precizia poziționării firului în apropierea piesei, această precizie ar fi foarte mare în cazul poziționării în afara procesului și este dată construcția motoarelor și întreg lanțul cinematic. Pe lângă acești factori care pot fi reduși ca și influență întrucât precizia poziționării firului în afara procesului este foarte exactă, mai apar factori de preces și care influențează poziția datorită procesului. Printre acești factori se numără vizeza firului, parametrii procesului impuși de generator prin timpii impulsurilor Ton și Toff, precum și înălțimea impulsurilor identificată ca tensiune de lucru.

- Precizia prelucrării poate fi mărită prin identificarea erorilor apărute din cauza parametrilor mai sus menționați

- Stabilirea unor parametrii eronați de proces pot duce la un control redus al preciziei și în cel mai rău caz la compromiterea prelucrării

- Stabilirea metodei și modului de reducere a erorilor dimensionale în urma prelucrării pot fi realizate în cazul în care parametrii procesului determină un proces stabil, erorile și calculele acestora trebuie să fie constante în timpul procesului

- Erorile mici nu pot influența grav precizia dimensională, ele pot afecta în schimb rugozitatea suprafeței piesei de prelucrat.

Menținând nivelul de tensiune și timpul OFF constant și analizând procesul de prelucrare în funcție de timpul ON se observă că acesta poate influența foarte mult procesul de prelucrare putând duce la compromiterea prelucrării : prin creșterea acestui timp, masa firului scade deci crește uzura acestuia astfel acesta se va rupe. Totodată creșterea timpului ON duce la realizarea unui proces mai rapid dar totodată brutal influențând astfel calitatea suprafeței piesei măsurate prin rugozitate.

Scăderea timpului ON duce la o rugozitate scăzută, uzură mică a firului, dar și la o productivitate scăzută.

Din analiza graficelor de la capitolul 4 cu referire la influențele timpilor Ton și Tof se poate spune că perioada impulsurilor influențează foarte puțin procesul de prelucrare însă frecvența impulsurilor dată de timpii ON/OFF ai impulsurilor sunt foarte importanți. Optimizarea timpilor ON/OFF ai impulsurilor poate îmbunătăți performanțele prelucrării, poate reduce timpul de prelucrare și poate reduce consumul de fir excesiv.

În urma analizelor experimentale efectuate, descrise în capitolul 4, prin modificarea timpilor de impuls generat de generator, se constată că raportul dintre timpii Ton și Toff pot face ca procesul să fie stabil, astfel procesul de prelucrare împreună cu fenomenele complexe ale acestuia pot determina erori dimensionale predictibile, astfel poate fi generată o funcție de corecție a traiectoriei.

Instabilitatea procesului de prelucrare determină o prelucrare haotică, neputându-se determina o funcție exactă de corecție a erorilor, deoarece aceste erori sunt determinate de fenomene imposibil de controlat în timpul procesului.

Se observă că eroare minimă obținută se obține în cazul în care timpul Toff este dublul timpului Ton, astfel că se recomandă indiferent de valorile timpului Ton sau Toff, raportul dintre aceștia să fie $Ton/Toff=1/2$.

Dintre contribuțiile personale aduse în cadrul acestui capitol pot fi enumerate următoarele :

➤ Identificarea experimentală a valorilor optime a unor parametrii atât de proces precum impulsuri generator, viteză de rulare fir cât și rezultați în urma procesului rugozitate, productivitate, consum și integrarea acestora întrun sistem expert în vederea generării unor parametrii pentru comanda mașinii.

➤ Studiul experimental al interstițiului eroziv prin măsurarea distanțelor dintre poziția firului și forma rezultată a piesei

➤ Realizarea unui model matematic pentru prelucrarea prin eroziune electrică cu fir. Modelul matematic realizat permite realizarea unor suprafețe de răspuns care prezintă diferite îndoituri. Acestea nu prezintă minime și maxime pe domeniul experimental. Astfel punctele de extrem pot fi identificate numai la marginile domeniului experimental.

➤ Identificare parametrilor optimi pentru raportul Ton și Toff pentru creșterea stabilității procesului de prelucrare, astfel acest raport a fost identificat ca fiind $Ton/Toff=1/2$.

6. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

Prezenta cercetare cuprinsă în teză conduce la unele concluzii generale foarte importante pentru cercetările prelucrărilor prin eroziune electrică cu electrod filiform care vor mai urma. Conținutul tezei aduce în atenție anumite contribuții personale precum și perspective de aplicare în practică a rezultatelor obținute, care să contribuie la îmbunătățirea procesului, precum și de modernizare a vechilor utilaje de prelucrare (de tip Elerofil), cu o apropiere considerabilă de performanțele celor mai noi modele.

Studiile complexe realizate pe parcursul tezei au necesitat cercetări teoretice, interpretări fenomenologice, punerea în practică a rezultatelor obținute prin realizarea reconstrucției și modernizării unei mașini de prelucrat prin eroziune electrică cu fir din generația anilor 80' folosind metode și rezultate obținute în cadrul programului experimental personal propus și realizat pe parcursul tezei.

În urma experimentelor efectuate, rezultatelor obținute, experiența acumulată în laboratoarele universității și ștandurilor de lucru din diferite fabrici în care a fost monitorizat procesul de prelucrare prin eroziune electrică cu fir, se consideră importante de menționat, anumite concluzii de ordin general, cum ar fi:

- Diversificarea tipurilor de produse, creșterea tipurilor de unicate fac ca mașinile de eroziune electrică să fie tot mai indispensabile în fabrici, chiar și în cele mai mici.
- Operarea mașinilor presupune cunoștințe în domeniul mecanicii, energeticii și mai nou în domeniul operării pe calculator, pentru eficientizarea procesului prin creșterea productivității, reducerea consumurilor și obținerea calității ridicate a pieselor.
- Este constatată posibilitatea de modernizare a parcurilor mașinilor prin înlocuirea mașinilor vechi cu cele noi, uneori aceste modernizări aduc creșteri ale producției fără a aduce creșteri asupra diversificării producției sau creșteri calitative ale suprafețelor piesei relucrate
- Se observă necesitatea de integrare obligatorie a unui calculator în sistemul de prelucrare prin eroziune electrică cu fir, acest lucru fiind pe de o parte un avantaj dat de posibilitatea updatării mașinilor fără înlocuire de piese ci doar software, tot un avantaj îl constituie fiabilitatea mașinilor dată și de calculator. Pe de altă parte mentenanța mașinilor devine mai dificilă și presupune cunoștințe suplimentare.
- Dezvoltarea mașinilor de prelucrat cu comandă numerică bazate pe calculator care permit folosirea mașinilor cu anumiți parametri fără a permite adaptarea parametrilor la anumite condiții des întâlnite în practică,

precum calitate proastă a dielectricului, materialului de prelucrat și uneori chiar a energiei electrice.

În concordanță cu cu obiectivele urmărite în cadrul tezei, se evidențiază următoarele contribuții originale ale autorului:

6.1. Contribuții în domeniul teoretic

- Realizarea unui model matematic pentru definirea influenței parametrilor generator asupra procesului și calității suprafețelor prelucrate.
- Identificarea prin cercetare bibliografică și experimentală a unor parametri de proces care pot fi optimizați prin comanda cu calculatorul a mașinii de prelucrat prin eroziune electrică cu fir;
- Studiul teoretic al interstițiului eroziv;
- Definirea unei metodologii proprii de abordare a problematicii optimizării procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu fir;
- Proiectarea sistemului de monitorizare și comandă a mașinii de prelucrat prin eroziune electrică cu fir;
- Elaborarea unui studiu matematic pentru definirea traiectoriei firului pentru creșterea preciziei dimensionale;
- Elaborarea unui algoritm pentru monitorizarea atentă, pas cu pas, a poziției exacte a firului în timpul prelucrării;
- Introducerea în algoritmul de conducere a unui parametru „contur critic” bazat în principal pe acceptarea erorilor și introducerea unei toleranțe;
- Stabilirea parametrilor pentru prelucrare în baza materialului de prelucrat, grosimii acestuia și în condițiile impunerii unei anumite productivități;
- Stabilirea unui program de cercetare experimentală bazată pe principiu analizei „cauză-efect”, după logica principiilor și practicii de prelucrare;
- Proiectarea software-ului pentru comanda mașinii de prelucrat prin eroziune electrică cu fir.

6.2. Contribuții în domeniul practic

- Identificarea experimentală a valorilor optime a unor parametrii atât de proces precum impulsuri generator, viteză de rulare fir cât și rezultați în urma procesului rugozitate, productivitate, consum și integrarea acestora întrun sistem expert în vederea generării unor parametrii pentru comanda mașinii.
- Studiul experimental al interstițiului eroziv prin măsurarea distanțelor dintre poziția firului și forma rezultată a piesei
- Realizarea software-ului pentru comanda mașinii de prelucrat prin eroziune electrică cu fir atât pentru calculator cât și pentru placa de dezvoltare cu microprocesor
- Implementarea unor tehnologii IT moderne precum touchscreen, monitorizare la distanță folosind internetul, monitorizarea vizuală a procesului și mașinii bazate pe camere video, telecomanda pentru poziționarea firului, etc în realizarea reconstrucției și modernizării mașinii de prelucrat cu eroziune electrică cu fir din cadrul laboratoarelor catedrei.
- Implementarea unei soluții de conturare a piesei de prelucrat pe baza unor algoritmi proprii
- Realizarea unui sistem expert pentru stabilirea parametrilor pentru prelucrare în baza materialului de prelucrat, grosimii acestuia și în condițiile impunerii unei anumite productivități
- Realizarea unui studiu experimental pentru reducerea consumului de fir în funcție de parametrii procesului și de uzura firului folosit
- Optimizarea algoritmilor de conducere a firului pe traiectorii prin introducerea unui parametru „contur critic” bazat în principal pe acceptarea erorilor și introducerea unei toleranțe.

*

Prezenta teză se dorește a reprezenta și un punct de sprijin pentru diverse perspective de cercetare științifică viitoare în domeniu, stabilind multiple premise pentru studierea aprofundată și a altor factori de influență a calității pieselor rezultate prin tăiere electro-erozivă cu electrod filiform, în condiții de eficiență economică sporită.

Introducerea sistemelor originale hardware și software reprezintă, de asemenea o posibilă bază de plecare în realizarea unor standuri experimentale, respectiv importante soluții de modernizare a mașinilor și instalațiilor mai vechi, existente încă în multe unități industriale, varianta prezentată asigurând conducerea procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu fir, cu ajutorul calculatorului.

Rezultatele tezei pot fi folosite și în atenția proiectanților, fabricanților și operatorilor mașinilor de prelucrat prin eroziune electrică cu fir, în vederea considerării mai atente, atât a fenomenologiei fizico-chimice din spațiul eroziv, cât și a condițiilor de monitorizare, directă și de la distanță a prelucrării, cu posibilități continue de îmbunătățire a indicatorilor de performanță.

Teza se dorește a fi și un exemplu de abordare interdisciplinară a sistemelor de prelucrare prin eroziune electrică cu fir, cu considerarea egală a tuturor aspectelor tehnologice, cât și a implicațiilor benefice și bine stabilite a echipării electronice, logistice și computaționale a utilajelor tehnologice.

BIBLIOGRAFIE

- 1 [Albu, 1981], Albu A., s.a; Programarea asistată de calculator a mașinilor unelte, Editura tehnică, București 1981
- 2 [Amza, 2002], Amza Gheorghe, ș.a. – Tratat de Tehnologia Materialelor, Editura Academiei Române, București, 2002.
- 3 [Andea, 2010], Andea, P., **Mnerie, A.V.**, Solomonesc, F., Pop Oana, Cristian, D., Conventional vs. Alternative Energy Source Overview, Part II. European Strategies, IEEE International Joint Conferences on Computational Cybernetics and Technical Informatics, IEEE 8th International Conference on Computational Cybernetics and 9th International Conference on Technical Informatics, ICC-CONTI 2010, May 27-29, 2010, IEEE Catalog Number CFP10575-CDR, ISBN 978-1-4244-7431-8
- 4 [Anghel, 2006], Anghel, Gabriela-Victoria, Mnerie, D., Jucu, D., Slavici, T., **Mnerie, A.V.**, (2007), Organisation of the Influence Factors System for Foodstuffs Lyophilization, Special Issue: Zrnko 2006, 2nd International and 19th Croatian Congress of Technologists for Post-harvest Technology, November 22 - 23, 2006, Tuheljske Toplice, Croatia, Agric. conspec. sci. 72(4):361-365
- 5 [Anton, 2008], Anton, Adrian Dan, Elemente privind prelucrarea prin eroziune electrică, editura Politehniun, Iași 2008
- 6 [Athanasiu, 2002] Athanasiu Irina, Pănoiu A., Microprocesoarele 8086,286,386, Editura Teora, București 1992
- 7 [Bălășoiu, 2003], BĂLĂȘOIU, Amalia, (2003) - Contribuții privind activarea procesului prin eroziune electrică cu electrod filiform în câmp magnetic, Teză de doctorat, Conducător științific Prof.dr.ing. Constantin Oprean, Sibiu
- 8 [Bogdanov, 1989], Bogdanov I., uP in comanda actionarilor electrice, Editura Fcla, Timisoara, 1989
- 9 [Bogdanov, 2009], Ivan Bogdanov, Inocențiu Maniu, Valer Dolga, Corneliu Rădulescu, Ștefan Varga, Valentin Ciupe, Robotică. Sistemul de conducere. Vol. III, Editura Politehnicii 2009
- 10 [Bondrea, 2003], Bondrea, I.; CATIA V5. Prelucrarea asistată pe mașini-unelte cu comandă numerică, Editura Universității „Lucian Blaga” din Sibiu, 2003
- 11 [Boragiu, 1982], Boragiu Th., Dobrescu R., Structuri moderne de conducere automată a mașinilor-unelte, Editura Tehnică, București 1982
- 12 [Brojboiu, 2002], Brojboiu Maria Electrotehnologii, editura Orizonturi Universitare, Timișoara 2002
- 13 [Catrina , 1993], Catrina O.; Turbo C++, Editura Teora, București, 1993
- 14 [Căprariu, 1991], Căprariu V.; Ghid de utilizare Turbo C 2.0, Cluj, Microelectronica, 1991
- 15 [Ceașescu, 1982] Ceașescu N., Popescu I., Tehnologii neconvenționale, Editura Scrisul Romanesc, Craiova 1982
- 16 [Cicală, 2005], Cicală Eugen Florin Metoda experimentelor factoriale Editura Politehnica Timișoara 2005
- 17 [Cicală, 1999], Cicală Eugen Florin Metode de prelucrare statistică a datelor experimentale Editura Politehnica Timișoara 1999

- 18 [Chiliban, 2002], CHILIBAN, Marius, (2002) - Contribuții privind activarea procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu electrod filiform, Teză de doctorat, Conducător științific Prof.dr.ing. Constantin Oprean, Sibiu
- 19 [Cristea, 1992a], Cristea V., ș.a; Rețele de calculatoare, Editura Teora, București, 1992
- 20 [Cristea, 1992b], Cristea V.; Tehnici de programare, București, Editura Teora, 1992
- 21 [Daescu, 1976], Daescu Gh., Toma M., Metode de calcul numeric, Bucuresti, Editura didactica si pedagogica, 1976
- 22 [Deneș, 2002], DENEȘ, Călin Viorel, (2002) - Contribuții asupra prelucrării prin eroziune electrică cu electrod filiform, Teză de doctorat, Conducător științific Prof.dr.ing. Constantin Oprean, Sibiu
- 23 [Dodun, 2000], DODUN, Oana, (2000) - Contribuții la optimizarea tehnologiei de prelucrare prin electroeroziune cu electrod filiform, Teză de doctorat, Conducător științific Prof.dr.ing. Gheorghe Lungu, Iași
- 24 [Nanu D, 2004], Nanu Dan, Tratat de tehnologii neconvenționale, vol II , Prelucrarea prin eroziune electrică, Editura ULBS, Sibiu, 2004
- 25 [Delesega, 1999], Delesega I.; Aparate electrice, Ed. Orizonturi Universitare, Timișoara, 1999
- 26 [Diaconescu, 2008], Constantin Diaconescu, Cercetări privind structura generatoarelor de impulsuri cu adaptare flexibilă, în timp real, la condițiile procesului de prelucrare prin **eroziune** electrică, Teză de doctorat, Universitatea "Lucian Blaga" din Sibiu, 2008
- 27 [Dobriceanu, 2001], Dobriceanu M., ș.a.; Senzori și instrumentație, Ed. Sitech Craiova, 2001
- 28 [Dobrotă, 1992], Dobrotă V., s.a. Aplicatii in sisteme cu Up , Editura Terra, Cluj, 1992
- 29 [Dobrota, 2002] Dobrota, V. - Retele digitale in telecomunicatii. Volumul I: comutatia digitala, analiza traficului. Editia a III-a. Editura Mediamira, Cluj-Napoca, 2002
- 30 [Velicu, 1999], Doru Velicu s.a. Geometrie descriptivă; Ed. Didactică și pedagogică 1999
- 31 [Dragomir, 1990], Dragomir T.L. Reglatoare automate, vol. I, Lito, Timisoara, 1990
- 32 [Draghici, 1993], Draghici G. - Studii asupra prelucrării simultane a microalezajelor multiple prin eroziune electrica, A VI-a Conferinta Nationala de Tehnologii Neconventionale, Timisoara, 1993
- 33 [Dumitrașcu, 2010], Liviu Dumitrașcu (Coordonator), Stelian Guțu, Titus Slavici, Liviu Ioniță, Gabriela Moise, Zoltan Borsos, Alin Mnerie – Crearea Site-Urilor Web Cu Adobe Dreamweaver Cs4. Modelarea Aplicațiilor Web Cu Uml2. Exemple, Aplicații, Studii De Caz, Editura Universității Petrol-Gaze Din Ploiești, 2010, Isbn: 978-973-719-218-9
- 34 [Dușa, 2000a], Dușa Petru, Popa Valeriu, Timohe-Tumac Ruxanda. Managementul Operațiilor. Tehnica-Info, Chișinău, 2000
- 35 [Dușa, 2000b], Dușa Petru, Pruteanu Octavian, Popa Valeriu. Concepția fabricației asistate de calculator. Tehnica-Info, Chișinău, 2000
- 36 [Ellis, 1990], Ellis M.; The Annotated C+ Reference Manual, Addison-Wesley, 1990
- 37 [Gerald, 1968], Gerald J.Hahn, Samuel S. Shapiro Statistical Models in

- Engineering Wiley& Sons 1968
- 38 [Gontean, 1995], Gontean A., s.a., Circuite integrate numerice, Lito, UT Timisoara, 1995
- 39 [Gontean, 2004], Gontean A., The PIC16F84A RISC Microcontroler (includes CD-ROM), Editura Orizonturi Universitare, Timisoara, ISBN 973-638-148-X, 2004, 231 pag., in Romanian
- 40 [Gonzales, 1993], Gonzales P.; La commande numerique par calculateur, Editions Casteilla, Paris, 1993
- 41 [Groza, 2004], Ioan Groza, Dinu Gubencu, Mircea Vasilescu, Marian Bratiş, Adelina Han, **Alin Mnerie**, Karina Herman, Şerban Popa, Titus Slavici – Fundamentele utilizării calculatoarelor, Editura Fundaţiei „IOAN SLAVICI”, Timişoara, 2004, ISBN 973-8093-24-X;
- 42 [Gubencu, 2009], Dinu Gubencu, Antoniu Reviczky-Levay, **Alin Mnerie**, Titus Slavici – Procese tehnologice asistate de calculator. Aplicaţii de laborator şi proiectare la disciplinele: Conducerea sistemelor, CAD şi Achiziţia informaţiei, Editura Fundaţiei pentru Cultură şi Învăţământ „IOAN SLAVICI”, Timişoara, 2009, ISBN 978-973-88962-1-5;
- 43 [Gubencu, 2003], Gubencu D., Mnerie A., s.a. Calculatoare Personale, Editura fundaţiei “Ioan Slavici”, 2003
- 44 [Harja, 2000], Harja C-tin; Amplificatoare şi convertoare de măsurare, UT “Gh.Asachi”, Iaşi, 2000
- 45 [Heber, 2000], Heber, S. Contributii la optimizarea tehnologiei de prelucrare prin EERC, a aliajelor de aluminiu, Teza de doctorat, Timisoara, 2000
- 46 [Isarie, 2003], ISARIE, C., (2003) - Contribuţii privind prelucrarea materialelor compozite prin eroziune electrică cu electrod filiform, Teză de doctorat, Conducător ştiinţific Prof.dr.ing. Constantin Oprean, Sibiu
- 47 [Kifor, 2002], Kifor Claudiu Vasile, Oprean Constantin. Ingineria Calităţii. Editura Universităţii „Lucian Blaga”, Sibiu, 2002
- 48 [Marcuşanu, 1986], Marcuşanu, A., Sistem de avans automat cu motor pas cu pas la masinile de prelucrat prin eroziune electrica, Teza de doctorat, Institutul Politehnic” Traian Vuia”, Timisoara, 1986
- 49 [Marinescu, 1993], Marinescu, N.I., Gavrilas, I. s.a., Prelucrari neconventionale in constructia de masini. Vol. II, Editura Tehnica, Bucuresti, 1993
- 50 [Marinescu, 1995], Marinescu, R. D., Marinescu, N.I., Managementul Tehnologiilor Neconventionale, Vol.I, Editura Economica, Bucuresti, 1995
- 51 [Maxwell, 2005], Maxwell J., ş.a.; A Multilayer Approach to Transient Voltage Suppressors, AVX Co., Technical Information
- 52 [Mihaila, 1999], Mihaila, I., Tehnologii Neconventionale, Editura imprimeriei de Vest, Oradea, 1999
- 53 [Mihaila, 2003], Mihaila Ioan, Tehnologii neconventionale, Editia a 2-a, Editura Univ. din Oradea, 2003
- 54 [Molnar, 2010], Florin Molnar-Matei, Adriana Bebeşelea, **Alin-Vasile Mnerie**, Mircea Krepelka, Ioan Groza, Veronica Kurti, Antonela Korosi, Gabriela Victoria Mnerie, Liliana Dorneanu, Titus Slavici – Utilizarea şi programarea calculatoarelor, Editura Eurostampa, 2010
- 55 [MnerieA, 2005a], Mnerie, A., Nanu A., Mnerie D., Dimensional process monitoring achieved by electrical erosion, International conference on integrated engineering C2I 2005 timisoara-romania
- 56 [MnerieA, 2005b], Mnerie, A., Nanu, A., Slavici, T., Reviczky, A., Anghel, G.,

- Integrated Hardware Resources For The Implementation Of The Command With Personal Computer In Electrical Erosion Machine With Wire Electrode, CITN, 2005
- 57 [MnerieA, 2005c], **Alin Mnerie**, Aurel Nanu, Titus Slavici, Mnerie, D., 2005, Study about process monitoring achieved by electrical erosion, Annual session of scientific papers „ITM ORADEA-2005”, Annals of the Oradea University, Fascicle of management and technological engineering, CD-ROM edition, volume IV (XIV), Editura Universitatii din Oradea, ISSN 1583-0691,
- 58 [MnerieA, 2007a], **Alin Mnerie**, Aurel Nanu, Titus Slavici, Mnerie, D., 2007, Wire displacement in electrical erosion processing with wire electrode using microcontroller PIC, Nonconventional Technologies Review, no.2/2007, ISSN-1454-3087, Ed. PIM Iasi
- 59 [MnerieA, 2007], **Alin Mnerie**, Titus Slavici, Gabriela-Victoria Anghel, Dumitru Jucu, Mnerie, D., 2007, The control of the electrical erosion processing with wire electrode for processed parts quality increasing, Nonconventional Technologies Review, no.3/2007, ISSN-1454-3087, Ed. PIM Iasi
- 60 [MnerieA, 2009a], **Alin Mnerie**, Aurel Nanu, Dumitru Mnerie, Titus Slavici, (2009), Some aspects of automated electrical erosion machine with wire electrode, Revista de Tehnologii neconvenționale, Editura Politehnica, nr. 1, pg. 36, ISSN 1454-3087
- 61 [MnerieA, 2010a], **Mnerie A.**, Iovan M., Molnar-Matei F., Applications of Expert Systems in Processing Through Power Erosion, The 3rd APPLIED COMPUTING CONFERENCE (AAC'10), Timișoara 2010
- 62 [MnerieA, 2010b], **Mnerie, A.**, Slavici T., Darvasi D., Petromana L., Applications of artificial intelligence in financial management, The 3rd APPLIED COMPUTING CONFERENCE (AAC'10), Timișoara 2010
- 63 [MnerieA, 2009b], Mnerie Alin, ș.a. - Îndrumător de laborator - Rețele, Sisteme intrare-ieșire, Achiziții de date, Calculatoare-echipamente Hard, Introducere în internet, Matematici discrete, Editura Fundației pentru Cultură și Învățământ „IOAN SLAVICI”, Timișoara, 2009, ISBN 978-973-88962-8-4;
- 64 [MnerieD, 2005a], Mnerie, D., Massimo Casagrande, Titus Slavici, **Alin-Vasile Mnerie**, 2005, About some application of shortwave in the process control and quality in agriculture, 4th International Conference “Integrated systems for agri-food production” - SIPA'05”, november, 24-26th, Timișoara, 2005, ISBN: 973-638-225-7, pg. 213-218
- 65 [MnerieD, 2005b], Mnerie, D., Dumitru Tucu, Gabriela-Victoria Anghel, **Alin Mnerie**, 2005, Elements of quality management integrated in technical system design for food industry, International conference on integrated engineering C2I 2005, 16-18 october, Timisoara-Romania, Editura Politehnica Timișoara, ISBN 973-625-259-0, pp. 149-150
- 66 [MnerieD, 2006a], Mnerie, D., Gabriela-Victoria Anghel, Slavici T., **Alin Mnerie**, 2006, International politics about occupational safety and health management, 1rd International Conference Systems for Health and Work Security, Timisoara, octombrie 2006, ISBN:(13) 978-973-638-276-5, Ed. Orizonturi Universitare
- 67 [MnerieD, 2006b], Mnerie, D., Gabriela-Victoria Anghel, Slavici T., **Alin Mnerie**, 2006, Some aspects about workplace risk management system, 1rd International Conference Systems for Health and Work Security, Timisoara, octombrie 2006, ISBN:(10) 973-638-274-5, Ed. Orizonturi Universitare
- 68 [MnerieD, 2007a], Dumitru Mnerie, Marius Mirica, Mirela Iorga, **Alin Vasile**

- Mnerie**, 2007, Photovoltaic applications for agriculture, Proceedings of the 5th International Conference "Integrated systems for agri-food production – durable development" - SIPA'07", november, 22-24th, Sibiu, 2007, ISBN: 978-973-638-348-9, pg. 229-234
- 69 [MnerieD, 2007b], Mnerie, D., Gabriela Victoria ANGHEL, **Alin Vasile MNERIE**, Constantin CHEVERESAN, (2007), A Comparison of Factors that Influence the Lyophilization Process, Special Issue: Zrnko 2006, 2nd International and 19th Croatian Congress of Technologists for Post-harvest Technology, November 22 - 23, 2006, Tuheljske Toplice, Croatia, Agric. conspec. sci. 72(4):367-37
- 70 [Moga, 1999], Moga M.; Conducerea proceselor din energetică cu calculatoare de proces, Ed. Orizonturi Universitare, Timișoara, 1999
- 71 [Muslea, 1992], Muslea I.; C++. Programarea orientată pe obiecte, Cluj, MicroInformatica, 1992
- 72 [Nani, 1996], NANI, V.M, (1996) - Activarea cu ultrasunete a proceselor de prelucrare prin electroeroziune cu electrod filiform, Teză de doctorat, Conducător științific Prof.dr.ing. Tudor Inclănzan, Timișoara
- 73 [NanuA, 1983], Nanu A, Tehnologia materialelor , Editura Didactica si Pedagogica Bucuresti, 1983
- 74 [NanuA, 1992], Nanu A., Achimescu N., Lelicescu C. Asupra echilibrului de prelevare, maruntire si evacuare a materialului din interstitiul activ la prelucrarea prin eroziune electrica, Buletinul Stiintific al IIS Sibiu, Vol. III
- 75 [NanuA, 1994], Nanu A., Nanu D , Reviczky Principii constructive ale masinilor de prlucrare dimensionala prin eroziune electrica tip ERO-I.P.Timisoara, AII-a conferinta-Tehnologii noi in constructia de masini. Galati
- 76 [NanuA, 1981], Nanu A., Nanu D., Prelucrarea dimensionala prin eroziune electrica in camp magnetic, Editura Facla, Timisoara 1981
- 77 [NanuA, 2003], Nanu A., Tratat de tehnologii neconventionale, vol. I , Tehnologii neconventionale la inceput de mileniu, Editura Augusta, Timisoara 2003
- 78 [NanuA, 2004], Nanu A., Tratat de tehnologii neconventionale, vol. II , Prelucrarea prin eroziune electrică, Editura ULSS, Sibiu 2004
- 79 [NanuA, 1980], Nanu A. – Prelucrări prin eroziune în construcția de mașini, Editura Facla , Timișoara, 1980.
- 80 [Nichici, 1996], Nichici Alexandru, Eugen Cicală, Robert Mee Prelucrarea datelor experimentale Universitatea Politehnica Timișoara 1996
- 81 [Obaciu, 2009], Gheorghe Obaciu, Cristian Pisarciuc, Flavius Sârbu, Prelucrarea materialelor prin eroziune electrică, Editura Universității "Transilvania", Brașov 2009
- 82 [Olariu, 1998], Olariu, M., Optimizarea tehnologica la prelucrarea prin eroziune cu electrod masiv, Teza de doctorat, Timisoara, 1998
- 83 [Oprea, 1994], OPREA, M., (1994) - Creșterea capacității portante tehnologice a electrodului la prelucrarea erozivă cu electrod filiform, Teză de doctorat, Conducător științific Prof.dr.ing. Alexandru Nichici, Timișoara
- 84 [Oprean, 1985], OPREAN, C., (1985) - Contribuții privind optimizarea parametrilor fizici și tehnologici la prelucrările neconvențional. Prelucrarea prin eroziune electrică cu electrod filiform, Teză de doctorat, Conducător științific Prof.dr.ing. Tache Voicu, Timișoara

- 85 [Petrescu , 1992], Petrescu M.; Interfete de proces, note de curs, Timișoara, 1992
- 86 [Popa, 2003], Popa M., Sisteme cu microprocesor, editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 2003
- 87 [Postelnicu, 2003], POSTELNICU, L., (2003) - Cercetări privind creșterea preciziei de prelucrare prin electroeroziune cu electrod filiform, Teză de doctorat, Conducător științific Prof.dr.ing. Traian Aurite, București
- 88 [Preitl, 1993], Preitl St., Teoria sistemelor si reglare automata, vol. I, Lito. UT Timisoara, 1993
- 89 [Pruteanu, 2001], Pruteanu Octavian, Bohosievici Cazimir. Managementul schimbărilor tehnologice în construcția de mașini. Editura Sedcom Libris, Iași, 2001,
- 90 [Răduță, 1998], RĂDUȚĂ, A., (1998), Elemente de știința și ingineria materialelor, Editura Politehnica, Timișoara;
- 91 [Reviczky, 1999a], Reviczky-L.A., Conducerea proceselor de prelucrare prin eroziune electrică, Ed. SOLNESS Timisoara, 1999
- 92 [Reviczky, 1998a], Reviczky-L.A., Contributii la imbunatatirea performantelor sistemelor de avans automat pentru masinile de prelucrat prin electroeroziune, Teza de doctorat, Timisoara 1998
- 93 [Reviczky, 1999b], Reviczky-L.A., Slavici T, Cercetări experimentale calitative asupra echipamentului CNC cu calculator PC a mașinii ELEROFIL – 10, Revista de Tehnologii neconvenționale Nr. 2/ 1999
- 94 [Reviczky, 1998b], Reviczky-L.A., Slavici T, Considerații asupra algoritmilor utilizați în cazul implementării unui soft pentru conducerea mașinilor de prelucrare prin electroeroziune cu electrod filiform, Conf.Int. "Eficienta tehnologiilor neconventionale" vol.1 Timișoara, 1998
- 95 [Reviczky, 1999c], Reviczky-L.A., Slavici T, Corelatiile dintre parametrii analizorului de impulsuri EDM și eficiența prelucrării, Revista de Tehnologii neconvenționale Nr.1/1999
- 96 [Reviczky, 2004], Reviczky-L.A., Slavici T. , Gubencu D, Comanda și controlul sistemelor tehnologice cu calculatorul. Metode CAD\CAN, Editura Fundatiei "Ioan Slavici" Timisoara, 2004
- 97 [Reviczky, 2005a], Reviczky-L.A., Slavici T. , Gubencu D., Mnerie A., Comanda și controlul sistemelor tehnologice cu calculatorul. Metode CAD\CAN, Editura Fundatiei "Ioan Slavici" Timisoara, 2005
- 98 [Reviczky, 2009a], Reviczky-Levay, Antoniu, ș.a. – Lucrări practice de electrotehnică și electronică analogică și digitală (îndrumător de proiect și laborator), Editura Fundației pentru Cultură și Învățământ „IOAN SLAVICI”, Timișoara, 2009, ISBN 978-973-88962-6-0
- 99 [Slavici, 2002], Titus Slavici, Ioan Groza, **Alin Mnerie**, Dinu Gubencu, Adelina Han, Karina Herman – Calculatoare personale. Inițiere în utilizare, Editura Fundației „IOAN SLAVICI”, Timișoara, 2002, ISBN 973-8093-24-4;
- 100 [Slavici, 1999], Slavici T. , Reviczky-L.A., s.a. Algoritm de comanda manuala a masinii de prelucrare prin eroziune electrică cu electrod filiform, Revista de Tehnologii neconvenționale Nr.1\1999
- 101 [Slavici, 2009a], Slavici Titus, ș.a. – Limbaje de programare - Tehnici de laborator și proiect, Editura Fundației pentru Cultură și Învățământ „IOAN SLAVICI”, Timișoara, 2009, ISBN 978-973-88962-3-9;
- 102 [Slavici, 1998a], Slavici T. , Reviczky-L.A., Structuri hard de conducere a

- masinilor de prelucrare prin eroziune electrica cu electrod filiform cu ajutorul calculatoarelor compatibile IBM PC, Conf.Int."Eficienta tehnologiilor neconventionale" vol.1 Timisoara, 1998
- 103 [Slavici, 1996], Slavici T., Conducerea cu calculatorul a sistemelor tehnologice, centrul de multiplicare Universitatea "POLITEHNICA", Timișoara 1996
- 104 [Slavici, 2003], Slavici T., s.a; Limbajul C. Elemente fundamentale și aplicații, Editura Fundației „Ioan Slavici”, Timișoara, 2003
- 105 [Slavici, 1995], Slavici T., ș.a.; Proiectare asistată pe calculator, curs Lito UT Timișoara, 1995
- 106 [Slavici, 1998b], Slavici T.; Calculatoare personale. Aplicații la conducerea sistemelor tehnologice, Ed. Mirton, Timișoara, 1998 industriale cu calculatorul
- 107 [Slavici, 1992], Slavici T.; Contribuții la proiectarea asistată pe calculator a MUCN în vederea prelucrării entităților geometrice complexe, Teză de doctorat, Timișoara, 1992
- 108 [Slavici, 1994], Slavici T., ș.a; Autocad și alte tehnici CAD/CAM, Editura Mirton, Timișoara, 1994
- 109 [Slavici, 2009b], Slavici Titus, Tiponut Virgil, **Mnerie Alin-Vasile**, Mnerie Dumitru, Modular Structures Of Numeriacal Management Of Processes For The Processing Of Materials And Nanotechnologies, , Revista de tehnologii neconvenționale, CITN ORADEA, 2009
- 110 [Slavici, 2009c], T. Slavici, Inteligența artificială, Fundației pentru cultura și învățământ "Ioan Slavici" Printing House, Timisoara, 2009.
- 111 [Slavici, 2006a], T. Slavici, Optimizarea management financiar cu ajutorul metodelor inteligenței artificiale, PhD Thesis, Timisoara, 2006
- 112 [Slavici, 2009c], Titus Slavici , Virgil Tiponut, **Alin Vasile Mnerie**, Dumitru Mnerie, (2009), Spin-off application in science and technological park – "tim science park", The 6th International Conference Integrated Systems for Agri-Food Production, SIPA 09, Proceedings SIPA09, Nyiregyháza, Hungary, 433, 4 pg., ISBN 978-963-9909-40-3
- 113 [Slavici, 2006b], Titus Slavici, Antoniu Reviczky-Levay, Dinu Gubencu, **Alin Mnerie** – Comanda și controlul sistemelor tehnologice cu calculatorul. Metode CAD / CAM, Editura Fundației „IOAN SLAVICI”, Timișoara, 2006, ISBN 973-8093-35-X;
- 114 [Slavici, 2007], Titus Slavici, Ioan Groza, Dinu Gubencu, **Alin Vasile Mnerie**, Gabriela Victoria Mnerie, Adelina Han, Liliana Dorneanu, Veronica Bivolaru, Antonela Körösi – Fundamentele utilizării calculatoarelor, Editura Eurostampa, Timișoara, 2007, ISBN 978-973-687-625
- 115 [Somnea 1992], Somnea D., s.a., Programarea in Assambler, Editura Tehnica, Bucuresti, 1992
- 116 [Szekely, 2001], Szekely I., ș.a.; Circuite electronice de conversie a semnalelor analogice și digitale, Ed. Matrix, București, 2001
- 117 [Șerban 2010], ȘERBAN, Viorel-Aurel, RĂDUJĂ, Aurel (2010), Știința și ingineria materialelor. Ediție revizuită și adăugită, Editura Politehnica Timișoara, ISBN 978-606-554-044-6;
- 118 [Tăbăcaru, 2004], Tăbăcaru V., Banu Mihaela, Eroziune electrică, Editura Evrika, Brăila, 2004
- 119 [Toma, 1996], Toma Liviu; Sisteme de achiziție și prelucrare numerică a datelor, Ed. de Vest, Timișoara, 1996
- 120 [Truax, 1999], Truax Th., ș.a.; A New Serial-Controlled Motor-Driver IC, Allegro Microsystem Inc., Technical Paper STP99-12

- 121 [Țîțu, 2002], Țîțu Mihail, Nanu Dan. Bazele prelucrării cu energii concentrate, Sibiu, 2002
- 122 [Țîțu, 2001a], Țîțu Mihail, Oprean Constantin, Cicală Eugen. Tehnici și metodici în conducerea proceselor tehnologice. Editura Universității „Lucian Blaga”, Sibiu, 2001
- 123 [Țîțu, 2001b], Țîțu Mihail, Oprean Constantin, Cicală Eugen. TStatistică tehnică și control statistic. Editura Universității „Lucian Blaga”, Sibiu, 2001
- 124 [Țucu, 2010], ȚUCU, Dumitru, (2010), Optimizarea costurilor calității, Editura Eurostampa, Timișoara, 2010, ISBN 978-606-569-076-9;
- 125 [Vornicu, 2001], Vornicu Liliana, ș.a.; Aparate electronice de măsurare și control, UT “Gh.Asachi”, Iași, 2001
- 126 Statgraphics –Manual de utilizare
- 127 Documentație site-ul : http://www.agie.com/english/index_e.html vizitat iulie 2007
- 128 Documentație site-ul : catia.3x.ro/index_files/text/Notiuni. Vizitat septembrie 2009
- 129 Documentație site-ul : www.charmilles.ro/pages/eroziune.htm vizitat februarie 2010
- 130 Documentație site-ul : <http://www.ona-electroerosion.com/eng/homepage.htm> vizitat iulie 2007
- 131 Documentație site-ul : <http://www.peps.com/> vizitat iulie 2008
- 132 Documentație site-ul : <http://www.peps.com/> vizitat iulie 2008
- 133 Documentație site-ul : *** ; Littelfuse TVS Application Notes vizitat iulie 2009
- 134 CATIA – English Documentation, Dessault Systems, 2005
- 135 Faulhaber Group, Miniature Drive Systems, Edition 2001
- 136 Harris, Supression Products Appl. Note 9771, july 1999
- 137 HEIDENHAIN, Sealed Linear Encoders, March 2003
- 138 Documentație site-ul : ***; Intelligent Instrumentation, Handbook of personal computer instrumentation, USA 1991
- 139 Documentație site-ul : ***; Schneider Electric, Catalog Distribuție electrică de joasă tensiune, 1999/2000
- 140 Documentație site-ul : ***; Tyco Electronics, Circuit protection Databook, 2002
- 141 Documentație site-ul : <http://www.charmilles.ro/> vizitat august 2010
- 142 Documentație site-ul : <http://eco.ro/LinkClick.aspx?fileticket=CqA8%2FcRgmXs%3D&tabid=58&mid=377> vizitat august 2010

SINTEZĂ PRIVIND LUCRĂRILE PROPRII

1. Ioan Groza, Dinu Gubencu, Mircea Vasilescu, Marian Bratiș, Adelina Han, **Alin Mnerie**, Karina Herman, Șerban Popa, Titus Slavici – *Fundamentele utilizării calculatoarelor*, Editura Fundației „IOAN SLAVICI”, Timișoara, 2004, ISBN 973-8093-24-X;
2. Liviu Dumitrașcu (Coordonator), Stelian Guțu, Titus Slavici, Liviu Ioniță, Gabriela Moise, Zoltan Borsos, **Alin Mnerie** – *Crearea Site-urilor Web Cu Adobe Dreamweaver Cs4. Modelarea Aplicațiilor Web Cu Uml2. Exemple, Aplicații, Studii De Caz*, Editura Universității Petrol-Gaze Din Ploiești, 2010, ISBN: 978-973-719-218-9
3. Florin Molnar-Matei, Adriana Bebeșelea, **Alin-Vasile Mnerie**, Mircea Krepelka, Ioan Groza, Veronica Kurti, Antonela Korosi, Gabriela Victoria Mnerie, Liliana Dorneanu, Titus Slavici – *Utilizarea și programarea calculatoarelor*, Editura Eurostampa, 2010
4. Mnerie, D., Massimo Casagrande, Titus Slavici, **Alin-Vasile Mnerie**, 2005, *About some application of shortwave in the process control and quality in agriculture*, 4th International Conference “Integrated systems for agri-food production” - SIPA’05”, november, 24-26th, Timișoara, 2005, ISBN: 973-638-225-7, pg. 213-218
5. Mnerie, D., Dumitru Tucu, Gabriela-Victoria Anghel, **Alin Mnerie**, 2005, *Elements of quality management integrated in technical system design for food industry*, International conference on integrated engineering C2I 2005, 16-18 october, Timisoara-Romania, Editura Politehnica Timișoara, ISBN 973-625-259-0, pp. 149-150
6. Mnerie, D., Gabriela-Victoria Anghel, Slavici T., **Alin Mnerie**, 2006, *International politics about occupational safety and health management*, 1st International Conference Systems for Health and Work Security, Timisoara, octombrie 2006, ISBN:(13) 978-973-638-276-5, Ed. Orizonturi Universitare
7. Mnerie, D., Gabriela-Victoria Anghel, Slavici T., Alin Mnerie, 2006, *Some aspects about workplace risk management system*, 1st International Conference Systems for Health and Work Security, Timisoara, octombrie 2006, ISBN:(10) 973-638-274-5, Ed. Orizonturi Universitare
8. Dumitru Mnerie, Marius Mirica, Mirela Iorga, **Alin Vasile Mnerie**, 2007, *Photovoltaic applications for agriculture*, Proceedings of the 5th International Conference “Integrated systems for agri-food production – durable development” - SIPA’07”, november, 22-24th, Sibiu, 2007, ISBN: 978-973-638-348-9, pg. 229-234
9. Mnerie, D., Gabriela Victoria ANGHEL, **Alin Vasile MNERIE**, Constantin CHEVERESAN, (2007), *A Comparison of Factors that Influence the Lyophilization Process*, Special Issue: Zrnko 2006, 2nd International and 19th Croatian Congress of Technologists for Post-harvest Technology, November 22 - 23, 2006, Tuheljske Toplice, Croatia, Agric. conspec. sci. 72(4):367-370
10. **Alin Vasile Mnerie**, Aurel Nanu, Mnerie, D., Titus Slavici, 2005, *Dimensional process monitoring achieved by electrical erosion*, International conference on integrated engineering C2I 2005 Timisoara-Romania
11. **Alin Mnerie**, Aurel Nanu, Titus Slavici, Mnerie, D., 2005, *Study about process monitoring achieved by electrical erosion*, Annual session of scientific papers „ITM ORADEA-2005”, Annals of the Oradea University, Fascicle of management

- and technological engineering, CD-ROM edition, volume IV (XIV), Editura Universitatii din Oradea, ISSN 1583-0691,
12. **Alin Mnerie**, Aurel Nanu, Titus Slavici, Mnerie, D., 2007, *Wire displacement in electrical erosion processing with wire electrode using microcontroller PIC*, Nonconventional Technologies Review, no.2/2007, ISSN-1454-3087, Ed. PIM Iasi
 13. **Alin Mnerie**, Titus Slavici, Gabriela-Victoria Anghel, Dumitru Țucu, Mnerie, D., 2007, *The control of the electrical erosion processing with wire electrode for processed parts quality increasing*, Nonconventional Technologies Review, no.3/2007, ISSN-1454-3087, Ed. PIM Iasi
 14. Anghel, Gabriela-Victoria, Mnerie, D., Țucu, D., Slavici, T., **Mnerie, A.V.**, (2007), *Organisation of the Influence Factors System for Foodstuffs Lyophilization*, Special Issue: Zrnko 2006, 2nd International and 19th Croatian Congress of Technologists for Post-harvest Technology, November 22 - 23, 2006, Tuheljske Toplice, Croatia, Agric. conspec. sci. 72(4):361-365
 15. Titus Slavici, Virgil Tiponut, **Alin Vasile Mnerie**, Dumitru Mnerie, (2009), Spin-off application in science and technological park – “tim science park”, The 6th International Conference Integrated Systems for Agri-Food Production, SIPA 09, Proceedings SIPA09, Nyíregyháza, Hungary, 433, 4 pg., ISBN 978-963-9909-40-3
 16. Titus Slavici, Antoniu Reviczky-Levay, Dinu Gubencu, **Alin Mnerie** – *Comanda și controlul sistemelor tehnologice cu calculatorul. Metode CAD / CAM*, Editura Fundației „IOAN SLAVICI”, Timișoara, 2006, ISBN 973-8093-35-X;
 17. Titus Slavici, Ioan Groza, Dinu Gubencu, **Alin Vasile Mnerie**, Gabriela Victoria Mnerie, Adelina Han, Liliana Dorneanu, Veronica Bivolaru, Antonela Körösi – *Fundamentele utilizării calculatoarelor*, Editura Eurostampa, Timișoara, 2007, ISBN 978-973-687-625
 18. **Alin Mnerie**, Aurel Nanu, Dumitru Mnerie, Titus Slavici, (2009), Some aspects of automated electrical erosion machine with wire electrode, Revista de Tehnologii neconvenționale, Editura Politehnica, nr. 1, pg. 36, ISSN 1454-3087
 19. Titus Slavici, Ioan Groza, **Alin Mnerie**, Dinu Gubencu, Adelina Han, Karina Herman – *Calculatoare personale. Inițiere în utilizare*, Editura Fundației „IOAN SLAVICI”, Timișoara, 2002, ISBN 973-8093-24-4;
 20. Titus Slavici, Virgil Tiponut, **Alin Vasile Mnerie**, Dumitru Mnerie, (2009), Modular structures of numerical management of processes for the processing of materials and nanotechnologies, Revista de Tehnologii neconvenționale, Editura Politehnica, nr. 1, pg. 41, ISSN 1454-3087
 21. Andea, P., **Mnerie, A.V.**, Solomonesc, F., Pop Oana, Cristian, D., *Conventional vs. Alternative Energy Source Overview, Part II. European Strategies*, IEEE International Joint Conferences on Computational Cybernetics and Technical Informatics, IEEE 8th International Conference on Computational Cybernetics and 9th International Conference on Technical Informatics, ICC-CONTI 2010, May 27-29, 2010, IEEE Catalog Number CFP10575-CDR, ISBN 978-1-4244-7431-8
 22. **Mnerie A.**, Iovan M., Molnar-Matei F., *Applications of Expert Systems in Processing Through Power Erosion*, The 3rd APPLIED COMPUTING CONFERENCE (AAC'10), Timișoara 2010
 23. **Mnerie, A.**, Slavici T., Darvasi D., Petromana L., *Applications of artificial intelligence in financial management*, The 3rd APPLIED COMPUTING CONFERENCE (AAC'10), Timișoara 2010
 24. **Mnerie Alin**, ș.a. – Îndrumător de laborator – Rețele, Sisteme intrare-ieșire, Achiziții de date, Calculatoare-echipamente Hard, Introducere în internet, Matematici discrete, Editura Fundației pentru Cultură și Învățământ „IOAN SLAVICI”, Timișoara, 2009, ISBN 978-973-88962-8-4.

ANEXE

Sursa programului pentru conducerea mașinii și procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu fir

```
program elerofil2010;

uses
  Forms,
  unit1 in 'unit1.pas' {Form1},
  tscap32_rt in 'tscap32_rt.pas';

{$R *.res}

begin
  Application.Initialize;
  Application.CreateForm(TForm1, Form1);
  Application.Run;
end.

unit Unit1;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, Menus, StdCtrls, ExtCtrls, tscap32_rt, ComCtrls, Buttons, jpeg;

type
  TForm1 = class(TForm)
    MainMenu1: TMainMenu;
    Fisiere1: TMenuItem;
    iesire1: TMenuItem;
    Fisiernou1: TMenuItem;
    Fisiernou2: TMenuItem;
    Salcaredate1: TMenuItem;
    Parametriiproses1: TMenuItem;
    Parametriigenerator1: TMenuItem;
    Parametriifir1: TMenuItem;
    Optimizareproces1: TMenuItem;
    Condiideluclu1: TMenuItem;
    Informatiiprelucrare1: TMenuItem;
    Ajutor1: TMenuItem;
    Configurareaplicatie1: TMenuItem;
    Elementevizuale1: TMenuItem;
```

```
Comunicare1: TMenuItem;
GroupBox1: TGroupBox;
Label1: TLabel;
Label2: TLabel;
Label3: TLabel;
Label4: TLabel;
Image1: TImage;
Memo1: TMemo;
Label5: TLabel;
Label6: TLabel;
Label7: TLabel;
Label8: TLabel;
Label9: TLabel;
Label10: TLabel;
Label11: TLabel;
Memo2: TMemo;
Label12: TLabel;
RadioGroup1: TRadioGroup;
Label13: TLabel;
Label14: TLabel;
Button1: TButton;
tsCap321: TtsCap32;
CheckBox1: TCheckBox;
Button2: TButton;
Bevel1: TBevel;
StaticText1: TStaticText;
StaticText2: TStaticText;
StaticText3: TStaticText;
ProgressBar1: TProgressBar;
Label15: TLabel;
Label16: TLabel;
Label17: TLabel;
CheckBox2: TCheckBox;
Edit1: TEdit;
Edit2: TEdit;
Edit3: TEdit;
Label18: TLabel;
Edit4: TEdit;
Edit5: TEdit;
ComboBox1: TComboBox;
Label19: TLabel;
Edit6: TEdit;
Edit7: TEdit;
Button3: TButton;
RadioGroup2: TRadioGroup;
OpenDialog1: TOpenDialog;
SaveDialog1: TSaveDialog;
Label20: TLabel;
Label21: TLabel;
Label22: TLabel;
Label23: TLabel;
```

```
BitBtn1: TBitBtn;
Button4: TButton;
Button5: TButton;
Button6: TButton;
procedure iesire1Click(Sender: TObject);
procedure CheckBox1Click(Sender: TObject);
procedure Button1Click(Sender: TObject);
procedure Fisiernou1Click(Sender: TObject);
procedure Salcaredate1Click(Sender: TObject);
procedure BitBtn1Click(Sender: TObject);
procedure FormCreate(Sender: TObject);
procedure Button4Click(Sender: TObject);
procedure Button6Click(Sender: TObject);
procedure RadioGroup2Click(Sender: TObject);
private
  { Private declarations }
public
  { Public declarations }
end;

var
  Form1: TForm1;
  marire,forma:integer;
  critic,offset:real;
implementation

{$R *.dfm}

procedure TForm1.iesire1Click(Sender: TObject);
begin
close();
end;

procedure TForm1.CheckBox1Click(Sender: TObject);
begin
if checkbox1.Checked then
begin
// checkbox1.Checked := false;
checkbox1.Caption := 'Dezactivare webcam';
tsCap321.Connected := true;
end else
begin
// checkbox1.Checked := true;
checkbox1.Caption := 'Activare webcam';
tsCap321.Connected := false;
end;
end;

procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
begin
If checkbox2.checked then begin checkbox2.checked:=false;
```

```

        button1.Caption := 'Executie proces'
    end
else begin
checkbox2.checked:=true;
button1.Caption := 'STOP';
end;

end;

procedure TForm1.Fisiernou1Click(Sender: TObject);
var
    F: TextFile;
    S,t: string;
    a,b : integer;
begin
    if OpenFileDialog1.Execute then    { Display Open dialog box }
    begin
        AssignFile(F, OpenFileDialog1.FileName); { File selected in dialog box }
        Reset(F);
        memo1.Lines.Clear;
        while not eof(F) do
            begin
                Readln(F, S);           { Read the first line out of the file }
                memo1.Lines.Add (S);    { Put string in a TEdit control }
            end;
        CloseFile(F);
    end;
    s:=memo1.Lines.Strings[0];
    //generator
    t:=s;a:=pos('generator',t);delete(t,1,a+9);b:=pos('; ',t);edit1.Text :=copy(t,0,b-1);
    //avans
    t:=s;a:=pos('avans',t);delete(t,1,a+5);b:=pos('; ',t);edit2.Text :=copy(t,0,b-1);
    //viteza fir
    t:=s;a:=pos('fir',t);delete(t,1,a+3);b:=pos('; ',t);edit4.Text :=copy(t,0,b-1);
    //Offset
    t:=s;a:=pos('offset',t);delete(t,1,a+6);b:=pos('; ',t);edit5.Text :=copy(t,0,b-1);
    //Critic
    t:=s;a:=pos('critic',t);delete(t,1,a+6);b:=pos('; ',t);edit3.Text :=copy(t,0,b-1);
    //Piesa
    t:=s;a:=pos('piesa',t);delete(t,1,a+5);b:=pos('; ',t);

    val(copy(t,0,b-1),b,a);
    combobox1.ItemIndex:=b;

    s:=memo1.Lines.Strings[1];
    //generator
    t:=s;a:=pos('x',t);delete(t,1,a+1);b:=pos('; ',t);edit6.Text :=copy(t,0,b-1);
    //avans
    t:=s;a:=pos('y',t);delete(t,1,a+1);b:=pos('; ',t);edit7.Text :=copy(t,0,b-1);
    memo1.Lines.Delete(0);
    memo1.Lines.Delete(0);

```

```

label7.Caption:= extractfileName(OpenDialog1.FileName);
end;

procedure TForm1.Salcaedate1Click(Sender: TObject);
var
  F2: TextFile;
  S,t: string;
  a,b : integer;
begin
  if SaveDialog1.Execute then begin
    if pos('.elr',SaveDialog1.FileName)=0 then
      SaveDialog1.FileName:=SaveDialog1.FileName+'.elr';
    AssignFile(F2, SaveDialog1.FileName);
    Rewrite(F2);

    s:='generator:'+edit1.Text+';fir:'+edit4.Text+';avans:'+edit2.Text+';offset:'+edit5.
    Text+';critic:'+edit3.Text+';piesa:';
    if combobox1.ItemIndex=1 then s:=s+'1';
    else s:=s+'0';
    Writeln(F2, s);
    s:='x:'+edit6.Text+';y:'+edit7.Text+';';
    Writeln(F2, s);
    for a:=0 to memo1.Lines.Count do
      Writeln(F2, memo1.lines.strings[a]);

    CloseFile(F2);
  end;
end;

procedure TForm1.BitBtn1Click(Sender: TObject);
var a,i,j,si,sj:integer;
    px,py,pi,pj:real;
    s,p1,p2,p3,p4:string;
begin
  image1.Canvas.Rectangle(20,20,577,327);
  Canvas.FloodFill(ClientWidth div 2, ClientHeight div 2, clBlack, fsBorder);
  si:=-50;sj:=-90;
  for i:=0 to 20 do
    begin;
      str(sj,s);
      image1.Canvas.Pen.Color:=clgreen;
      image1.Canvas.TextOut(i*30, 0, s);
      image1.Canvas.moveto(5+i*30,13);
      image1.Canvas.lineto(5+i*30,20);
      image1.Canvas.TextOut(i*30, 337, s);
      image1.Canvas.moveto(5+i*30,337);
      image1.Canvas.lineto(5+i*30,325);
      sj:=sj+10;
    end;
  si:=50;
  for i:=1 to 10 do

```

```

begin;
str(si,s);
image1.Canvas.TextOut(0,i*30, s);
image1.Canvas.moveto(13,5+i*30);
image1.Canvas.lineto(20,5+i*30);
image1.Canvas.TextOut(585,i*30, s);
image1.Canvas.moveto(585,5+i*30);
image1.Canvas.lineto(575,5+i*30);
si:=si-10;
end;
image1.Canvas.moveto(275,185);
image1.Canvas.Pen.Color:=clblack;
for i:=0 to memo1.Lines.Count do
begin
s:=memo1.Lines[i];
a:=pos('G1',s);
if a<>0 then
begin
p1:=copy(s,a+3,pos('Y',s)-a-3);
a:=pos('Y',s);
p2:=copy(s,a+1,length(s)-a);
val(p1,px,a);val(p2,py,a);
memo2.Lines.Add(P1+' '+p2);
image1.Canvas.lineto(275+round(px*3*marire),185-round(py*3*marire))
end;

end;
end;
procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
begin
image1.Canvas.Create;
marire:=1;
end;

procedure TForm1.Button4Click(Sender: TObject);
var a,i,j,si,sj:integer;
px,py,pi,pj:real;
s,p1,p2,p3,p4:string;
begin
forma:=1; val(edit3.text,critic,a);
critic:=1+critic;
if combobox1.ItemIndex=0 then forma:=-1;
image1.Canvas.moveto(275+round(forma*critic*marire*3),185+round(forma*critic
*marire*3));
image1.Canvas.Pen.Color:=clred;
for i:=0 to memo1.Lines.Count do
begin
s:=memo1.Lines[i];
a:=pos('G1',s);
if a<>0 then
begin

```



```
        p1:=copy(s,a+3,pos('Y',s)-a-3);
        a:=pos('Y',s);
        p2:=copy(s,a+1,length(s)-a);
        val(p1,px,a);val(p2,py,a);
        memo2.Lines.Add(P1+' '+p2);
        image1.Canvas.lineto(275+round(px*3*forma*critic*marire),185-
round(py*3*critic*forma*marire));
        end;

    end;
end;

procedure TForm1.Button6Click(Sender: TObject);
var a,i,j,si,sj:integer;
    px,py,pi,pj:real;
    s,p1,p2,p3,p4:string;
begin
image1.Canvas.Pen.Color:=clgreen;
image1.Canvas.Rectangle(20,20,577,327);
Canvas.FloodFill(ClientWidth div 2, ClientHeight div 2, clBlack, fsBorder);
si:=-50;sj:=-90;
for i:=0 to 20 do
    begin;
        str(sj,s);
        image1.Canvas.Pen.Color:=clgreen;
        image1.Canvas.TextOut(i*30, 0, s);
        image1.Canvas.moveto(5+i*30,13);
        image1.Canvas.lineto(5+i*30,20);
        image1.Canvas.TextOut(i*30, 337, s);
        image1.Canvas.moveto(5+i*30,337);
        image1.Canvas.lineto(5+i*30,325);
        sj:=sj+10;
    end;
si:=50;
for i:=1 to 10 do
    begin;
        str(si,s);
        image1.Canvas.Pen.Color:=clgreen;
        image1.Canvas.TextOut(0,i*30, s);
        image1.Canvas.moveto(13,5+i*30);
        image1.Canvas.lineto(20,5+i*30);
        image1.Canvas.TextOut(585,i*30, s);
        image1.Canvas.moveto(585,5+i*30);
        image1.Canvas.lineto(575,5+i*30);
        si:=si-10;
    end;
image1.Canvas.moveto(275,185);
end;

procedure TForm1.RadioGroup2Click(Sender: TObject);
var s:string;
```

```
begin
if radiogroup2.ItemIndex =0 then marire:=1;
if radiogroup2.ItemIndex =1 then marire:=5;
if radiogroup2.ItemIndex =2 then marire:=100;
str(marire,s);memo2.Lines.Add(s);

end;

end.
```

Sursa programului pentru conducerea mașinii și procesului de prelucrare prin eroziune electrică cu fir

```
const
  pin_reset=0;
  pin_d1=2;
  pin_d2=3;
  pin_d3=4;
  pin_d4=5;
  pin_g1=6;
  pin_g2=7;
  pin_clk=1;

  timp_pauza=10;

  ph1:array [0..5] of byte=(0,0,1,1,1,1);
  ph2:array [0..5] of byte=(0,1,0,1,1,1);
  ph3:array [0..5] of byte=(0,1,1,0,1,1);
  ph4:array [0..5] of byte=(0,1,1,1,0,1);

var informatie:byte;

  stare:byte;
  ocupat:boolean;

  directie:bit;
  poz_rotor:byte;

  poz_temp:longint;
  xc,yc,zc,uc:longint;
  xv,yv,zv,uv:longint;

  sx,sy,sz,su:boolean;
  rotx,roty,rotz,rotu:longint;

  i:byte;

procedure pauza;
begin
  delay_us(timp_pauza);
end;

procedure rst;
begin
  pauza;
  PORTB.pin_reset:=0;
  pauza;
  PORTB.pin_reset:=1;
  pauza;
  PORTB.pin_reset:=0;
```

```
pauza;
end;

procedure select(motor:byte);
begin
  PORTB.pin_g1:=motor div 2;
  PORTB.pin_g2:=motor mod 2;
end;

procedure tic;
begin
  pauza;
  PORTB.pin_clk:=0;
  pauza;
  PORTB.pin_clk:=1;
  pauza;
  PORTB.pin_clk:=0;
  pauza;
end;

procedure set_data(db0,db1,db2,db3:byte);
var temp:byte;
begin
  PORTB.pin_d1:=db0;
  PORTB.pin_d2:=db1;
  PORTB.pin_d3:=db2;
  PORTB.pin_d4:=db3;
  tic;
end;

procedure rotire;
begin
  set_data(ph1[poz_rotor],ph2[poz_rotor],ph3[poz_rotor],ph4[poz_rotor]);
end;

procedure pozitionare;
begin
  repeat
    if xv<>xc then
      begin
        sx:=false

        if xv>xc then
          begin
            inc(xc);
            inc(rotx);
          end;
        if xv<xc then
          begin
            dec(xc);
            dec(rotx);
          end;
      end;
  until sx;
end;
```

```
end;

if rotx<1 then rotx:=4
if rotx>4 then rotx:=1;

poz_rotor:=rotx;
rotire;
end
else sx:=true;

if yv<>yc then
begin
  sy:=false

  if yv>yc then
  begin
    inc(yc);
    inc(roty);
  end;
  if yv<yc then
  begin
    dec(yc);
    dec(roty);
  end;

if roty<1 then roty:=4
if roty>4 then roty:=1;

poz_rotor:=roty;
rotire;
end
else sy:=true;

if zv<>zc then
begin
  sz:=false

  if zv>zc then
  begin
    inc(zc);
    inc(rotz);
  end;
  if zv<zc then
  begin
    dec(zc);
    dec(rotz);
  end;

if rotz<1 then rotz:=4
if rotz>4 then rotz:=1;
```

```
poz_rotor:=rotz;
rotire;
end
else sz:=true;

if uv<>uc then
begin
su:=false

if uv>uc then
begin
inc(uc);
inc(rotu);
end;
if uv<uc then
begin
dec(uc);
dec(rotu);
end;

if rotu<1 then rotu:=4
if rotu>4 then rotu:=1;

poz_rotor:=rotu;
rotire;
end
else su:=true;

until (((sx=true) and (sy=true)) and ((sz=true) and (su=true)))
end;

procedure init();
begin
ADCON1 := 7;
CMCON := 7;

TRISA := 0xFF;
TRISB := 0;
TRISC := 0xFF;
TRISD := 0;
TRISE.0 := 1;
TRISE.1 := 1;

stare:=0;
ocupat:=false;

poz_rotor:=0;
poz_temp:=0;

sx:=false;
sy:=false;
```

```
sz:=false;
su:=false;

rst;

for i:=0 to 3 do
begin
  select(i);
  poz_rotor:=5;
  rotire;
end;
end;

procedure analiza_poz;
begin
  if informatie=45 then directie:=0
  else directie:=1;

  if (informatie>47) and (informatie<58) then
  begin
    poz_temp:=poz_temp*10+informatie;
  end;
end;

procedure analiza;
begin
  if stare=0 then
  begin
    case informatie of
      88:stare:=1; // X
      89:stare:=2; // Y
      90:stare:=3; // Z
      85:stare:=4; // U
      81:stare:=99; // Q
    end;
  end;

  if stare=1 then
  begin
    analiza_poz();

    if informatie=32 then
    begin
      xv:=xc+(2*directie*poz_temp);
      xv:=xv-poz_temp;

      ocupat:=true;
      pozitionare;
    end;
  end;
end;
```

```
if stare=2 then
begin
analiza_poz();
if informatie=32 then
begin
yv:=yc+(2*directie*poz_temp);
yv:=yv-poz_temp;
end;
end;
if stare=3 then
begin
analiza_poz();

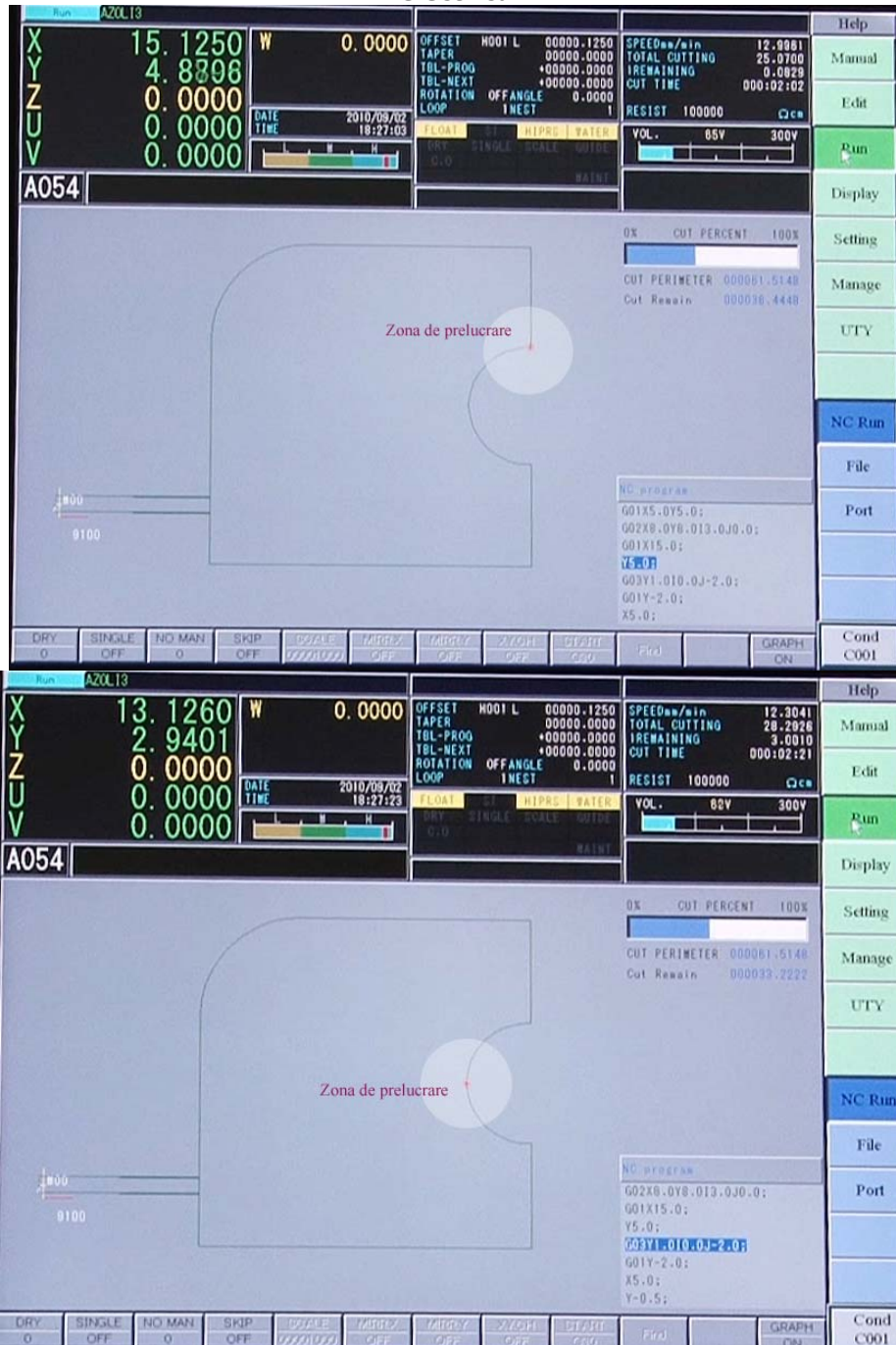
if informatie=32 then
begin
zv:=zc+(2*directie*poz_temp);
zv:=zv-poz_temp;
end;
end;

if stare=4 then
begin
analiza_poz();

if informatie=32 then
begin
uv:=uc+(2*directie*poz_temp);
uv:=uv-poz_temp;
end;
end;
end;

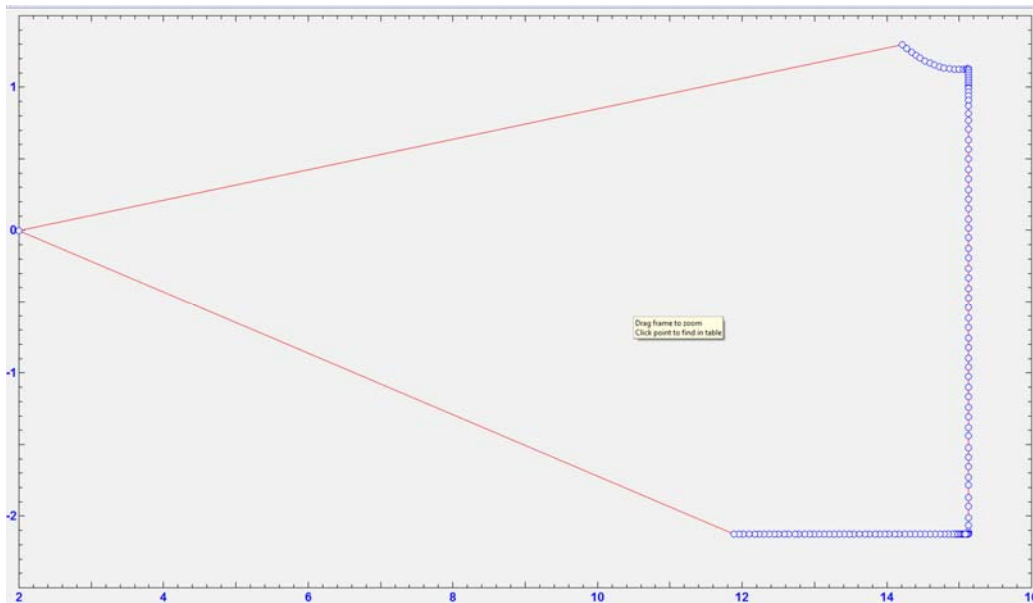
begin
UART1_Init(9600);
Delay_ms(100);
UART1_Write_Text('-= CNC =-');
UART1_Write(10);
UART1_Write(13);
init;
UART1_Write_Text('CNC initializat');
while (TRUE) do
begin
if (UART1_Data_Ready() <> 0) then
begin
informatie:=UART1_Read();
analiza();
end;
end;
end.
end.
```

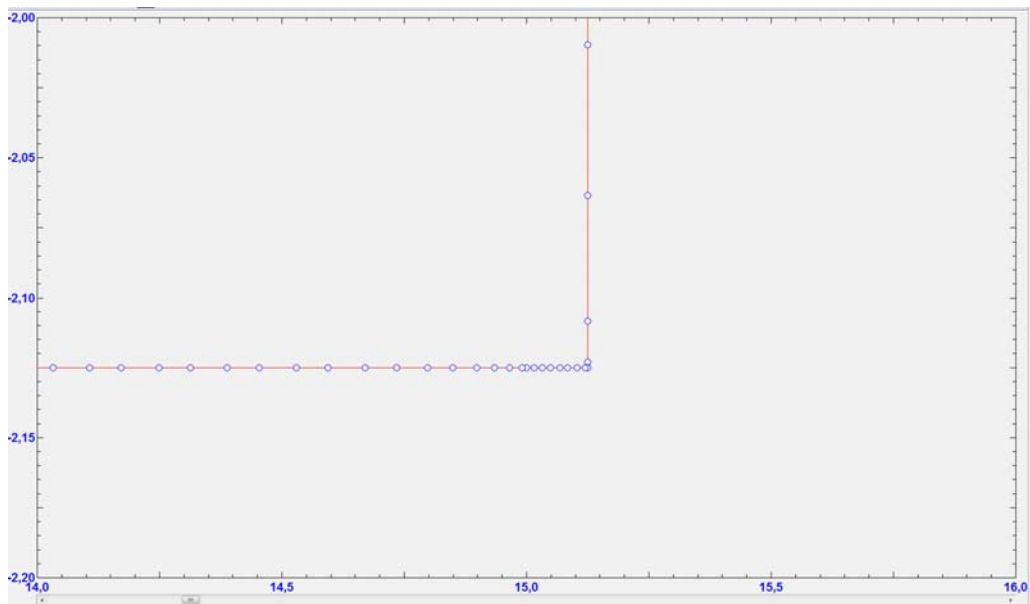
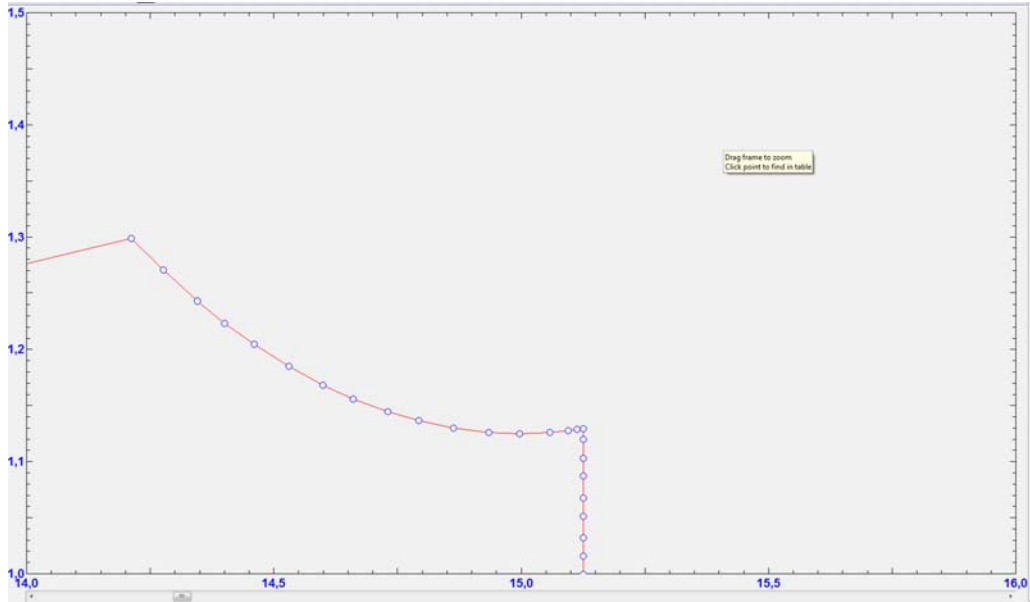

Analiza punctelor farcuse de fir în procesul de prelucrare prin eroziune electrică

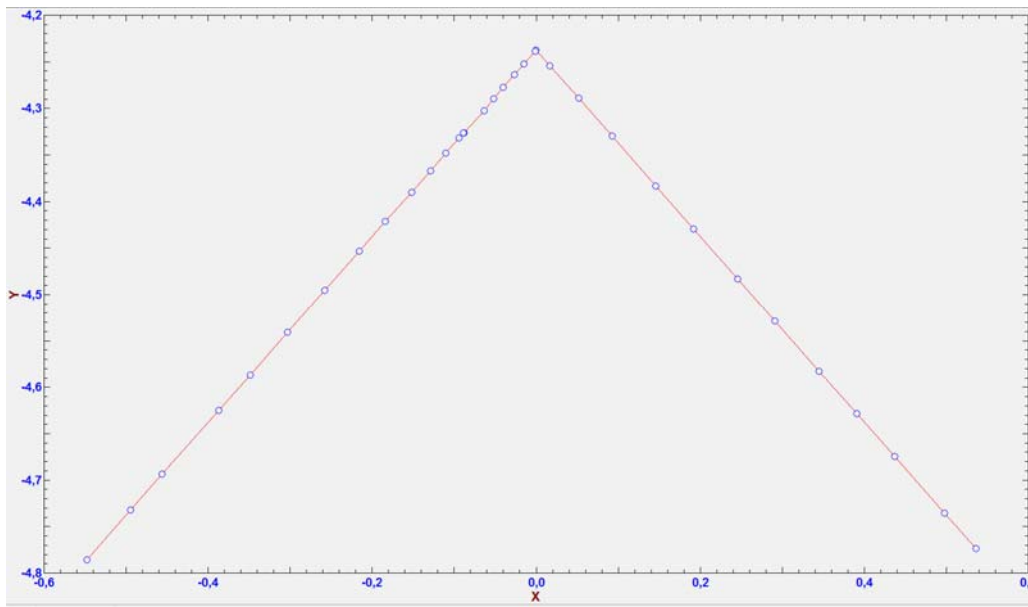
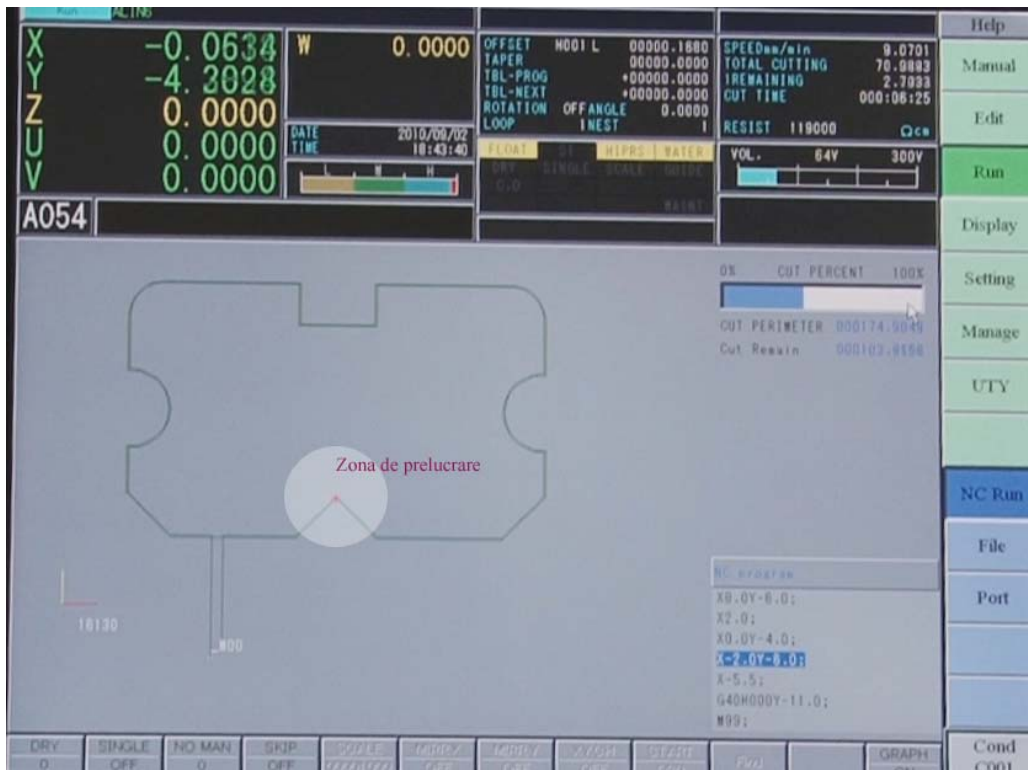


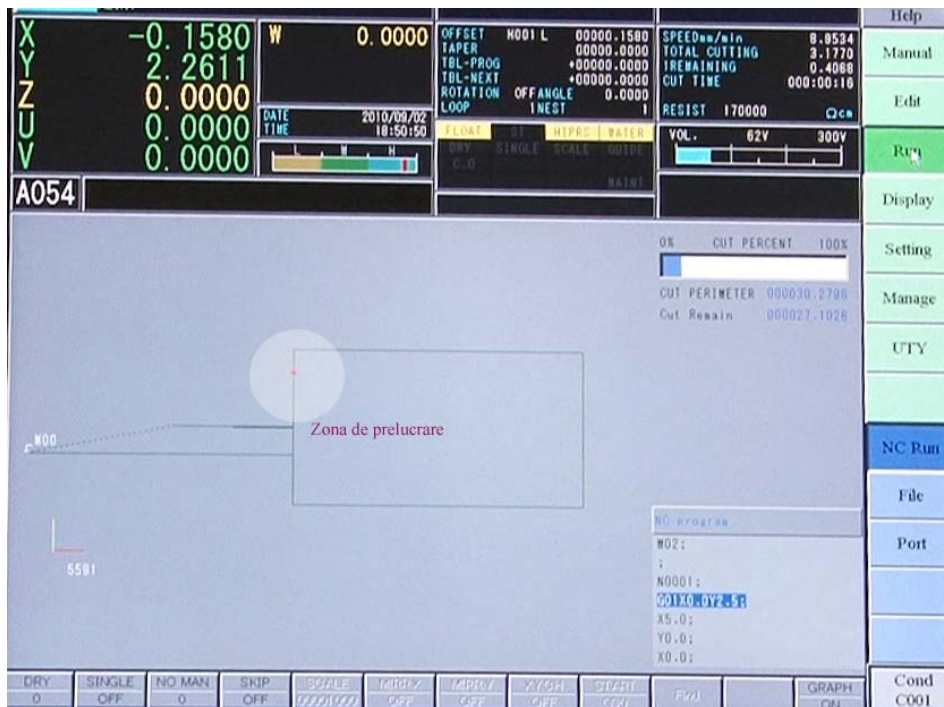
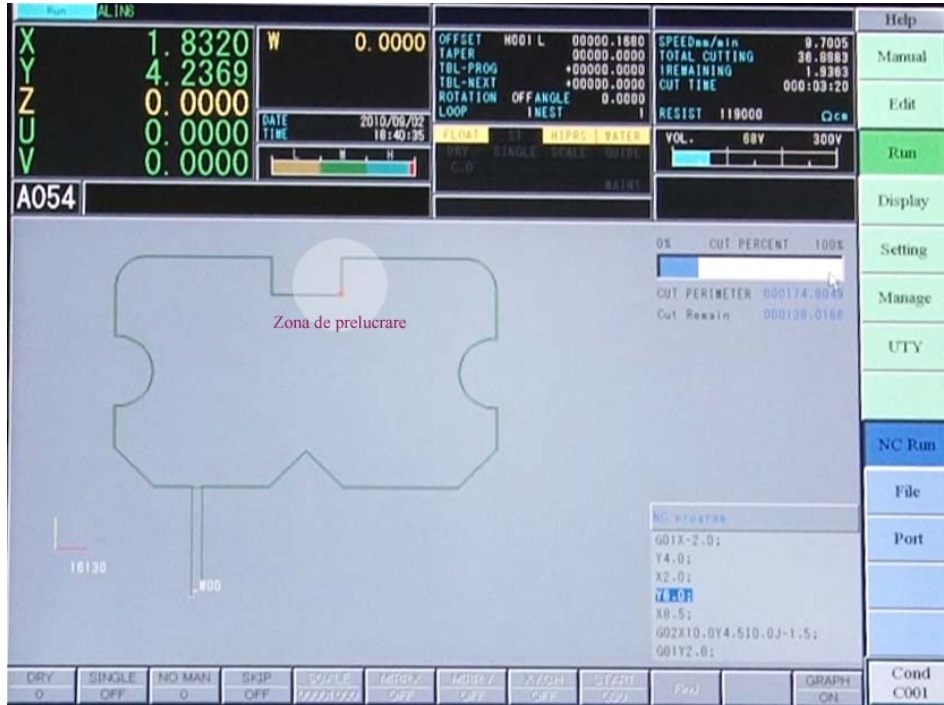
The screenshot shows a CNC control interface with the following data:

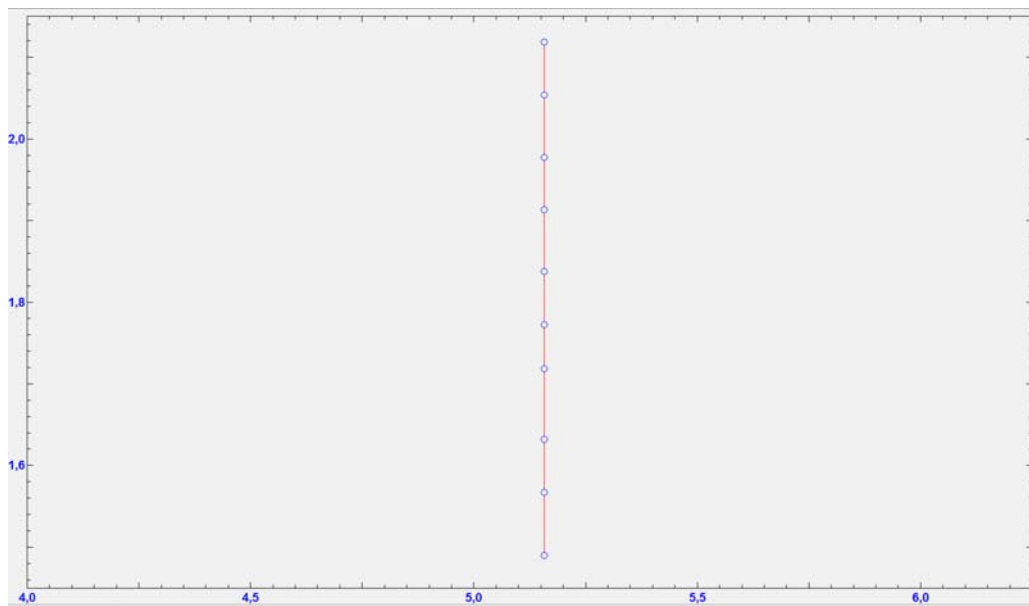
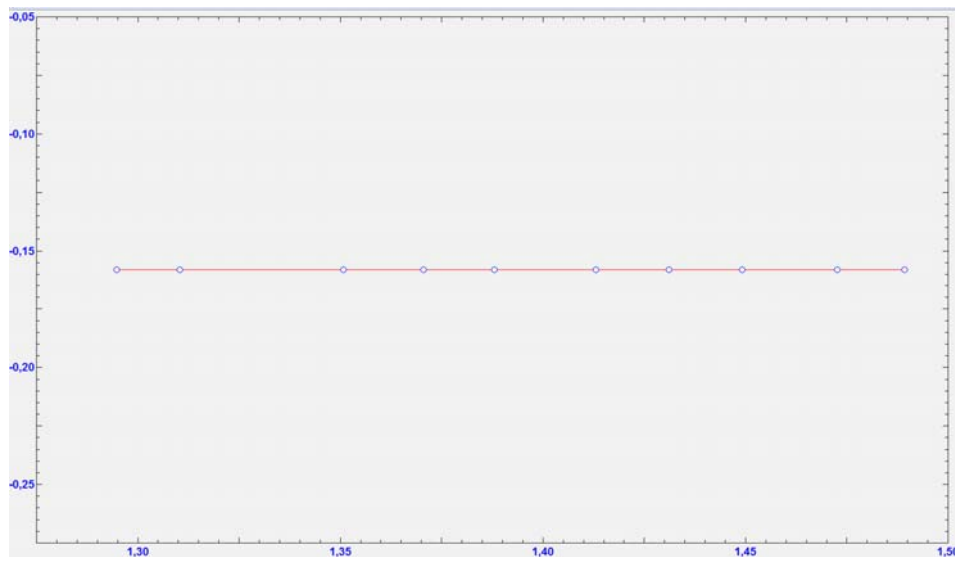
- Coordinates:** X: 15.0954, Y: 1.1274, Z: 0.0000, U: 0.0000, V: 0.0000
- Workpiece:** W 0.0000
- Machine Parameters:** OFFSET: 0000.1250, TAPER: 0000.0000, TBL-PROG: +0000.0000, TBL-NEXT: +0000.0000, ROTATION: OFFANGLE 0.0000, LOOP: 1
- Performance:** SPEED: 12.3143, TOTAL CUTTING: 31.2865, IREMAINING: 0.0271, CUT TIME: 000:02:36
- Material:** RESIST: 100000
- Power:** VOL: 82V / 300V
- Machine ID:** A054
- Graphical Display:** Shows a part with a red circle labeled "Zona de prelucrare" (machining zone).
- Machine Status:** DRY: 0, SINGLE: OFF, NO.MAN: 0, SKIP: OFF, PAUSE: 000000, TAPPR: OFF, MIRR: OFF, XZAP: OFF, DEPTH: 0.0, FIND: , GRAPH: ON
- Right Panel:** Includes buttons for Help, Manual, Edit, Run, Display, Setting, Manage, UTILITY, NC Run, File, Port, and Cond C001.
- Bottom Panel:** Shows a progress bar for "CUT PERCENT" (0% to 100%), "CUT PERIMETER: 000061.5148", and "Cut Remain: 000030.2403".

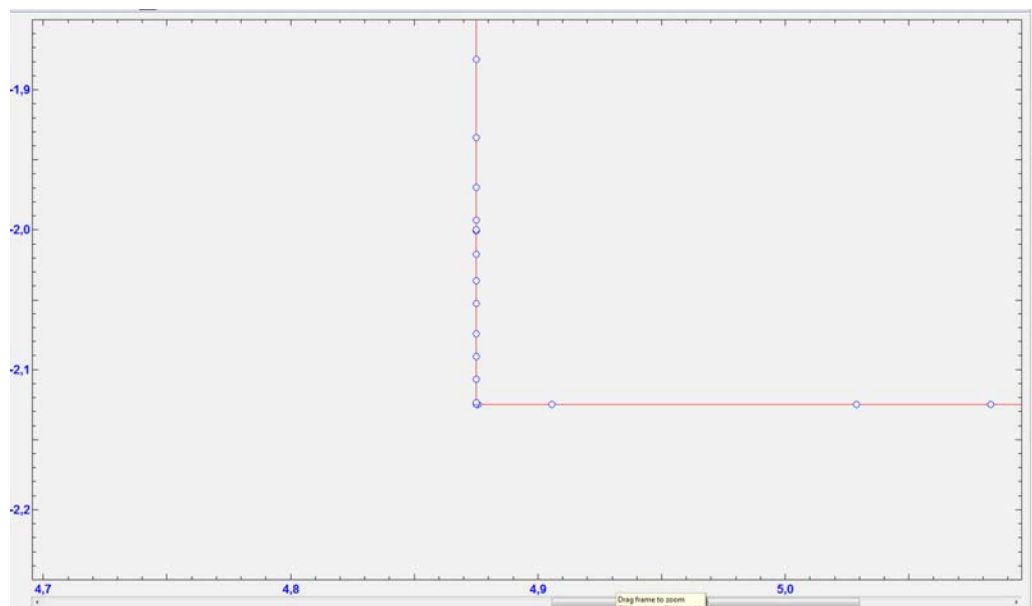
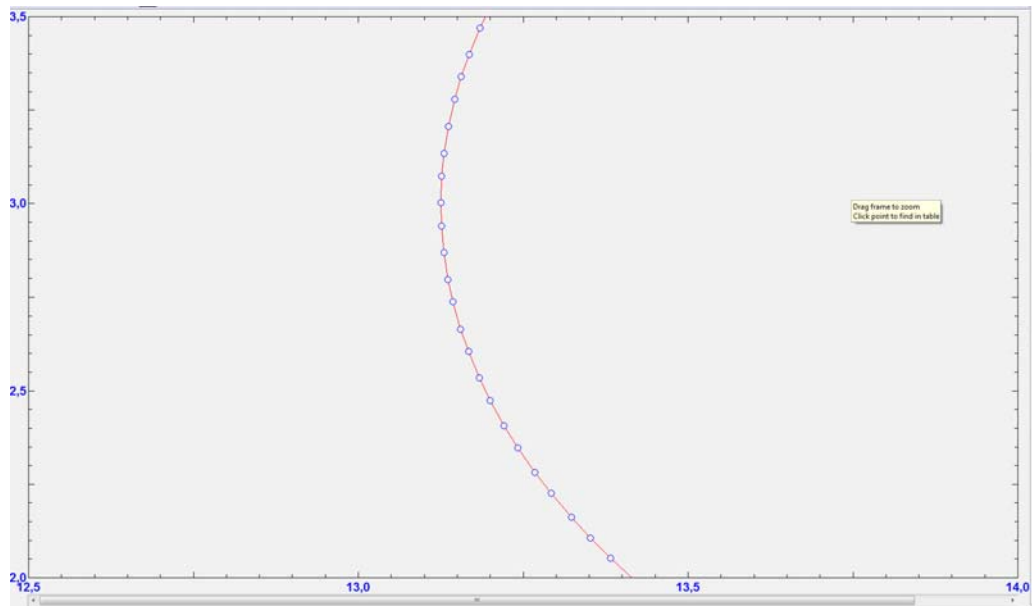






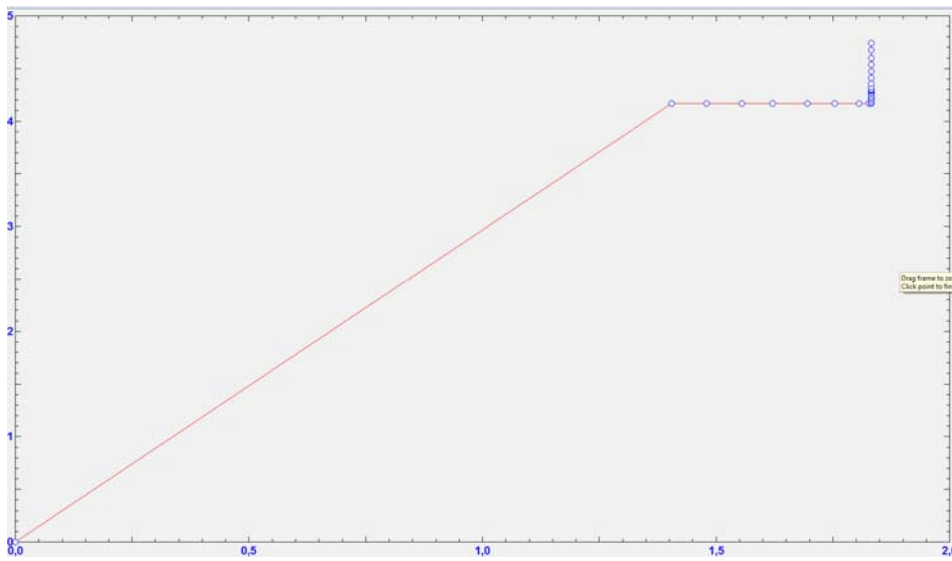


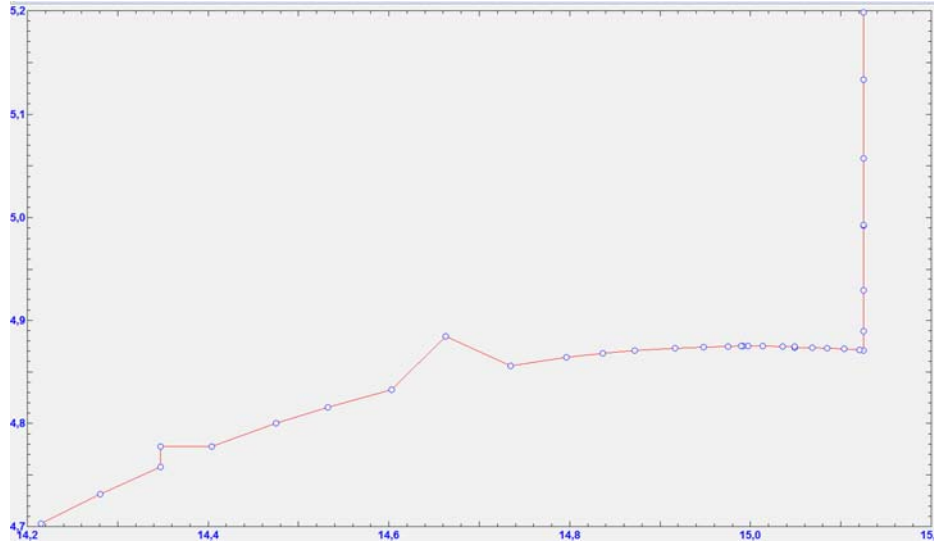




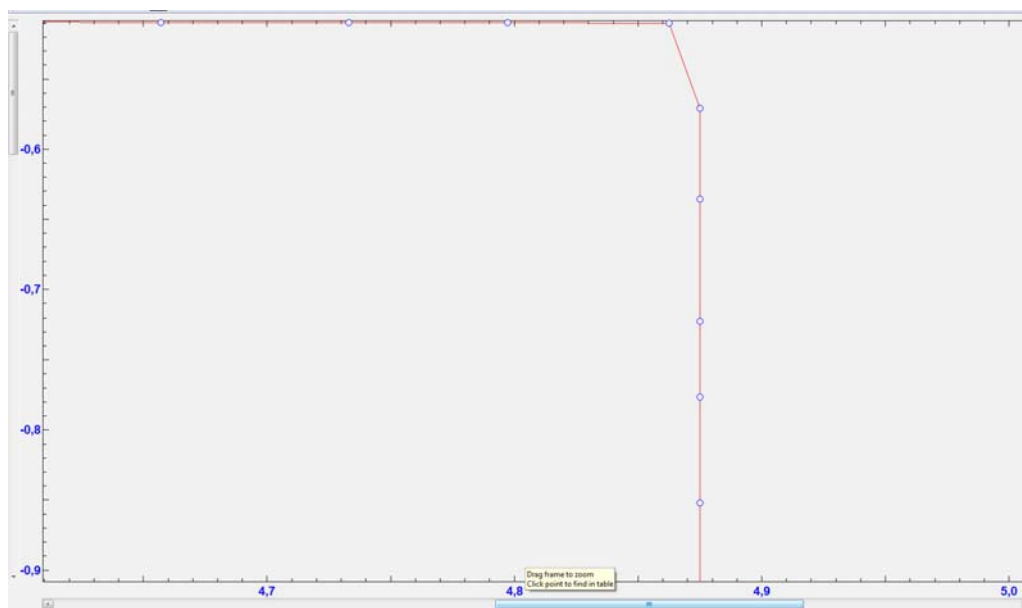
The screenshot displays a CNC control interface with the following sections:

- Top Left:** Coordinates X: 4.9499, Y: -2.1250, Z: 0.0000, U: 0.0000, V: 0.0000. W: 0.0000. DATE: 2010/08/02 18:23:48.
- Top Middle:** OFFSET: M01 L 0000.1250, TAPER: 0000.0000, TBL-PROG: +0000.0000, TBL-NEXT: +0000.0000, ROTATION: OFFANGLE 0.0000, LOOP: 1 NECT 1.
- Top Right:** SPEED_{m/min}: 12.0004, TOTAL CUTTING: 44.7058, IREMAINING: 0.0021, CUT TIME: 000:03:48, RESIST: 101000.
- Right Panel:** Buttons for Help, Manual, Edit, Run, Display, Setting, Manage, UTY, NC Run, File, Port, and Cond C001.
- Center:** A graphical workspace showing a part outline with a red dot and the text "Zona de prelucrare".
- Bottom Left:** A row of status buttons: DRY (0), SINGLE (OFF), NO MAN (0), SKIP (OFF), SWARE (00000000), MIRR-Z (OFF), MIRR-Y (OFF), SYOR (OFF), DIST (000), and GRAPH (OFF).
- Bottom Right:** NC program details: Y5-0; G03Y1.010.0J-2.0; G01Y-2.0; X5.0; Y-0.5; G40H000X0.0; M99;





X -0.1580 Y 2.2611 Z 0.0000 U 0.0000 V 0.0000		W 0.0000 DATE 2010/09/02 TIME 18:50:50	OFFSET W001 L 00000.1580 TAPER 00000.0000 TBL-PROG +00000.0000 TBL-NEXT +00000.0000 ROTATION OFF ANGLE 0.0000 LOOP I NEST 1	SPEEDm/min 0.0534 TOTAL CUTTING 3.1770 REMAINING 0.4068 CUT TIME 000:00:18 REGIST 170000	Help Manual Edit Run Display Setting Manage UTY NC Run File Port Cond C001
A054		FLUID OFF DRY SINGLE SCALE WATER C.O.	VOL. 62V 300V	OK CUT PERCENT 100% CUT PERIMETER 000030.2780 Cut Remain 000027.1028	
Zona de prelucrare					NO PROGRAM M02; ; M0001; G01 X0.0 Y0.0 Z0.0;
DRY 0 SINGLE OFF NO MAN 0 SKIP OFF SCALE () M001Z OFF M001Y OFF X15H OFF START (00)			Fwd GRAPH ON		



Modul de conectare prin intermediul optocuploarelor a intrărilor la microcontroller, folosit la interfațarea mașinii de prelucrat prin eroziune electrică cu fi

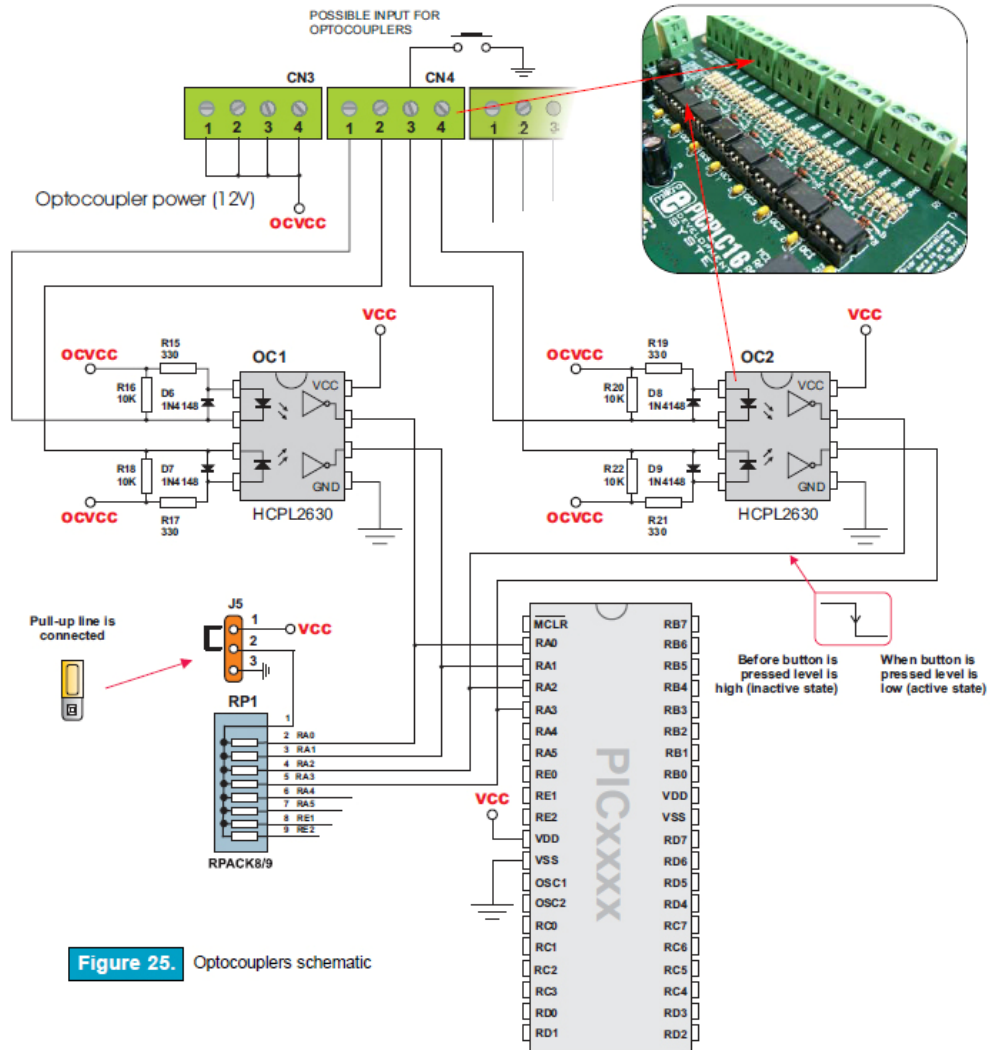
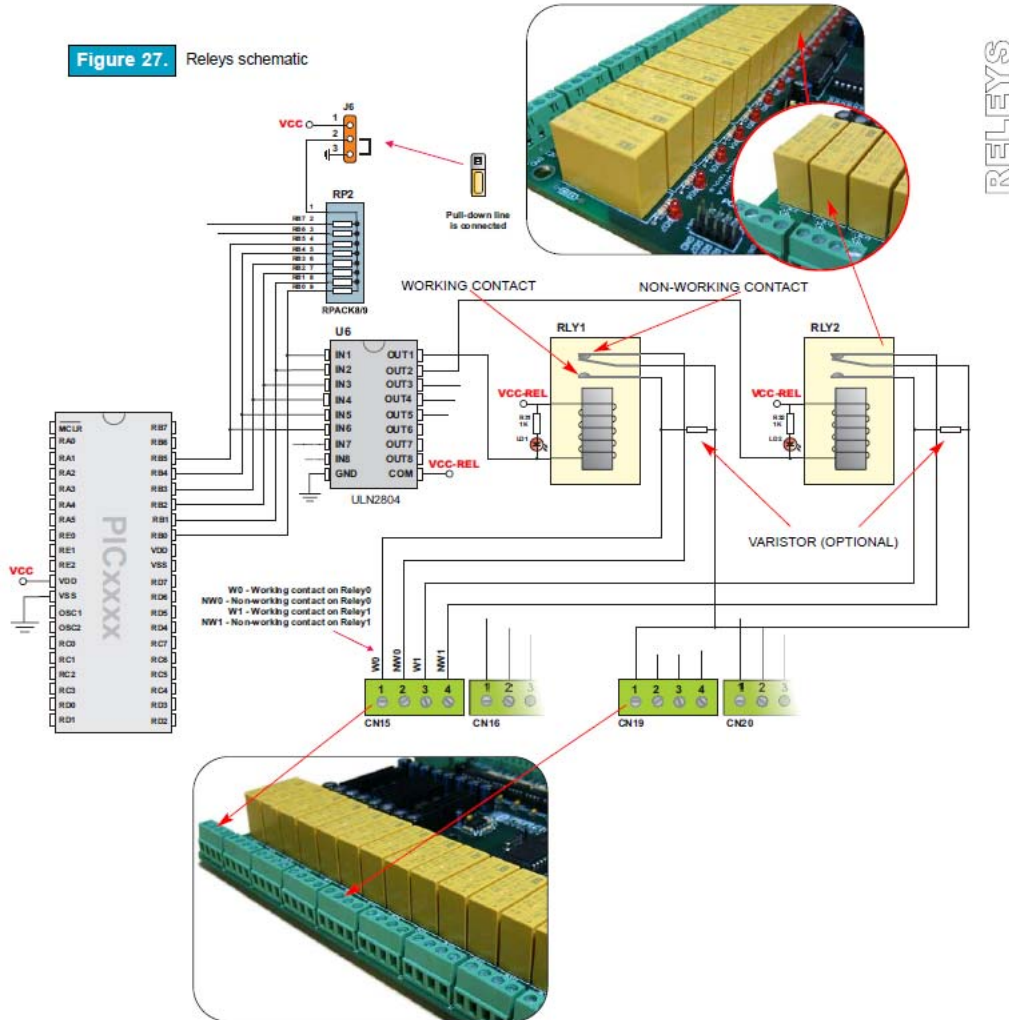


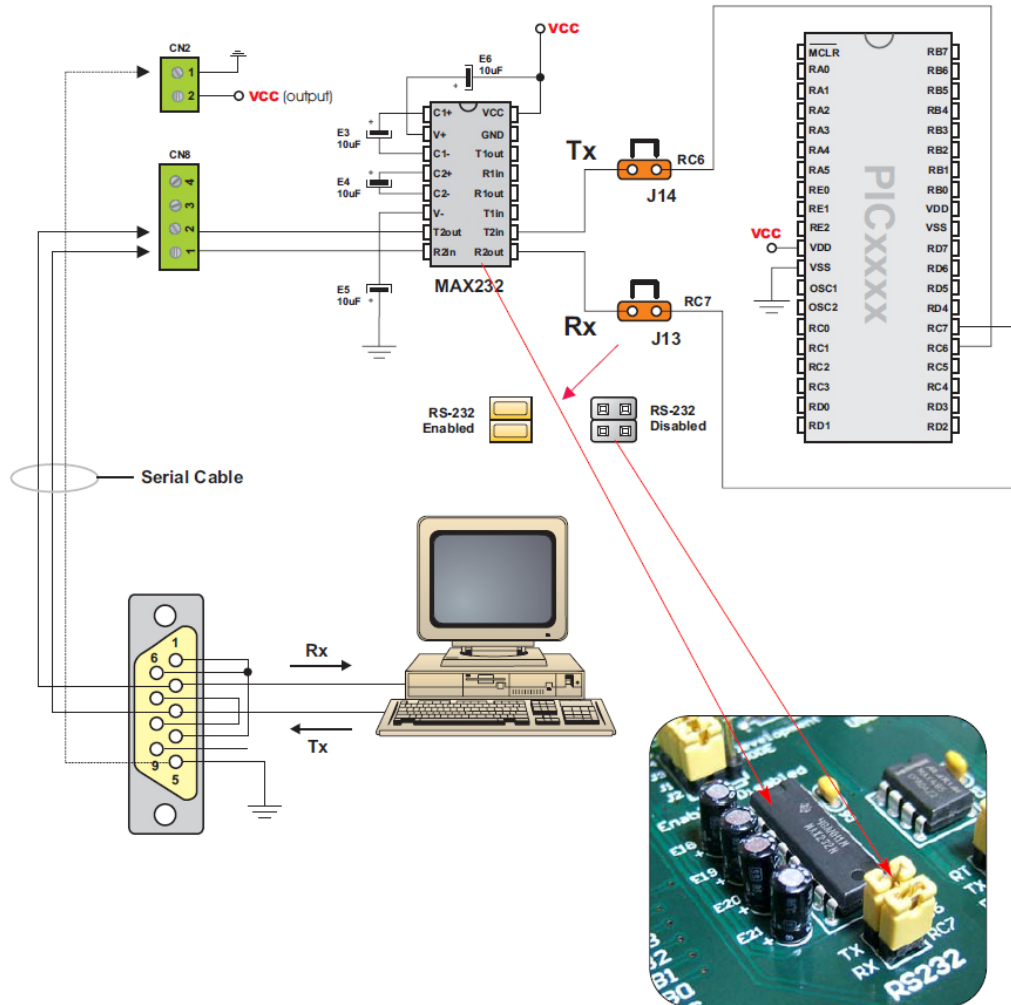
Figure 25. Optocouplers schematic

Modul de conectare prin intermediul releelor a ieșirilor la microcontroller, folosit la interfațarea mașinii de prelucrat prin eroziune electrică cu fi

Figure 27. Relays schematic

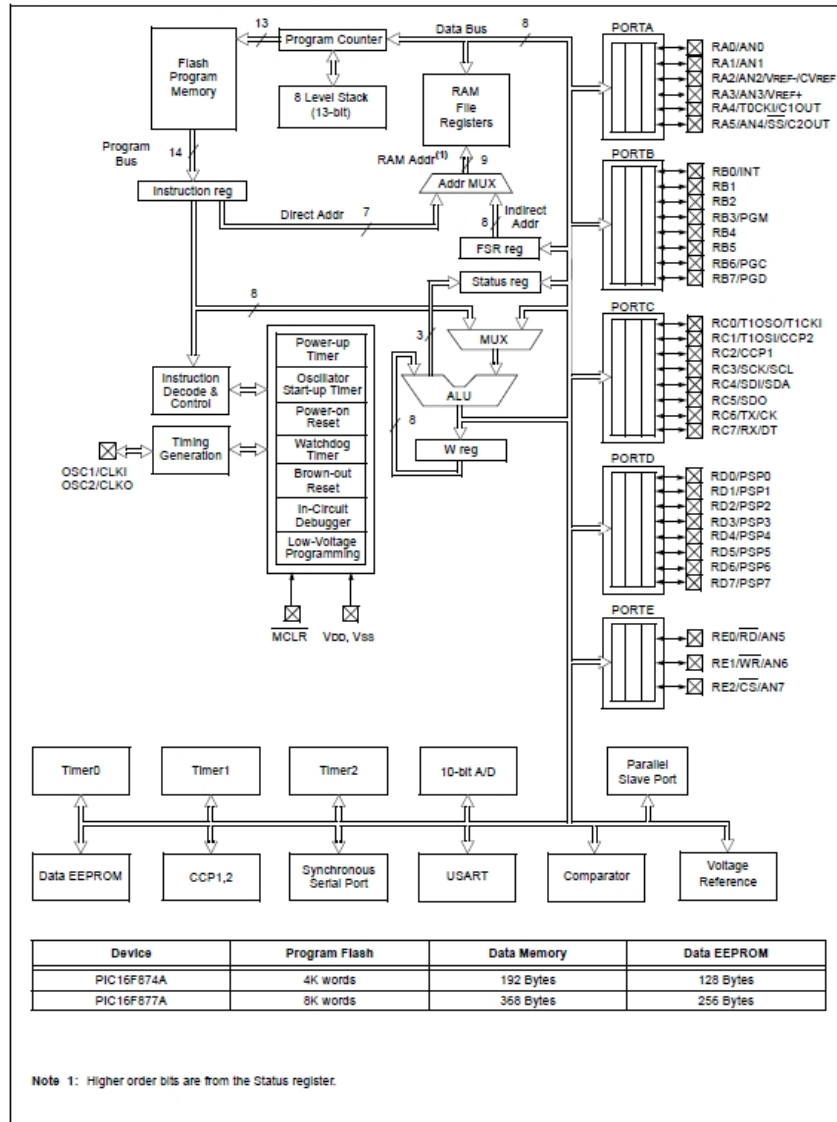


Modul de conectare a calculatorului prin interfața serială la placa de dezvoltare, model folosit la interfațarea mașinii de prelucrat prin eroziune electrică cu fi



PIC16F87XA

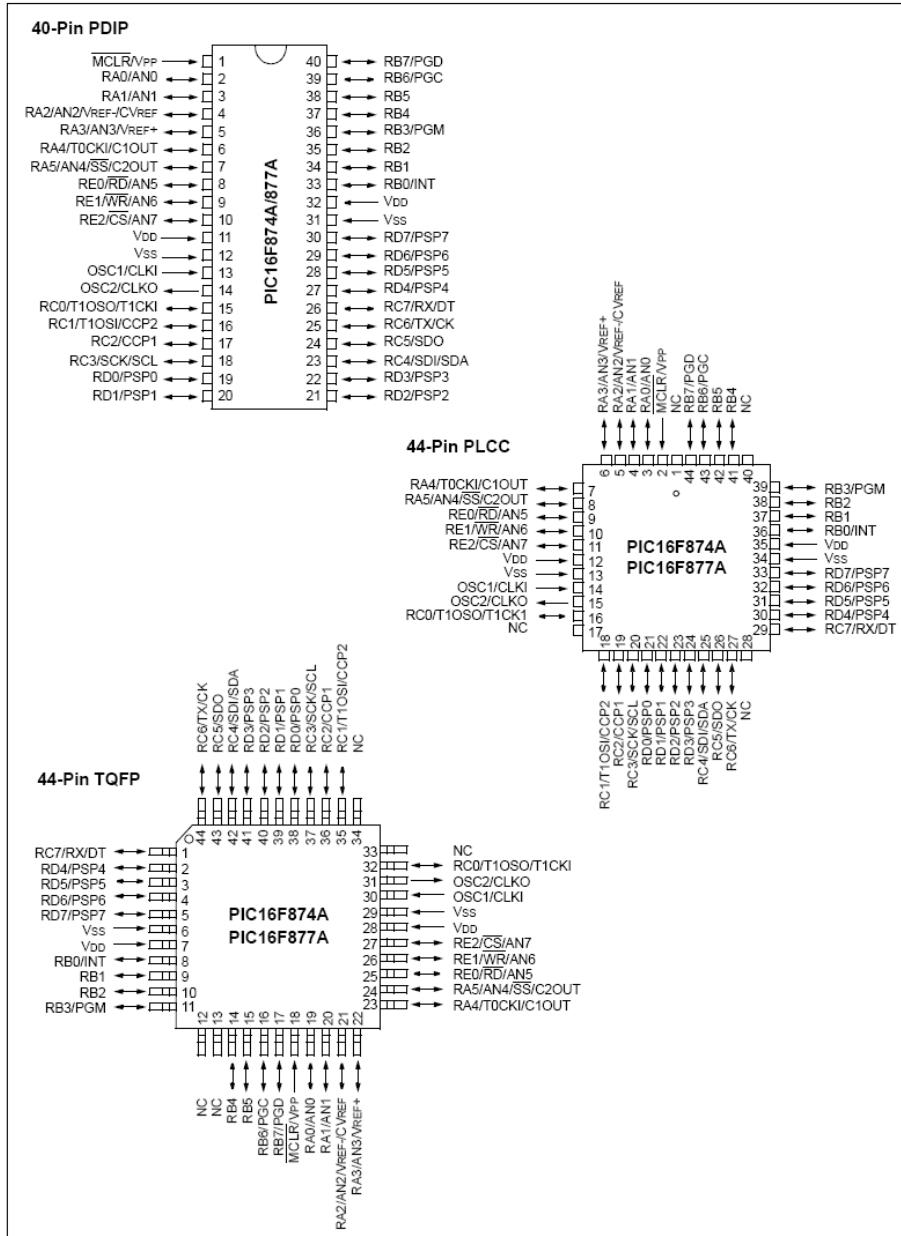
FIGURE 1-2: PIC16F874A/877A BLOCK DIAGRAM

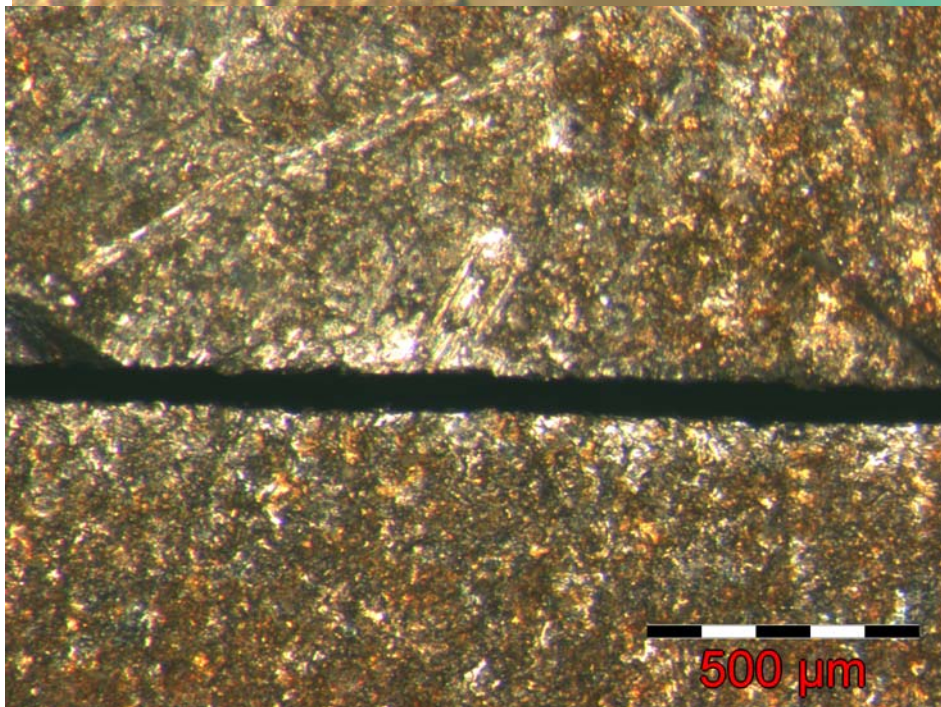
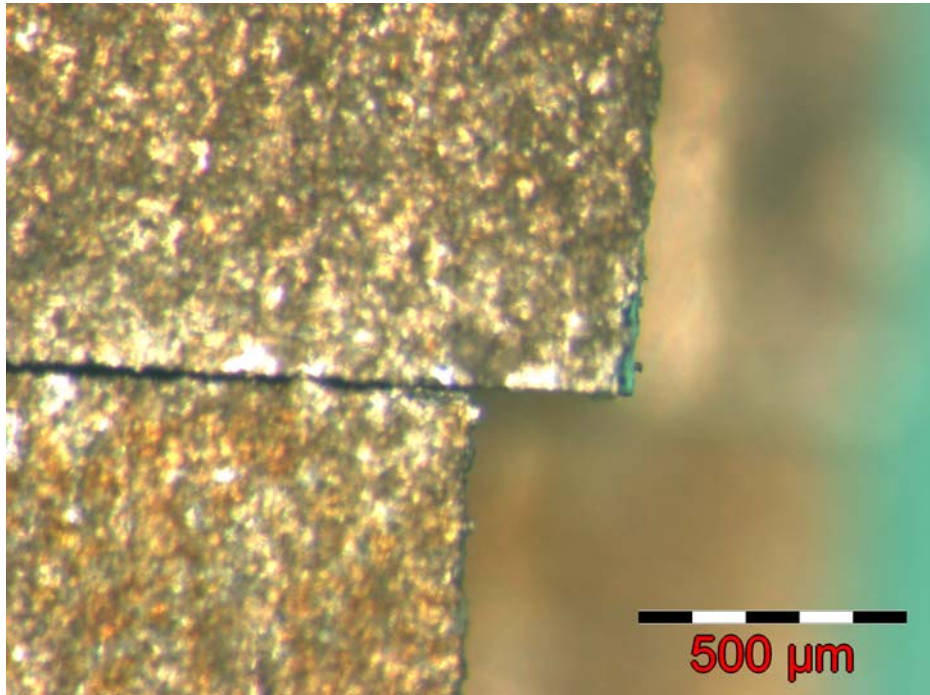


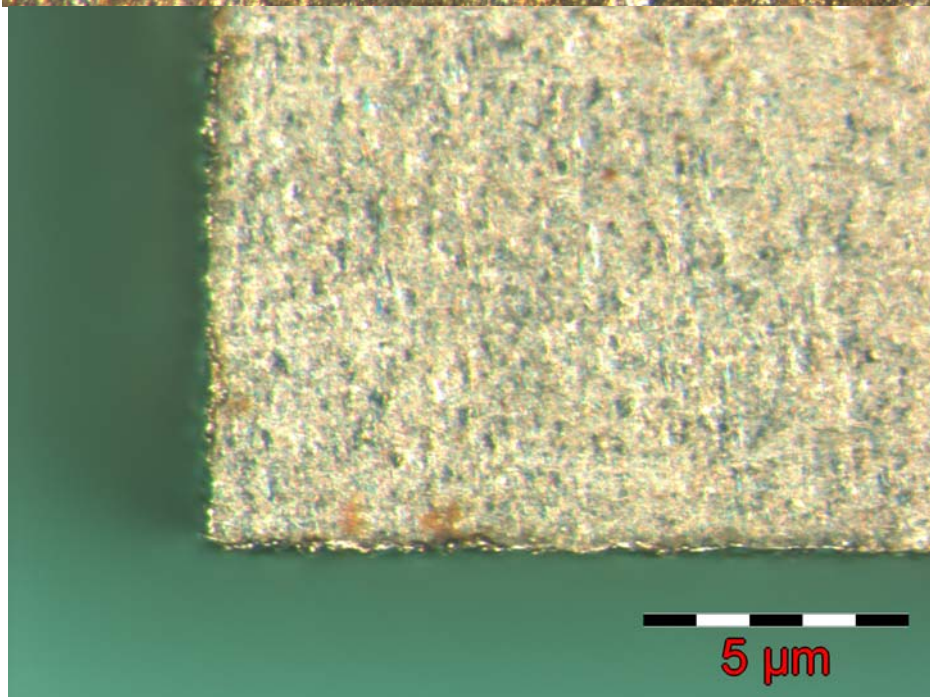
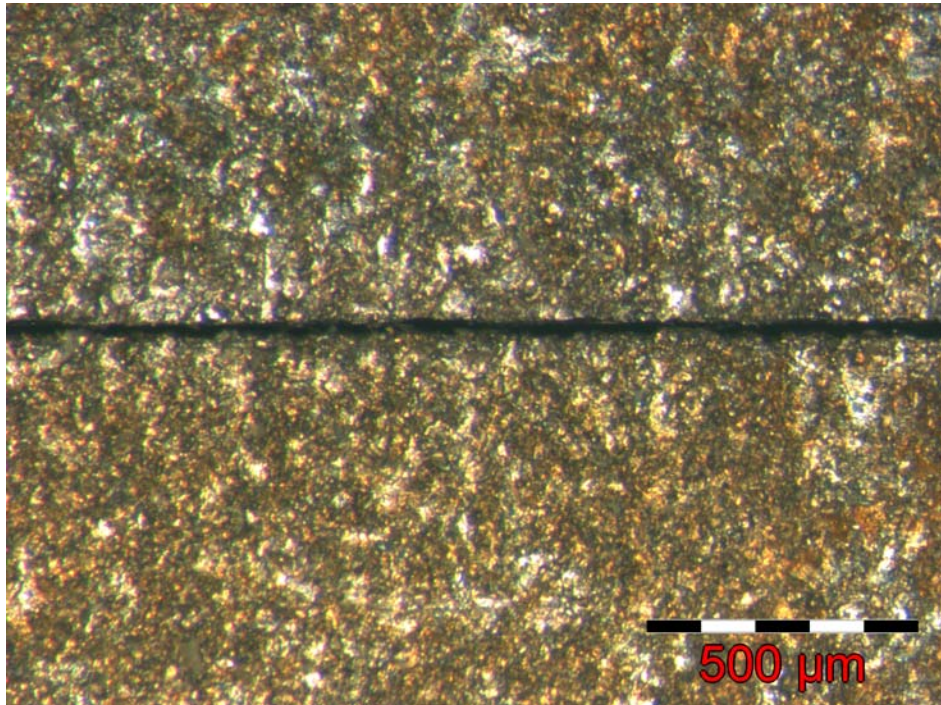
Schema logică a microcontrollerului PIC16F877A

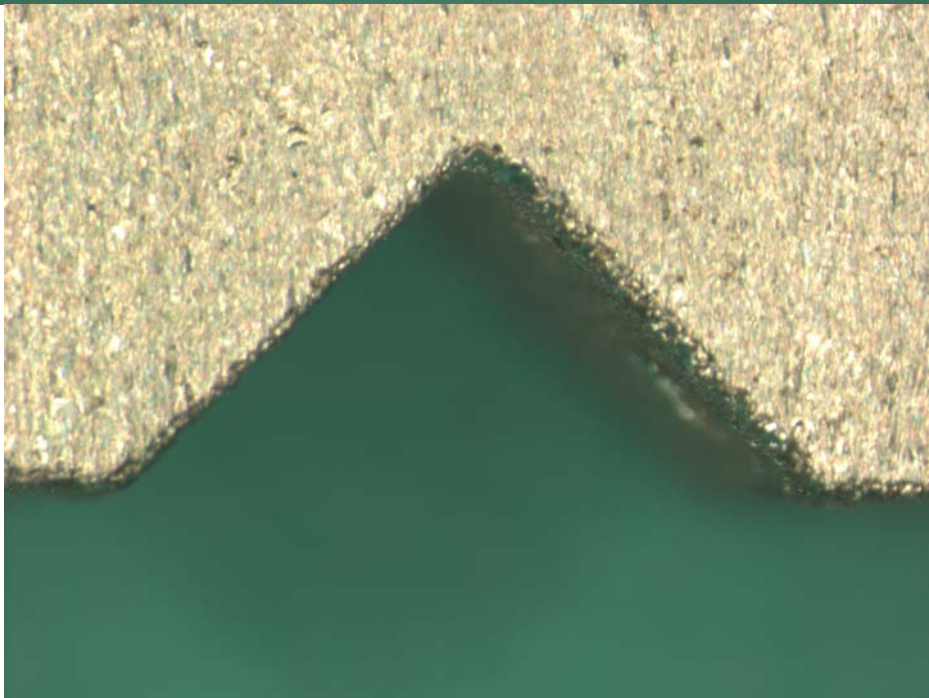
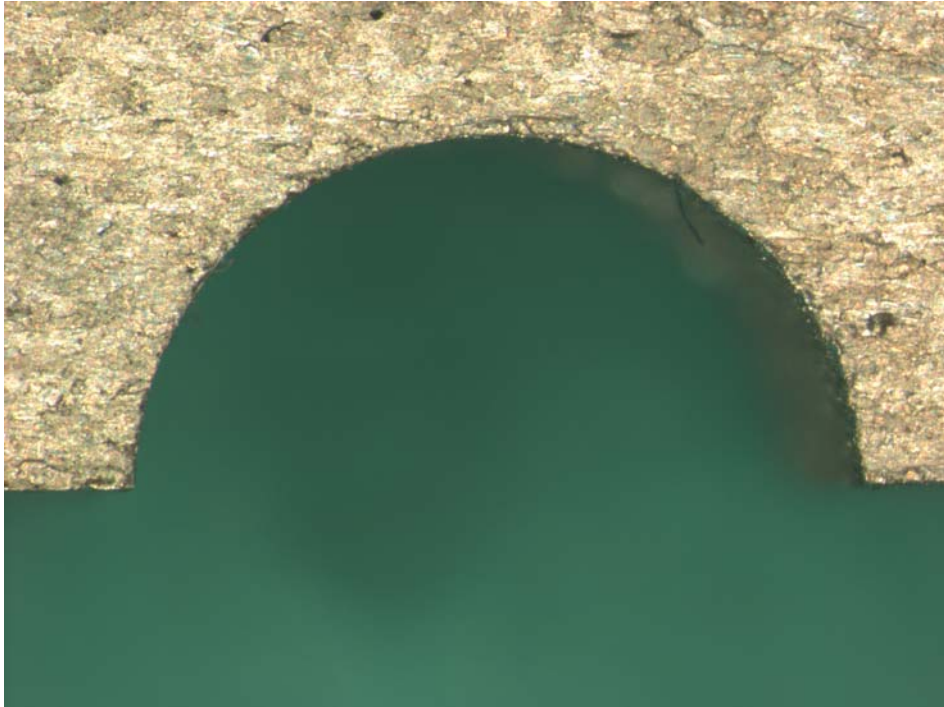
PIC16F87XA

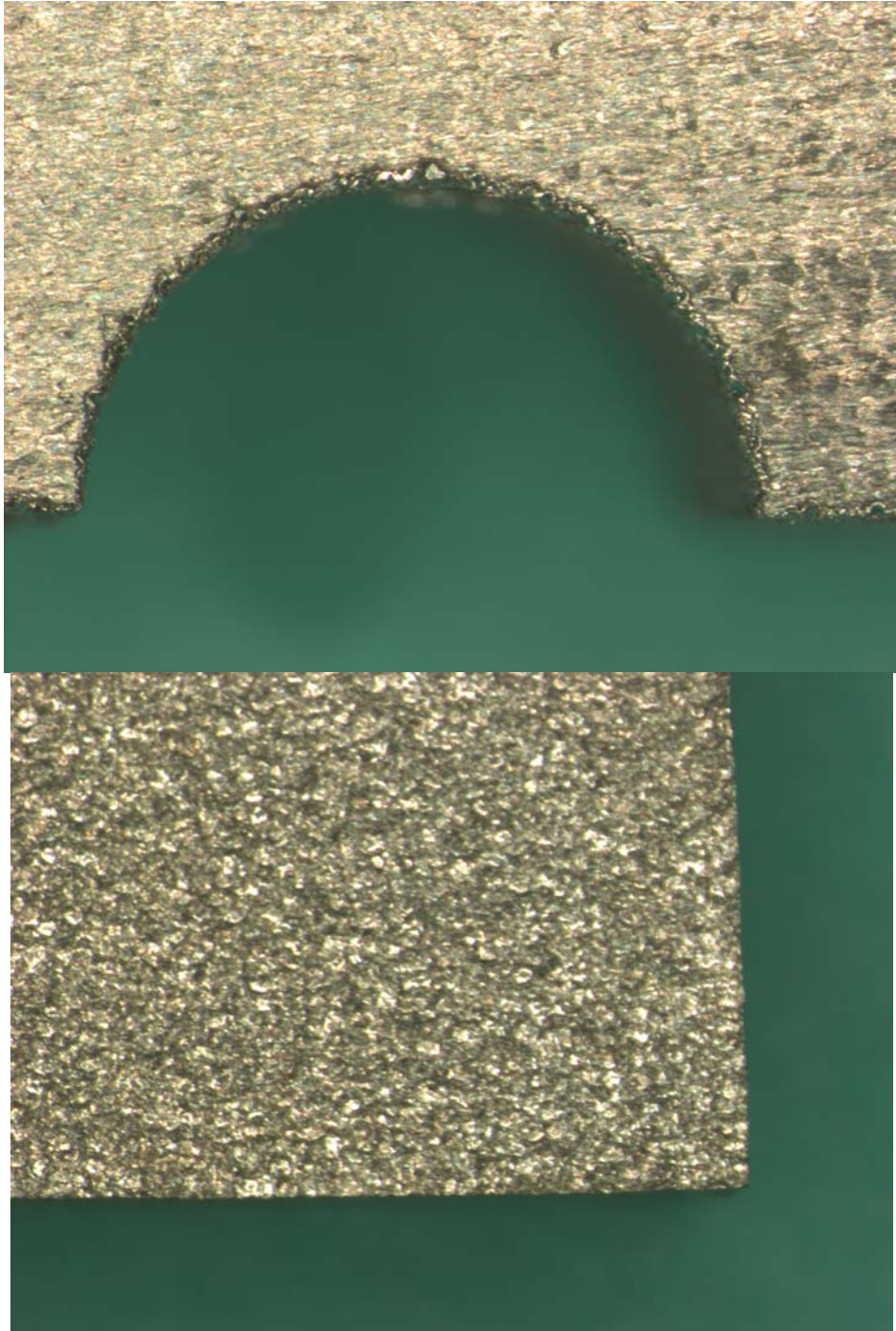
Pin Diagrams (Continued)



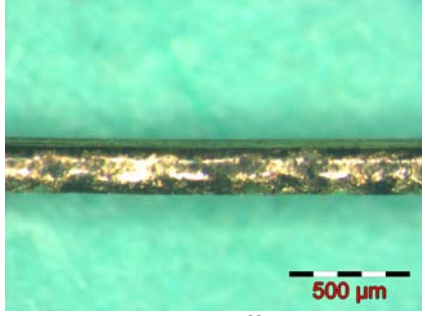
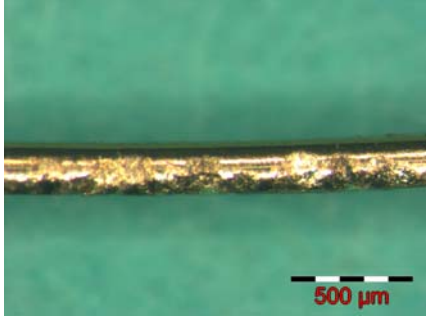
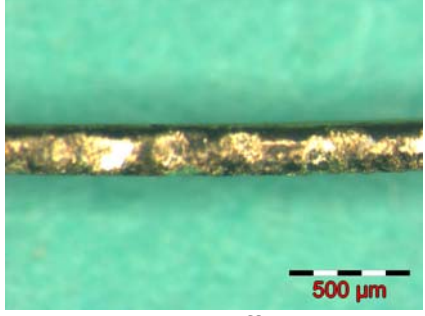
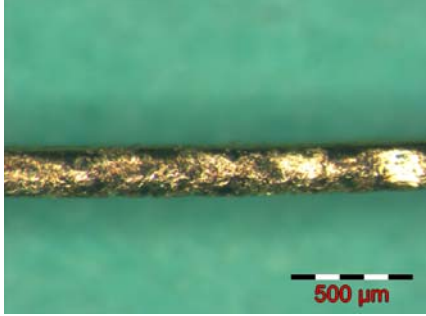
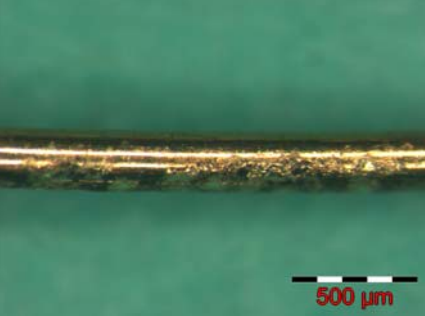
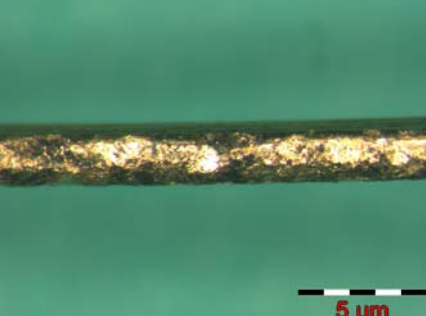
Aspecte prelucrate dimensional prin eroziune electrică cu fir

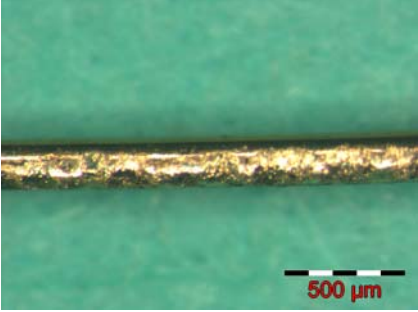
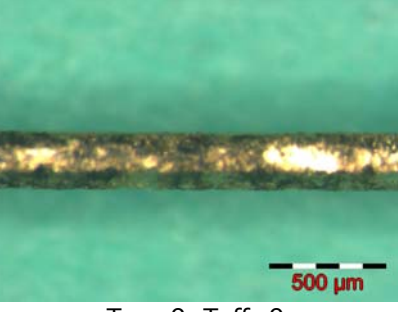
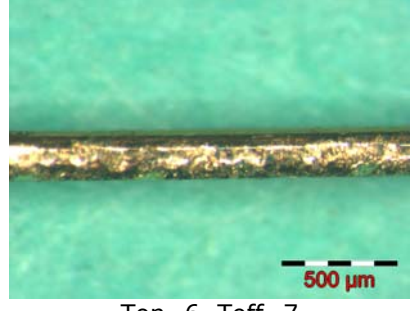

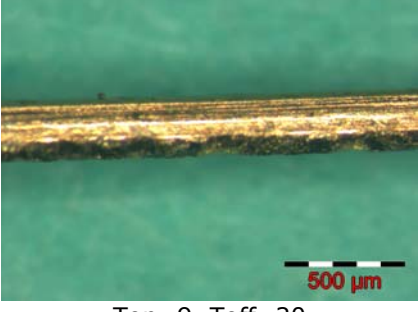
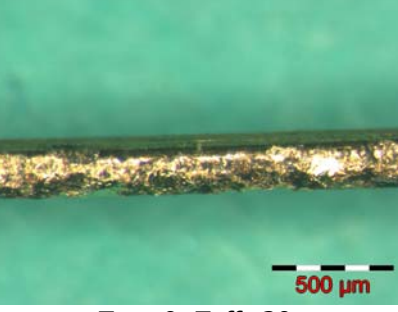





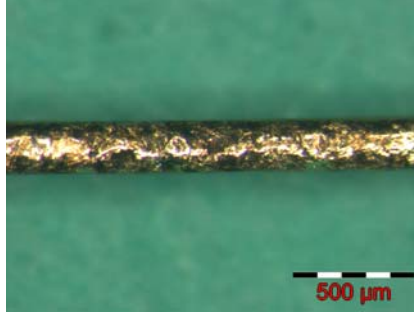
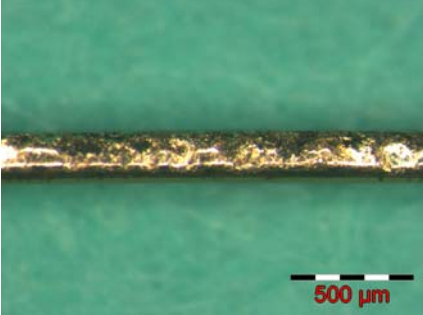


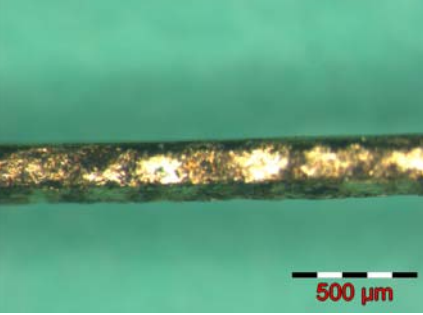



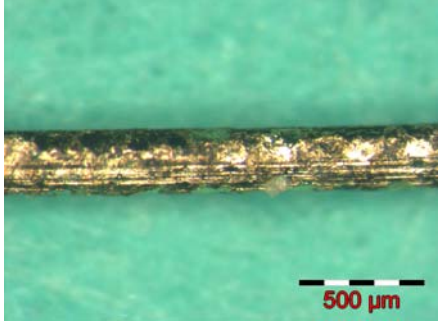
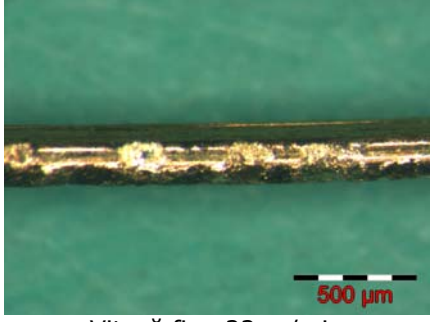
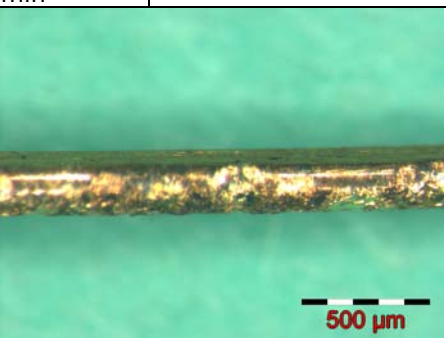
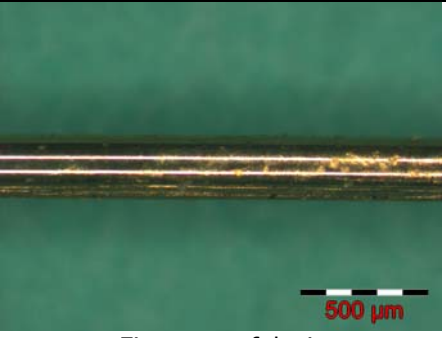


Aspecte ale firului uzat în urma prelucrărilor dimensionale prin eroziune electrică cu fir

Cazul a	Cazul b	Parametrii procesului
 <p align="center">Ton=3, Toff=15</p>	 <p align="center">Ton=5, Toff=15</p>	Viteză fir : 10 m/min Tensiune : 80V Material : Oţel
 <p align="center">Ton=7, Toff=15</p>	 <p align="center">Ton=9, Toff=15</p>	Viteză fir : 10 m/min Tensiune : 80V Material : Oţel
 <p align="center">Ton=3, Toff=9</p>	 <p align="center">Ton=5, Toff=9</p>	Viteză fir : 10 m/min Tensiune : 80V Material : Oţel

 <p data-bbox="395 719 580 741">Ton=7, Toff=9</p>	 <p data-bbox="847 719 1032 741">Ton=9, Toff=9</p>	<p data-bbox="1187 409 1318 584">Viteză fir : 10 m/min Tensiune : 80V Material : Oțel</p>
 <p data-bbox="395 1059 580 1081">Ton=6, Toff=7</p>	 <p data-bbox="847 1059 1032 1081">Ton=7 Toff=7</p>	<p data-bbox="1187 750 1318 925">Viteză fir : 10 m/min Tensiune : 80V Material : Oțel</p>
 <p data-bbox="395 1400 580 1422">Ton=9, Toff=20</p>	 <p data-bbox="847 1400 1032 1422">Ton=9, Toff=30</p>	<p data-bbox="1187 1090 1318 1265">Viteză fir : 10 m/min Tensiune : 80V Material : Oțel</p>
 <p data-bbox="427 1740 549 1762">Niv V = 1</p>	 <p data-bbox="879 1740 1000 1762">Niv V = 3</p>	<p data-bbox="1187 1431 1318 1606">Viteză fir : 10 m/min Ton=9, Toff=15 Material : Oțel</p>

 <p>Niv V = 5</p>	 <p>Niv V = 6</p>	<p>Viteză fir : 10 m/min Ton=9, Toff=15 Material : Oțel</p>
 <p>Niv V = 7</p>		<p>Viteză fir : 10 m/min Ton=9, Toff=15 Material : Oțel</p>
 <p>Viteză fir : 4 m/min</p>	 <p>Viteză fir : 7 m/min</p>	<p>Tensiune :80V Ton=9, Toff=15 Material : Oțel</p>
 <p>Viteză fir : 13 m/min</p>	 <p>Viteză fir : 16 m/min</p>	<p>Tensiune :80V Ton=9, Toff=15 Material : Oțel</p>

		Tensiune :80V Ton=9, Toff=15 Material : Oțel
 <p data-bbox="580 1061 1027 1151">Tensiune :80V, Viteză fir : 10 m/min Ton=9, Toff=15 Material : Aluminu</p>		
 <p data-bbox="692 1487 916 1507">Fir nou, nefolosit</p>		

Aspecte din activitatea de cercetare



