

MINISTERUL ÎNVĂȚĂMĂNTULUI
UNIVERSITATEA TEHNICĂ DIN TIMIȘOARA
FACULTATEA DE MECANICĂ

595.810
.13 F

ING. MIHAI CONSTANTIN OPREA

**CREȘTEREA CAPACITĂȚII PORTANTE TEHNOLOGICE
A ELECTRODULUI LA PRELUCRAREA
ELECTROEROZIVĂ CU ELECTROD FILIFORM**

TEZA PENTRU OBTINEREA TITLULUI ȘTIINȚIFIC DE DOCTOR INGINER

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC
PROF. DR. ING. ALEXANDRU NICHICI

1994

CUPRINS

<u>LISTA ABREVIERILOR SI SIMBOLURILOR</u>	p.	5
<u>INTRODUCERE</u>	p.	11
<u>1. STADIUL ACTUAL AL PRELUCRARIII PRIN EROZIUNE ELECTRICA</u>		
<u>CU ELECTROD FILIFORM (SINTEZA BIBLIOGRAFICA)</u>	p.	16
1.1. <u>Domenii de aplicare si performante</u>	p.	16
1.2. <u>Fenomene si procese fundamentale</u>	p.	19
1.2.1. <u>Strapungerea dielectricului</u>	p.	19
1.2.2. <u>Dezvoltarea spatial-temporala a</u>		
<u>canalului de plasma si a bulei de gaz in IT</u>	p.	23
1.2.3. <u>Transferul energiei descarcarii</u>		
<u>electrice in mediul ambiant (electrozi si</u>		
<u>lichid dielectric)</u>	p.	23
1.2.4. <u>Prelevarea de material</u>	p.	26
1.2.4.1. <u>Mecanismul prelevarii de</u>		
<u>material</u>	p.	26
1.2.4.2. <u>Prelevarea de material</u>		
<u>in cazul descarcarii singulare</u>	p.	27
1.2.4.3. <u>Prelevarea de material</u>		
<u>in cazul procesului electroeroziv integrat</u>	p.	30
1.2.5. <u>Transferul de masa intre electrozi</u>		
<u>prin intermediul LD</u>	p.	31
1.3. <u>Sisteme constructiv-tehnologice</u>	p.	32
1.3.1. <u>Electrodul filiform</u>	p.	33
1.3.2. <u>Aparatul de prelucrare</u>	p.	35
1.4. <u>Tehnologii de prelucrare</u>	p.	37
1.5. <u>Costul prelucrarii</u>	p.	40
1.6. <u>Directii actuale si tendinte de evolutie</u>		
<u>in cercetarea stiintifica si tehnologica</u>	p.	42
<u>2. CAPACITATEA PORTANTA A EF - ELEMENT</u>		
<u>CONSTITUTIV DETERMINANT AL CAPACITATII</u>		
<u>PORTANTE TEHNOLOGICE A PRELUCRARIII PRIN EEF</u>	p.	46
2.1. <u>Definitie, structura si functionalitate</u>	p.	46
2.2. <u>Solicitarile aplicate EF pe parcursul</u>		
<u>prelucrarii EEF</u>	p.	47
2.2.1. <u>Solicitari termice</u>	p.	49

2.2.2. Solicitari mecanice	p.	50
2.2.3. Solicitari electrice	p.	55
2.2.4. Concluzii	p.	56
3. <u>MODELAREA MATEMATICA A CAPACITATII PORTANTE A EF</u>	p.	58
3.1. <u>Capacitatea portanta termica</u>	p.	58
3.1.1. Modelarea matematica a uzarii EF	p.	58
3.1.2. Modelarea matematica a incalzirii EF	p.	63
3.1.2.1. Pierderi termice prin		
conductie	p.	64
3.1.2.2. Pierderi termice prin		
efectJoule-Lenz al curentului electric	p.	65
3.1.2.3. Efectul pelicular		
("Skin") al curentului electric	p.	68
3.1.3. Modelarea matematica a dilatarii EF	p.	69
3.1.4. Concluzii practice care reies din		
modelarea matematica a capacitatii portante		
termice a EF	p.	70
3.2. <u>Capacitatea portanta mecanica</u>	p.	72
3.2.1. Modelarea matematica a fortelor		
electrostatice	p.	72
3.2.1.1. Forte perpendiculare		
pe axa longitudinala a EF	p.	72
3.2.1.1.1. EF in afara fantei	p.	73
3.2.1.1.2. EF in fanta	p.	75
3.2.1.2. Forte in lungul axei		
longitudinale a EF	p.	78
3.2.2. Modelarea matematica a fortelor		
electromagnetice	p.	78
3.2.2.1. Materialul OP-amagnetic	p.	80
3.2.2.2. Materialul OP-feromagnetic	p.	81
3.2.2.2.1. EF in afara fantei	p.	81
3.2.2.2.2. EF in fanta	p.	81
3.2.2.3. Materialul OP - magnet		
permanent	p.	83
3.2.3. Modelarea matematica a fortelor		
produse de lichidul dielectric	p.	84
3.2.3.1. Forte hidrodinamice	p.	85
3.2.3.1.1. Forte in directia axei Oz	p.	85
3.2.3.1.2. Forte in directia axei Oy	p.	88
3.2.3.1.3. Forte in directia axei Ox	p.	89

3.2.3.2. Forte hidrostactice	p. 91
3.2.4. Modelarea matematica a fortelor produse de presiunea coloanei de plasma a descarcarii electrice	p. 93
3.2.5. Modelarea matematica a fortelor produse de presiunea bulei de gaz asociata descarcarii electrice	p. 94
3.2.6. Aprecieri asupra fortelor produse la expulzarea produsilor de eroziune de pe suprafata EF	p. 97
3.2.7. Concluzii practice care reies din modelarea matematica a fortelor care solicita EF	p. 97
3.3. Deplasari si deformatii ale EF pe parcursul prelucrarii EEF	p. 100
3.3.1. Modelarea matematica a modificarilor de pozitie ale EF	p. 100
3.3.1.1. Deformarea axei EF pe directia Oy	p. 102
3.3.1.1.1. Deformarea statica	p. 102
3.3.1.1.2. Deformarea dinamica	p. 107
3.3.1.2. Deformarea axei EF pe directia Ox	p. 110
3.3.2. Aprecieri privind modificarea prin deformare plastica locala a geometriei EF	p. 112
3.3.3. Exemplu de calcul al deformarii axei EF (caz particular)	p. 113
3.3.4. Concluzii practice care reies din modelarea matematica a deplasarii si deformarii EF	p. 116
3.4. <u>Concluzii generale referitoare la capacitatea portanta a EF</u>	p. 116
4. <u>CERCETARI EXPERIMENTALE</u>	p. 120
4.1. <u>Descrierea standurilor pentru experimentare; marimi masurate si calculate</u>	p. 120
4.1.1. Standul experimental 1	p. 121
4.1.1.1. <i>Prezentare generala</i>	p. 121
4.1.1.2. <i>Subsistemele electrod-OP</i> <i>integrate in standul 1</i>	p. 128
4.1.2. Standul experimental 2	p. 131

4.1.3. Standul experimental 3	p. 133
4.2. <u>Programe experimentale efectuate</u>	p. 134
4.2.1. Prezentare generala	p. 134
4.2.2. Programul experimental E1	p. 136
4.2.3. Programul experimental E2	p. 137
4.2.4. Programul experimental E3	p. 140
4.2.5. Programul experimental E4	p. 145
4.2.6. Programul experimental E5	p. 156
4.2.7. Programul experimental E6	p. 158
4.2.8. Programul experimental E7	p. 159
4.2.9. Programul experimental E8	p. 161
4.2.10. Programul experimental E9	p. 164
4.2.11. Programul experimental E10	p. 166
4.2.12. Programul experimental E11	p. 167
4.2.13. Programul experimental E12	p. 170
4.2.14. Concluzii practice care reies din cercetarile experimentale	p. 176
5. <u>CONCLUZII FINALE SI CONTRIBUTII ORIGINALE</u>	p. 177
<u>ANEXE</u>	p. 182
<u>BIBLIOGRAFIE</u>	p. 183

LISTA ABREVIERILOR SI SIMBOLURILOR

A ampermetru
A [C] factor dependent de parametrii impulsului de curent
A [A/m^2] constanta universala
A [m^2] aria sectiunii transversale a bulei de gaz
A [$m^{-1}s^{-1}$] coeficient
 A_1, A_2, A_3, A_4 coeficienti de integrare
 A_i [m^2] aria sectiunii transversale initiale a EF
 A_f [m^2] aria sectiunii transversale finale a EF
a [m] cota
 a_1 [m] cota
 a_2 [m] cota
a(s) [m/s^2] acceleratie
B [m/s] coeficient
B [T] inductie magnetica
b [m] cota
 b_1 [m] cota
 b_2 [m] cota
C contact electric
C [F] capacitate
C [m/s] coeficient
CE cronometru electric
c [m/s] viteza de propagare a undelor
c [$J/(kg K)$] caldura specifica
c [-] coeficient de rezistenta
 c_o [m^3/J] cifra Bauer
D duza pentru introducerea LD in IT
DM marca germana
 d_o este diametrul EF
 $d_{o\ ech}$ [m] diametrul echivalent al EF uzat
E electrod
E [N/m^2] modul de elasticitate
EEF eroziune electrica cu electrod filiform
EEM eroziune electrica cu electrod masiv
EF electrod filiform
 E_i [V] potentialul de ionizare
 E_s [V/m] rigiditate dielectrica
e [-] baza logaritmului natural
F [N] forta de tensionare mecanica la intindere a EF

F_{em} [N] forta electromagnetica
 F_{es} [N] forta electrostatica
 F_c [N] forta datorata gazului
 F_h [N] forta hidrostatica, hidrodinamica
 F_L [N] forta Lorentz
 F_n [N] forta medie din coloana de plasma
 f [Hz] frecventa impulsurilor de tensiune
 f_o [Hz] frecventa proprie de oscilatie
 f_i [Hz] frecventa impulsurilor de curent
 f_i [s^{-1}] frecventa medie a impulsurilor de lucru (practic)
 f_p [Hz] frecventa minima a impulsurilor de curent pentru care
 apare efectul "Skin"
 f_s [Hz] frecventa Strouhal
 G ghidaj al EF
 g [m/s^2] acceleratie gravitationala
 h [m] inaltimea OP
 h_r [m] inaltime de ridicare
 I [m^2] moment de inertie
 I_b [A] curentul descarcarii
 I_{ef} [A] curent efectiv
 I_{eff} [A] curent efectiv final
 I_{efi} [A] curent efectiv initial
 I_{efm} [A] curent efectiv maxim
 I_n [A] curent mediu
 IT interstitiu tehnologic
 $I <$ releu de curent minim
 i [-] ordinul armonicii
 i [A] curent momentan
 i_{e+} [A/m^2] densitate de curent ionic
 i_{e-} [A/m^2] densitate de curent electronic
 j [A/m^2] densitate de curent
 j_o [A/m^2] densitatea de curent la suprafata unui conductor
 k [J/K] constanta lui Boltzman
 K_s [-] coeficient de umplere a impulsurilor normale
 K_t [-] coeficient de umplere a impulsurilor de tensiune
 LD lichid dielectric
 l [m] distanta intre ghidajele EF
 l_{EF} [m] lungimea unui esantion de EF
 M [kg/s] debit masic de gaz
 m [kg] masa gazului provenit din LD

m_{EF} [kg] este masa portiunii de EF aflata in IT
 m_{EFF} [kg] este masa finala a EF
 m_{EFi} [kg] este masa initiala a EF
 m_{OPr} [kg] este masa finala a OP
 m_{OPi} [kg] este masa initiala a OP
 n [Ns/m] coeficient de amortizare a vibratiilor
OP obiect de prelucrat
 P [kg²K/s⁵] criteriul Palatnik
 p [%] ponderea numarului relativ al impulsurilor de curent in
frecventa impulsurilor de tensiune
 p_o [N/m²] presiunea normala
 p_o [N/m²] presiunea in sectiunea transversala a coloanei de
plasma, in axa
 p_c [N/m²] presiunea gazului din bula
 p_a [N/m²] presiunea atmosferica momentana
 p_m [N/m²] presiunea medie in sectiunea transversala a coloanei
de plasma
 p_R [N/m²] presiunea in sectiunea transversala a coloanei de
plasma, la periferie
 p_r [N/m²] presiunea curenta in sectiunea transversala a coloanei
de plasma
 Q debitul apei la intrarea in IT [m/s]
 Q_v [J/mm³] densitate volumica de caldura
 Q_u [mm_s/min] debitul uzarii
 Q_i [m/s] debitul apei la intrarea in IT pe la partea inferioara
 Q_p [mm³/min] productivitate
 Q_{rel} [%] uzura relativa
 Q_s [m/s] debitul apei la intrarea in IT pe la partea superioara
 Q_{sp} [mm³/imp], [mm²/imp] productivitate specifica pe impuls
normal
 Q'_u [mm_s/min] debitul uzarii
 q [C] sarcina electronului
 $q_b(z,t)$ [N/m] componenta variabila a sarcinii perturbatoare
distribuite
 q_s [N/m] componenta constanta a sarcinii perturbatoare
distribuite
 $q_{ech s}$ [N/m] forta statica echivalenta
 q_{em} [N/m] sarcina distribuita, provenita din forta
electromagnetica
 q_{es} [N/m] sarcina distribuita provenita din forta electrostatica

q_c [N/m] sarcina distribuita provenita din actiunea gazului
 q_h [N/m] sarcina distribuita provenita din forta forta hidrodinamica
 q_n [N/m] sarcina distribuita datorata actiunii plasmei
 $q_x(z,t)$ sarcina perturbatoare distribuita pe directia Ox
 $q_y(z,t)$ sarcina perturbatoare distribuita pe directia Oy
 R [J/(mol K)] constanta gazelor perfecte
 R [m] raza maxima
 R [Ω] rezistenta electrica
 R_r [%] reducere a rezistentei electrice
 R_a [μm] abaterea medie aritmetica a profilului de rugozitate
 $R_{p_{0,2}}$ [N/m^2] limita de curgere
 r [m] raza craterului elementar de uzura
 r [m] raza EF
 r [m] raza curenta
 r_b [m] raza bulei de gaz asociate descarcarii
 r_c [m] raza craterului elementar de deformare plastica
 Re [-] numarul Reynolds
 S [-] numarul Strouhal
 S [m^2] aria sectiunii transversale a EF
 s [m] grosimea IT
 T [K] temperatura curenta
 T [s] perioada impulsurilor de tensiune
 T_0 [K] temperatura normala
 T_a [K] temperatura ambianta
 T_i [s] perioada medie a impulsurilor de curent
 T_T [K] temperatura de topire
 T_v [K] temperatura de vaporizare
 TCT trusa de curent si tensiune
 t [s] timp curent
 t [s] timpul de sedere in IT
 t_a [s] durata amorsarii
 t_b [s] durata existentei bulei de gaz asociate descarcarii
 t_{i1} [s] durata impulsului de curent normal
 t_{j-1} [s] timp pana la ruperea EF
 t_p [s] timp de pauza intre impulsurile de tensiune
 t_r [s] timp de racire
 U [V] tensiune
 U_a [V] tensiune de amorsare
 U_b [V] tensiunea descarcarii

U_s [V] tensiune de strapungere
 u [V] tensiune
 u_a [V] caderea de tensiune anodica
 u_k [V] caderea de tensiune catodica
 V [m³] volumul gazului
 v [m/s] viteza, perpendiculara pe axa EF, de iesire a LD din IT
 v_A [m/s] viteza de introducere a LD in IT
 v_c [m/s] viteza de deplasare axiala a EF
 v_r [m/s] viteza relativa EF-OP
 W [J/min] puterea impulsurilor normale
 W_a [J/m²] densitatea de energie in zona anodului
 W_k [J/m²] densitatea de energie in zona catodului
 $W'_i/2$ [J] fractiunea energiei a impulsului care produce uzura
 $W''_i/2$ [J] fractiunea energiei a impulsului care incalzeste EF
 prin conductie
 x [m] deplasare curenta
 x [m] latimea fantei
 x [m/s] viteza de deformare a axei EF
 $x(z,t)$ deformarea axei EF pe directia Ox
 x_n [m] amplitudinea vibratiilor Strouchal
 x_n [m] latimea fantei la mijlocul distantei intre ghidajele EF
 $x_{n,x}$ [m] amplitudinea vibratiilor Strouchal
 $x_{n,d}$ [m] latimea medie (pe inaltimea OP) a fantei
 y [m] deplasare curenta
 $y(z,t)$ deformarea axei EF pe directia Oy
 y_1 [m] cota
 $y_b(z,t)$ [m] componenta dinamica a deformarii axei longitudinale
 a EF pe directia Oy
 $y_s(z)$ [m] componenta statica a deformarii axei longitudinale
 a EF pe directia Oy
 y_n [m] deformarea axei longitudinale a EF pe directia Oy la
 mijlocul distantei intre ghidajele EF
 y_s [m] sageata deformarii statice a axei EF
 z [m] cota
 α [K⁻¹] coeficient de dilatate termica liniara
 β [-] unghi curent
 Δp [N/m²] pierdere de presiune hidraulica
 ϵ_0 [F/m] permitivitatea vidului
 ϵ_r [-] permitivitate relativa
 θ [°C] temperatura curenta

Θ_r [$^{\circ}\text{C}$] temperatura de topire
 Θ_a [$^{\circ}\text{C}$] temperatura ambienta
 Θ_{ap} [$^{\circ}\text{C}$] temperatura apei
 Θ_f [$^{\circ}\text{C}$] temperatura finala
 Θ'_f [$^{\circ}\text{C}$] temperatura finala
 Θ''_f [$^{\circ}\text{C}$] temperatura finala
 κ [S/m] conductivitate electrica
 λ [J/(m.s)] conductibilitatea termica
 λ_r [J/kg] caldura latentă de topire
 λ_v [J/kg] caldura latentă de vaporizare
 μ_o [N/A²] permeabilitatea magnetica a vidului
 μ_g [-] masa molară a gazului provenit din apa
 μ_r [-] permeabilitate magnetica relativa
 ν [m²/s] vascozitatea cinematică a apei
 ξ [N/m] tensiunea superficială a apei
 ρ [kg/m³] densitatea materialului EF
 ρ_o [kg/m³] densitatea gazului în condiții normale
 ρ_{op} [kg/m³] densitatea materialului OP
 ρ_a [kg/m³] densitatea apei
 ρ_{e1} rezistivitatea electrică [Ωm]
 ρ_g [kg/m³] densitatea gazului
 σ [N/mm²] efort unitar la tractiune
 Φ [V] potentialul de iesire a electronului
 $\Phi(f, R, s)$ [-] factor caracteristic efectului de proximitate
 φ [-] unghi de defazaj electric
 χ [-] exponent adiabatic
 ω [s⁻¹] pulsatiile impulsurilor
 ω_o [s⁻¹] pulsatie proprie
 ∇p [N] gradient de presiune

INTRODUCERE

Generarea suprafetelor tehnologice in procesul prelucrării prin eroziune electrică cu electrod filiform (EEF) este rezultatul cumulat al descărcărilor electrice în impuls dezvoltate într-un lichid dielectric, LD, între un electrod filiform, EF și obiectul de prelucrat, OP și al deplasării relative între EF și OP cu o viteză \bar{v}_r [m/s], corelate cu procesele dinamice de activare energetică, prelevare, dezactivare energetică și îndepărtare de material din interstițiul tehnologic, IT (fig.1).

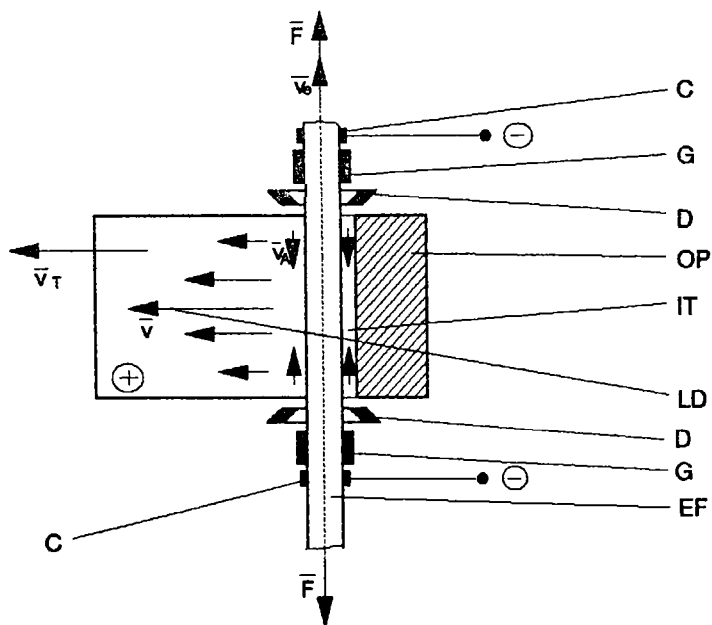


Fig.1. Spațiul de lucru elementar și conexiunile sale substantiale și energetice cu sistemul tehnologic la prelucrarea prin eroziune electrică cu electrod filiform.

EF este trecut prin două ghidaje, G, confecționate din safir artificial, un material cu rezistență la uzură și rigiditate mari. EF este tensionat axial cu o forță F [N] care îi asigură rectilinitatea și se deplasează în direcția axei sale longitudinale, pentru compensarea propriei uzuri cu viteza \bar{v}_e [m/s], corelată cu intensitatea aceluși proces. Energia electromagnetică este adusă

in impulsuri la EF prin intermediul a doua contacte electrice, C, iar LD este (de obicei) injectat in IT prin una sau doua duze, D, cu viteza \bar{v}_1 [m/s], parasindu-l cu o viteza aleatoare, simbolizata in fig.1 cu \bar{v} [m/s] [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8]. Ca mediu de lucru se utilizeaza, la scara industriala, apa demineralizata si deionizata, in ultimul timp utilizandu-se, numai experimental, apa normala [9R.jurn].

Procedeul de prelucrare EEF, aparat relativ tarziu fata de procedeul de prelucrare prin eroziune electrica cu electrod masiv, EEM [3], are o aplicabilitate limitata fata de acesta, datorita faptului ca generarea suprafetei se poate face numai prin riglare. In domeniul sau de aplicabilitate EEF ofera insa avantaje nete fata de EEM, din care a provenit, prin reducerea la limita inferioara a volumului electrodului, in corelare cu adoptarea unei forme si unui mod de sustinere a sa adecvate.

Privind istoric inceputurile procedurii EEF, se poate afirma ca aparitia sa a avut ca scop evitarea prelucrarii intregului deseu provenit din OP [11], asa cum se petrecea in cazul prelucrarii EEM (fig.2), fapt care consuma timp si energie. O solutie intermediara, care a contribuit la reducerea timpului si consumului de energie necesare prelucrarii a fost utilizarea, in locul electrodului masiv, a unui electrod tubular, de suprafata laterala exterioara identica cu suprafata laterala a celui masiv.

Necesitatea economisirii cat mai drastice impunea micsorarea la limita a grosimii peretelui tubular, dar limita fizica era suficient de departata de limita ideala (zero), datorita, in principal, rigiditatii scazute a electrodului. Rigiditatea, factor important in asigurarea conservarii in timpul prelucrarii EEM a formei si dimensiunilor electrodului, are prin aceasta (la prelucrare cu copierea formei electrodului) o importanta majora in obtinerea preciziei. Cu cat electrodul are sectiunea transversala pe directia de avans mai mica, cu atat efectele uzurii asupra micsorarii rigiditatii sale sunt mai vizibile. Acest fapt conducea, in timpul prelucrarii cu electrozi tubulari cu pereti subtiri (care trebuiau totusi sa aibe o lungime limitata superior, pentru a avea o rigiditate acceptabila), la o frecventa mare de schimbare a electrozilor uzati.

In tendinta de micsorare si mai accentuata a cantitatii de material erodat din OP, dar cu obtinerea unor indicatori tehnologici performanti, electrodul tubular cu pereti relativ subtiri a fost

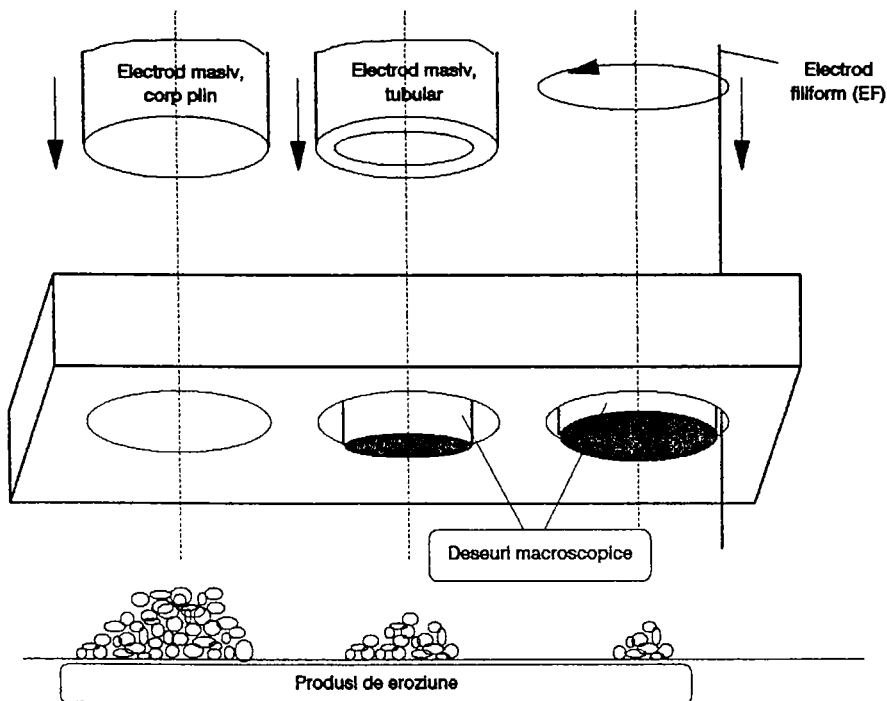


Fig.2. Prelucrarea unor orificii identice prin EEM si EEF.

inlocuit, pentru prima data la scara industrială in anul 1969 [3], cu un electrod filiform care a introdus o concepie noua in prelucrarea prin eroziune electrica: generarea combinata a suprafetelor tehnologice prin mijloace erozive si cinematice, cu multiplicarea corespunzatoare a axelor dupa care se poate efectua deplasarea relativa EF-OP (fig.2). Pe de alta parte, tocmai grosimea EF (mai mica decat grosimea peretelui electrodului tubular) si forma sa (corp plin, de obicei cilindru de lungime mare), deci rigiditatea sa mica, au facut posibila stocarea EF de lungime teoretic infinita pe o bobina, de unde partea sa uzata este inlocuita in mod continuu, dupa ce in prealabil i se confera forma necesara in timpul prelucrării (de bara rectilinie) de catre blocul mecanic al aparatului de prelucrare prin EEF.

Deci, in cazul prelucrării EEF, rigiditatea electrodului, jucand un rol mai putin important decat in cazul prelucrării prin EEM cu electrod tubular, a fost permisa micșorarea cantitatii de

material erodat din OP, prin micșorarea grosimii electrodului, în condițiile unei îmbunătățiri semnificative a preciziei de prelucrare.

Diminuarea volumului și respectiv masei EF, corelată cu lipsa de rigiditate intrinsecă a acestuia, pune însă în discuție eficiența cantitativă realizabilă a procesului electroeroziv.

În acest context, devine critică stabilitatea spațial-temporală a sistemului tehnologic de prelucrare, în general și stabilitatea geometrică, substanțială și funcțională a EF, în particular. Consecința previzibilă și reală a stărilor critice de instabilitate este deriva sistemului tehnologic către rapoarte productivitate/calitate a suprafețelor prelucrate nefavorabile și, la limită, chiar întreruperea procesului electroeroziv prin distrugerea locală a EF.

Cele de mai sus justifică și argumentează oportunitatea introducerii, definirii și evaluării unui concept original de "capacitate portantă tehnologică" a prelucrării prin eroziune electrică cu electrod filiform, ca o caracteristică comportamentală și, în același timp, ca o măsură a potențialului tehnologic real al prelucrării EEF, în condiții date. Așa cum se va vedea în continuare, componenta EF a acestei capacități portante globale reprezintă unul din obiectivele prioritare de studiu ale prezentei teze de doctorat.

Faptul că generarea suprafețelor prin EEF nu se poate face prin "copierea formei electrodului" în OP, ci prin realizarea unei mișcări relative (în general) după mai multe direcții în spațiu între acestia, a condus la dezvoltarea unor aparate de prelucrare prin EEF capabile să asigure o cinematică complexă: 3 până la 5 axe, cu posibilitatea comandării înclinării axei longitudinale a electrodului în raport cu suprafața de așezare a piesei.

Din momentul impunerii la scară industrială a procedurii, acesta s-a dezvoltat continuu, în contextul evoluției cunoștințelor fenomenologice și al creșterii performanțelor în domeniile mecanicii fine și microelectronicii. Istoricul prelucrării prin EEF conține câteva date de referință [3], [10]:

-1969 -primul aparat de prelucrare prin EEF, fabricat industrial,

-1976 -primul aparat cu cap de lucru deplasabil pe 3 axe,

-1978 -primul EF construit special pentru prelucrarea EEF,

-1980 -prima celulă pentru prelucrare prin EEF și (EEM) bazată

pe un concept unitar,

-1981 -primul aparat industrial echipat cu un generator de impulsuri comandate,

-1985 -primul EF cu o constructie stratificata.

Incepand cu anul 1881, Intreprinderea "Electrotimis" din Timisoara, actualmente -S.C. Stimel S.A., a construit aparatul ELEROFIL 10, pana astazi, unicul model produs in Romania, care inca nu a fost abandonat.

Pe plan mondial, producatorii de sisteme si tehnologii de prelucrare EEF provin dintr-un numar restrans de tari industrializate si foste socialiste: Statele Unite, Japonia, R.F. Germania, C. S. I., Elvetia, Franta, Italia, Spania, fosta Cehoslovacie, etc., piata disputandu-se intre doua firme elvetiene (AGIE si Charmilles Technologies) si cateva firme japoneze (Japax, Fujitsu, Makkino si Sodik). Unele din aceste firme au vandut si pe piata romaneasca aproximativ 10 aparate, dintre care 5 (1 AGIE, 2 Japax, 2 Makkino) fac parte din generatia moderna, fiind echipate cu generatoare cu impulsuri comandate. Pretul lor ridicat si susceptibilitatea acestor aparate de a fi utilizate numai in domenii de varf ale industriei, precum si conditia necesara a existentei unei industrii sanatoase, stabile, care sa fie capabila sa asigure front de lucru unor aparate utilizate prin definitie in productia individuala si de serie mica, ne determina sa evaluam ca putin probabile, intr-un viitor apropiat, fabricarea in tara a unor asemenea aparate, sau importul lor, sau importul de licente de fabricatie a lor in Romania. In acelasi timp, raportandu-ne la procesul continuu de perfectionare principiala si constructiv-tehnologica a prelucrarii EEF in tarile dezvoltate, consideram ca traditiile valoroase ale scolii romanesti si indeosebi timisorene in domeniul tehnologiilor neconventionale pot fi si trebuie continuate in directia modelarii matematice, inovarii si optimizarii sistemelor tehnologice specifice prelucrarii EEF.

Este ceea ce ne propunem prin teza de doctorat "Cresterea capacitatii portante tehnologice a electrodului la prelucrarea electroeroziva cu electrod filiform" sperand sa contribuim la consolidarea bazei teoretice si experimentale de receptionare, asimilare si dezvoltare a uneia din cele mai eficiente tehnologii din domeniul constructiei de masini si aparate.

1. STADIUL ACTUAL AL PRELUCRĂRII PRIN EROZIUNE ELECTRICĂ CU ELECTROD FILIFORM (SINTEZA BIBLIOGRAFICĂ)

Pe plan internațional, datele bibliografice referitoare la prelucrarea EEF reprezintă pentru cel care dorește să abordeze acest subiect o sursă bogată de documentare, capabilă să constituie un serios punct de plecare în tratarea problemei: articole, brevete, teze de doctorat, prospecte, manuale și periodice ale firmelor producătoare de sisteme tehnologice și tehnologie. Din păcate, procedeul nu și-a găsit încă locul meritat în preocupările de cercetare științifică și, implicit, nici în literatura română de specialitate. Articolele științifice publicate, puține la număr, ca și singura teză de doctorat susținută în România se referă la prelucrarea cu aparate dotate cu generatoare de relaxare (soluție care nu se mai folosește în țările industrializate de 10 ani), constituind un material util, dar insuficient pentru o teză de doctorat modernă și competitivă.

Datele culese de autor în urma studiului bibliografic efectuat au fost sistematizate în șase direcții:

- domeniile de aplicare și performanțele actuale ale prelucrării,
- stadiul cunoașterii proceselor,
- sistemul constructiv-tehnologic de prelucrare,
- tehnologia prelucrării,
- costul prelucrării,
- direcții actuale de cercetare și tendințe de viitor în prelucrarea EEF.

1.1. Domenii de aplicare și performanțe

Funcție de proprietățile lor electroconductoare se pot prelucra unele materiale semiconductoare și toate materialele electroconductoare. Fig.3 [3] prezintă domeniul de aplicabilitate al prelucrării prin eroziune electrică (inclusiv al EEF) funcție de conductivitatea electrică χ [S/m] a materialului OP.

Datorită modului de generare cinematică prin riglare a suprafețelor și particularităților electrodului, care nu poate fi fixat în consolă, ci trebuie să fie sprijinit în două puncte pe lungimea sa, între care trebuie să fie rectiliniu, varietatea

formelor suprafețelor prelucrate prin EEF este limitată. Totuși gama formelor și pozițiilor suprafețelor generate prin EEF față de planul de așezare pe masa aparatului este largă, datorită posibilităților multiple de deplasare a elementelor mobile ale blocului mecanic care echipează sistemul constructiv-tehnologic de prelucrare: se prelucraza suprafețe riglate plane, cilindrice, conice, racordate cu raze de mărime variabilă, având înclinații constante sau variabile în trepte sau continuu față de planul de așezare a OP (fig.4 [10]).

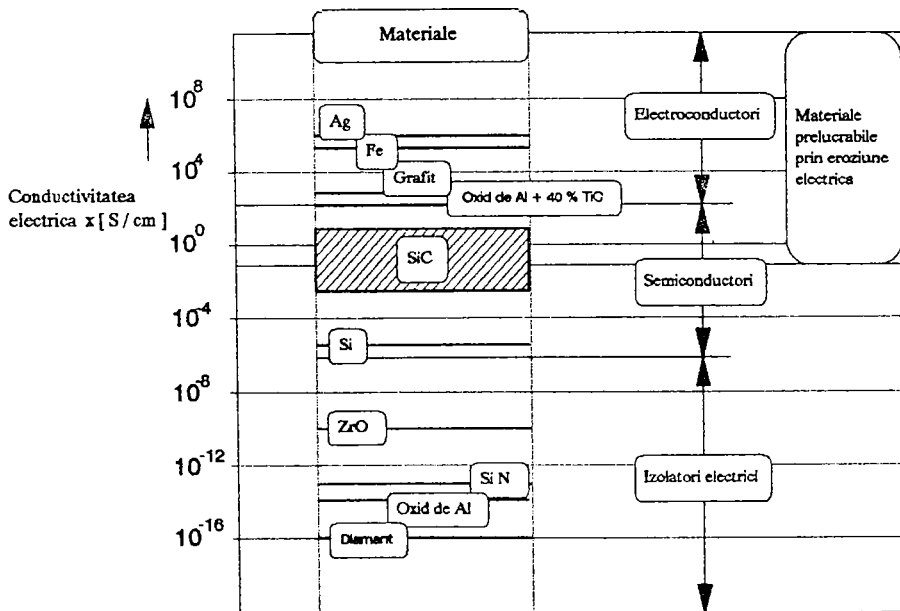


Fig.3. Delimitarea materialelor prelucrabile și neprelucrabile prin eroziune electrică, funcție de caracteristicile lor electroconductoare.

Încă de la apariția sa, procedeul și-a capatat un loc în rândul procedeelor (bazate pe prelevarea de material) utilizate cu predilecție în prelucrări miniaturale, grație, pe de o parte secțiunii transversale mici a EF și, pe de altă parte, solicitărilor mecanice neglijabile la care este supus OP în procesul electroeroziv. Aceste particularități, însumate la particularitățile generale ale prelucrării prin eroziune electrică (dependența slabă a uzurii electrodului și a productivității de proprietățile mecanice

ale materialului OP, precum si timpul de prelucrare relativ ridicat), determina utilizarea EEF la prelucrari (eventual miniaturale) in materiale metalice dure sau in carburi metalice, in productia de unicate si de serie mica: la prelucrarea elementelor active ale stantelor, a matritelor si poansoanelor pentru presare-sinterizare, a paletelor de turbina, a rotilor dintate, etc. (fig.5) [1], [2], [10].

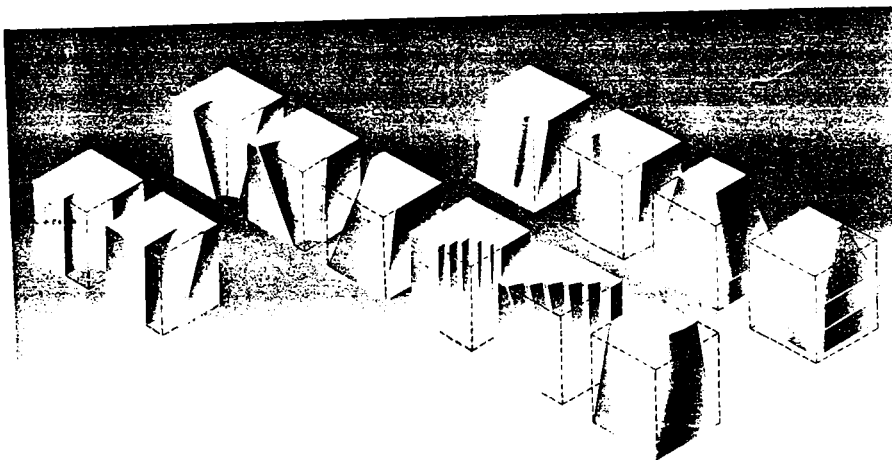


Fig.4. Exemple de suprafete generabile prin riglare prin prelucrare EEF [10].



Fig.5. Exemple de piese prelucrate prin EEF [10].

Performantele prelucrării EEF, atinse în prezent, sunt:
-productivitatea prelucrării: max. 400 mm²/min,

- inaltimea OP: max. 400 mm,
- abaterea de la linearitate a unei suprafete prelucrate, de inaltime 100 mm: min. 2 μm ,
- rugozitatea R_a : min 0,4 μm ,
- reproductibilitatea: cotele se inscriu intr-un camp de toleranta de dimensiune max. 1/1000 din valoarea dimensiunii nominale [10].

1.2. Fenomene si procese fundamentale

Din punct de vedere al succesiunii temporale a proceselor energetice, procesul electroeroziv este constituit din urmatoarele faze [1], [2] [3], [5]:

- strapungerea dielectricului,
- dezvoltarea spatial-temporala a canalului de plasma si a bulei de gaz in IT,
- transferul energiei descarcarii electrice in mediul ambiant (electrozi si lichid dielectric),
- prelevarea de material,
- transferul de masa intre electrozi prin intermediul LD.

1.2.1. Strapungerea dielectricului

Descarcarea electrica care realizeaza prelevarea de material din electrozii intre care este amorsata si intretinuta reprezinta o forma specifica de conductie in fluide dielectrice. Dintre tipurile de descarcare electrica, care se deosebesc intre ele prin durata de existenta, presiunea mediului in care are loc descarcarea, intensitatea curentului si tensiunea, numai descarcarea in arc nestationar (descarcarea de scurta durata in arc electric) are importanta pentru prelucrarea prin eroziune electrica. In fig.6 [12] se prezinta tipurile de descarcare electrica in gaze nobile, la presiune joasa si distanta mare intre electrozi.

Descarcarea este efectul a doua cauze primare: emisia autoelectronica a catodului si plasarea electronilor emisi in camp electric. Acesta provoaca deplasarea electronilor emisi, pe de o parte si faciliteaza emisia electronica, pe de alta parte [1], [12], [13], [14],. Strapungerea este un proces de activare

energetica progresiva a mediului care elibereaza prin ionizari succesive avalanse de purtatori de sarcina. Mai multe asemenea avalanse (care se genereaza una pe alta) formeaza in final un "strimer", care este un canal ingust, puternic ionizat, care uneste cei doi electrozi si prin care circula curentul electric. Fluidul din canal se deplaseaza in stare de plasma. Viteza de crestere a unei avalanse in gaze este de 10^7 cm/s, in timp ce viteza de propagare a unui "strimer" (viteza de nastere a avalanselor, care in final vor forma "strimerul") este de 10^8 cm/s [13], [14]. Timpul necesar propagarii canalului in gaze este de 10^{-8} - 10^{-7} s, in timp ce, in cazul lichidelor, care sunt considerate gaze la presiuni ridicate, timpul este de 10^{-5} - 10^{-4} s [15], [16], valoare care reprezinta durata de strapungere pentru un impuls electric singular (izolat in timp). In lichide strapungerea este ingreunata din cauza drumului liber mijlociu mai mic al purtatorilor de sarcina.

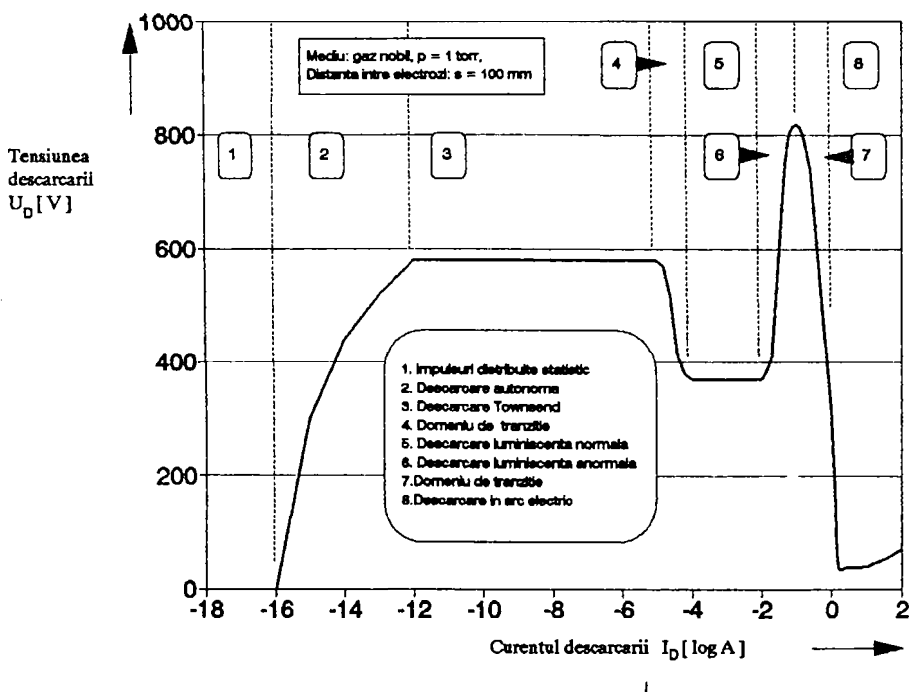


Fig.6. Tipurile de descarcare electrica in gaze nobile la presiune joasa si distanta mare între electrozi [12].

In conditiile reale ale prelucrării prin EEF (privita ca o actiune a unor trenuri de descarcari electrice), unde uzual durata impulsului de curent este mai mica de $4 \mu s$, valoarea duratei necesare strapungerii lichidelor, enuntata mai sus ($10-100 \mu s$) este in discordanta cu valoarea reala (maxim $0,1 \mu s$). In acest caz strapungerea este facilitata de inertia cu care se realizeaza deionizarea mediului din IT dupa strapungerea precedenta si de prezenta temporara in spatiul dintre cei doi electrozi a produsilor de eroziune si a bulelor de gaz. Faptul ca, in conditii reale de prelucrare, strapungerea este facilitata, este atestat si de valoarea reala marita a grosimii IT fata de valoarea teoretica: apa deionizata pura are rigiditatea $50 V/\mu m$ [5], ceea ce inseamna ca la o tensiune de amorsare de $300 V$ (valoare uzuala in prelucrarea EEF) grosimea IT ar trebui sa fie de maximum $6 \mu m$; dar in practica grosimea IT este de cativa zeci de micrometri. La o asemenea marime a grosimii IT strapungerea este posibila numai prin scaderea temporara a rigiditatii dielectricului, fapt pus pe impurificarea acestuia cu particule metalice si cu gaze.

In [1] si [17] se explica cauzele pentru care este posibila amorsarea accelerata a descarcarii in conditiile unui tren de impulsuri de frecventa suficient de mare. Functie de marimea particulelor metalice care impurifica IT, se deosebesc doua mecanisme prin care strapungerea este facilitata:

-daca metalele au temperatura de topire si de vaporizare mica si caldura specifica mare (Cu, Zn, Pb, alama), prin prelevare de material IT se impurifica cu vapori de metal la presiune mare, care se racesc repede dupa stingerea arcului. Reapriinderea arcului la un nou impuls de tensiune, suficient de apropiat in timp de primul, este facilitata prin strapungerea dielectricului pe distante mici, particulele ramase in IT constituind puncte intre electrozi. Ele faciliteaza amorsarea prin numarul lor mare.

-daca metalele au temperatura de topire si de vaporizare mare si caldura specifica mica (W, Mo), in IT se formeaza o atmosfera rarefiata de vapori de metal in contul particulelor de metal desprinse in stare solida si lichida, care sunt mari si se racesc cu viteza mica. In timpul racirii emit electroni datorita temperaturii ridicate (emisie termoelctronica), realizand strapungerea dielectricului pe distante mici.

In fig.7 [17] se prezinta variatia in timp (masurat din momentul stingerii impulsului de tensiune precedent) a tensiunii de

strapungere in gaz intre doi electrozi aflati la distanta mare intre ei, variatie care este caracteristica calitativ si prelucrarii prin eroziune electrica.

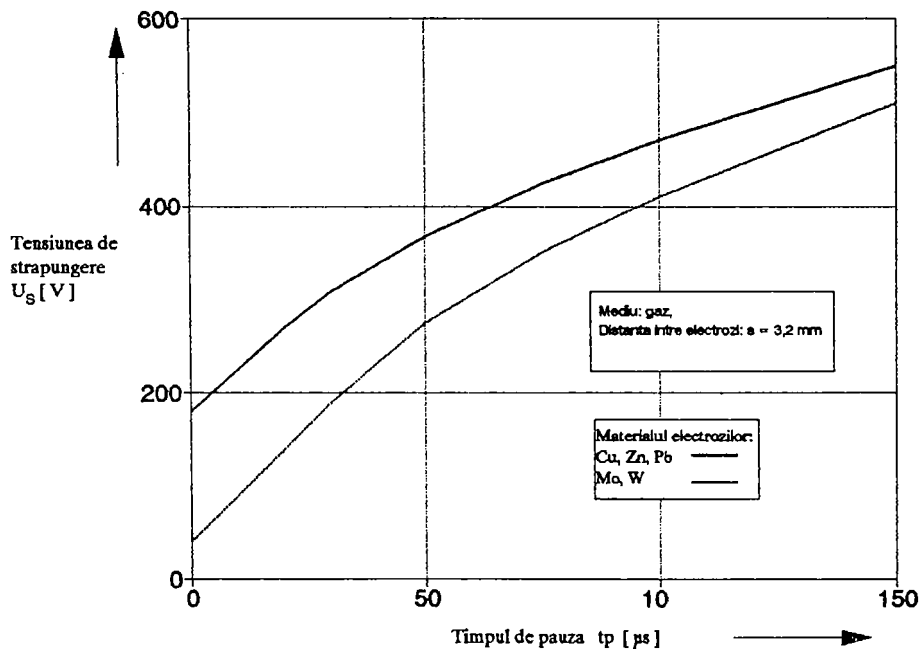


Fig.7. Refacerea in timp, dupa incetarea impulsului, a tensiunii de strapungere la valoarea sa teoretica [17].

Indiferent de mecanismul de strapungere, se observa ca exista un interval de timp imediat urmator stingerii arcului, in care tensiunea de strapungere nu este inca restaurata la valoarea sa teoretica. Daca se incearca o strapungere in aceasta perioada, aceasta va fi facilitata, dupa [17] -mai intens daca spatiul dintre electrozi este impurificat cu metale din cea de-a doua categorie (W, Mo), dupa [18] -mai intens daca spatiul dintre electrozi este impurificat cu metale din prima categorie (Cu, Zn, Pb, alama).

1.2.2. Dezvoltarea spatial-temporala a canalului de plasma si a bulei de gaz in IT

Dupa realizarea canalului de conductibilitate dintre electrozi, numarul purtatorilor de sarcina se multiplica prin ionizare, conducand la cresterea curentului. Campul magnetic propriu interactioneaza cu curentul dat de purtatorii de sarcina in miscare, generand pe perioada cresterii curentului forte electromagnetice divergente (efect "Skin"), care tind sa mareasca diametrul canalului. Dupa [18], cu cat distanta intre electrozi este mai mare, cu atat creste timpul necesar strapungerii si canalul isi mareste diametrul mai mult. La prelucrarea EEF, unde distanta intre cei doi electrozi este adaptata conditiilor disruptive de catre sistemul de reglare a grosimii IT dupa criteriul "cadere de tensiune constanta pe interstitiu", se constata [5], [18], ca IT impurificate cu particule ale metalelor cu temperatura de topire si vaporizare mica au grosimi mai mari decat cele impurificate cu particule ale metalelor cu temperatura de topire si vaporizare mare. Aceasta conduce la concluziile ca: in conditiile prelucrarii EEF strapungerea este mai facila si canalul de plasma este mai larg in cazul impurificarii IT cu metale avand temperatura de topire si vaporizare mica.

In jurul canalului de plasma, datorita incalzirii de la acesta, se formeaza o zona tubulara de gaz provenit din lichidul dielectric, a carei viteza de crestere in diametru este, dupa [5], de 50 m/s, ceea ce inseamna ca in 1 μ s cresterea diametrului bulei este de 50 μ m. In interiorul bulei au loc variatii de temperatura, vaporizare, ionizari, recombinaii, variatii de presiune. Dupa unii autori bula de gaz implodeaza in momentul stingerii descarcarii [4], dupa altii bula mai exista si dupa acest moment, largindu-se, chiar, si mai mult datorita inertiei, dupa care gazul, atingand o presiune egala cu [5] sau mai mica decat [1] presiunea ambianta, determina stingerea [5], respectiv implozia [1] bulei.

1.2.3. Transferul energiei descarcarii electrice in mediul ambiant (electrozi si lichid dielectric)

Energia unui impuls electric de lucru se transforma in IT in diferite forme de energie care sunt prezentate in fig.8. Dintre

aceste forme de energie, conform teoriei termice a prelevării de material, acceptată astăzi, energia primită de electrozi prin canalul de plasma are un rol hotărâtor în realizarea prelevării. Particulele care parcurg canalul de plasma lovesc suprafețele celor doi electrozi în așa-numitele pete electrodice, cedându-și energia cinetică. Aceasta se transformă în mare măsură, la interacțiunea cu rețeaua materialelor electrozilor, în energie termică, dezvoltându-se temperaturi care variază, funcție de autor, între 4.000 și 50.000 °C [1], [2], [5], [18], [19], [20], [21].

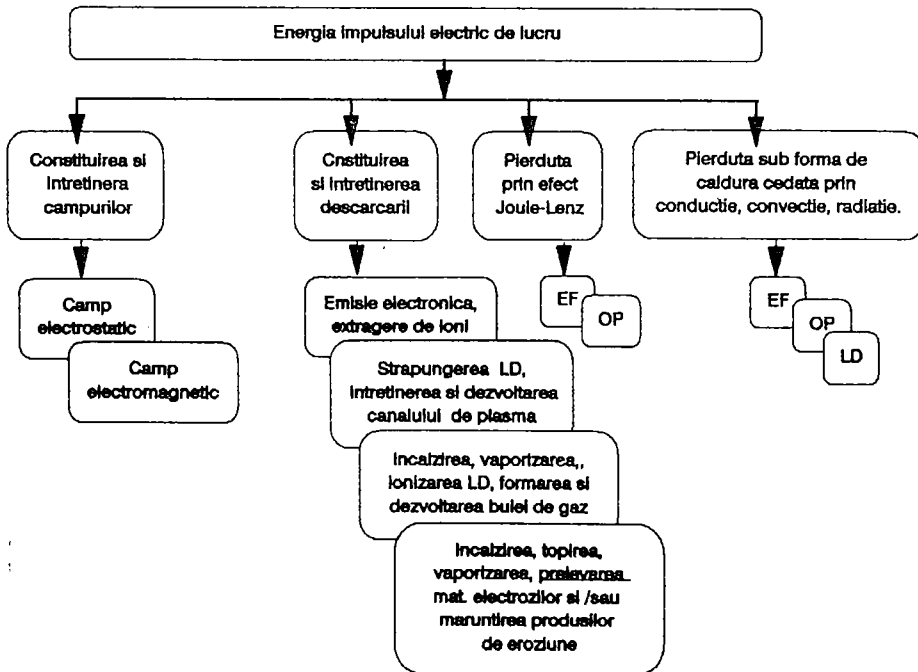


Fig.8. Formele de energie în IT, provenite din energia impulsului

Prelevarea de material, fiind în general inegală în raport cu polaritatea celor doi electrozi (chiar când aceștia sunt din același material), se trage concluzia că energia descărcării nu se repartizează în mod egal electrozilor, fapt de care trebuie să se țină seama în tendința de maximizare a productivității și de minimizare a uzurii.

După [22], formula densității energiei în domeniul anodic

este:

$$W_a = \int_0^{t_{ii}} (u_a + \phi) i_e dt \quad [J/m^2] \quad (1)$$

iar in domeniul catodic este:

$$W_k = \int_0^{t_{ii}} [(u_k + E_i) i_e - \phi i_{e^-}] dt \quad [J/m^2] \quad (2)$$

unde t_{ii} este durata impulsului de curent [s],
 u_a este caderea de tensiune anodica [V],
 u_k este caderea de tensiune catodica [V],
 ϕ este potentialul de iesire a electronului [V],
 E_i este potentialul de ionizare [V],
 i_{e^-} este densitatea de curent electronic [A/m²],
 i_{e^+} este densitatea de curent ionic [A/m²].

Aceasta inseamna ca anodul primeste energia potentiala si cinetica a electronilor catodului si pierde ioni pozitivi, in timp ce catodul primeste energia potentiala si cinetica a ionilor anodului si pierde lucrul mecanic de iesire a electronilor. Relatiile (1) si (2) neglijeaza eventuala energie pe care electrozii o primesc de la purtatorii de sarcina proveniti din ionizarea mediului de lucru.

Prelucrarii EEF ii sunt caracteristice energii ale impulsului de curent mici, din motive de protectie a EF, care are un volum mic. Aceasta impune prelucrarea cu impulsuri de curent (comandate) de scurta durata: maximum cateva microsecunde. In acest timp scurt numai curentul electronic (de la catod la anod) depaseste regimul tranzitoriu, stabilizandu-se, intrucat mobilitatea electronilor este mare, in timp ce curentul ionic (de la anod la catod), datorita mobilitatii ionilor (de peste 1.600 de ori mai mica decat cea a electronilor [13]), nu reuseste sa se constituie [9], [14]. Dupa [14], la descarcari de asemenea durata, 99 % din curentul descarcarii este format din curentul electronilor produsi de catod.

Deci la prelucrarea EEF, energia provenita din descarcare se repartizeaza calitativ la cei doi electrozi astfel:

-o fractiune mai mare la anod (decat la catod), pe care il bombardeaza electronii si la care, va fi conectat OP,

-o fractiune mai mica la catod, pe care, eventual, il bombardeaza un flux slab de ioni si la care, va fi conectat EF.

La nivelul anilor 1970, la prelucrarea EEM care se baza pe impulsuri de relaxare, bilanturile energetice aratau ca in medie numai 10 % din energia impulsurilor era folosita pentru topirea, vaporizarea si prelevarea de material [5], restul participand la initierea si intretinerea agentului eroziv, respectiv, pierzandu-se in celelalte forme de energie, prezentate in fig.8.

1.2.4. Prelevarea de material

1.2.4.1. Mecanismul prelevării de material

Pana acum au fost emise mai multe teorii care explica mecanismul prelevării de material, fiecare dintre ele bazandu-se pe cate un fenomen fizic predominant. Functie de fenomenul fizic predominant caracteristic, acestea sunt:

***Teoria fortelor electrostatice** (a lui Williams) afirma ca fortele electrostatice puternice sunt capabile sa distruga legaturile interatomice metalice si sa disloce fragmente din retea [1], [5], [23].

***Teoria socurilor mecanice** (a lui Mandelstamm si Raysky) afirma ca produse de eroziune care ating viteze de pana la 1.000 m/s, lovesc suprafetele electrozilor, de unde disloca fragmente de material [5], [23].

***Teoria socurilor termice** atribuie prelevarea de material tensiunilor mecanice care apar datorita incalzirilor si racirilor bruscte in volume mici ale materialelor electrozilor. Socurile termice cauzeaza gradiente de temperatura atat de mari, incat cristale sau grupe de cristale de la suprafata electrozilor pot fi dislocate [5] [23].

***Teoria termica** a fost dezvoltata de sotii Lazarenko in anul 1943 si de Zolotih in anul 1953 [5], [20]. Dupa presupunerile lor, prelevarea de material este un proces de natura electrotermica: materialul este topit, eventual partial vaporizat, de o parte din energia de efect, care este preponderent de natura termica, apoi materialul este dislocat sub influenta fortelor electromagnetice, electrostatice, mecanice si termodinamice [1], [5], [20]. Astfel primele trei teorii au fost, in principiu, incluse in teoria termica, care este astazi teoria unanim acceptata referitoare la mecanismul prelevării de material.

Multi autori afirma ca la prelucrarea prin eroziune electrica cu impulsuri de durata de ordinul a catorva microsecunde, majoritatea materialului prelevat este adus, in prealabil, in stare de vapori [5], [8], [9]. Zolotih sustine ca, pentru durate ale impulsului curentului mai mici de $1 \mu s$, proportia de material prelevat in stare de vapori este de aproximativ 80 % din intreg volumul prelevat [5].

Referitor la momentul, in care are loc prelevarea, moment raportat la existenta descarcarii electrice, toti autorii sunt de parere ca prelevarea are loc pe (sau si pe) durata impulsului de curent. Conform teoriei electrostatice a prelevarii, acceptata si verificata de un numar mare de autori, exista o mare probabilitate ca prelevarea de material sa aibe loc si in timpul amorsarii, cand tensiunea are valori de sute de volti, fortele electrostatice mari generate producand fisuri, si dislocarea materialului, mai ales in materiale cu temperaturi de topire si vaporizare ridicate si plasticitate scazuta, fisuri care, apoi, vor fi largite si adancite de socurile termice [1], [5]. Van Dijck conchide in urma unor deductii teoretice ca prelevarea de material are loc in stare topita si dupa incetarea impulsului de curent [5]. De asemenea exista parerea unanima ca prelevarea de material are loc in acest moment si in stare solida, cand materialul ecruisat si racit brusc se contracta, rezultand fisuri care, in prezenta energiei cinetice eliberate prin implozia bulelor de gaz, favorizeaza dislocarea materialului.

1.2.4.2. Prelevarea de material in cazul descarcarii singulare

Pentru un OP dintr-un material dat, volumul de material prelevat pe impuls in cazul unei descarcari electrice singulare este proportional cu energia impulsului. Aprofundand, rezulta din relatiile (1) si (2) (care reprezinta formulele densitatii de energie anodice, respectiv catodice) ca prelevarea de material este functie de densitatea de curent electronic si ionic, de caderile de tensiune in zonele anodului si catodului si de proprietatile fizice ale materialelor (prin potentialul de masurare a electronilor catodului si prin potentialul de ionizare a materialului anodului). In cazul prelucrarii EEF cu impulsuri electrice de scurta durata, cand curentul ionic este neglijabil, din aceleasi relatii se vede

ca, dintre proprietatile de material ale electrozilor, numai potentialul de iesire a electronilor catodului influenteaza W_a [J/m^2] si W_k [J/m^2], deci, productivitatea si uzura. In plus, marimea densitatii curentului electronic, principalul factor care produce prelevarea de material la anod, depinde si de temperatura de emisie electronica, conform formulei lui Richardson [12], [13], [24]:

$$j_{e^-} = A e^{-\frac{\phi q}{kT}} \quad [A/m^2] \quad (3)$$

unde A este o constanta universala [A/m^2],
 e este baza logaritmului natural [-],
 q este sarcina electronului [C],
 k este constanta lui Boltzman [J/K],
 T este temperatura de emisie electronica [K].

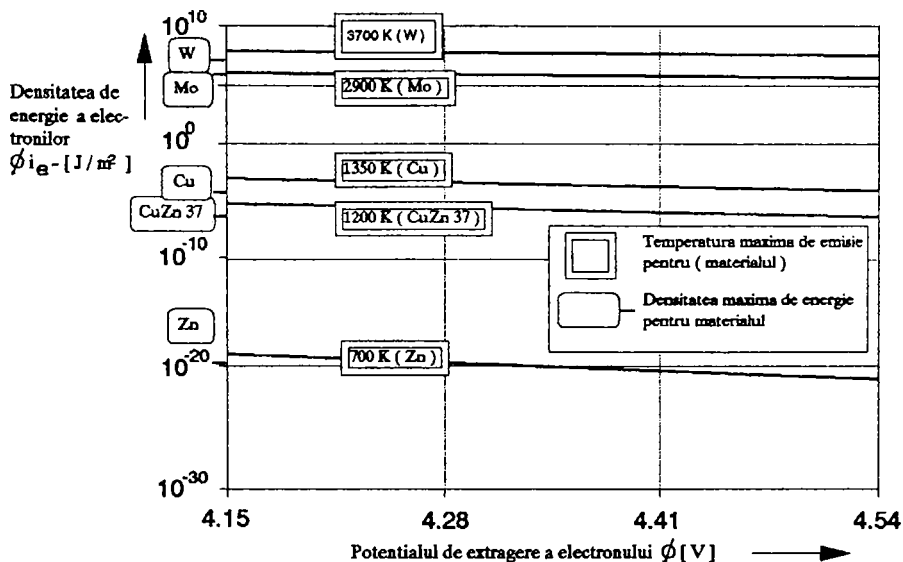


Fig.9. Valorile maxime ale densitatii curentului electronic functie de materialul catodului (EF), caracterizat prin temperatura sa de topire si prin potentialul de iesire a electronilor.

Fig.9 prezinta valorile densitatii maxime ale curentului electronic pentru diferite materiale de electrod, care au fost calculate considerand ca temperatura maxima de termoemisie este temperatura de topire a fiecarui material.

Se observa ca marimea acesteia depinde foarte pronuntat de valoarea temperaturii de emisie termoelectronica. Deci, conform teoriei, in cazul impulsului de curent singular, cu cat temperatura de topire a materialului electrodului este mai ridicata, cu atat volumul potential de material prelevat pe impuls din OP este mai mare.

Referitor la dependenta prelevarii de material pe impuls functie de materialul corpului din care se face prelevarea, Palatnik [2], [12], pornind de la ecuatie generala a transmisiei caldurii in masa unui conductor electric pe suprafata caruia apare un arc electric de durata scurta si Wertheim [5], concepend spatiul de lucru ca un sistem adiabatic, au ajuns la concluzia ca volumul prelevat depinde de constantele termofizice ale materialului in cauza, anume: volumul de material prelevat este descrescator cu temperatura de topire, de vaporizare, caldura specifica, caldura latentă de topire si de vaporizare, cu conductivitatea termica si cu densitatea.

Deci, sintetizand, in cazul unei descarcari singulare, de scurta durata (max. 4 μ s), prelevarea depinde la anod, in principal, de energia descarcarii, de proprietatile termofizice ale materialului anodului si ale materialului care constituie electrodul opus, iar prelevarea la catod depinde numai de energia descarcarii si de proprietatile termofizice ale materialului catodului.

Aspectul craterelor, functie de proprietatile termofizice ale materialului, este urmatorul: cu cat metalul are constantele termofizice enumerate mai sus de valori mai mari, cu atat craterul este mai putin adanc si de diametru mai mare. Prelevarea, inegala cantitativ in raport cu polaritatea electrozilor, este inegala si calitativ: in timp ce craterul de la anod are o forma apropiata de cea a unei calote sferice, craterul de la catod are o suprafata rugoasa [14], [25]. Acest aspect al craterului de la catod este pus de [25] pe seama faptului ca, in zona catodica, canalul de plasma este contractat si mobil (in timpul descarcarii) pe suprafata catodului. Astfel craterul de la catod este o aglomeratie de cratere mai mici, toate produse in timpul aceluiasi impuls electric.

Aspectul craterului depinde si de grosimea interstitiului.

Variind distanta intre EF si OP prin utilizarea diferitelor materiale de electrod (in pereche cu acelasi OP), [18] conchide ca la prelucrarea cu interstitiu relativ mare, unde pata anodica creste in diametru ca urmare a cresterii in timp a diametrului canalului de plasma (densitatea de energie micsorandu-se), craterul este mai putin adanc si de diametru mai mare, decat cel obtinut la un interstitiu mai mic.

1.2.4.3. *Prelevarea de material in cazul procesului electroeroziv integrat*

In conditii reale de prelucrare, in urma prelevarii realizate de primele impulsuri de lucru, spatiul dintre cei doi electrozi se impurifica cu produse de eroziune intrucat sectiunea sa transversala mica raportata la inaltimea sa mare ingreuneaza circulatia lichidului, care are si rolul de a realiza evacuarea. Astfel, in aceste momente nu se poate realiza echilibrul dinamic intre prelevarea si evacuarea materialului, echilibru teoretic necesar "initializarii conditiilor" pregatitoare strapungerii. Astfel, numarul impulsurilor care produc prelevarea este mai mic decat numarul impulsurilor de tensiune. Pe de alta parte, prezenta impuritatilor in LD din IT faciliteaza strapungerea, actiune hotaratoare pentru desfasurarea prelucrarii EEF cu frecventa ridicata (10^4 - 10^6 Hz), controland prin densitate si repartizare spatiala energia si frecventa impulsurilor de curent. In fig.10 [1] se prezinta tipurile de impulsuri electrice care apar la prelucrarea prin eroziune electrica cu impulsuri comandate. Dintre aceste tipuri de impulsuri, d.p.d.v. al efectului tehnologic prezinta interes numai impulsurile cu caracteristica normala (de lucru), care produc prelevarea.

Deci, functie de succesul corelarii intensitatii si duratei proceselor de activare energetica, prelevare si initializare a conditiilor de lucru, se poate obtine in IT o densitate temporala optima a impulsurilor normale de lucru de energie optima, care sa produca efectul tehnologic maxim scontat.

Datorita faptului ca procesul electroeroziv integrat, real se desfasoara cu pierderi energetice fata de procesul electroeroziv in cazul descarcarii singulare, volumul mediu de material prelevat pe impuls in primul caz este mai mic decat volumul de material

prelevat la o descarcare singulara. Wertheim afirma in anul 1975 ca raportul celor doua valori ale volumelor la prelucrarea EEM este de $1/40...1/10$ [5].

1.2.5. Transferul de masa între electrozi prin intermediul LD

Paragraful se refera la procesele prin care in IT se transporta material metalic, care functie de momentul prelevării de material poate fi înainte sau dupa acesta.

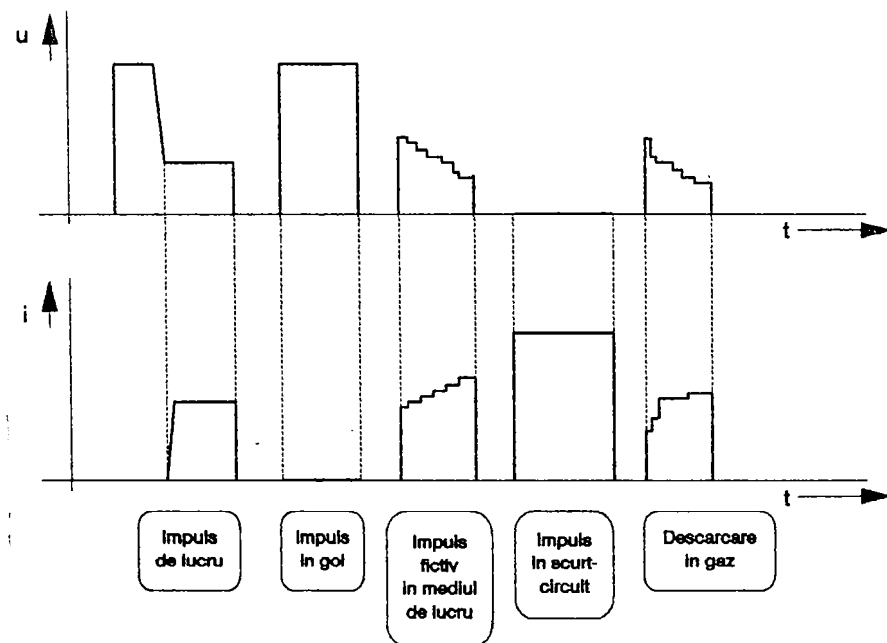


Fig.10. Caracteristici dinamice ale diferitelor tipuri de impulsuri electrice.

Initial, după realizarea canalului de conductibilitate între cei doi electrozi, aceștia fac prin coloana de plasma un schimb de material între ei, care la prelucrarea EEF cu impulsuri comandate de scurta durată este neînsemnat deoarece curentul ionic (care este o măsură a transportului de ioni) este neglijabil.

După momentul prelevării, particulele expulzate sunt

transportate sub actiunea undelor de soc (ale caror viteza si presiune depind de energia impulsurilor) si a bulelor de gaz. Varietatea fenomenelor si combinarea imprevizibila a factorilor care concura la deplasarea particulelor prelevate (lungime medie de transport la o descarcare, proprietatile anizotrope ale LD, directia aleatoare de transport) confera un caracter aleator deplasarii [1]. In general, la prelucrarea prin eroziune electrica, o parte din particulele prelevate se redepun pe suprafata electrodului de provenienta, altele sunt evacuate prin circularea mediului de lucru, altele raman in suspensie in acesta contribuind la amorsarea urmatoarei descarcari, in fine, altele lovesc electrodul opus, implantand ioni prin difuziune termica in suprafata acestuia. In [5] se afirma ca la prelucrarea EEM catodul preia 10-20 % din materialul prelevat la anod, iar anodul preia 7-14 % din materialul prelevat la catod.

La prelucrarea EEF schimbul de material intre cei doi electrozi este, pe de o parte favorizat de grosimea mica a IT, pe de alta parte, este defavorizat de imposibilitatea constituirii curentului ionic, si de schema caracteristica care faciliteaza evacuarea produsilor de eroziune, care consta in: pozitia verticala sau apropiata de verticala a IT, care este deschis la ambele extremitati, viteza mare a LD si miscarea axiala a EF. Ne fiind in posesia unor date cantitative explicite referitoare la schimbul de material intre componentele perechii de electrozi la prelucrarea EEF, in [9] se afirma ca exista cercetari in vederea inlocuirii EF din Cu si alama, pentru a evita implantarea ionilor de Cu in OP din otel.

1.3. Sisteme constructiv-tehnologice

- Sistemul constructiv-tehnologic de prelucrare EEF cuprinde:
- subsistemul EF-OP si
 - subsistemul aparat de prelucrare

Cele doua subsisteme se afla intr-o stransa interdependenta, in sensul ca electrodul, elementul esential, functie de a carui solutie constructiv-tehnologica depind efectele prelucrarii EEF, reprezinta, prin etapele istorice ale perfectionarii sale, tot atatea motive obligatorii pentru adaptarea aparatelor de prelucrare. Interdependenta dintre ele poate fi considerata biunivoca, daca se

considera ca adeseori constructorii de aparate, avantajati de progresele electronicii, au fost cei care au impulsionat dezvoltarea unor noi electrozi.

1.3.1. Electrocul filiform

Astazi se folosesc la scara industriala EF de forma cilindrica, obisnuit de diametre cuprinse intre 0,03 si 0,3 mm, din materiale metalice electroconductoare sub forma de metale tehnic pure sau aliaje ductile. Intrucat EF lucreaza la regimuri care il situeaza permanent la limita existentei sale, cerintele impuse materialelor pentru constructia sa sunt cele impuse materialelor electrodului masiv, dar la nivele superioare: sa aiba stabilitate ridicata la eroziune electrica, sa posede o conductibilitate electrica cat mai mare, sa asigure productivitati mari si rugozitati mici ale prelucrarii EEF, la care se adauga capacitatea de preluare a unei tensiuni mecanice de intindere cat mai mari la o deformare cat mai mica [4], [26], conditie necesara asigurarii unei precizii ridicate a prelucrarii. Aceste conditii, neputand fi indeplinite simultan de nici un material cunoscut, rezulta ca nu exista o solutie constructiva dominanta (d.p.d.v. al materialului) pentru EF, fapt care a condus la specializarea lor, functie de scopul tehnologic, respectiv, la constructia unor electrozi multistrat, din doua sau trei componente asamblate concentric din materiale diferite. Electrozii multistrat sunt construiti dintr-un miez, un invelis (de grosime cativa micrometri) si, eventual, din o a treia parte componenta, care are functia de liant intre primele doua componente. Primele doua componente au functia de a asigura preluarea, la parametri maximi, a unei sau a unui grup din conditiile cerute EF. Miezul preia tensiunea de intindere si majoritatea curentului care trece prin EF in timpul descarcarii, iar invelisul asigura stabilitatea la eroziune electrica, productivitatea si rugozitatea suprafetei prelucrate [7], [9].

In prelucrari industriale, functie de scopul tehnologic urmarit, pentru cazurile care solicita productivitati mari, fara pretentii asupra preciziei prelucrarii EEF, se utilizeaza EF monostrat din Cu sau alama sau multistrat cu miez din Cu sau alama in combinatie cu invelis din Zn, la grosimi mari: 0,2-0,3 mm. Pentru

cazurile care solicita obtinerea unor rugozitati mici ale suprafetelor prelucrate, fara pretentii asupra marimii abaterilor de forma, se folosesc EF din Zn multistrat cu miez din Cu sau alama invelit cu Zn, la grosimi de: 0,15-0,3 mm [8]. In cazurile care solicita abateri de forma minime ale suprafetei prelucrate prin EEF, fara pretentii asupra productivitatii si asupra rugozitatii, se folosesc EF monostrat din metale cu rigiditate relativ mare, care suporta tensiuni de intindere mari, cum sunt Mo, W si otelul inoxidabil, la grosimi mici: 0,03-0,10 mm, grosimi care ofera si avantajul posibilitatii de prelucrare a suprafetelor miniaturale [18], [27]. Daca simultan trebuie asigurata si o rugozitate mica, atunci se folosesc EF multistrat din miez din otel sau otel inoxidabil si invelis din Zn.

Fabricarea EF industriali [28] porneste de la elaborarea materialului metalic. In aceasta etapa se acorda o atentie deosebita compozitiei chimice si structurii materialului, care au o influenta semnificativa asupra conductivitatii electrice: in cazul electrozilor din metale tehnic pure, aceasta creste cu gradul de puritate, iar in cazul celor din aliaje, cu procentul de faza caracterizata printr-o retea in care atomii componentelor sunt ordonati cantitativ, de exemplu compus intermetalic, care se obtine prin tratamente termice cu viteza mica de racire [28], [13].

Urmeaza apoi aducerea semifabricatului (care are compozitia chimica finala) la forma si dimensiunile dorite ale EF. Electrozii din Mo sau W se fabrica pornind de la pulbere, care sufera o presare-sinterizare, rezultand sarme sau bare, a caror sectiune este apoi microrata, la inceput, prin forjare, apoi prin trageri repetate prin filiere din diamant. Ecrusarea, care determina cresterea valorilor caracteristice proprietatilor de rezistenta, inrautatarea celor de plasticitate si tehnologice si scaderea drastica a conductivitatii electrice (cu pina la 18 % la Mo), impune recoaceri de recristalizare in atmosfera reductoare de hidrogen, in scopul restaurarii structurii si, prin aceasta, a proprietatilor de material initiale [13], [24], [28].

Electrozii din celelalte materiale metalice se fabrica pornind de la semifabricate turnate, prin laminari si trageri succesive. Pana la diametrul de 0,2 mm tragerile se pot face prin filiere din otel aliat sau din carburi metalice. Pentru diametre mai mici, tragerea se face prin filiere din diamant. Otelul se trage in stare patentata, stare care ii confera o rezistenta la rupere mare

simultan cu o plasticitate mare si posibilitatea tragerii cu viteza oricât de mare daca reducerea de sectiune pe tragere nu depaseste 60 %. Efectele nedorite ale ecruisarii (care nu sunt atât de nefavorabile ca la Mo) se elimina prin recoaceri (o recoacere dupa 3 pana la 4 trageri succesive). De remarcat ca, functie de scopul tehnologic urmarit la prelucrarea EEF, EF din Cu, alama si otel se livreaza in diferite stari de ecruisare (avand diferite valori ale limitei de curgere) [13], [28].

Ultima etapa in fabricarea EF este lustruirea. O lustruire partiala se poate realiza la ultima tragere, daca se folosesc filiere cu alezaj fin lustruit din safir, rubin, diamant, sau, mai eficient, daca la ultimele doua trageri, se foloseste lubrefierea lichida (ex.: emulsie de sapun in apa). Lustruirea fina se realizeaza electrochimic [28].

In cazul EF multistrat cu miez metalic, pe miezul obtinut prin tehnologia de mai sus, se depune invelisul prin diferite procedee: galvanizare, metalizare, bombardare cu ioni, depunere in vid etc. [8], [28], [29], dupa care legaturile mecanice (slabe) dintre cele doua metale pot fi transformate in legaturi intermetalice prin difuziune termica. Aceasta se realizeaza prin incalzirea ansamblului miez-invelis cu ajutorul curentului electric. In final mai are loc o tragere in scop de calibrare si de lustruire a suprafetei EF [28].

1.3.2. Aparatul de prelucrare

Aparatul de prelucrare prin EEF are urmatoarea structura tipica (fig.11):

- blocul mecanic,
- generatorul de impulsuri,
- sistemul pentru lichid dielectric,
- sistemul de conducere a procesului de prelucrare, cu subsistemele:
 - comanda numerica si
 - comanda adaptiva,
- calculatorul.

Funcțiile blocurilor componente ale aparatului, aflate într-o interdependenta activa, sunt, de asemenea prezentate schematic in fig.11 [1], [8], [10]. Numarul functiilor pe care le poate executa

un aparat si acuratetea in executia fiecarei functii sunt definitorii pentru performantele respectivului aparat. Din multimea functiilor disponibile, vom accentua pe cele ale blocului mecanic.

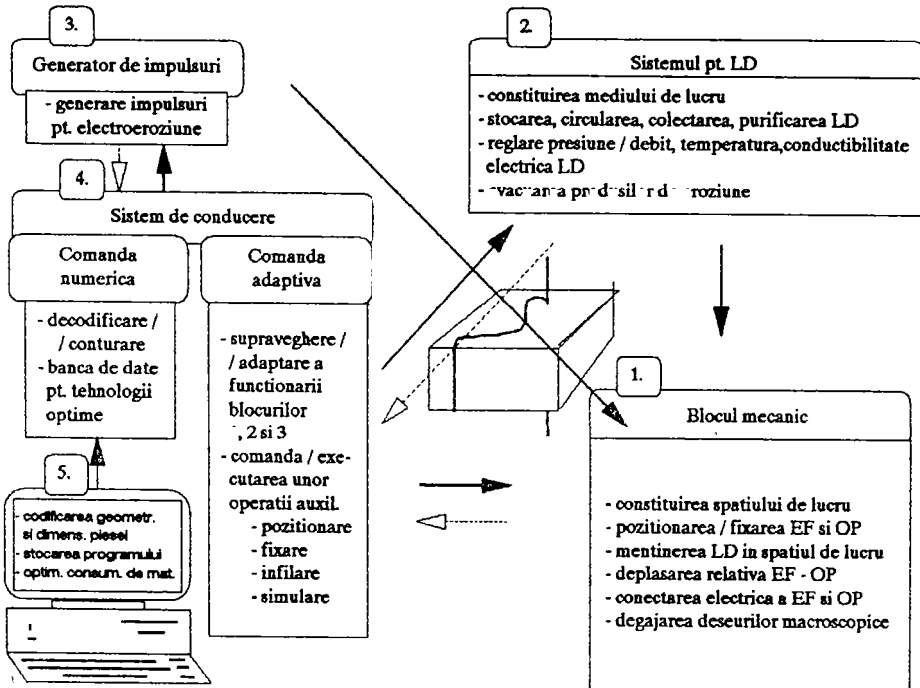


Fig.11. Structura tipica a aparatului de prelucrare prin EEF si functiunile blocurilor sale componente [8], [10], [30].

Modul specific de generare a suprafetelor tehnologice a impus dezvoltarea unor blocuri mecanice cu mobilitate pe maximum 5 axe, din care, 2 axe asigura deplasarea relativa EF-OP (de obicei prin intermediul deplasarii mesei), o axa-miscarea de reglare a distantei intre ghidaje (prin deplasarea capului de forta), iar celelalte 2 axe asigura miscarea de reglare a inclinarii EF fata de planul de asezare al OP (prin deplasarea unuia din ghidajele EF). Miscarile de reglare se pot realiza intermitent sau continuu si in timpul prelucrarii, astfel ca pot fi generate suprafețe de pozitie variabila in raport cu planul de asezare al OP (ex.: suprafețe conice). Inclinarea maxima a EF este de 30° , valoare limitata de marimea maxima a deplasarii ghidajului mobil care asigura inclinarea

(17,5 mm). Partile mobile sunt antrenate de 5 motoare pas cu pas, avand, obisnuit, incrementul de 1 μm , dar exista si aparate la care partile mobile se deplaseaza cu un increment de 0,5 μm .

Procedeul se caracterizeaza printr-o precizie a prelucrarii ridicata. Pentru evitarea alterarii acesteia prin vibrarea si deformarea termica a partilor componente ale blocului mecanic, unele firme producatoare de aparate au inlocuit materialul metalic cu granitul sau marmura in constructia unor componente masive (batiu, grinzi, ghidaje) [10].

1.4. Tehnologii de prelucrare

Parametrii regimului tehnologic de prelucrare EEF se stabilesc functie de materialul si inaltimea OP, precum si de precizia si calitatea impuse suprafetei care se va prelucra. Din multimea combinatiilor de parametri tehnologici, oferite de posibilitatile aparatului de prelucrare prin EEF, se alege aceea care satisface cat mai economic scopul tehnologic urmarit [1].

Aparatele moderne de prelucrare prin EEF [9], [10], fiind dotate cu echipament electronic de calcul, poseda o biblioteca bogata de asemenea cupluri de parametri (in general: 99 de regimuri, cel mai des utilizate in practica). In plus, programul de optimizare a tehnologiei, scuteste pe operator de alegerea tehnologiei optime din cele oferite, pentru ca aceasta operatie se poate face automat. Operatorul (atat tehnologul, cat si cel care deservește aparatul propriu-zis) poate interveni in orice moment cu modificari, completari etc. in tehnologia aleasa din banca de date a computerului, conform experientei sale, sau poate renunta la oferta acesteia.

Modul automatizat de stabilire a tehnologiei de prelucrare, presupune, din partea operatorului, stabilirea unui numar optim de treceri, functie de obiective, calculatorul alegand din banca de date regimurile optime intr-o succesiune optima [10], [30]. Totusi, tehnologia prelucrarii EEF pe aparatele moderne poate fi stabilita si in modul "neautomatizat", dar nu in intregime, ponderea parametrilor reglabili, care pot fi alesi independent, de catre tehnolog, depinzand, in general, de generatia si de marca aparatului de prelucrare prin EEF.

Spre exemplu, in cazul aparatului de prelucrare EEF marca

AGIE Cut 315 DEM, tehnologul trebuie, pornind de la materialul si dimensiunile OP si tinand seama de obiectivele prelucrarii, sa stabileasca un numar restrans de parametri tehnologici de intrare reglabili, anume [30]:

- a. Parametrii de instalare a EF si OP.
- b. Parametrii referitori la EF:
 - materialul,
 - diametrul.
- c. Parametrii regimului electric:
 - valoarea curentului mediu
 - durata impulsului de curent.
- d. Parametrii regimului pentru lichid dielectric:
 - valoarea conductivitatii electrice a apei,
 - pozitia relativa a perechii EF-OP fata de LD,
 - valoarea presiunii/debitului de introducere a LD in IT.
- e. Parametrii regimului mecanic:
 - forta de tensionare mecanica a EF,
 - viteza de deplasare axiala a EF,
 - sensul de deplasare axiala a EF,
 - inclinarea initiala fata de verticala a EF.

Acesti parametri, cu exceptia ultimului, sunt pastrati constanti in timp, unii prin constructia aparatului, altii de catre comanda adaptiva.

Restul parametrilor de intrare, asupra carora tehnologul nu poate actiona in mod direct, sunt parametri constanti, fixati constructiv: polaritatea electrozilor, forma impulsului de tensiune si valoarea tensiunii de amorsare;

Ceilalti parametri de regim sunt dependenti de proces; ei se regleaza initial, automat, "in grup", functie de nivelul stabilit de catre tehnolog al unui parametru sau al mai multor parametri de reglare, definitorii pentru grup si care, ulterior, in timpul prelucrarii isi modifica, sub influenta comenzii adaptive, valorile in timp, functie de conditiile din IT: durata de amorsare, frecventa impulsurilor de tensiune, amplitudinea si frecventa medie ale impulsurilor de curent, grosimea IT etc.

Indicatorii tehnologici care intereseaza la prelucrarea EEF sunt:

- viteza de prelucrare [mm/min], ca masura a productivitatii,
- abaterea de la linearitate [mm] si abaterea dimensionala [mm] ale suprafetei prelucrate, ca masuri ale preciziei prelucrarii,

-rugozitatea suprafetei prelucrate [mm], calitatea si adancimea stratului modificat [mm], ca masuri ale calitatii suprafetei.

Debitul uzarii EF [mm³/min] este un indicator de interes secundar.

Actualmente prelucrarea se face cu impulsuri electrice comandate, care genereaza impulsuri de curent dreptunghiulare de amplitudine ridicata (max. 300 A) si durata scurta (max. 4μs), ale caror marimi caracteristice sunt prezentate in fig.12. Amorsarea descarcarii este limitata in timp prin utilizarea unor impulsuri de tensiune cu panta brusc crescatoare (obisnuit 300 V). [10].

Efectele negative ale uzarii EF asupra preciziei prelucrarii si asupra capacitatii sale portante sunt limitate prin conectarea sa la catodul generatorului de impulsuri si prin imprimarea unei viteze mari de deplasare axiala (max. 300 mm/s).

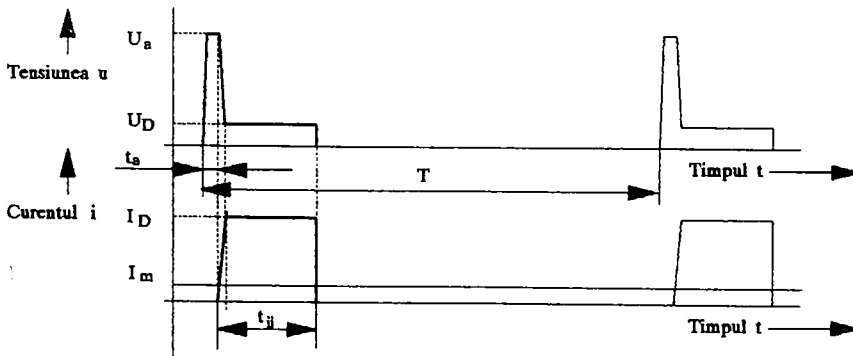


Fig.12. Caracteristicile impulsurilor comandate utilizate la prelucrarea EEF (schematic) [1], [8], [9], [10], [30].

D.p.d.v. al amplasarii perechii EF-OP in raport cu lichidul de lucru, care este apa demineralizata si deionizata, prelucrarea se poate face in imersiune si/sau prin circularea forzata a LD in IT, dupa una din urmatoarele scheme (fig.13):

- a. injectie asimetrica
- b. injectie asimetrica
- c. injectie-aspiratie.

Debitul lichidului circulat in IT este mare (max. 1000 l/h) pentru a putea evacua cu eficienta maxima produsii de eroziune, in conditiile unei productivitati relativ mari.

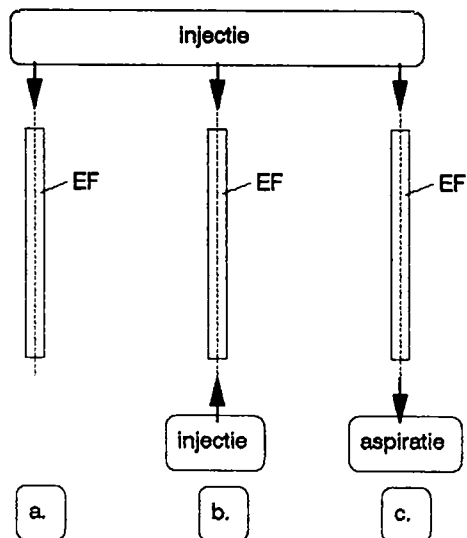


Fig.13. Moduri de circulare forata a LD in interstitiul tehnologic [1], [8], [9], [10], [30].

1.5. Costul prelucrării

Referitor la subiectul acestui paragraf s-au studiat doua surse informationale, anume:

-cazul S.C. "Sinterom" S.A. Cluj (date din iunie 1993 si din ianuarie 1994) si

-cazul unei firme utilizatoare din R.F. Germania (date din anul 1979).

S.C. "Sinterom" S.A. posedă un aparat modern de prelucrare prin EEF cu impulsuri comandate si, in acelasi timp fabrica sarme din W si Mo. S-au cules aceleasi date cu caracter economic in doua momente diferite, pentru a verifica valabilitatea constantei lor in timp. Din pacate, neconcordanta evolutiei, in acest interval, a cursului de schimb valutar cu evolutia preturilor electrozilor produsi in tara si a salariilor, nu au contribuit la formarea unei imagini clare asupra costului prelucrării prin EEF la aceasta firma.

In cazul firmei occidentale, in [5] se compara între ele toate elementele componente ale costului prelucrării EEF, raportand costurile la timp. Rezultatele sunt prezentate in fig.14. si fig.15.

Din compararea valorilor din cele doua figuri, se observa

Germania, 1979

[DM/h] (%)

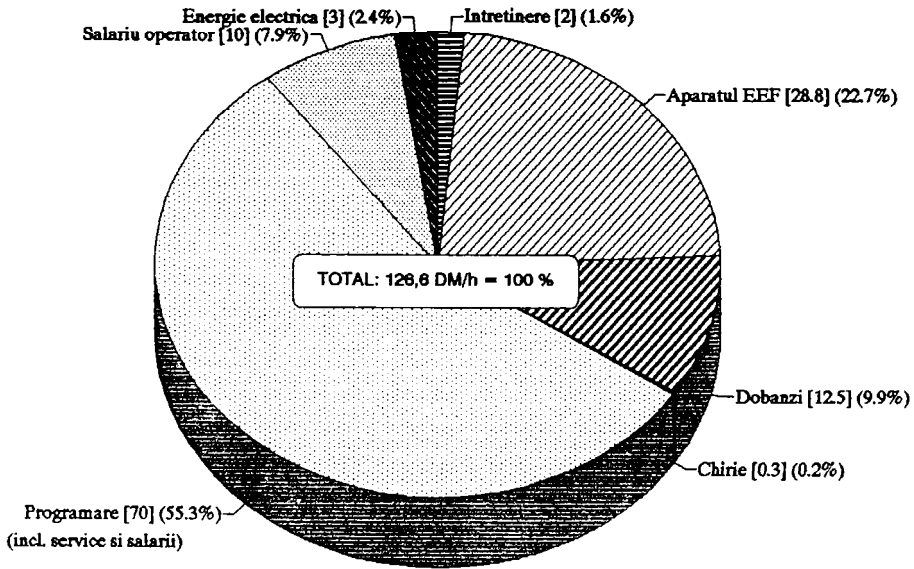


Fig.14. Costul orar si structura sa (exclusiv costul EF) la prelucrarea EEF [5].

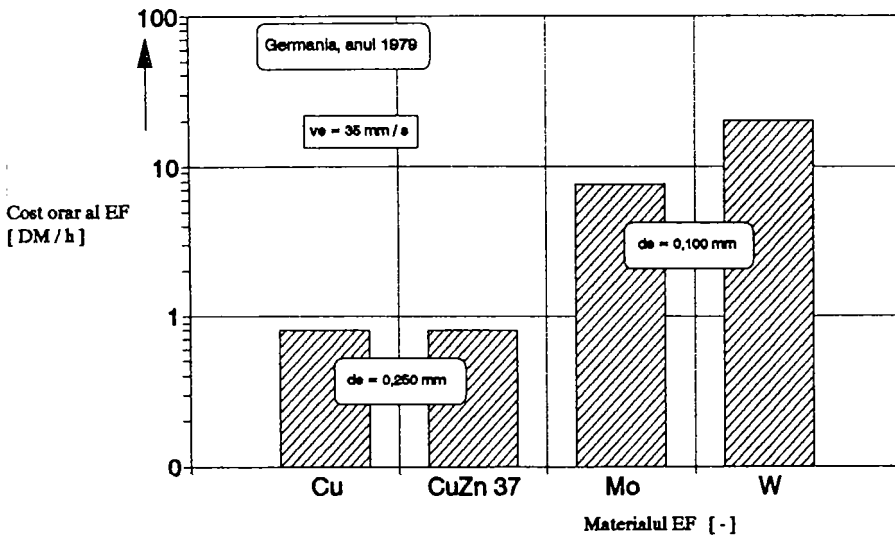


Fig.15. Costul orar al electrodului la prelucrarea EEF [5].

ca cheltuielile orare datorate EF sunt neglijabile in cazul

prelucrării cu electrozi din Cu sau alama, dar au o pondere mai ridicată în costul orar total în cazul prelucrării cu electrozi din Mo (5 %) sau W (18 %); la viteze mai mari de deplasare axială a electrodului (în cazul prelucrării OP de înălțime mai mare) costul orar al EF crește, putând atinge o pondere semnificativă, mai mare de 50 % din costul orar total.

Costul orar în cazul "Sinterom" are aproximativ aceleași valori ca în cazul prezentat mai sus pentru costurile materializate prin sectoare circulare hasurate cu linii în fig.14, cele hasurate cu puncte fiind considerabil mai mici și cu fluctuații mari, funcție de condițiile economice generale, ceea ce le-a făcut imposibil de calculat obiectiv.

În calculele efectuate nu s-au luat în considerare recuperările banesti provenite din reciclarea materialului de electrod. Deși există încercări de prelucrare EEF cu EF uzati, această soluție nu s-a adoptat până acum la nivel industrial. Totuși materialul pentru EF se reciclează.

1.6. Direcții actuale și tendințe de evoluție în cercetarea științifică și tehnologică

Actualmente, cercetările având ca scop creșterea productivității se îndreaptă spre dezvoltarea unor generatoare de impulsuri care să asigure o putere marită a impulsului de lucru, prin creșterea curentului descărcării la 1.000 A, simultan cu micșorarea duratei impulsurilor de curent și cu creșterea frecvenței acestora. Acest fapt conduce la încărcarea electrică, termică și mecanică suplimentară a EF. Întrucât problemele constructive legate de generator vor fi rezolvate într-un viitor apropiat, în paralel au demarat cercetările la nivel de electrod, care se concentrează asupra gășirii unor soluții constructive noi, care să poată suporta solicitări mecanice marite la deformări minime, în condiții de încărcări electrice și termice ridicate. Teoretic, acest deziderat poate fi atins prin utilizarea unor EF din materiale noi, cu proprietăți termo-fizice și mecanice excepționale și/sau având forme de secțiuni, care să le confere o stabilitate mai mare decât secțiunea circulară.

Referitor la materiale noi pentru EF, recent au avut loc, în stadiu de laborator, încercări de prelucrare EEF cu electrozi

multistrat avand miez din fibra de carbon, material care poate prelua, la temperaturi ridicate, solicitari mecanice de intindere mari, dar nu poate prelua curenti mari, invelit cu un strat relativ gros din Zn, pentru a putea prelua curenti mai mari. Acesti electrozi au un cost ridicat, conferit atat de tehnologia fabricarii miezului, cat si de cea a depunerii metalului pe acesta. In plus, grosimea mare a invelisului metalic, asociata cu efectul "Skin" amplificat in conductori tubulari, determina limitarea curentului de lucru, cu efecte negative asupra productivitatii [12].

Referitor la forma sectiunii transversale a EF, incercarile de prelucrare cu electrozi metalici de sectiune patrata, in cruce sau dreptunghiulara [9], fabricati pe masini de tras, s-au oprit la stadiul de laborator datorita dificultatii de ghidare a EF pentru introducerea lor corecta in IT. S-a incercat, de asemenea, folosirea EF cilindrici, reprofilati la sectiuni transversale diferite de cea circulara, prin tragere pe aparatul de prelucrare EEF, inainte de introducerea lor in IT.

Alte incercari [9] s-au facut asupra unor EF din sarme metalice impletite sub forma de cablu, care ofera, de asemenea, avantajul capacitatii mari de incarcare, dar au dezavantajul preciziei scazute, al uzarii rapide a ghidajelor si al limitarii curentului de lucru datorita amplificarii efectului "Skin".

De asemenea, la nivel de electrod s-a incercat ameliorarea performantelor de productivitate ale prelucrarii EEF prin imbunatatirea conditiilor de strapungere, folosind EF cu suprafata rugoasa [9];

Pana acum, din informatiile autorului, aceste solutii nu au fost inca adoptate la nivel industrial, probabil din considerente economice, unele asteptand sa fie perfectionate, altele fiind deocamdata abandonate.

Dintre imbunatatirile aduse in ultimii ani performantelor prelucrarii EEF pe seama perfectionarii electrodului insusi, industria si-a manifestat interesul doar pentru utilizarea electrozilor multistrat din miez din Cu sau alama invelit cu Zn. Acest unic "succes" poate conduce la ideea ca resursele rezidente in electrod pentru cresterea performantelor prelucrarii sunt, la actualul nivel de dezvoltare tehnologica, epuizate, ceea ce a determinat orientarea atentiei unor cercetatori spre alte surse potentiale ("externe") de crestere a performantelor, anume:

-imbunatatirea randamentului evacuarii caldurii din masa EF,

in scopul cresterii posibilitatii de incarcare termica a sa, prin cresterea eficientei circulatiei LD in IT. Aceasta se poate realiza pe seama cresterii presiunii de introducere a lichidului in interstitiu (AI¹) si/sau a asigurarii etansarii circuitului lichidului in zona intrarii in interstitiu (AI), sau a optimizarii unghiului sau de intrare in interstitiu (CL²) [9], sau pe seama utilizarii, cat mai mult posibil a schemei de prelucrare "EF in afara fantei" (fig.20), care favorizeaza patrunderea LD in IT (AI);

-micsorarea incovoierii EF, in scopul cresterii preciziei prelucrarii, prin cresterea numarului de puncte de ghidare a electrodului in IT; suplimentar, ghidarea se poate face mecanic, cu ajutorul unei bare rigide de sprijin plasata in IT (CL) [9], sau hidrodinamic cu ajutorul LD (AI) [31], sau cu ajutorul unor campuri (electrostatic, electromagnetic);

-micsorarea amplitudinii vibratiilor EF in scopul cresterii preciziei prelucrarii, prin cresterea frecventei perturbatoare care le produce la valori mult mai mari decat frecventa proprie de vibratie a EF; aceasta se poate face prin cresterea frecventei descarcarilor electrice (AI), sau prin suprapunerea unor vibratii mecanice suplimentare de frecventa ridicata, produse independent, care, compunandu-se cu cele rezultate din procesul electroeroziv, sa genereze noi vibratii, caracterizate de amplitudine mica si un coeficient de amortizare infinit (CL) [9].

Faptul ca multe din cercetarile de laborator din ultimii ani, referitoare la resursele "externe" electrodului, s-au materializat in aplicatii industriale (existand inca pentru unele directii de cercetare rezerve suficiente de actiune) si ca un numar mare de directii de cercetare, care se afla inca in stadiul de laborator, nu au fost abandonate, demonstreaza ca acesta este terenul pe care vor continua, preferential, cel putin in viitorul apropiat, cercetarile in scopul imbunatatirii performantelor prelucrarii EEF.

Prezenta teza incearca sa isi aduca contributia la cresterea productivitatii si la ameliorarea indicatorilor tehnologici calitativi, prin cautarea resurselor atat "interne", cat si "externe" electrodului, actionand pe plan teoretic si practic:

-in directia modelarii matematice a incarcarilor termice si

1 - AI-aplicat industrial
2 - CI-cercetari de laborator

mecanice statice si dinamice ale EF, precum si a deformarii EF in timpul prelucrarii;

-in directia realizarii si incercarii, pentru prima oara in tara, a unui EF multistrat;

-in directia incercarii, pentru prima oara in tara, a unui EF cu suprafata rugoasa;

-in directia ghidarii EF in IT, in scopul limitarii incovoierii sale, cu ajutorul unui camp magnetic.

2. CAPACITATEA PORTANTA A EF - ELEMENT CONSTITUTIV DETERMINANT AL CAPACITATII PORTANTE TEHNOLOGICE A PRELUCRARIII PRIN EEF

2.1. Definitie, structura si functionalitate

Conceptul de capacitate portanta a unui sistem tehnic exprima limita superioara a incarcarii pe care acesta o poate suporta, fara sa se distruga, in timpul functionarii sale sau a ansamblului a carui parte constituinta este. Acest concept, care face parte din multimea proprietatilor de rezistenta si comportamentale, nu este o caracteristica de material, ci depinde pregnant de forma, dimensiunile si arhitectura sistemului considerat, precum si de conditiile de solicitare [32], [33], [34].

Extrapolarea conceptului traditional de capacitate portanta, specific sistemelor constructive, in sfera sistemelor tehnologice, propusa prin prezenta teza de doctorat, are la baza similitudinea functionala a acestora, determinata de existenta unor stari limita de incarcare care conditioneaza mentinerea stabilitatii si, respectiv, integritatii substantiale a sistemelor considerate.

Prin analogie cu domeniul constructiilor, capacitatea portanta a EF, ca element constitutiv determinant al capacitatii portante tehnologice a prelucrarii prin EEF, reprezinta intensitatea limita a celei mai defavorabile incarcari, care actioneaza asupra electrodului, fara sa perturbe semnificativ stabilitatea sistemului tehnologic si a procesului de prelucrare, generat si intretinut de acesta in IT.

Scaderea si, in extremis, anularea capacitatii portante a EF pe parcursul prelucrarii EEF are ca manifestari practice principale:

-dezvoltarea unor deformatii ale EF inadmisibile in raport cu cerintele calitative impuse suprafetelor prelucrate;

-pierderea partiala sau totala a integritatii substantiale a EF, in urma uzarii excesive si respectiv ruperii EF, cu consecinte catastrofale asupra stabilitatii procesului de prelucrare si indicatorilor de performanta cantitativi (in special) si calitativi ai prelucrarii.

Structura si functionalitatea capacitatii portante a EF, prezentate in fig.16, releva, pe de o parte, dependenta acesteia atat de EF (capacitate portanta intrinseca), cat si de aparatul si regimul de prelucrare prin EEF (capacitate portanta extrinseca),

precum si, pe de alta parte, caracterul sau multifactorial: termic, mecanic si electric.

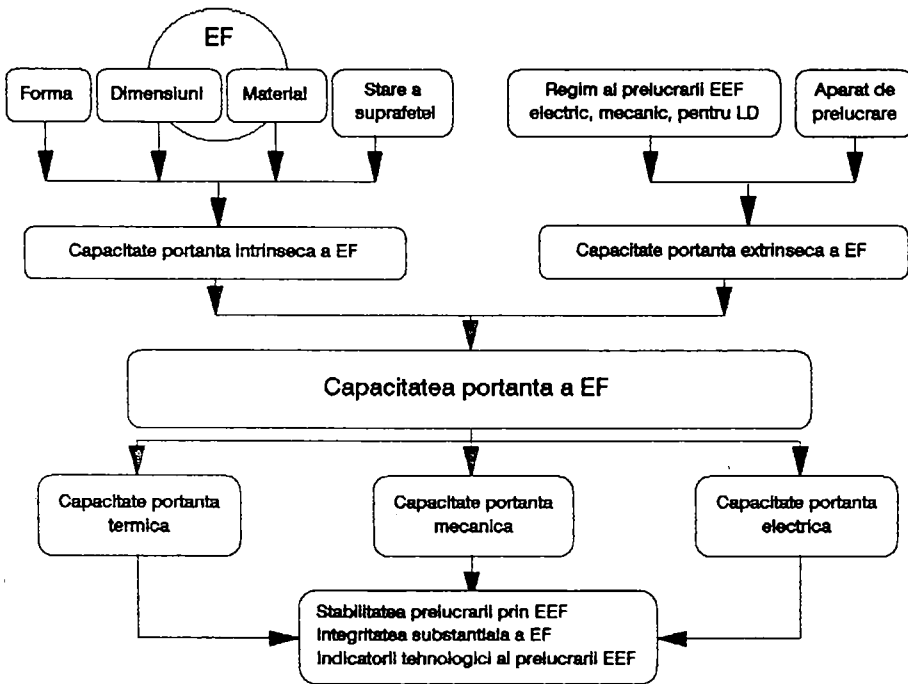


Fig.16. Structura si functionalitatea capacitatii portante a EF.

In acceptiunea prezentata, analizata in continuare, capacitatea portanta a EF este o marime caracteristica complexa, integrata prelucrării EEF, perfectibila continuu.

2.2. Solicitarile aplicate EF pe parcursul prelucrării EEF

In timpul prelucrării prin eroziune electrica, electrodul si OP sunt supusi unor solicitari generate si intretinute, direct sau indirect, de sistemul tehnologic de prelucrare. La prelucrarea EEM aceste solicitari produc un numar limitat de efecte asupra OP (in parte-dorite, in parte-nedorite), cat si asupra electrodului (nedorite): modificari ale formei si dimensiunilor, precum si modificari structurale si de proprietati de material pe adancime

mica de la suprafețele electrozilor spre interior.

Valorile solicitărilor cresc în importanța atunci când electrodul are un volum mic și o rigiditate redusă (ca în cazul EF), pentru că la modificările care apar în cazul prelucrării EEM, se mai adaugă încă două (ambele-nedorite): modificarea poziției și reducerea ariei secțiunii transversale a EF la nivele critice pentru integritatea sa substanțială [4], [5], [27].

Toate modificările EF în timpul prelucrării, cauzate de procesul electroeroziv, devin cauze ale perturbării stabilității acestuia, perturbare care conduce în final (fig.17) la abaterea valorilor indicatorilor tehnologici de la valorile optime și la riscul real al ruperii EF.

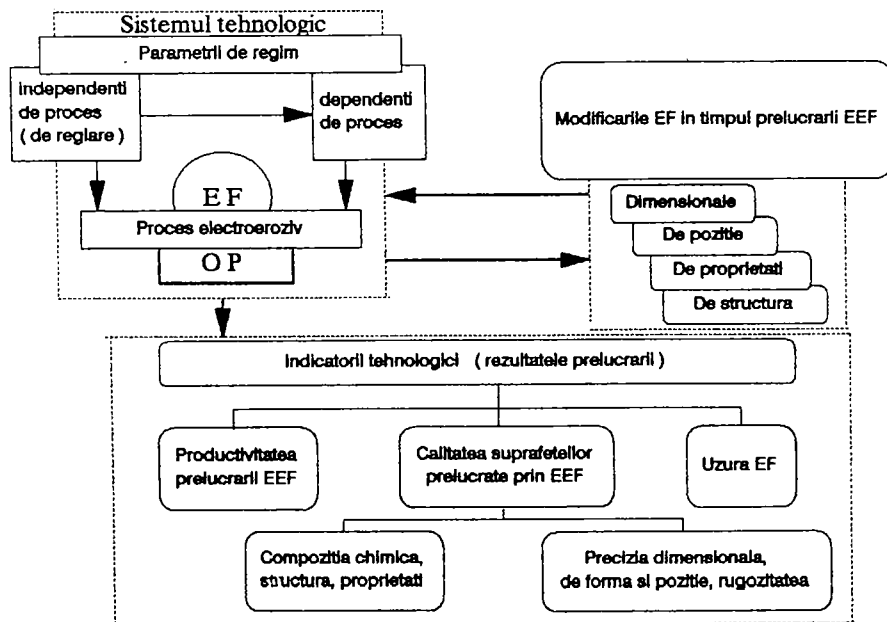


Fig.17. Relația de cauzalitate și efecte tehnologice în sistemul tehnologic de prelucrare prin EEF.

Limitarea modificărilor suferite de EF în timpul prelucrării s-a făcut în cursul evoluției istorice a procedurii pe seama creșterii capacității portante a electrodului. Se apreciază că

evolutia in acest sens este inca departe de final, existand inca rezerve importante pentru cresterea sa in continuare. Pentru a putea depista aceste rezerve este necesara definirea, in prealabil, a componentelor capacitatii portante, iar aceasta se poate efectua numai dupa un studiu al solicitarilor EF provenite din procesul electroeroziv.

2.2.1. Solicitari termice

Caldura, provenita din energia impulsului de curent, este transmisa electrodului pe doua cai:

- prin canalul de plasma format intre EF si OP si
- prin efect Joule-Lenz al curentului electric

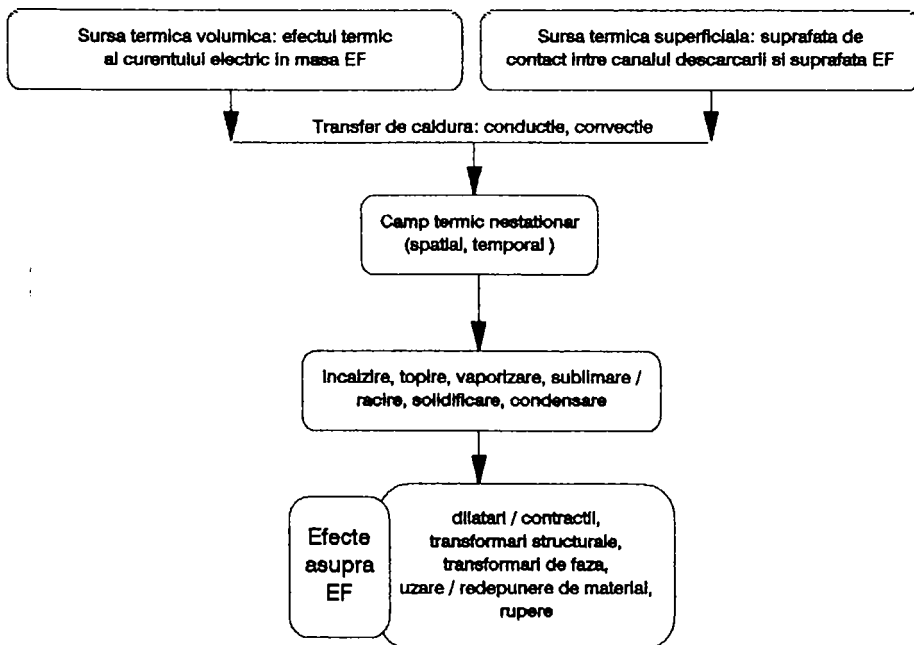


Fig.18. Cauzele si efectele solicitarilor termice aplicate EF.

si produce asupra sa efectele prezentate in fig.18.

Datorita tendintei de prelucrare cu viteza cat mai mare, energia termica introdusa in IT tinde sa devina tot mai mare, iar datorita tendintei de a minimiza cantitatea de material erodat din OP (de inaltime data), EF tinde sa aibe o sectiune transversala cat mai mica. Aceasta determina electrodul sa lucreze in situatii care il plaseaza in vecinatate limitei existentei sale: el este permanent sub pericolul dezintegrarii.

Astfel una din componentele capacitatii portante a EF devine capacitatea sa de incarcare termica. Ea depinde de dimensiunile electrodului, de proprietatile intrinseci ale materialului sau, cum sunt temperaturile si caldurile latente de transformare, conductibilitatea termica, rezistivitatea electrica, caldura specifica etc. si de particularitatile tehnologice ale conditiilor in care lucreaza electrodul, cum sunt eficienta evacuarii caldurii din IT, parametrii impulsului de curent etc. [5], [27].

A limita efectele nedorite ale caldurii asupra EF, fie pe calea imbunatatirii proprietatilor electrodului, fie pe calea optimizarii tehnologiei prelucrarii EEF, in sensul obtinerii unei incarcari termice mai favorabile electrodului, in scopul imbunatatirii rezultatelor prelucrarii, inseamna a-i creste capacitatea portanta.

2.2.2. Solicitari mecanice

In timpul procesului electroeroziv, apar in IT forte de natura:

- electrostatica (datorata tensiunii electrice),
- electromagnetica (datorata interactiunii curentilor care strabat EF si OP pe durata impulsului de curent),
- hidrodinamica (datorata rezistentei pe care o opune EF curgerii LD),
- hidrostatica (datorata intreruperii continuitatii spatiale a contactului intre suprafata EF si LD) si
- mecanica (datorata presiunii plasmei si a gazului format in jurul coloanei de plasma si datorata desprinderii explozive a produsilor de eroziune de pe suprafata EF).

Acestea, actionand asupra unui electrod de volum si rigiditate mici, il deformeaza si il deplaseaza dupa cele trei directii rectangulare

longitudinale se materializeaza pe suprafata prelucrata, alterand precizia prelucrarii. Corespunzator cauzelor care produc deformarea axei EF, aceasta are doua componente:

-una statica, produsa de componenta statica a rezultantei fortelor din procesul electroeroziv, care este incovoiere si

-una dinamica, produsa de componenta dinamica a rezultantei fortelor din procesul electroeroziv, care este reprezentata de vibratii in jurul axei longitudinale incovoiate ale EF. Influenta deformatiei axei EF asupra preciziei prelucrarii depinde in primul rand de pozitia relativa EF-OP, prin scopul tehnologic urmarit de aceasta:

-finisare, careia ii este caracteristica pozitia EF in afara fantei, respectiv

-degrosare, careia ii este caracteristica pozitia EF in fanta (fig.20).

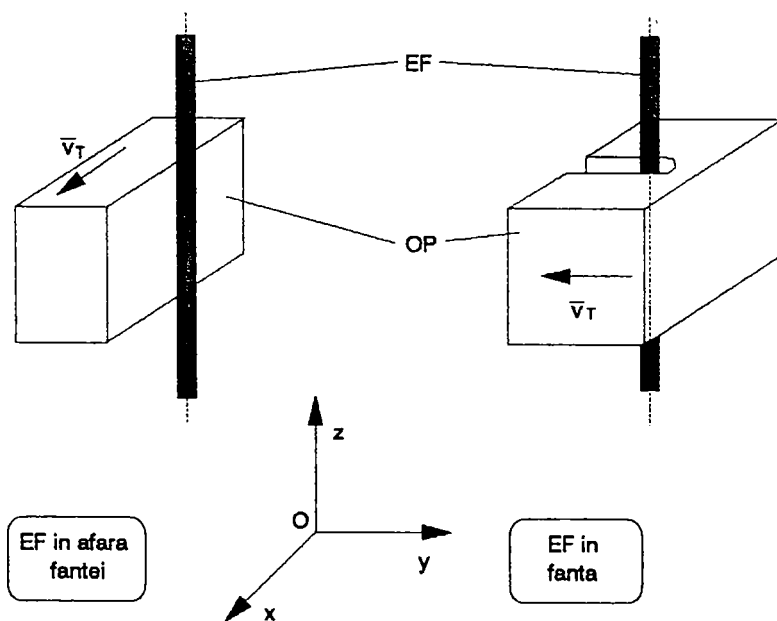


Fig.20. Pozitiile relative posibile EF-OP in timpul prelucrarii.

In cazul prelucrarii dupa schema 'EF in afara fantei', suprafata prelucrata se abate de la planeitate pentru ca axa deformata a electrodului este continuta in planul Oyz, care nu contine si vectorul viteza de taiere, \vec{v}_T (fig.21). Vibratiile EF in

planul Oxz, nu influenteaza precizia prelucrării pentru ca acest plan contine vectorul \vec{v}_T .

In cazul prelucrării dupa schema EF in fanta, vibratiile EF in planul Oxz determina generarea unor suprafete concave in planul Oxz (fig.22). Deformarea EF in planul Oyz nu deranjeaza atat timp cat viteza de taiere este continuta in acest plan, dar in momentul schimbarii directiei de taiere, vectorul \vec{v}_T iese din planul in care se afla axa deformata a electrodului. Aceasta conduce la

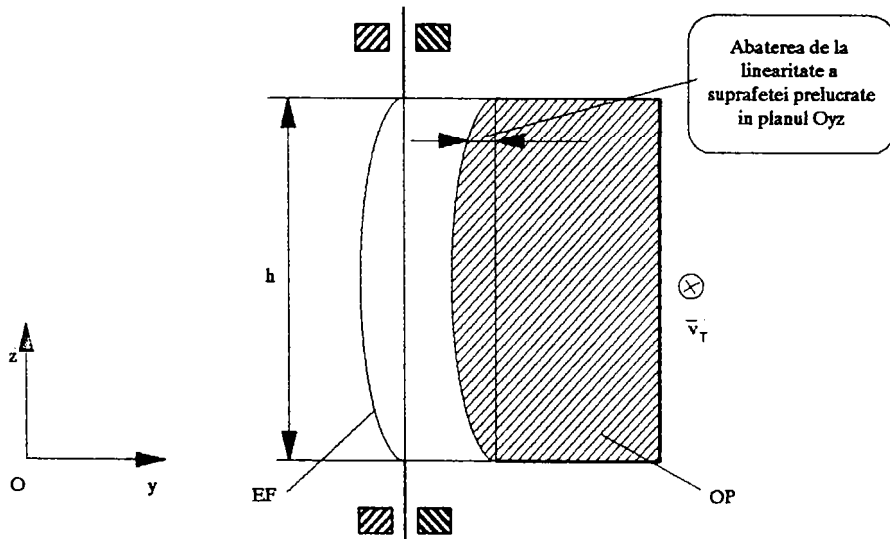


Fig.21. Abateră de la linearitate pe direcția Oy a suprafeței prelucrate după schema EF în afara fantei.

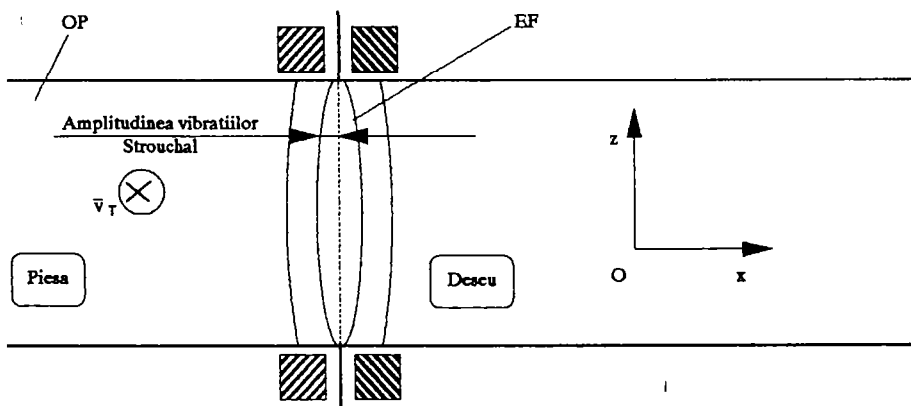


Fig.22. Abateră de la linearitate pe direcția Ox a suprafeței prelucrate după schema EF în fanta.

imposibilitatea deplasării întregului volum al EF pe aceeași traiectorie pe care se deplasează ghidajele.

În fig.23 este prezentat schematic cazul în care trebuie prelucrate în OP două suprafețe plane care se intersectează sub un unghi diedru de 90° , formând o muchie. Deși ghidajele EF se deplasează după o traiectorie care la un moment își schimbă direcția brusc cu 90° , electrodul, a cărui zonă de mijloc (mijloc al distanței între ghidaje) rămâne în urma ghidajelor cu o distanță egală cu săgeata, nu poate să se deplaseze pe o traiectorie paralelă cu cea a ghidajelor. Rezultatul este că cele două suprafețe plane prelucrate vor fi racordate, raza de racordare variind pe înălțimea OP.

Pentru a limita cât mai eficient deformările axei longitudinale a EF, acesta, neavând rigiditate proprie, trebuie tensionat, cu o forță axială care îl încarcă suplimentar față de rezultanta forțelor provenite din proces.

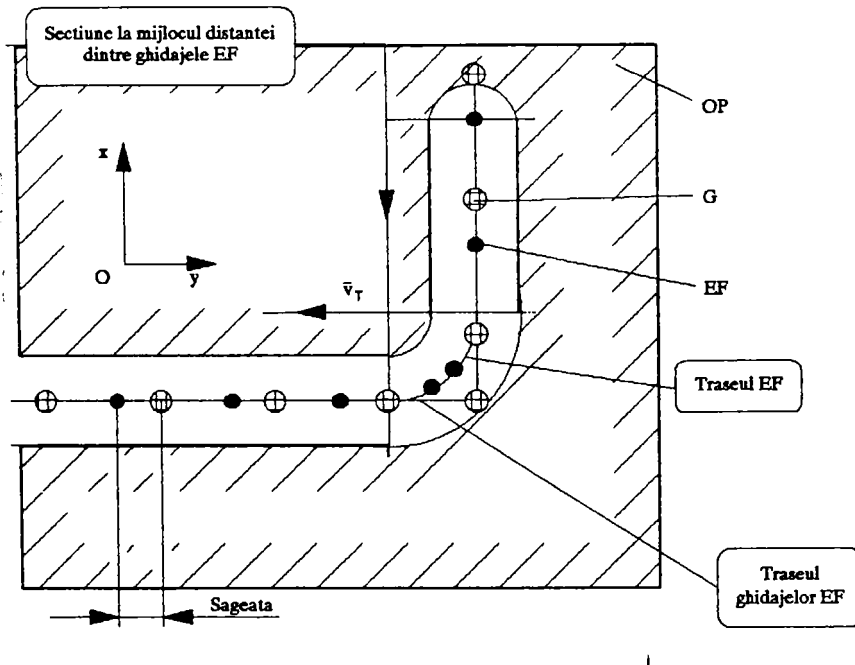


Fig.23. Abaterea de la forma a suprafeței prelucrate după schema EF în fanta, în momentul modificării direcției de deplasare relativă EF-OP.

Pe de alta parte, anumite forte care incarca electrodul pot avea si efecte singulare: de exemplu forta mecanica exercitata asupra EF de catre gazul provenit din lichidul de lucru in jurul canalului de plasma, il poate deforma plastic, daca presiunea sa depaseste limita de curgere a materialului electrodului, rezultand un crater de deformare plastica in jurul craterului de uzura (fig.24).

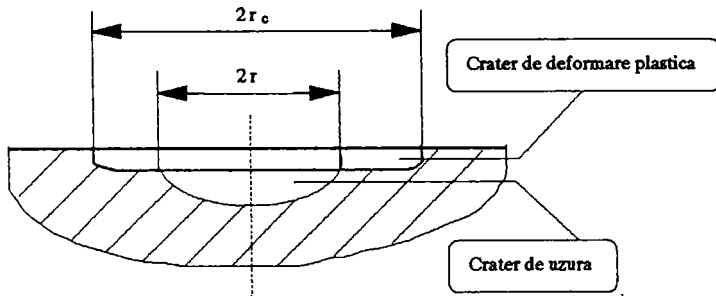


Fig.24. Crateretele elementare de uzura si de deformare plastica.

Din cele expuse in acest paragraf, se desprinde ideea ca cea de-a doua componenta a capacitatii portante a EF este capacitatea sa de incarcare mecanica. Ea depinde de electrod prin dimensiunile sale, prin proprietatile intrinseci ale materialului, cum sunt rezistenta mecanica de curgere, modulul de elasticitate, densitatea etc., precum si de conditiile de prelucrare, cum sunt proprietatile magnetice ale materialului OP, parametrii regimului electric, forta de tensionare a EF etc. A limita deformatiile si deplasările electrodului, actionand fie la nivelul sau, fie la nivelul aparatului de prelucrare, fie la nivelul parametrilor tehnologici, inseamna a creste stabilitatea EF in timpul prelucrării, deci capacitatea sa portanta. Aceasta are ca efect imbunatatirea performantelor prelucrării.

2.2.3. Solicitari electrice

In literatura sunt emise teorii potrivit carora, la prelucrarea prin EEF electrodul este solicitat de curentul electric (de densitate mare) care il strabate sau de tensiunea electrica

aplicata in mod direct, prin transformarea energiei cimpului electric in energie mecanica de rupere.

Astfel, sarme subtiri parcurse de curent, la cresterea brusca a curentului la valori ridicate, se pot rupe instantaneu, nu datorita efectului Joule-Lenz, ci printr-un proces de separare mecanica.

Pe de alta parte, este vizibila la materialele electroconductoare dure prelevarea de material prin smulgere de particule in stare solida, probabil, sub influenta campului electrostatic [1], [5].

Astfel, vom numi cea de-a treia componenta a capacitatii portante a EF capacitatea de incarcare electrica. Ea depinde atat de proprietatile intrinseci ale materialului sau, cat si de regimul electric al prelucrarii EEF.

Observand ca cele trei componente ale capacitatii portante depind de un grup de parametri legati de electrod, pe de o parte si de ceilalti parametri ai regimului de prelucrare, pe de alta parte, se poate afirma ca, din acest punct de vedere, capacitatea portanta a EF se poate divide in capacitate portanta intrinseca, respectiv, in capacitate portanta extrinseca.

2.2.4. Concluzii

In urma analizei efectelor solicitarilor asupra EF pe durata prelucrarii, se constata ca pierderea capacitatii portante a electrodului in timpul prelucrarii prin EEF conduce la pierderea capacitatii portante tehnologice insasi a prelucrarii. Relatia de cauzalitate intre capacitatea portanta a EF si capacitatea portanta tehnologica a prelucrarii prin EEF se poate rezuma la urmatoarele manifestari practice:

- dezvoltarea unor deformatii inadmisibile ale EF, implica aparitia unor consecinte negative asupra calitatii impuse a prelucrarii si

- pierderea partiala sau totala a stabilitatii electrodului, implica aparitia unor consecinte catastrofale asupra stabilitatii procesului de prelucrare si asupra indicatorilor de performanta.

Capacitatea portanta a EF este o caracteristica care depinde, atat de electrod (capacitate portanta intrinseca), cat si de ceilalti parametri ai prelucrarii, precum si de calitatea

aparaturii de prelucrare prin EEF (capacitate portanta extrinseca), avand trei "dimensiuni": termica, mecanica si electrica.

Capacitatea portanta a EF este o marime care se supune unui proces de maximizare continuu, perfectionarea pe care le sufera in evolutia sa istorica constituind rezerve necesare pentru perfectionarea indicatorilor tehnologici ai prelucrarii EEF. Fig.16 prezinta sintetic componentele capacitatii portante a EF si relatiile de tip cauza-efect la care participa aceasta.

3. MODELAREA MATEMATICA A CAPACITATII PORTANTE A EF

Procesul electroeroziv este un proces de mare complexitate, la desfasurarea sa participand o multitudine de fenomene, majoritatea dintre ele imposibil de inclus in relatii matematice, avand o comportare aleatoare si aflate intr-un lant de conexiuni lung si ramificat intr-un spatiu multidimensional [1], [7], [8], [23], [26], [27], [31], [35], [36], [37], [38], [39], [40]. Acest caracter al prelucrarii prin eroziune electrica face imposibila modelarea matematica a capacitatii portante a EF chiar in conditiile cunoasterii tuturor datelor reale de intrare, necesare rezolvarii. De aceea este necesara utilizarea unor ipoteze simplificatoare si, bineinteles, o verificare bazata pe experiment, a rezultatelor obtinute in urma modelarii matematice. Toate ipotezele simplificatoare din prezenta lucrare au un caracter acoperitor referitor la problemele la a caror rezolvare participa.

3.1. Capacitatea portanta termica

In procesul prelucrarii EEF, datorita caldurii dezvoltate, EF este supus urmatoarelor procese: variatie a temperaturii, dilatare, topire, vaporizare, uzare si rupere. Intrucat fluxul de caldura este variabil in timp, dependent de regimul electric si hidraulic, la racire, EF sufera procese contrarii celor amintite mai sus: contractie, solidificare, condensare si redepunerea unei fractiuni din materialul expulzat pe suprafata sa. Inertia (din cauze dependente de EF sau de ceilalti parametri ai regimului de prelucrare) cu care EF raspunde acestor procese este o masura a capacitatii sale portante termice.

3.1.1. Modelarea matematica a uzarii EF

Considerand (cu o suficient de buna aproximatie) ca prelevarea de material este rezultatul unor procese exclusiv termice [1], [2], [3], [5], [7], [18], [19], [20], [23], [26], [36], mecanismul acesteia se poate explica astfel: in masa EF si OP energia impulsului se transforma intr-o cantitate de caldura suficient de mare pentru a realiza o activare energetica care sa

determine o crestere a temperaturii, in zonele adiacente petelor electrodice, peste temperaturile de topire si chiar de vaporizare ale materialelor electrozilor. Materialul, avand starea fizica astfel modificata, va fi desprins apoi prin ruperea legaturilor intermetalice cu faza solida, respectiv lichida, in parte datorita unei fractiuni a energiei impulsului, in parte datorita conditiilor dure de resolidificare din IT.

Conditiiile specifice prelucrarii EEF fata de prelucrarea electroeroziva cu electrod masiv, in ceea ce priveste prametrii de regim ai impulsului (curentul descarcarii, I_0 [A]- mare, durata impulsului de curent, t_{i1} [s]- mica, rigiditatea dielectricului, E_s [V/m]- mica, grosimea IT, s [m]- mica) conduc la o densitate spatiala si temporala ridicata a energiei transmise EF, avand ca efect prelevarea de material preponderent in stare de vapori [7], [8], [9], [20], [31].

In cele ce urmeaza, se considera ca craterul de uzura este emisferic si se formeaza in urma expulzarii intregii cantitati de material, incalzit pana la temperatura de vaporizare a materialului EF, fara a mai avea loc redepuneri.

Pentru a compara comportarea la uzura a diferitelor materiale pentru EF, se calculeaza (in ipotezele ca intreaga energie a impulsului, W_i [J], se repartizeaza exclusiv perechii de electrozi in mod egal si ca prelevarea de material se face exclusiv in stare de vapori a intregului volum incalzit) caldura, Q_s [J/mm³], necesara

incalzirii pana la temperatura de vaporizare a unui volum de 1 mm³ din urmatoarele materiale: Cu, CuZn37, Fe, Mo, Sn, W, Zn [5], [41],[42], [43] cu relatia:

$$Q_s = \rho [c (T_T - T_a) + \lambda_T + c (T_V - T_T) + \lambda_V] \quad [J/mm^3] \quad (4)$$

unde ρ este densitatea [kg/m³],

c este caldura specifica [J/(kg K)],

λ_T este caldura latentă de topire [J/kg],

λ_V este caldura latentă de vaporizare [J/kg],

T_a este temperatura ambienta [K],

T_T este temperatura de topire [K],

T_V este temperatura de vaporizare [K].

Puterea impulsurilor W [J/min] este:

unde I_0 este curentul descarcarii [A],

$$W = I_D U_D t_{ii} f_i 60 \quad [J/min] \quad (5)$$

unde I_D este curentul descarcarii [A],

U_D este tensiunea descarcarii [V],

t_{ii} este durata descarcarii [s],

f_i este frecventa impulsurilor de curent, considerand ca toate impulsurile au aceeasi energie [Hz].

Pe de alta parte fractiunea puterii repartizata EF este:

$$\frac{W}{2} = Q_s Q_e \quad [J/min] \quad (6)$$

unde Q_e este debitul uzarii [J/mm^3].

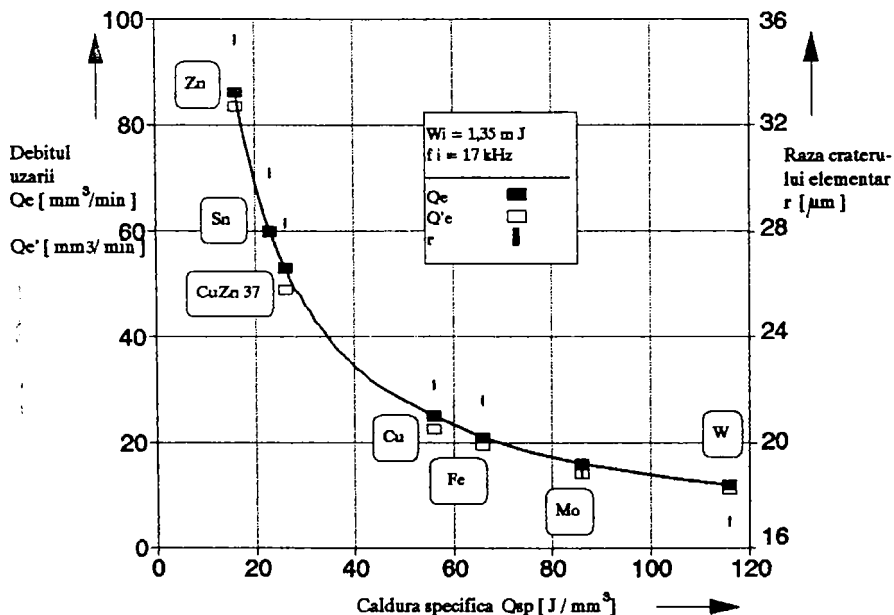


Fig.25. Debitul uzarii si raza craterului elementar de uzura functie de materialul EF.

Considerand un impuls cu parametrii: $I_D=100$ A, $U_D=9$ V, $t_{ii}=1,5 \mu s$, $f_i=17$ kHz, din relatiile (4), (5) si (6) se obtine cate un punct de coordonate (Q_s , Q_e) pentru fiecare material de EF

considerat. Punctele obtinute astfel sunt plasate pe curba din fig.25, care este o hiperbola.

Aceasta reprezinta o ierarhizare a materialelor de electrod d.p.d.v. al rezistentei lor la uzura. Se observa ca metalele W si Mo au stabilitatea cea mai mare la eroziune electrica datorita densitatii, temperaturii de topire si de vaporizare precum si caldurilor latente ridicate, desi au valori mici ale caldurii specifice. De asemenea, se vede ca marimea uzurii depinde de energia impulsului de curent si de frecventa impulsurilor.

In realitate, nu intreaga energie a impulsului este utilizata in scopul prelevării de material. In cele ce urmeaza se va lua in considerare si fractiunea energiei impulsului pierdute cu incalzirea prin conductie a zonei din EF adiacente craterului elementar. Pentru simplificare, se presupune ca zona este de forma unui cilindru de diametru egal cu diametrul craterului (considerat semisferic), avand axa longitudinala comuna cu axa craterului:

$$\frac{W_i}{2} = \frac{W'_i}{2} + \frac{W''_i}{2} \quad [J] \quad (7)$$

unde $W'_i/2$ [J] este fractiunea de energie a impulsului care produce uzura in ipotezele enuntate la paragraful anterior,

$W''_i/2$ [J] este fractiunea de energie a impulsului care incalzeste prin conductie suplimentar EF, fara a modifica starea de agregare.

Volumul craterului elementar, considerat semisferic, este [44]:

$$V_{cr} = \frac{2}{3} \pi r^3 \quad [m^3] \quad (8)$$

unde r este raza craterului [m].

Pentru ca W'_i produce uzura in aceleasi ipoteze simplificatoare de mai sus, ea respecta relatia:

$$W'_i = Q_s V_{cr} \quad [J] \quad (9)$$

unde Q_s este caldura necesara aducerii in stare de vapori a unui volum de 1 mm³ de material de electrod si se calculeaza cu relatia (4).

W''_i rezulta din ecuatia generala a transmisiei caldurii in masa unui conductor electric pe suprafata caruia apare un arc electric de durata scurta [12]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad [^{\circ}\text{C}/\text{s}] \quad (10)$$

unde θ este temperatura [$^{\circ}\text{C}$],

t este timpul [s],

x este distanta masurata in lungul generatoarei cilindrului incalzit prin conductie, de la pata electrodiva la un punct curent din cilindru [m]. In conditiile in care intreaga energie $W''_i/2$ se transmite prin conductivitate [12]:

$$\frac{W''_i}{2} = -\lambda \frac{\pi I}{2} \int_0^t \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad [\text{J}] \quad (11)$$

unde λ este conductibilitate termica [$\text{J}/(\text{m}\cdot\text{s})$].

In conditii de limita, in momentul initial, pe suprafata comuna a cilindrului si craterului, temperatura atinsa de materialul electrodului este egala cu temperatura sa de topire ($x=0, t=0, \theta=T_f-273$), in timp ce la o distanta infinita de aceasta suprafata, materialul atinge temperatura ambianta ($x \rightarrow \infty, t=0, \theta=T_a-273$). Din relatiile (10) si (11) rezulta:

$$\frac{W''_i}{2} = 4 \sqrt{\pi} (T_f-273+T_a) r^2 \sqrt{\rho c \lambda t_{ii}} \quad [\text{J}] \quad (12)$$

Factorul din relatia (12) care depinde de constantele termofizice de material este:

$$\sqrt{P} = (T_f-273+T_a) \sqrt{\rho c \lambda} \quad [\text{J m}^{-2} \text{ s}^{-0,5}] \quad (13)$$

unde P este criteriul Palatnik [1], [2] si arata ca, fractiunea energiei impulsului consumata cu incalzirea masei EF este crescatoare, in timp ce fractiunea energiei care participa la uzare este descrescatoare cu valorile constantelor termofizice ale materialului pentru EF densitate, caldura specifica si conductibilitate termica. Deci un material cu P de valoare mare se uzeaza mai putin, la aceeasi energie a impulsului, decat unul cu P de valoare mica.

Cu relatiile (4), (5), (6), (7), (8), (9) si (12) se calculeaza, pentru regimul electric considerat anterior, debitul uzarii in conditiile pierderii unei fractiuni a energiei impulsului cu incalzirea electrodului, Q'_c [mm^3/min], raza craterului r [m]

(ambele in fig.25) si fractiunea energiei impulsului care produce uzura, W'_i/W_i [%] (fig.26).

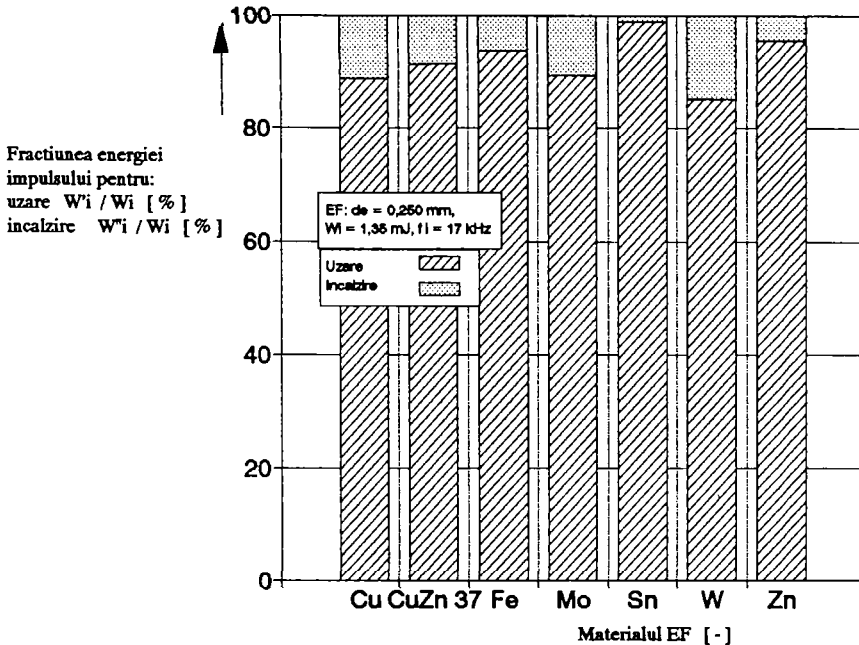


Fig.26. Repartizarea energiei descarcarii pentru uzura si incalzirea EF functie de materialul electrodului.

Se observa ca aceleasi metale, W si Mo, au si in acest caz o comportare la uzura favorabila: pe de o parte craterul de uzura este mai mic decat in cazul celorlalte materiale de electrozi, iar pe de alta parte, fractiunea energiei impulsului care produce uzura este mai mica in detrimentul fractiunii care incalzeste electrodul fara sa-i modifice starea fizica.

3.1.2. Modelarea matematica a incalzirii EF

S-a denumit generic "incalzirea EF" efectele termice in masa electrodului rezultate in urma pierderilor de energie care nu produc prelevare de material. Acestea se compun din: pierderi ale energiei transmise petei electrodice de pe suprafata EF prin conductie termica si pierderi prin disiparea energiei electromagnetice prin

efect Joule-Lenz.

3.1.2.1. Pierderi termice prin conductie

In § 3.1.1 s-a calculat, pentru diferite materiale de electrod, valoarea pierderii energiei impulsului prin conductie in masa EF, a carei fractiune, raportata la energia impulsului, este prezentata in fig.26. Aceasta produce, considerand ca perechea EF-OP nu face schimb de caldura cu exteriorul, o incalzire la o temperatura finala θ_f [°C] a carei marime depinde, pentru un EF de dimensiuni date, de durata "sederii" electrodului in IT t [s], de frecventa si energia impulsurilor si de constantele termofizice ale materialului sau:

$$f_i W_i' t = \rho \pi \frac{d_e^2}{4} l c (\theta_f - \theta_a) \quad [J] \quad (14)$$

unde d_e este diametrul EF,

l este lungimea EF aflat in IT [m].

Daca se prelucreaza o piesa cu inaltimea $h=100$ mm (egala cu l) cu un EF cu rezistenta la uzura minima (Zn) (fig.25), cu viteza de derulare $v_e=100$ mm/s, atunci un element de volum al acestuia se afla in IT timp de 1s. Timpul de "sedere" in IT a electrozilor din alte materiale, ale carui valori sunt prezentate in fig.27, este invers proportional cu debitul uzarii lor. Rezulta ca materialele cu rezistenta mai ridicata la uzare prin electroeroziune pot "sta" un timp mai indelungat in IT, incalzindu-se, deci mai mult [27]. In fig.27 sunt prezentate, pentru fiecare material de electrod, valorile temperaturii finale relative (θ_f/θ_r [%]) la temperatura de topire. Temperatura finala este temperatura la care se incalzesc electrozi din diferite materiale, de diametru 0,250 mm si lungime intre ghidaje 100 mm, rezultata din relatiile (12) si (14), in care s-au luat in considerare valorile proprii fiecarui material de EF ale timpului t [s].

Se observa ca metalele cu constante termofizice de valori ridicate (W, Mo, Fe, Cu) se uzeaza mai putin dar se incalzesc mai mult prin conductie, pe de o parte pentru ca au W''_i/W_i mare (fig.26), iar pe de alta parte pentru ca, uzandu-se cu viteza mai mica, pot "sta" in IT un timp mai indelungat decat celelalte (Sn, CuZn37, Zn). Din relatia (14) se observa ca temperatura de incalzire

a EF creste linear cu energia si cu frecventa impulsurilor.

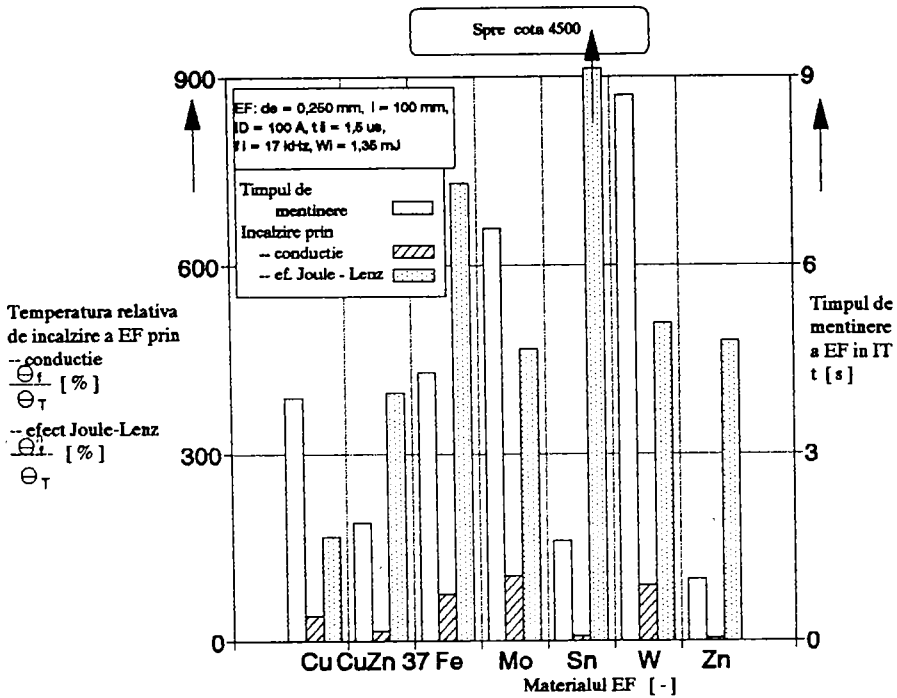


Fig.27. Temperatura relativa de incalzire si timpul maxim admisibil de "sedere" a EF in IT, functie de materialul EF .

3.1.2.2. Pierderi termice prin efect Joule-Lenz al curentului electric

In timpul descarcarii electrice, de durata t_{11} , prin EF trece un curent a carui valoare, pentru un regim electric dat depinde de locul descarcarii in lungul electrodului. Cazul cel mai defavorabil, d.p.d.v. al efectului termic de rezistenta este cel in care descarcarea are loc la mijlocul distantei intre contactele electrice ale EF (fig.28), cand prin fiecare ramura a EF trece un curent egal cu jumatate din valoarea curentului efectiv, I_{ef} [A], al descarcarii.

Energia disipata pe fiecare ramura este:

$$\frac{W_{J-L}}{2} = \frac{I_{ef}^2}{4} \frac{R}{2} t \cos(\varphi t) \quad [J] \quad (15)$$

unde t este timpul propriu de "sedere" in IT [s],

φ este defazajul intre I_D si U_b , care este nul [-].

R este rezistenta electrica a EF de diametru d_e [m], pe lungimea l [m] intre cele doua contacte ale sale, aproximata cu lungimea intre ghidajele sale, si are formula [43]:

$$R = \rho_{el} \frac{l}{\pi \frac{d_e^2}{4}} \quad [\Omega] \quad (16)$$

unde ρ_{el} este rezistivitatea electrica a materialului EF [Ωm].

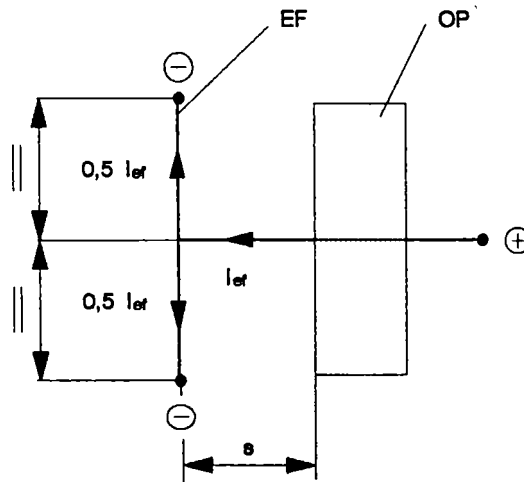


Fig.28. Circuitul electric momentan in IT.

Pentru impulsuri dreptunghiulare de curent curentul efectiv este [45]:

$$I_{ef} = \sqrt{I_i \tau_{ii}} I_D \quad [A] \quad (17)$$

Considerand ca nu sunt pierderi termice in mediul de lucru, aceasta energie disipata incalzeste fiecare ramura a EF la o temperatura θ'_e [$^{\circ}C$], data de relatia [43]:

$$\frac{W_{J-L}}{2} = \rho \pi \frac{d_e^2}{4} \frac{l}{2} c (\theta_f - \theta_a) \quad [J] \quad (18)$$

Pentru un regim electric si dimensiuni ale EF enuntate anterior si aproximand lungimea sa dintre contacte cu inaltimea OP, rezulta din relatiile (15), (16), (17) si (18) temperaturile finale la care se incalzesc electrozii, θ'_f [°C]. S-a considerat aceeasi viteza v_e , de 100 mm/s pentru toti EF. Temperatura θ'_f este proportionala cu factorul $\rho_{el}/(\rho c)$ [$\Omega K^2/N$] care inglobeaza caracteristici de material (fig.29), cu patratalui curentului descarcarii si cu coeficientul de umplere de curent $K_1 = t_{11}/T_1 = t_{11} f_1$ [-] [1], [36], unde T_1 este perioada medie a impulsurilor de curent [s].

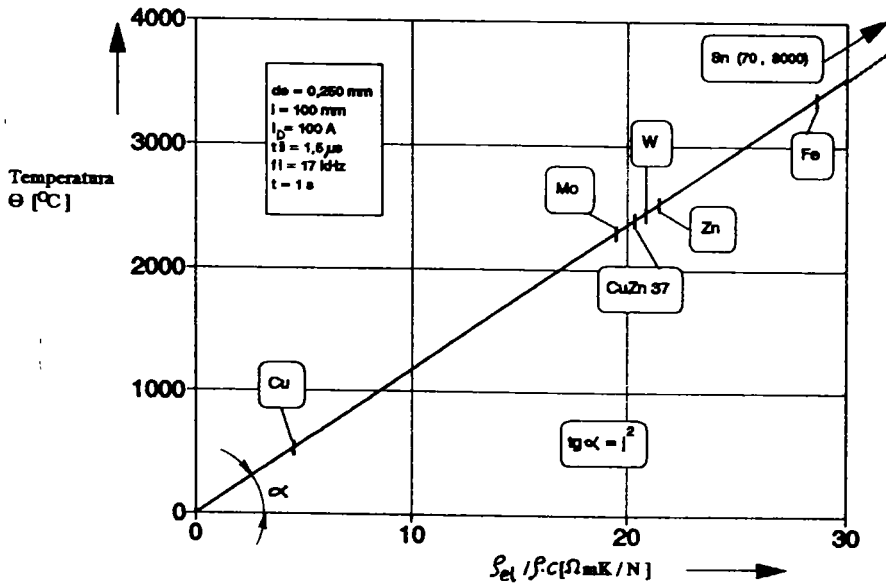


Fig.29. Temperatura de incalzire a EF datorita efectului Joule-Lenz functie de materialul electrodului, caracterizat prin factorul $\rho_{el}/(\rho c)$.

Temperatura dezvoltata prin efect Joule-Lenz in masa EF din W sau Mo este relativ scazuta datorita densitatii lor mari, cea

dezvoltata in EF din Cu este scazuta datorita rezistivitatii sale electrice mici, iar cea dezvoltata in EF din Fe sau Sn este mare datorita rezistivitatii lor electrice mari.

In fig.27 sunt prezentate valorile temperaturii finale de incalzire a electrozilor, θ''_i [°C] relative la temperatura de topire a fiecarui material de electrod considerat, unde θ''_i este calculata luand in considerare vitezele diferite de deplasare axiala a electrozilor in timpul prelucrarii, functie de rezistenta lor la uzare.

3.1.2.3. Efectul pelicular ("Skin") al curentului electric

La frecvente mari ale curentului electric apare efectul pelicular, care determina o repartitie neuniforma a densitatii de curent j [A/m²] in sectiunea transversala a conductorului [12], [46] (sarcinile electrice se aglomereaza spre periferia conductorului care trebuie sa suporte o mare parte a densitatii de curent, fiind mai puternic solicitata electric si termic) dupa legea [12]:

$$j(x) = j_0 e^{-\frac{a}{x}} \quad [A/m^2] \quad (19)$$

unde $x \in [d_w/2; 0]$ (fig.30) este distanta [m],

j_0 este densitatea de curent la suprafata conductorului [A/m²],

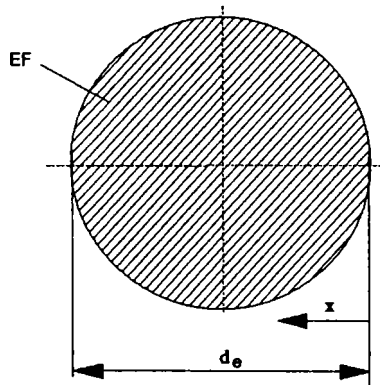


Fig.30. Sectiunea transversala a EF.

$$a = \sqrt{\frac{\rho_{el}}{\pi \mu_0 \mu_r f_i}} \quad (20)$$

unde μ_0 este permeabilitatea magnetica relativa a materialului EF [-],

μ_r este permeabilitatea magnetica a vidului [N/A^2].

Limita inferioara a frecventei curentului pentru care apare efectul pelicular este [12]:

$$f_p = 100 \frac{\rho_{el}}{\pi \mu_0 \mu_r} \quad [Hz] \quad (21)$$

Pericolul maxim de aparitie a efectului pelicular este la EF din Cu, material care are raportul ρ_{el}/μ_r minim. Pentru un EF din Cu, din relatia (21) rezulta $f_p=14,7$ MHz. Aceasta valoare este cu unul pana la trei ordine de marime mai mare decat frecventele uzuale la prelucrarea EEF, deci nu exista pericolul aparitiei efectului pelicular.

Totusi frecventa ridicata a curentului si apropierea dintre EF si OP determina o repartitie neuniforma a densitatii de curent in sectiunea transversala a EF prin asa-numitul "efect de proximitate" [12], care va fi studiat la paragraful referitor la fortele electromagnetice. Acesta conduce la o incarcare termica si electrica mai accentuata in anumite zone ale sectiunii transversale a EF.

Solicitarea termica prin efect Joule-Lenz este cea mai dura (dintre toate solicitarile pe care le suporta EF), afectand cel mai pregnant integritatea electrodului in timpul prelucrarii, intrucat ea depinde parabolic de valoarea curentului descarcarii, care este ridicata (sute de amperi).

3.1.3. Modelarea matematica a dilatarii EF

Caldura dezvoltata in masa EF din IT, indiferent de provenienta, modifica prin dilatare volumul acestuia, afectand prin aceasta precizia prelucrarii.

Cresterea maxim admisa a diametrului EF in timpul prelucrarii fiind de $1 \mu m$ [10], [26], se impun limite drastice pentru temperatura maxima pe care o poate atinge acesta. In fig.31

se prezinta valorile acestei temperaturi pentru un EF de diametru $d_e=0,250$ mm, functie de materialul electrodului (α este coeficient de dilatare termica liniara [K^{-1}]).

Datorita dilatarii, EF se alungeste. Temperaturilor limita din fig.31 le corespunde, daca electrozii au o lungime de 100 mm, o alungire de aproximativ 0,3 mm independent de materialul studiat, care are ca efect incovoierea lor cu o sageata de 2,5-3,5 mm. Dilatarea reprezinta inca un motiv de limitare a temperaturii EF in timpul prelucrarii.

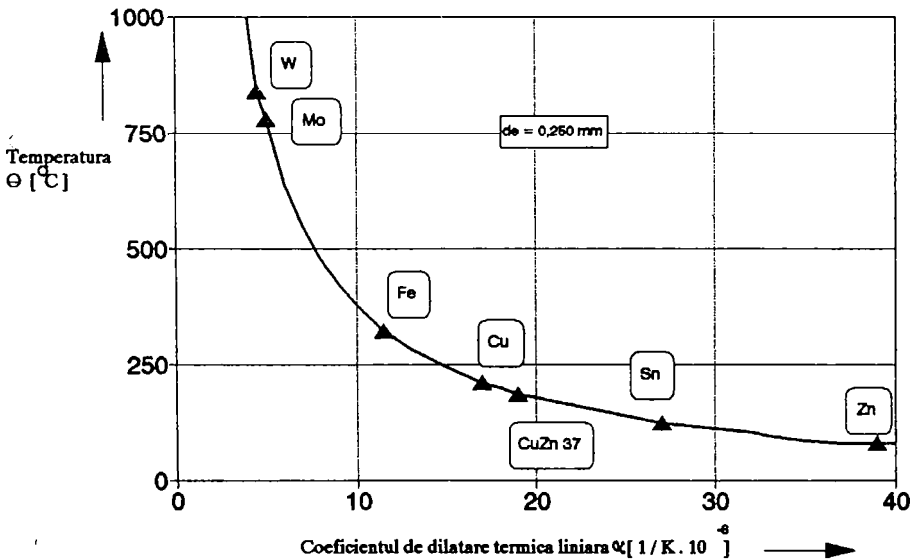


Fig.31. Temperatura maxim admisa in masa EF, corespunzatoare unei dilatare termice a diametrului sau de $1 \mu m$, functie de materialul electrodului, caracterizat de coeficientul de dilatare termica liniara.

3.1.4. Concluzii practice care reies din modelarea matematica a capacitatii portante termice a EF

Intrucat temperaturile θ'_e si θ''_e dezvoltate in EF sunt ridicate, electrodul (a carui capacitate portanta termica intrinseca este depasita din necesitati de maximizare a productivitatii prelucrarii EEF) neputand prelua caldura in

intregime (spre deosebire de cazul prelucrării electroerozive cu electrod masiv), trebuie să se acționeze (considerând că EF este dat) asupra parametrilor de regim (capacitate portanta termică extrinsecă): Capacitatea portanta termică intrinsecă poate fi mărită prin utilizarea unor materiale de electrod având combinații ale constantelor termofizice de valori extreme, în sensul amintit mai sus (λ , λ , T_r , T_v , ρ_1 , λ , ρ , c). Întrucât nu există nici un material "dominant" care să aibă simultan valori extreme ale tuturor constantelor termofizice, nu există nici un material ideal pentru construcția EF. O ierarhizare a materialelor pentru EF, funcție de rezistența lor la EEF, deci de capacitatea lor portanta termică intrinsecă, se poate efectua după metode matematice relativ laborioase [47], [48], [49], [50], [51], care să țină cont de valorile și de importanța acestor constante de material. Din experiența teoretică și practică a autorului se constată că o ierarhizare rapidă, facilă și suficient de fidelă realității a materialelor pentru construcția EF se poate efectua funcție de modulul lor de elasticitate E [N/m^2] (fără a exista o explicație fenomenologică): cu cât modulul de elasticitate al unui material este mai mare, cu atât stabilitatea sa la EEF este mai mare. Dar utilizarea unor materiale de electrod având primele 4 constante termofizice, din cele enumerate mai sus, de valori ridicate (în scopul creșterii capacității portante a EF), ar constitui o măsură aflată în conflict cu cea care ar trebui să conducă la productivități ridicate ale prelucrării EEF: astfel W, Mo, Fe asigură o capacitate portanta termică intrinsecă ridicată, dar o productivitate scăzută [9], [18]. O modalitate de soluționare a acestei situații antagonice ar consta în construirea unor EF multistrat (un miez învelit concentric cu un alt material), în care o componentă (miezul) ar avea funcțiuni în asigurarea capacității portante termice, în timp ce cealaltă componentă ar asigura o productivitate mărită, simultan cu o protecție termică a miezului. O altă modalitate de rezolvare a problemei rezidă în căutarea rezervelor pentru creșterea capacității portante termice și în latura sa extrinsecă.

Capacitatea portanta termică extrinsecă a EF poate fi mărită (în condițiile obținerii unei productivități impuse prelucrării EEF) prin perfecționarea eficienței evacuării căldurii din IT, care se poate realiza prin următoarele modalități:

-limitarea superioară a coeficientului de umplere a

impulsurilor de curent K_{11} [-],

-cresterea eficientei circulatiei LD in IT,

-corelarea vitezei de deplasare axiale a EF v_e [m/s] nu numai cu uzura, ci si cu cantitatea de caldura disipata in EF.

3.2. Capacitatea portanta mecanica

In timpul prelucrării EEF electrodul suferă modificări ale formei, dimensiunilor și poziției sale față de OP, care nu sunt rezultatul acțiunii termice (eventual sunt favorizate de dezvoltarea caldurii în IT), ci al unor solicitări mecanice. Cauzele acestor solicitări sunt forțele de natură electrostatică, electromagnetică, hidraulică și mecanică, care se dezvoltă în procesul electroeroziv [4], [27]. Efectele lor finale constau în inducerea unei imprecizii a prelucrării EEF. De aceea ele trebuie limitate, mai ales la prelucrări de finisare. În ansamblu, se poate afirma că inerția (din cauze dependente de electrod sau de ceilalți parametri ai regimului de prelucrare) cu care EF suferă deformări și deplasări nedorite, datorate solicitărilor mecanice care apar în procesul electroeroziv, este o măsură a capacității sale portante mecanice. Creșterea capacității portante mecanice a EF se poate face, fie prin micșorarea și/sau echilibrarea solicitărilor, fie prin limitarea deformațiilor și deplasărilor care provin din acestea.

Pentru o abordare cât mai completă a problemei, în prezentul capitol se vor studia întâi factorii de influență a forțelor enumerate, apoi efectele acestora asupra comportării EF în timpul prelucrării.

Modelarea matematică a forțelor dinamice s-a efectuat la nivelul impulsului singular, după care, forțele astfel obținute au fost transformate în forțe echivalente prin modificarea bazei de timp. Pentru toate forțele echivalente a fost aleasă baza de timp egală cu perioada impulsurilor de tensiune.

3.2.1. Modelarea matematică a forțelor electrostatice

3.2.1.1. *Forțe perpendiculare pe axa longitudinală a EF*

Pe durata impulsului de tensiune (fig.12), când EF și OP sunt încărcate cu sarcini contrare și sunt izolați electric

intre ei, se genereaza un camp electrostatic in IT. Astfel ansamblul EF-LD-OP formeaza un condensator. Asupra armaturilor sale, EF si OP, actioneaza o forta electrostatica de atractie pe directia Oy (fig.20), data de relatia [4], [52]:

$$F_{es} = \frac{U^2}{2} \frac{dC}{dy} \quad [N] \quad (22)$$

unde U este tensiunea intre EF si OP [V],

C este capacitatea condensatorului EF-LD-OP [F],

y este deplasarea armaturilor in directia fortei F_{es} [m].

3.2.1.1.1. EF in afara fantei (fig.20.a)

Pentru un condensator cu o armatura cilindrica (EF) si una plana (OP), se poate scrie formula capacitatii [4], [52]:

$$C = \frac{2 \pi \epsilon_0 \epsilon_r l}{\ln \left[\frac{S}{r} + 1 + \sqrt{\left(\frac{S}{r} + 1 \right)^2 - 1} \right]} \quad [F] \quad (23)$$

unde ϵ_0 este permitivitatea vidului [F/m].

ϵ_r este permitivitatea relativa a apei [-],

r este raza EF [m],

s este grosimea IT [m],

l este lungimea EF intre ghidaje [m], care s-a aproximat cu inaltimea h [m] a OP.

Fora F_{es} , fiind constanta in lungul EF, va genera o sarcina distribuita [53]:

$$q_{es} = \frac{F_{es}}{l} \quad [N/m] \quad (24)$$

Din relatiile (22),(23),(24) rezulta in final:

$$q_{es} = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r U^2}{r \sqrt{\left(\frac{S}{r} + 1 \right)^2 - 1} \ln \left[\frac{S}{r} + 1 + \sqrt{\left(\frac{S}{r} + 1 \right)^2 - 1} \right]} \quad [N/m] \quad (25)$$

In fig.32 se prezinta variatia sarcinii distribuite datorate fortei electrostatice functie de raza EF, r [m]. Intrucat aceasta este crescatoare cu r, este bine ca la prelucrari EEF cu regimuri de finisare, cand trebuie limitata cat mai mult deformarea

axei EF, sa se utilizeze electrozi de diametre cat mai mici.

In fig.33 se prezinta variatia sarcinii distribuite datorate fortei electrostatice, functie de grosimea IT, s [m]. Se observa ca ea este crescatoare cu micsorarea grosimii IT.

In momentul initial al impulsului de tensiune, pentru o grosime s_0 [m] a IT, rezulta o forta electrostatica initiala, q_{es0} [N/m]. Aceasta forta determina deplasarea EF catre OP, deci o micsorare a IT de la valoarea s_0 la o valoare s_1 ($s_1 < s_0$), avand ca efect cresterea fortei de la q_{es0} la q_{es1} ($q_{es1} > q_{es0}$), s.a.m.d. Deci, desi tensiunea U care o genereaza este constanta in timp, forta electrostatica este variabila, determinand o acceleratie variabila [54]:

$$a(s) = \frac{F_{es}}{m_{EF}} = \frac{q_{es}}{\rho \pi r^2} \quad [m/s^2] \quad (26)$$

unde m_{EF} este masa portiunii de EF aflata in IT [kg].

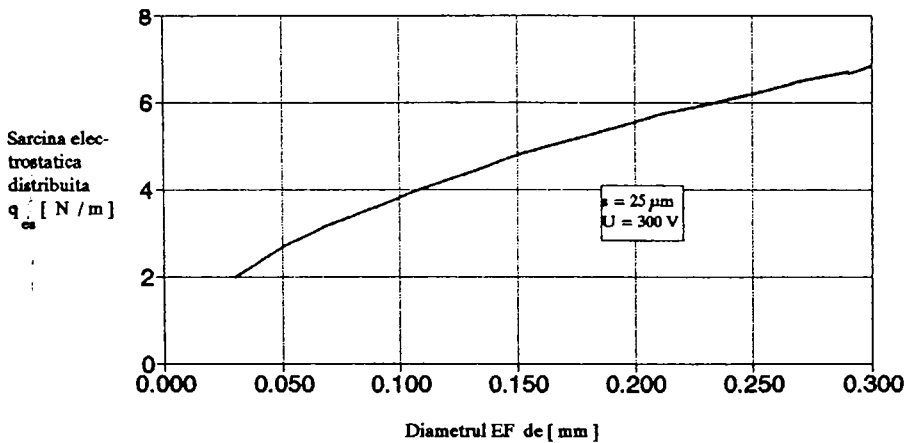


Fig.32. Variatia sarcinii electrostatice distribuite care incarca EF, plasat in afara fantei, functie de diametrul sau.

Sarcina q_{es} fiind crescatoare in timp, rezulta ca si acceleratia $a(s)$, este crescatoare in timp. Apare, deci, teoretic pericolul contactului intre EF si OP (scurtcircuit), cu precadere in timpul de amorsare, t_a , a descarcarii, cand tensiunea are valori de sute de volti, fata de cativa volti in timpul descarcarii.

Spatiul parcurs de EF spre OP in timpul de amorsare, este solutia s [m] a ecuatiei [54]:

$$\frac{d^2 s}{dt^2} = a(s) \Big|_{t=0}^{t=t_a} \quad (27)$$

Rezolvand-o iterativ, pentru o tensiune de amorsare de 300 V, un IT de grosime initiala 25 μm si un timp de amorsare de 1 μs (exagerat de mare), rezulta ca deplasarea unui EF spre OP, indiferent de materialul sau, avand diametrul 0,250 mm, este neglijabila (sub 0,1 μm).

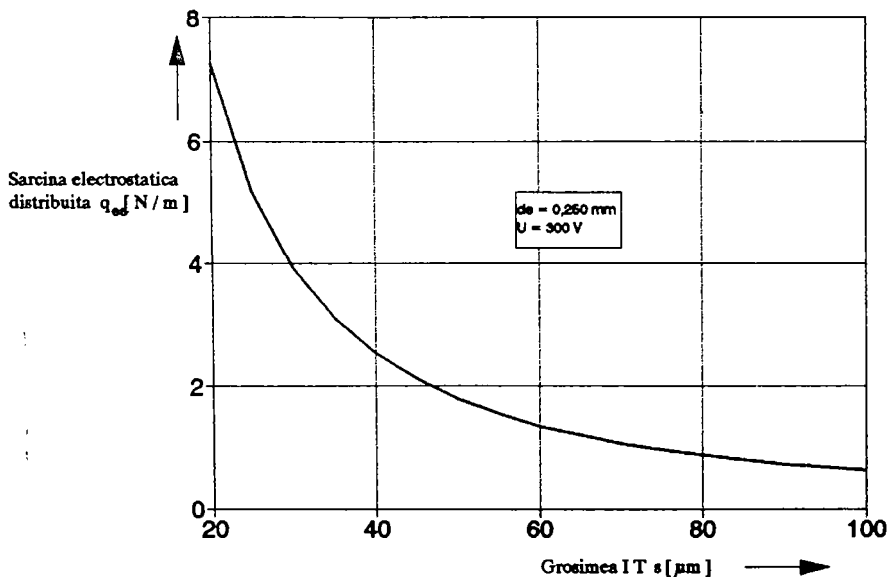


Fig.33. Variatia sarcinii electrostatice distribuite care incarca EF, plasat in afara fantei, functie de grosimea IT.

3.2.1.1.2. EF in fanta (fig.20.b)

Sistemul EF-LD-OP formeaza un condensator pentru care forta de atractie dintre armaturi nu se poate determina analitic. Cazul este intermediar cazurilor:

a. condensator cu o armatura cilindrica si una plana (analizat anterior) (fig.34.a),

b. condensator cilindric excentric (fig.34.b), care este, de asemenea, analitic determinabil.

Capacitatea condensatorului cilindric excentric este [4], [52]:

$$C = \frac{2 \pi \epsilon_0 \epsilon_r l}{\ln \frac{(\sqrt{a^2 - R^2} + y + r - a) (\sqrt{a^2 - R^2} + a + R)}{(\sqrt{a^2 - R^2} - y - r + a) (\sqrt{a^2 - R^2} - a + R)}} \quad [F] \quad (28)$$

unde R [m], r [m] si y [m] au semnificatiile din fig.34.b

$$a = \frac{y^2 + R^2 - r^2}{2y} \quad [m] \quad (29)$$

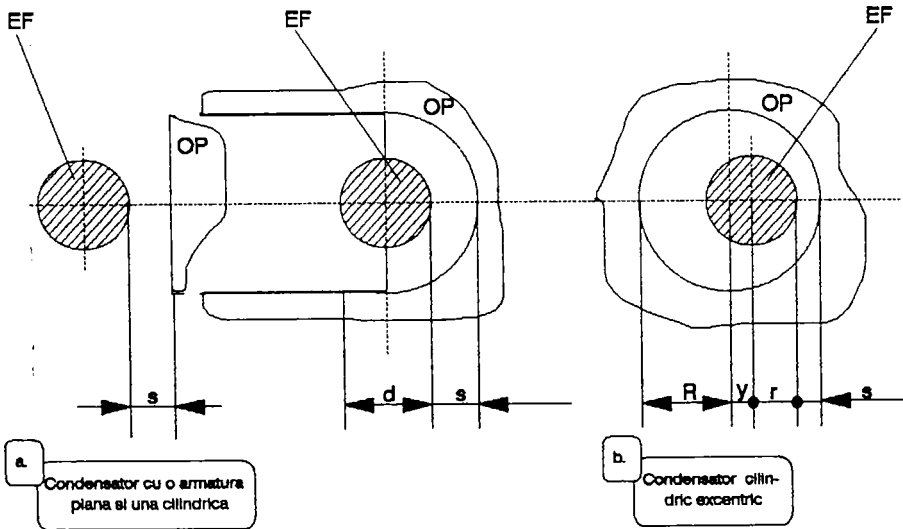


Fig.34. Tipuri de condensatoare, functie de pozitia relativa EF-OP.

Din relatiile (22), (24), (28) si (29) rezulta:

$$Q_{es} = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r R r U^2}{b \sqrt{a^2 - R^2} (a y - R^2 - y \sqrt{a^2 - R^2}) \ln^2(b)} \quad [N/m] \quad (30)$$

unde:

$$b = \frac{y^2 - (R+r)^2 + 2y\sqrt{a^2 - R^2}}{y^2 - (R+r)^2 - 2y\sqrt{a^2 - R^2}} \quad [-] \quad (31)$$

In fig.35 se prezinta variatia sarcinii distribuite datorate fortei electrostatice functie de tensiunea care o produce, pentru cazurile a. si b. Variatia q_{es} reale, care apare intre EF in fanta si OP, este o curba plasata intre cele doua curbe reprezentate.

In timpul amorsarii descarcarii, cand tensiunea are valori de sute de volti, forta electrostatica distribuita atinge valori mari, proportionale cu patratul tensiunii si cu inaltimea IT (care s-a aproximat cu 1 [m]). Ea nu depinde de materialul EF. Pentru un EF de dimensiuni date, micșorarea acestei forte se poate face prin reducerea la limita a tensiunii de amorsare si, mai ales, prin reducerea timpului de amorsare. Pentru aceasta impulsul de tensiune trebuie sa aibe o panta puternic crescatoare si in IT trebuie create conditii care sa faciliteze strapungerea.

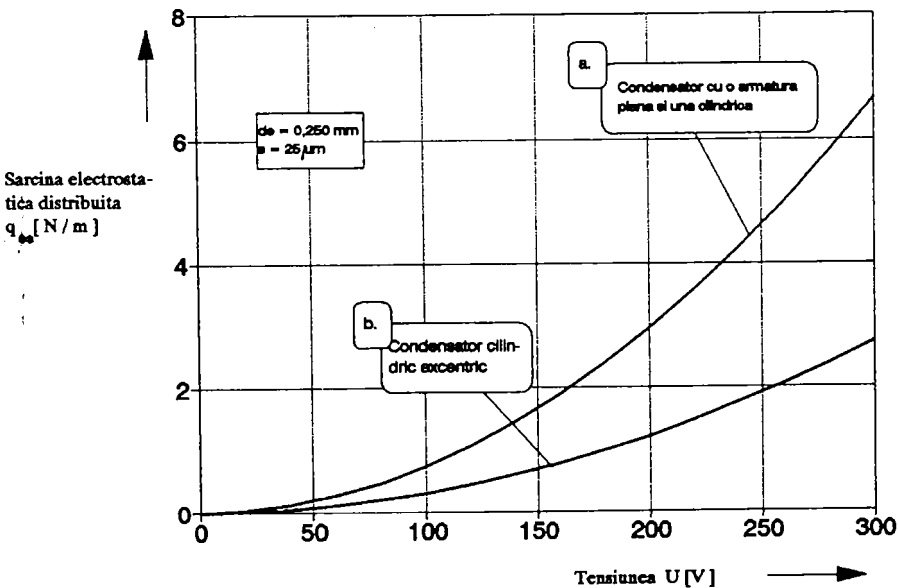


Fig.35. Sarcina electrostatica distribuita care incarca EF, functie de pozitia relativa EF-OP si de valoarea tensiunii electrice pe IT.

Fora electrostatica care apare in cazul EF in afara fantei este mai mare decat cea care apare in cazul EF in fanta.

3.2.1.2. Forțe în lungul axei longitudinale a EF

La deplasarea EF cu viteza v_e , apare o forță electrostatică F_{es} în lungul axei Oz, care se opune intrării electrozudului în IT, a cărei formulă este [52], [55]:

$$F_{es} = \frac{U^2}{2} \frac{dC}{dz} \quad [N] \quad (32)$$

unde z [m] este deplasarea EF în lungul axei sale longitudinale, datorate forței F_{es} ,

Asimilând cazul real cu un condensator cilindric simetric, capacitatea sa este [52], [55]:

$$C = \frac{2 \pi \epsilon_0 \epsilon_r l}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)} \quad [F] \quad (33)$$

cu notațiile din fig.34.b. Din relațiile (32) și (33) rezultă:

$$F_{es} = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r U^2}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)} \quad [N] \quad (34)$$

În fig.36 se prezintă variația acestei forțe, care pentru regimuri uzuale de prelucrare EEF, are valori în spațiul dintre cele două curbe reprezentate. Se vede că, forța electrostatică în lungul EF este neglijabilă.

3.2.2. Modelarea matematică a forțelor electromagnetice

În timpul descărcării, de durată t_{11} [s], când EF și OP, aflați la o distanță s [m] unul de altul, sunt străbătuți de curent (fig.37), apar forțe electromagnetice, care, teoretic, sunt uniform distribuite pe lungimea celor doi conductori.

Analitic, mărimea forței electromagnetice dintre doi conductori paraleli străbătuți de curent electric se poate calcula numai dacă aceștia sunt suficient de departați unul de altul, pentru evitarea apariției efectului de proximitate [12] și numai dacă descărcarea se produce la mijlocul distanței dintre contactele C (calcul care este acoperitor pentru valoarea deformării axei EF).

Forțele electromagnetice acționează pe direcția Oy, (fig.20) sensul lor depinzând de proprietățile magnetice ale materialului OP [12]:

1. amagnetic-respingere
2. feromagnetic-atractie
3. magnet permanent-aleator.

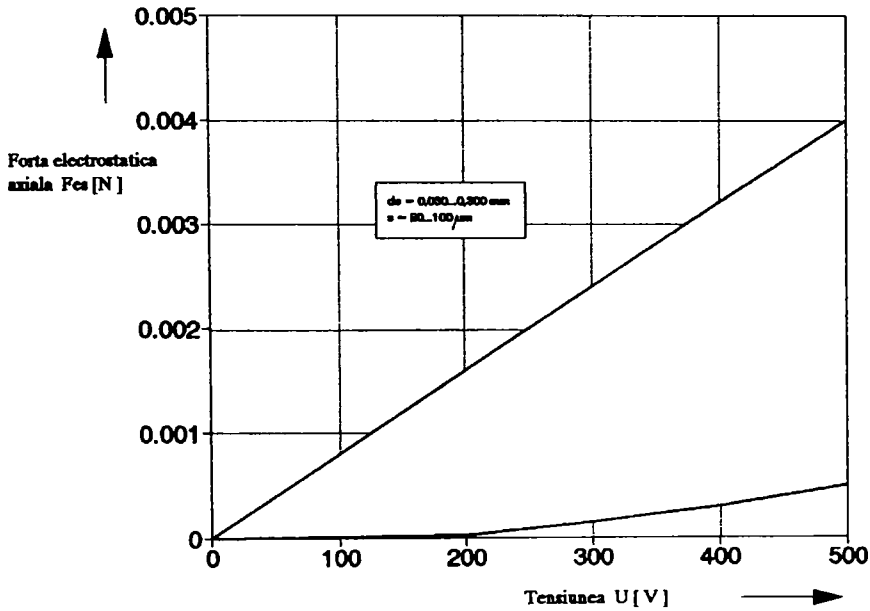


Fig.36. Locul geometric al valorilor posibile ale fortei electrostatice care incarca EF axial.

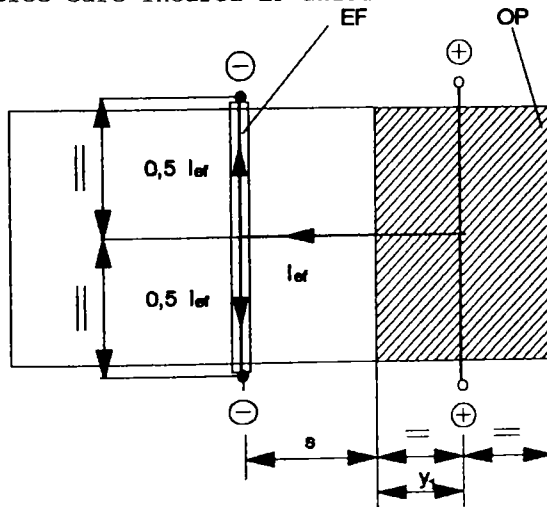


Fig.37. Circuitul electric momentan in IT.

In toate cazurile de prelucrare EEF apare efectul de proximitate, care este crescator cu apropierea EF de OP, s [m], cu rezistenta electrica, R [Ω] si cu frecventa curentului, f_1 [Hz] si care provoaca o crestere aparenta a rezistentei electrice a electrozudului si repartizarea neuniforma a curentului in sectiune [12], [46], [56]. Pentru evaluarea analitica a amplitudinii acestui efect, nu exista relatii matematice, iar cercetarile experimentale s-au facut in conditii particulare. Factorul de crestere a rezistentei $\phi(f_1, R, s)$ [-], datorita efectului de proximitate, fata de rezistenta in conditii normale isi face simtita prezenta pentru:

$$\frac{\sqrt{I_1}}{R} > 50 \frac{\sqrt{\text{Hz}}}{\Omega}, \quad (35)$$

atingand valoarea 2 cand raportul de mai sus ia valori in domeniul [300, 400] $\sqrt{\text{Hz}/\Omega}$ [12]. In cazul prelucrarii EEF, raportul este de ordinul a 1000...6000 $\sqrt{\text{Hz}/\Omega}$ -pentru EF si de ordinul 10^{10} ... 10^{14} $\sqrt{\text{Hz}/\Omega}$ -pentru OP. Efectul de proximitate la prelucrarea EEF, exprimat cantitativ prin factorul $\phi(f_1, R, s)$, care este crescator cu raportul $\sqrt{f_1}/R$, este, deci, mai evident decat in alte cazuri (studiate in literatura) si influenteaza forta electromagnetica astfel: creste forta de respingere si micsoreaza forta de atractie.

3.2.2.1. Materialul OP - amagnetic

Intre EF si OP, in timpul descarcarii, apare o sarcina electromagnetica distribuita, q_{em} [N/m], de respingere, care, la un IT de grosime s [m], aproximand distanta intre contacte, l [m], cu inaltimea, h [m], a OP, este [12]:

$$q_{em} = \frac{\mu_0 \mu_r}{16 \pi} \frac{I_D^2}{\frac{d_e}{2} + s + y_1} \phi(f_1, R, s) \quad \text{[N/m]} \quad (36)$$

unde μ_0 este permeabilitatea magnetica a apei [N/A²],
 μ_r este permeabilitatea magnetica relativa a apei [-],
 I_D este curentul descarcarii [A],
 y_1 rezulta din fig.37 [m].

3.2.2.2. Materialul OP - feromagnetic

In acest caz, avand in vedere raportul de volume intre EF si OP, acesta din urma poate fi inlocuit cu un conductor imagine (fig.38), plasat la o distanta $2s$ de EF, prin care trece un

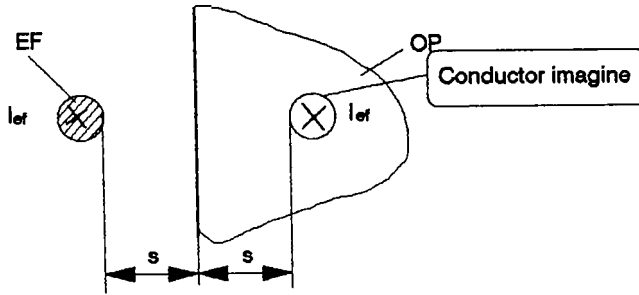


Fig.38. Echivalarea d.p.d.v. electric a OP din material feromagnetic cu un conductor imagine.

curent I_e [A] in acelasi sens ca prin EF. Ca urmare apar forte electromagnetice de atractie, a caror marime depinde, in primul rand, de schema de prelucrare: in afara -sau in fanta.

3.2.2.2.1. EF in afara fantei

In acest caz apare o forta electromagnetica de atractie, al carei modul este [12], [57]:

$$F_{em} = \frac{\mu_0 \mu_r}{32 \pi} \frac{I_D^2}{\left(\frac{d_e}{2} + s\right)} \phi(f_i, R, s) \quad [N/m] \quad (37)$$

3.2.2.2.2. EF in fanta

In acest caz apare o forta electromagnetica de atractie, al carei modul este dat de relatia [12], [57]:

$$q_{em} = \frac{\mu_0 \mu_r}{16} \frac{I_D^2}{\frac{d_e^2}{2} + s} \phi(f_i, R, s) \quad [N/m] \quad (38)$$

In fig.39 se prezinta variatia sarcinii distribuite generate de forta electromagnetica functie de diametrul EF si de grosimea IT,

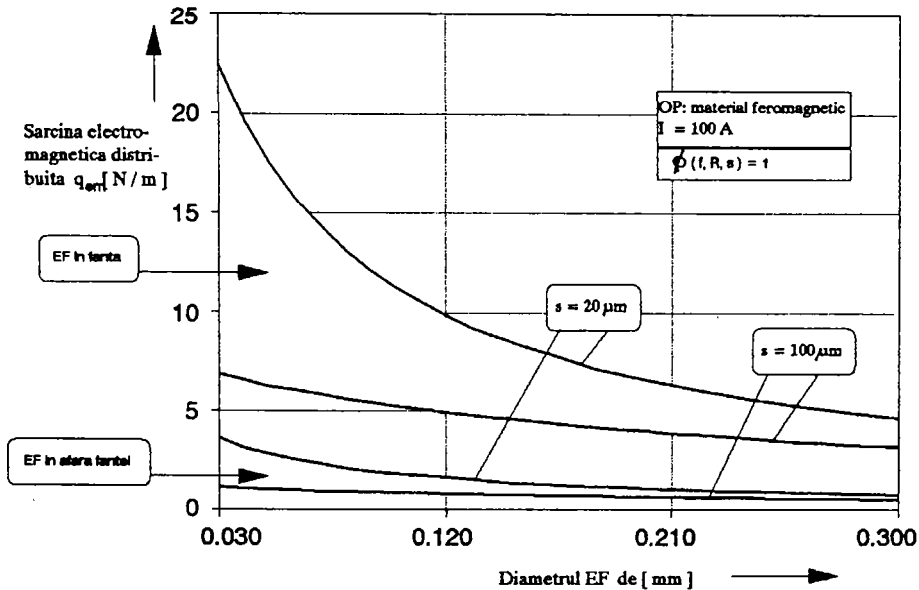


Fig.39. Locurile geometrice ale valorilor posibile ale sarcinii distribuite electromagnetice la prelucrarea dupa schema EF in afara fantei, respectiv, EF in fanta.

la prelucrarea unui OP dintr-un material feromagnetic dupa schemele EF in afara fantei (relatia (37)) si EF in fanta (relatia (38)), fara a se considera efectul de proximitate. Se observa ca pentru un curent al descarcarii dat, forta electromagnetica poate fi vizibil micorata prin cresterea grosimii IT si/sau a diametrului EF, pentru orice material al OP si orice pozitie relativa EF-OP. Dar (mai ales la prelucrarea suprafetelor cu raze mici de racordare sau a celor cu rugozitate mica) aceste cresteri nu sunt proprii regimurilor de prelucrare la finisare. In acest caz, micorarea fortei electromagnetice se poate efectua prin una din actiunile urmatoare:

-sa se prelucreze dupa schema EF in afara fantei, care asigura

o forta de 6 ori mai mica decat in cazul prelucrării după schema EF în fanta (fig.39),

-sa se micșoreze curentul descărcării, simultan cu mărirea numărului de treceri de finisare (conform relațiilor (36), (37) și (38) forța electromagnetică crește proporțional cu pătratul curentului),

-sa se micșoreze durata impulsului de curent.

Se menționează că, în cazul prelucrării unui OP dintr-un material amagnetic, forța electromagnetică de respingere este mult diminuată datorită termenului y_1 [m], care depinde de dimensiunile OP și care are în general o valoare mult mai mare decât termenii d și s (relația (36)), dar apoi este multiplicată nesemnificativ de efectul de proximitate. Forța electromagnetică de atracție care apare în timpul prelucrării materialelor feromagnetice este diminuată de efectul de proximitate. Pentru amplificarea acestui efect, în scopul echilibrării forțelor care încarcă electrozudul, se recomandă prelucrarea cu frecvențe mari.

3.2.2.3. Materialul OP - magnet permanent

Între curentul din EF și inducția magnetică, \vec{B} [T], a OP apare o forță electromagnetică pe durata impulsului de curent,

$$\vec{F}_{em} = \frac{I_D}{2} (\vec{l} \times \vec{B}) \quad [N] \quad (39)$$

a cărei valoare maximă, pentru un curent și o mărime a inducției date, este atinsă în cazul în care \vec{B} este perpendiculară pe axa longitudinală a EF și descărcarea în impuls are loc la mijlocul înălțimii IT. Pentru jumătate din lungimea EF, forța electromagnetică generată de fiecare impuls de curent are modulul (40) [43]:

$$F_{em} = \frac{I_D}{2} \frac{l}{2} B \sin(\vec{l}, \vec{B}) \quad [N] \quad (40)$$

unde l este lungimea EF [m], considerată un vector paralel cu axa longitudinală a electrozudului, având sensul de parcurgere a curentului prin EF.

Dacă cei doi vectori sunt perpendiculari (cazul cel mai defavorabil d.p.d.v. al mărimii forței electromagnetice), atunci

modulul sarcinii distribuite pe lungimea l [mm] a EF, provenit din relatia (40), este: $q_{em}=0,5 I_p B$ [N/m]. La fiecare impuls electric, in lungul EF, pe cele doua ramuri ale sale strabatute de curent in sensuri opuse (indreptat divergent, de la locul descarcarii spre cele doua contacte electrice), forta electromagnetica are doua sensuri opuse, functie de sensul curentului prin electrod, producand undularea electrodului.

Pe de alta parte, \bar{F}_{em} are orientare aleatoare, care depinde de orientarea vectorului inductie magnetica a OP (fig.40).

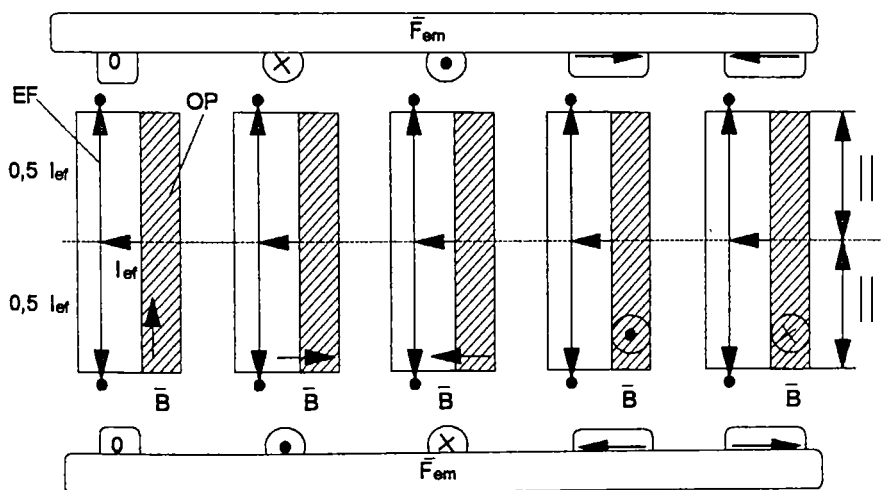


Fig.40. Directia si sensul fortei electromagnetice la prelucrarea EEF a unui magnet permanent, functie de directia si sensul vectorului inductie magnetica a OP.

La prelucrarea EEF cu regimul amintit anterior a unui magnet permanent avand inductia $B=1,2$ T, rezulta o sarcina distribuita maxima $q_{em}=1,5$ N/m.

3.2.3. Modelarea matematica a fortelor produse de lichidul dielectric

Fortele produse de lichidul dielectric asupra EF sunt de natura:

-hidrodinamica-datorata miscarii relative intre EF si LD [42],

[58], [59], [60], [61], [62]

-hidrostatica -datorata contactului intermitent intre EF si LD [4], [43].

3.2.3.1. *Forte hidrodinamice*

Lichidul dielectric (apa deionizata) este, in general, introdus in IT si/sau aspirat din IT sub forma de jet coaxial cu EF. Fortele hidrodinamice care apar in timpul prelucrarii EEF, se datoresc rezistentei pe care EF, caracterizat de o suprafata portanta, o opune curentului de apa. Aceste forte au valori importante in spatii mici, acolo unde viteza de curgere a apei este mare [58], [59]. De aceea, in prezentul capitol se trateaza fortele numai pentru cazul EF in fanta. Studiul se face pentru injectie simetrica. Ca directie, fortele hidrodinamice sunt orientate in lungul EF (Oz) si in plan perpendicular pe axa Oz.

3.2.3.1.1. *Forte in lungul axei Oz*

Pentru calculul acoperitor al fortei in directia Oz, ansamblul EF-OP se aproximeaza cu un cilindru plin introdus intr-un tub cilindric, coaxial cu acesta, prin spatiul ramas liber patrundand, dinspre cele doua extremitati ale tubului apa cu viteza v_x [m/s] (fig.41). Fiecare jet de apa actioneaza pe o jumatate din inaltimea IT.

Viteza apei la suprafata EF, in lungul IT este [59], [61]:

$$v = A r^2 + B \ln(r) + C \quad [m/s] \quad (41)$$

unde r este raza EF [m].

Pentru jumatate din inaltimea IT, pe care actioneaza fiecare jet de apa, coeficientii A [$m^{-1} s^{-1}$] si B [m/s] sunt dati de relatia (42) [59], [61]:

$$A = - \frac{\Delta p}{4 \rho_a v \frac{l}{2}} \quad [m^{-1} s^{-1}], \quad B = A \frac{R^2 - r^2}{\ln(\frac{R}{r})} \quad [m/s] \quad (42)$$

unde ρ_a este densitatea apei [kg/m^3],

v este vascozitatea cinematica a apei [m^2/s],

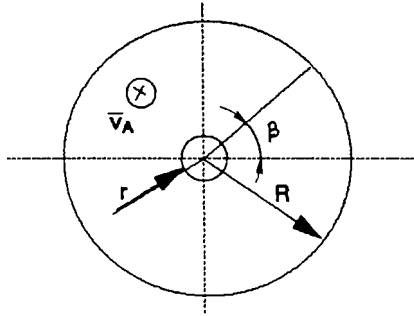


Fig.41. Schema explicativa pentru calculul fortei hidrodinamice in lungul EF.

Δp este pierderea de presiune in lungul tubului [N/m^2]:

$$\Delta p = \frac{8 \varrho_a v \frac{l}{2}}{R^2 + r^2 - \frac{(R^2 - r^2)}{\ln(\frac{R}{r})}} \frac{Q}{\pi (R^2 - r^2)} \quad [N/m^2] \quad (43)$$

unde Q este debitul apei la intrarea in IT [m^3/s],

R este raza tubului [m].

Tensiunea hidraulica este [58], [59]:

$$\tau = \varrho_a v \frac{dv}{dr} \quad [N/m^2] \quad (44)$$

iar forta hidrodinamica la suprafata cilindrica a EF este [58], [59]:

$$F_h = 2 \pi \int_0^{\frac{l}{2}} \int_0^R r \tau \, dr \, dt \quad [N] \quad (45)$$

Pentru un EF de diametru dat si o grosime data a IT, aproximand $s=R-r$, din relatiile (41), (42), (43), (44) si (45) rezulta ca F_h este proportionala cu viteza v_A de intrare a apei in IT (fig.42) si ca depinde de temperatura apei (prin intermediul viscozitatii), de diametrul EF, de grosimea IT si de diametrul duzelor d_b [m]. Valorile vitezei v_A din fig.42 s-au calculat pentru o duza cu orificiul circular de diametru $d_b=3,5$ mm [27], [31].

Practic, in cazul EF in fanta forta F_h este mai mica decat cea rezultata din calculele de mai sus, pentru ca sectiunea transversala a IT (real) este mai mare decat cea a interstitiului din

fig.41.

Forța hidrodinamică în lungul EF nu depinde de materialul electrodului, ci doar de dimensiunile sale, de debitul lichidului

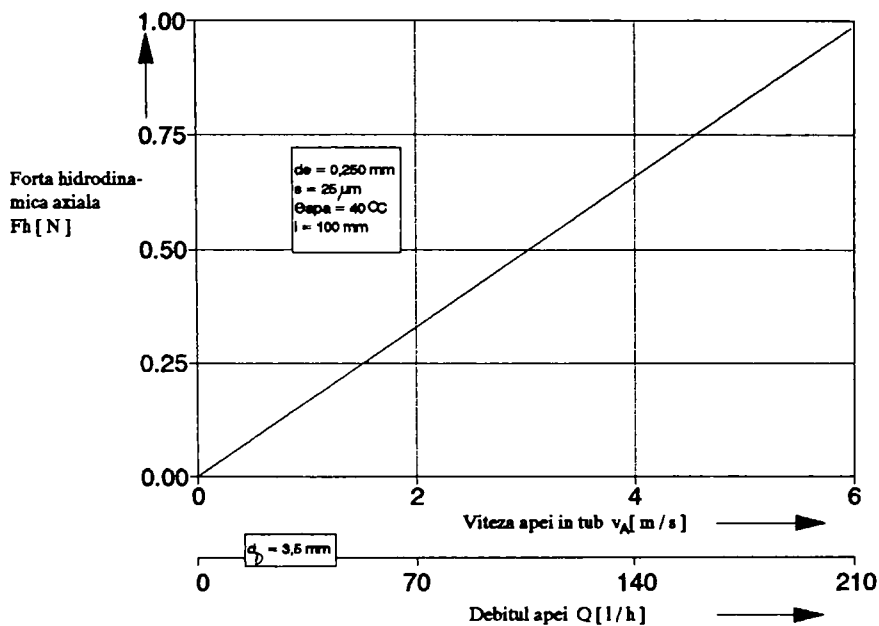


Fig.42. Variația forței hidrodinamice în lungul EF, funcție de mărimea vitezei de introducere a apei în IT.

și de grosimea IT și încarcă suplimentar electrodul, contribuind la întinderea porțiunii sale din vecinătatea duzelor și la solicitarea ghidajelor. Ea este, constantă pentru un electrod dat, atât timp cât și forma și dimensiunile jetului de lichid rămân constante.

În cazul EF în afara fantei: $R \rightarrow \infty$, deci Δp tinde la zero, deci $F_h \rightarrow 0$. Deci această schemă de prelucrare este recomandată, la prelucrări EEF cu regimuri de finisare, unde este necesară obținerea unei precizii ridicate.

3.2.3.1.2. Forte in directia axei Oy

Fora este generata de curentul de apa care paraseste IT cu viteza \bar{v} , considerata (pentru simplitate) perpendiculara pe directia vitezei \bar{v}_λ (fig.1). Fora de rezistenta F_h [N] pe care o dezvolta un cilindru plasat transversal intr-un curent de fluid, este, teoretic, constanta pe lungimea de contact intre cilindru si fluid si in timp, fiind proportionala cu patratul vitezei fluidului. Considerand ca v este constanta pe inaltimea IT, sarcina hidrodinamica distribuita este [42], [58]:

$$q_h = c \rho_a d_e \frac{v^2}{2} \quad [N/m] \quad (46)$$

unde c este coeficient de rezistenta [-]. Pentru un fir in curent de fluid transversal $c = 1,2$ [42].

Sarcina hidrodinamica distribuita pe directia Oy este orientata in sensul departarii EF de OP si depinde de dimensiunile electrodului, ale IT, de debitul si temperatura apei din interstitiu (fig.43).

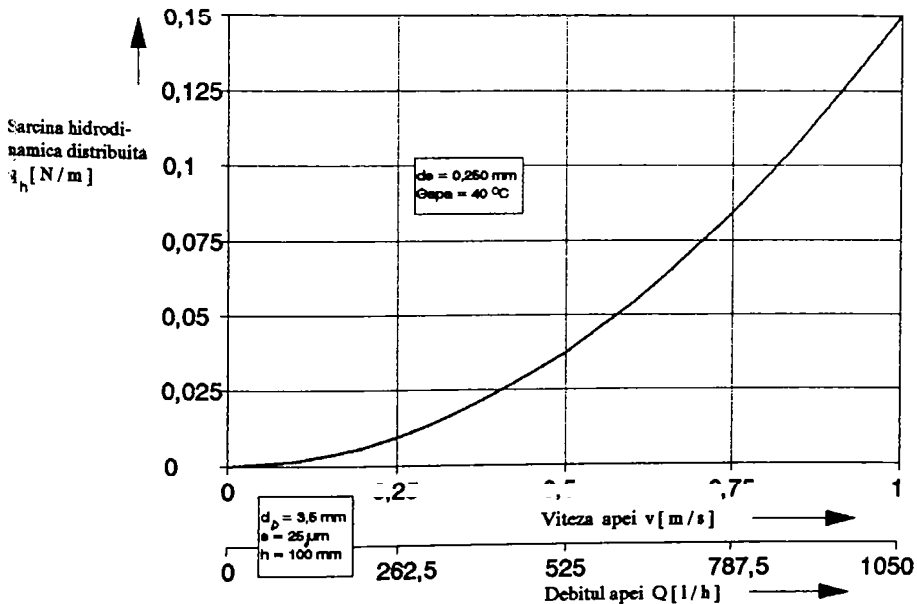


Fig.43. Variatia sarcinii hidrodinamice disrtribuite, functie de marimea vitezei de iesire a apei din IT.

Intrucat F_n scade linear cu diametrul EF (conform relatiei (46)), la regimuri de finisare se recomanda utilizarea unor electrozi mai subtiri. De asemenea este recomandabila la prelucrari de finisare utilizarea schemei EF in afara fantei, pentru ca viteza apei este mai mica decat in cazul schemei EF in fanta deoarece jetul se fractioneaza, iesind din IT in mod divergent.

3.2.3.1.3. Forte in directia axei Ox

Cand LD paraseste IT cu viteza \bar{v} [m/s], orientata pe directia Oy, el se desprinde de pe suprafata EF sub forma de turbioni (fig.44), periodic de pe cate un flanc al electrodului cu o frecventa, numita frecventa Strouhal, f_s [Hz], producand astfel vibratii ale EF in directia Ox cu aceasta frecventa si cu o amplitudine proportionala cu q_n [60], [62].

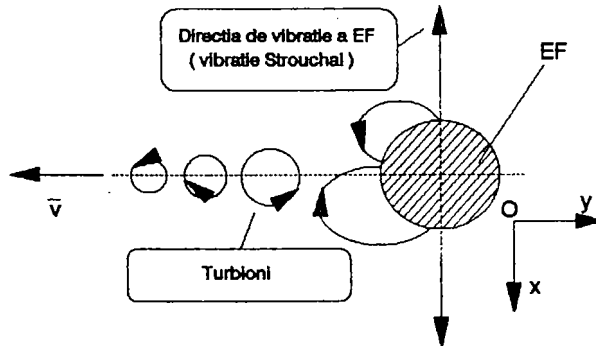


Fig.44. Formarea turbionilor la parasirea suprafetei EF de catre LD, avand ca efect vibratii Strouhal [62].

$$f_s = S \frac{v}{d} \quad [\text{Hz}] \quad (47)$$

unde S este numarul Strouhal [-], care se poate calcula cu:

$$S = 0,21 \left(1 - \frac{20}{Re}\right) \quad [-] \quad (48)$$

unde Re este numarul Reynolds [-], care se poate calcula cu:

$$Re = v \frac{d}{\nu} \quad [-] \quad (49)$$

si

$$v = \frac{1,78 \cdot 10^{-6}}{(1 + 0,0337 \Theta_{\text{apa}} + 0,00022 \Theta_{\text{apa}}^2)} \quad [m^2/s] \quad (50)$$

unde Θ_{apa} este temperatura apei [$^{\circ}\text{C}$].

Din relatiile (47), (48), (49) si (50) rezulta ca frecventa

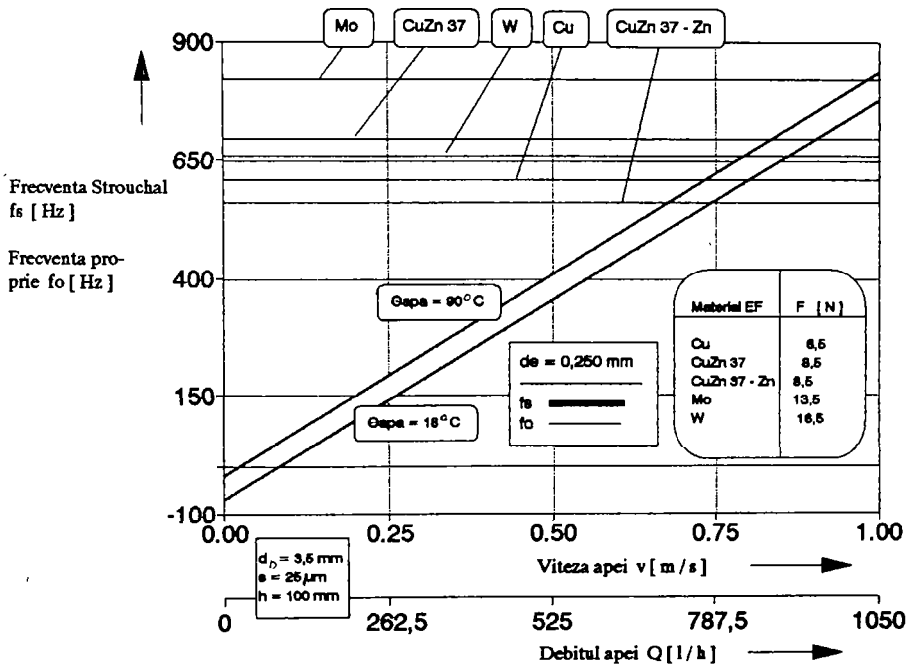


Fig.45. Locul geometric al valorilor frecvenței Strouchal, funcție de temperatura și viteza de ieșire a apei din IT și valoarea frecvenței proprii de oscilație a EF, funcție de materialul său.

Strouchal depinde de diametrul EF și de viteza și temperatura LD în IT. Întrucât aceasta are valori apropiate de frecvențele proprii f_o [Hz] ale electrozilor din diferite materiale (fig.45), calculate cu relația (85), există teoretic pericolul de rezonanță, care ar conduce la ruperea EF.

Forța care produce oscilațiile EF pe direcția Ox este:

$$F_h = q_h l \cos(2 \pi f_s t) \quad [N] \quad (51)$$

unde q_h este sarcina distribuita pe directia Oy [N/m], calculata cu relatia (46),

t este timpul [s].

Amplitudinea fortei hidrodinamice pe directia Ox este egala cu forta hidrodinamica pe directia Oy: $q_h l$ [N]. Deci ambele forte hidrodinamice care actioneaza in plan perpendicular pe axa EF depind de aceiasi factori ai regimului de prelucrare.

Oscilatiile EF in fanta pe directia Ox determina apropierea si departarea succesiva a acestuia de flancurile IT, micșorind si marind succesiv grosimea interstitiului lateral, cu efecte asupra fortei electrostatice si asupra conditiilor disruptive si, prin aceasta, asupra preciziei prelucrării.

In cazul EF in afara fantei, amplitudinea vibratiilor Strouhal este diminuată pentru ca q_h este diminuată (prin divergenta jetului de apa). In plus, acestea nu afecteaza precizia prelucrării pentru ca planul in care oscileaza EF, Cxz, contine vectorul \vec{v}_1 .

3.2.3.2. Forte hidrostatice

Fora hidrostatica apare datorita contactului simultan al suprafatei EF cu doua faze fluide diferite: apa si gaz. In timpul prelucrării, o parte din masa lichidului de lucru se transforma in gaz acumulat in volume mici la temperatura si presiune ridicate, care se afla temporar in contact cu suprafata electrodului. Pe de alta parte, in urma unor calcule simple, rezulta ca LD are in IT o circulatie plasata la limita dintre laminar si turbulent, fiind foarte probabila cresterea masei de aer inglobat in jetul de lichid pina la intreruperea locala si temporara a contactului EF-LD. Tendinta lichidului de a se deplasa prin efect de capilaritate in scopul anularii acestei discontinuitati a contactului dintre suprafata electrodului si lichid (prin inlocuirea volumului ocupat de gaz) conduce la aparitia unor forte hidrostatice, orientate in sensul deplasării apei (dinspre apa, spre gaz), care tind sa deplaseze electrodul. Cum locul si frecventa formării volumelor de gaz aflate in contact cu suprafata EF sunt aleatoare, rezulta ca forta hidrostatica este variabila in timp, avand punctul de

aplicatie mobil si ca eventuala deplasare a EF se produce dupa directii aleatoare.

Pentru calcule, se considera cazul cel mai defavorabil, al formarii unui volum de gaz care ocupa la un moment dat intreg IT, pe toata inaltimea sa (fig.46).

Astfel, sarcina hidrostatica distribuita este [4], [43]:

$$q_{hs} = 4 \xi \left(\frac{d_e}{s} + 1 \right) \quad [N/m] \quad (52)$$

unde ξ este tensiunea superficiala a apei [N/m], sarcina fiind orientata pe directia Oy, in sensul deplasarii EF spre OP.

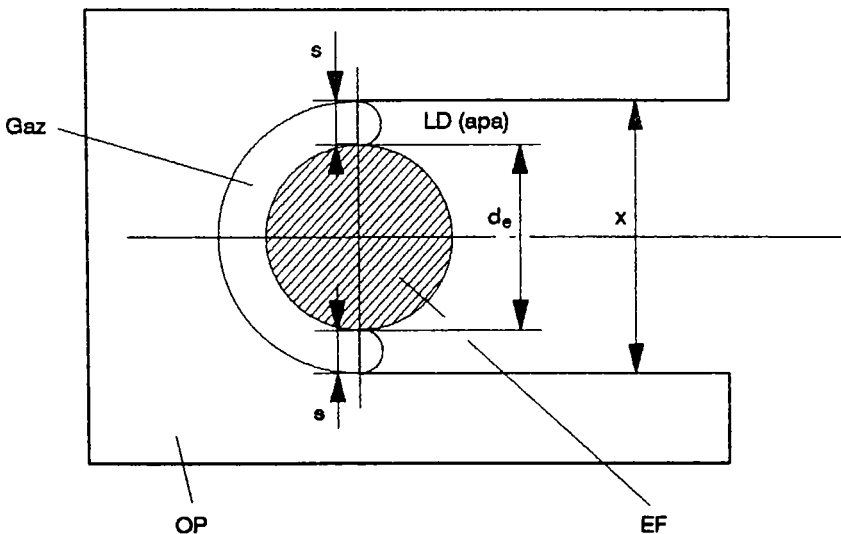


Fig.46. Schema explicativa pentru calculul sarcinii hidrostatice [4].

Din relatia (52) se vede ca q_{hs} creste cu raportul d_e/s . De aceea, la prelucrari de finisare, unde grosimea IT (s) este mica, se impune utilizarea unor electrozi mai subtiri. Forta hidrostatica depinde de regimul de prelucrare, inclusiv de materialul EF care influenteaza grosimea interstitiului, (dependenta nefiind inclusa in relatia matematica (52)), deci, de frecventa de formare a bulelor de gaz, repartitia si dimensiunile lor. Pentru regimul considerat anterior, valoarea fortei datorate tensiunii superficiale, in

ipotezele in care a fost scrisa relatia (52), ia o valoare exagerat de mare (3,3 N), neconfirmata experimental, ceea ce obliga la revizuirea ipotezei simplificatoare folosite.

3.2.4. Modelarea matematica a fortelor produse de presiunea coloanei de plasma a descarcarii electrice

In coloana de plasma a descarcarii in impuls apare forta Lorentz F_L [N], ca urmare a interactiunii densitatii de curent j [A/m²] cu inductia magnetica proprie B [T] [43]:

$$\vec{F}_L = \vec{j} \times \vec{B} \quad [N] \quad (53)$$

unde [12]:

$$j = \frac{I_D}{\pi R^2} \quad [A/m^2] \quad B = \frac{\mu_0 I_D r}{2 \pi R^2} \quad [T] \quad (54)$$

unde R este raza de limitare a coloanei ionizate [m] si

r este raza curenta [m]. F_L este perpendiculara pe axa coloanei de plasma, indreptata spre aceasta, determinand comprimarea sa axiala, fenomen cunoscut sub numele de "efect Pinch" [1], [2], [12]. Forta Lorentz este echilibrata de gradientul de presiune ∇p [N] din coloana arcului [12]:

$$F_L = |\nabla p| \quad [N] \quad (55)$$

Diferenta de presiune dintre un punct aflat pe cercul de raza r si un punct aflat pe cercul de raza maxima, R , este [12]:

$$\int_{p_r}^{p_R} dp = j B \int_R^r dr \quad [N/m^2] \quad (56)$$

Presiunea medie, p_m [N/m²] se obtine integrand intre limitele $r=R$ (periferia coloanei) si $r=0$ (axa coloanei):

$$p_m = \frac{p_0 - p_R}{2} = \frac{\mu_0 I_D^2}{8 \pi^2 R^2} \quad [N/m^2] \quad (57)$$

Sectiunea coloanei la incidenta sa cu suprafata EF este πR^2 . Deci sarcina distribuita datorata presiunii plasmei este:

$$q_m = \frac{F_m}{l} = \frac{\mu_0 I_D^2}{8 \pi l} \quad [N/m] \quad (58)$$

avand sensul dinspre OP spre EF.

Din relatia (58) rezulta ca forta distribuita q_m [N/m] depinde doar de curentul descarcarii (creste parabolic) si nu depinde de electrod. Ea este o forta perpendiculara pe axa longitudinala a EF, orientata spre EF, mobila si dinamica, aplicata cu frecventa impulsului de curent. Totusi forta datorata presiunii din canalul de plasma are valori neglijabile in conditiile prelucrarii EEF.

3.2.5. Modelarea matematica a fortelor produse de presiunea bulei de gaz asociata descarcarii electrice

O parte din energia descarcarii electrice actioneaza asupra apei, producand incalzirea si vaporizarea sa, ceea ce genereaza in jurul canalului de plasma o bula de gaz ale carei molecule disociaza si se recombina. Gazul, incalzit prin convecție si radiatie de coloana de plasma, se dilata atingand un maxim al volumului la sfarsitul duratei impulsului de curent. Acesta este momentul in care suprafata de contact a gazului (aflat sub presiune) cu EF fiind maxima, forta exercitata de acesta asupra electrodului este maxima, departandu-l de OP. Dupa incetarea impulsului, gazul se raceste izobar, bula micșorandu-si volumul pana la disparitie (fig.47). Este posibil ca, dupa disparitia bulei, datorita inertiei sa apara o depresiune [27], [36], avand ca efect apropierea EF de OP.

Referitor la marimea presiunii gazului in conditiile prelucrării EEF, nu exista date teoretice si experimentale. Referitor la eroziunea electrica cu electrod masiv, se cunosc urmatoarele date experimentale: presiunea $p_c=10...2000$ bar, corespunzindu-i o forta $F_c=10...900$ N, in mediu dielectric de hidrocarburi lichide, la o energie a impulsului de 0,2...7 J [4]. Pe de alta parte, in aparatele electrice, la deschiderea contactelor electrice sub sarcina, apar presiuni de ordinul a 1000 bar [14], iar fortele de respingere a electrozilor sunt de 10...100 N la curenti de 10...100 kA [12].

Fora F_c [N] cu care gazul preseaza EF (dinspre OP), se

poate calcula pornind de la presiunea maxima, p_c [N/m²], admitand ca bula are forma cilindrica, iar gazul, de masa m [kg], ocupa volumul V [m³] la temperatura T [K] [12], [43].

$$p_G V = \frac{m}{\mu_g} R T \quad [Nm] \quad (59)$$

unde μ_g este masa molară a gazului dezvoltat de acțiunea arcului electric asupra apei [-],

R este constanta gazelor perfecte [J/(molK)].

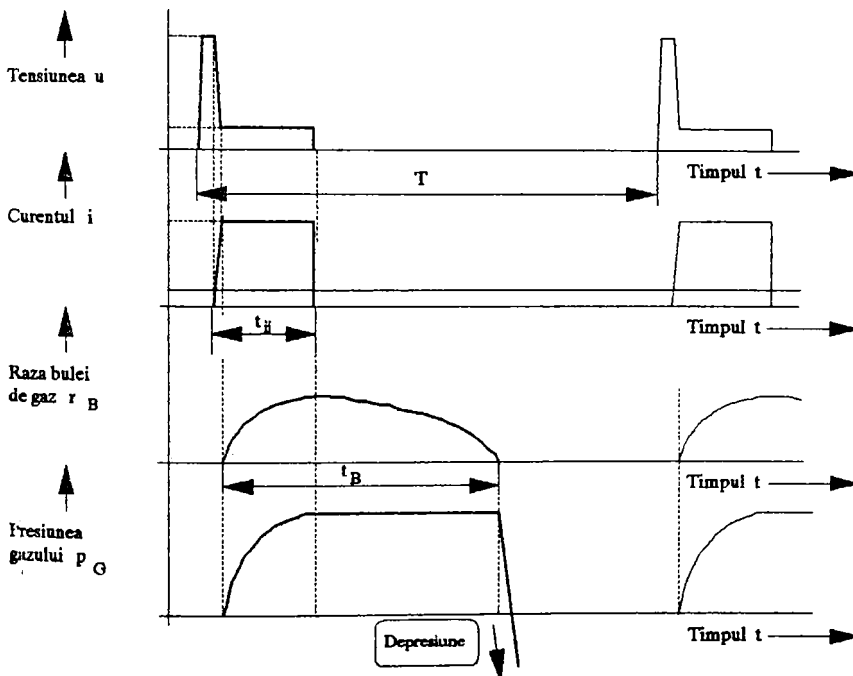


Fig.47. Variatia razei bulei si presiunii gazului pe durata unei perioade a impulsului electric normal.

In conditii normale de temperatura T_0 [K] si presiune p_0 [N/m²], volumul de gaz al bulei este proportional cu energia impulsului W_i [J] [12]:

$$V_0 = c_0 W_i \quad [m^3] \quad (60)$$

unde c_0 este cifra Bauer [m³/J] si arata ce volum de gaz aflat in conditii normale de temperatura si presiune se dezvolta in urma unei

descarcari electrice de energie 1 J. Pentru lichid dielectric din ulei mineral $c_0 = 60 \dots 500 \text{ mm}^3/\text{J}$.

Masa de gaz de volum V , creat de arcul electric este:

$$m = \rho_0 c_0 W_i \quad [\text{kg}] \quad (61)$$

unde ρ_0 este densitatea gazului $[\text{kg}/\text{m}^3]$ in conditii normale.

Astfel, relatia (59) devine:

$$P_0 V_0 = \frac{m}{\mu_g} R T_0 \quad [N m] \quad (62)$$

iar

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0} = \frac{\mu_g}{R} \frac{P_0}{T_0} \quad [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (63)$$

Pe durata impulsului de curent t_{ii} este produs un debit masic de gaz [12]:

$$\dot{M} = \frac{m}{t_{ii}} = c_0 \frac{\mu_g}{R} \frac{P_0}{T_0} \frac{W_i}{t_{ii}} \quad [\text{kg}/\text{s}] \quad (64)$$

Pe de alta parte [12]:

$$\dot{M} = A \left[\frac{2}{\kappa+1} \right]^{\frac{1}{\kappa-1}} \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa+1}} \rho_g \sqrt{2 \frac{R}{\mu_g} T} \quad [\text{kg}/\text{s}] \quad (65)$$

unde A este aria sectiunii transversale a bulei $[\text{m}^2]$,

χ este exponent adiabatic $[-]$,

μ_g este masa molară a apei $[-]$,

ρ_g este densitatea gazului la presiunea p si temperatura T $[\text{kg}/\text{m}^3]$, fiind data de formula [12], [43]:

$$\rho_g = \frac{m}{V} = \frac{1}{R} \frac{\mu_g P_G}{T} \quad [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (66)$$

Din relatiile (64), (65) si (66) rezulta sarcina datorata presiunii gazului, distribuita pe lungimea electrodului :

$$Q_G = \frac{F_G}{l} = \frac{P_G A}{l} = \frac{P_0 c_0}{T_0 l} \frac{W_i}{t_{ii}} \sqrt{\frac{1}{\kappa} \left[\frac{\kappa+1}{2} \right]^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}}} \sqrt{\frac{\mu_g T}{R}} \quad [N/m] \quad (67)$$

Tinand seama ca W_i/t_{ii} este puterea impulsului, se observa ca forta este proportionala cu aceasta (matematic), dar trebuie subliniat ca si temperatura, T , a gazului este crescatoare cu

puterea impulsului. Deci apare inca un motiv sa se foloseasca energii mici ale impulsului la prelucrari de finisare. Forta nu depinde explicit de materialul EF. Ea este o forta perpendiculara pe axa longitudinala a EF, mobila (isi deplaseaza punctul de aplicatie dupa locul descarcarii electrice) si dinamica, aplicata cu frecventa impulsului de curent.

3.2.6. Aprecieri asupra fortelor produse la expulzarea produsilor de eroziune de pe suprafata EF

In momentul desprinderii explozive a produsilor de eroziune de pe suprafata EF, datorita socului mecanic, conform legii conservarii impulsului mecanic, asupra EF actioneaza un impuls mecanic in sens invers deplasarii produsilor, a carui proiectie in plan perpendicular pe axa longitudinala a electrodului este orientata spre acesta.

La viteze egale de desprindere, pentru materialele de electrod studiate, forta generata de impuls este proportionala cu masa desprinsa, deci, conform relatiilor (8) si (9), cu produsul ρr^3 [27], unde ρ este densitatea materialului EF [kg/m^3] si r este raza craterului de uzura [m]. Marimea acestei forte nu se poate determina analitic, fiind dificil de evaluat marimea si directia vitezei de desprindere a produsilor de eroziune. Dupa marimea produsului ρr^3 (deci dupa marimea fortei generate la desprindere), se poate stabili insa o ierarhie a materialelor pentru EF, considerand valorile razei r [m] din fig.25. Ierarhia astfel stabilita este: Mo, Fe, W, Cu, CuZn37, Sn, Zn (forta pentru electrodul din Mo este minima). Forta, fiind generata de impulsul de lucru, are punctul de aplicatie mobil, este orientata spre suprafata EF, dar nu este neaparat perpendiculara pe axa sa longitudinala, ci aleator si este aplicata dinamic.

3.2.7. Concluzii practice care reies din modelarea matematica a fortelor care solicita EF

In urma modelarii matematice a fortelor care solicita EF, acestea se pot clasifica astfel:
d.p.d.v. al timpului de actiune, in: -forte aplicate static

d.p.d.v. al spatiului de actiune, in:

- forte aplicate dinamic;
- forte uniform distribuite
- forte concentrate, care, la randul lor pot fi:

- forte cu punct de aplicatie fix si
- forte cu punct de aplicatie mobil.

Evident ca pentru obtinerea unei imagini globale asupra solicitatrilor aplicate EF pe parcursul prelucrarii EEF, se impune evaluarea fortelor rezultante, problema extrem de dificila din cauza dispersiei spatial-temporale a fortelor componente. Cateva consideratii generale pot fi totusi utile.

Pe directia Oz rezultanta se stabileste simplu, prin insumarea algebrica a fortelor de pe aceasta directie.

Fortele dinamice care incarca electrodul in plan perpendicular pe axa sa longitudinala, datorate impulsului de curent isi deplaseaza punctul de aplicatie in lungul EF printr-o miscare de translatie (fig.48) si in plan transversal printr-o miscare de rotatie, avand vectorii dispusi intr-un sector circular de deschidere 180° (fig.49). Componentele fortelor se anuleaza pe directia Ox (fig.49), cu exceptia fortei dinamice provenite din actiunea apei asupra electrodului pe aceasta directie, dar nu se anuleaza pe directia Oy.

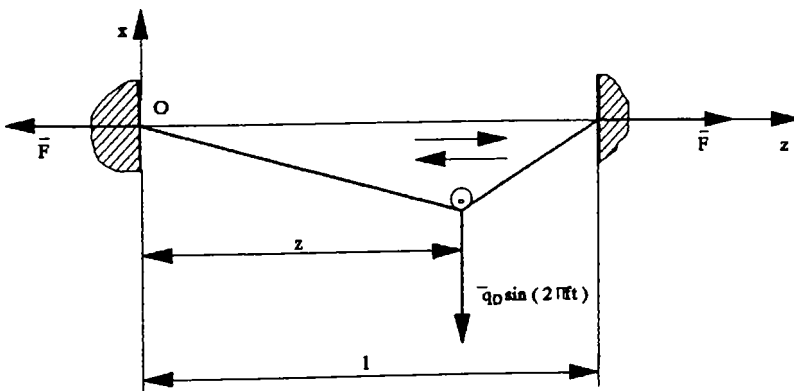


Fig.48. Translatarea in lungul EF a componentei dinamice a fortei perturbatoare, provenite din descarcarea electrica.

Pentru calculul rezultantei fortelor pe aceasta directie, se face urmatorul rationament: intrucat frecventa fortei (componentei) dinamice provenite din descarcarea electrica este cu unul pana la patru ordine de marime mai mare decat frecventa proprie de oscilatie a EF, ceea ce conduce la o rapida amortizare a efectelor sale (vibratii ale EF), se poate considera, cu o suficient de buna aproximatie, ca ea incarca electrodul static, distribuindu-se in lungul acestuia si intr-un sector semicircular, conform fig.49. Analog, si forta electrostatica, care este, de asemenea dinamica, dar imobila, poate fi asimilata cu o forta statica, uniform distribuita pe lungimea EF. Echivaland fiecare forta

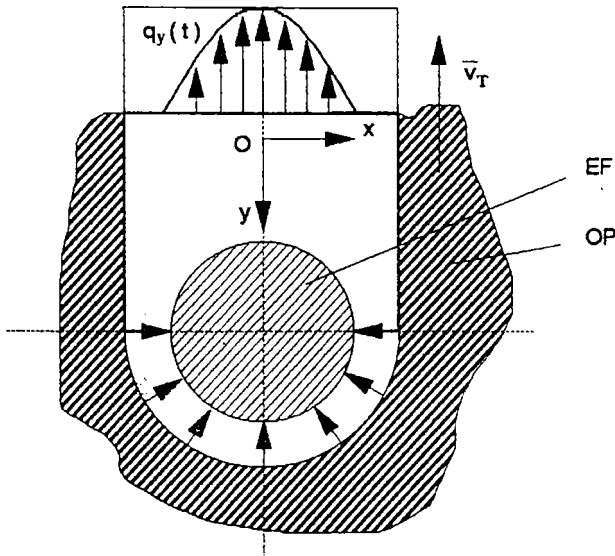


Fig.49. Rotirea in sectiune transversala pe axa longitudinala a EF a componentei dinamice a fortei perturbatoare, provenite din descarcarea electrica.

dinamica cu una statica care actioneaza intr-un timp dilatat la valoarea intregii perioade a impulsului electric si avand, in mod corespunzator, amplitudinea micșorata, fortele statice astfel obtinute se pot insuma algebric, rezultand o sarcina distribuita echivalenta pe lungimea EF, notata cu $q_{ech\ s}$ [N]. Aceasta, la randul ei se poate insuma algebric cu sarcina statica distribuita pe lungimea EF, provenita din actiunea hidrodinamica a LD.

Aparent fortele din procesul electroeroziv, care solicita electrodul, asa cum rezulta din relatiile din acest capitol, nu

depind de materialul sau (cu exceptia fortei mecanice generate de desprinderea produsilor de eroziune, care depinde de masa prelevata). Unele nu depind nici macar de dimensiunile EF. In realitate situatia este alta: fortele depind de materialul electrodului prin faptul ca acesta constituie o variabila determinanta asupra temperaturii dezvoltate in IT, asupra formei si dimensiunilor portiunii EF in IT si asupra grosimii IT (de ex: la prelucrarea EEF cu electrod din Cu, IT are o grosime mai mare, decat la prelucrarea cu electrod din Mo). Modelul matematic utilizat difera de situatia reala datorita imposibilitatii matematizarii tuturor proceselor reale (de o varietate mare, adesea decurgand imprezvizibil), fapt care a implicat utilizarea unor ipoteze simplificatoare. Totusi, sintetizand concluziile care decurg din aplicarea modelului matematic, se poate afirma ca un mod general de actiune in scopul cresterii capacitatii portante mecanice a EF prin micsorarea fortelor care il incarca este de a prelucra cu electrozi de sectiune transversala minima in interstitii deschise (EF in afara fantei), utilizand energii ale impulsului adaptate sectiunii EF si scopului tehnologic (semifinisare, finisare, etc). In conditiile in care aceasta permite prelucrarea cu viteze marite (fata de cazul nefolosirii acestui mod de actiune), se poate prelucra, fara a se diminua productivitatea generala, in mai multe treceri.

3.3. Deplasari si deformatii ale EF pe parcursul prelucrarii EEF

3.3.1. Modelarea matematica a modificarilor de pozitie ale EF

Fortele provenite din procesul electroeroziv modifica pozitia EF pe cele 3 directii rectangulare in spatiu (fig.20). Intrucat deplasarea EF (sub influenta fortelor) este impiedicata la capetele sale (EF are capetele sprijinite in ghidaje), acesta sufera deformatii de intindere si incovoiere statice si dinamice. Daca deformatiile electrodului pe directia Oz (de intindere) pot fi usor compensate prin reglarea corespunzatoare a fortei de tensionare mecanica F [N], deformatiile din planul perpendicular pe directia Oz (de incovoiere) nu pot fi anulate cu ajutorul exclusiv al acestui parametru de regim. Pentru a minimiza deformatiile EF pe directiile Ox si Oy, este necesar un studiu mai detaliat care sa indice

comportarea la incarcarea mecanica a EF si, eventual, sa indice alti factori de influenta a acestora, decat cei care influenteaza fortele exercitate.

Pentru ca toate fortele dinamice, cu exceptia celei hidrodinamice, isi anuleaza doua cate doua componentele pe directia Ox (fig.49), EF sufera pe aceasta directie doar vibratii cu frecventa Strouhal, datorate fortei hidrodinamice .

In mod real, pe directia Oy, EF sufera incovoiere datorata actiunii constante a lichidului in miscarea de iesire din IT, peste care se suprapun vibratii cu frecventa impulsurilor de curent si vibratii cu frecventa impulsurilor de tensiune, datorate celorlalte forte studiate.

Pentru calculul deformarii pe directiile Ox si Oy, electrodul este considerat o bara prismatica dreapta supusa la intindere axiala (fig.50), la incovoiere si la vibratii transversale produse de o sarcina distribuita liniar, vibratii amortizate viscos. Bara este un sistem liniar cu 2 grade de libertate.

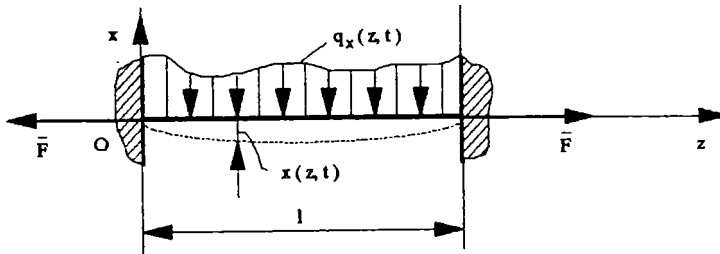


Fig.50. Bara prismatica dreapta supusa la intindere axiala, la incovoiere si la vibratii transversale produse de o sarcina distribuita liniar.

Ecuatiile care au ca solutii deformatiile fibrei medii \$x(t)\$ -pe axa Ox si \$y(t)\$ -pe axa Oy sunt [12], [63]:

$$Ox: EI \frac{\partial^4 x}{\partial z^4} - F \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} + \rho S \dot{x} + \frac{n}{l} \dot{x} = -q_x(z, t) \quad [N/m] \quad (68)$$

$$Oy: EI \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} - F \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} + \rho S \dot{y} + \frac{n}{l} \dot{y} = -q_y(z, t) \quad [N/m] \quad (69)$$

unde, in fiecare relatie, primul termen reprezinta forta distribuita

de rezistenta elastica, rezultata din incovoierea barei de moment de inertie I [m^4] si modul de elasticitate E [N/m^2],

-al doilea termen reprezinta forta distribuita de rezistenta la intinderea barei, produsa de forta F [N],

-al treilea termen reprezinta forta distribuita de inertie la vibratii a barei de arie a sectiunii transversale S [m^2], din material de densitate ρ [kg/m^3],

-al patrulea termen reprezinta forta distribuita de frecare vascoasa, proportionala cu viteza de deformare \dot{x} [m/s] si cu coeficientul de amortizare n [Ns/m],

-membrul drept reprezinta sarcina distribuita perturbatoare (rezultanta fortelor studiate) [N/m]:

Intrucat cazul deformarii barei in directia Oy este mai general decat cel al deformarii pe Ox (pentru ca $q_y(z,t)$ are atat componenta constanta, cat si periodica, in timp ce $q_x(z,t)$ are numai componenta periodica), se va rezolva ecuatia (69), urmand ca, prin particularizarea solutiei acesteia, sa se deduca solutia ecuatiei (68).

3.3.1.1. Deformarea axei EF pe directia Oy

Fora $q_y(z,t)$ are doua componente [27], [64]: o componenta constanta in timp si uniform distribuita, q_s [N/m], precum si una variabila $q_b(z,t)$ [N/m]:

$$q_y(z,t) = q_s + q_b(z,t) \quad [N/m] \quad (70)$$

fapt care implica pentru solutia relatiei (69), $y(z,t)$, o componenta statica, $y_s(z)$ [m] (incovoiere sub sarcina statica q_s) si o componenta dinamica, $y_b(z,t)$ [m] (vibratii sub sarcina variabila $q_b(z,t)$) [27], [63]:

$$y(z,t) = y_s(z) + y_b(z,t) \quad [m] \quad (71)$$

3.3.1.1.1. Deformarea statica

Ecuatia deformarii statice rezulta din relatia (69), prin renuntarea la termenii dependenti de timp:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} - F \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = -q_s \quad [N/m] \quad (72)$$

care are solutia generala [63], [64]:

$$y_s(z) = A_1 \cosh(Kz) + A_2 \sinh(Kz) + A_3 z + A_4 + \frac{q_s}{2F} z^2 \quad [m] \quad (73)$$

unde:

$$K = \sqrt{\frac{F}{EI}} = \sqrt{\frac{R_{p0,2}}{E} \frac{S}{I}} \quad [m^{-1}] \quad (74)$$

daca forta F [N] solicita la tractiune bara pana la limita de curgere $R_{p0,2}$ [N/m²].

Coefficientii de integrare A_1, A_2, A_3, A_4 se obtin din conditiile de limita. Considerand bara incastrata, la capetele sale deformarea si rotirea trebuie sa fie nule. Rezulta, astfel, solutia [63], [64]:

$$y_s(z) = \frac{q_s}{EI K^4} \left[\frac{\cosh[K(\frac{l}{2}-z)] + \cosh(\frac{l}{2})}{\sinh(K\frac{l}{2})} - \frac{K}{2} l - \frac{K^2}{2} l z (1 - \frac{z}{l}) \right] \quad [m] \quad (75)$$

Deformarea statica este, deci, dependenta de

- marimea si de forma sectiunii transversale a EF, prin S [m²], respectiv, I [m⁴],
- lungimea EF l [m],
- materialul EF, prin limita de curgere $R_{p0,2}$ [N/m²] si prin modulul de elasticitate E [N/m²],
- marimea componentei statice a rezultantei fortelor provenite din procesul electroeroziv, q_s [N/m],
- marimea fortei de intindere a EF, F [N].

Pentru electrozi de lungime 300 mm, de diferite forme ale sectiunii transversale (circulara, patrata, cruce sau dreptunghiulara) (fig.51), care erodeaza in OP o fanta de latime $a+2s$ [m] ($a=0,250$ mm -pentru fiecare electrod considerat, iar s = grosimea IT [m]), primul termen al relatiei (75) are o pondere mai mica decat 2,5 % din valoarea sa totala. Pentru aceleasi sectiuni ale EF, dar o lungime de 75 mm, ponderea este mai mare, anume de 10 % [64]. In calculele urmatoare acest termen va fi neglijat. Deci,

cu cat raportul intre lungimea EF si aria sectiunii sale transversale este mai mare, cu atat influenta termenului care contine produsul (EI), care caracterizeaza forma sectiunii electrodului, este mai nesemnificativa si cu atat mai mult EF poate fi privit ca o coarda si nu ca o bara.

EF este sustinut strans la extremitatile portiunii incarcate, de ghidaje, care ii permit totusi sa alunece in directia axei sale longitudinale. Modul de sustinere real poate fi asimilat in doua moduri pentru care exista posibilitatea modelarii matematice:

- incastrare la ambele capete, respectiv
- rezemare simpla.

Din calcule rezulta ca influenta modului de rezemare a capetelor EF este neglijabila asupra marimii deformatiei [64].

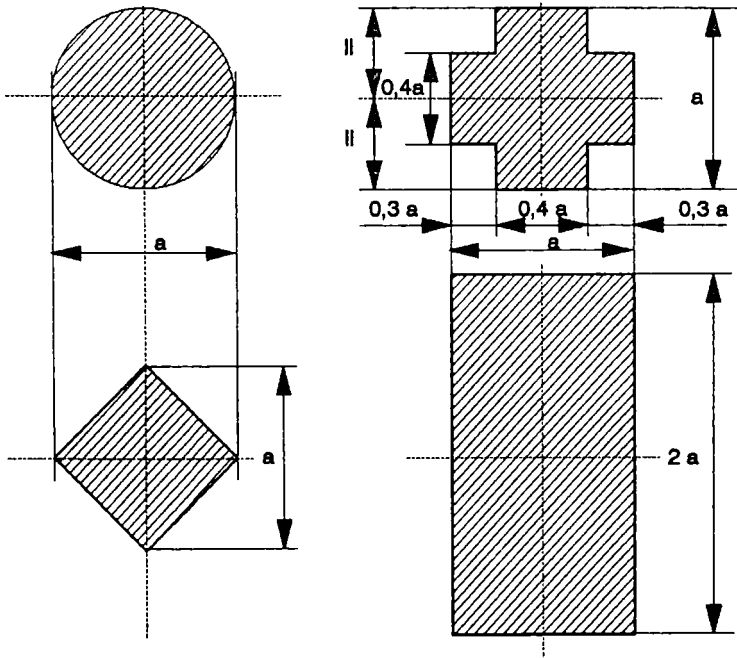


Fig.51. Forme de sectiune transversala ale unor bare.

Astfel, cu notatiile din relatia (74), relatia (75) devine de forma (76), care reprezinta ecuatia unei parabole cu extremitul plasat la mijlocul distantei dintre ghidaje:

$$y_s(z) = \frac{\alpha_s}{2F} (z^2 - l z) \quad [m] \quad (76)$$

In fig.52 se prezinta, conform relatiei (76), fibra medie deformata a unui EF cilindric, solicitat la intindere cu valori diferite ale fortei. Se vede ca marimea deformarii axei EF scade cu cresterea efortului de intindere la care poate fi supus electrodul.

Sageata, $y_{s \max} = y_s(l/2)$ este data de relatia:

$$y_{s \max} = y_s\left(\frac{l}{2}\right) = -\frac{\alpha_s l^2}{8F} \quad [m] \quad (77)$$

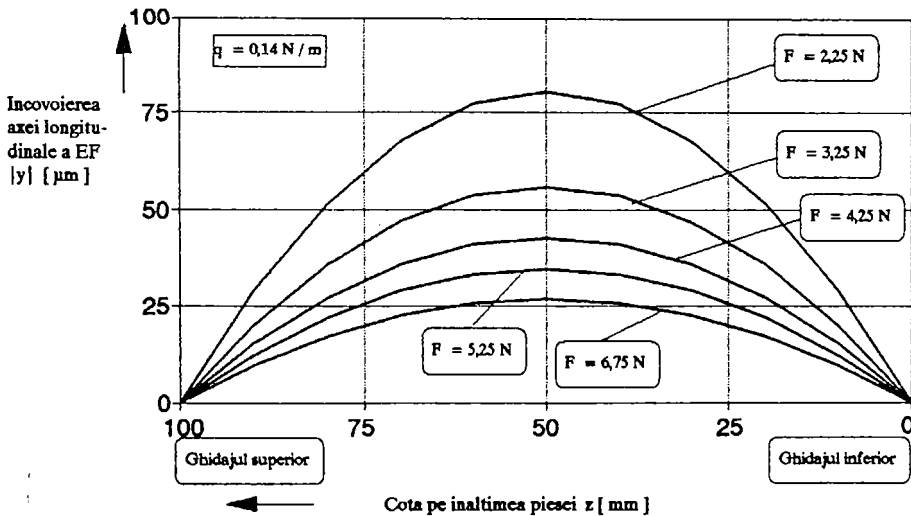


Fig.52. Fibra medie a unui EF cilindric incarcat static pe directia Oy cu o sarcina uniform distribuita, functie de marimea fortei de intindere.

Din relatia (77) se observa ca sageata ia valori crescatoare parabolic cu lungimea EF si linear cu marimea sarcinii rezultante distribuite si ca scade hiperbolic cu aria sectiunii transversale a EF (F fiind proportionala cu aria). De aceea, in primul rand, pentru cresterea capacitatii portante intrinseci trebuie redusa cat mai mult posibil distanta intre ghidajele electrodului.

Curba din fig.53 reprezinta variatia sagetii unui EF functie de marimea fortei de intindere. Se observa ca cresterea fortei de

intindere constituie o solutie de micșorare a sagetii numai in domeniul valorilor sale mari. In domeniul valorilor mici ale sagetii (la prelucrari de finisare), chiar pentru reduceri mici ale sagetii sunt necesare cresteri mari ale tensiunii axiale. Teoretic, efortul de intindere a EF nu poate depasi limita de curgere a materialului sau. Dar o apropiere exagerata de limita de curgere conduce, la unele materiale, la reducerea elastica exagerata a sectiunii transversale a electrodului, cu efecte negative asupra capacitatii sale portante intrinseci termice si mecanice.

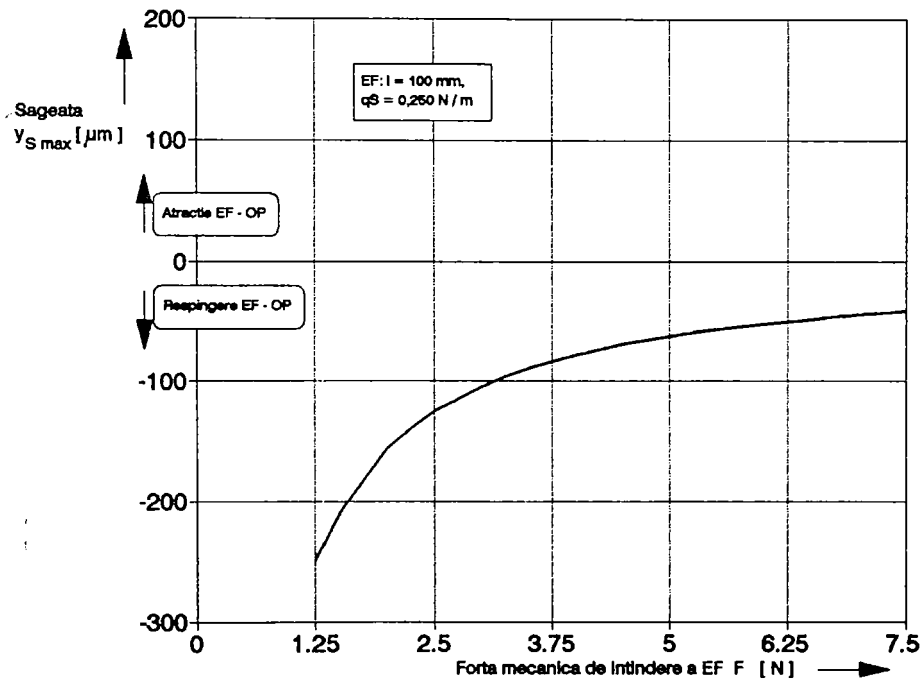


Fig.53. Variatia sagetii EF functie de marimea fortei de intindere.

Materialele cu o comportare contrara celei anterioare, care la eforturi mari au un domeniu ingust al deformarii elastice, se numesc rigide si au modulul de elasticitate E [N/m^2] mare.

Deci si capacitatea portanta mecanica intrinseca (ca cea termica intrinseca) se bazeaza pe un modul de elasticitate a materialului EF de valoare ridicata. Totusi cresterea capacitatii portante a EF prin cresterea fortei de tensionare mecanica, chiar

in cazul folosirii unor electrozi din materiale cu rigiditate mare (W, Mo, Fe) are o aplicabilitate limitata doar la prelucrari care nu impun o precizie foarte ridicata. De aceea resursele cresterii capacitatii portante mecanice ale EF trebuie cautate in alta parte, si anume in latura sa extrinseca.

De remarcat ca expresia (76) este solutia ecuatiei diferentiale:

$$-F \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = -q_s \quad [N/m] \quad (78)$$

in care s-a transformat ecuatia (72) prin renuntarea la termenul care caracterizeaza corpul solicitat drept "o bara" (cel care contine produsul EI) si care reprezinta ecuatia deformarii statice a unui fir tensionat axial incarcat cu o sarcina statica distribuita.

Avand in vedere ca partea componenta a solutiei ecuatiei (72), care corespunde termenului care contine produsul EI, este neglijabila, in continuare EF va fi considerat o coarda (un fir).

3.3.1.1.2. Deformarea dinamica

Ecuatia deformarii dinamice a firului rezulta din ecuatia (69) prin renuntarea la termenii independenti de timp:

$$\rho S \ddot{y} + \frac{n}{l} \dot{y} = -q_D(z, t) \quad [N/m] \quad (79)$$

Considerand ca sarcina distribuita dinamica $q_D(z, t)$ [N/m] este rezultatul actiunii impulsurilor electrice asupra EF (pentru simplificarea calculelor: toate impulsurile de tensiune sunt de lucru si au efecte identice) si ca acestea, deplasandu-se in lungul EF (fig.48), provoaca deplasarea punctului de aplicatie al fortei se poate scrie relatia:

$$q_D(z, t) = q_D \sin\left(\pi \frac{z}{l}\right) \sin(\omega t) \quad [N/m] \quad (80)$$

unde q_D este amplitudinea fortei distribuite [N/m],

z este distanta [m] (fig.48),

ω este pulsatia impulsurilor [s^{-1}] de frecventa f , [Hz] si este data de relatia [54]:

$$\omega = 2 \pi f_i \quad [s^{-1}] \quad (81)$$

Solutia ecuatiei (79), tinand seama de relatia (80), este:

$$y_D(z, t) = \frac{q_D \sin(\pi \frac{z}{l}) \sin(\omega t)}{\sqrt{n \omega^2 + m_{EF}^2 \omega^4 (1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2})^2}} \quad [m] \quad (82)$$

unde m_{tr} este masa EF din IT [kg],

ω_0 este pulsatia proprie a EF de lungime l , [s^{-1}], careia ii corespunde frecventa proprie de oscilatie f_0 [Hz] [42]:

$$\omega_0 = 2 \pi f_0 \quad [s^{-1}] \quad f_0 = i \frac{c}{2l} \quad [Hz] \quad (83)$$

unde i este ordinul armonicii [-],

c este viteza de propagare a undelor [m/s].

Pentru o coarda intinsa pana la limita de curgere de forta F :

$$c = \sqrt{\frac{F}{\varrho S}} = \sqrt{\frac{R_{p0,2}}{\varrho}} \quad [m/s] \quad (84)$$

Astfel, pentru armonica de ordinul intai ($i=1$), rezulta frecventa proprie de oscilatie a EF [42]:

$$f_0 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{R_{p0,2}}{\varrho}} \quad [Hz] \quad (85)$$

care, se vede, depinde numai de lungimea si de materialul EF. In fig.45 se prezinta valorile frecventelor proprii pentru EF de lungime 100 mm din diferite materiale (alaturi de frecventa Strouchal).

Din expresia solutiei (82) se vede ca amplitudinea vibratiilor EF este maxima, functie de pozitia fortei perturbatoare, cand aceasta se afla la mijlocul distantei intre ghidajele EF ($z=l/2$). In functie de timp, amplitudinea vibratiilor este maxima pentru $\sin(\omega t)=1$, adica pentru o forta perturbatoare $q_b(t)=q_b$. In functie de amortizare amplitudinea vibratiilor este maxima pentru $n=0$. Cazul incarcarii EF pentru care sunt indeplinite simultan aceste trei conditii este cazul cel mai defavorabil.

Solutia generala a ecuatiei (69), care contine atat deformarea statica (incovoiere), cat si cea dinamica (vibratii), tinand seama de relatiile (71), (76), (81), (82) si (83), este:

$$y(z, t) = q_s \frac{1}{2F} (z^2 - lz) + q_D \frac{l \sin(\pi \frac{z}{l}) \sin(2\pi f_i t)}{\sqrt{4\pi^2 f_i^2 n^2 + 16 m_{EF}^2 \pi^4 f^4 (1 - \frac{f_0^2}{f_i^2})^2}} \quad [m] \quad (86)$$

Oscilatiile perturbatoare, sunt produse de impulsurile electrice, care la prelucrarea EEF cu impulsuri comandate au frecventa mult mai mare decat frecventa proprie de oscilatie a electrodului (indiferent de materialul sau). Deci in expresia solutiei (86) se poate neglija raportul f_0/f_i , care tinde la 0. Atunci, in cazul cel mai defavorabil,

- sarcina perturbatoare -maxima in timp
- punct de aplicatie -la mijlocul lungimii EF
- coeficient de amortizare -nul,

amplitudinea maxima la mijlocul lungimii EF este:

$$y_{D \max} = \left| \frac{q_D}{\pi^3 f^2 q d_e^2} \right| \quad [m] \quad (87)$$

Daca sarcina dinamica $q_b(z, t)$ ar fi aplicata static, cu marimea q_b [N/m], ar produce si ea, o sageata statica maxima a axei EF, care s-ar insuma celei produse de sarcina statica q_s . Raportul dintre amplitudinea maxima a vibratiilor produse de forta $q_b(z, t)$ (data de relatia (87)) si sageata produsa de forta statica de valoare q_b (data de relatia (77)), in cazul prelucrarii EEF cu frecvente ridicate ($10^4 \dots 10^6$ Hz) este extrem de mic: $10^{-7} \dots 10^{-6}$ [27]. Deci, daca f_i este mare, atunci amplitudinea vibratiilor este neglijabila, pe de o parte si daca $f_i \gg f_0$, atunci vibratiile se amortizeaza foarte repede, pe de alta parte. Astfel, prin cresterea frecventei impulsurilor electrice, se poate evita practic aparitia vibratiilor, deci se poate mari capacitatea portanta mecanica extrinseca. Capacitatea portanta mecanica intrinseca poate fi marita (fapt vizibil in relatia (87)) prin utilizarea unor materiale de EF cu densitate mare si/sau a unor EF de sectiune transversala mare si prin reducerea distantei intre ghidajele EF cit mai mult posibil.

In fig.54 se prezinta, calitativ, variatia solutiei $y(z, t)$, conform expresiei (86), in cazul cel mai defavorabil al solicitarii unui EF de lungime 100 mm pentru $f_i \gg f_0$ si amortizare nula.

In concluzie, daca $f_i \gg f_0$, componenta variabila a sarcinii

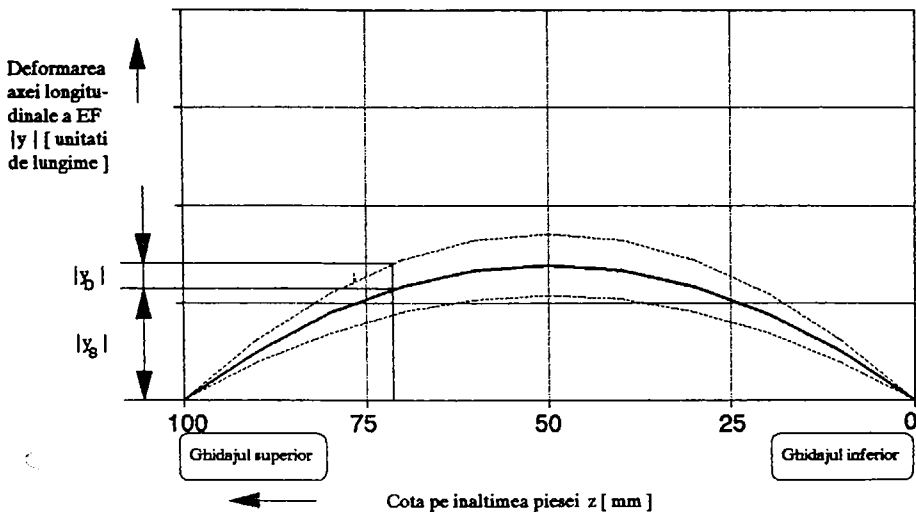


Fig.54. Locul geometric (calitativ) in planul Oyz al pozitiei axei longitudinale ale EF, datorita incarcarii statice si dinamice suprapuse.

perturbatoare isi aduce o contributie infima la deformarea EF. De aceea, transformarea fortelor periodice in forte statice echivalente q_{ech} [N/m] care actioneaza pe toata perioada T [s] a impulsului, obtinute prin diminuarea fortelor periodice proportional cu dilatarea timpului, este o operatiune care nu introduce erori mari. In aceste conditii, si aceasta forta va produce o incovoiere statica a EF, care se insumeaza algebric la cea produsa de sarcina q_s , conform relatiei (76):

$$y_s(z) = -(q_s + q_{ech}) \frac{l^2}{8 F} \quad [m] \quad (88)$$

3.3.1.2. Deformarea axei EF pe directia Ox

Solutia ecuatiei diferentiale (68), care reprezinta deformarea axei EF pe directia Ox, este de forma (86), cu urmatoarele particularitati:

-sarcina perturbatoare nu are componenta constanta, ci doar una variabila, datorata fortei hidrodinamice pe directia Ox, fiind

de forma:

$$q_x(z, t) = c \varrho_a d_e \frac{v^2}{2} \cos(2 \pi f_s t) \quad [N/m] \quad (89)$$

-solutia variaza numai functie de timp, nu si de pozitia fortei in lungul electrodului (z [m])

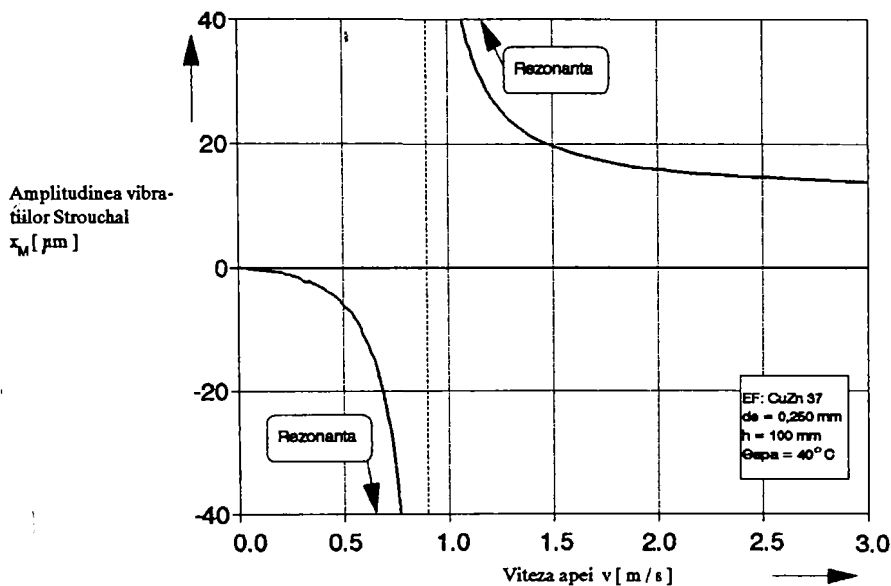


Fig.55. Variatia amplitudinii vibratiilor Strouchal, functie de viteza de iesire a apei din IT.

-diferenta intre frecventa de excitatie (Strouchal) si frecventa proprie a EF nu este mare (fig.45), existand chiar pericolul aparitiei rezonantei, daca se ating viteze critice ale apei in IT.

Deci solutia ecuatiei deformarii EF pe directia Ox , (68) provine din forma solutiei ecuatiei deformarii pe directia Oy , (86) si este:

$$x(t) = \frac{c q_a d_e l \frac{v^2}{2} \sin(2 \pi f_s t)}{\sqrt{4 \pi^2 f_s^2 n^2 + 16 m_{EF}^2 \pi^4 f_s^4 \left(1 - \frac{f_0^2}{f_s^2}\right)^2}} \quad [m] \quad (90)$$

unde coeficientul de amortizare n [Ns/m] este proportional cu produsul: $d_e^2(f_s - f_0)$ [27].

Amplitudinea vibratiilor Strouchal depinde de aceeasi factori ca amplitudinea vibratiilor pe directia Oy, cu deosebirea ca EF are un rol primordial in amortizarea vibratiilor, prin marimea sectiunii transversale si a densitatii materialului.

In fig.55 se prezinta variatia amplitudinii deformarii EF pe directia Ox functie de viteza de iesire a apei din IT, pentru conditiile prezentate in figura. Se remarca ca pentru viteze mici (sub 0,9 m/s) nu exista vibratii Strouchal (zona amplitudinilor negative); incepand cu aceasta valoare a vitezei se produce rezonanta; la viteze ale apei mai mari de 1,5 m/s, amplitudinea se stabilizeaza la o valoare mai mica decit 20 μ m.

3.3.2. Precizari privind modificarea prin deformare plastica locala a geometriei EF

Paragraful se refera la modificarea geometriei suprafetei electrodului prin deformare plastica. La prelucrarea electroeroziva, daca presiunea gazului din bula, p_c [N/m²] depaseste limita de curgere $R_{p,0,2}$ [N/m²] a materialului EF, acesta va fi deformat plastic, pe suprafata sa aparand un crater concentric cu craterul de uzura, de forma aproximativ circulara, de raza r_c [m], corespunzatoare razei bulei, a carui adancime scade progresiv spre periferie (odata cu cresterea progresiva a limitei de curgere, datorita scaderii progresive a temperaturii) (fig.24) [27].

Aria suprafetei de raza r_c [m²] este [54]:

$$A = \frac{q_G l}{P_G} \quad [m^2] \quad (91)$$

unde $q_G l$ este amplitudinea sarcinii distribuite pe lungimea l [m] a EF, datorata fortei F_G [N/m²] cu care gazul apasa pe suprafata electrodului, data de relatia (67).

De exemplu, pentru o presiune a gazului $p_g=400$ bar, in conditiile regimului de lucru dat anterior, raza craterului de deformare plastica este $r_c=70 \mu\text{m}$.

Deformarea plastica a suprafetei apare preponderent la materiale moi: Sn, Zn, Cu.

3.3.3. Exemplu de calcul al deformarii axei EF (caz particular)

Calculul se efecteaza pentru cazul EF in fanta, OP din material feromagnetic, pentru urmatorul regim particular:

- a. EF : material - CuZn 37
 $d_c=0,250$ mm
 $l=100$ mm
- b. OP : material - otel (feromagnetic)
 $h=100$ mm
- c. Regim generator de impulsuri comandate.
electric: $U_a=300$ V
 $U_b=9$ V
 $t_a=0,2 \mu\text{s}$
 $I_b=100$ A
 $t_{i1}=1,5 \mu\text{s}$
 $f=21$ kHz ($T = 48 \mu\text{s}$)
 $f_1=17$ kHz
 $s=25 \mu\text{m}$
- d. Regim LD - apa deionizata
pentru LD: circulare LD in IT - injectie simetrica
 $d_p=3,5$ mm
 $2 \times Q=2 \times 140$ l/h
temperatura medie a apei in IT $\theta_{\text{apu}}=40$ °C
 $\chi=15 \mu\text{S/cm}$
- e. Regim $v_e=90$ mm/s
mecanic: $F=4,25$ N

Se calculeaza amplitudinile fortelor perturbatoare (cu exceptia fortei provenite din desprinderea produsilor de eroziune de pe suprafata EF si a fortei hidrostatice)' pentru un impuls de lucru in situatia cea mai defavorabila, cand apar toate fortele si cand sunt maxime. In tabelele 1, 2 si 3 sunt prezentate caracteristicile fortelor care solicita EF pe directile Ox, Oy, respectiv Oz, iar in fig.56 sunt prezentate calitativ fortele care

actioneaza pe directia Oy.

Tabel 1. Forta care sollicita EF pe directia Ox

Nr. crt.	Natura fortei	Sensul fortei	Simbol	Amplitudine [N/m]	Timp de act.	Nr. rel.	Frecv [Hz]
1.	Hidrodinamica	oscilant	q_h	0,003	T	(46)	66

Tabel 2. Fortele care sollicita EF pe directia Oy

Nr. crt.	Natura fortei	Sensul fortei	Simbol	Amplitudine [N/m]	Timp de act.	Nr. rel.	Frecv [kHz]
1.	Electrostatica	spre CP	q_{es}	5	t_{s1}	(30)	21
2.		OP	q_{es}	0,005	t_{s1}	(30)	21
3.	Electromagnetica	spre OP	q_{em}	6ϕ	t_{s1}	(38)	17
4.	Hidrodinamica	spre EF	q_h	0,003	T	(40)	- cont.
5.	Mecanica (Plasma)	spre EF	q_m	0,005	t_{s1}	(58)	17
6.	(Gaz)	spre EF	q_g	6,3	nt_{s1}	(67)	17

Tabel 3. Fortele care sollicita EF pe directia Oz

Nr. crt.	Natura fortei	Sensul fortei	Simbol	Amplitudine [N]	Timp de act.	Nr. rel.	Frecv [kHz]
1.	Electrostatica	opus lui v_e	F_{es}	$8 \cdot 10^{-9}$	t_{s1}	(34)	21
2.			F_{es}	$6 \cdot 10^{-12}$	t_{s1}	(34)	21
3.	Hidrodinamica	dinspre duze spre mijloc. EF	F_h	0,65	T	(45)	- (continua)

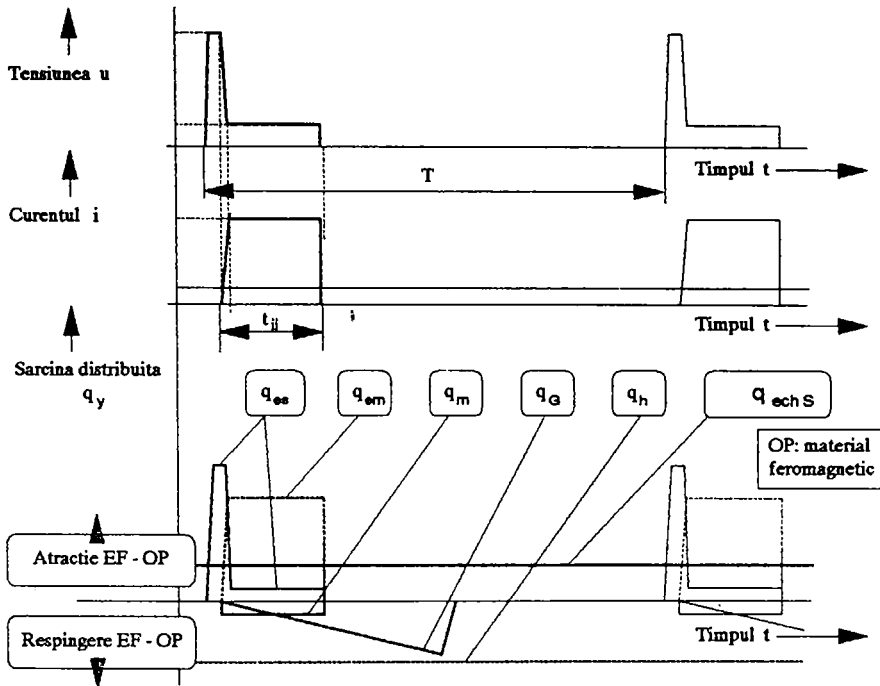


Fig.56. Variatia sarcinilor distribuite care incarca EF pe directia Q_y , pe durata unei perioade a impulsului electric normal.

Apoi, cunoscand valorile fortelor se calculeaza deformarea EF pe directiile Ox si Oy .

Conform fig.55, EF nu vibreaza pe directia Ox pentru regimul LD dat, pentru ca $v < 0,9$ m.

Pentru calculul rezultantei fortelor provenite din proces, care actioneaza pe directia Oy , in prealabil fiecare forta perturbatoare periodica (fig.56) se echivaleaza cu o forta statica, care are acelasi efect asupra deformarii EF. Considerand ca forta statica echivalenta actioneaza pe toata perioada impulsului, T , aceasta se calculeaza din conditia de egalitate a lucrului mecanic efectuat asupra EF de forta periodica, respectiv, cea statica. Astfel, fortele statice obtinute (cate una pentru fiecare forta periodica) se pot insuma algebric, intre ele si cu sarcina constanta, rezultand (pentru regimul de lucru particular) sarcina distribuita echivalenta statica totala:

$$Q_{ech\ s} = [0,153 \phi(F_i, R, s) + 0,015] - 0,161 n \quad [N/m] \quad (92)$$

unde termenul pozitiv din membrul drept reprezinta sarcina distribuita de atractie intre EF si OP, iar termenul negativ -cea de respingere.

3.3.4. Concluzii practice care reies din modelarea matematica a deplasarii si deformarii EF

In urma modelarii matematice a deformarii si deplasarii EF ca urmare a solicitarilor mecanice care apar in procesul prelucrarii prin eroziune electrica, rezulta ca micșorarea acestora se poate realiza, la nivelul electrodului, prin folosirea unor electrozi de sectiune transversala cat mai mare, din materiale cu rigiditate, limita de curgere si densitate cat mai mari. Intrucat valorile acestor caracteristici de material ale materialelor metalice cunoscute sunt departe de a satisface cerintele actuale ale prelucrarii EEF, limitarea deformarii si deplasarii EF trebuie facuta actionand asupra parametrilor de regim care nu apartin electrodului: vibratiile pot fi amortizate folosind frecvente de lucru mari, iar incovoierea axei longitudinale poate fi redusa prin multiplicarea punctelor de sprijin ale EF in interstitiu. Sustinerea electrodului in IT poate fi realizata mecanic, hidraulic sau electromagnetic.

3.4. Concluzii generale referitoare la capacitatea portanta a EF

Referitor la conceptia modelului matematic al capacitatii portante a EF, in [5] se afla un inceput al modelarii productivitatii, considerandu-se ca toata energia impulsului este folosita la prelevare. In [4] este prezentata modelarea matematica a deformarii axei longitudinale a EF pe directia Oy si, partial, a fortelor rezultate din proces, care incarca EF.

Prezenta teza contine, ca elemente originale in domeniul capacitatii portante termice, modelul matematic al incalzirii prin conductie termica si prin efect Joule-Lenz, al dilatarii, al efectului pelicular al curentului electric si al marimii volumului prelevat pe impuls. Ca elemente originale in domeniul capacitatii

portante mecanice, se amintesc: modelul matematic al forțelor mecanice provenite din presiunea plasmii descarcării și a gazului dezvoltat din apă, precum și din conservarea impulsului la desprinderea produsilor de eroziune, al forței electrostatice în lungul EF, al forței hidrodinamice și modelul matematic al deformării plastice de suprafață a electrodului și al vibrațiilor Strouhal.

Ca formă generală de acțiune, rezultată în urma modelării matematice, pentru creșterea capacității portante a EF se recomandă utilizarea unor regimuri diferite funcție de scopul tehnologic urmărit:

1 -separare cu regim de degrosare (conform schemei EF în fantă), caz în care este necesară o încălzire termică mare pentru asigurarea unei productivități ridicate. Creșterea capacității portante la prelucrări prin degrosare se poate realiza, în principal, în contul creșterii capacității portante termice. Pentru aceasta nu se recomandă utilizarea unor materiale de electrod cu constante termofizice de valori ridicate (pentru că nu asigură productivități ridicate), ci creșterea secțiunii transversale a EF. Aceasta permite utilizarea unor regimuri electrice dure, constând în impulsuri de energii și frecvențe relativ ridicate. Pentru mărirea eficienței evacuării căldurii din IT este indicat să micșoreze coeficientul de umplere a impulsurilor și să se folosească un regim pentru LD cât mai dur. Necesitatea asigurării energiilor și frecvențelor ridicate ale impulsurilor în contextul micșorării coeficientului de umplere, conduce la necesitatea utilizării unor impulsuri de curent dreptunghiulare de amplitudine cât mai mare și durată cât mai mică. De menționat că prin această măsură, crește efectul termic al descărcărilor, deci și productivitatea, pentru că energia impulsurilor crește parabolic cu valoarea curentului, și scade liniar cu durata lor.

2 -prelucrare cu regim de finisare a suprafeței separate anterior, caz în care, simultan cu micșorarea secțiunii transversale a EF (din motive de asigurare a preciziei generării cinematice prin EEF a suprafețelor), trebuie micșorate sau echilibrate forțele care deformează electrodul și limitată însăși deformarea sa. Creșterea capacității portante la prelucrări de finisare se poate realiza în principal în contul creșterii capacității portante mecanice. Aceasta se recomandă să se facă prin utilizarea unor electrozi din materiale cu modul de elasticitate, limită de curgere și densitate cât mai

ridicate. Pentru limitarea fortelor care solicita EF, este indicata prelucrarea cu electrozi cat mai subtiri (inca un motiv pentru micșorarea sectiunii electrozilor) dupa schema EF in afara fantei, care asigura totodata si o mai buna evacuare a caldurii, concomitent cu utilizarea unor impulsuri electrice de energie mica. Acest fapt conduce la o productivitate scazuta, ceea ce impune erodarea adaosului de prelucrare rezultat in urma degrosarii (daca acesta este mare) in mai multe treceri. Pentru echilibrarea fortelor, in scopul reducerii deformării si deplasării EF in timpul prelucrării, se recomanda sustinerea mecanica, hidraulica sau electromagnetica a electrodului pe o lungime cat mai mare in IT. Pentru reducerea amplitudinii si amortizarea rapida a vibratiilor EF se impune folosirea unor frecvente de lucru ridicate.

Modelarea matematica a capacitatii portante a EF s-a facut in conditiile utilizării multor ipoteze simplificatoare, unele dintre acestea simplificand fenomene reale de baza care apar in timpul prelucrării EEF, altele -inlocuindu-le cu alte fenomene mai usor de modelat, altele -ignorand, chiar, unele fenomene reale. Din acest motiv, autorul nu are pretentia obtinerii unor rezultate cantitative exacte ale marimilor care caracterizeaza capacitatea portanta a EF. Totusi, modelul matematic adoptat indica factorii de influenta a capacitatii portante a EF si, prin aceasta, a capacitatii portante tehnologice a prelucrării. Astfel au rezultat directiile si modurile de actiune in vederea creșterii capacitatii portante.

Unele moduri de actiune in vederea atingerii scopurilor urmarite, recomandate de prezenta lucrare in urma studiului teoretic, au fost deja si sunt permanent abordate de producatorii de sisteme constructiv-tehnologice si tehnologii de prelucrare prin EEF si de cercetatori. Astfel, de exemplu, cresc in salturi (in evolutie cronologica) curentul descarcării si presiunea de intrare a LD in IT. Stagnarile, inerente, sunt provocate de limitele constructiv-tehnologice care pot fi atinse la un moment dat. Spre exemplu, in cazul generatoarelor de impulsuri, limita consta (acum) in dificultatea construirii unor componente electronice care sa intrerupa curenti de ordinul a 1.000 A dupa o durata a descarcării de ordinul a 0,1 μ s. Dupa depasirea acestui obstacol, va fi posibila, de la sine, creșterea frecvenței simultan cu micșorarea coeficientului de umplere a impulsurilor de curent.

Cercetarile referitoare la unele moduri de actiune au fost

deja abandonate, probabil temporar din motive economice, asteptandu-se rezolvare, care inca nu se intrevad. Este cazul celor referitoare la materiale noi de electrod, sau a celor referitoare la sprijinirea mecanica a portiunii EF din IT.

In fine, alte moduri de actiune inca nu si-au gasit locul in atentia cercetatorilor si producatorilor. Este cazul echilibrarii electromagnetice a fortelor care incarca electrodul, in vederea minimizarii deplasarii si deformarii axei sale longitudinale, mod de actiune care face obiectul cercetarilor din prezenta lucrare.

4. CERCETARI EXPERIMENTALE

Cercetarile experimentale efectuate au avut ca obiective prioritare:

*verificarea unor ipoteze si concluzii inserate in capitolele precedente ale lucrarii, referitoare la desfasurarea unor procese care concura la prelucrarea prin eroziune electrica si la prelucrarea prin EEF, in general;

*verificarea unor concluzii rezultate in urma modelarii capacitatii portante a EF, referitoare la factori de influenta si la modul lor de actiune asupra acesteia;

*culegerea unor date, capabile sa completeze rezultatele teoretice ale modelului matematic, conducand astfel, prin metode analitico-experimentale, la finalizarea unor concluzii referitoare la capacitatea portanta a EF;

*verificarea concordantei modelelor teoretice cu starea reala, practica;

*aplicarea in practica a unor solutii de crestere a capacitatii portante a EF, oferite de rezultatele modelarii sale matematice.

S-au efectuat 12 programe experimentale, notate ulterior cu E.1 ... E.12.

4.1. Descrierea standurilor pentru experimentare; marimi masurate si calculate

Din numarul total de programe experimentale, 9 s-au efectuat pe un aparat de prelucrat prin EEF, echipat cu un generator de impulsuri comandate. Dintre acestea, majoritatea (E3, E4, E5, E6, E10, E11 si E12) au constituit-o cercetarile in conditii reale de prelucrare EEF, in timp ce doua programe experimentale (E1 si E2), s-au facut in conditii de prelucrare care se abat de la cele industriale. In fine, 3 programe experimentale (E7, E8 si E9) s-au efectuat in conditii simulate, cand s-au eliminat intentionat unele interdependente de proces pentru a evidentia legitatile existente, sau pentru ca numai prin eliminarea unor factori s-au putut afla informatii despre aceste legitati.

4.1.1. Standul experimental 1

4.1.1.1. *Prezentare generala*

Standul 1 a fost folosit pentru cercetari experimentale pe aparatul de prelucrare prin EEF, deci il include. Standul cuprinde:

-instrumente, dispozitive, aparate si sisteme de masura si control,

-subsistemul EF-OP si

-aparatul de prelucrare prin EEF, tipul AGIE Cut 315 DEM.

Schema sa de principiu este prezentata in fig.57.

Osciloscopul, legat in paralel pe IT, permite vizualizarea informatiilor referitoare la impulsurile de tensiune:

-forma,

-tensiunea de amorsare U_a [V],

-durata de amorsare t_a [s],

-tensiunea descarcarii U_b [V],

-durata impulsului de curent t_{i1} [s],

-durata impulsului de tensiune t_{i2} [s] si

-perioada impulsului de tensiune T [s].

Masurarile s-au efectuat pe urmatoarele scale: scala de timp: 0,5; 1; 2; 5; 10; 20 si 50 μ s/diviziune ecran; scala de tensiune: 1 V/diviziune ecran, respectiv 10 V/diviziune ecran. Ecranul osciloscopului are cate 10 diviziuni pe fiecare axa.

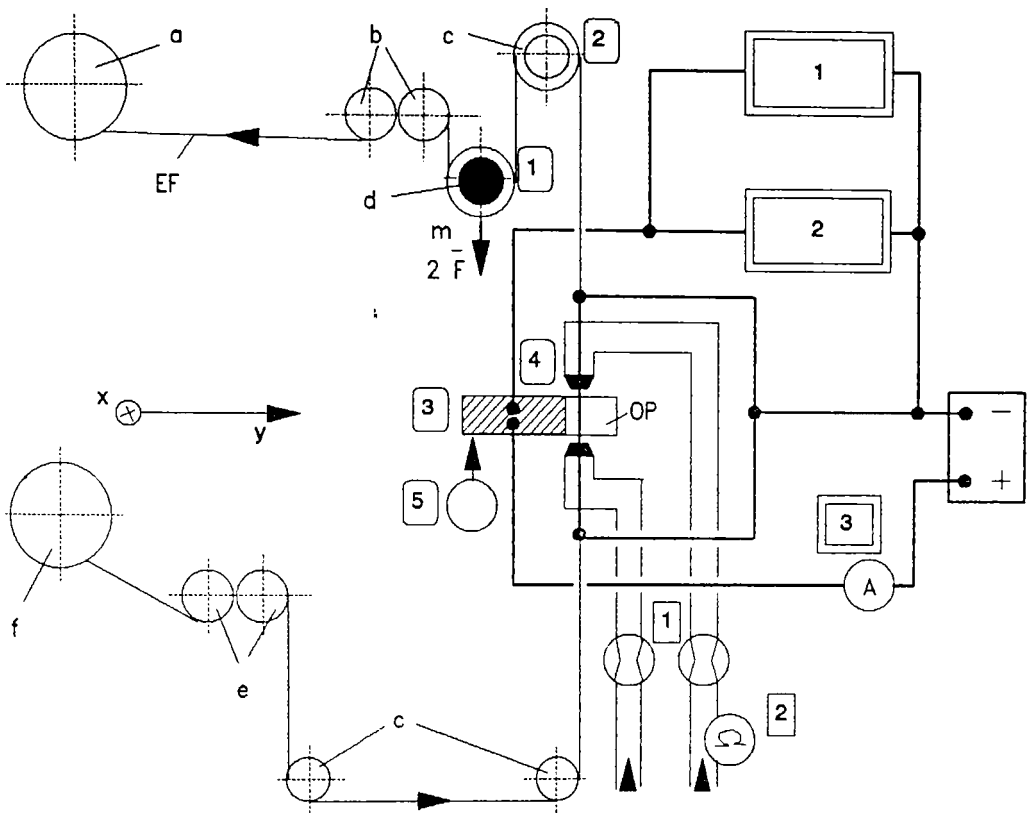
Discriminarea impulsurilor de tensiune cu caracteristica normala (carora le corespund impulsuri de curent de lucru) din multimea impulsurilor de tensiune furnizate se face cu un analizor logic de impulsuri, legat in paralel pe IT [65].

Analizorul este cuplat cu un numarator de impulsuri/frecventmetru, ale carui indicatii sunt prelucrate corespunzator, astfel incat sa se poata afisa, pe un display cu LED-uri, ponderea medie a impulsurilor de tensiune/curent de lucru in totalul impulsurilor de tensiune comandate:

$$D = \frac{f_i}{f} 100 \quad [\%] \quad (93)$$

pentru un anumit interval de timp, in care:

f_i este frecventa medie a impulsurilor de lucru (care, pentru simplificarea scrierii, le vom numi impulsuri de curent) [s^{-1}] si f este frecventa impulsurilor de tensiune comandate [Hz].



Circuitul electric



Circuitul LD



- a - bobina pentru captarea EF uzat
- b - role de antrenare
- c - role schimbatoare de directie
- d - rola oclianta
- e - role de franare
- f - bobina pentru alimentare cu EF

Circuitul electric

- 1 - Osciloscop - masurarea caracteristicilor impulsurilor de tensiune
- 2 - Analizor de impulsuri cuplat cu frecventmetru - discriminarea impulsurilor normale, numararea si calcularea ponderii lor in numarul impulsurilor de tensiune
- 3 - Ampermetru - masurarea curentului mediu

Sistemul pentru LD

- 1 - Debitmetru hidraulic - masurarea debitelor apei
- 2 - Ohmmetru - masurarea rezistentei electrice a apei

Blocul mecanic

- 1 - Masa etalonata - masurarea fortei de tensionare axiale a EF
- 2 - Turometru - masurarea turatiei rolei c superioare
- 3 - Sistem de masurare cu traductor a deplasarii si vitezei relative EF - OP
- 4 - Sistem de masurare cu traductor a distantei intre ghidajele EF
- 5 - Comparator cu cadran - masurarea abaterilor de pozitie la li.stalarea OP; masurarea acaterilor de la forma geometrica a suprafetii prelucrate

Fig.57. Schema de principiu a standului experimental 1.

Diviziunea scalei este de 3,33 %, intr-un interval de la 0 la 100 %.

Ampermetrul, legat in serie cu IT, masoara curentul mediu I_m [A]. Diviziunea scalei: 0,1 A, intr-un domeniu de masurare de la 0 la 3 A.

Cu marimile astfel masurate, se pot calcula celelalte marimi care caracterizeaza impulsurile electrice [1], [2]:

-frecventa impulsurilor de tensiune:

$$f = \frac{1}{T} \quad [Hz] \quad (94)$$

-frecventa medie a impulsurilor de curent (cu caracteristica normala):

$$f_i = \frac{1}{100} \frac{D}{T} \quad [s^{-1}] \quad (95)$$

-coeficientul de umplere a impulsului de tensiune:

$$K_u = t_{iu} f \quad [-] \quad (96)$$

-coeficientul de umplere a impulsului de curent:

$$K_i = t_{ii} f_i \quad [-] \quad (97)$$

-curentul descarcarii, considerand ca toate impulsurile de curent sunt impulsuri normale de lucru:

$$I_D = \frac{1}{K_i} I_m \quad [A] \quad (98)$$

-energia impulsului in aceleasi conditii:

$$W_i = I_D U_D t_{ii} \quad [J] \quad (99)$$

Circuitul pentru LD este echipat cu doua debitmetre hidraulice care masoara debitul orar de apa care iese prin cele doua duze inspre IT (aparaturile pot lucra numai prin injectarea apei in IT). Diviziunea scalei este de 10 l/h, intr-un domeniu de masurare de la 0 la 220 l/h.

Ohmmetrul masoara rezistenta electrica a unui esantion de apa de volum determinat cuprins intre doua placi metalice [66]. El se afla conectat la un dispozitiv electronic de calcul care converteste rezultatul masurarii in valoare a conductivitatii electrice χ [$\mu S/cm$]. Diviziunea scalei este de 1 $\mu S/cm$.

Forța de întindere a EF este reglată și, implicit, măsurată cu ajutorul unor piese ("greutăți") de masă etalonată, de formă cilindrică, prevăzute cu un alezaj central, interschimbabile, care se montează pe axul rolei oscilante. Greutățile nu se pot însuma, pentru că, la un moment dat, numai o greutate poate fi poziționată pe ax. Trusa acestora asigură următoarele valori ale forței de întindere F [N]: 2,25; 3,25; 4,25; 5,25; 6,75; 8,25 și 9,75.

Viteza de deplasare axială a EF v_e [mm/s] este afișată digital cu un increment de 1 mm/s într-un domeniu de la 0 la 250 mm/s, ca rezultat al convertirii turatiei rolei superioare schimbătoare de direcție, care reprezintă de fapt mărimea măsurată. Aceasta este măsurată cu un turometru.

Deplasarea relativă EF-OP, care se reduce la deplasarea mesei aparatului de prelucrare prin EEF pe cele două direcții perpendiculare în plan orizontal, se măsoară cu două sisteme (cate unul pentru fiecare direcție), integrate constructiv, dotate cu traductoare tip inductosyn, care convertesc distanțe într-o mărime electrică. De obicei, mărimea electrică este o tensiune, a cărei amplitudine sau fază variază continuu, fiind într-o interdependență strictă cu valoarea deplasării [67], [68]. Valorile sunt afișate digital. Diviziunea scalei este de 1 μm pe fiecare direcție de deplasare. Rezultatele măsurărilor deplasărilor pe cele două direcții sunt convertite, prin raportarea lor la durata deplasării, în valori ale vitezelor, care, apoi sunt compuse vectorial, rezultând valoarea vitezei relative EF-OP. Diviziunea scalei pentru afișarea (digitală) vitezei este de 0,01 mm/min.

Măsurarea deplasării pe verticală a ghidajului superior al EF se face după aceleași principii ca măsurarea deplasării mesei aparatului. Sistemul de măsură, integrat constructiv, permite afișarea digitală a distanței între cele două ghidaje cu un increment de 0,1 mm, pe o scară de la 0 la 220 mm.

Comparatorul cu cadran a fost folosit la poziționarea relativă a OP față de EF. Este integrat constructiv, țija sa are 6 grade de libertate, iar precizia sa este de 0,01 mm. El mai poate fi folosit și la măsurarea abaterilor de formă ale suprafețelor prelucrate, dar având o precizie insuficientă, nu a fost întrebuințat în acest scop în cadrul cercetărilor experimentale.

De la panourile de comandă ale aparatului se reglează următorii parametri de regim:

-durata impulsului de curent, în domeniul 1...4 μs ,

- intensitatea curentului mediu, in domeniul (exprimat in pozitii ale comutatorului) 1...6,
- constanta dielectrica a apei, in domeniul minim (teoretic-0)...maxim (teoretic-valoarea conductivitatii apei industriale),
- distanța între port-ghidajele EF, in domeniul 0...220 mm
- debitele de injectie a apei, in domeniul 0...220 l/h,
- forta de întindere a EF, reglabila in trepte in domeniul 2.25...9,75 N,
- inclinarea EF față de verticala, in domeniul 0...30 °,
- sensul deplasării axiale a EF.

Valorile reglate, cu exceptia inclinării EF și a distanței între port-ghidajele EF, sunt mentinute constante in timpul prelucrării. Cei doi parametri care fac exceptie sufera modificari numai daca geometria OP o cere (fie ca OP are înalțimea variabila, fie ca inclinarea suprafeței care trebuie prelucrata este variabila).

Ceilalti parametri de regim sunt influentati de evolutia proceselor din interstitiu, functie de care iau valori variabile in timpul prelucrării.

Toate experimentele s-au efectuat la valori identice ale constantei dielectrice a apei, cu electrodul avand axa longitudinala in pozitie verticala și, cu o exceptie, care va fi subliniata la momentul respectiv, deplasandu-se de jos in sus.

Cu datele culese in timpul prelucrării se calculeaza productivitatea Q_p [mm^2/min], cu relatia:

$$Q_p = v_r h \quad [\text{mm}^2/\text{min}] \quad (100)$$

unde v_r este viteza relativa EF-OP [mm/min] și

h este înalțimea OP [m].

Stabilirea celorlalti indicatori tehnologici s-a facut in urma masurarilor efectuate dupa prelucrare. Pentru aceasta s-au utilizat urmatoarele instrumente, dispozitive și aparate de masura:

Microscopul de scule a fost folosit pentru determinarea aspectului fantei in OP la intrarea și la iesirea EF, in sectiune transversala pe axa acestuia și pentru compararea grosimii interstitiului lateral cu cea a interstitiului frontal. Diviziunea scalei de masurare liniara este de 0,01 mm pe o scara de la 0 la 25 mm, iar diviziunea scalei de masurare unghiulara este de 1' pe o scara de la 0 la 360°.

Comparatorul cu cadran, de precizie 0,001 mm, a fost folosit la determinarea abaterilor de la linearitate ale suprafetelor prelucrate, a latimii fantei si, indirect, a grosimii IT.

Astfel se poate calcula productivitatea Q_p [mm^3/min] cu relatia:

$$Q_p = v_T h x_{med} \quad [\text{mm}^3/\text{min}] \quad (101)$$

unde x_{med} este latimea medie a fantei [m].

Intrucat schemele de masurare si relatiile prin care se stabilesc indicatorii tehnologici calculati depind de forma OP, ele vor fi prezentate in paragraful urmatoar, care se refera la forma constructiva a OP.

Rugozimetrul, conectat la un dispozitiv electronic de integrare, s-a utilizat pentru determinarea abaterii medii aritmetice a profilului de rugozitate R_a [μm] a suprafeței prelucrate. Domeniile de masurare au fost de la 0 la 10 μm , cu diviziunea scalei de 0,1 μm , respectiv, de la 0 la 3 μm , cu diviziunea scalei de 0,03 μm .

Balanta analitica a fost folosita pentru determinarea pierderii de masa a EF, ca urmare a uzarii sale si, in unele cazuri, a OP, ca urmare a prelucrării sale. Domeniul de masurare: de la 0 la 99,9999 g, cu diviziunea scalei de 10^{-4} g. Cu ajutorul maselor initiale m_{EFi} [kg] si finale m_{EFf} [kg] ale unui esantion de electrod de lungime l_{EF} [m], se determina debitul uzarii Q_e [mm^3/min] si uzura relativa Q_{rel} [%] ale electrodului. Tinand seama de deplasarea EF cu viteza v_e , debitul uzarii este:

$$Q_e = 60 \frac{m_{EFi} - m_{EFf}}{Q_{EF} l_{EF}} v_e \quad [\text{mm}^3/\text{min}] \quad (102)$$

unde v_e se introduce in [mm/s].

De asemenea, balanta a fost folosita si la determinarea productivitatii si debitului uzarii la prelucrarea prin EEM. Relatiile de calcul pentru acesti indicatori sunt:

-pentru productivitate:

$$Q_p = \frac{m_{OPi} - m_{OPf}}{Q_{OP} t} \quad [\text{mm}^3/\text{min}] \quad (103)$$

-pentru debitul uzarii:

$$Q_e = \frac{m_{EMi} - m_{EMf}}{\rho t} \quad [mm^3/min] \quad (104)$$

unde indicele i se refera la masurarile initiale,
 indicele f se refera la masurarile finale,
 indicele EM se refera la electrodul masiv,
 ρ_p este densitatea materialului OP [kg/m³] si
 t este timpul prelucrării [s].

Cu relatiile (101) si (103) se poate calcula marimea productivitatii specifice pe impuls de curent Q_{sp} , iar cu relatia (104) se poate calcula marimea uzurii specifice pe impuls de curent Q_{uc} :

$$Q_{sp} = \frac{Q_p}{60 F_i} \quad [mm^2/imp]; [mm^3/imp]$$

$$Q_{uc} = \frac{Q_e}{60 F_i} \quad [mm^3/imp] \quad (105)$$

Unitatea de masura a productivitatii specifice este functie de unitatea de masura (prin intermediul relatiei de definitie) a productivitatii.

La prelucrarea prin EEF se intrebuinteaza doua relatii de definitie pentru uzura relativa:

-o relatie derivata din indicatorul general caracteristic metodei de prelucrare prin eroziune, practic neutilizata in aplicatiile industriale:

$$Q_{rel} = \frac{Q_e [mm^3/min]}{Q_p [mm^3/min]} 100 \quad [\%] \quad (106)$$

-o relatie care are aceeasi semnificatie cu relatia reducerii relative de sectiune la prelucrarea prin tragere, singura utilizata in practica:

$$Q_{rel} = \frac{A_i - A_f}{A_i} 100 \quad [\%] \quad (107)$$

unde A_i este aria sectiunii transversale initiale a EF [m²] si

A_f este aria sectiunii transversale finale a EF [m²].

Cunoscand marimile d_e , v_e (masurate) si Q_e (calculata cu relatia (102)), relatia de calcul a uzurii relative devine:

$$Q_{rel} = \frac{Q_e}{15\pi d_e^2 v_e} 100 \quad [\%] \quad (108)$$

4.1.1.2. Sub sistemele electrod-OP integrate in standul 1

Funcție de scopurile incercarilor, pe standul 1 s-au folosit 4 subsisteme electrod-OP, notate cu A, B, C și D. Fiecare subsistem este prezentat în câte o figura, care conține informații asupra formei, dimensiunilor și poziției relative ale electrozilor și obiectelor de prelucrat în timpul prelucrării. Tabelul care însoțește fiecare figura conține informații asupra modului în care au fost cuplate materialele acestora pe parcursul celui mai cuprinzător experiment care a utilizat subsistemul electrod-OP descris de figura respectivă. Cu același subsistem electrod-OP s-au făcut, în unele cazuri, mai multe experimente, la unele din acestea restrângându-se numărul de materiale încercate. În aceste cazuri se vor specifica, în text, cuplurile de materiale pentru electrod și OP.

A. Electrodul, în construcție masivă și OP, prezentate în fig.58, au fost identice d.p.d.v. al materialului, formei și dimensiunilor.

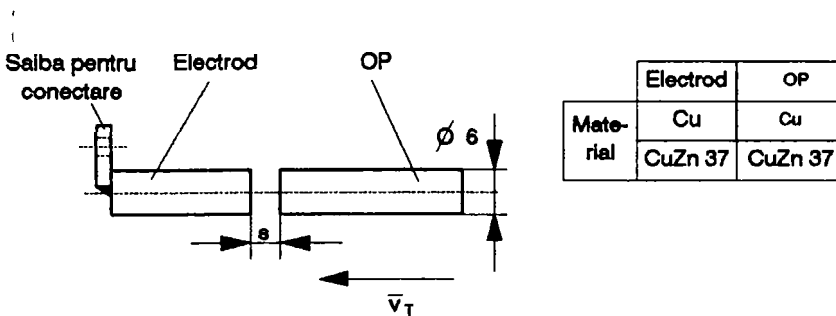


Fig.58. Sub sistemul electrod-OP: A.

Corpurile folosite ca electrod (legate la catodul generatorului de impulsuri) au fost asamblate prin alamire cu câte o saiba, necesara pentru fixarea lor pe unul din cele doua contacte electrice de pe ramura generator-electrod a circuitului electric.

Corpurile folosite ca OP nu au necesitat o pregatire speciala in vederea instalarii, ele s-au fixat pe masa aparatului in mod obisnuit, cu ajutorul dispozitivelor existente. Pozitionarea lor coaxiala a fost asigurata prin alinierea suprafetelor lor cilindrice cu ajutorul comparatorului cu cadran din dotarea aparatului.

B. Electroful a fost electroful filiform, iar OP a fost tabla de grosime $1^{+0,001}$ mm (fig.59). EF din CuZn 37-Zn, de provenienta elvetiana, este un electroful confectionat dintr-un miez din alama invelita cu un strat de Zn de grosime $8 \mu\text{m}$. Ceilalti electrofi sunt de fabricatie indigena.

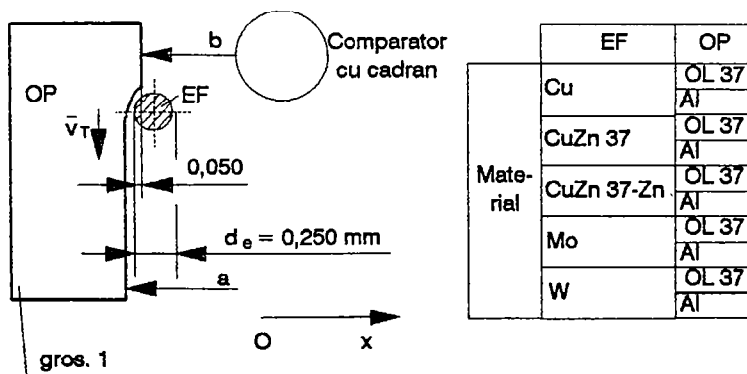


Fig.59. Subsystemul electroful-OP: B.

Subsystemul nu a ridicat probleme de instalare pe aparatul de prelucrare prin EEF.

Dupa intreruperea prelucrarii, s-au masurat, cu un comparator cu cadran de precizie $1 \mu\text{m}$, cotele a [m] si b [m], stabilindu-se dimensiunea pe directia Ox a materialului erodat:

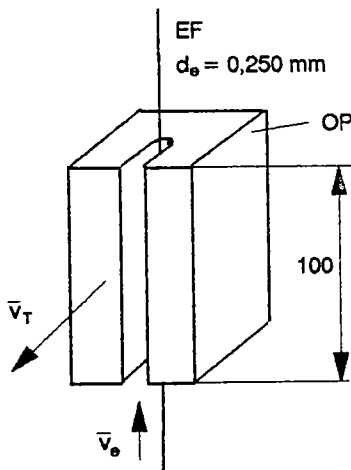
$$x = a - b \quad [m] \quad (109)$$

C. Electroful a fost electroful filiform, iar OP a fost corp masiv (fig.60). Subsystemul nu a ridicat probleme de instalare pe aparatul de prelucrare prin EEF.

D. Electroful a fost electroful filiform. OP, de constructie speciala, a fost constituit din doua piese-pereche, ca in fig.61, rectificata pe toate fetele, asamblate cu bride in timpul prelucrarii. Viteza de deplasare relativa a EF fata de OP a fost plasata permanent in planul de separatie al celor doua piese

asamblate, care, deci, a continut electrodul. Din acest motiv si pentru ca electrodul a avut o grosime greu sesizabila fara instrumente optice, pozitionarea relativa initiala a EF fata de OP a fost mai dificila. Aceasta a fost mult facilitata, totusi, de prezenta comparatorului cu cadran care echipeaza aparatul si de faptul ca toate suprafetele OP au fost rectificata.

Dupa intreruperea prelucrarii, care s-a facut inainte de separarea completa prin prelucrare electroeroziva a celor doua componente ale OP, acestea au fost dezmembrate prin demontarea bridelor. Astfel s-au putut face masurari pe suprafetele prelucrate cu ajutorul comparatorului cu cadran, rezultand profilul acestora



	EF	OP
Material	CuZn 37	OL 37 X 205 Cr 12

Fig.60. Subsistemul electrod-OP: C.

pe directiile Ox si Oy. Latimea fantei intr-un punct oarecare pe inaltimea IT se calculeaza cu relatia:

$$x = (a_1 - b_1) + (a_2 - b_2) \quad [m] \quad (110)$$

unde termenii din membrul drept sunt rezultatele masurarilor efectuate la aceeasi cota pe inaltimea IT, astfel: a_1 si b_1 (fig.61) au fost obtinute pe una din cele doua piese componente ale OP, iar a_2 si b_2 -pe cealalta componenta.

Pe directia Oy se poate stabili abaterea de la linearitate a suprafetei prelucrate, ca urmare a deformarii axei longitudinale a EF prin masurarea cotelor din fig.61 la diferite inaltimei ale IT

si considerand ca la partea inferioara si superioara a IT, in apropierea ghidajelor electrodului (in care acesta este incastrat) deformarea sa este nula.

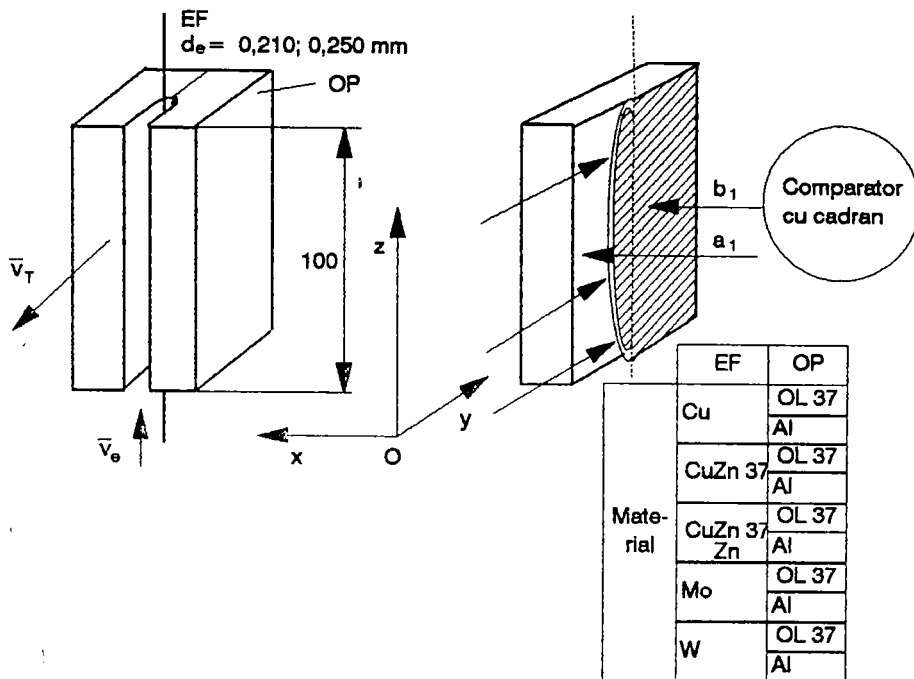


Fig.61. Subsistemul electrod-OP: D.

In fig.62 se prezinta subsistemul, cu OP format din cele doua corpuri fixate cu doua bride, in timpul prelucrarii prin EEF.

4.1.2. Standul experimental 2

Standul experimental 2 (fig.63) a fost utilizat la studiul inaltimei de urcare a apei in IT doar sub actiunea efectului de capilaritate. Contine un vas cu apa si doua perechi de corpuri: o pereche formata din doua lame de sticla, si o pereche din OL 37, formata din OP descris la subsistemul EF-OP: D, care are o fanta prelucrata prin EEF de latime $x=0,3$ mm. Cele doua placi de sticla sunt paralele si mentinute la distanta $x=0,3$ mm una de alta cu un distantier, pentru a simula fanta realizata prin eroziune.

Ambele perechi de corpuri se introduc in baie, urmarindu-se nivelul h_r [m] pana la care apa se ridica in interstitii peste

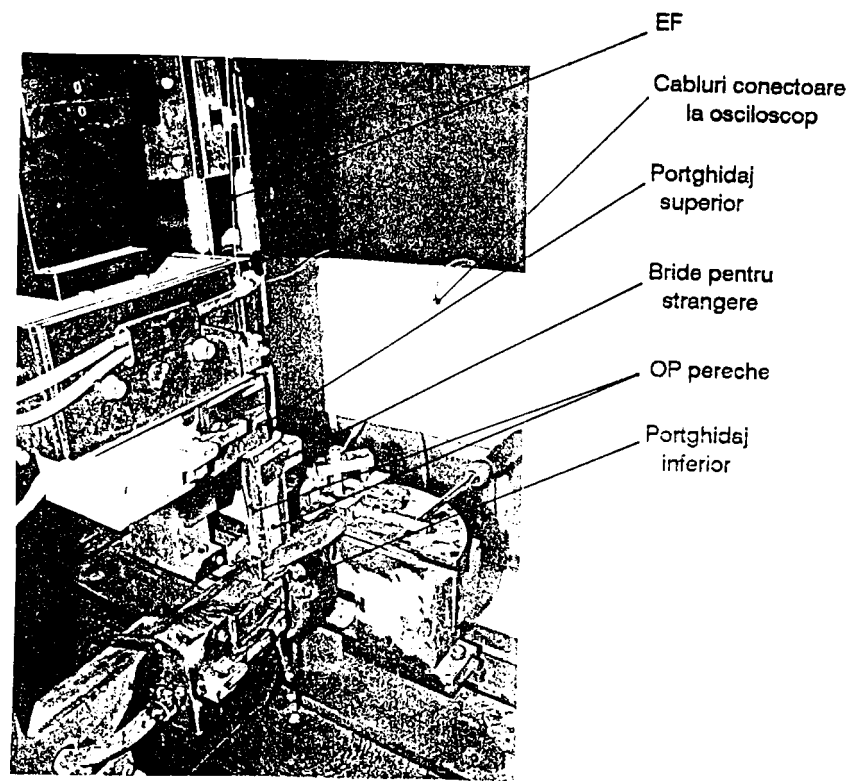


Fig.62. Subansamblul electrod-OP: D , in timpul prelucrării pe standul 1.

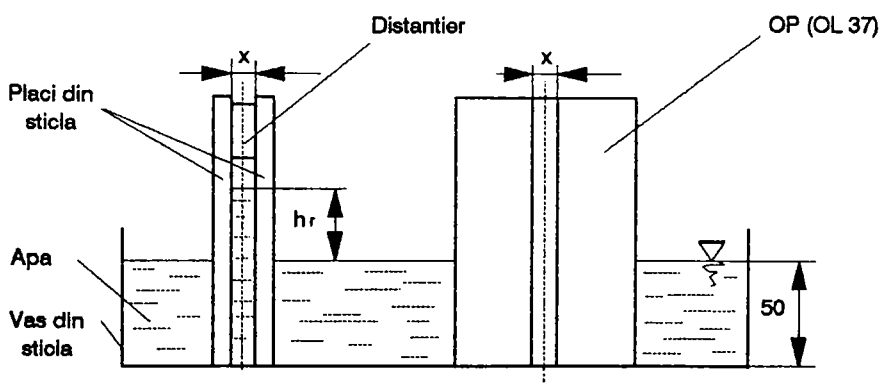


Fig.63. Schema de principiu a standului 2.

nivelul apei din vas. In cazul perechii de placi din sticla acesta se vede prin transparenta. In cazul perechii de placi metalice acesta se observa dupa scoaterea lor din apa si dezasamblarea lor, prin urma lasata de apa pe suprafata prelucrata prin EEF (care este "udata" de apa). Inaltimea h_r se masoara cu un subler cu precizia de 0,1 mm. Apoi suprafetele celor doua perechi de corpuri, care au format interstitiul, se usuca in vederea masurarii rugozitatii lor R_a [μm] cu rugozimetrul de la standul experimental 1.

4.1.3. Standul experimental 3

Standul experimental 3 (fig.64) a fost conceput in vederea studiului comportarii electrozilor filiformi din diferite materiale la incarcarea simultana mecanica si electrotermica, respectiv, la studiul modificarii rezistentei electrice a EF din metale tehnic pure si din aliaje metalice functie de gradul de recoacere a materialelor lor.

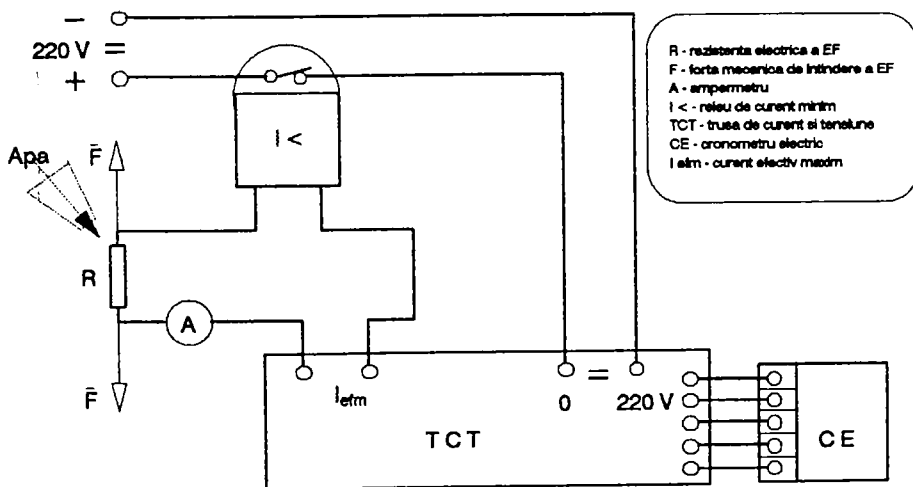


Fig.64. Schema de principiu a standului 3.

Pentru primul obiectiv s-au utilizat EF de diametru 0,250 mm si lungime 40 mm din Cu, CuZn 37, CuZn 37-Zn, Mo si W.

Fora de intindere a electrozilor a fost realizata cu "greutati" etalonate, luand valorile: 0; 2,5; 4,5; 6,5; 8,5 si 10,5

N. Incarcarea electrotermica a electrodului (materializat in fig.64 prin rezistorul R) s-a facut cu ajutorul unei truse de curent si tensiune, TCT, care poate genera un curent efectiv maxim I_{efa} [A] de aceeasi valoare (stabilita in prealabil) indiferent de materialul EF. Curentul de incercare a fost alternativ sinusoidal, de frecventa 50 Hz. S-a utilizat un cronometru electric, CE,, legat prin intermediul unui releu de curent minim, I<, cu rolul de oprire a cronometrului in momentul in care curentul efectiv prin EF a atins valoarea 0 ca urmare a intreruperii circuitului electric. Intreruperea s-a produs prin ruperea, prin topirea sau prin dezintegrarea prin oxidare a esantionului de electrod. Cronometrul, actionat de un motor de curent alternativ la 220 V, a avut diviziunea scalei de 0,01 s. Pentru verificarea valorii curentului s-a folosit un ampermetru cu diviziunea scalei de 0,1 A intr-un domeniu de la 0 la 5 A, respectiv, cu diviziunea scalei de 0,5 A intr-un domeniu de la 5 la 20 A.

Un set de experiente s-a facut mentinand EF intr-un jet de apa coaxial, care a fost adus cu un furtun de diametru interior 3 mm. Temperatura ambianta si temperatura apei au fost masurate cu un termometru cu diviziunea scalei de 1°C. Pentru al doilea obiectiv s-au folosit EF de lungime 40 mm, din Cu de diametru 0,150 mm si din CuZn 37 de diametru 0,250 mm si acelasi stand, unde s-a renuntat la "greutatile" etalonate si la instalatia hidraulica.

In acest caz ampermetrul a fost folosit si la masurarea curentului care a trecut prin EF, la o valoare constanta a unei tensiunii efective de masurare, inainte si dupa tratamentul termic (realizat prin efect Joule-Lenz al curentului electric cu ajutorul trusei de curent si tensiune). Tensiunea a fost generata cu aceeasi trusa. Astfel s-a putut determina reducerea rezistentei electrice a EF in urma tratamentului termic.

4.2. Programe experimentale efectuate

4.2.1. Prezentare generala

In continuare se vor prezenta scopul, metodica, rezultatele obtinute si interpretatea rezultatelor fiecarui experiment efectuat. Pentru asigurarea unei vederi de ansamblu, in tab.4 se prezinta sintetic variabilele independente, parametrii si indicatorii

Tab.4. Programe experimentale efectuate.

Nr. crt.	Prog exp.	Nr. stnd	Variabile indep.	Indicatori urnariti	Conditii de exper.	Scop(uri)
1	E 1	1	polaritatea, t_{ij}	Q_e, Q_p	EEM, pe aparat EEF	-evaluarea influentei efectului de polaritate asupra volumului prelevat, la durate mici ale descarcarii
2	E 2	1	nat. EF	Q_{sp}	EEF, (frecv. redusa)	-stabilirea influentei materialului catodului asupra volumului de material prelevat la anod, la durate mici ale descarcarii
3	E 3	1	nat. EF, nat. OP	$Q_p, Q_2, Q_{sp}, Q_{rel}, \gamma_n$	EEF, industriale	-stabilirea influentei materialelor EF si OP asupra indicatorilor tehnologici cantitativi si calitativi la prelucrarea EEF -stabilirea influentei materialului EF asupra repartizarii energiei impulsului normal la componentele constitutive ale II
4	E 4	1	F, nat. OP	$Q_p, Q_2, Q_{sp}, Q_{rel}, \gamma_n, \chi_n, \gamma_n'$	EEF, industriale	-stabilirea influentei marinii tensiunii de intindere a EF asupra stabilitatii la eroziune electrica a EF si indicatorilor tehnologici cantitativi si calitativi la prelucrarea EEF -stabilirea influentei materialului OP asupra sensului si marinii deformarii axei long. a EF -stabilirea sarcinii distribuite perturbatoare care incarca EF pe directia O _y
5	E 5	1	t_{ij}, f_i, I_j	γ_n	EEF, industriale	-stabilirea influentei parametrilor impulsului de curent asupra marinii deformatiei axei EF pe dir. O _y la mijlocul distantei intre ghidajele EF
6	E 6	1	nat. OP, t_{ij}	Q_p, Q_2, Q_{rel}	EEF, industriale	-stabilirea influentei proprietatilor mecanice ale materialului OP asupra productivitatii -stabilirea influentei materialului OP asupra capacitatii portante ternice a EF
7	E 7	3	nat. EF, t_r	R_R	sinulate	-stabilirea influentei gradului de ordonare a ionilor in reteaaua aliajelor metalice electroconductoare asupra rezistentei lor electrice
8	E 8	3	nat. EF, F, mediul	t_r	sinulate	-stabilirea influentei materialului EF asupra capacitatii de preluare a incarcarii simultane mecanice si electrotermice
9	E 9	2	R_a a OP	h_r	sinulate	-stabilirea cailor reale de introducere a apei in fanta si in II
10	E10	1	R_a a EF, Q_s, Q_i, v_e	Q_p	EEF, industriale	-stabilirea unei corelatii intre marimea rugozitatii suprafetei EF si productivitatea prelucrarii prin EEF. -stabilirea influentei deplasarii axiale a EF asupra regimului hidraulic in II
11	E11	1	nat. EF -alana zincata rona-nesc	Q_p, Q_2, Q_{rel}, R_a	EEF, industriale	-realizarea unui EF multistrat din alana zincata -compararea indicatorilor tehnologici obtinuti la prelucrarea prin EEF cu acest EF cu indicatorii obtinuti la prelucrarea cu un electrod obisnuit, din Cu, fabricat industrial in tara
12	E12	1	F, B	$Q_p, Q_2, Q_{sp}, Q_{rel}, \chi_n, \gamma_n', \gamma_n$	EEF, industriale	-echilibrarea fortelor perturbatoare, urnarind o anulare a deformatiei axei longitudinale a EF -stabilirea influentei campului magnetic asupra indicatorilor tehnologici cantitativi si calitativi

tehnologici urmăriti și scopurile fiecăruia din cele 12 programe experimentale. Luând în considerare gradul înalt de reproductibilitate pe care îl poate asigura aparatul de prelucrare prin EEF, utilizat la experimentari, programul sau încărcat de funcționare, precum și costul orar ridicat al prelucrării, s-a considerat ca suficient numărul de replici 2, pentru majoritatea programelor experimentale efectuate.

4.2.2. Programul experimental E1

Scopul programului E1 a fost de a verifica efectul de polaritate la durate mici ale descărcării, care așa cum reiese din relațiile (1) și (2) determină ca acțiunea de prelevare să se desfășoare cu precădere la anod, în detrimentul prelevării la catod.

E1 s-a desfășurat pe standul 1 cu subsistemul EF-OP: A, care conține un electrod masiv. Standul 1 a fost necesar pentru a folosi generatorul de impulsuri comandate cu care este echipat, capabil să regleze durata impulsului electric într-un interval mic de timp ($1 \dots 4 \mu\text{s}$). Nu s-au folosit electrozi filiformi pentru ca deplasarea lor axială în timpul prelucrării viciaza rezultatele referitoare la debitul uzării.

Prelucrarea prin EEM s-a efectuat pe suprafețele frontale. Pentru facilitarea evacuării produsilor de eroziune, electrodul și OP au avut diametre egale și mici (6 mm), iar IT a fost amplasat vertical.

Parametrii de intrare reglați au fost: durata impulsului de curent, curentul mediu, constanta dielectrică a apei, debitul LD. Apa a fost introdusă în IT cu un debit variabil, funcție de durata impulsului, astfel încât curentul descărcării să rămână la o amplitudine de valoare constantă pentru toate regimurile. În timpul prelucrării s-a urmărit constanta în timp a parametrilor reglați. Frecvența medie a impulsurilor de curent de lucru a fost reglată de către comanda adaptivă și stabilit în urma unor măsurări și calcule prezentate la subcapitolul 4.1.1. Experimentul a fost efectuat în 2 replici. Timp de prelucrare cu fiecare regim: 1 minut. După prelucrare s-au cântărit electrozii și OP și s-au calculat debitul uzării și productivitatea.

Condițiile de experimentare și rezultatele sunt prezentate în fig.65. Pentru fiecare valoare a t_{11} , cu care s-a prelucrat, rezulta $Q_p > Q_e$, ceea ce confirmă afirmațiile teoretice.

Urmărind alura curbelor $Q_e(t_{11})$ și $Q_p(t_{11})$ pentru o pereche de electrozi, se observă că acestea tind să se intersecteze în domeniul de timp $t_{11} \in (3;4) \mu s$, după care Q_p devine mai mic decât Q_e . În acest moment este indicată inversarea polarității electrozilor: electrodul-anod și OP-catod.

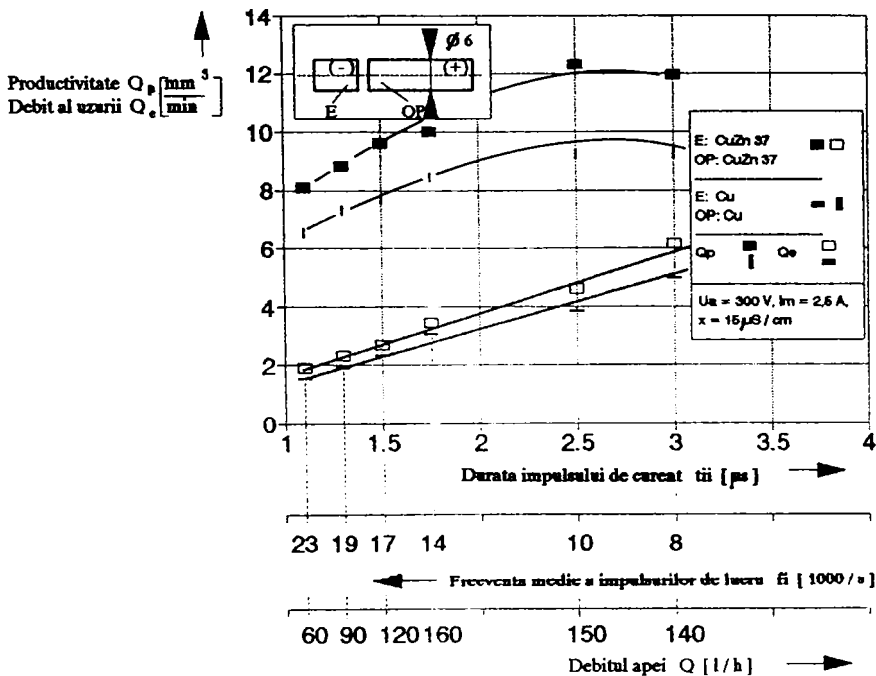


Fig.65. Influența polarității asupra prelevării de material.

De altfel, acest rezultat este aplicat practic de constructorii de aparate de prelucrare prin EEF. El este atât de evident, încât aparatele nu oferă posibilitatea schimbării polarității.

4.2.3. Programul experimental E2

Scopul programului E2 a fost de a verifica parțial concluziile rezultate din relațiile (1), (2) și (3), referitoare la

prelucrarea prin eroziune electrica in general, anume ca volumul de material prelevat la anod la o descarcare singulara este crescator cu temperatura de topire si cu potentialul de iesire a electronilor materialului catodului.

Experimentul s-a desfasurat pe standul 1, dar intrucat aparatul de prelucrare prin EEF nu permite dezvoltarea unor descarcari electrice singulare, s-a adoptat subsistemul EF-OP: B. Acesta favorizeaza evacuarea eficienta a produsilor de eroziune prin inaltimea mica a IT, prin pozitia relativa EF-OP (EF in afara fantei) si prin valoarea ridicata a debitului de injectie a LD.

Parametrii de intrare reglati au fost: durata impulsului de curent, curentul mediu, constanta dielectrica a apei, debitul LD, forta de tensionare axiala a EF si viteza de deplasare axiala a EF. In timpul prelucrarii s-a stabilit frecventa medie a impulsurilor de curent (normale), s-a masurat viteza relativa EF-OP si s-a verificat constanta in timp a parametrilor reglati. Numar de replici: 2. Timp de prelucrare: 1 minut cu fiecare regim.

Dupa prelucrare s-a aflat pierderea de volum a OP prin doua metode: pornind de la determinarea pierderii de masa cu balanta analitica, respectiv pornind de la determinarea pierderii de latime cu comparatorul cu cadran (ca in fig.59). Apoi s-a calculat productivitatea specifica pe impuls de curent.

Conditiiile de incercare si rezultatele sunt prezentate in fig.66. Se observa din valoarea mica a frecventei impulsurilor de tensiune ca s-a atins un timp de pauza suficient de mare pentru a permite deionizarea IT, timp care, conform [15] si [16], este de 10...100 μ s in lichide pure linitite. Prin aceasta se considera ca experimentul s-a apropiat de conditiile unui experiment real de prelevare in conditii de impuls singular. Din studiul curbelor se observa ca Q_{sp} creste odata cu cresterea temperaturii de topire a materialului EF (catod), ceea ce este in concordanta cu concluziile reiesite din teorie.

Se mai vede ca, pentru prelucrarea cu oricare dintre EF productivitatea specifica pentru OP din Al este mai mare decat pentru OP din otel, rezultat aflat in contradictie cu unele rezultate obtinute la prelucrarea EEM. In acest din urma caz, productivitatea relativ scazuta la prelucrarea aluminiului este pusa pe seama conductibilitatii sale termice ridicate si a formarii pe suprafata sa a unei pelicule refractare din Al_2O_3 (temperatura de topire: 2050°C). Prelucrarea prin EEF este caracterizata de o

densitate energetica temporala a descarcarii mult mai mare si de o durata a interactiunii caldurii cu materialul OP mult mai scurta decat la prelucrarea prin EEM. Prima caracteristica, care favorizeaza prelevarea in stare preponderenta de vapori (temperatura de vaporizare a Al: 2500°C), face posibila distrugerea pe cale termica a peliculei refractare. Cea de a doua caracteristica defavorizeaza schimbul de caldura prin conductie intre metalul din pata anodica si metalul din zonele invecinate.

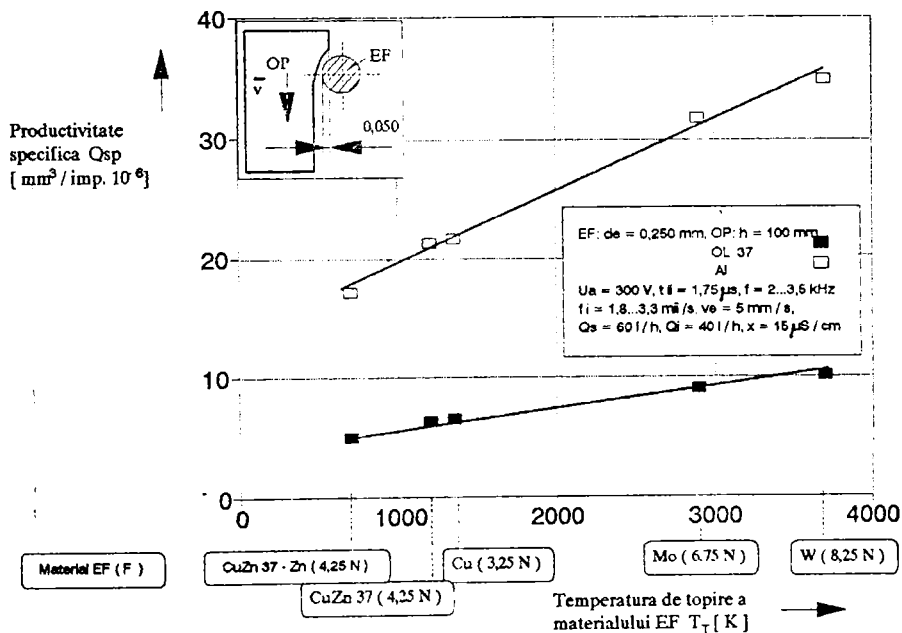


Fig.66. Influenta materialului EF asupra prelevarii pe impuls de curent din OP, in conditii apropiate de prelucrarea cu impulsuri singulare.

Datorita proprietatilor dielectrice recunoscute ale oxidului de Al, acesta ar trebui sa constituie un factor de intarziere a strapungerii. Dar pelicula obtinuta prin oxidarea Al are totdeauna un volum mare de pori [69], [70]: 20-40 %, fapt care se considera ca usureaza amorsarea, fata de cazul unei pelicule dielectrice compacte.

In concluzie, in conditii de prelucrare apropiate de prelucrarea cu impulsuri singulare, materialele de EF cu proprietati mecanice si termo-fizice superioare (W , M_0) dau rezultate superioare, fata de celelalte materiale de electrod, si in privinta productivitatii prelucrarii.

4.2.4. Programul experimental E3

Scopul programului E3 a fost de a determina, in conditii reale de prelucrare prin EEF, influenta materialului EF si a materialului OP asupra frecventei medii a impulsurilor de curent, productivitatii, productivitatii specifice pe impuls de curent, rugozitatii suprafetei prelucrate, latimii fantei, grosimii IT, debitului uzarii. De asemenea, folosind rezultatele experimentale in combinatie modelul matematic al capacitatii portante termice, s-a urmarit calcularea bilantului energetic (repartizarea energiei impulsului normal la componentele constitutive ale IT) la prelucrarea OP din OL 37 cu diferite materiale de EF.

Experimentul s-a efectuat pe standul 1 echipat cu subsistemul EF-OP: D. Parametrii de intrare reglati au fost: durata impulsului de curent, curentul mediu, constanta dielectrica a apei, debitul LD, forta de tensionare axiala a EF si viteza de deplasare axiala a EF. In timpul prelucrarii s-a stabilit frecventa medie a impulsurilor de curent, tensiunea descarcarii, s-a masurat viteza relativa EF-OP si s-a verificat constanta in timp a parametrilor reglati. Numar de replici: 2. Prelucrarea s-a efectuat pe o lungime minima de 2,5 mm, distanta (masurata de la suprafata de intrare a EF in OP) considerata suficient de mare pentru ca regimul tranzitoriu sa se stabilizeze [30].

Dupa prelucrare s-au masurat cu comparatorul cu cadran cotele a si b la mijlocul inaltimii fiecarei piese (fig.61), stabilindu-se latimea fantei in aceasta pozitie x_n [m] si s-a masurat cu rugozimetrul rugozitatea R_n [μ m] a suprafetei prelucrate. S-au cantarit esantioane de electrod de lungime determinata inainte si dupa prelucrare, stabilindu-se debitul uzarii Q_u [mm^3/min] si uzura relativa Q_{rel} [%], cu relatia (108). S-au calculat productivitatea Q_p [mm^3/min], cu relatia (101) si productivitatea specifica pe impuls de curent Q_{sp} [mm^3/imp].

S-a calculat rata energiei impulsului normal revenita EF, OP si LD. Pornind de la valorile experimentale ale productivitatii specifice pe impuls Q_{sp} [mm^3/imp] si ale uzurii specifice pe impuls Q_{se} [mm^3/imp], pentru EF din materiale diferite si OP din OL 37, s-a calculat, in aceleasi ipoteze simplificatoare care s-au utilizat la modelarea matematica a capacitatii portante termice a EF, energia necesara prelevării de material pe impuls, insumata (conform relatiei (7)) cu energia care produce incalzirea prin conductie a EF si OP. Valoarea aqęstei din urma energiei s-a calculat apoi cu relatia (12). Apoi s-a calculat cu relatiile (15) si (16) energia care incalzeste EF prin efect Joule-Lenz. In fine, s-a calculat energia impulsului pentru o tensiune a descarcării (pentru toti electrozii) de 9 V.

Condițiile de experimentare si rezultatele sunt prezentate in figurile 67, 68, 69, 70 si 71.

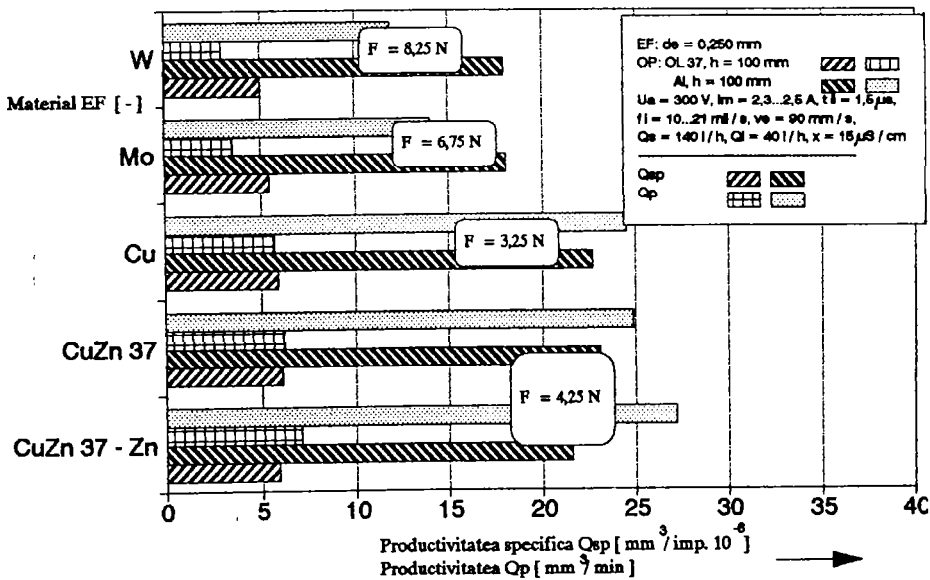


Fig.67. Influenta materialului EF asupra productivitatii si productivitatii specifice pe impuls de curent.

Contrar rezultatelor obtinute la E2, productivitatea specifica pe impuls (fig.67) are o dependenta inversa fata

materialul EF: electrozii cu proprietati mecanice si termo-fizice bune, genereaza o productivitatea specifica pe impuls scazuta. La fel se comporta si productivitatea. Aceasta denota ca procesul electroeroziv integrat se desfasoara conform unor legitati care se abat de la cele care guverneaza procesul in cazul descarcarii singulare, gradul de impurificare a IT avand un rol hotarator in stabilirea conditiilor de strapungere, a energiei descarcarii si, prin aceasta, asupra prelevarii de material. Metalele de electrod cu temperatura mica de topire si de vaporizare au permis prelucrarea la frecvente medii ale impulsurilor de curent mai mari decat celelalte metale (fig.68), confirmand astfel teoria ca strapungerea este favorizata de acestea prin densitatea mare a produsilor de eroziune, aflati in IT in stare fin dispersata.

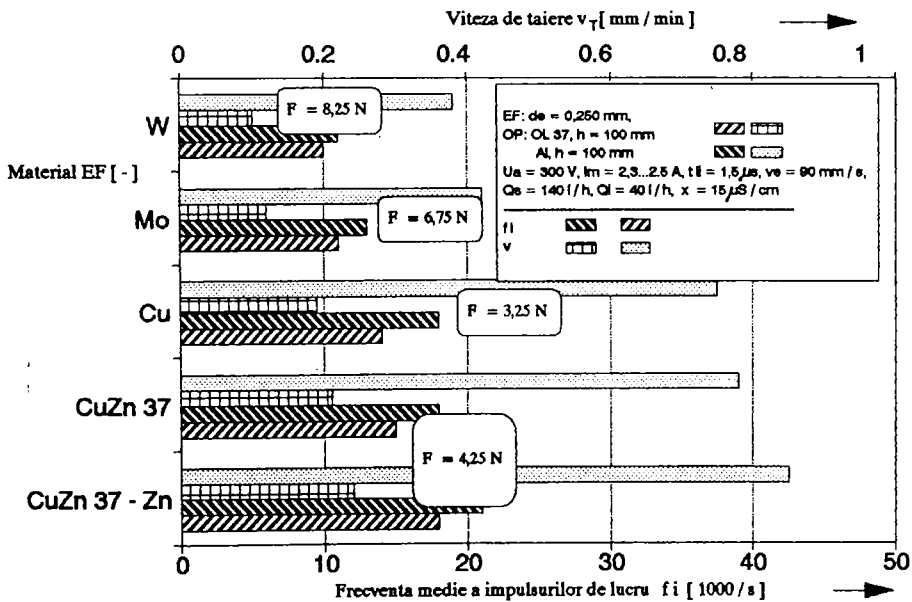


Fig.68. Influenta materialului EF asupra frecventei medii a impulsurilor de curent si vitezei de prelucrare.

Prezenta lor in numar mare determina si micșorarea energiei descărcărilor la a căror amorsare participa, fapt vizibil practic prin valoarea mica a rugozitatii suprafeței prelucrate (fig.69). Aceste rezultate coincid cu cele din literatura [5], [18]. De asemenea se observa ca diferentele valorilor productivității

specifice, obtinute cu diferite materiale de EF, nu mai sunt atat de mari ca in cazul prelucrarii in conditii apropiate de prelucrarea cu impulsuri singulare.

Aceleasi rezultate si concluzii ca la E2 au fost obtinute in urma compararii comportarii la eroziune a otelului si aluminului. Productivitatea specifica mult mai mare in cazul prelucrarii Al (oglundita si in rugozitatea marita) decat in cazul prelucrarii otelului, este insotita si de o frecventa marita. Acest fapt poate fi pus pe seama unui grad mai mare de impurificare a IT, cu produse de eroziune mai fin dispersati, la prelucrarea Al, ceea ce favorizeaza scurtarea duratei de strapungere.

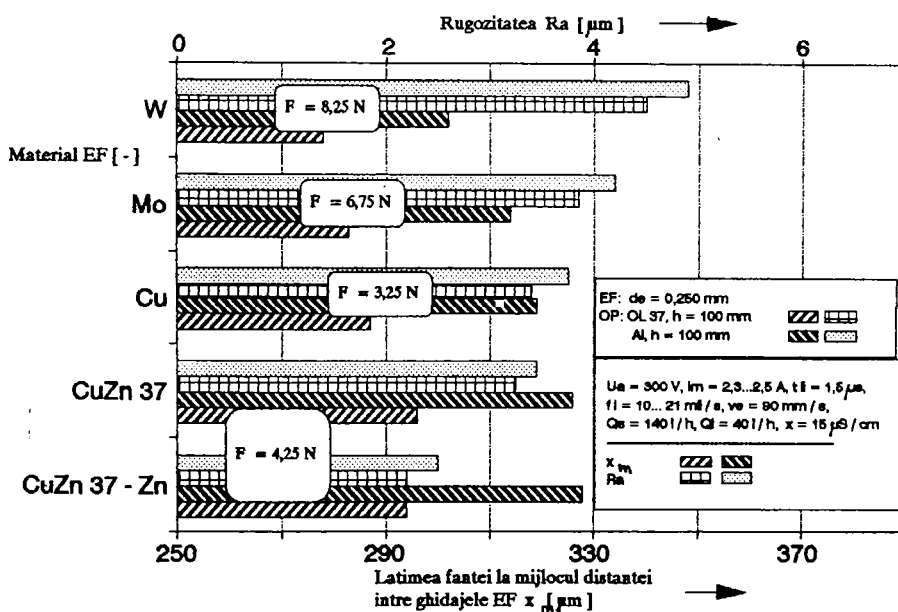


Fig.69. Influenta materialului EF asupra rugozitatii si latimii fantei la mijlocul distantei intre ghidaje.

In fig.70 se observa, asa cum era de asteptat in urma modelarii matematice a capacitatii portante termice a EF, ca materialele cu constantele termofizice: λ_r , λ_v , T_r , T_v , λ , ρ de valori ridicate au o stabilitate la eroziune electrica ridicata.

Rezultatele referitoare la bilantul energetic se prezinta in fig.71.

Se observa ca rata energiei utilizate la prelevarea de material este de aproximativ 30...40 % din energia impulsului. Bilantul energetic la prelucrarea prin EEM, calculat dupa o metoda aproximativa, ale carui rezultate sunt prezentate in [5] arata ca rata energiei impulsului care participa la prelevarea de material era in medie de 10 % (intre 3 si 17 %, functie de perechea de materiale electrod-OP). Prelucrarea prin EEM se deosebeste, d.p.d.v. al caracteristicilor impulsului de curent, de prelucrarea prin EEF prin amplitudinea sa mica si durata sa mare. In acest

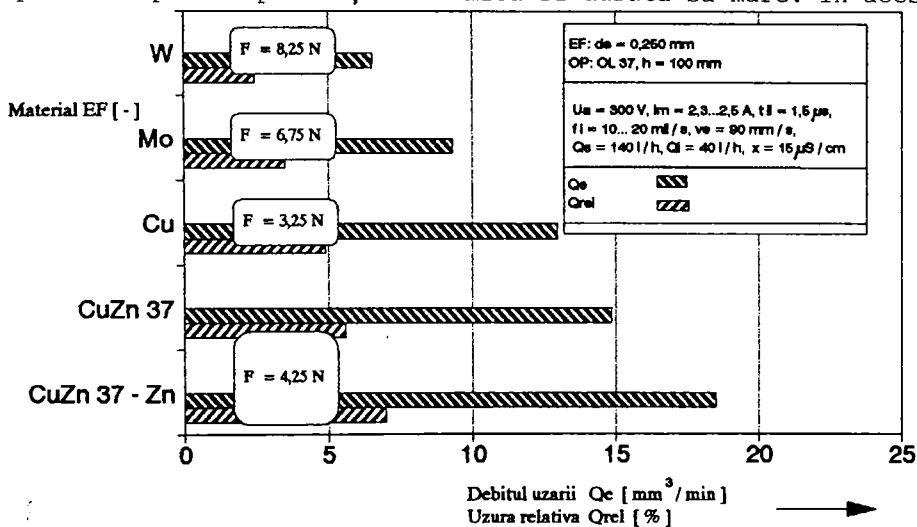


Fig.70. Uzura EF functie de materialul EF.

interval (la prelucrarea prin EEM) mare exista timp pentru ca materialul din petele electrodice sa faca schimb de caldura cu mediul, pierzandu-se astfel aproximativ 10 % din energia impulsului in masa electrozilor si 80 % in masa lichidului de lucru. La prelucrarea prin EEF, timpul scurt in care energia este introdusa, cu un caracter mai pregnant de "soc", limiteaza pierderile de caldura, crescand astfel randamentul energetic al actiunii impulsului. In fig.71 se vede ca materialele de EF care confera o capacitate portanta ridicata electrodului, absorb mai putina energie prin efect Joule-Lenz. Dar acest potential avantaj nu este folosit in contul cresterii ratei energiei care produce prelevarea, ci la incalzirea suplimentara a electrozilor prin conductie si, in principal, favorizeaza pierderea unei mai mari fractiuni a energiei impulsului in mediul lichid.

In concluzie, se poate afirma ca in conditii reale de

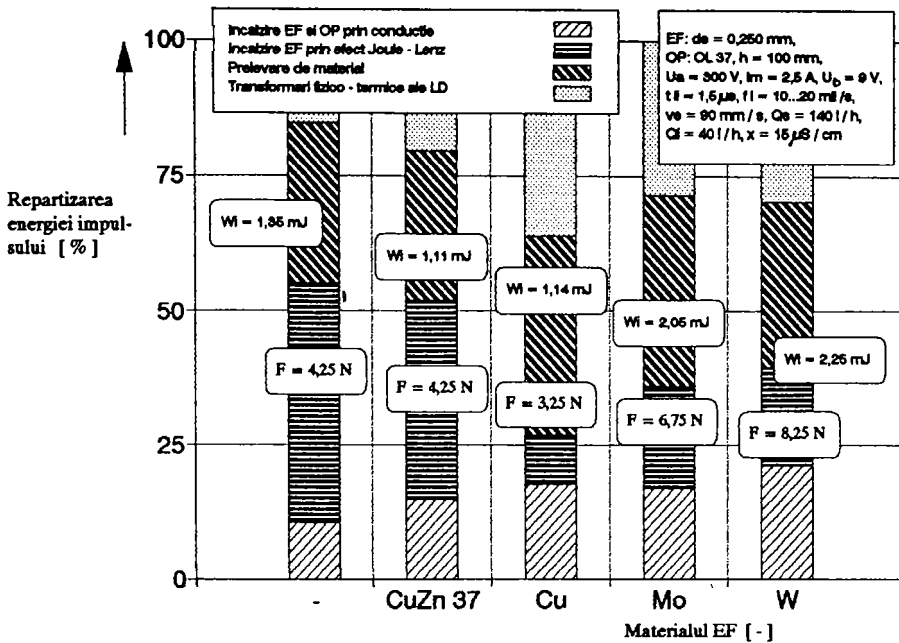


Fig.71. Repartizarea energiei impulsului la componentele constitutive ale IT, functie de materialul EF.

prelucrare, electrozii cu capacitate portanta fizica mare nu asigura o productivitate ridicata: d.p.d.v. al criteriului productivitatii, cu cat capacitatea lor portanta fizica este mai mare, cu atat productivitatea prelucrarii EEF este mai mica si, deci capacitatea lor portanta tehnologica este mai mica.

4.2.5. Programul experimental E4

Scopurile programului E4 au fost:

- stabilirea practica a influentei marimii tensiunii de intindere a EF asupra deformarii axei sale longitudinale (determinata, in prealabil, teoretic), asupra frecventei medii a impulsurilor de curent, asupra stabilitatii la eroziune electrica a EF, asupra productivitatii si productivitatii specifice a prelucrarii, asupra rugozitatii suprafetei prelucrate;

- stabilirea influentei materialului OP asupra sensului si marimii deformarii axei longitudinale a EF;

-stabilirea indirecta a sarcinii distribuite care incarca EF pe directia Oy.

E4 s-a efectuat pe standul 1 echipat cu subsistemul EF-OP: D. Se considera ca abaterile de la rectilinitate ale suprafetei prelucrate sunt generate prin "copierea" abaterilor de la rectilinitate ale EF. Deci prin masurarea primelor, se poate deduce marimea celor din urma.

Cuplul de materiale EF-OP a fost: EF din CuZn 37 de diametru 0,250 mm si OP din OL,37 si Al. Numar de replici: 2. Deplasarea relativa EF-OP minima, pentru fiecare regim de lucru, a fost 2,5 mm. Parametrii de intrare reglati au fost: durata impulsului de curent, curentul mediu, constanta dielectrica a apei, debitul LD, viteza de deplasare axiala a EF (parametri constanti) si forta de tensionare axiala a EF (variabila). In timpul prelucrarii s-a stabilit frecventa medie a impulsurilor de curent, tensiunea descarcarii, s-a masurat viteza relativa EF-OP si s-a verificat constanta in timp a parametrilor reglati.

Dupa prelucrare s-au masurat:

-abaterile de la linearitate ale suprafetei prelucrate pe directia Oy in 11 puncte echidistante de pe inaltimea OP, cu comparatorul,

-abaterile de la linearitate ale suprafetei prelucrate pe directia Ox in 6 puncte echidistante de pe inaltimea OP, cu comparatorul,

-rugozitatea suprafetei, cu rugozimetrul si

-masa finala a EF, cu balanta analitica.

S-au calculat:

-frecventa medie a impulsurilor de curent,

-latimea fantei in punctele masurate,

-debitul uzarii,

-uzura relativa, cu relatia (108),

-productivitatea prelucrarii,

-productivitatea specifica pe impuls Q_{sp} [mm^2/imp].

S-au determinat grafic, in urma rezultatelor experimentale:

-latimea fantei prelucrate la mijlocul inaltimei OP, x_n [m],

-deformarea axei longitudinale a EF pe directia Oy, la mijlocul inaltimei OP, y_n [m].

S-a determinat, combinand rezultatele experimentale cu cele analitice, sarcina statica echivalenta distribuita, $q_s + q_{ech}$ [N/m] care a deformat EF pe directia Oy, prin introducerea valorii

deformarii de la mijlocul inaltimei OP in relatia (88), respectiv, prin introducerea valorii deformarii curente in relatia (76).

Conditiiile de experimentare si rezultatele sunt prezentate in figurile 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80 si 81. La prelucrarea otelului (fig.72 si 73) si aluminului (fig.73) se observa ca pe directia Oy, suprafata prelucrata, deci axa EF, nu respecta concluziile reiesite in urma modelarii matematice, anume din relatia (86) si fig.54: ar trebui sa fie o parabola cu sageata la

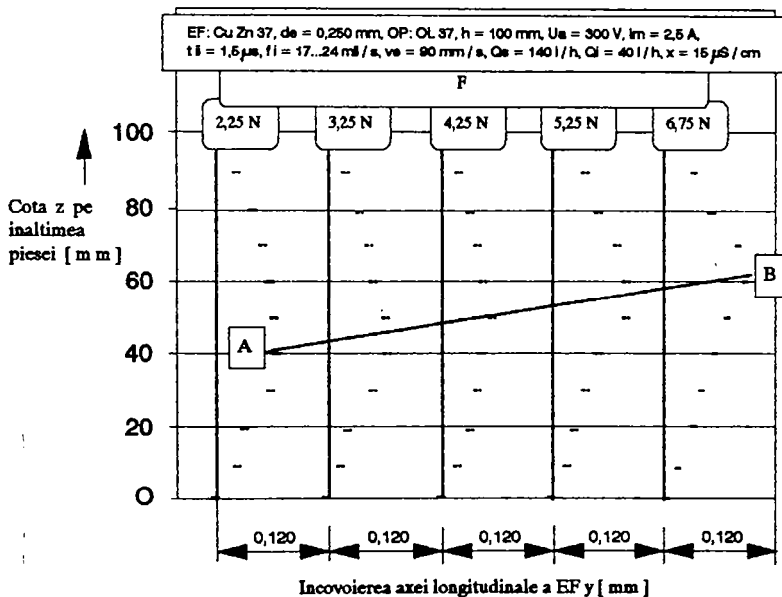
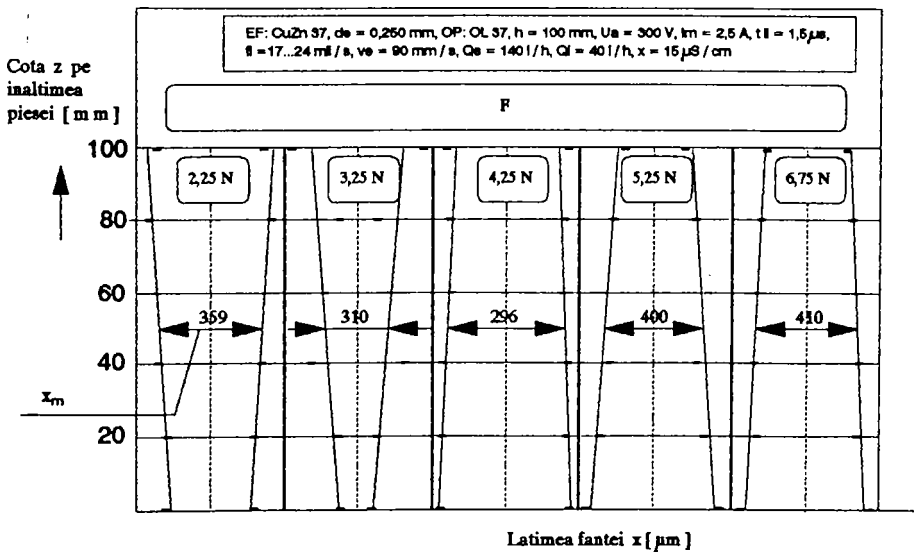
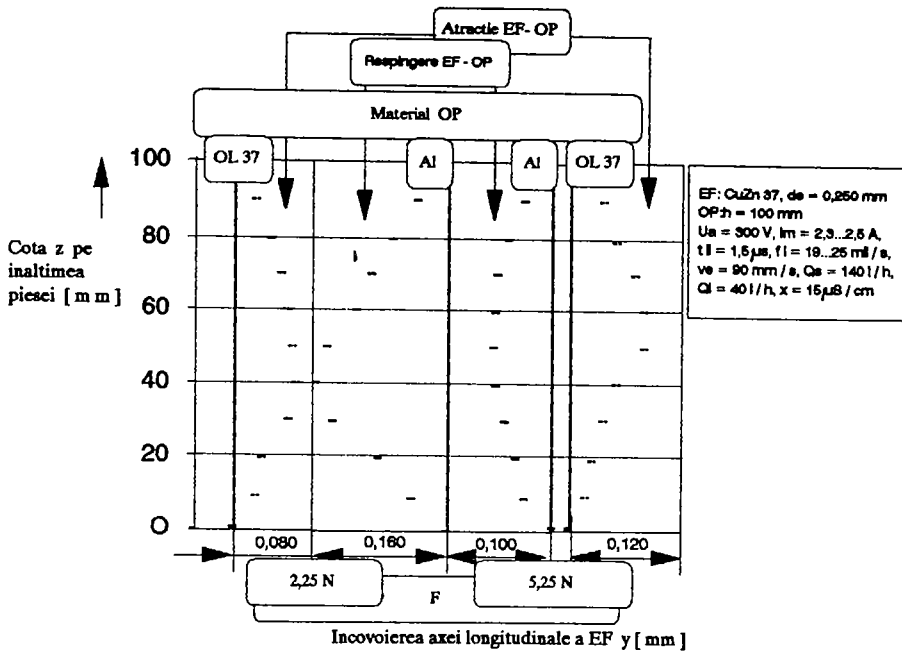


Fig.72. Incovoierea axei longitudinale a EF pe directia Oy functie de forta de intindere.

mijlocul distantei între ghidajele EF, peste care sa se suprapuna ondulatii de lungime de unda mica ca urmare a vibratiilor electrodului. Suprafata reala obtinuta releva urmatoarele abateri de la modelul matematic si aspecte noi, neincluse in acesta:

a-cu comparatorul de precizie 1 μ m nu s-au pus in evidenta vibratiile EF pe directia Oy (nici cu microscopul de scule nu s-au putut evidenta); concluzia este ca amplitudinea lor este mai mica de 1 μ m, fapt pus pe seama raportului mic între frecventa proprie a EF si frecventa impulsurilor electrice.

b-incovoierea axei EF pe Oy se abate, in unele cazuri, de la



forma unei parabole, cazuri in care sageata nu este plasata la mijlocul inaltimii IT; in cazul in care axa EF se curbeaza dupa o parabola (fig.72), pentru OP din OL 37 si forta de intindere a EF de 4,25 N, sageata este plasata la mijlocul inaltimii IT; aceasta observatie trebuie corelata cu alura fantei pe directia Ox (fig.74), care este intr-o interdependenta biunivoca cu regimulhidraulic si cu dimensiunile transversale ale EF, care depind (toate) si de forta de intindere. Astfel, ca regula generala, se poate conchide ca atunci cand fanta are peretii aproximativ paraleli (in cazul OP din OL 37, pentru $F=4,25$ N), procesele din IT au o distributie uniforma pe inaltimea IT, determinand o incovoiere a EF dupa o parabola cu sageata minima si la mijlocul distantei intre ghidajele sale; in cazul in care flancurile fantei nu sunt paralele, sageata este mai mare si deplasata pe inaltimea IT spre extremitatea unde acestea sunt mai apropiate. Concluzia este ca factorul important care produce asimetria incovoierii EF pe directia Oy este jetul de apa care paraseste IT pe aceasta directie, avand viteza de iesire mai mare in spatiile mai inguste. Daca la forte mici de intindere a EF (in cazul OP din OL 37, pentru $F=2,25$ si $3,25$ N) este normal ca sageata sa fie mare, apare ca o anomalie ca sageata sa fie mare in domeniul fortelor mari de intindere ($5,25$ si $6,75$ N).

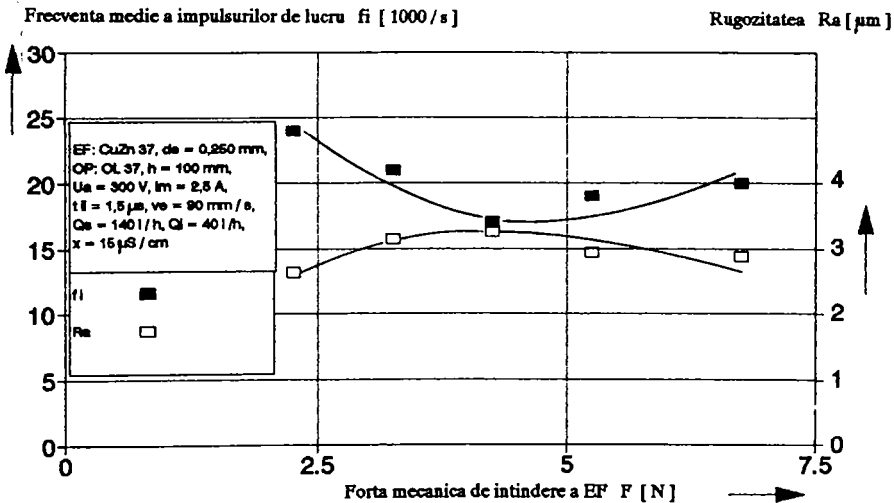


Fig.75. Influenta fortei de intindere a EF asupra frecventei medii a impulsurilor de curent si rugozitatii.

c-frecventa medie a impulsurilor de curent atinge un minim pentru cazul $F=4,25$ N, fapt atestat si de maximul atins de rugozitate (fig.75). Probabil in celelalte cazuri, rigiditatea mai mica a EF a permis vibrarea sa in directia Ox cu efecte benefice asupra amorsarii descarcarilor laterale la energii mai mici, fapt care este posibil sa fie si cauza latirii fantei (fata de cazul $F=4,25$ N).

O alta regula generala, desprinsa din aceste observatii: functie de marimea fortei de intindere, modul de variatie a sagetii EF pe directia Oy este acelaasi cu modul de variatie a latimii fantei si invers modului de variatie a rugozitatii si a productivitatii specifice pe impuls de curent (prezentata in fig.76).

d-in fig.77 se prezinta variatia rugozitatii OP din otel pe inaltimea suprafetei prelucrate, pentru 3 regimuri de prelucrare (care difera intre ele numai prin valoarea fortei de intindere). Variatiile au fost analoge la prelucrarea OP din otel si Al, pentru toate regimurile de lucru.

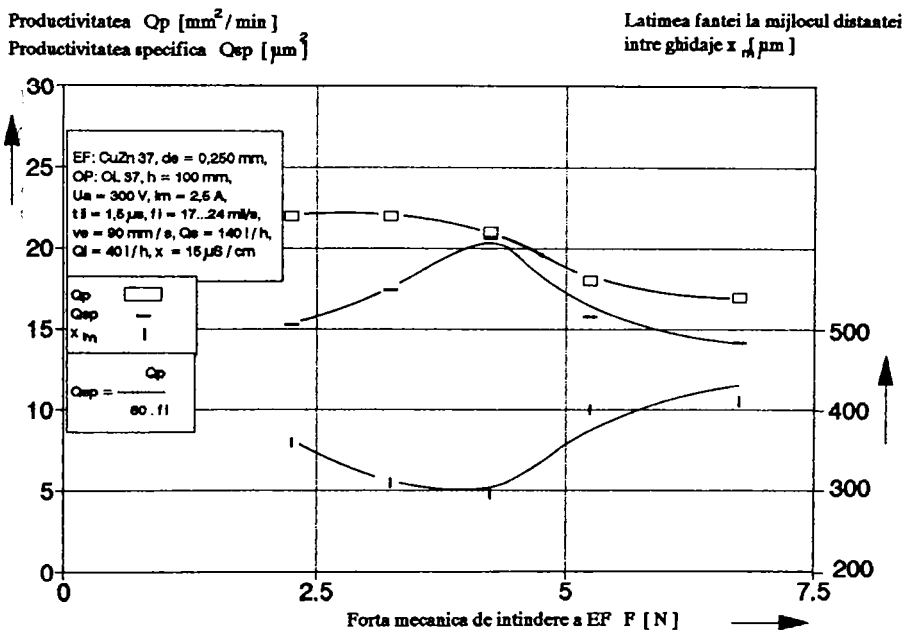


Fig.76. Influenta fortei de intindere a EF asupra latimii fantei la mijlocul distantei intre ghidaje, productivitatii si productivitatii specifice.

Comparand deformatiile axei EF pe directia Oy in cazul prelucrarii otelului si aluminiului, se observa ca sensurile deformarii sunt opuse (fig.73), ceea ce inseamna ca fortele perturbatoare rezultante care le-au produs au avut sensuri opuse: la OL 37-spre OP si la Al-dinspre OP. Singura componenta a fortei rezultante aplicate EF, care poate avea sensuri opuse functie de proprietatile materialului OP, este forta electromagnetica. Aceasta

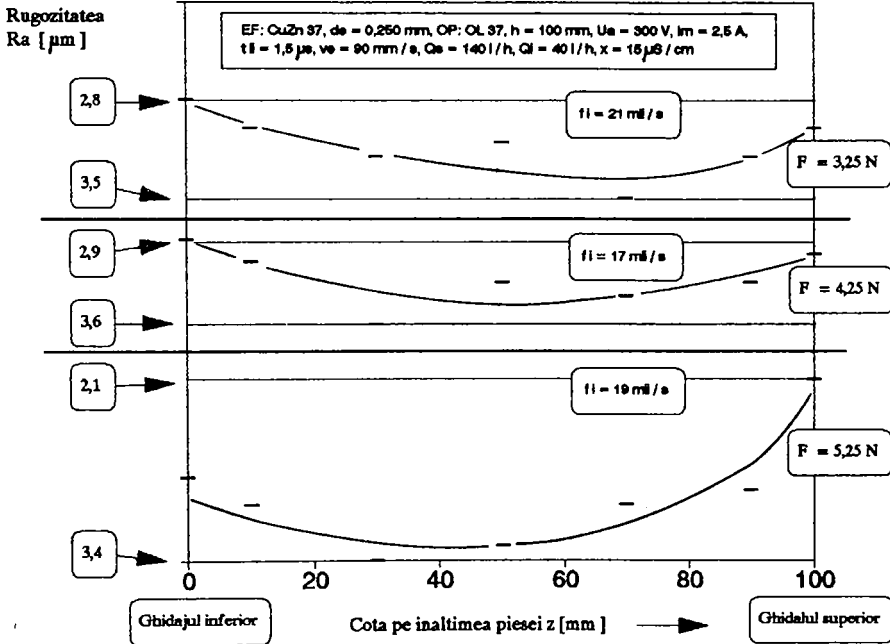


Fig.77. Variatia marimii rugozitatii pe inaltimea IT.

este orientata spre OP, daca acesta este dintr-un material feromagnetic (ex.: OL 37) si dinspre OP, daca acesta este dintr-un material amagnetic (ex.: Al). La prelucrarea acestuia din urma, conform rezultatelor modelarii matematice a capacitatii portante mecanice a EF, forta electromagnetica are o valoare neglijabila. Astfel rezultanta fortelor are doar trei componente: electrostatica, hidrodinamica si mecanica (datorata presiunii gazului din bula).

Cu ajutorul relatiei (76) si a rezultatelor experimentale s-au trasat locurile geometrice, approximate cu parabole, cele mai apropiate de pozitia reala a axei longitudinale a EF in timpul prelucrarii, pentru doua valori ale fortei F (fig.78). Astfel s-au stabilit valorile sarcinilor distribuite $q_s + q_{ch}$ s [N/m] care au deformat EF pe directia Oy si care sunt inscrite pe figura.

In fig.79 se prezinta valorile sarcinii distribuite care incarca electrodul, calculate cu relatia (88) pornind de la valorile experimentale ale incovoierii EF la mijlocul distantei intre ghidaje. Se observa ca sarcina distribuita stabilita experimental

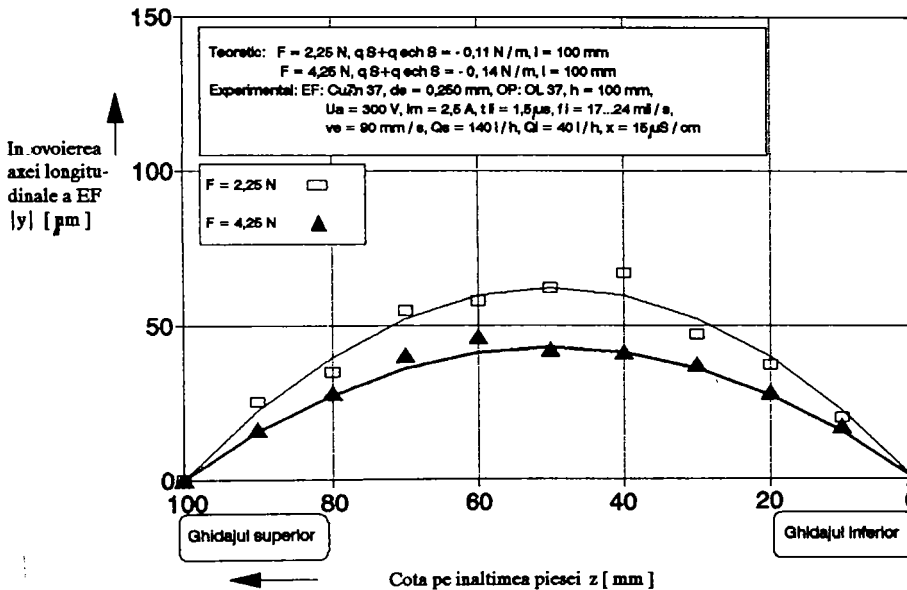


Fig.78. Incovoierca axei longitudinale a EF pe directia Oy, pe inaltimea IT.

nu este constanta, ea crescand brusc, in valoare absoluta, in domeniul fortelor mari de intindere a electrodului, atat in cazul prelucrarii otelului, cat si a aluminiului.

In fig.80 s-au trasat, pentru OP din otel si aluminiu, curbele teoretice ale variatiei sagetii functie de forta de intindere, obtinute prin introducerea valorilor cele mai probabile ale fortelor rezultante perturbatoare in relatia (88). Peste aceste curbe s-au suprapus valorile experimentale ale deformatiilor axei EF la mijlocul distantei intre ghidaje. Si din aceasta figura se observa ca o capacitate portanta mecanica intrinseca mare (reprezentata prin curbele teoretice care tind spre 0) este insuficienta, pentru ca, in domeniul fortelor mari de intindere,

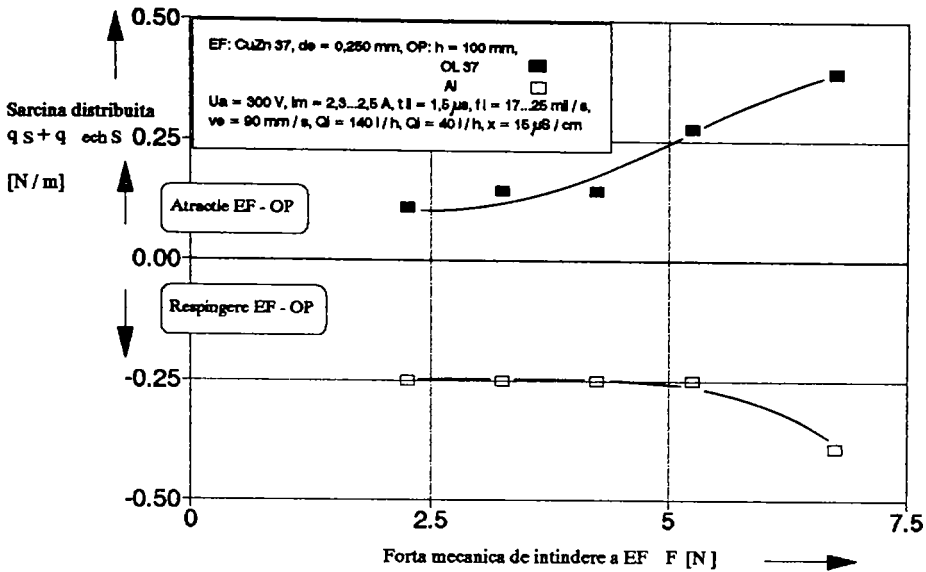


Fig.79. Influenta fortei de intindere a EF asupra valorii sarcinii distribuite perturbatoare.

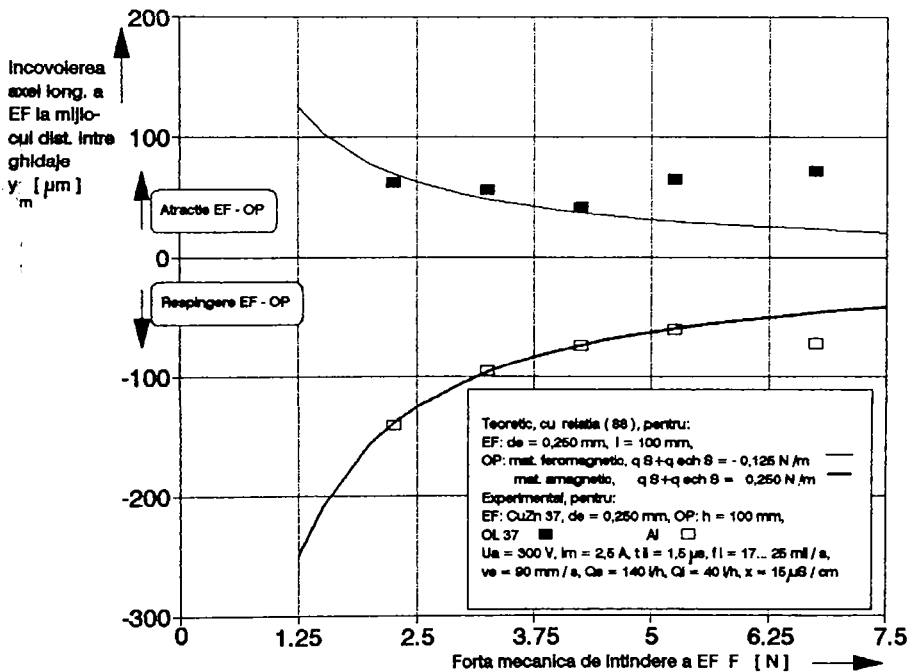


Fig.80. Comparatie intre valorile teoretice si experimentale ale incovoierii axei EF la mijlocul distantei dintre ghidaje.

deformatiile reale se abat de la cele stabilite teoretic, crescand in valoare absoluta, datorita cresterii valorilor sarcinii perturbatoare (rezultata din fig.79).

Nu s-au pus in evidenta vibratiile Strouchal pe directia Ox. Conform concluziilor modelului matematic, pentru cazul studiat experimental (diametru EF, grosime si inaltime IT) acestea ar trebui sa apara numai la viteze de iesire a apei din IT mai mari de 0,9 m/s. Aceasta viteza ar corespunde unui debit de iesire a apei prin duze de 2x1000 l/h (asa cum reiese din fig.43).

Urmarind variatia uzurii EF functie de cresterea fortei de intindere a EF, aceasta scade vizibil cu cresterea fortei, atat la prelucrarea OL 37 (fig.81), cat si la prelucrarea Al. Simultan productivitatea, exprimata ca volum de material erodat pe unitatea

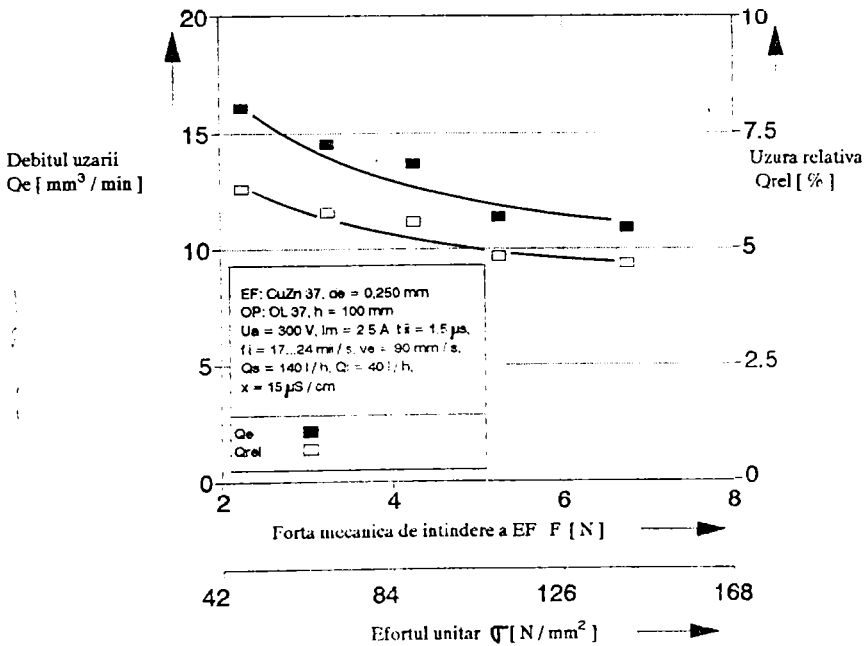


Fig.81. Influenta starii de tensiuni interne a EF asupra uzurii.

de timp (relatia (101)) are tendinte usor descrescatoare. Cu siguranta ca la aceasta evolutie contribuie modul de curgere a apei in IT (turbulent sau laminar), grosimea IT, reducerea sectiunii transversale a EF cu cresterea fortei de intindere. Se poate emite ipoteza ca la scaderea debitului uzurii o contributie importanta isi aduce starea de tensiuni mecanice interne a EF, care cresc cu

cresterea fortei de intindere a electrozudului. Este cunoscut faptul ca, desi se afirma ca "indicatorii tehnologici cantitativi la prelucrarea prin eroziune electrica nu depind de proprietatile mecanice ale materialului care se prelucraza", ei depind totusi. De exemplu, din practica se stie ca viteza de taiere prin EEF a otelului X 205 12 Cr tratat termic (mai puternic tensionat) este mai mica cu aproximativ 20 % decat cea obtinuta la prelucrarea aceleiasi marci de otel in stare netratata termic (mai slab tensionat). [5.] face afirmatii asemanatoare, referindu-se la alte marci de oteluri.

In concluziile care se desprind din rezultatele acestui experiment, se poate afirma ca:

-valoarea limitei de curgere a materialului EF, care, conform modelului matematic este hotaratoare pentru obtinerea unei precizii ridicate a prelucrarii, are importanta numai in domeniul eforturilor unitare de tractiune mici. Astfel devine nejustificata economic folosirea unor materiale de EF cu limita de curgere ridicata. De aceea trebuie actionat in directia cresterii capacitatii portante mecanice extrinseci a EF.

-functie de scopul tehnologic urmarit, exista o valoare optima a fortei de intindere pentru un EF dat:

- *pentru productivitati mari-forta mica,
- *pentru abateri de la linearitate ale suprafetei prelucrate minime si regulate pe inaltimea OP-forta medie;
- *pentru uzura mica a EF-forta mare.

Intrucat cel de al treilea scop nu este, in general urmarit, pentru indeplinirea celorlalte doua scopuri, la prelucrarea unei piese trebuie alocate cel putin doua treceri cu regimuri diferite:

*prima-de separare, cu regim de degrosare, dupa schema EF in fanta, cu o forta mica de intindere a EF;

*a doua (eventual, urmatoarele)-cu regim de finisare, dupa schema EF in afara fantei, cu o forta medie de intindere a EF.

Astfel, cel de-al treilea scop este sacrificat in beneficiul primelor doua. Prelucrarea in mai multe treceri permite, in plus, reglarea descrescatoare in trepte a fortei perturbatoare care deformeaza EF si a caldurii care il solicita, contribuind astfel la cresterea capacitatii portante termice si mecanice extrinseci a EF.

Experimentul este original prin conceptia sa: forma si dimensiunile OP, pozitia relativa EF-OP (EF in fanta), scopul urmarit (influenta fortei de intindere asupra indicatorilor tehnologici calitativi si cantitativi). De vibratiile Strouhal inca

nu s-a ocupat nici o lucrare referitoare la prelucrarea EEF, nici pe plan teoretic, nici experimental.

4.2.6. Programul experimental E5

Scopul programului E5 este de a stabili o corelatie intre valorile parametrilor impulsului de curent si marimea deformarii axei EF la mijlocul distantei intre ghidajele EF pe directia Oy.

S-a folosit standul 1 in combinatie cu subsistemul EF-OP: D. Cuplul de materiale a fost: EF din CuZn 37 si OP din OL 37. Parametrii reglati au fost aceeasi ca la E4, cu exceptia fortei de intindere a EF, care a fost mentinuta constanta si a duratei impulsului de curent, care a fost variabila. S-au efectuat 2 replici.

Aparatul inclus in stand nu permite decelarea parametrilor impulsului de curent. Astfel, mentinand valoarea curentului mediu constanta, pentru diferite valori ale t_{ii} [s], rezulta valori diferite ale curentului descarcarii, functie de frecventa medie a impulsurilor de curent. Din acest motiv se introduce un parametru:

$$A = I_D t_{ii} \quad [C] \quad (111)$$

legat de frecventa medie a impulsurilor de curent, fata de care se urmareste deformarea axei EF.

Parametrii masurati in timpul prelucrarii au fost aceeasi ca la E4. Parametrul masurat dupa prelucrare a fost abaterea de la rectilinitate, la mijlocul inaltimii IT, a suprafetei prelucrate pe directia Oy, dupa metodica descrisa la prezentarea subsistemului EF-OP: D.

Conditiiile de incercare si rezultatele sunt prezentate in fig.82. Rezultatele sunt conforme asteptarilor: curba $y_*(A)$ variaza avand un maxim. Pentru valori mari ale parametrului A [C], incovoierea EF se atenuaza datorita diminuarii frecventei medii a impulsurilor de curent. Interesant este ca maximum deformarii a fost detectat pentru acelasi regim care la experimentul anterior a generat minimum deformarii. Aparent, in urma acestui experiment rezulta ca EF are o capacitate portanta mecanica minima pentru acelasi regim pentru care la E4 a rezultat o capacitate portanta mecanica maxima. Pentru elucidarea acestei dileme, se poate

considera un criteriu suplimentar, ales functie de scopul tehnologic urmarit. De exemplu, considerand viteza de prelucrare functie de parametrul A [C], aceasta are un maxim chiar in punctul de abscisa discutata. Deci, in cazul in care si acest criteriu de comparatie este important, tocmai regimul discutat este optim.

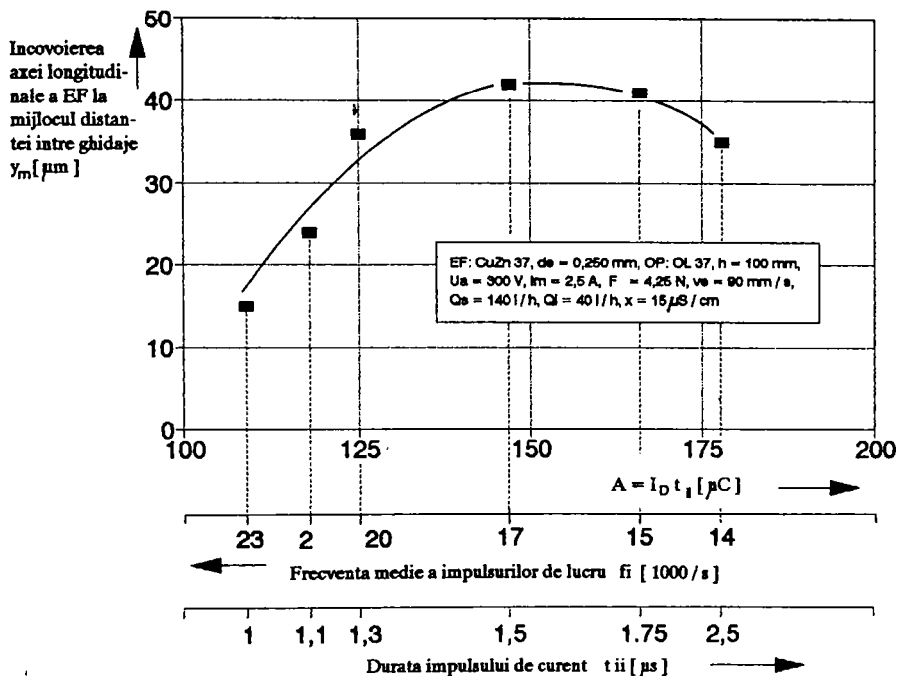


Fig.82. Influenta parametrilor impulsului de curent asupra incovoierii EF pe directia Oy.

Experimentul este original prin faptul ca s-a efectuat in conditii reale de prelucrare, neexistand in bibliografia studziata unul asemanator. [4] s-a ocupat de determinarea sagetii EF in afara fantei, in conditii simulate, incarcand electrodul succesiv cu forte electrostatice si electromagnetice. Pentru studiu a folosit tensiune continua si alternativa, materiale de OP fero- si amagnetice, variind diametrul EF si grosimea IT, obtinand rezultate conforme cu cele ale modelului matematic din prezenta lucrare. Experimentul se abate sensibil de la conditiile reale de prelucrare, prin neglijarea celorlalte forte si a impurificarii IT cu produse de eroziune, rezultatele sale avand o importanta in domeniul electrotehnic.

4.2.7. Programul experimental E6

Scopurile programului E6 au fost:

-stabilirea unei corelatii intre proprietatile mecanice ale materialului OP si productivitatea prelucrarii, verificand afirmatiile facute in cadrul interpretarii rezultatelor E4,

-stabilirea existentei unei influente a materialului OP asupra capacitatii portante termice a EF.

Prelucrarea s-a efectuat pe standul 1, echipat cu subsistemul EF-OP: C. Parametrii reglati au fost aceeasi ca la E5. S-a facut 1 replica. Dupa prelucrare s-au stabilit uzura relativa Q_{rel} [%], cu relatia (108), in urma cantaririi unor esantioane de EF si productivitatea prelucrarii.

Conditiiile de experimentare si rezultatele sunt prezentate in fig.83. Alura curbelor productivitatii este cea asteptata: un maxim pentru un regim optim, la durate mai mari ale impulsului de curent, micsorandu-se frecventa medie a impulsurilor de curent.

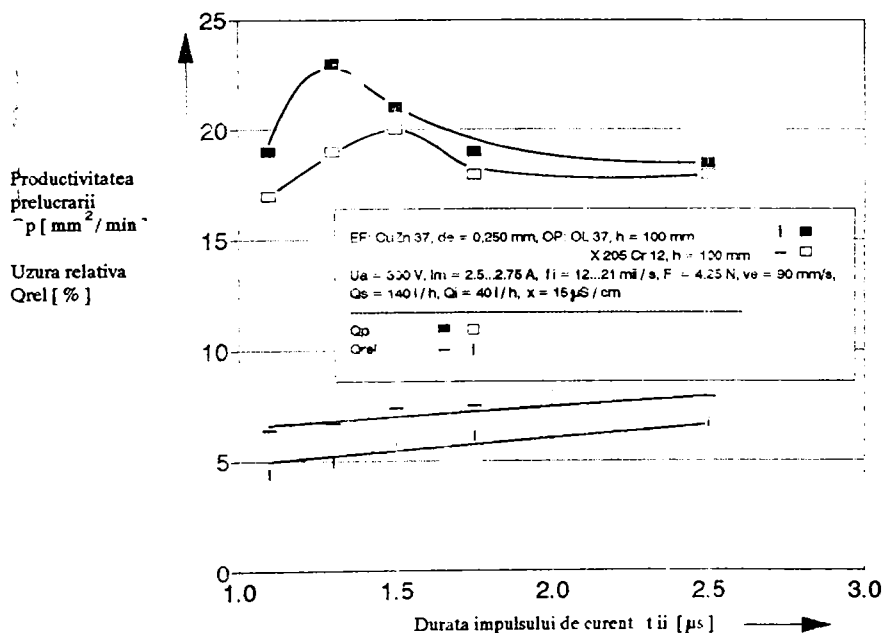


Fig.83. Influenta proprietatilor mecanice ale materialului OP asupra indicatorilor tehnologici cantitativi.

Deoarece curba productivitatii pentru OP din OL 37 este pentru orice t_{11} [s] deasupra curbei productivitatii pentru OP din X 205 Cr 12, se deduce ca proprietatile mecanice ale materialului OP influenteaza indicatorii tehnologici cantitativi la prelucrarea prin EEF (si in general, la prelucrarea prin eroziune electrica).

Din studiul curbelor care descriu variatia uzurii relative a EF, se vede ca in cazul prelucrarii X 205 Cr 12, EF a suferit o uzura mai accentuata, desi frecventa medie a impulsurilor de curent a fost cu 10...20 % mai mica decat la prelucrarea OL 37. La prelucrarea, analoga, a aluminiului (rezultatele nu sunt prezentate in figura), valorile uzurii relative obtinute au fost plasate intre valorile uzurii relative pentru cele doua marci de otel. Explicatia acestei comportari rezida in repartizarea diferentiata a energiei impulsului la componentele constitutive ale IT.

Deci capacitatea portanta termica a EF este influentata si de materialul OP.

4.2.8. Programul experimental E7

Scopul programului E7 a fost de a verifica influenta cresterii gradului de ordonare a ionilor in retea aliajelor metalice electroconductoare asupra rezistentei lor electrice [13].

Cresterea gradului de ordonare se realizeaza practic printr-un tratament termic cu racire lenta si ar trebui sa fie cu atat mai evidenta, cu cat timpul de racire este mai lung.

E7 s-a efectuat pe standul 3, utilizand ca rezistor (fig.64) esantioane de EF neuzat de lungime 40 mm, din CuZn 37 (diametru 0,250 mm) si din Cu, (diametru 0,150 mm), ambele livrate in stare 1/2 tare. S-au efectuat 10 replici. Cu ajutorul trusei de curent si tensiune s-a introdus initial in rezistor un curent efectiv maxim I_{efn} [A], care a provocat incalzirea sa la rosu prin efect Joule-Lenz, dupa care, cu ajutorul potentiometrului trusei, acest curent a fost redus la 0, in intervale de timp de durate diferite. Mediul de incercare: aer. Inainte si dupa fiecare tratament termic astfel aplicat, s-a masurat cu ampermetrul curentul care trece prin rezistenta electrica a EF, prin conectarea capetelor sale la aceeasi trusa, comutata in modul de lucru care asigura valoarea constanta a tensiunii efective. Cu cele doua valori ale curentului, initiala

I_{efi} [A] si finala I_{eff} [A], s-a calculat reducerea relativa a rezistentei electrice:

$$R_R = \frac{I_{eff} - I_{efi}}{I_{efi}} 100 \quad [\%] \quad (112)$$

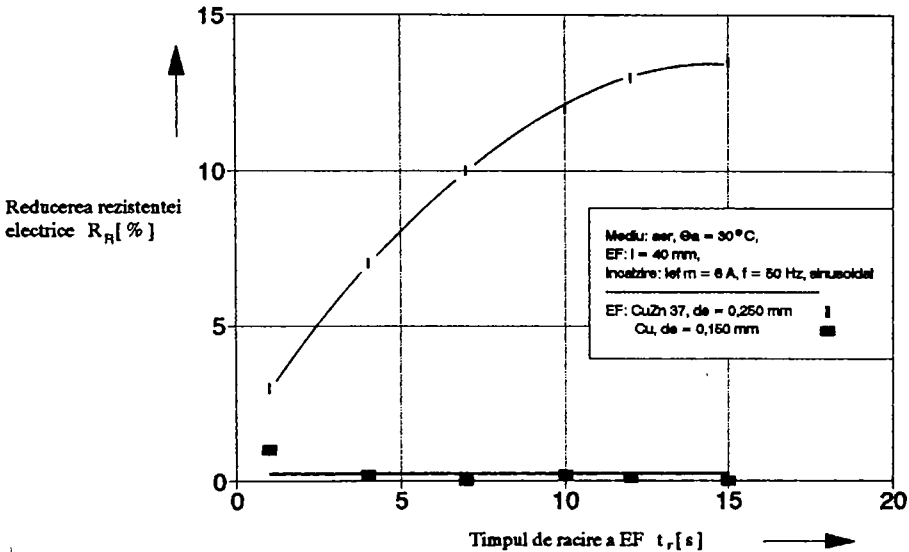


Fig.84. Micsorarea rezistentei electrice a EF din CuZn 37 prin tratament termic cu racire lenta.

Conditiiile de experimentare si rezultatele sunt prezentate in fig.84. La incercarea sarmelor din CuZn 37, rezistenta electrica a scazut odata cu micsorarea vitezei de racire, din doua cauze: datorita cresterii gradului de ordonare a atomilor in retea, cu formarea compusilor intermetalici (in principal) [13] si datorita atenuarii starii de ecrusare.

La incercarea rezistorilor din Cu, unde nu se pot forma compusi intermetalici, era de asteptat o reducere mai mica a rezistentei electrice datorita atenuarii starii de ecrusare. Acest fapt nu s-a petrecut sau nu a putut fi pus in evidenta.

Experimentul a fost inspirat de tehnologia de fabricatie a sarmelor electroconductoare, care sunt supuse recoacerii prin incalzire prin efect Joule-Lenz. El releva importanta tratamentului termic la fabricarea EF din aliaje cu transformari in stare solida

si, prin aceasta, a continutului de compus intermetalic asupra capacitatii portante termice intrinseci.

4.2.9. Programul experimental E8

Scopul programului E8 a fost de a studia capacitatea de incarcare simultana mecanica si electrotermica a electrozilor filiformi din diferite materiale si de aceleasi dimensiuni.

E8 s-a efectuat pe standul 3, dupa metodologia descrisa odata cu prezentarea standului. Incarcarea mecanica a electrozilor s-a facut prin aplicarea unor forte de intindere axiala, variabile in trepte, iar incarcarea termoelectrica s-a facut prin introducerea sub forma de soc a unui curent de valoare efectiva I_{efm} [A], comuna pentru toti electrozii. Aceasta valoare (7 A-la incercarile in aer si 16 A-la incercarile in apa) a fost astfel determinata incat sa incalzeasca toti EF instantaneu la rosu, provocand ruperea lor in stare neincarcata mecanic intr-un timp suficient de lung pentru a putea fi masurat. Ea s-a determinat dupa 10 incercari.

Aplicand esantioanelor de EF forta de intindere si valoarea astfel reglata a curentului, s-a cronometrat timpul din momentul conectarii trusei de curent si tensiune pana la intreruperea circuitului electric, datorata dezintegrarii electrozilor. S-au efectuat 20 de replici.

Conditiiile de experimentare si rezultatele sunt prezentate in fig.85, pentru incercarile efectuate in aer si in fig.86, pentru incercarile efectuate in apa. Urmarind alura curbelor (in ambele figuri) functie de incarcarea mecanica, se observa ca diferentele de durate de existenta ale electrozilor din diferite materiale, incercati in stare nesolicitata mecanic, tind sa se anuleze, chiar pentru forte mici de intindere.

Exceptie face comportarea EF din W, in ambele medii de incercare si a EF din alama zincata in aer. Comportarea EF din W este pusa pe seama rezistentei sale mecanice exceptionale, dublata de o buna conductivitate electrica. Mai iesita din comun pare comportarea EF din alama zincata (grosimea stratului de Zn: 8 μm), mai ales daca o comparam cu comportarea EF din alama. La parcurgerea EF din alama zincata, care este un rezistor constituit din doua rezistoare legate in paralel (unul-miezul, celalalt-invelisul), curentul se distribuie astfel incat puterile disipate pe miez si

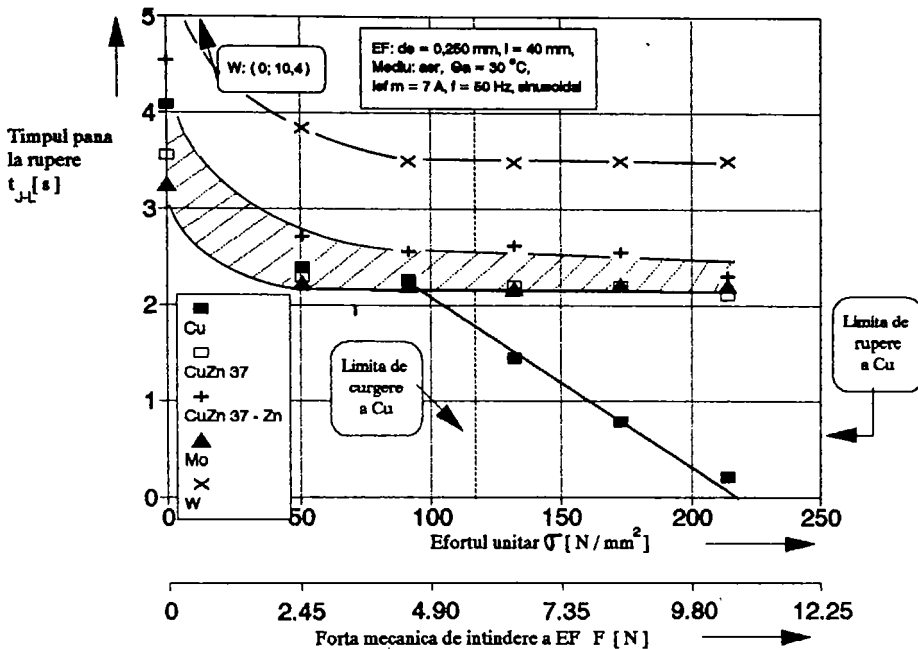


Fig.85. Comportarea sarmelor din diferite materiale metalice in aer, la incarcarea simultana mecanica si electrotermica.

invelis sunt egale, indiferent de marimea sectiunii lor transversale. Temperatura de topire a Zn este mai mica decat cea a alamei si astfel invelisul se topeste primul si o parte difuzeaza in alama, suprafata electrodului ingalbenindu-se. Este posibil ca la topire, zincul sa absoarba o parte din caldura necesara topirii de la miezul cu care este in contact prin conductie, sub forma de caldura latentă de topire. Astfel miezul sufera o racire usoara, intarziindu-si topirea. Intarzierea la topire a EF din alama zincata, fata de EF din alama, a fost egala aproximativ cu intarzierea la topire a EF din alama recopt prin racire rapida (obtinut la experimentul anterior).

Se mai observa ca, desi valoarea curentului efectiv de incercare a fost sensibil mai mare la experimentul desfasurat in apa decat la cel desfasurat in aer, duratele de existenta ale EF in apa au fost mai mari. Este normal pentru ca schimbul de caldura intre un corp cald si apa este mai intens decat schimbul de caldura intre acelasi corp cald si aer.

Se mai observa ca in domeniul tensiunilor de tractiune mici

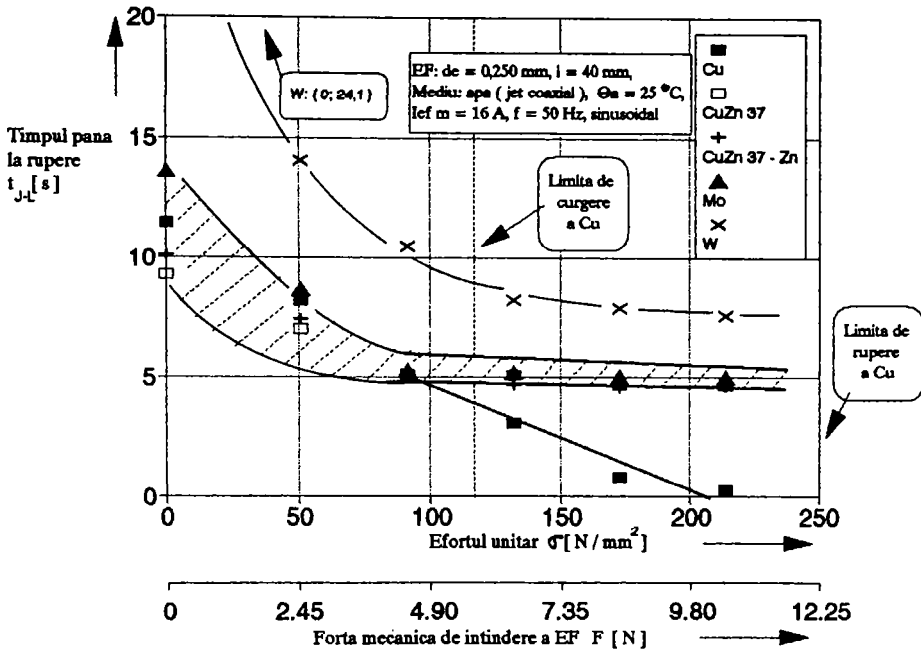


Fig.86. Comportarea sarmelor din diferite materiale metalice in apa, la incarcarea simultana mecanica si electrotermica.

si mijlocii, pana la limita de curgere a materialului, timpul de rupere se stabilizeaza. Odata cu depasirea acesteia (cazul cuprului) timpul de rupere scade cu cresterea tensiunii de intindere.

Experimentul pune in evidenta capacitatea portanta intrinseca termica si mecanica a electrozilor in conditii de simulare a incarcarii reale a EF. Desi curentul de incercare a fost alternativ sinusoidal de 50 Hz, la un curent efectiv mult mai mare decat curentul mediu la prelucrarea reala prin EEF (2,3...2.75 A), se considera ca experimentul este relevant, tinand seama ca si in conditii reale de prelucrare EF se pot rupe sub actiunea impulsurilor de curent de amplitudine 80...170 A, la coeficienti de umplere de curent de 0,01...0-03. Totusi experimentul nu pune in evidenta comportarea EF la socuri electrice mari, datorita amplitudinii mici a curentului de incercare folosit.

Cu exceptia EF din W si a EF multistrat din CuZn 37-Zn in aer, capacitatea portanta intrinseca astfel estimata nu diferentiaza comportarea EF din celelalte materiale. E8 scoate in evidenta, in premiera, unul din avantajele EF multistrat din alama zincata, anume

un plus de capacitate portanta fata de EF din Cu, alama si Mo. Acest fapt nu rezulta din modelul matematic al capacitatii portante, dimpotriva. Astfel, rezultatele incercarii la solicitarea simultana mecanica si electrotermica propulseaza EF din alama zincata intr-o pozitie superioara in ierarhia materialelor de EF.

4.2.10. Programul experimental E9

Scopul programului E9 a fost de a verifica daca la prelucrarea EEF, apa poate intra in fanta, creata in OP prin eroziune, in mod natural, prin efect de capilaritate. Functie de rezultate s-au putut trage concluzii asupra importantei injectiei si a transportului apei in IT cu ajutorul EF.

S-a folosit standul 2. Incercarea s-a efectuat in 6 replici, conform metodologiei descrise la prezentarea standului. Rezultatele experimentale au fost comparate cu inaltimea teoretica [43] la care ar trebui sa se ridice apa intr-o fanta de aceeasi latime x [m] ca

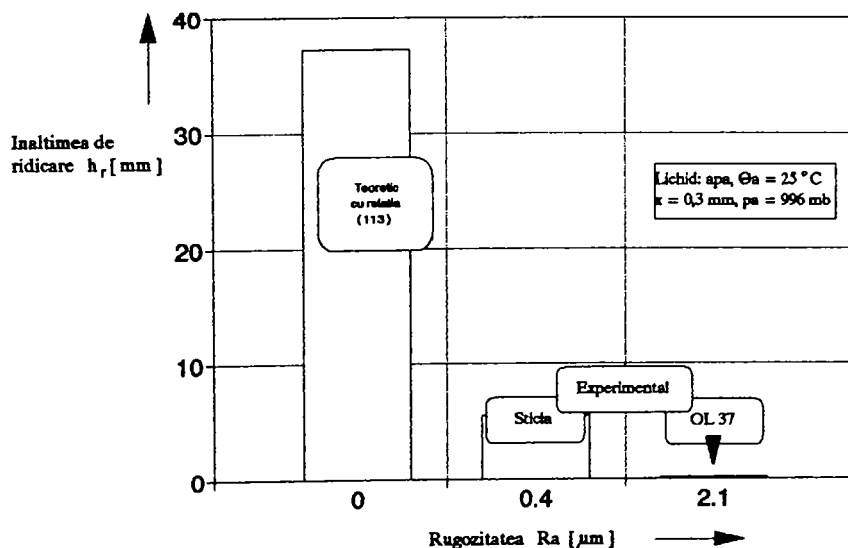


Fig.87. Inaltimea de ridicare a apei in fanta prin efect de capilaritate.

cea folosita in experiment, datorita tensiunii superficiale ξ [N/m]:

$$h_r = \frac{2\xi}{x\varrho_a g} \quad [m] \quad (113)$$

unde g este acceleratia gravitationala [m/s^2].

Conditiiile de experimentare si rezultatele (teoretic si experimentale) sunt prezentate in fig.87.

Se observa ca, practic, inaltimea de urcare a apei in fanta este mai mica decat cea data de relatia (113), care nu tine seama de frecarea intre apa si peretii fantei. h_r scade odata cu cresterea rugozitatii (2,1 μm a fost rugozitatea minima obtinuta la prelucrarea OP pereche din OL 37). Probabil ca apa nu intra prin efect de capilaritate nici in IT, care la prelucrarea prin EEF are o grosime maxima de 50 μm . DE aici se deduce importanta introducerii fortate a apei in IT.

Din rezultatele programului E4 se mai desprinde o concluzie, care inca nu a fost amintita: in fig.72 si 74 se observa ca pentru forta de intindere de 4,25 N, curba dupa care se deformeaza axa longitudinala a EF este o parabola cu extremul plasat la mijlocul distantei intre ghidaje si ca fanta are peretii aproximativ paraleli. Prin aceasta fanta s-au deplasat doua jeturi de apa: unul superior (de sus in jos), de debit mare si unul inferior (de jos in sus), de debit mic. Raportul lor a fost de 3,5:1 in favoarea debitului superior. Deci cele doua jeturi inegale la intrarea in IT, in plus, plasate in campul gravitational, s-au indreptat unul spre celalalt printr-o fanta de sectiune transversala aproximativ constanta, intalnindu-se la mijlocul inaltimii IT, pe care l-au parasit la aceasta cota pe o directie perpendiculara pe axa EF (fapt atestat de simetria parabolei). Intalnirea celor doua jeturi la mijlocul inaltimii IT a fost posibila numai datorita transportului apei de jos in sus cu ajutorul EF aflat in deplasare axiala in acest sens. Deci electrodul a facilitat transportul apei introduse prin duza inferioara, a franat, chiar a modificat partial sensul apei introduse prin duza superioara, anuland totodata si efectul fortei de gravitatie. Valoarea ridicata a raportului celor doua debite initiale, care la mijlocul inaltimii IT vor fi egalizate, indica importanta acestui mijloc de transport in asigurarea regimului hidrodinamic optim.

E9, prin concluziile sale, cumulate cu concluziile din aliniatul precedent, va servi la stabilirea regimului hidrodinamic de la programul experimental E10.

4.2.11. Programul experimental E10

Scopul programului E10 a fost de a stabili o corelatie intre marimea rugozitatii suprafetei EF si productivitatea prelucrarii prin EEF.

S-a utilizat standul 1 in combinatie cu subsistemul EF-OP: C, din care s-a prelucrat numai OP din OL 37. Parametrii reglabili ai regimului electric s-au mentinut constanti, variind parametrii regimului hidraulic (tipul injectiei si debitul lichidului) si parametrii regimului mecanic (sensul deplasarii axiale a EF). S-au utilizat un electrod cu suprafata neteda, respectiv, unul cu suprafata rugoasa, care s-a obtinut prin uzarea unui EF cu suprafata neteda, in urma unei prelucrari anterioare prin EEF. S-a calculat diametrul echivalent al EF astfel uzat $d_{e\ ech}$ [m], in urma determinarii pierderii de masa prin cantarire:

$$A_f = \frac{\pi}{4} d_{e\ ech}^2 \quad [m^2] \quad (114)$$

unde A_f [m²] se determina din relatiile (102), (107) si (108).

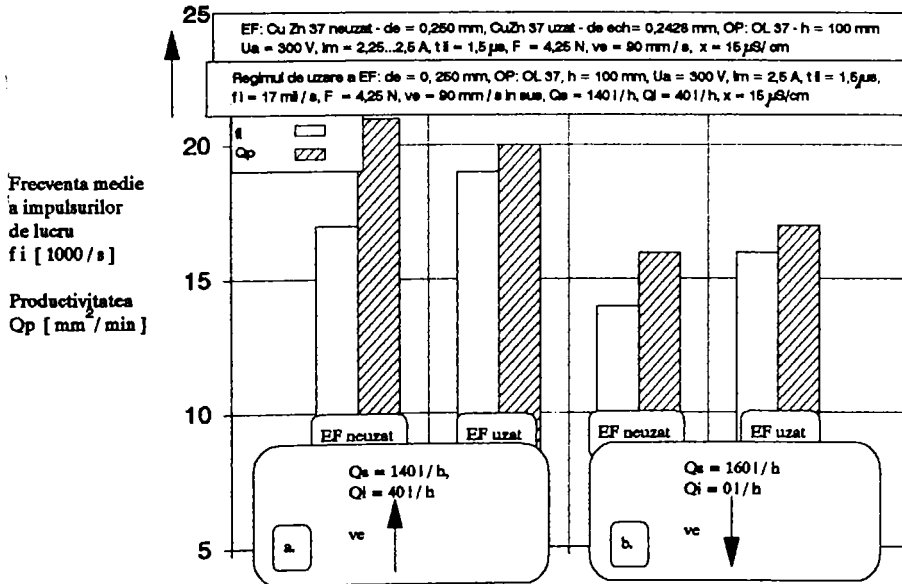


Fig.88. Comparatie a valorilor productivitatii si frecventei medii a impulsurilor de curent, la prelucrarea cu EF uzat prin EEF si EF neuzat.

Experimentul s-a efectuat in 2 replici pentru prelucrarea cu EF neuzat si in 3 replici pentru prelucrarea cu EF uzat.

Conditiiile de experimentare si rezultatele sunt prezentate in fig.88. Se observa ca, fata de prelucrarea cu EF cu suprafata neteda, la prelucrarea cu EF rugos, frecventa medie a impulsurilor de curent creste, crestere pusa pe seama facilitarii amorsarii in varfurile microneregularitatilor, acolo unde campul electrostatic atinge valori maxime. Regimul a. (fig.88), care, conform concluziilor de la E9, la prelucrarea cu EF neuzat a fost un regim optim d.p.d.v. hidraulic, nu mai este indicat la prelucrarea cu EF uzat, datorita diminuarii productivitatii. Datorita frecarii marite intre suprafata rugoasa a EF si apa, deplasarea sa de jos in sus favorizeaza deplasarea jetului de apa inferior si franeaza exagerat deplasarea celui superior.

In cazul b. (fig.88), unde sensul curgerii apei coincide cu sensul fortelor gravitationale si cu sensul de deplasare axiala a EF, se observa o imbunatatire a productivitatii, desi cresterea este la o valoare nesatisfacatoare. Nu exista o explicatie fenomenologica la faptul ca frecventa medie a impulsurilor de curent este mai mica in cazul b. decat in cazul a.

Experimentul ar trebui continuat in scopul gasirii unui regim hidraulic si mecanic optim de prelucrare cu EF rugos, astfel incat compararea sa cu regimul optim de la prelucrarea cu EF neted sa fie riguroasa. De asemenea, este indicata utilizarea unui procedeu de asperizare a suprafetei EF (prin deformare plastica, chimic, electrochimic etc.) care sa asigure o rugozitate uniforma pe toata suprafata, iar electrozii netezi si rugosi trebuie sa aibe acelasi diametru.

4.2.12. Programul experimental E11

In Romania inca nu s-a realizat un EF multistrat si nu se prelucreaza prin EEF cu electrod multistrat, in timp ce in tarile dezvoltate acesta a intrat in fabricatia de serie.

Scopul programului E11 a fost de a realiza un EF multistrat avand invelisul din Zn, de a prelucra cu el prin EEF si de a compara indicatorii tehnologici astfel obtinuti cu indicatorii obtinuti la prelucrarea cu un electrod obisnuit, din Cu, fabricat industrial in

țara, a cărei comportare la EEF este cunoscută de utilizatorii procedurii.

EF multistrat a fost realizat pe o instalație industrială, la S.C. "Industria Sarmei" S.A. din Câmpia Turzii, prin depunerea electrolitică a unui strat de Zn de grosime 7-8 μm pe un EF din CuZn 37 de diametru 0,200 mm, folosit ca miez. Apoi sarma a fost trasa o dată la diametrul final de 0,210 mm.

Prelucrarea prin EEF cu acest electrod și apoi cu electrodul din Cu s-a efectuat pe standul 1, în combinație cu OP de la subsistemul EF-OP: D. S-a prelucrat numai OL 37. S-a efectuat 1 replică cu EF din Cu și 3 replici cu EF multistrat. Dintre parametrii reglabili rigid de la panoul de comandă a aparatului s-a ales ca variabilă independentă durata impulsului de curent. În timpul prelucrării s-au măsurat aceiași parametri ca la experimentul 4. După prelucrare s-a măsurat pierderea de masă a EF prin uzare și rugozitatea suprafeței prelucrate. S-au calculat: frecvența medie a impulsurilor de curent, productivitatea prelucrării, debitul uzării și uzura relativă, cu relația (108).

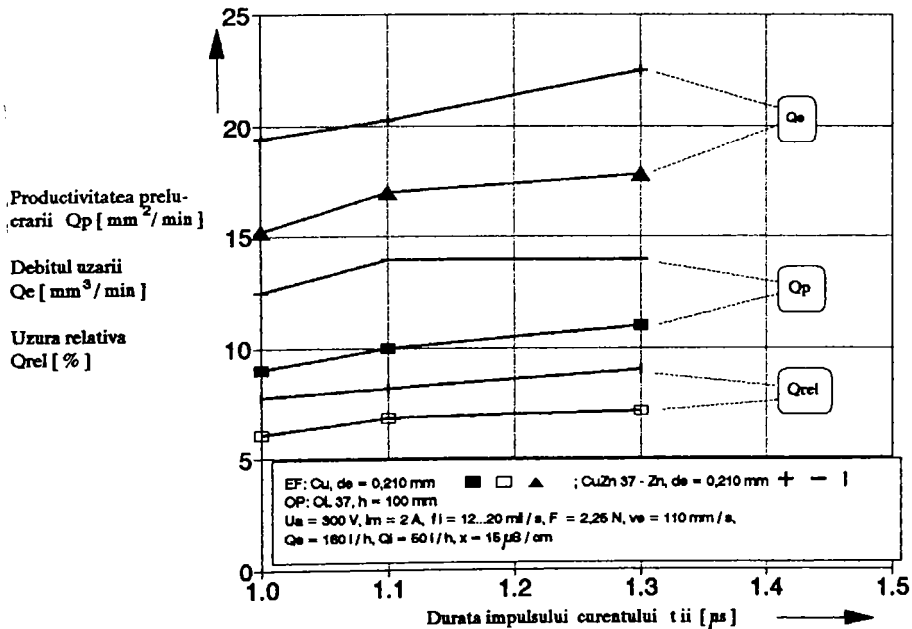


Fig.89. Indicatorii tehnologici cantitativi la prelucrarea cu EF din alama zincată și din cupru.

Condițiile de experimentare și rezultatele sunt prezentate în figurile 89 și 90. Se observă că EF din alama zincată se comportă, față de cel din cupru, conform așteptărilor: productivitate, frecvență medie a impulsurilor de curent, uzură mai mare și rugozitate a suprafețelor prelucrate mai mică, întrucât EF din alama zincată de import, încercat în E3.

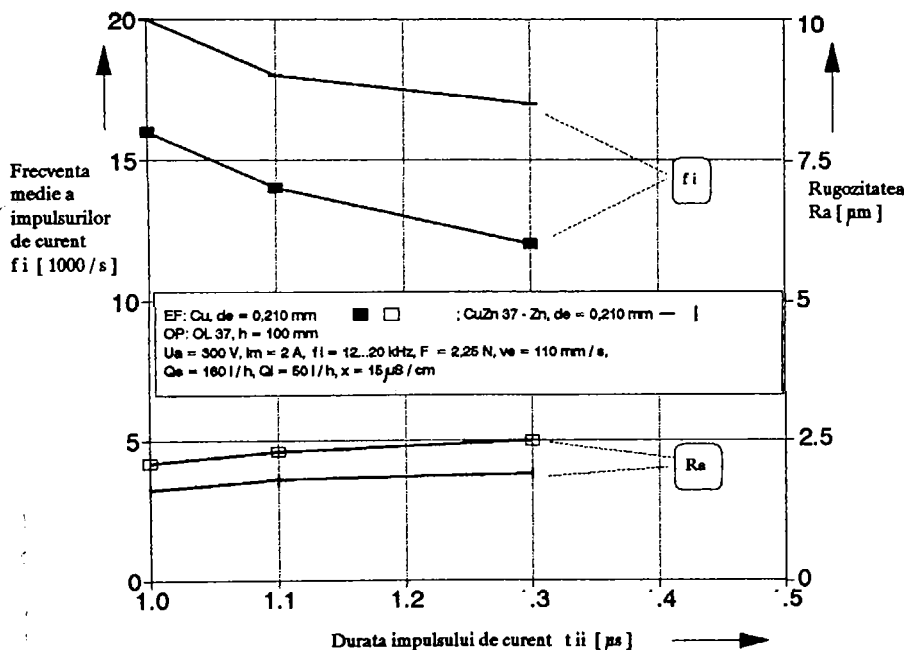


Fig.90. Frecvență medie a impulsurilor de curent și rugozitatea suprafeței la prelucrarea cu EF din alama zincată și din cupru.

Cu excepția avantajelor desprinse din rezultatele acestui experiment, EF multistrat din alama zincată mai are două avantaje, față de EF monostrat din alama:

- capacitate portanță termică mai ridicată la sollicitările termice "din interior", provenite prin efectul de rezistență al curentului electric, conform concluziilor de la E8;

- capacitate portanță termică mai ridicată la sollicitările termice "din exterior", provenite încălzirea prin conducție, având ca sursă termică pata catodică; explicația este următoarea: atât timp cât nu este deteriorată continuitatea invelisului din Zn, temperatura maximă la care poate ajunge miezul nu depășește

temperatura pe care o atinge local stratul de Zn; temperatura de vaporizare a zincului este relativ scazuta, ceea ce determina ca si temperatura atinsa in miezul din alama sa fie scazuta.

Experimentul a condus la obtinerea industrială a primului EF multistrat din Romania, a carui comportare la prelucrarea prin EEF a fost corespunzătoare. Avantajele sale față de EF de același diametru din celelalte materiale metalice de electrod sunt: productivitate mai mare și rugozitate mai mică, în aceleași condiții de prelucrare. Față de EF din alama, el are o capacitate portanță termică mai mare.

4.2.13. Programul experimental E12

Marimea capacității portante mecanice a EF se rasfrange asupra gradului de precizie a suprafețelor prelucrate cu acesta. Așa cum a rezultat din Capitolul 3, una din soluțiile de creștere a acestei capacități constă în echilibrarea forțelor care rezultă din procesul electroeroziv, încărcând, deplasând și deformând electrodul.

Scopul programului E12 a fost de a demonstra practic această posibilitate, urmărind o anulare a deformației axei longitudinale a EF. Soluția practică aleasă pentru atingerea scopului a fost inspirată din faptul că, la prelucrarea unui magnet permanent prin EEF, forța electromagnetică generată de interacțiunea curentului care străbate electrodul în timpul descărcării cu câmpul electromagnetic are direcția și sensul determinate de orientarea vectorului inducție magnetică.

Pentru experimentări s-a folosit standul 1 în combinație cu subsistemul EF-OP: D, prelucrându-se numai OP din OL 37. Pe OP s-au fixat doi magneti permanenți de formă cilindrică și inducție $B=1,2$ T în două moduri diferite (fig.91). Urmărindu-se anularea sau, cel puțin, minimizarea deformației axei EF, al cărei sens a fost stabilit în E4 și cunoscând că vectorul inducție magnetică este îndreptat de la nord la sud, cei doi magneti au fost astfel amplasați (în ambele cazuri), încât forța electromagnetică să fie orientată în sens invers rezultantei forțelor perturbatoare din proces.

Parametrii reglați la panoul de comandă a aparatului, precum și cei măsurați și calculați, au fost aceiași ca la E4 (prelucrare fără câmp magnetic suplimentar). Pentru a putea compara rezultatele

obtinate la E4 cu cele obtinute la E12, la ambele experimente s-au folosit aceleasi regimuri d.p.d.v. al parametrilor reglabili.

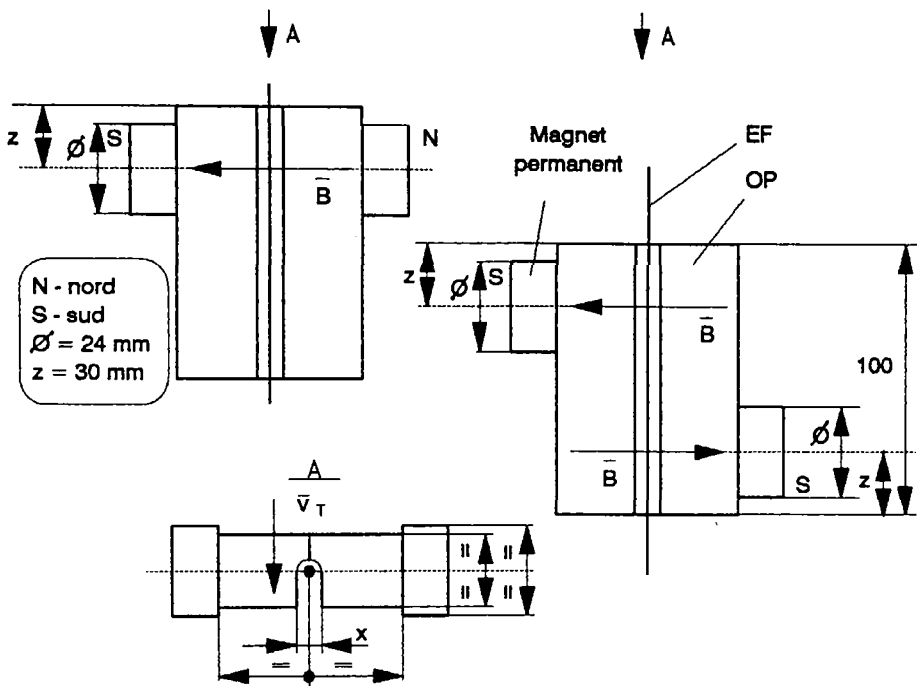


Fig.91. Amplasarea magnetilor fata de OP, la prelucrarea prin EEF cu camp magnetic.

Comparatia s-a facut pentru cele mai nefavorabile doua regimuri de la E4 (cele pentru care deformatia axei EF a fost maxima), anume, pentru regimurile unde forta de intindere a electrodului a fost minima, respectiv, maxima. S-au efectuat 6 replici.

Conditiiile de experimentare si rezultatele sunt prezentate in figurile 92, 93, 94 si 95. La modul de positionare a magnetilor simetric fata de axa EF (fig.91 si fig.92) a rezultat rectilinitatea EF numai in vecinatatea ghidajului electrodului mai apropiat de perechea de magneti, acolo unde campul magnetic este maxim si relativ uniform pe inaltimea IT. Rezultate mai bune s-au obtinut in cazul positionarii magnetilor simetric fata de centrul portiunii EF din IT. Comparand rezultatele referitoare la incovoierea axei longitudinale ale EF pe directia Oy din fig.92 cu cele din fig.72, obtinute la prelucrarea fara camp magnetic suplimentar (E4), se observa ca, la prelucrarea in camp magnetic suplimentar, acesta,

suprapus peste fortele perturbatoare, a fost atat de puternic, incat a modificat sensul curburii axei EF, pe de o parte si i-a anulat asimetria deformarii, conferindu-i alura de parabola simetrica, pe de alta parte. In combinatie cu o forta de intindere axiala mica (2,25 N) a rezultat o sageata mare, dar in combinatie cu o forta de intindere axiala mare (6,75 N) sageata s-a redus la valoarea de 3 μm . Deci deformarea EF pe directia Oy poate fi controlata cu ajutorul campului magnetic suplimentar. Controlul se poate face prin reglarea marimii inducției magnetice si/sau prin reglarea pozitiei vectorului inductie magnetica pe inaltimea IT. In masura in care cercetarea va fi continuata in aceasta directie, se va putea stabili o tehnologie de prelucrare prin EEF in camp magnetic, care sa contina datele necesare reglarii inductiei magnetice in scopul controlarii deformarii axei EF.

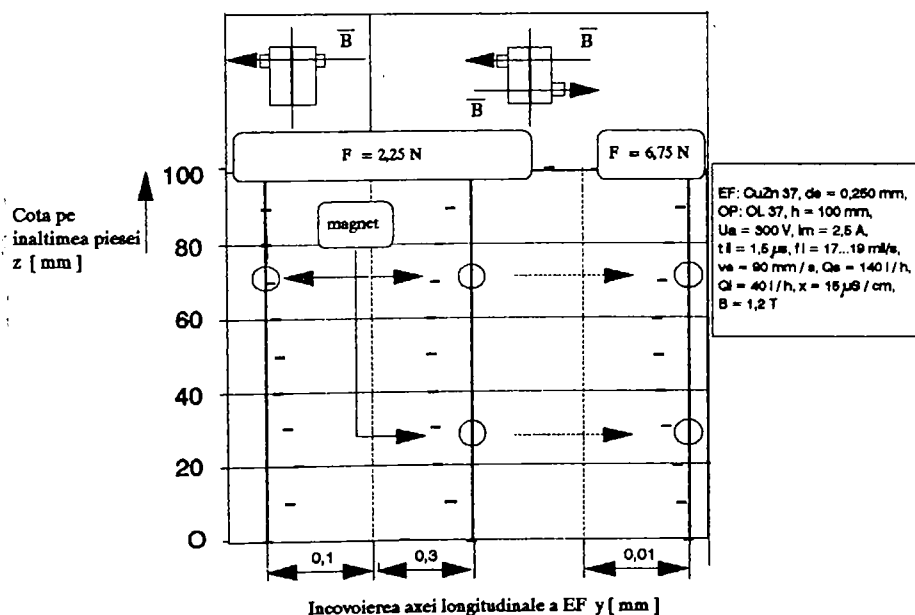


Fig.92. Incovoierea axei EF pe directia Oy la prelucrarea otelului, functie de amplasarea magnetilor permanenti si de forta de intindere.

Comparand alura fantelor prelucrate la E4 si E12 (fig.74 si fig.93), se observa ca la prelucrarea in camp magnetic, cand EF este

mai puternic tensionat axial, latimea fantei scade. Cauza rezida in micșorarea amplitudinii vibratiilor laterale ale EF, defavorizand astfel descarcarile laterale. In ceea ce priveste inclinarea peretilor fantei, corelata cu latimea si cu regimul hidrodinamic, se observa, comparativ, o micșorare a inclinarii pentru forta mica si chiar o modificare a sensului inclinarii pentru forta mare de intindere.

In fig.94, in care se prezinta comparativ rezultatele referitoare la frecvența medie a impulsurilor de curent si la rugozitatea suprafetei prelucrate cu si fara camp magnetic suplimentar, se observa o micșorare a frecventei medii a impulsurilor de curent atestata si de cresterea rugozitatii. Aceste abateri de la cazul prelucrării fara camp magnetic suplimentar sunt cu atat mai vizibile, cu cat EF este mai puternic tensionat. Faptul ca la aceeasi intensitate a curentului mediu, frecvența medie a

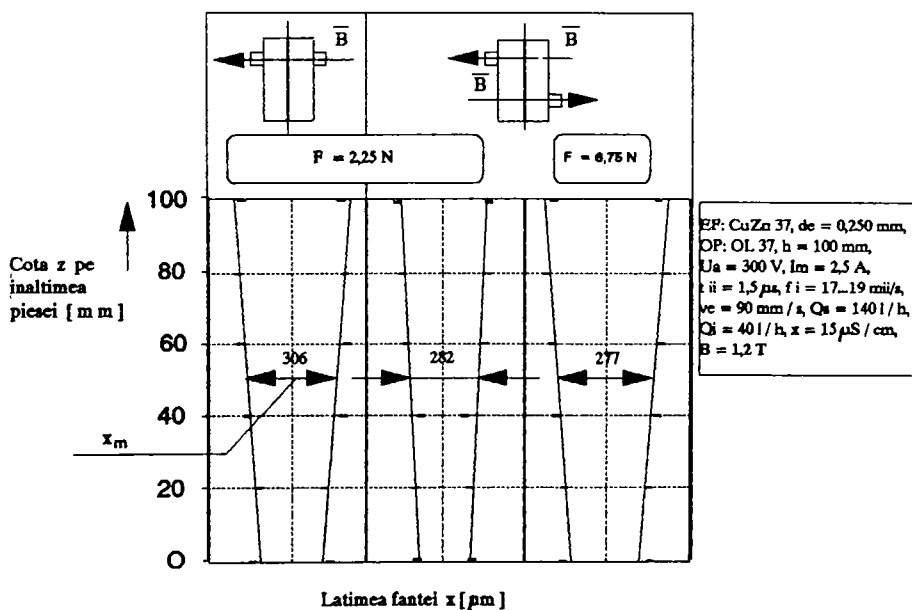


Fig.93. Alura fantei la prelucrarea otelului, functie de amplasarea magnetilor permanenti si de forta de intindere.

a impulsurilor de curent scade si rugozitatea suprafetei crește in conditiile creșterii tensiunii mecanice din EF, indica o crestere a energiei descarcării. Acest fapt poate fi pus pe seama micșorării

densitatii in IT a punctilor care participa la strapungere, determinand o crestere a timpului necesar amorsarii si a energiei descarcarii. Micsorarea densitatii punctilor se poate realiza printr-o mai buna evacuare a produsilor de eroziune de natura feromagnetica (proveniti din OP), sub influenta campului magnetic. In fig.95, in care se prezinta comparativ rezultatele referitoare la productivitate si la uzura relativa, se observa o scadere (fata de cazul E4) a volumului de material prelevat pe minut din OP. Totusi viteza de prelucrare, exprimata prin Q_p [mm^3/min] creste, in contul scaderii mai pronuntate a latimii fantei. Uzura relativa, calculata cu relatia (108), care este proportionala cu debitul uzarii si nu depinde de productivitate, sufera o usoara scadere, fata de cazul E4, odata cu cresterea valorii tensiunii de intindere din electrod.

Atat scopul, conceptia, cat si rezultatele experimentului sunt originale.

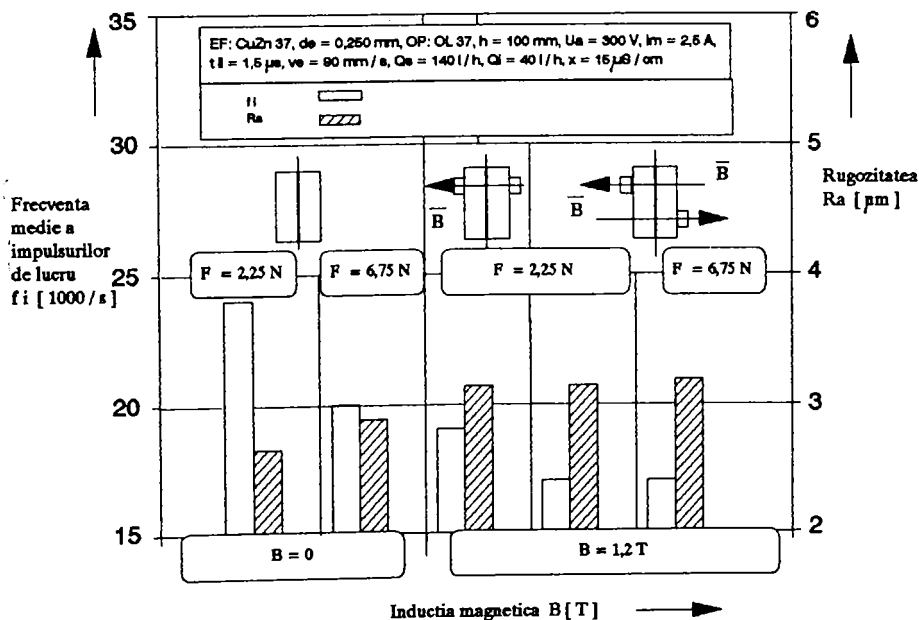


Fig.94. Frecventa medie a impulsurilor de curent si rugozitatea suprafetei functie de amplasarea magnetilor permanenti si de forta de intindere a EF, comparativ cu rezultatele obtinute la prelucrarea fara camp magnetic.

Problema plasarii interstitiului tehnologic in camp (electro)magnetic exterior a mai fost abordata atat la prelucrarea prin EEM, cat si prin EEF. La aceasta din urma, [71], s-a urmarit exclusiv cresterea productivitatii, folosind un camp electromagnetic paralel cu axa care trece prin cele doua ghidaje ale EF, avand inductia mult mai mica (de 100 de ori mai mica) decat cel utilizat in lucrarea de fata.

E12 a permis gasirea unei solutii simple, economice, nepoluante, ideala pentru cresterea capacitatii portante mecanice a EF, astfel incat pastrarea rectilinitatii sale in timpul prelucrarii a devenit o problema relativ usor de rezolvat. Este adevarat ca productivitatea Q_p [mm^3/min] a scazut. Dar la prelucrarea prin EEF acest indicator este de importanta secundara. Intereseaza, in schimb, productivitatea Q_p [mm^2/min], iar aceasta a crescut pe seama micșorării lății fantei (matematic), in

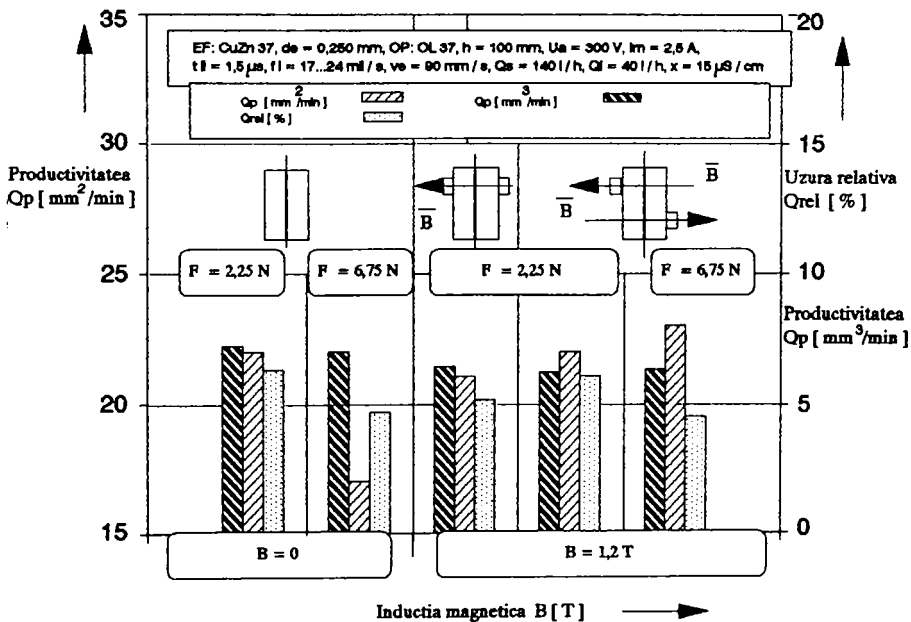


Fig.95. Indicatorii tehnologici cantitativi funcție de amplasarea magnetilor permanenți și de forța de întindere a EF, comparativ cu cei obținuți la prelucrarea fără câmp magnetic.

fond, pe seama diminuării producerii descărcărilor laterale și concentrării descărcărilor pe direcție frontală (tehnologic). În urma acestor prime rezultate, pare controlabilă forma geometrică a fantei.

Ca dezavantaj, se aminteste creșterea rugozității suprafeței prelucrate. Acesta poate fi eliminat prin prelucrarea în mai multe treceri, caz în care, funcție de scopul tehnologic al fiecărei treceri, se pot aplica vectori câmp magnetic diferențiați prin mărime și, eventual, orientare.

4.2.14. Concluzii practice care reies din cercetările experimentale

În urma efectuării programelor experimentale, s-a constatat că modelul matematic al capacității portante a EF a indicat, în general, corect factorii care o influențează și modurile de acțiune tehnologică în vederea creșterii sale. Cercetarea practică a pus, de asemenea, în evidență limitele inerente ale modelului matematic.

Abordarea tematicii pe cale experimentală conduce la concluzia că, fără eforturi mari, s-ar putea trece la fabricarea în țară a EF multistrat cu înveliș de zinc, pe instalații industriale existente.

De asemenea, eficiența și ergonomicitatea procedurii testat, de echilibrare a forțelor perturbatoare, care soliciță EF, îl recomandă pentru continuarea cercetărilor în vederea aplicării sale la fabricația aparatelor de prelucrare prin EEF.

5. CONCLUZII FINALE SI CONTRIBUTII ORIGINALE

Capacitatea portanta a EF este o marime permanent perfectibila. Cresterea sa determina imbunatatirea stabilitatii fizice si tehnologice a electrodului in timpul prelucrarii prin EEF si, prin aceasta, conduce la imbunatatirea performantelor prelucrarii.

In scopul cresterii capacitatii portante a EF, se poate actiona la 3 nivele:

- *electrodul filiform
- **tehnologia prelucrarii prin EEF
- ***aparaturile de prelucrare prin EEF.

*La nivelul EF, caile de actiune constau in:

-adoptarea unei solutii constructive multistrat, avand miezul din material metalic cu constantele termofizice T_r , T_v , λ_r , λ_v , λ_c , χ , E , ρ , de valori cat mai mari pentru a putea prelua incarcările mecanice, termice si electrice si invelisul din material metalic cu constantele termofizice T_r , T_v , λ_r , λ_v , λ_c de valori cat mai mici, pentru a putea obtine la prelucrare productivitati mari si rugozitati mici;

-adoptarea unei solutii constructive monostrat, la care materialul EF poseda una din cele doua grupe de constante termofizice (din aliniatul precedent) la parametrii extremi, impusi de scopul tehnologic urmarit, care poate fi: degrosare, semifinisare, finisare, superfinisare, lustruire.

**La nivelul tehnologiei de prelucrare prin EEF, caile de actiune pentru cresterea capacitatii portante a EF constau in:

-prelucrarea succesiva a aceleiasi suprafete cu regimuri tehnologice diferite, care sa permita reglarea incarcarii electrice, termice si mecanice a EF, functie de scopul tehnologic urmarit;

-micsorarea energiei termice introduse in EF, prin utilizarea unor impulsuri de durate cat mai mici la frecvente si amplitudini ridicate;

-cresterea eficientei evacuării caldurii din EF, prin adoptarea corespunzatoare a schemei si a parametrilor regimului hidraulic de circulare a LD in IT;

-echilibrarea fortei perturbatoare rezultate din procesul electroeroziv, prin aplicarea unor forte externe;

-amortizarea forțată a vibrațiilor EF, prin suprapunerea unor vibrații mecanice externe.

***La nivelul aparatului de prelucrare EEF, calea de acțiune în vederea creșterii capacității portante a EF constă în îmbunătățirea caracteristicilor sale constructive și funcționale, astfel încât acesta să poată asigura aplicarea tehnologiei optime.

Încercările autorului de a contribui la rezolvarea problemei creșterii capacității portante tehnologice a EF s-au concretizat, în prezenta teză, prin următoarele contribuții originale:

A. În domeniul teoretic

1. S-a făcut modelarea matematică a capacității portante termice a EF, luând în considerare încălzirea prin conducție termică de la metalul plasat în pata catodică, rezultând astfel comportarea materialelor de electrod studiate la uzare, mărirea razei craterului elementar de uzură și rata energiei impulsului consumată pentru uzare.

2. S-a făcut modelarea matematică a încălzirii EF prin efect Joule-Lenz al curentului electric.

3. S-a făcut o ierarhizare a materialelor de electrod funcție de dilatarea lor în timpul prelucrării EEF.

4. Au fost modelate forțele provenite din descarcarea electrică: forța generată de presiunea plasmei din coloana ionizată, forța generată de presiunea gazului provenit din transformările fizico-chimice ale mediului de lucru.

5. A fost stabilită o ierarhie a materialelor EF, funcție de forța provenită din socul desprinderii produsilor de eroziune de pe suprafața electrodului.

6. S-a realizat modelarea matematică a deformării axei longitudinale a EF pe direcția Ox, luând în considerare efectul desprinderii alternative a turbionilor de apă de pe suprafața electrodului.

7. S-a dedus o metodă simplă și rapidă de stabilire a comportării materialelor de electrod la prelucrarea prin EEF, după un singur criteriu, al modulului de elasticitate, care oglindește perfect comportarea reală.

8. Modeland comportarea EF in timpul prelucrării unui magnet permanent, s-a dedus posibilitatea echilibrării forțelor perturbatoare din proces cu ajutorul unei forțe electromagnetice exterioare.

B. In domeniul practic

1. A fost conceput și realizat un experiment original pentru determinarea, în condiții reale de prelucrare, a influenței forței de întindere a EF, plasat în fantă, asupra indicatorilor tehnologici cantitativi și calitativi ai prelucrării.

2. A fost conceput și realizat un experiment original pentru determinarea, în condiții reale de prelucrare, a influenței parametrilor impulsului de curent asupra deformării axei longitudinale a EF.

3. A fost conceput și realizat un experiment original pentru stabilirea, în condiții simulate, a capacității de încărcare simultană mecanică și electrotermică a EF, punându-se în evidență capacitatea portantă marită a EF din alama zincată, față de alte materiale de electrod: Cu, CuZn 37, Mo.

4. S-a evaluat, folosind rezultatele teoretice în combinație cu cele experimentale, bilanțul energetic în IT, tragându-se concluzii asupra repartizării energiei impulsului la elementele constitutive ale IT, funcție de materialul EF.

5. S-au determinat, folosind rezultatele teoretice în combinație cu cele experimentale, valorile sarcinii statice echivalente, provenite din proces, care încarcă EF, pentru diferite regimuri de lucru.

6. Prelucrând, pentru prima oară în România, cu un EF uzat prin eroziune electrică, s-a obținut, cu anumite regimuri, creșterea productivității, fără diminuarea capacității portante a electrodului.

7. S-a construit industrial primul EF multistrat în România, care, experimentat în prelucrarea prin EEF, a dat rezultate foarte bune.

8. Folosind concluziile teoretice, s-au echilibrat, în premieră, forțele perturbatoare din proces cu ajutorul unei forțe electromagnetice produse de interacțiunea curentului din EF cu un

camp magnetic exterior. Astfel s-a demonstrat posibilitatea anularii deformarii axei longitudinale a EF in timpul prelucrării.

Lucrarea nu a epuizat problema cresterii capacitatii portante a EF, lasand deschise o serie de probleme:

-se poate face o modelare matematica a capacitatii portante in conditiile reducerii numarului de ipoteze simplificatoare;

-cercetarile experimentale referitoare la prelucrarea cu EF cu suprafata rugoasa trebuie continuate folosind electrozi care sa aibe o rugozitate uniforma pe toata suprafata;

-cercetarile experimentale referitoare la prelucrarea in camp magnetic exterior, trebuie continuate, utilizand si materiale amagnetice pentru OP, pentru a elucida problemele legate de influenta materialului OP asupra evacuării produsilor de eroziune; de asemenea, se impune varierea marimii vectorului inductie magnetica si modificarea orientarii sale, in scopul gasirii parametrilor optimi in legatura cu campul magnetic exterior.

-studiul teoretic si experimental poate fi completat cu considerarea cazului tranzitoriu, al patrunderii EF in materialul OP;

-studiul teoretic si experimental poate fi aplicat la cercetarea capacitatii portante a EF aflat in pozitie inclinata fata de verticala;

-posedand un sistem de masurare pentru forte, care sa contina un traductor piezoelectric cu frecventa de rezonanta ridicata, se poate masura forta rezultata din proces, care actioneaza asupra EF;

-studiind influenta subsistemului constructiv tehnologic- aparat de prelucrare prin EEF asupra capacitatii portante, se pot deduce atat directiile si modurile de actiune la nivelul acesteia, cat si se poate actiona practic in vederea cresterii capacitatii portante.

Autorul prezentei lucrari considera ca si-a adus aportul la determinarea factorilor de influenta a capacitatii portante tehnologice a EF si, prin aceasta, a stabilitatii procesului de prelucrare prin EEF si a indicatorilor tehnologici. Actionand conform modelului matematic prezentat, la nivelul electrozului si la nivelul tehnologiei de prelucrare prin EEF, atitudinea sa creatoare fata de obiectivul tezei s-a concretizat in gasirea unor modalitati practice, economice, usor de aplicat, de crestere a

capacitatii portante tehnologice, avand repercursiuni asupra cresterii productivitatii si a preciziei prelucrarii.

ANEXE [13], [24], [41], [42], [52], [66], [72], [73],
[74]

Anexa 1. Constante termofizice universale

T_a [K]	P_{O_2} [N/m ²]	R [J/(kmolK)]	k [J/K]	c_0 [F/m]	A [A/m ²]	μ_{O_2} [N/A ²]
293	10^5	8310	$1,38 \cdot 10^{-23}$	$8,86 \cdot 10^{-12}$	$62,2 \cdot 10^6$	$4n \cdot 10^{-7}$

Anexa2. Constante termofizice ale apei deionizate

T_f [K]	T_{f4} [K]	ρ_a [kg/m ³]	ϵ_T [-]	μ_T [-]	I [-]	E_g [kV/mm]	μ_g [-]	ζ [N/m]	c_p [mm ² /s]
273	373	1000	81	1	1,4	50	18	0,073	392

Anexa 3. Constante de material ale unor materiale metalice

Material→ Constante ↓	Cu	Fe	Mo	Sn	W	Zn	CuZn 37
ρ [kg/m ³]	8940	7850	10220	7310	19300	7130	8940
R_m [N/mm ²]	225	345	1540	25	1100	200	500
$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	135	210			800	75	400
E [N/mm ²]	125	210	336	55	415	94	105
σ_T [°C]	1082	1538	2610	232	3410	419	910
σ_V [°C]	2595	3000	4800	2270	5925	1750	1110
c [J/(kgK)]	385	460	255	225	134	585	388
λ_T [kJ/kg]	210	258	293	59	251	112	172
λ_V [kJ/kg]	4645	6100	7115	2595	4810	1800	2500
λ [J/(me)]	392	75	147	67	201	113	113
$\rho_{g1} \cdot 10^9$ [Om]	17	100	52	115	55	59	67
$\alpha \cdot 10^6$ [K ⁻¹]	17	12	5	27	5	39	19
ϕ [keV]	4480	4630	4340	4390	4540	4270	

BIBLIOGRAFIE

- 1-Nichici, A., S. &, Prelucrarea prin eroziune in constructia de masini, Ed. Facla, Timisoara, 1983
- 2-Nanu, A., Tehnologia materialelor, Ed. Didactica si Pedagogica, Bucuresti, 1983
- 3-Schumacher, B., Modern Electrical Discharge Cutting, Industrial & Production Engineering, 2/1987, Carl Hanser Verlag, München, 1987
- 4-Panschow, R., Über die Kräfte und ihre Wirkungen beim elektroerosiven Schneiden mit Drahtelektrode, Teza doctorat, TU Hannover, 1974
- 5-Förster, K., Untersuchung der technologischen und physikalischen Zusammenhänge beim funkenerosiven Drahtschneiden, Teza doctorat, TU München, 1979
- 6-König, W., Technische Keramiken funkenerosiv bearbeiten, Technik Report 1/1991, Verlag Technik Report Ges.m.b.H., Wien, 1991
- 7-Oprea, M., Performante si tendinte pe plan mondial in domeniul prelucrării prin eroziune electrica cu electrod filiform, a 5-a Conferinta Nationala de Tehnologii Neconventionale, Ed. IPTV Timisoara, Timisoara, 1989,
- 8-Oprea, M., Stadiul actual al prelucrării electroerovive cu electrod filiform, Referat doctorat, Univ. Tehnica Timisoara, 1991
- 9-* * *, Referatînii jurnal, 14. Tehnologia mashinostroiénye, 1988-1990, Moskva
- 10-* * *, Prospekte ale firmelor AGIE, Charmilles Technologies (Elvetia), Janetzky, Matra-Fanuc, Nassovia (Germania)
- 11-Nichici, A., Popa, H., Analiza energetico-informationala a proceselor de prelucrare prin eroziune electrica, a 4-a Conferinta Nationala de Tehnologii Neconventionale, Ed. IPTV Timisoara, Timisoara, 1983
- 12-Hortopan, G., Aparate electrice, Ed. Didactica si Pedagogica, Bucuresti, 1980

- 13-Cartianu, P., s.a., Manualul inginerului electrician, Ed. Tehnica, Bucuresti, 1956
- 14-Finkelburg, V., s.a., Elektriceskie dnighi i termiceskaya plazma, Ed. Moskva, Moskva, 1961
- 15-Tetzner, V., Der Entladungsaufbau der Anordnung Spitze-Platte unter Öl bei glatten und pulsierenden Spannungen, Teza doctorat, TU Berlin, 1959
- 16-Zagorni, V., Untersuchung über elektrische Entladung in Öl, Teza doctorat, TU Berlin, 1963
- 17-Holm, R., Electric Contacts Handbook, Springer Verlag, Göttingen, Heidelberg, 1958
- 18-Faeber, M., G., Beitrag zur Auswahl eines geeigneten Schneidverfahrens für Stahlwerkstoffe unter besonderer Berücksichtigung des Laserstrahlschneidens, Teza doctorat, TH Aachen, 1991
- 19-Stute, G., Ausnutzung elektrischer Entladungen zur Metallbearbeitung, Teza doctorat, TH Aachen, 1959
- 20-Zolotih, B., N., Physikalische Grundlagen der Elektrofunkensbearbeitung von Metallen, VEB Verlag Technik, Berlin, 1955
- 21-Obrig, W., H., Grundlagen der Funkenerosiven Gesenkbearbeitung, Teza doctorat, TH Aachen, 1961
- 22-Schierholt, H., Über den Abtragvorgang bei der funkenerosiven Bearbeitung und Forderungen an Impulsform und Regeleinrichtungen der verwendeten Generatoren, Teza doctorat, TH Aachen, 1964
- 23-Schumacher, B., Das Leistungsverhalten und der Werkzeugverschleiß bei der funkenerosiven Bearbeitung von Stahl mit Speicher- und Impulsenergiegeneratoren, Teza doctorat, TH Aachen, 1966
- 24-Agte, C., Vacek, J., Wolfram und Molybdän, Akademie-Verlag, Berlin, 1959
- 25-Conn, W., Technische Physik der Lichtbogenschweißung, Springer Verlag, Göttingen, Heidelberg, 1959
- 26-Spur, C., Stüferle, T., Handbuch der Fertigungstechnik, vol.

- 4/1, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1987
- 27-Oprea, M., Solicitarile electrozului in procesul de prelucrare electroeroziva cu electrod filiform, Referat doctorat, Univ. Tehnica Timisoara, 1991
- 28-Cazimirovici, E., s.a., Teoria si tehnologia deformarii prin tragere, Ed. Tehnica, Bucuresti, 1990
- 29-Spinulescu, I., Fizica straturilor subtiri, Ed. Stiintifica, Buçuresti, 1975
- 30-* * *, Cartea aparatului AGIE Cut 315 DEM
- 31-Korenblum, M., V., s.a., Metodika rasceta parametrov rejima vysokoproizvodicelnovo virezanya na elektroerozionih stankah s provolocinim elektrodom, Elektronaya Obrabotka Materialov, 6 (138)/1988, Ed. Stiinta, Chisineu, 1989
- 32-* * *, Nouveau Petit Larousse, Librairie Larousse, Paris, 1968
- 33-* * *, Dictionarul enciclopedic roman, vol. I, Ed. Politica Bucuresti, 1962
- 34-Radulet, R., s.a., Lexiconul tehnic roman, Ed. Tehnica, Bucuresti, 1957
- 35-Warneche, H.,J., Einführung in die Fertigungstechnik, B.G. Treubner, Stuttgart, 1990
- 36-Achimescu, N., Studiul procesului de generare a formelor spatiale la prelucrarea prin eroziune electrica-aspecte geometrice si substantiale, Teza doctorat, IPTV Timisoara, 1983
- 37-Marinceu, D., Contributii in domeniul prelucrarii prin eroziune electrica cu electrod masiv mobil, Teza doctorat, Univ. Tehnica din Timisoara, 1993
- 38-Olariu, M., Ordonarea factorilor de influenta a productivitatii prelucrarii prin eroziune electrica prin metoda agregarii de clasamente, Sesiunea de comunicari stiintifice a Univ. "A. Vlaicu" Arad, Ed. Univ. "A. Vlaicu" Arad, 1994
- 39-Olariu, M., Stadiul actual al optimizarii prelucrarii prin eroziune electrica, Referat doctorat, Univ. Tehnica din Timisoara, 1993

- 40-Nichici, A., Achimescu, N., s.a., Aspecte energetice ale prelevării de material la prelucrarea prin eroziune electrică, Simpozion "Tehnologiile neconventionale, mijloc de ridicare a eficienței tehnico-economice în construcția de mașini", Ed. IPTV Timisoara, Timisoara, 1986
- 41-Buicliu, G., s.a., Manualul inginerului, Ed. Tehnica, București, 1959
- 42-Buzdugan, G., s.a., Manualul inginerului mecanic, Ed. Tehnica, București, 1968
- 43-Gherbanovschi, N., s.a., Fizica-manual pentru clasa a X-a, Ed. Didactica și Pedagogica, București, 1983
- 44-Gheorghiu, G., T., Memorator de matematică, Ed. Tehnica, București, 1972
- 45-Nicolaide, A., Bazele fizice ale electrotehnicii, Ed. Scrisul românesc, Craiova, 1986
- 46-Timotin, A., s.a., Lectii de baze, Ed. Didactica și Pedagogica, București, 1970
- 47-Andrasiu, M., s.a., Metode de decizii multicriteriale, Ed. Tehnica, București, 1986
- 48-Boldur, G., Fundamentarea complexă a procesului decizional economic, Ed. Stiintifica, București, 1973
- 49-Popescu, I., Introducere în fundamentarea deciziei, Ed. Stiintifica și Enciclopedică, București, 1983
- 50-Oprea, M., Condiții impuse materialului electrodului rezultate din evaluarea teoretică a solicitărilor termice ale acestuia la prelucrarea electroerozivă cu electrod filiform, Analele Universității din Oradea, Ed. Univ. din Oradea, Oradea, 1992
- 51-Oprea, M., Metode de alegere a materialului electrodului la prelucrarea electroerozivă cu electrod filiform, Construcția de mașini, 10-11-12/1993, București, 1993
- 52-Phillipow, E., Taschenbuch Elektrotechnik-Grundlagen, VEB Verlag Technik, Berlin, 1968
- 53-Buzdugan, G., Rezistența materialelor, Ed. Tehnica, București, 1974

- 54-Hristev, A., s.a., Fizica-manual pentru clasa a IX-a, Ed. Didactica si Pedagogica, Bucuresti, 1981
- 55-Mocanu, C., Teoria cimpului electromagnetic, Ed. Didactica si Pedagogica, Bucuresti, 1981
- 56-Dommel, H., W., EMTP Theory Book, Microtran Power System Analysis Corporation, Vancouver, 1992
- 57-Suciu, I., Aparate electrice, Ed. Didactica si Pedagogica, Bucuresti, 1968
- 58-Ancusa, V., Meşană fluidelor si masini hidraulice, Ed. IPTVT, Timisoara, 1980
- 59-Oroveanu, T., Mecanica fluidelor viscoase, Ed. Academiei R.S.R., Bucuresti, 1967
- 60-Milne-Thomson, L., M., Theoretical Hidrodinamics, MacMilan & Co. Ltd., London, 1960
- 61-Birkhoff, G., Sarantonello, E., Struyi, sledii i kavernii, Mir, Moskva, 1964
- 62-Kobayashi, T., Schwingungserregung von federlagerten, stumpfen Zylindern infolge Wirbelablösung, Teza doctorat, TU Berlin, 1980
- 63-Pissarenko, G., s.a., Aide-memoire de resistance des materiaux, Mir, Moscou, 1979
- 64-Oprea, M., Calculul deformatiilor electrodului filiform in conditii de simulare a prelucrării prin eroziune electrica, TEHNOMUS VI, Ed. Univ. "Stefan cel Mare", Suceava, 1991
- 65-Reviczky, Levay, A., s.a., Analizor de impulsuri pentru prelucrerea prin eroziune electrica, Simpozion "Tehnologiile neconventionale, mijloc de ridicare a eficientei tehnico-economice in constructia de masini", Ed. IPTV Timisoara, Timisoara, 1986
- 66-* * *, Elektrische und Wärmetechnische Messungen, Hartmann & Braun AG, Frankfurt/Main, 1963
- 67-Babutia, I., Petruscu, M., Automatizari electronice in constructia de masini, Ed. Facla, Timisoara, 1983
- 68-Dodon, E., Masini unelte si agregate, Ed. Didactica si Pedagogica, Bucuresti, 1978
- 69-Oniciu, L., Coroziunea metalelor, Ed. Stiintifica si Enciclopedica, Bucuresti, 1986

- 70-Constantinescu, M., Protectia anticoroziva a metalului, Ed. Tehnica, Bucuresti, 1979
- 71-Oprean, C., Contributii privind optimizarea parametrilor fizici si tehnologici la prelucrarile neconventionale. Prelucrarea prin eroziune electrica cu electrod filiform, Teza doctorat, IP Bucuresti, 1985
- 72-* * *, Technische Tabellen, Siemens Aktiengesellschaft, 1986
- 73-Tanasescu, F., T., Agenda tehnica, Ed. Tehnica, Bucuresti, 1990
- 74-Beer, B., Kleine Enzyklopädie Technik, Verlag Enzyklopädie, Leipzig, 1958