

INSTITUTUL POLITEHNIC „TRAIAN VOIA” TIMIȘOARA
FACULTATEA DE MECANICĂ

N I C O L A E A C R I M I E S C U

Studiul procesului de generare a formelor spațiale
la prelucrarea prin eroziune electrică - aspecte
geometrice și substanțiale

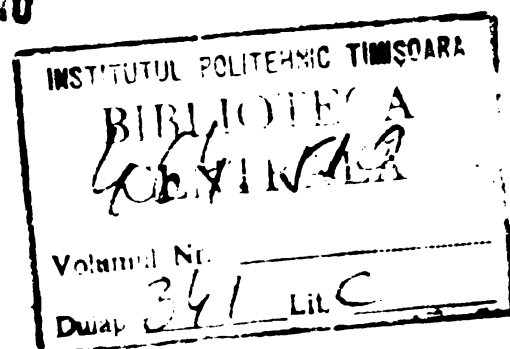
T E Z A

pentru obținerea titlului științific de doctor inginer

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

Conducător științific
Prof. dr. des. ing. AUREL BANU

- 1 9 8 3 -



INTRODUCERE	1
ap.1. CONTRIBUTII LA ELUCIDAREA UNEI FENOMENE CARE DETERMINA EROZIUNEA ELECTRICA.	4
1.1. Procese elementare de eroziune electrică.	4
1.2. Procesul integral de eroziune electrică	18
1.3. Studiul interdependenței proceselor de prelevare, mărunțire și evacuare a produselor eroziunii electrice	24
ap.2. IDENTIFICAREA FACTORILOR SI PARAMETRILOR CARE DETERMINA MODUL SI DE GENERARE A FORMELOR SPA- TIALE PRIN EROZIUNE ELECTRICA.	34
2.1. Categori generale de factori și parametri la prelucrarea prin eroziune electrică	34
2.2. Factori proveniți de la utilajul tehnologic	36
2.3. Factori primari proveniți de la elementele spațiului de lucru	42
2.4. Factori intermediari proveniți de la procesele din spațiul de lucru	47
2.5. Factori finali - caracteristici tehnologice ale prelucrării prin eroziune electrică	51
ap.3. STUDIUL SI CERCETARI ASUPRA DINAMICII DE GENERARE A SUPRAFEȚELOR PRIN EROZIUNE ELECTRICA	59
3.1. Mecanismul generării suprafeței la prelucrarea cu copierea formei	59
3.2. Model matematic pentru copierea formei prin eroziune electrica	61
3.3. Cercetari experimentale asupra dinamicii de generare as suprafețelor prin eroziune electrică.	65
ap.4. CERCETARI PRIVIND ELABORAREA SI CONFECTIONAREA LA EROZIUNE ELECTRICA A UNOR MATERIALE SPECIALE PENTRU ELECTROZI	86
4.1. Rezistența la eroziune electrică a materialelor de electrozi	86
4.2. Materiale utilizate pentru confecționarea electrozilor de transfer	87
4.3. Influența fazelor refractare dispersate asupra procesului de uzare a electrozilor	90
4.4. Elaborarea pseudoaliazelor cu matrice de cupru și fază dispersă de grafit	94
4.5. Elaborarea electrozilor din cupru sinterizat izotrop	116

Cap.5. INFLUENȚA REGIMULUI DE LUCRU ȘI A NATURII	
MATERIALULUI DE ELECTROD ASUPRA CARACTERISTI-	
CILOR TEHNOLOGICE	122
5.1. Sistemul de acțiune tehnologică la pre-	
lucrarea prin eroziune electrică	122
5.2. Planificarea statistică a experiențelor	124
5.3. Efectuarea încercărilor experimentale	127
5.4. Metodele de analiză a funcțiilor de răspuns	
prin determinarea regresiei	128
5.5. Încercări cu electrozi din #75-Cu25	131
5.6. Încercări cu electrozi din Cu92-C8	141
5.7. Încercări cu electrozi din cupru sinterizat	
isotrop	146
5.8. Studiu comparativ al rugozității suprafețelor	
prelucrate prin eroziune electrică cu dife-	
rite materiale de electrozi	151
Cap.6. CONCLUZII	156
BIBLIOGRAFIE	160

INTRODUCERE

Ritmul actual de dezvoltare a producției de bunuri materiale este susținut prin depășirea limitelor temporare de prelucrabilitate, fie pe calea perfecționării și diversificării tehnologiilor clasice, fie pe calea inventării și aplicării altora noi neconvenționale [35]

Una dintre sarcinile de seamă trasată științei și tehnicii românești prin documentele programatice ale P.C.R. [1], [2] o constituie perfecționarea tehnologiilor existente, crearea și aplicarea industrială de noi tehnologii. Dacă la nivelul anului 1975 utilajele tehnologice neconvenționale reprezentau în R.S.R. 0,12 % din totalul celor în funcțiune, în 1980 ele au crescut la 0,30 % [110], [159], [160], se estimează că la începutul anului 1983 au depășit 2% și se prognozează menținerea acestui ritm ascendent în perioada următoare. Repartizarea ponderală pe procedee este în prezent 70% eroziune electrică, 20% eroziune electrochimică, 5% eroziune cu fascicul de radiații și cu unde ultrasonice și 5% alte procedee [159].

Se remarcă faptul că eroziunea electrică are cea mai mare pondere, menținută de multă vreme și pe plan mondial [57], precum și cea mai dinamică evoluție în cadrul procedeelelor noi [54], 110.

Dezvoltarea eroziunii electrice este susținută din cauza avantajelor sale cunoscute :

- prelucrabilitate ridicată și practic independentă de proprietățile mecanice ale unor materiale excesiv de dure, fragile, refractare ;

- gamă largă de gabarite ale suprafețelor prelucrate, cu dimensiuni cuprinse între sutimi de milimetru până la cele de ordinul metrilor;

- complexitate a formelor și diversitate mare a metodelor de generare a acestora : copierea formei și a profilului, perforarea, decuparea după contur, etc;

- posibilitatea obținerii unor suprafețe imposibil de realizat prin aplicarea altor procedee : găuriri cu axe curbe, circulare, elicoidale, canale interioare cu axe frânte, etc ;

- lipsa solicitărilor mecanice, fapt care permite folosirea unor obiecte de transfer al energiei confecționate din materiale relativ ieftine, ușor prelucrabile.

Eroziunea electrică poate deveni competitivă și la prelucrarea unor materiale care au prelucrabilitate mijlocie, atunci când prezintă față de alte procedee caracteristicii tehnologice și tehnico-

economice mai bune [111].

Aplicabilitatea prelucrării prin eroziune electrică este plajonată de consumul ridicat de energie specifică, de uzarea electrodului de transfer, de repartiția neuniformă a uzurii, de productivitatea limitată și de gradul de incertitudine al proiectării procesului tehnologic.

În întreaga lume și în țara noastră procedeul este intens studiat; cu toate acestea perfectibilitatea lui rămâne încă deschisă fiind obiectul multor cercetări fundamentale și aplicative.

Direcția principală de perfecționare a procedeului este optimizarea caracteristicilor tehnologice, prin automatizarea avansată a prelucrării, cu reglarea adaptivă a regimului electric (frecvența, forma, amplitudinea, durata și factorul de umplere ale impulsurilor), a dinamicii de avans al electrodului și a circulației mediului de lucru, urmărindu-se mai ales reducerea uzurii electrodilor de transfer. Se prognozează [160], că ar mai fi necesar cel puțin un deceniu până de vor obține rezultate satisfăcătoare în această direcție.

În punct de vedere economic o pondere importantă în costul prelucrării revine electrodului de transfer care, la prelucrarea cu copierea formei, poate ajunge la 50 - 70% [144]. Pe de o parte materialele de electrozi sînt uneori dificil de elaborat și de prelucrat, iar pe de alta, în mod obișnuit sînt necesari doi sau mai mulți electrozi pentru prelucrarea unei singure cavități.

În lumina acestor considerații prezenta lucrare de doctorat și-a propus să contribuie, din punct de vedere teoretic, la lămurirea unor fenomene din procesul de prelucrare prin eroziune electrică a materialelor metalice, încă insuficient clarificate în literatura de specialitate, relevînd mai cu seamă interdependența factorilor și parametrilor din procesul de prelucrare și, legat de aceasta, realizînd studiul mai complet al procesului de generare a formelor spațiale prin eroziune electrică. În punct de vedere aplicativ ne-am propus studiul comportării la eroziune electrică a unor materiale speciale, elaborate în țară, pentru electrozi de transfer, în vederea ridicării performanțelor tehnologice în general, al scăderii prețului de cost și eliminării importului.

Lucrarea a fost structurată în 6 capitole, desfășurate pe 172 pagini cu 35 tabele, 113 figuri și 228 referiri bibliografice, dintre care un număr de 31 titluri aparțin autorului.

În prima parte (cap.1 și 2) s-au sistematizat într-o viziune originală principalele cunoștințe fundamentale acumulate în literatura de specialitate asupra proceselor de eroziune electrică, s-a făcut un studiu teoretic determinându-se un model matematic al reacției inverse interne exercitată prin procesele de mărunțire, dispersare și evacuare a produselor eroziunii.

Capitolul 3 însumează cercetările teoretice și experimentale efectuate de autor asupra procesului de generare a suprafețelor prin eroziune electrică cu copierea formei. Se deduce un model matematic pentru determinarea geometriei succesive a suprafețelor generate și se elucidează mecanismul fizic al repartiției spațiale temporale a uzurii electrozilor.

În capitolul 4 sînt cuprinse cercetările autorului privind elaborarea și comportarea la eroziune a unor materiale speciale de electrozi elaborate prin metalurgia pulberilor.

Capitolul 5 cuprinde studiul influenței regimului de lucru asupra caracteristicilor tehnologice obținute la prelucrarea acestor materiale, pe baza unor experimente progresate și prelucrate statistic. Rezultatele cercetărilor pun la dispoziția industriei tehnologii de elaborare și de utilizare a unor noi materiale de electrozi elaborate în R.S.R. din componente indigene și utilizînd unele materiale re folosibile.

În capitolul de concluzii se prezintă principalele contribuții originale aduse în domeniul cercetării fundamentale și al celei aplicative.

Autorul ține să exprime, și pe această cale, întreaga sa gratitudine față de conducătorul științific, prof.dr.doc.ing. Aurel Nănu pentru competența cu care l-a îndrumat în toată perioada acestei lucrări. Le asemenea mulțumește tuturor colegilor din colectivul Catedrei Tehnologie mecanică, din alte colective ale I.P.T.V.Timișoara, precum și celor de la Laboratorului de Cercetări pentru Metalurgia Pulberilor din I.P.Cluj-Napoca pentru ajutorul acordat în documentare și pentru colaborarea lor la efectuarea cercetărilor care au stat la baza elaborării prezentei lucrări.

CAPITOLUL I

CONTRIBUȚII LA ELUCIDAREA UNEI FENOMENE CARE ÎNTRUPEȘTE ERZIUNEA ELECTRICA

Erziunea electrică se realizează prin acțiunea repetată a elementului eroziv constituit de descărcarea electrică nestaționară care transformă energia impulsului electric în energie de efect la suprafața obiectului de prelucrat, U_1 , a electrodului de transfer, U_2 , și în mediul de lucru, U_3 . [120], [121]. descărcarea poate avea loc între electrodii aflați la distanțe mici, între extremități și până la 1000 μm , separați într-un mediu dielectric și poate dura între 0,1 până la 2000 μs . [58], [91], [150], [174], [211], [216-224].

1.1. Procesele electrice de erziune electrică

Unghiul mecanicului de acțiune a uneia dintre descărcările electrice în impuls din seria celor succedate succesiv și localizate selectiv în diferite zone ale interstițiului este foarte dificilă din cauza imposibilității separării experimentale a cauzelor și efectelor ce se suprapun total sau parțial în timp și în spațiu.

Cu toate acestea, datele experimentale, studiile teoretice și cunoștințele trase din efectele globale s-au acumulat treptat formând o imagine care trebuie să fie, dacă nu fidelă, foarte apropiată de realitate [21], [30], [43], [51], [61], [63], [64], [72], [73], [79], [98], [99], [100], [109], [112], [123], [144], [156], [205], [208], [214].

Intensificarea acestor cunoștințe, dinamica desfășurării fenomenelor la scara actului elementar de erziune poate fi considerată ca rezultat al unei succesiuni de procese fizice.

1.1.1. Începutul descărcării electrice

Prin sarcarea a descărcării electrice înțelegem totalitatea fenomenelor care au loc în perioada pregătirii și formării în dielectric a unui traseu filiform, gazos, ionizat, conductor de curent.

Timpul scurt din momentul aplicării tensiunii pe spațiul de lucru până la străpungerea electrică a interstițiului, numit timp de sarcare, t_s , este constituit din două componente: un timp de întârziere, care reprezintă o perioadă cu caracter aleator de pre-

gătire a condițiilor străpunerii și un timp efectiv de străpungere, în care se formează un lichid coloidal necesar a descărcării.

Pentru a se realiza trecerea curentului prin spațiul dielectric dintre electrozi este necesar ca din catod să se emită electroni pentru declanșarea seriei de procese fizice care determină apariția curentului de particule purtătoare de sarcini electrice.

Situația inițială se poate analiza considerând mecanismul de funcționare autonomă a descărcării.

Curentul i_k de electroni emiși în unitatea de timp determină numărul n_k . La anod vor ajunge n electroni, care poate fi calculat [50], [227], cu relația :

$$n = n_k \cdot \exp. \alpha d \quad (1.1)$$

unde d - distanța dintre electrozi, α - coeficient de ionizare de volum (coeficientul lui Townsend) care ține cont de probabilitatea de ionizare pe electron și se definește prin numărul de perechi de ioni formați de un electron pe unitatea de lungime parcursă în direcția câmpului accelerator. La rîndul său n_k este format din numărul n_0 de electroni primari (emiși inițial) și numărul n_s de electroni secundari (emiși la impactul cu catodul al ioniilor pozitivi).

$$n_k = n_0 + n_s = n_0 + C(n - n_k) \quad (1.2.)$$

unde C - coeficient de ionizare specifică, ținînd seama de probabilitatea de oțtinere de electroni prin emisiune secundară și definindu-se prin numărul mediu de electroni eliberați din catod pentru un ion pozitiv incident. Înlocuind (1.2) în (1.1) se obține :

$$n = n_0 \frac{\exp \alpha d}{1 - C(\exp \alpha d - 1)} \quad (1.3)$$

Șind numărul n_s de electroni secundari este mai mare decît numărul n_0 de electroni primari, care au contribuit la formarea lor, are loc dezvoltarea "avalanșei" de electroni care permite străpungerea dielectricului. Aceasta corespunde unei distanțe critice de străpungere, d_0 , pentru care se satisface relația :

$$1 - C(\exp \alpha d_0 - 1) = 0 \quad (1.4)$$

În acest caz, din punctul de vedere al descărcării electrice, curentul poate crește la infinit și el va fi limitat numai de impedanța exterioară a circuitului care aplică tensiunea pe electrozi.

Câmpul de străpungere a dielectricului este prea mic (10^{-7} sec) pentru ca, în mediul lichid, ionii pozitivi să poată ajunge la catod pentru realizarea emisiunii secundare. În lichid nu se poate conta deci decât pe emisiunea autoelectronică și pe cea fotoelectronică.

Intensitatea curentului autoelectronic inițial [40] are expresia :

$$I_0 = \frac{e}{2\pi h} \frac{h^2 \sqrt{L_0}}{L_0 + L_1 \sqrt{L_0}} \exp \frac{4 K \sqrt{L_1^3}}{3 K} \quad (1.5)$$

unde e - sarcină electrică a electronului; h - constanta lui Planck; K - intensitatea câmpului electric aplicat; L_0 - energia cinetică medie a unui electron liber în interiorul catodului; L_1 - energia de emisie (lucrul mecanic de ieșire pentru catod); K - constanta lui Boltzmann.

Intensitatea câmpului electric necesar descărcării în lichide dielectrice, de ordinul 10^6 V/cm, este sensibil mai mare decât în gaze, astfel încât devine posibilă o puternică emisie autoelectronică, pe baza căreia să se considere în continuare fenomenul străpunerii. Datorită distanțelor mici de accelerare în lichid energia cinetică a electronilor nu poate depăși valoarea critică necesară ionizării colisionale [43], a moleculelor lichidului. Ei interacționează însă cu aceste molecule transmitând o energie care poate produce transformări locale de stare, favorizate și de efectul de concentrare a emisiunii autoelectronice pe vârful micronegularităților suprafeței catodului, unde intensitatea necoaxenă a câmpului electric are valoare maximă. Apariția locală de mediu gazos poate forma microincinte în care să se dezvolte avalanșă de electroni, într-un canal mult mai mic decât cel corespunzător descărcărilor în gaze. Acest canal înaintază înspre anod și, pe măsura dezvoltării sale, datorită ionizărilor se formează și o sarcină spațială de ioni pozitivi care ocupă o zonă în care electronii cu energii mici pot fi captați de atomi cu afinitate la electroni rezultând ioni negativi. Frontul de sarcini negative (electroni și ioni) dezvoltat în avalanșă înaintază totuși cu canalul gazos, de lungime l_0 , pe măsura formării lui (Fig.1.1) și determină intensificarea câmpului de tensiune între el și anod. Acest fapt, precum și micșorarea lungimii în lichid, l_{110} , rănesc încă neștiută, mărește și mai mult intensitatea K a câmpului electric, astfel încât procesul se desfășoară accelerat. Când canalul filiform gazos a stins anodul spațiul dielectric se consideră străpuns.

In cazul dielectricului omogen localizarea canalului descărcării este determinată de distanța reală dintre cei doi electrozi și de intensitatea locală a câmpului electric.

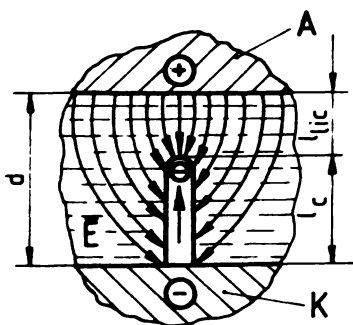


Fig. 1.1.1.

În cazul în care se modifică distanța se modifică și timpul de amorțare, mai ales prin creșterea timpului de întârziere.

In cazurile reale de prelucrare lichidul dielectric nu poate fi pur. Încălzirile anterioare poluează mediul de lucru cu suspensii din reziduri provenite din elementele spațiului de lucru (CP, BT și AL) și cu mici bule disperse de gaz. Urmele

vechilor descărcări se mai resimt și sub forma unor neomogenități locale de temperatură. Gradul de impurificare K_1 poate fi definit, [20], prin schimbarea densității lichidului

$$K_1 = \frac{\rho_1 - \rho}{\rho_0} \cdot 100 \quad (1.6)$$

unde ρ_1 - densitatea lichidului impurificat; ρ_0 - densitatea lichidului pur. Particulele care impurifică lichidul se pot afla la granulații foarte diferite, de la suspensii coloidale rezultate în principal prin piroliză mediului de lucru până la granule metalice vizibile cu ochiul liber, rezultate din electrozi.

In condițiile neomogenității mediului dielectric mecanismul străpungerii suferă modificări în sensul adaptării lui la fragmentarea spațiului în care au loc aceste fenomene. Principul efectului probabil al fragmentării este cel considerat al formării unor punți de impurități depășite de efectul dinamic al câmpului electric uniform și așezate pe traiectorii cu gradient maxim al câmpului. Se pot forma astfel lanțuri de capacități electrice orientate de-a lungul liniilor de câmp, în care intensitatea curentului inițial crește prin formarea unor trasee cu resistivitate mai mică, ducând la scurtarea timpului aleator de întârziere. Acest fenomen este cel mai probabil acolo unde gradul de impurificare este mai mare, deci în zonele în care au avut loc dispersate încă rezidurile poluante produse de descărcările anterioare și la viteze mici de curgere ale lichidului de lucru.

Cercetări experimentale mințioase [30], [61], [64] au pus în evidență variațiile timpului de întârziere la amorțare laște de dificultățile de formare a punților de străpungeră. Astfel, la aplica-

rea unor impulsuri cu aceeași tensiune de mers în gol și același timp de impuls, dacă s-a păstrat grosimea interstițiului constantă s-a constatat [30] creșterea timpului de amorsare odată cu mărirea timpului de pauză și cu creșterea vitezei de curgere a lichidului de lucru (ambii factori fiind favorabili disipării impurităților) iar dacă se păstrează timpul de pauză și viteza de curgere constante, t_a crește cu grosimea interstițiului, deci cu lungimea traseului punților de străpungere.

1.1.2. Dezvoltarea descărcării electrice

Starea de plasmă în canalul descărcării se stabilește concomitent cu fenomenele de ionizare care au loc în timpul străpungerii canalului odată formate permite desfășurarea proceselor cunoscute la descărcările electrice în mediul gazos, la densități mari de curent

- extragerea electronilor din catod prin emisie termoelectronică (pate catodică atinge temperaturi ridicate după amorsare), emisie secundară (catodul este bombardat cu ioni accelerați din coloana de plasmă), emisie fotoelectronică (dezexcitări și recombinații fac ca plasma să fie o sursă activă de radiații electromagnetice plasate între spectrul luminoz și ultraviolet) și emisie autoelectronică (căderea de tensiune catodică de gradienti de câmp electric mari, care pot învinge bariera de potențial de ieșire a catodului);

- accelerarea electronilor emiși în câmpul electric din zona catodică și proiectarea lor în canalul de plasmă unde energia cinetică acumulată declanșează prin ciocniri procese de excitări, disocieri și ionizări, cu absorbție de energie, care pot fi urmate de dezexcitări, asocieri și recombinații, cu emisie de energie radiantă;

- orientarea purtătorilor de sarcini spre anod, respectiv spre catod, cu formarea de sarcini spațiale în vecinătatea electrozilor, la distanțe corespunzătoare parcursului mediu mijlociu și cu determinarea unei repartiții neuniforme a tensiunii pe interstițiu (fig.1.2). Tensiunea descărcării, U_d , aplicată pe distanța δ dintre electrozi poate fi considerată ca sumă a trei căderi de tensiune: U_A repartizată neliniar în zona anodică pe lungimea l_A , U_C repartizată liniar pe lungimea l_C a coloanei de plasmă conductoare și U_K repartizată neliniar în zona catodică pe lungimea l_K .

$$U_d = U_A + U_C + U_K \quad \delta = l_A + l_C + l_K \quad (1.7)$$

Astfel lungimile l_K și l_A cit și căderile de tensiune U_K și U_A se află în raporturi constante față de aceeași lungime l_d , respec-

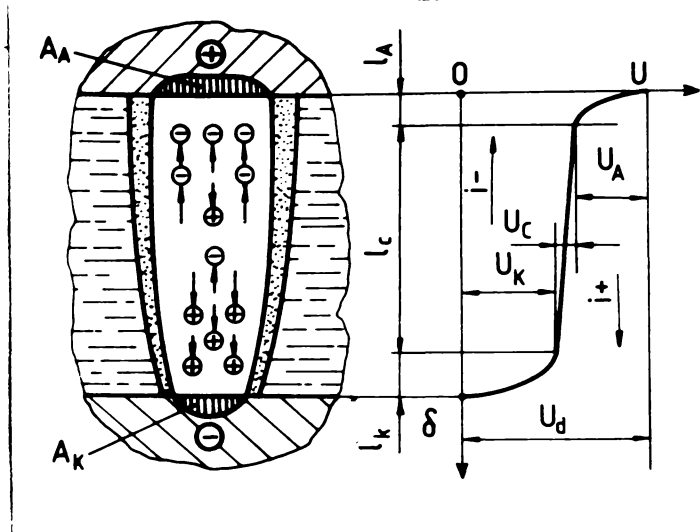


Fig.1.2.

tiv tensiune U_d . Valoarea acestor rapoarte este influențată, pe lângă natura electrodilor și a mediului dielectric și de starea acestora, temperatura jucând un rol determinant. Astfel, dacă la polii electrodice relativ mai "rece" căderea de tensiune catodică este mai mare, la polii electrodice relativ mai "calde" ea scade în favoarea creșterii celei anodice [99]. Acest fenomen se pare că

este una din cauzele schimbării de repartitie a energiei între elementele spațiului de lucru, cu apariția efectului de polaritate, chiar în absența peliculizărilor protectoare.

d) - accelerarea purtătorilor de sarcină în câmpurile electrodice și proiectarea lor în rețeaua metalică a electrodilor. Ioni cedează energia lor prin impact la suprafață, cei pozitivi se neutralizează prin recombinație cu electronii catodici, cei negativi cedează electronii suplimentari la anod. Acești electroni pătrund în anod și prin interacțiuni repetate transmit energia lor cinetică straturilor de suprafață al materialului. Ca urmare a acestor fenomene, zona de contact între canalul descărcării electrice și metal se transformă în sursă termică de temperatură ridicată, vizibilă datorită radiației luminoase. Se formează polii catodici de arie A_K și polii anodici de arie A_A .

Fenomenele termice care însoțesc descărcarea și timpul scurt în care ea are loc nu permit stabilizarea dimensiunilor transversale ale canalului de plasmă. Aceste dimensiuni depind, în afară de procesele electrostatice și electromagnetice și de presiunea gazului din coloana plasmatică. Ele sînt stabilite prin echilibrul dintre presiunea internă a gazelor și forțele de inerție ale lichidului pus în mișcare, precum și de presiunea hidrostatică a acestuia.

Modificarea dimensiunilor transversale ale canalului în care se deplasează purtătorii de sarcină este decalată din cauza inerției față de procesele electrice, astfel încît o descăr-

care electrică în impuls, în mediul lichid, nu poate ajunge practic în regim staționar. Cu toate acestea se poate urmări [43] pe baza câmpurilor electrice, repartiția spațială a puterii disipate în cele trei zone distincte ale variației de tensiune. Curentul electric, i , va reprezenta pe toată lungimea d suma :

$$i = i_{(+)} + i_{(-)} \quad (1.8)$$

unde $i_{(+)}$, respectiv $i_{(-)}$ sînt componente ale curentului realizate prin purtători de sarcini pozitive, respectiv negative. Avînd în vedere schimbul activ de sarcini între particule, în plasma descărcării aceste componente au valori diferite în funcție de lungimea d , valoarea intensității: $i_{(+)}$ crescînd de la anod spre catod în timp ce $i_{(-)}$ are variație inversă. Notînd aceste componente la nivelul pereții catodice cu $i_{K(+)}$ și $i_{K(-)}$ în [43] se calculează puterea electrică, P_K , disipată la catod :

$$\begin{aligned} P_K &= U_1 \cdot i_{K(+)} + U_K \cdot i_{K(+)} - U_{1K} \cdot i_{K(+)} - U_{1K} \cdot i_{K(-)} = \\ &= (U_1 + U_K - U_{1K}) i_{K(+)} - U_{1K} \cdot i_{K(-)} \end{aligned} \quad (1.9)$$

unde $U_1 \cdot i_{K(+)}$ este puterea rezultată din energia de recombinare a ionilor pozitivi sosiți la catod, U_1 - valoarea potențialului de ionizare al acestora; $U_K \cdot i_{K(+)}$ - puterea rezultată din energia cinetică a ionilor accelerați în câmpul electric al catodului; $U_{1K} \cdot i_{K(+)}$ - puterea consumată pentru lucrul mecanic de ieșire din catod a electronilor necesari pentru recombinarea ionilor pozitivi incidenti; U_{1K} - bariera de potențial de ieșire a catodului; $U_{1K} \cdot i_{K(-)}$ - puterea consumată la suprafața catodului pentru creșterea electronilor care formează componenta negativă $i_{K(-)}$.

Puterea electrică disipată la anod, P_A va fi :

$$P_A = P_T - P_K - P_C \quad (1.10)$$

unde $P_T = U_d \cdot i$ - puterea electrică totală consumată de descărcarea electrică; P_C - puterea disipată în coloana arcului, foarte mică, în jur de 1% în raport cu P_T .

Neglijînd P_C și ținînd cont de (1.8) și (1.9) se poate scrie:

$$\frac{P_A}{P_K} = \frac{U_d - U_1 - U_K + U_{1K} + (U_d + U_{1K}) \frac{i_{K(-)}}{i_{K(+)}}}{U_1 + U_K - U_{1K} - U_{1K} \frac{i_{K(-)}}{i_{K(+)}}} \quad (1.11)$$

Se vede că raportul puterilor repartizate pe electrozi depinde

de raportul între componentele electronice și ionice ale curentului care la rândul lor variază în funcție de densitatea de curent, J , și de temperatura petei catodice. În fig. 1.3 pentru electrozi de cupru și fig. 1.4 pentru electrozi de oțel se prezintă după Van Rijk [43], variația raportelor $i_{K(-)}/i_{K(+)}$ (linii întrerupte) și P_A/P_K (linii continue) în funcție de densitatea de curent.

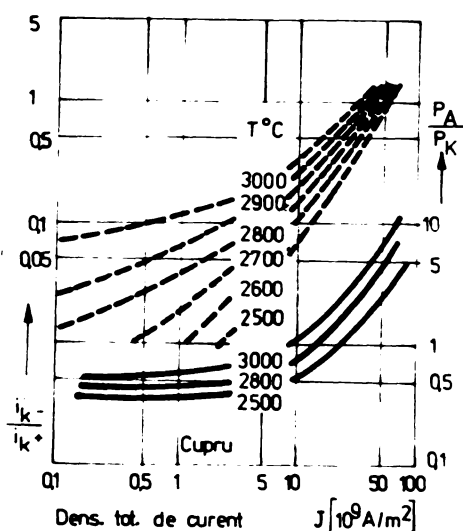


Fig. 1.3.

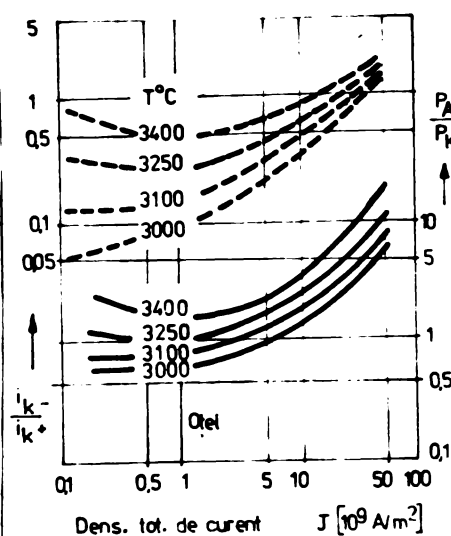


Fig. 1.4.

Se observă că la creșterea densității de curent crește componenta electronică a curentului și drept urmare crește și pierderea puterii anodice. Rezultă că toți parametri care tind să micșoreze densitatea de curent, respectiv concentrarea în timp și în spațiu a energiei descărcării, vor reduce în ultimă instanță eroziunea anodului.

1.1.3. Efecte dinamice ale descărcării electrice în mediul lichid

Coloana descărcării electrice în lichide se deosebește de cea în gaz printr-o mai mare concentrare în spațiu a canalului conductor, fapt care duce la o densitate de curent extrem de mare, de ordinul 10^6 A/cm^2 [206]. Unele calcule teoretice citate în [63] dau pentru faza inițială a surpunerii în care a fost fermată aproape instantaneu coloana de gaz, presiuni foarte mari, de ordinul 10^6 daN/cm^2 [79]. Această presiune dezvoltată în timp scurt dă naștere unei unde de șoc care se propagă radial. La început marginile bulei de gaz și a coloanei ionizate coincid mai apoi frontul unei de presiune se separă de coloană avansând rapid în mediul lichid, fiind urmat de suprafața de separație a bulei gazease în expansiune și după aceea de către coloana în dilatare a descărcării electrice. Viteza inițiale

lă de expansiune a bulei de gaz este supersonică [202], ea scade rapid în primele microsecunde odată cu dilatarea mediului gazos. Separarea canalului de plasmă de peretele bulei de gaz este favorizată și de forțele electrodinamice exercitate de câmpul magnetic propriu al descărcării asupra liniilor de curent, respectiv asupra traiectoriilor reale ale purtătorilor de sarcină. Astfel, în timpul în care curentul crește la începutul impulsului, canalul ionizat tinde să se dilate ca urmare a efectului skin (fig.1.5) fiind presiunea, p , și forța Kelvin, f_s , acționează în aceeași direcție. Canalul descărcării crește odată cu expansiunea bulei gazoase.

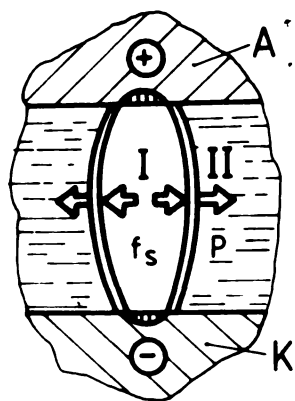


Fig.1.5.

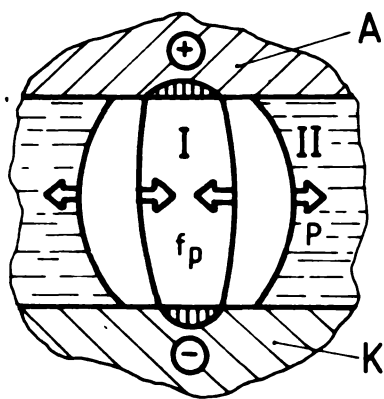


Fig.1.6.

În timpul în care $d_i/dt < 0$, descărcarea electrică este avestigionată și seționează efectul Finch (fig.1.6) cind presiunea p și forța constricționă, f_p , acționează în sensuri inverse. Canalul de plasmă se descealează față de

frontul gazos II. La sfirșitul impulsului canalul de plasmă este din nou supus efectului skin. Principale consecință a acestui efect este sporirea în regiia variabilă a rezistenței electrice echivalente odată cu creșterea neuniformității repartiției densității de curent, ceea ce favorizează întreruperea descărcării electrice.

Dilatarea bulei de gaz continuă și după încetarea impulsului de curent, fapt care duce la scăderea sa înă a presiunii sub valoare presiunii atmosferice cind extinderea fazei gazoase încetează și bulă intră în colaps. Viteza maximă de colaps a suprafeței bulei este de aproximativ 20 m/s [63]. La lichide cu tensiune superficială și viscozități mici bula se fragmentează, jeturi de lichid o străpung și sînt proiectate prin explozie asupra craterelor, iar fragmente din suprafața de separație lichid-gaz lovesc craterele, metalul electrozilor sau alte fragmente ale aceleiași suprafețe. Agitația mecanică locală contribuie la deionizarea spațiului și refacerea rigidității dielectrice a mediului de lucru.

1.1.4. Prelevarea materialului din electrozi

Mecanismul prelevării materialului din electrozii supuși eroziunii electrice este complex și elucidarea interacțiunii fenomenelor este dificilă. Fără a face o analiză amănunțită a tuturor teoriilor în legătură cu acest mecanism reținem că efectul termic al descărcării electrice este fenomenul de bază care determină alăbierea forțelor interatomice locale de legătură a materialului de îndepărtat pentru a se asigura expulzarea lui și formarea craterului de eroziune. [20], [21], [22], [47], [51], [76], [86], [99], [177], [178], [179], [181], [194]

Fenomenele care determină ruperea legăturilor interatomice și expulzarea materialului sînt mai complicate și mai controversate. Vom lua în considerare cele două aspecte fundamentale ale efectului eroziv :

- activarea locală prin introducerea de energie în microspațiul de eroziune (cel afectat de descărcare) ;
- expulzarea materialului activat cînd asupra sa se exercită forțe care depășesc o anumită valoare critică a forțelor de eroziune.

a) Activarea energetică locală

Forma și aspectul craterelor de eroziune [131], structura stratului de suprafață [33], [34], [113], forma sferică a majorității particulelor expulzate [79], etc., structure acestora [19], [109], atestă faptul că materialul îndepărtat prin eroziune electrică a suferit transformări de fază sub acțiunea energiei calorice. Principial această energie se poate obține prin transformarea în căldură a energiei cinetice a particulelor elementare purtătoare de sarcini electrice, accelerate în coloana descărcării de către forțele câmpului electric și proiectate în rețeaua metalică densă a electrozilor. Prin acest proces petele electrodice devin surse termice de suprafață.

O altă sursă termică posibilă este una volumetrică rezultată în stratul de material de sub pată electrodică în urma efectului termic al curentului electric concentrat la densități locale mari. [126].

Calculs teoretice [43], [95], [177], [178], [194], [206], [213], și determinări experimentale [22], [38], [50], [61], [206], confirmă că sursa de căldură de scurtă durată și de dimensiuni limitate care provoacă eroziunea electrică poate fi considerată sursă termică superficială (se poate neglija cea volumetrică) de la care

Prin proces nestaționar de termococonducțivitate căldura se propagă spre interior. La suprafața materialului, acolo unde sursa termică are temperatură mai ridicată decât cea de vaporizare a materialului are loc trecerea acestuia în stare gazoasă. Sursa se deplasează corespunzător menținându-se pe suprafața electrozilor. În acest mod procesul de activare energetică este însoțit de îndepărtarea unei cantități de material prin "vaporizare liniștită" [206], [214]. În același timp, pe măsura ce suprafața izotermică a cîmpului termic, cu temperatura egală cu cea de topire a materialului, pătrunde în adîncime, are loc trecerea acestuia în stare lichidă. Său adîncimea de topire urmează un strat solid activat prin încălzire.

b) Expulsarea materialului activat

Forțele care înving coeziunea și provoacă îndepărtarea materialului activat pot să fie de origine termodinamică, electrică, electromagnetă, hidrodinamică sau termomecanică.

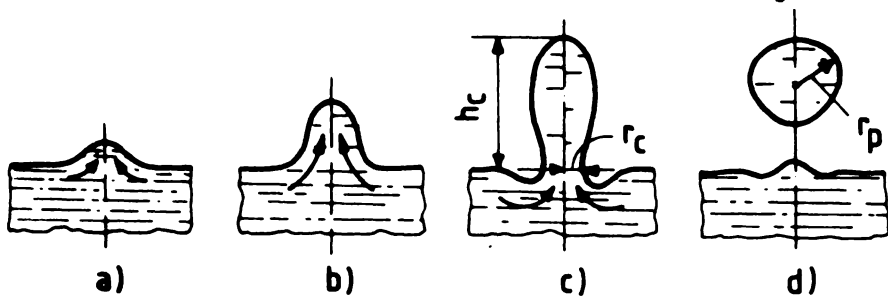
Expulsarea termodinamică reprezintă mecanismul care descrie îndepărtarea materialului în stare de vapori și în stare lichidă sub acțiunea fazei de vapori. Din foarte multe variante în care s-a explicat acest proces [20], [22], [76], [98], [100], [109], [126], [178], [181], [194], [204], [206], [211], [214], [215], se poate accepta o succesiune probabilă a fenomenelor pe baza considerării transformărilor termofizice.

Temperatura de vaporizare a metalului lichid depinde de natura acestuia și de presiunea exterioară. Lichidul activat începe să vaporizeze pe măsură ce presiunea de vapori depășește presiunea coloanei gazease a descărcării electrice. Procesul de vaporizare "liniștită" este frînat la începutul impulsului din cauza creșterii presiunii în bule de gaz, cauză din care crește și temperatura de vaporizare. În acest mod are loc și o supraîncălzire a fazei lichide. Scăderea bruscă a presiunii la dilatarea coloanei gazease și colapsul ei implozie de la sfîrșitul descărcării duce la coborîrea bruscă a temperaturii de vaporizare și scurge în stare critică întreg lichidul supraîncălzit la temperaturi mai mari. În faza lichidă apar, se dezvoltă și se dilată cu viteză mare microincinte de vaporizare explozivă care antrenază și masa lichidului pe care o ejectează sub formă de picături. Lichidul care nu a fost antrenat în șocul de expansiune este reținut de tensiunea superficială la suprafața corpului solid și se resolidifică pe fundul și pe marginile craterului. Acest model explică foarte bine preleve-

rea materialului metalic la sfârșitul impulsului, fenomen constant experimental mai ales la impulsurile lungi fiind și calculele terac- tehnice [45], [177], [178], [203], 206, dau o bună corelare între vo- luntile calculate și cele măsurate ale craterelor precum și a cores- pondență satisfăcătoare cu forma acestora.

Experiențe efectuate cu fotografieri ultrarapide [63], [202], [206], [208], au pus în evidență prezența unor expulzări de particole în primele microsecunde ale impulsurilor. Undele de șoc, bula de gaz și colona descărcării electrice sînt toate în stadii diferite de evoluție atunci cînd particola de material incandescent sînt inje- ctate din petele electrodice cu o viteză în jur de 60 m/s, ceva mai mică decît viteza inițială de expansiune a bulei de gaz. Rezultă că o anumită perioadă de timp particolele circulă în mediul gazos men- ținându-și practic viteza de eiecție. Cîm viteze de deplasare a peretelui bulei scade rapid sub influența inerției mediului, parti- celele calde ajung din urmă acest perete, pătrund în lichidul die- lectric rece și formează o cîră de vapori în urma frecării dintre ele. După pierderea căldurii își continuă mișcarea în fluid pînă cîm își pierde complet și energia cinetică. Cîra de vapori se frag- mentează, fragmentele iau sub acțiunea tensiunii superficiale for- ma celei mai mici energii constituind sfere gazease mici aliniate de-a lungul traiectoriei particolei metalice, în fața frontului gaz-lichid principal al descărcării. Rezultă că în primele stadii ale impulsului alte fenomene decît cele termice pure determină ex- pulzarea de material.

Expulzarea electrostatică. Densitatea de curent în pata electrodică, deci și densitatea de putere a sursei termice, nu sînt uniforme în timp. Ele au valori inițiale mai mari în zona periferică sub acțiunea efectului Skin din perioada primară cîm variază mult intensitatea curentului și au valori mai mari în zona axială a des- cîrcării în perioada quasistabilă a acesteia cîm intensitatea cu- rentului este aproximativ constantă și cîm efectul flash, acționînd



acupra liniilor de curent începe să con- centreze lichidul spre axa descărcării (fig. 1.7, a, b), după [45].

Fig. 1.7.

La atingerea unei raze critice r_c (fig.1.7,c) se formează picături care se desprind de masa lichidă (fig.1.7,d).

Calculul forțelor implicate în efectul Finch arată că acest mecanism este posibil numai la raze ale petei electroscopice foarte mici (până la 5 - 10 nm) întâlnite numai la prizele microsecunde ale descărcărilor mai lungi.

Sauizarea electrostatică. Conform acestui mecanism [198], [199], densitățile foarte mari ale curentului la suprafața anodului determină apariția locală a unor sarcini electrice spațiale și deci a unui câmp electric foarte intens care acționează asupra ionilor pozitivi ai rețelei cristaline metalice. Când forțele electrostatice depășesc rezistența la rupere a materialului în secțiunea de legătură a unei particule de material devine posibilă sauzarea și dirijarea acesteia în direcția liniilor de câmp. Considerând descărcarea ca o sursă de energie de efect punctiform în [199], se calculează o rază critică r_c la care se îndeplinesc condițiile sauzării electrostatice :

$$r_c = \sqrt{\frac{i}{2\pi j_c}} \quad (1.12)$$

unde i este intensitatea curentului și j_c - densitatea critică a curentului la care tensiunea mecanică dată de câmpul electric depășește forțele de coeziune. Pornind de la relația (1.12) se poate determina volumul craterelor de eroziune în funcție de intensitatea curentului, timpul de impuls și rezistența la rupere a materialului. Calcululele efectuate conform acestei teorii au dat rezultate de același ordin de mărime cu valorile determinate experimental numai la impulsuri de durată scurtă. La impulsuri lungi rezultatele sînt evident diferențiate, iar eroziunea catodului nu poate fi explicată [43].

Ancorarea termomecanică. Avînd în vedere gradientul mare al câmpului termic, activarea termică în stratul de material rămas în stare solidă dă naștere datorită procesului de dilatare, unor tensiuni mecanice interne convergente față de axa descărcării (fig.1.8) din cauză că volumul de metal rece, înconjurător, împiedică dilatarea

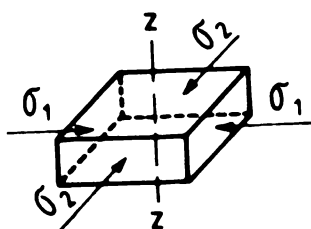


Fig.1.8.

laterală. Materialul se dilată numai în direcția axială a descărcării, iar tensiunile mecanice pot duce la fisurarea sau chiar la ruperea unor particule de material [21], [47], [62], [215]. Tendința de fisurare termomecanică este cu atât mai mare cu cât materialul supra eroziunii este mai dur, mai fragil și cu conductibilitate ter-

mai mică,
niciă fenomenul este favorizat și de concentrarea din punct de vedere energetic al impulsurilor. Teși calcule separate [21], [43], arată că sculgera electrostatică, expulzarea electromagnetică și ruperea termomecanică au pondere limitată și parțială, evaluarea lor comună permite aprecierea că își pot suprapune efectele completând eroziunea termodinamică și explicând aspectele fenomenelor pe care aceasta nu le acoperă, de exemplu existența pe lângă particulele sferice și a unor neregulate, fără urze de topire în produsele eroziunii [62], [73], [66].

Pe baza acțiunii termomecanice de scurtă durată determinate de dilatari rapide, ținând seama de forțele inițiale s-a pus și ipoteza expulzăriiării lichide din crater [93], pe baza vitezelor diferite de dilatare a fazelor.

Expulzarea hidrodinamică. Este o ipoteza care presupune că extragerea materialului topit din crater poate fi făcută de unda de șoc prin spălarea depresivă a suprafeței materialului de către frontul lichidului de lucru proiectat asupra acestuia la implozia bulei gazoase. Dină ice bulei de gaz [63], [202], [206], [215] și calculul timpilor după care apare colapsul incintei gazoase a descoperit, arată că aceste forțe hidrodinamice nu se pot exercita decât după o perioadă care este suficient de lungă pentru ca lichidul să fi fost deja solidificat [43]. În anumite cazuri însă și acest mecanism poate fi luat în considerare în suprapunere cu efectele termomecanice asupra materialelor fragile. Se are în vedere faptul că fisuri și rupturi termomecanice pot să apară, mai probabil, la răcirea stratului solid activat termic [47], atunci când la încălzire tensiunile termice s-au atenuat prin deformări plastice la cald, iar la răcire au loc tensiuni de contracție care supra la întindere stratul de material comprimat inițial. Procesul de fisurare la contracție poate să se suprapună cu aplicarea forțelor hidrodinamice de spălare violentă a suprafeței materialului la colapsul bulei de gaz

Indiferent de forma și localizarea sursei de căldură care determină activarea energetică și indiferent de natura forțelor ce provoacă expulzarea materialului activat, efectul eroziv se dezvoltă în primul rând în legătură cu energia impulsului și cu repartiția acesteia în timp, respectiv cu puterea impulsului. Intensitatea energiei calorice în surse termice depinde de raportul dintre puterea P_1 și energia electrică, W_1 , a impulsului, pe care îl definim drept factor de concentrare, K_0 , el fiind invers proporțional cu durata t ,

464-510
341 C

$$k_0 = \frac{W_1}{W_2} (s^{-1}) \quad (1.13)$$

Acceptând premise că între energia termică a impulsului și energia sa electrică există o dependență liniară se poate accepta și o proporționalitate a volumului total al craterelor de eroziune cu energia impulsurilor de aceeași durată. La impulsuri de aceeași energie însă de durate diferite volumul craterelor trebuie să difere atât ca mărime globală cât și ca repartiție procentuală între anod și catod. La impulsuri isoenergetice concentrate (k_0 mare) rezultă cimpuri termice cu gradienti mari care restrâng geometric zone temperaturilor corespunzătoare fazei lichide (cuprindă între T_{vap} și T_{sol}) și prin creșterea domeniului temperaturilor înalte extindă zona fazei de vapori, în detrimentul fazei lichide.

La impulsuri de concentrare joasă (k_0 mic) se extinde zona fazei lichide și impulsul este volumetric mai efectiv, în punctul de vedere al energiei repartizate pe volumul de material transformat de fază, caș favorabil pentru obiectul de prelucrat.

La concentrații și mai mici sau la materiale cu temperaturi de transformare înalte se extinde zona cu temperaturi corespunzătoare fazei solide și suprafața izotermă cu $T = T_{top}$ poate răfăna la nivelul suprafeței metalului, astfel încât nu mai apar transformări de fază în material, caș favorabil pentru electrodul de transfer.

1.2. Procesul integral de prelucrare prin eroziune electrică

1.2.1. Diversificarea tipurilor de impulsuri în condițiile descărcărilor succesive.

Descărcările electrice se succed în spațiul limitat al interstițiului dintre electrod și piesă, fapt care face ca o mulțime de procese fizico-chimice să se combine sau să se influențeze reciproc. Încă din primele cercetări sistematice asupra naturii fizice a eroziunii electrice și asupra proceselor ce o însoțesc [20], [31], [38], [66], [63], [84], [91], [92], [203], [204], [205], [212], [213], [214], s-a constatat că efectul global al descărcărilor repetate nu reprezintă însumarea simplă a efectelor determinate la descărcarea singulară de aceeași caracteristici.

Studiul proceselor la aplicarea seriilor de impulsuri [50], [84], [98], [138], [203], [212], [213], și analiza caracteristicilor descărcării în condiții tehnologice de lucru a dus la depistarea lui

multor categorii de impulsuri cu caracteristici distincte și cu efecte fizice diferite. Cauzele acestor diferențieri sînt legate de succesiunea fenomenelor generate de procesele elementare de eroziune și de repartiția spațial-temporală a acestora. Sintetizînd rezultatele cercetărilor, în general acceptate în literatură de specialitate [52], [68], [91], [92], [196], [201], se consideră că în timpul prelucrării prin eroziune electrică apar următoarele categorii de impulsuri :

a) impulsuri efective, la care apar descărcări electrice și care realizează efect eroziv asupra celor două corpuri metalice, suport al petelor electrice. Impulsurile efective pot fi de mai multe categorii:

a₁) impulsuri primare de prelevare, N_{pp} , care realizează vaporizarea, topirea și expulzarea din crateră a materialului din CF și ET, avînd efectivitate maximă;

a₂) impulsuri primare de prelevare și mărunțire, N_{pa} , la care pe lângă energia de efect eroziv la CF și ET se mai consumă și o parte din energie impulsului pentru mărunțirea și dispersarea particulelor solide din aglomerările locale provenite din cele expulzate anterior din crateră și neevacuate încă din interstițiu;

a₃) impulsuri secundare de mărunțire și dispersare, N_{sa} , care acționează în principal asupra materialului ce a fost prelevat anterior și care, dînd descărcări între ei și aglomerările de deșeu solid din interstițiu, nu provoacă prelevare la CF deși au caracteristici identice cu impulsurile primare; pentru a ușura urmărirea efectelor se pot separa convențional impulsurile de prelevare de cele de mărunțire considerîndu-se că unele dintre impulsuri au numai efect de prelevare și altele numai efect de mărunțire. Se poate scrie că numărul total de impulsuri de prelevare, N_p , și numărul total de impulsuri de mărunțire, N_m , vor fi :

$$N_p = N_{pp} + \eta N_{pa} \quad (1.14)$$

$$N_m = N_{sa} + (1-\eta) N_{pa} \quad (1.15)$$

unde η este randamentul de prelevare al impulsurilor cu efect dublu;

a₄) impulsuri în gaz, N_g , însoțite de descărcări electrice care au loc în mediul vapor-gaze sau la limita gaz-lichid [30], și prezintă scarare distinctă, lungime a colonei mici, tensiuni mici și curenți mai mari decît impulsurile de lucru, au acțiune de evacuare dar acțiune de prelevare mult mai mică (de un ordin de mărime).

b) impulsuri neefective, care nu sînt însoțite de descărcări electrice și nu prezintă efecte eroziv la CP și ET. Ele pot fi :

b₁) impulsuri fictive, N_P , care apar în lichid datorită conducției curentului prin punți, nu prezintă virf de amorțare, au caracteristică voltamperetrică coborîtoare, pot produce piroliza lichidului dielectric dar nu și creștere pe electrozi [52] ;

b₂) impulsuri în scurtcircuit, N_K , la care contactul direct între ET și CP dă curentul de scurtcircuit în timpul impulsului tensiunea scăzînd la o valoare practic nulă;

b₃) impulsuri în gol, N_G , cînd este prezentă tensiunea pe spațiul de lucru dar lipsește curentul.

Acum se consideră numărul de impulsuri de tensiune, N_1 , emis de generator într-un timp carecarea t se poate scrie :

$$N_1 = N_P + N_M + N_G + N_F + N_K + N_0 \quad (1.16)$$

Împertind numerele N la timp se obține relația între frecvența impulsurilor de tensiune incidente pe spațiul de lucru și frecvența impulsurilor de o anumită categorie.

$$f_1 = f_P + f_M + f_G + f_F + f_K + f_0 \quad (1.17)$$

La un regim de prelucrare dat, cînd $f_1 = ct.$, rezultă :

$$\frac{df_P}{dt} + \frac{df_M}{dt} + \frac{df_G}{dt} + \frac{df_F}{dt} + \frac{df_K}{dt} + \frac{df_0}{dt} = 0 \quad (1.18)$$

adică modificarea frecvenței impulsurilor de un anumit tip se face numai cu modificarea simultană a uneia sau mai multor frecvențe ale impulsurilor de alte tipuri.

1.2.2. Integrarea selectivă a proceselor elementare în spațiul de lucru

Pe baza cunoștințelor actuale, procesul de prelucrare prin eroziune electrică nu poate fi descris printr-un model matematic care să considere totalitatea dependențelor și a mărimilor principale pentru factorii de intrare și cei de ieșire din proces, astfel încît să se poată calcula modificarea lor pe măsura prelucrării unei piese. În lipsa unui astfel de model general rezultă imposibilitatea obținerii prin particularizare a unor modele practice mai simple pentru cazuri și regimuri de lucru concrete [196].

Acum legițiile care determină procesul de prelucrare integral nu pot fi scrise în forma analitică, ele pot fi însă ordonate în scheme structurale calitative pentru facilitarea unor metode convenabile de stabilire a modelelor matematice particulare și pentru

determinarea experimentală a legăturilor mai importante între și în interiorul subproceselor.

În fig.1.9 se prezintă într-o schemă structurală sintetică modul în care se integrează principalele categorii de procese interdependente desfășurate în spațiul de lucru în condiții de prelucrare tehnologică. Dependentele directe ale proceselor s-au marcat cu li-

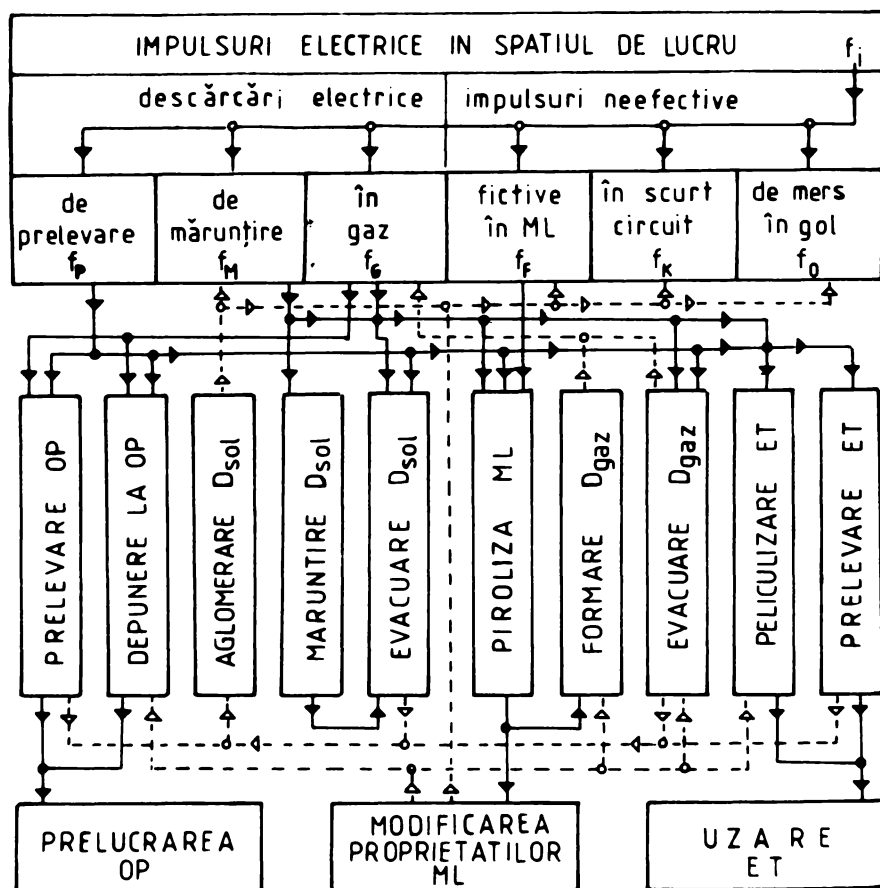


Fig.1.9.

și repartițiilor lor cu o anumită probabilitate pe categoriile structurale și de succesiunea acestora depind atât natura și intensitatea fenomenelor fizice cit și efectele care realizează transformarea tehnologică.

Între o anumită relație între regimul electric programat și starea spațiului de lucru se poate considera [196], că disocierea impulsurilor pe categorii are loc în două etape distincte :

- o selectare inițială a impulsurilor de mers în gol cu probabilitatea P_0 , a celor de scurtcircuit cu probabilitate P_k și a celor fictive în mediul de lucru cu probabilitate P_f . Frecvența acestora va fi proporțională cu cea inițială a impulsurilor de tensiune, f_i :

nie plină, iar reacția inversă a procesului global cu linie întreruptă.

Rolul determinant îl are agentul roziv, respectiv descărcările electrice în impuls care, în funcție de caracteristicile programate de generare a impulsurilor pe de o parte și de răspunsul fizic al spațiului de lucru pe de altă parte stabilesc caracteristicile efective ale impulsurilor electrice, precum

$$f_0 = P_0 \cdot f_1 ; f_K = P_K \cdot f_1 ; f_P = P_P \cdot f_1 \quad (1.19)$$

- o selecție finală a impulsurilor efective proporțională cu frecvența acestora prin probabilitățile de apariție a descărcărilor în gaz, P_G și a celor de mărunțire P_K .

$$f_0 = P_G [f_1 - (f_0 + f_K + f_P)] = P_G \cdot f_1 (1 - P_0 - P_K - P_P) \quad (1.20)$$
$$f_M = P_M [f_1 - (f_0 + f_K + f_P)] = P_M \cdot f_1 (1 - P_0 - P_K - P_P)$$

Rezultă frecvența impulsurilor de prelevare :

$$f_P = f_1 - (f_K + f_G) - (f_0 - f_K - f_P) = f_1 (1 - P_M - P_G) (1 - P_0 - P_K - P_P) \quad (1.21)$$

Probabilitățile P_j , ($j = 0, K, P, G, M$) sînt funcții de caracteristicile geometrice ale spațiului de lucru de natura și proprietățile elementelor constitutive ale acestuia și de caracteristicile programate ale impulsurilor electrice.

Descărcările de prelevare influențează nemijlocit asupra îndepărtării volumice de material la anod și la catod, asupra modificării proprietăților lichidului dielectric supus procesului de piroliză și asupra fenomenelor hidrodinamice și pneumatico-mecanice care condiționează funcția de evacuare a produselor eroziunii. Procesele elementare succesive pot expulsa în interstițiul activ o cantitate mare de material metalic din electrozi care poate ajunge la 15.000 mm³/min. [52], și care trebuie evacuat pentru continuarea prelucrării. Avînd în vedere dimensiunile și curburile interstițiului activ, la prelevarea cu copierea forasî expulzarea integrală a particulelor direct în afara interstițiului este practic exclusă astfel încît evacuarea lor în interstițiul pasiv sau în afara acestuia se face sub acțiunea mulțimii descărcărilor prin intermediul mișcării lichidului și a bulelor de gaz în interstițiu. Varietatea fenomenelor și combinarea imprevizibilă a efectelor lor dau un caracter întâmplător deplasării acestor particule, astfel încît pînă la evacuarea lor se produc aglomerările de deșeu solid, D_{sol} , care împreună cu impuritățile disperse și cu faza gaz-vapori, D_{gas} , prevalite din piroliză intrerup continuitatea și schimbă proprietățile mediului de lucru.

Modificarea proprietăților și determină principală reacție inversă internă a procesului de prelucrare. Aglomerările solide duc la apariția impulsurilor de mărunțire și de scurtcircuit, componența gaseasă de descărcările în gaz, impurificarea lichidului dielectric crează condițiile apariției impulsurilor fictive, iar variațiile grosimii interstițiului determină reacția externă a sistemului de evacuare care restabilește distanța disruptivă. Oscila-

țiile rezultate din interacțiunea acestor două reacții determină și pericolea în care, nesîndu-se condițiile de descărcare, apar impulsuri de aer în gol precum și cele în care electrozii ajung în contact galvanic direct dînd impulsuri de scurtcircuit.

ilanțul global al variației de masă se concretizează prin prelucrarea piesei și prin uzura electrodului de transfer.

1.2.3. Procese de depunere - peliculizare

În anumite condiții de desfășurare a proceselor din spațiul de lucru, pe anod se depune o peliculă protectoare de carton care determină compensarea relativă a eroziunii acestuia [158], [207].

Principalele condiții în care apare fenomenul de peliculizare sînt :

- utilizarea corect dielectrică a unei hidrocarburi;
- aplicarea unor impulsuri de energie mare și de durată mai mari de 200 μ s ;
- conectarea spațiului de lucru în polaritate inversă;
- formarea unui proces de succesiune a descărcărilor "în culburi" astfel încît să se obțină încălziri locale ale stratului de suprafață al materialului an, în jur de 700°C.

Analiza spectrală a arătat că stratul depus are structură cristalină [205], iar aderența pe suprafața metalului este slabă în cazul oțelului și foarte puternică la cupru și grafit.

Fenomenul peliculizării poate fi explicat pe baza proceselor de ionizare și de transport ionic în colcana descărcării [98], [158]. Principalele componente gazoase din coloană, cînd descărcarea are loc în hidrocarburi, o constituie produsele disocierii acestora, respectiv hidrogenul și carbonul. Atozii de hidrogen prin ciocniri neelastice cu electroni din curentul electronic formează ioni pozitivi care intră ca parte componentă a curentului ionic pozitiv, ajung la catod unde se neutralizează și se reîntorc în coloană sau se combină chimic cu metalul dînd hidrați metalici, fără o importanță prea mare în desfășurarea proceselor ulterioare, ei fiind îndepărtați de pe stratul de suprafață odată cu produsele eroziunii. Carbonul însă, datorită afinității sale pentru captură electronică, se poate ioniza negativ și se adaugă componente electronice care se deplasează la anod. Dacă temperatura acestuia este suficient de ridicată ioni de carbon pot difuza în rețeaua metalică a anodului formînd soluții solide de interstiție. Excesul de ioni de carbon se poate depune pe această bază sub formă de grafit într-un strat mai subțire sau mai puțin consistent.

1.3. Studiul interdependenței proceselor de prelucrare,

marșare și evacuare a produselor eroziunii electrice

stabilitatea procesului de prelucrare prin eroziune electrică depinde funcțional și de raportul real dintre impulsurile de un anumit tip, raport determinat la rândul lui de echilibrul stabilit într-un proces de prelucrare a materialului din electrod și cele de evacuare a produselor eroziunii [114], [115].

În cele ce urmează se propune un model matematic în care desfășurarea procesului de eroziune electrică să fie urmată prin variația concentrației particulelor solide aglomerate și mărunțite în interstițiul activ.

Volumul total, V , de material prelevat prin eroziune din piatră și din electrod este regăsit în orice moment ulterior sub o formă sau alta în interstițiul de lucru sau în afara lui.

$$V = V_{AP} + V_{EP} + V_{AS} + V_{ES} \quad (1.22)$$

unde V_{AP} - volumul aglomerarilor primare adică al materialului staționat în interstițiu cu forma și granulația de expulzare din cratere;

V_{EP} - volumul evacuat primar, adică al materialului transportat în afara interstițiului cu forma și granulația de expulzare, fără să fi suferit alte transformări dimensionale;

V_{AS} - volumul aglomerat secundar, provenit dintr-o parte a celui expulzat din cratere și supus ulterior acțiunii de dispersare și mărunțire, dar rămas în interstițiu cu granulație nouă, mai mică;

V_{ES} - volumul evacuat secundar, mărunțit în timpul staționării în interstițiu și evacuat din acesta sub formă mărunțită.

Cu egalitatea (1.22) este valabilă, conform legii conservării substanței, și la momentul t și la momentul $t+dt$ al desfășurării procesului, este satisfăcută și egalitatea:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV_{AP}}{dt} + \frac{dV_{EP}}{dt} + \frac{dV_{AS}}{dt} + \frac{dV_{ES}}{dt} \quad (1.23)$$

Efectivitatea impulsurilor este determinată pe de o parte de parametri lor comandați și pe de altă parte de geometria, natura elementelor constitutive și starea spațiului de lucru. Starea spațiului de lucru se schimbă în timpul procesului de prelucrare datorită produselor eroziunii, cea mai mare influență exercitându-o particulele metalice electroconductive aflate în interstițiu. $V_{AP}+V_{AS}$ particulele mărunțite care formează volumul aglomerărilor secundare V_{AS} sînt mai mici, mai compacte dimensional și mai mobile decît cele

aglomerate primare. Repartizarea spațială în interstițiu a particulelor mărunțite este și ea mai omogenă. Aceasta situație face ca variațiile V_{AP} să modifice direct starea și proprietățile mediului de lucru. În același timp variațiile V_{AS} poartă informații și asupra evoluțiilor primare V_{AP} din care ele se formează, cât și asupra cotei de energie de efect pe care sustras-o productivității.

Reacția inversă internă a procesului începe de fapt prin apariția aglomerărilor de mărunțire, astfel ca se vor exprima toate celelalte volume parțiale și variațiile lor în funcție de V_{AS} .

În primul rând se poate considera că atât variația volumului evacuat direct cât și suma variațiilor volumelor mărunțite sînt proporționale cu volumul aglomerărilor primare existente în interstițiu

$$\frac{dV_{EP}}{dt} = C_1 \cdot V_{AP} \quad (1.24)$$

unde C_1 este o constantă de evacuare primară;

$$\frac{d(V_{A_1} + V_{A_2})}{dt} = C_2 V_{AP} \quad (1.25)$$

unde C_2 - constantă de mărunțire.

În al doilea rând se poate aproxima că variația volumului evacuat secundar sau feră mărunțită trebuie să fie proporțională cu volumul aglomerărilor secundare existente în interstițiu.

$$\frac{dV_{AS}}{dt} = C_3 V_{AS} \quad (1.26)$$

unde C_3 - constantă de evacuare secundară.

În (1.25) și (1.26) se poate scrie :

$$V_{AP} = \frac{1}{C_2} \cdot \frac{dV_{AS}}{dt} + \frac{C_3}{C_2} V_{AS} \quad (1.27)$$

derivind (1.27) obținem:

$$\frac{dV_{AP}}{dt} = \frac{1}{C_2} \cdot \frac{d^2 V_{AS}}{dt^2} + \frac{C_3}{C_2} \cdot \frac{dV_{AS}}{dt} \quad (1.28)$$

înlocuind (1.27) în (1.24) se obține :

$$\frac{dV_{EP}}{dt} = \frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{dV_{AS}}{dt} + \frac{C_1 \cdot C_3}{C_2} \cdot V_{AS} \quad (1.29)$$

În al treilea rând se poate considera că dacă tot materialul ar fi expulzat direct din cratere în afara interstițiului energic

de efect n-ar mai fi diminuată de procesul de mărunțire și variația volumului erodat ar fi egală, cu un debit maxim Q_M

$$\left| \frac{dV}{dt} \right|_{\max} = Q_M \quad (1.30)$$

Acă, din contra, tot materialul expulzat din cratere rămâne în interstițiu, V_{AP} crește pînă la o valoare critică la care procesul încetează.

$$\left| \frac{dV}{dt} \right|_{\min} = 0; \quad |V_{AP}|_{\max} = K A_1 \delta_s \quad (1.31)$$

unde K este un coeficient de saturație care depinde în primul rînd de granulația particulelor și se definește ca raport între volumul aglomerărilor solide aflate în interstițial saturat și volumul interstițialului; A_1 - aria mijlocie a interstițialului; δ_s - grosimea interstițialului saturat.

Pentru un caz de prelucrare dat $|V_{AP}|_{\max}$ are o valoare constantă V_M care este volumul de umplere.

$$K A_1 \delta_s = V_M \quad (1.32)$$

Pentru situații intermediare $C < V_{AP} < V_M$, scăderea debitului de particule, prin reducerea efectivității energiei introduse în spațiul de lucru, va fi proporțională cu gradul de saturare al interstițialului caracterizat de raportul dintre volumul aglomerărilor primare existente V_{AP} și cel de saturare completă V_M .

$$\frac{dV}{dt} = Q_M - \frac{V_{AP}}{V_M} Q_M \quad (1.33)$$

Se definește drept coeficient de saturare, C_4 , raportul :

$$C_4 = \frac{V_{AP}}{V_M} \quad (1.34)$$

Ecuația (1.33) se poate scrie :

$$\frac{dV}{dt} = Q_M - C_4 \cdot V_{AP} \quad (1.35)$$

Înlocuind (1.27) în (1.35) se obține:

$$\frac{dV}{dt} = Q_M - C_4 \left(\frac{1}{C_2} \cdot \frac{dV_{AS}}{dt} + \frac{C_3}{C_2} V_{AS} \right) \quad (1.36)$$

Iar cu (1.28), (1.29), (1.26) și (1.36) ecuația (2) devine:

$$\frac{d^2 V_{AS}}{dt^2} + (C_1 + C_2 + C_3 + C_4) \frac{dV_{AS}}{dt} + C_3 (C_1 + C_2 + C_4) V_{AS} = C_2 Q_M \quad (1.37)$$

toate constantele au dimensiune t^{-1} pot fi scrise :

$$C_1 = \frac{1}{T_{1P}}; C_2 = \frac{1}{T_M}; C_3 = \frac{1}{T_{RS}}; C_4 = \frac{1}{T_S} \quad (1.38)$$

mod în care poate fi definită mai ușor semnificația lor fizică:

T_{1P} - timp de evacuare primară, adică timpul în care întreg volumul V_{AP} ar putea fi evacuat din interstițiu, cu debitul de evacuare primară;

T_M - timp de mărunțire, reprezentând timpul în care întreg volumul V_{AP} ar putea fi transformat dimensional, cu debitul de mărunțire, în particule de granulație mai mică, indiferent dacă ele rămân sau sînt evacuate secundar din interstițiu;

T_{RS} - timp de evacuare secundară, adică timpul în care întreg volumul V_{AS} aglomerat secundar ar putea fi evacuat cu debitul de evacuare secundară;

T_S - timp de saturare, definit ca timp ce ar fi necesar pentru furnizarea cu debit primar a volumului maxim posibil de acumulare în interstițiu. El ar putea fi determinat de regimul de prelucrare (prin Q_p) și de capacitatea de înmagazinare a interstițiului (prin V_{ij}).

Ecuația (1.37) reprezintă un model matematic al reacției inverse interne exercitată, prin procesul de evacuare al produselor eroziunii din acțiul activ. Se vede că este o ecuație diferențială de ordinul II și de forma :

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + C = L \quad (1.39)$$

Pentru rezolvarea ei se consideră ecuația caracteristică asociată a formei omogene :

$$r^2 + Br + C = 0 \quad (1.40)$$

cu soluțiile :

$$r_1, r_2 = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4C}}{2} \quad (1.41)$$

Discriminantul ecuației caracteristice are forma :

$$B^2 - 4C = (C_1 + C_2 + C_3 + C_4)^2 - 4C_3(C_1 + C_2 + C_4) = (C_1 + C_2 - C_3 + C_4)^2 \quad (1.42)$$

Discriminantul fiind pozitiv rădăcinile ecuației caracteristice date de (1.41) sînt reale și ambele negative, $|r_2| > |r_1|$, avînd valorile :

$$r_1 = -C_3; r_2 = -(C_1 + C_2 + C_4) \quad (1.43)$$

deci : $(C_1 + C_2 + C_4) > c_3$ (1.44)

Soluția generală a ecuației (1.39) este :

$$V_{AB}(t) = K_1 \cdot e^{r_1 t} + K_2 \cdot e^{r_2 t} + \frac{D}{C} \quad (1.45)$$

Constantele de integrare K_1 și K_2 se determină din condițiile inițiale nule pentru $V_{AB}(t)$ și dV_{AB}/dt .

$$V_{AB}(0) = K_1 + K_2 + \frac{D}{C} = 0 \quad (1.46)$$

$$\left. \frac{dV_{AB}}{dt} \right|_{t=0} = K_1 \cdot r_1 + K_2 \cdot r_2 = 0 \quad (1.47)$$

de unde rezultă :

$$K_1 = \frac{D}{C} \cdot \frac{r_2}{r_1 - r_2} < 0 \quad (1.48)$$

$$K_2 = \frac{D}{C} \cdot \frac{r_1}{r_1 - r_2} > 0 \quad (1.49)$$

Intrând deținutul de evacuare secundară este nul la începutul prelucrării și cele două rădăcini, r_1 și r_2 , sînt negative, constantele K_1 și K_2 vor avea, conform (1.47), semne contrare și cum $|r_2| > |r_1|$ rezultă $|K_1| > |K_2|$

În (1.48), (1.49) și (1.45) se calculează :

$$K_1 = \frac{C_2}{C_3^2 - C_3(C_1 + C_2 + C_4)} < 0 \quad (1.50)$$

$$K_2 = \frac{C_2}{(C_1 + C_2 + C_4)^2 - C_3(C_1 + C_2 + C_4)} > 0 \quad (1.51)$$

Cu valorile din (1.48) și (1.49) ecuația (1.24) se scrie :

$$V_{AB}(t) = \frac{D}{C} \cdot \frac{r_2}{r_1 - r_2} \cdot e^{r_1 t} - \frac{D}{C} \cdot \frac{r_1}{r_1 - r_2} \cdot e^{r_2 t} + \frac{D}{C} \quad (1.52)$$

Acă se derivatează :

$$\frac{dV_{AB}}{dt} = \frac{D}{C} \cdot \frac{r_1 r_2}{r_1 - r_2} (e^{r_1 t} - e^{r_2 t}) > 0 \quad (1.53)$$

Rezultă că $V_{AB}(t)$ este o funcție monoton crescătoare care pornește din zero și tinde asimptotic spre valoarea D/C , la care se stabi-

lizată (fig.1.10). Valoarea de stabilizare este :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} V_{AS}(t) = \frac{D}{C} = \frac{C_2}{C_3(C_1+C_2+C_4)} \omega_1; \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{dV_{AS}}{dt} = 0 \quad (1.54)$$

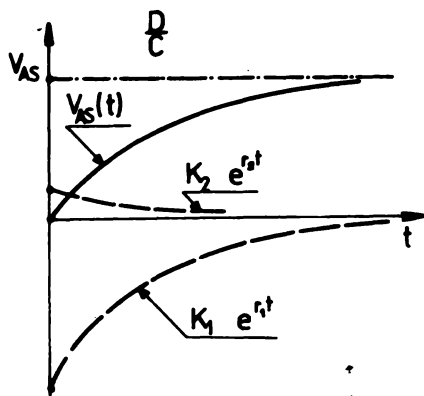


Fig.1.10.

Modelul matematic reflectă corect procesul fizic. Valoarea de stabilizare a volumului V_{AS} este direct proporțională cu productivitatea aerisă ω_1 , care la rîndul ei, la pereche ET-F dată, depinde de regimul de lucru; este de asemenea direct proporțională cu rata de străungere a aglomerărilor primare prin constanta C_2 . În aceeași timp proporționalitatea inversă arată că volumul aglomerărilor secundare la procesul stabilizat (t mare) scade cu creșterea ratei de evacuare secundară, (constanta C_3) și cu creșterea sumei factorilor ($C_1+C_2+C_4$) care determină micșorarea volumului aglomerărilor primare în interstițiu.

Acum se urmărește volumul evacuat secundar, V_{ES} , din expresie (1.26) rezultă :

$$\begin{aligned} V_{ES}(t) &= C_3 \int_0^t V_{AS}(t) dt = C_3 \int_0^t (K_1 e^{-r_1 t} + K_2 e^{-r_2 t} + \frac{1}{C}) dt = \\ &= C_3 \left(\frac{K_1}{r_1} e^{-r_1 t} + \frac{K_2}{r_2} e^{-r_2 t} + \frac{1}{C} t \right) - C_3 \left(\frac{K_1}{r_1} + \frac{K_2}{r_2} \right) \quad (1.55) \end{aligned}$$

Înlocuind $t = 0$ și valorile calculate pentru K_1, K_2, r_1, r_2 , relația (1.55) verifică condițiile inițiale, adică $V_{ES}(0) = 0$.

Derivata funcției (1.55) va fi :

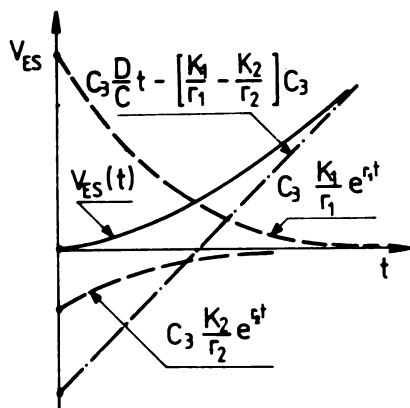
$$\frac{dV_{ES}}{dt} = C_3 \frac{1}{C} \left(\frac{r_2}{r_1-r_2} e^{-r_1 t} - \frac{r_1}{r_1-r_2} e^{-r_2 t} + 1 \right) > 0 \quad (1.56)$$

Rezultă că și $V_{ES}(t)$ este o funcție pozitivă și monoton crescătoare (fig.1.11) care după fază transitorie inițială se apropie asimptotic de dreapta oblică a cărei expresie este:

$$V_{ES} = \frac{C_2 C_1}{C_1 + C_2 + C_4} \omega_1 - \frac{C_2(C_1 + C_2 - C_3 + C_4) \omega_1}{C_3(C_1 + C_2 + C_4)^2} \quad (1.57)$$

La stabilizarea procesului, când t crește, debitul evacurii secundare rămâne constant în timp la valoarea :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{dV_{AP}}{dt} = C_3 \cdot \frac{D}{C} = \frac{C_2 Q_M}{C_1 + C_2 + C_3} \text{ ct.} \quad (1.58)$$



ceea ce exprimă faptul că tot materialul mărunțit în unitatea de timp este evacuat din interstițiu - vezi relația (1.25) și (1.54), fapt care corespunde intrutotul procesului fizic real.

Pentru expresia volumului V_{AP} , ecuația (1.27) se poate scrie :

Fig. 1.11.

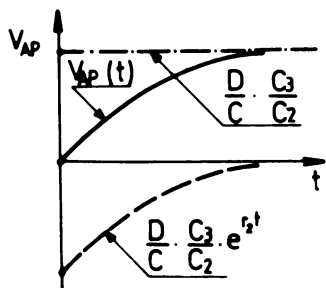
$$\begin{aligned} V_{AP}(t) &= \frac{1}{C_2} \cdot \frac{D}{C} \left(\frac{r_1 r_2}{r_1 - r_2} \right) + \left(\frac{C_3 r_2}{r_1 - r_2} \right) e^{r_1 t} - \left(\frac{r_1 r_2}{r_1 - r_2} - \frac{r_1 C_3}{r_1 r_2} \right) e^{r_2 t} + C = \\ &= \frac{-C_3}{-C_2} \cdot \frac{D}{C} (1 - e^{r_2 t}) \end{aligned} \quad (1.59)$$

cu valorile rădăcinilor r_1 și r_2 , din (1.22) ecuația devine :

$$V_{AP}(t) = \frac{Q_M}{(C_1 + C_2 + C_3)} (1 - e^{-(C_1 + C_2 + C_3)t}) \quad (1.60)$$

iar derivata sa :

$$\frac{dV_{AP}}{dt} = Q_M e^{-(C_1 + C_2 + C_3)t} \quad (1.61)$$



Volumul $V_{AP}(t)$ este nul la $t=0$ și crește exponențial spre o valoare de echilibru (fig. 1.12)

$$\lim_{t \rightarrow \infty} V_{AP}(t) = \frac{Q_M}{(C_1 + C_2 + C_3)} ; \quad (1.62)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{dV_{AP}}{dt} = 0$$

Fig. 1.12.

ceea ce iarăși corespunde procesului real.

Înlocuind în expresia debitului evacuării primare ecuația (1.29) valorile calculate pentru V_{AE} și debitul său se obține :

$$\begin{aligned} \frac{dV_{EP}}{dt} &= \frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{D}{C} \cdot \frac{r_2}{r_1 - r_2} (r_1 + C_3) e^{r_1 t} - \frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{D}{C} \cdot \frac{r_1}{r_1 - r_2} (r_2 + C_3) \cdot \\ &= \frac{C_1 C_3}{C_2} \cdot \frac{D}{C} = \frac{C_1 C_3}{C_2} \cdot \frac{1}{C} (1 - e^{r_2 t}) > 0 \end{aligned} \quad (1.63)$$

care, cu valorile rădăcinilor r_1, r_2 devine :

$$\frac{dv_{EP}}{dt} = \frac{C_1 C_3}{(C_1 + C_2 + C_4)} (1 - e^{-(C_1 + C_2 + C_4)t}) \quad (1.64)$$

Voluntul evacuat primar, V_{EP} , se obține prin integrarea ecuației (1.64).

$$\begin{aligned} V_{EP} &= \frac{C_1 C_3}{(C_1 + C_2 + C_4)} \left(1 - \int_0^t e^{-(C_1 + C_2 + C_4)t} dt \right) = \\ &= \frac{C_1 C_3}{(C_1 + C_2 + C_4)^2} \left(1 - e^{-(C_1 + C_2 + C_4)t} \right) + \frac{C_1 C_3}{(C_1 + C_2 + C_4)} t - \frac{C_1 C_3}{(C_1 + C_2 + C_4)^2} \end{aligned} \quad (1.65)$$

Această funcție este pozitivă și are o creștere (Fig. 1.13), care tinde asimptotic spre dreapta a cărei ecuație este:

$$V_{EP} = \frac{C_1 C_3}{(C_1 + C_2 + C_4)} t - \frac{C_1 C_3}{(C_1 + C_2 + C_4)^2} \quad (1.66)$$

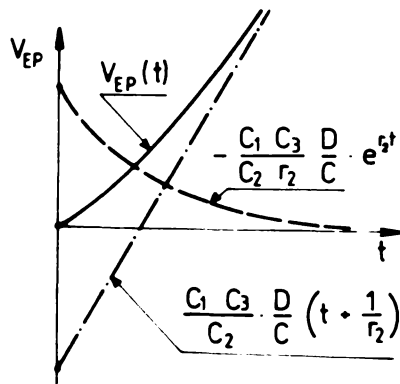


Fig. 1.13.

după o perioadă transitorie debitul evacuării primare se stabilizează la valoarea :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{dv_{EP}}{dt} = \frac{C_1 C_3}{(C_1 + C_2 + C_4)} = ct \quad (1.67)$$

Relația (1.67) reflectă fidel cazul real, debitul evacuării primare crescând cu puterea rezinului de lucru (exprinsă prin productivitatea maximă q_{max}) și cu valoarea constantei de evacuare primară C_1 și scăzând la creșterea valorii factorilor

care tind să măsoare concentrația aglomerărilor primare ($C_1 + C_2 + C_4$).

În fine, scriind ecuația (1.22) cu expresiile calculate pentru diversele faze în care se ajunge la momentul t , volutul total al eroziunii se obține:

$$\begin{aligned} V(t) &= -\frac{1}{C} \left(\frac{C_3}{r_2} + 1 \right) \left(\frac{C_3}{C_2} + \frac{r_1}{r_1 - r_2} \right) e^{r_2 t} + \\ &+ \frac{1}{C} \frac{C_3}{C_2} \left(\frac{C_3}{C_2} + 1 \right) t + \frac{1}{C} \left(\frac{r_1^2 - r_2^2}{r_2} + \frac{C_1 C_3}{C_2 r_2} + \frac{C_3}{C_2} + 1 \right) \end{aligned} \quad (1.68)$$

derivata acestei ecuații dă, pentru regimul stabilizat, expresia :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{dV}{dt} = \frac{V}{C} C_3 \left(\frac{C_1}{C_2} + 1 \right) \quad (1.69)$$

În (1.37) și (1.46) se vede că :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{dV}{dt} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{d(V_{EP} + V_{SE})}{dt} = \frac{C_1 + C_2}{(C_1 + C_2 + C_4)} V_{SE} = ct, \quad (1.70)$$

ceea ce descrie faptul că în regim stabilizat productivitatea eruziunii este egală cu suma debitelor de evacuare și că atunci când apare săruntirea, productivitatea scade. Conform ecuației (1.70) ecuația de debitul de producere de noi particule să fie egal cu productivitatea maximă este :

$$\frac{C_1 + C_2}{C_1 + C_2 + C_4} = 1, \text{ respectiv } \frac{dV}{dt} = V_{SE} \quad (1.71)$$

cea care corespunde situației $C_4 = 0$ (interstițiul nu înmagazinează particule prinzare).

În analiza modelului matematic al reacției inverse interne rezultă :

1. Prelucrarea prin eroziune electrică începe printr-o etapă tranzitorie în care se stabilește decalajul între momentul producerii și cel al evacurii din interstițiu al materialului prelevat. Un proces tranzitoriu similar, descrie de aceeași relații matematice, are loc și după modificarea geometriei interstițiului, atunci când se modifică și condițiile de evacuare. Dacă acestea se înrăutățesc de exemplu, V_{SE} crește, se schimbă raportul dintre numărul de căruri de prelevare, N_p , și cele de săruntire, N_{SE} . Mărirea frecvenței acestora din urmă duce la micșorarea debitului, dV/dt , al particulelor nou formate. În același timp cresc cu volumul aglomerărilor prinzare și debitele de evacuare și de săruntire până la atingerea unui nou nivel staționar cu productivitate mai mică, cu volum de aglomerări prinzare mai mare și cu debit de evacuare primară mai mic. În schimb, ca rezultat al unei săruntiri mai active debitul evacurii secundare crește.

Modelul matematic de sus reflectă corect legăturile proceselor din interstițiu, descriind atât perioade tranzitorie de formare a mediului de lucru real cât și pe cea de funcționare stabilă. El poate fi utilizat în cercarea adaptivă dacă se optimizează productivi-

tatea în funcție de constantele $C_2 \dots C_4$ care, în ultima analiză, oglindesc repartiția statistică a diferitelor tipuri de impulsuri din spațiul de lucru. Un sistem informațional cu discriminarea impulsurilor pe categorii poate fi utilizat pentru adaptarea reacției externe a regulatorului de avans.

2. Procesul integral de eroziune este aperiodic în raport cu produsele solide aflate în interstițiul activ. El are totdeauna tendința de stabilizare și nu poate fi întrerupt din această cauză. Oscilațiile și perturbările aperiodice trebuie să fie asociate cu alte fenomene, în primul rând cu existența în interstițiu a bulelor de gaz care, în condiții de staționare temperatură în interstițiu sau de reținere de lucru nepotrivit (timp de pauză aici la densități mari de curent și condiții dificile de evacuare) pot duce la descărcări în gaz mărește repetat, formând arcuri quasi-staționare cu efecte de coesificare.

CAPITOLUL 2

INTERDEPENDENȚA FACTORILOR ȘI PARAMETRIILOR CARE DETERMINĂ PROCEDELE DE GENERARE PRIN EROZIUNE ELECTRICĂ A PORNELOR SPATIALE

2.1. CATEGORII GENERALE DE FACTORI ȘI PARAMETRI LA PRELU- CAREA PRIN EROZIUNE ELECTRICĂ

În procesele de prelucrare prin eroziune electrică intervin multe mărimi variabile, interdependente, a căror calitate sau valoare la un moment dat pot fi exprimate prin diferiți factori și parametri. Legăturile care exprimă legăturile dintre acestea sînt numai parțial cunoscute, prelucrarea fiind rezultatul unui șir de fenomene complexe și interconectate. Dependențele și succesiunea efectelor determinante sînt dificil de selectat, dar sînd în vedere refacerea ciclică, sub acțiunea regulatorului automat de avans, a unei stări inițiale care să permită desfășurarea integrală a tuturor proceselor elementare și a acțiunilor lor integrate pentru generarea unei noi suprafețe la U_0 , se poate urmări în mod sistematic mecanismul intrării în acțiune a diferitelor fenomene, precum și rezultatele lor.

În procesul de eroziune electrică, așa cum se întîmplă la orice proces de transformare considerat sistemic, se disting trei mari categorii de factori : factori primari, de intrare, factori intermediari, de proces și factori finali, de ieșire.

Principalele categorii, după proveniență, desfășurare sau rezultat, care acționează în timpul de reproducere a suprafeței active la CP (fig.2.1) sînt :

a) Factori primari proveniți de la utilajul tehnologic

GI - parametri și impulsurilor electrice furnizate de generatorul de impulsuri ;

RI - caracteristici de instalare a CP și IT;

RA - parametri de reglare comandați la sistemul de avans automat și la generatorul de impulsuri;

RE - caracteristici programate rigid la echipamentul de circulație a mediului de lucru și cele de acționare suplimentară a electrotrodului de transfer;

b) Factori primari proveniți de la elementele spațiului de

lucru

OP - caracteristici de material ale obiectului prelucrării;

- I - caracteristicii geometrice ale interstițiului de lucru;
- ML - caracteristicii de material ale mediului de lucru;
- ET - caracteristicii de material ale electrozudului de transfer;
- c) Factori intermediari proveniți de la procesele din spațiul

de lucru;

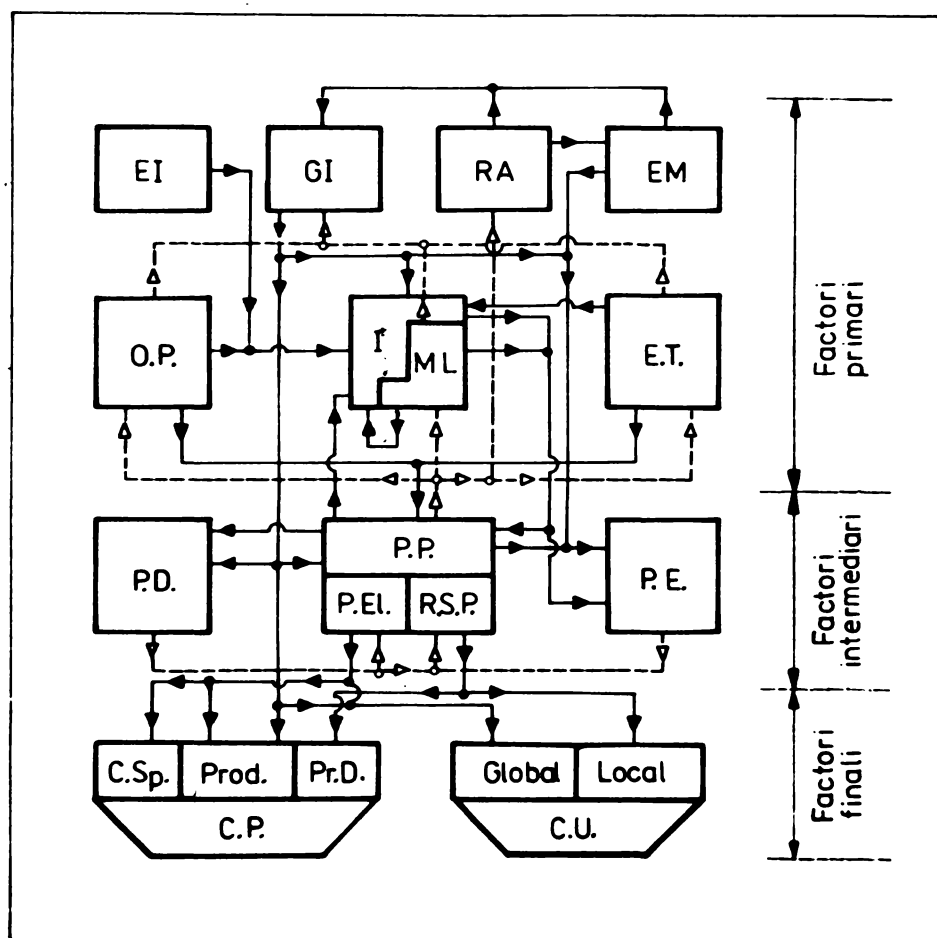


Fig.2.1.

PF - caracteristicii ale proceselor de prelevare și de așchuire, dintre care P.11 - provenite de la procesele elementare; S.P. - provenite din repartiția statistică, spațială temporală a proceselor elementare;

PI - caracteristicii ale proceselor de depunere;

PE - parametri ai proceselor de evacuare;

d) Factori finali, rezultati din procesul de eroziune electri-

ca

CP - caracteristicii de prelucrare, la CP, dintre care C.Sp. - calitatea suprafeței prelucrate, Prod. - productivitatea prelucrării, Pr.D. - precizia dimensională;

CU - caracteristicii de uzură a electrozudului de transfer, Global - raportate la întregul volum uzat din electrod, Local - raportate la repartizarea geometrică a uzurii pe corpul electrozudului.

Interdependențele integrale între categoriile de factori au fost marcate cu linii pline în cazul determinărilor directe și cu linii întrerupte în cazul reacțiilor inverse.

Legăturile sintetice marcate între categorii, în fig.2.1, reprezintă rezultatul unei analize detaliate a cercetărilor publicate în literatură de specialitate, precum și a celor proprii [14], [15], [17], [18], [19], [22], [25], [27], [29], [31], [32], [40-42], [49], [52], [56].

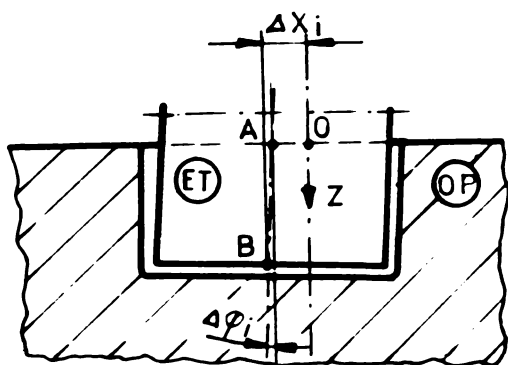


Fig.2.3.

raportată la axa nominală a piesei, la
surafață.

Erorile de instalare au repercursi-
uni asupra preciziei prelucrării prin
intermediul caracteristicilor geometrice
ale interstițiului activ pe care le asi-
metrizează în raport cu direcția avansu-
lui.

2.2.2. Parametri de reglare comandați

Fraza categoric de parametri comandați ai regiunii de pre-
lucrare sînt mărimile de referință programate pentru generatorul de
impulsuri, respectiv tensiunea de sarcină în gol, U_g , treapta de cu-
rent, I , durata impulsurilor de tensiune, t_g , timpul de pauză, t_p ,
sau factorul de umplere, τ , prin care se determină parametri îm-
pulsurilor electrice .

A două categorii de parametri primari de reglare comandați
sînt cei care se referă la sistemul automat de avans (sensibilitate,
viteză de reacție, stabilitatea) care, poziționînd electrodul
la distanța disruptivă determină timpul macroscopic activ de func-
ționare, cu influență directă asupra frecvenței impulsurilor de lu-
cru efective. Tot sistemul automat de avans influențează asupra mo-
dului cum se exercită caracteristicile rigide, MM , programate la
echipamentele mecanice de acționare suplimentară a electrocului :
vibrări, rotații, relaxări, mișcări planetare [68],[100],[112],[128]
[217-223], care la rîndul lor influențează asupra parametrilor elec-
trici ai impulsurilor precum și asupra proceselor de evacuare a pro-
duselor eroziunii din interstițiul de lucru. Asupra evacuării ac-
ționează și echipamentul de circulație și de păstrare a proprieta-
ților fizico-chimice ale mediului de lucru (presiunea și debitul
lichidului la circulația forțată, temperatura menținută de sistemul
de răcire etc.).

2.2.3. Parametri impulsurilor electrice

Funcționarea generatoarelor de impulsuri trebuie considerată,
la rîndul ei ca un sistem . Intrările sale sînt mărimile de reglare
și caracteristicile rigide programate la echipamente pentru acțio-
narea suplimentară a ET, separată de mișcarea de avans, precum și
reacția inversă a spațiului de lucru.

Parametri GI la ieșirea din generator se stabilesc din interacțiunea caracteristicilor sale funcționale cu elementele spațiului de lucru (compoziția chimică și constantele termofizice ale electrozilor, compoziția chimică și rigiditatea dielectrică a mediului de lucru), energia, forma și parametri de durată ai impulsurilor determină eficiența agentului eroziv în procesele elementare, iar frecvența de repetiție a acestora stabilește prin însușirea volunului total de proces ale eroziunii electrozilor și ale pirolizei dielectricului.

Polaritatea conectării este o mărime de intrare care, în mod obișnuit nu se schimbă în timpul unei treceri. Efectul de polaritate, influențat de frecvența [194], constantele termofizice ale materialelor [20],[21],[47],[51],[76],[84],[91],[99],[126],[177],[179],[181],[204],[214], forma și energia impulsurilor [82],[83],[137],[139],[140],[143], este caracterizat de coeficientul de polaritate, C_p , care, pentru o pereche de materiale electroconductoare se determină [150], din expresia :

$$C_p = \frac{V_{(-)}}{V_{(+)}} \cdot \frac{V_{K(-)}}{V_{K(+)}} = \frac{\gamma_{(-)}}{\gamma_{(+)}} \quad (2.1)$$

unde $\gamma_{(-)}$ este uzura relativă volunică la conectarea polului (+) pe piesă (la semnifica polaritate directă) iar $\gamma_{(+)}$ este uzura relativă volunică la conectarea polului (-) pe piesă (polaritate inversă).

Polaritatea conectării determină în principal repartiția energiei între cele trei elemente substanțiale ale spațiului de lucru : CF, IT și ML.

Tensiunea de mare în gol se transmite de la generator pe spațiul de lucru în timpul de impuls de tensiune, iar restul factorilor își determină interdependent valorile în funcție de mărimile reglate și elementele spațiului de lucru stabilind o anumită energie a impulsurilor. Puterea electrică introdusă în interstițiu este determinată de energia impulsurilor și de frecvența lor și nu poate fi comandată cu independență totală față de spațiul de lucru. În primul rând tensiunea medie în impuls este relativ independentă față de cea de mare în gol și față de intensitatea curentului. La 5 μ s după încercarea descărcării [32], tensiunea atinge o valoare practic constantă, notificându-se numai în limite unor oscilații mici și depinzând în special de polaritatea conectării, de caracteristicile ML și de natura materialului IT și CF [171]. La prelucrarea oțelului, de exemplu, [92], U_{Lod} variază între 22-25 V, în funcție de natura electrozilor

și a ML la polaritatea directă și între 31-33 V la polaritate inversă.

În al doilea rând, pentru ca momentul apariției impulsului de tensiune nu coincide cu cel al trecerii curentului prin spațiul de lucru, durata aplicării impulsului de tensiune va fi :

$$t_u = t_a + t_i \quad (2.2.)$$

unde t_i - durata impulsului de curent; t_a - timpul de amorsare, iar perioada, T , a impulsului este :

$$T = t_p + t_u = t_p + t_a + t_i \quad (2.3.)$$

unde t_p - timp de pauză în care este absentă pe interstițiu și tensiunea, este absent și curentul.

Energia fiind introdusă în spațiul de lucru în mod discontinuu, pentru a se evidenția timpul efectiv de acțiune s-a introdus o mărime convențională de calcul numită factor de umplere, τ și definită ca raport între durata impulsului de tensiune și perioada impulsului.

$$\tau = \frac{t_u}{T} = \frac{t_i + t_a}{T} \quad (2.4)$$

această se exprimă factorul de umplere în funcție de frecvență :

$$\tau = (t_i + t_a) f_i \quad (2.5)$$

se constată că el are o componentă efectivă $t_i f_i$ și una fictivă, $t_a f_i$, componente care nu se pot separa în proces. Timpul de amorsare are valori medii statistice dependente de spațiul de lucru și de tensiunea de mers în gol. Timpul de pauză este totdeauna mărimii conștate și este limitat inferior de timpul minim, t_{pm} , necesar pentru deionizarea spațiului străpuns de descărcarea anterioară și pentru refacerea rigidității dielectrice a intervalului. La o frecvență constantă, atunci când timpul de pauză are valoarea minimă t_{pm} , timpul de impuls are valoarea maximă t_{im} .

În ceea ce privește parametrii impulsurilor electrice va exista totdeauna o mărime care nu se poate controla decât statistic și care trebuie aleasă inițial de constructorul generatorului de impulsuri. Dacă se stabilește o frecvență fixă (perioadă constantă) [216], rezultă τ constant înă t_i variabil de la impuls la impuls funcție de componenta întâmplătoare a timpului de amorsare. Dacă se conștate durata impulsului de curent, t_i , constantă [219], rezultă în cazul aceluși timp de amorsare o perioadă T variabilă, deci o frecvență a impulsurilor necontrolată riguros.

Dacă se exprimă factorul de umplere în funcție de timpul de pauză se obține ecuația unei drepte [94], denumită înapoi "curbă" caracteristică :

$$\tau = \frac{t - t_p}{T} = 1 - \frac{t_p}{T} = 1 - t_p f_i \quad (2.6)$$

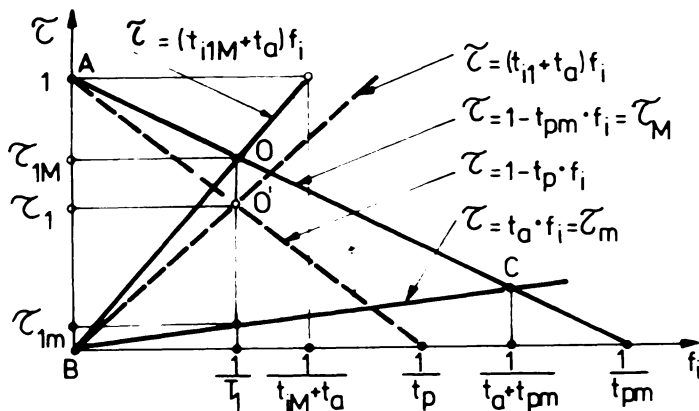


Fig. 2.4.

reapă $\tau = t_p \cdot f_i$ rezultată din relația (2.3) în care s-a luat $t_1 = t$, trece prin origine și corespunde valorilor minime τ_m ale factorului de umplere, respectiv limite sub care acesta nu poate coborî prin scăderea timpului de impuls întrucît este necesar și timpul de așteptare (s-a considerat, convențional, $t_p = ct$ pentru evidențierea procesului.

Acum se calculează abscise intersecției și se obține valoarea limită maximă, f_{1M} , a frecvenței la care, în condiții date de strălucire și de deionizare a mediului de lucru, nu mai pot apărea impulsuri de curent discrete.

$$f_{1M} = \frac{1}{t_a + t_{pm}} \quad (2.7)$$

Intervalul în care factorul de umplere îndeplinește condițiile de prelucrare este cuprins în suprafața triunghiului ABC. Dacă se consideră o frecvență $f_{11} = 1/T_1$, dată în acest domeniu, din punctul de vedere al productivității prelucrării, valorile optime ale coeficientului de umplere sînt cele care tind spre τ_{max} .

Productivitatea maximă se determină în anumite condiții de prelucrare în funcție de mărirea puterii medii, P_{med} introdusă în interstițiu [68]. Această putere se poate scrie dacă se neglijează timpul t_p , se consideră U_{med} constantă și se notează I_p - valoarea maximă a funcției $i(t)$ a curentului :

$$P_{med} = U_{med} \cdot I_{med} = U_{med} \cdot \frac{1}{T} \int_0^{t_i} i(t) dt = \quad (2.3)$$

$$= \tau U_{med} \cdot \frac{1}{t_1 + t_2} \int_0^{t_i} i(t) dt = U_{med} \cdot I_M \cdot K_{FI}$$

unde K_{FI} - un coeficient de formă avind expresia :

$$K_{FI} = \frac{I_{med}}{I_M} \quad (2.9)$$

și variind între $K_{FI} = 0,515$ în cazul impulsurilor sinusoidale și $K_{FI} = 1$ în cazul impulsurilor dreptunghiulare.

upă cum reiese din relațiile (2.3) și (2.9) puterea medie se poate ari prin creșterea amplitudinii I_M a curentului, a coeficientului de formă sau a factorului de umplere. Valorile maxime ale factorului de umplere pot fi păstrate numai în condițiile păstrării timpului de pauză minima t_{pm} care, fiind funcție de spațiul de lucru, crește în timpul prelucrării odată cu modificarea caracteristicilor acestuia. Cind are valori apropiate de μ crește productivitatea și arităiei descărcării ulterioare în vecinătatea celei anterioare cu formarea cea nămitelor, "cuiburi de descărcări" [90],[92], care favorizează procesele de depunere. Dacă se înrăutățesc condițiile de evacuare se schimbă caracteristicile mediului, t_{pm} poate crește, pauzele dispar și se loc descărcări prelungite care duc la coacșificarea Aceleași fenomen se întâmplă dacă se depășește o valoare critică a densității de putere introdusă în spațiul de lucru. Densitatea de putere se limitează practic prin limitele densității de curent, definită cu raport între intensitatea medie a curentului și aria suprafeței active, A_s (cm^2).

$$j = \frac{I_{med}}{A_s} \quad (A/cm^2) \quad (2.10)$$

Usual se acceptă $j = (2 + 10) A/cm^2$ [119], pînă la limita $j < 25 A/cm^2$ [174] ?

Forma impulsurilor influențează direct dinamica de dezvoltare a sursei termice în petele electrodice, foarte importantă fiind panta lor frontală [212]. Un front cu înclinașe mică [32],[92], permite o mai bună disipare a energiei prin conducție, caz favorabil pentru protecția electrodilor refractari, iar un efort abrupt duc la concentrări în timp ale energiei, caz favorabil pentru electrozi cu conductibilitate bună. Forma impulsului împreună cu valoarea tensiunii de mare în gol determină și valoarea t_g , indirect a lui t_1 , precum și grosimea medie a interstițiului.

2.3. Factori primari proveniti de la elementele spatiului de lucru

Elemente ale spatiului de lucru sînt considerate corpurile fizico-chimice care limitează sau ocupa acest spațiu : obiectul prelucrării, electrodul de transfer și mediul de lucru. O serie de caracteristici provin din geometria interstițiului în care se realizează eroziunea electrică (fig. 2.5).

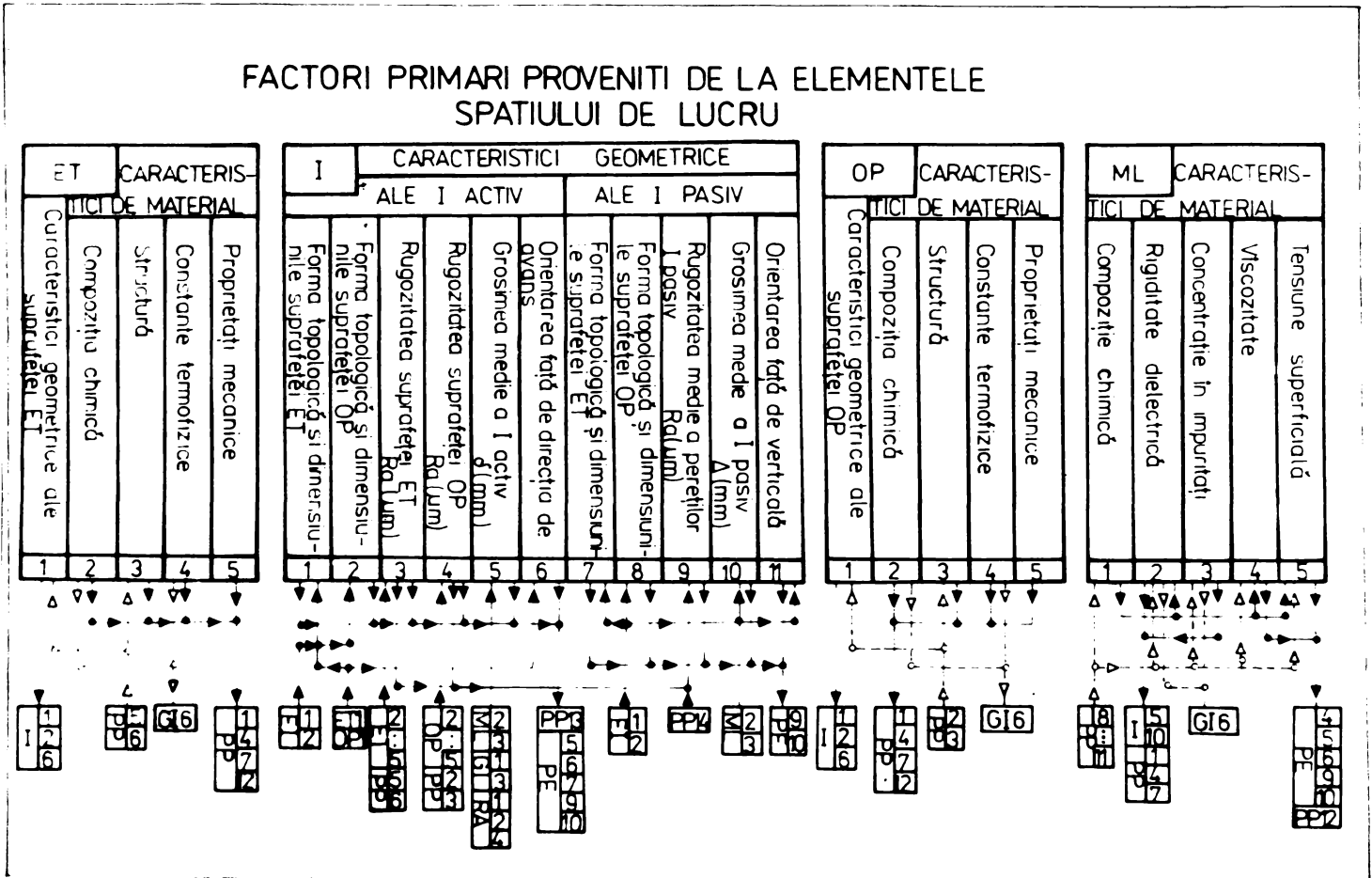


Fig. 2.5.

2.3.1. Caracteristici de material

Principalele caracteristici de material ale Cr și Sf care intervin în procesul eroziv sînt cele definitorii pentru natura, structura și pentru proprietățile termofizice și mecanice ale substanței de constituție. În raport cu regiul de lucru ele determină mărimea și forma craterelor de eroziune al căror rezultat este modificarea formei, dimensiunilor, rugozității și structurii suprafeței de suprafață.

Pe baza mecanismului eroziunii termice s-a încercat definirea și calculul unor criterii de determinare pe baza constantelor termofizice a rezistenței la eroziune electrică a materialelor. Încă din anul 1951 s-a propus de către Paletnik și Gutkin drept criteriu de clasificare din acest punct de vedere a materialelor timpul de

oasar încălzirii, sub acțiunea unui flux termic dat, a stratului de material de îndepărtat, până la temperatura de topire [88], [91].

Criteriul Palstaik, bază de plecare a tuturor teoriilor termice ulterioare, este definit prin relația :

$$\Pi = \lambda \cdot \epsilon \cdot \rho (T_f - T_0)^2 \quad (2.11)$$

Dacă se acceptă ipoteza că volumul de material îndepărtat este proporțional cu volumul de material topit, atunci valoarea numerică a acestui criteriu al transformării fazice este o măsură a rezistenței la eroziunea materialului. Pentru a compara din acest punct de vedere două materiale diferite s-a definit coeficientul stabilității termice, K_P

$$K_P = \frac{\lambda_1 \epsilon_1 \rho_1 (T_{f1} - T_0)^2}{\lambda_2 \epsilon_2 \rho_2 (T_{f2} - T_0)^2} = \frac{\Pi_1}{\Pi_2} \quad (2.12)$$

Pe baza acestui coeficient a fost stabilită, în funcție de un material etalon, o scară de rezistență la eroziune electrică a materialelor conductoare. Neconcordanțele dintre această clasificare și rezultatele experimentale a fost atribuită neglijării căldurii latente de topire. Lingerman [205], corectează criteriul Palstaik introducând în relația (2.12) în locul temperaturii T_f o valoare corectată, de calcul, pe care a denumit-o "temperatură redusă" de topire, T_f^* , și a calculat-o cu relația :

$$T_f^* = T_f + \frac{q_1}{\epsilon} \quad (2.13)$$

unde q_1 - căldura latentă de topire. Nici relațiile de calcul al volumului și adiacenții craterelor pe baza acestui criteriu nu concordă întrutotul cu rezultatele experimentale. Causa principală este, așa cum s-a văzut la cap.1.2, repartiția energiei care este determinată și de factori independenți de natura materialului, contribuția la prelevare a altor factori (eroziunea săfiind exclusiv termică) și, mai ales mecanismul expulsării care nu îndepărtează într-o proporție cunoscută metalul topit, o parte înseamnă resolidificându-se în crater.

Au fost încercate și alte relații pentru compararea materialelor din punctul de vedere al stabilității termice. Pentru a se ține cont și de regimul de prelucrare este necesar ca în aceste relații să intervină și condițiile de regim. Spre exemplu, se definește [93], coeficientul stabilității termice la echitect, K_{p1}

$$K_{p1} = \left| \frac{t_{11}}{t_{12}} \right| q_0 = \text{idem}; h = \text{idem} \quad (2.14)$$

unde t_{11} , t_{12} reprezintă timpii de încălzire în condiții de flux termic constant și egal la prelucrarea ambelor materiale, q_0 - valoarea acestui flux, iar $h = h_1 = h_2$ - adâncimea craterelor egală în ambele materiale comparate. Dacă se consideră că timpul t_1 respectiv t_2 , este format din timpul de antetopire, t_{at} , necesar ca sub acțiunea fluxului termic q_0 metalul să fie încălzit până la topire pe adâncimea h și din timpul de topire efectivă, t_g , în care același flux termic ar fi utilizat pentru topirea propriu-zisă a materialului, atunci

$$t_1 = t_{at} + t_g \quad (2.15)$$

care introdusă în (2.14) va da :

$$K_{p1} = \frac{t_{at1} + t_{g1}}{t_{at2} + t_{g2}} = \frac{t_{at1}}{t_{at2}} \cdot \frac{1 + \gamma_1}{1 + \gamma_2} \cdot \frac{\pi_1}{\pi_2} \cdot \frac{1 + \gamma_1}{1 + \gamma_2} \quad (2.16)$$

în care $\gamma_1 = t_{g1}/t_{at1}$ și $\gamma_2 = t_{g2}/t_{at2}$ sînt mărimi dependente de q și h și pot fi calculate în funcție de puterea sursei termice și de constantele termofizice.

Dacă se schimbă condițiile de definiție se poate calcula un coeficient de prelucrabilitate, K_{ph} .

$$K_{ph} = \left| \frac{h_1}{h_2} \right| q_0 = \text{idem}; t_1 = \text{idem} \quad (2.17)$$

h_1 - adâncimea craterului în materialul 1; h_2 - adâncimea craterului în materialul 2, realizate în același timp, t_1 , și sub acțiunea aceluiași flux termic, q_0 . La rapoarte γ_1 și γ_2 mari, deci la timpii mari și la fluxuri termice mari, coeficientul de prelucrabilitate devine inversul celui de stabilitate.

Cu toate aceste încercări, pînă în prezent nu s-a putut identifica o sursă unică, universală, de stabilitate la eroziune electrică a materialelor; diferitele criterii avînd numai valoare orientativă, în condițiile în care factorii de proces au influență esențială.

Mediul de lucru îl formează lichidul dielectric impurificat cu produsele eroziunii. Lichidul determină localizarea energiei și concentrarea ei într-un canal îngust asigurînd densitatea de putere necesară procesului de eroziune. Mediul lichid mai asigură captarea și transportul în afara interstițialului a cîșecului de prelucrare transformat în mici particule solide.

Multe rețete de lichide dielectrice speciale îmbunătățesc comportarea mediului de lucru în procesul de eroziune, fie printr-o vâscozitate și tensiune superficială favorabile pentru funcția de transport a particulelor erodate, fie prin modificarea proprietăților dielectrice care influențează caracteristicile descărcărilor. De că de exemplu [49], kerocenul cu 2-20% suspensii de granulație micronică din oxizi de calciu, cupru, aluminiu, nichel, franciu sau 20% fluoruri de calciu care prin apariția în celoare descărcării a unor ioni negativi leneși determină recombinarea ionilor pozitivi și micșorarea componentei pozitive a curentului, având drept rezultat o bună protecție a catodului la polaritatea directă.

Printre parametri mediului de lucru în schema din fig.2.5 s-au luat în considerare numai cei care sînt implicați direct în procesele de eroziune, respectiv rigiditatea dielectrică și concentrația în impurități care influențează dimensiunile interstițiului, repartitia energiei între elementele spațiului de lucru și tensiunea medie pe spațiul de lucru în timpul impulsului de curent. S-au mai considerat caracteristicile care determină proprietățile de transport și evacuare a produselor eroziunii. Nu s-au avut în vedere aici alte caracteristici care trebuiesc luate în seamă la analiza tehnico-economică pentru alegerea lichidului de lucru : temperaturile de solidificare (saponificare), de aprindere, de fierbere, conținutul în substanțe odorizante, masă specifică, corozivitatea, toxicitatea, disponibilitatea, prețul de cost, etc. [51], [174], [224].

În partea proceselor elementare de prelevare și de piroliză mediul de lucru primește reacția inversă a procesului prin care aceasta îi schimbă caracteristicile inițiale, fiind necesare circularea și reînprospătarea lui în tot timpul prelucrării.

2.3.2. Caracteristici geometrice

Geometria spațiului de lucru efectiv este determinată de suprafețele în interacțiune ale obiectului de prelucrat cu electrodul de transfer și de distanța dintre ele, permanent restabilite de reacția externă. Se formează în acest mediu spațiul de lucru macroscopic, cunoscut sub denumirea de interstițiu în care se află mediul de lucru și la orice stadiu al prelucrării este constituit din două părți distincte :

- un interstițiu activ definit ca spațiu marginit de suprafețele active ale CR și ET, suprafețe care reprezintă suportul lizotref, macroscopic, pe care-l parcurge agentul eroziv în procesul de migrare al spațiului de lucru microscopic în timpul generării prin

eroziune electrică a formei spațiale prelucrate;

- un interstițiu pasiv, definit ca spațiu mărginit de suprafețe CP și FT constituite din elemente finale ale formei spațiale generate prin eroziune, respectiv din elemente de suprafață ale electrodului care delimitează restrictiv spațiul de deplasare a agentului eroziv. Interstițiul pasiv influențează procesul integral determinând unele caracteristici ale mediului de lucru precum și unele procese secundare de evacuare a produselor eroziunii.

Caracteristicile geometrice ale interstițiului se generează treptat în procesul de prelucrare în funcție de regimul de lucru, forma topologică și dimensiunile suprafețelor conjugate, poziționarea lor reciprocă și orientarea față de direcția de avans [15],[17],[18],[40],[41],[67],[127],[145],[146],[157],[161].

Dimensiunile reale ale interstițiului au influență determinată asupra proceselor de generare a formelor spațiale. Aria sa mijlocie, $A_{med.1}$, cuprinsă între suprafețele OP și FT depinde de configurația formei de prelucrat și variază odată cu acestea de la mărimea suprafețelor active inițiale până la cea a suprafețelor totale, active și pasive, finale. Grosimea δ a interstițiului este însă o mărime nestabilă în tot timpul prelucrării. Așa cum s-a dovedit în [14], grosimea interstițiului intervine în distribuția geometrică a efectului eroziv ducând la modificarea formei. Pe de altă parte această grosime influențează direct și precizia prelucrării prin corecția ce trebuie introdusă în proiectarea dimensiunilor electrodilor [216 și 223].

În punctul de vedere al preciziei prelucrării se iau în considerare două valori convenționale ale grosimii interstițiului :

- interstițiu frontal, de grosime δ , considerat între suprafețele active, în axa electrodului, pe direcția avansului;
- interstițiu lateral de grosime δ_q , considerat între suprafețele pasive verticale, în plan perpendicular pe direcția avansului.

Pentru înțelegerea proceselor ce se desfășoară în spațiul de lucru pot fi definite mai multe dimensiuni ale interstițiului frontal (fig.2.6):

- interstițiu nominal, δ , - distanța dintre linia mijlocie a profilului FT și cea a profilului CP ;
- interstițiu geometric, δ_q , - distanța între liniile exterioare ale profilului FT și CP; Interstițiu nominal este totdeauna mai mare decât interstițiu geometric, iar diferența dintre ele

depinde de energia descărcărilor (de adâncimea craterelor) și de constantele termofizice ale materialelor.

$$\delta = \delta_g + |Y_{max} + |IT + |Y_{max} + |OP \quad (2.18)$$

unde $Y_{max} +$ este diferența dintre linia exterioară și cea mijlocie a suprafețelor IT, respectiv OP.

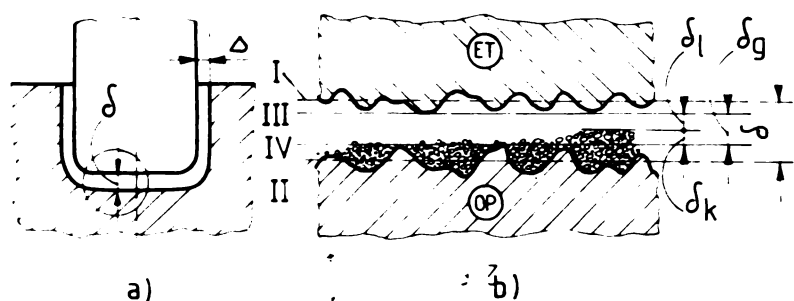


Fig. 2.6.

- interstițiul de lucru, δ_l - distanța între linia exterioară a IT și linia exterioară de contact a OP pe care o definim ca linie paralelă cu cea mijlocie a profilului IT și tangentă la cea mai depărtată particulă solidă conductoare

în contact cu OP. În absența aglomerărilor de particule $\delta_l = \delta_g +$

- interstițiul de scurtcircuit, δ_k - distanța între linia exterioară și linia exterioară de contact ale OP. În absența aglomerărilor $\delta_k = 0$. În cazul general :

$$\delta_k = \delta_g - \delta_l \quad (2.19)$$

În cauza anizotropiei proprietăților mediului de lucru și a neuniformității câmpului electric, descărcarea electrică în iapula nu va avea loc totdeauna acolo unde interstițiul de lucru are grosime minimă. În consecință se poate defini și un interstițiu electric [70], de grosime δ_e :

$$\delta_e = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_{e1}}{n} \quad (2.20)$$

unde δ_{e1} - grosimea interstițiului electric instantaneu, definit ca distanța între două puncte aparținând IT respectiv OP care la un moment considerat are rigiditatea dielectrică cea mai mică; n - numărul descărcărilor succesive. Cu oit neomogenitatea dielectricului este mai mare cu atât probabilitatea de coincidență a interstițiului electric instantaneu cu interstițiul de lucru este mai mică.

2.4. Factori intermediari proveniți de la procesele din spațiul de lucru

2.4.1. Categori de parametri ai proceselor din spațiul de lucru

Așa cum s-a arătat în capitolul 1 arziunea electrică este rezultatul însumării proceselor elementare de prelevare și mărunțire

$$W_2 = \eta (W_{1P} + W_{1E} + W_{1L}) \quad (2.21)$$

W_{1P} - energia primită de obiectul prelucrării

W_{1E} - energia primită de electrodul de transfer

W_{1L} - energia primită de mediul de lucru.

Aceste energii stau la baza desfășurării proceselor elementare de prelevare, înrunchire, depunere (policularizare) și a celor de evacuare și determină volumul materialului prelevat din piasă și din electrod și dințimea medie a craterelor, cantitatea de deșeură solidă expulsată în interstițiu precum și volumul produselor pirolizei dielectricului. Ieșirea particulelor solide determină unele caracteristici de prelucrare și uzură având drept rezultat schimbarea geometriei interstițiului și a formei CP și FT.

Elementele geometrice ale interstițiului și parametri impulsurilor electrice determină repartiție neregulată spațial-temporală a numărului de descărcări.

$$n_{loc} = \frac{N_{xy}}{\Delta X \cdot \Delta Y} \quad (\text{imp./mm}^2) \quad (2.22)$$

unde N_{xy} - numărul de descărcări care au loc pe suprafața a cărei proiecție în planul normal pe direcția de uzură are dimensiunea $\Delta A_y = \Delta X \cdot \Delta Y$. Dacă se consideră repartizarea impulsurilor n_{xy} pe categorii se pot defini în mod similar densități medii locale relative. Spre exemplu densitatea medie locală n_{PM} a impulsurilor de înrunchire va fi :

$$n_{PM} = \frac{N_{PM}(PM)}{\Delta X \cdot \Delta Y} \cdot loc \quad (\text{imp./mm}^2) \quad (2.23)$$

la fel pot fi definite densitatea relativă medie locală a impulsurilor în scurtcircuit, n_{SC} , a impulsurilor fictive n_f , a impulsurilor de mare în gol n_g și a impulsurilor în gaze, n_g .

Funcția de spațiu și de timp a acestor mărimi nu poate fi cunoscută în procesul de prelucrare. Experimental [30], [68], [170], ea poate fi estimată pentru cazuri particulare.

Mărimile statistice determină direct atât valorile globale cât și cele locale ale caracteristicilor tehnologice de prelucrare și de uzură precum și stabilitatea sistemului de uzură, la anumite valori critice ale acestor densități putând apărea fenomenul perturbat de oscilații și de oscilare.

Procesele de depunere, caracterizate prin volumul, grosimea medie, compoziția chimică, structură, caracteristici fizico-chimice

și localizarea parțială a stăutului depun, alut determinate de caracteristicile descărcărilor electrice de repartizarea lor statistică și de existența în spațiul de lucru a produselor eroziunii. La rândul lor, prin reacție inversă, procesele de depunere influențează prin compensare materială pe cale de prelevare și uzare, cu efecte asupra geometriei interstițiului și asupra microgeometriei suprafețelor preluate.

2.4.3. Factori intermediari proveniți de la procesele de evacuare

Lebitul de furnare, Q_p , a saui de deșeu solid în interstițiu, D_{sol} , provine din produsele eroziunii expulzate din crater în interstițiu peste ajunge pînă la $15.000 \text{ m}^3/\text{min}$ [52], [91], și este funcție de volumul mediu de deșeu solid rezultat la anul din procesele elementare de eroziune și de frecvența acestora.

Granulația medie, exprimată prin diametrul mediu d_m al particulelor solide depinde de energia și densitatea locală a descărcărilor. —a stabilit, [52], că la particule mai mari de $5 \mu\text{m}$, diametrul mediu depinde exponențial de energia impulsurilor :

$$d_m = C_1 \cdot W_1^{1/3} \quad (2.24)$$

La granulații mai mici de $5 \mu\text{m}$ se schimbă întrucîtva curba de repartitie a granulației, deplasîndu-se medie înagre valori mai mari, care nu se sosit însă de la legea (2.24) cu mai mult de 3-15%.

Granulația materialului expulzat primar este însă modificată prin mărunțire. După expulzare granulele se repartizează gravimetric în jurul craterului de proveniență, într-o dispunere asimetrică, eliptic-stelată și într-o repartitie granulometrică a cărei fracțiune de bază depinde de lungimea parcursului particulei expulzate și crește cu distanța față de crater și cu energia impulsurilor.

Transportul deșeurilor solide se face sub acțiunea efectului "de piston" dat de extinderea bulilor gazeose în interstițiul frontal și de scoaterea unui anumit debit de lichid prin interstițiul lateral, față urmată de intrarea ulterioară a lichidului atînci cînd interstițiul se depresurizează. Energia impulsurilor determină presiunea și viteza undelor de șoc care se propagă în spațiul de lucru precum și lungimea de transport a particulelor și, împreună cu frecvența impulsurilor determină debitale de furnare și de evacuare a deșeurilor gazeose și solide din medial de lucru. Se remarcă că în afara de bulile-gazeose formate în calea descărcării mai apar și bule de fierbere intensivă după terminarea impulsului de curent

la revenirea lichidului pe suprafețele fierbinți ale fostelor surse termice. Timpul de răcire completă a zonei este relativ lung, între 0,05 - 0,1 sec. [87].

Faza gazoasă este antrenată de undele de lichid antrenat în mișcare de descărcările ulterioare, îndeplinind funcția principală de transport a particulelor solide.

Problema timpului de viteză de curgere printr-un interstițiu curbiliniu, determinat de surse de precizie migratoare în timp și în spațiu este foarte dificil de rezolvat. Cu toate acestea studiul repartiției proceselor elementare în spațiu și a succesiunii lor a permis evaluarea statistică a distanțelor între descărcările succesive și deducerea unor legități de deplasare a particulelor [74], [91], și calculul valorii t_T a timpului mediu de evacuare a particulei din interstițiul activ, timp numit în [52], "durată de răcire".

$$t_T = R_T \frac{A_0 - R_T}{f_1 \cdot l_m} \quad (2,25)$$

unde R_T - rata de evacuare a particulei, calculată în funcție de sarcina suprafeței active și de distanța minimă față de perimetrul acesteia de la locul inițial al particulei; A_0 - aria transversală a suprafeței active; f_1 - frecvența impulsurilor și l_m - lungimea medie a parcursului liber al particulelor, care este funcție de energia impulsurilor. Durata de stagnare a particulelor în interstițiu scade cu creșterea frecvenței și energiei descărcărilor. La valori mari ale f_1 și A_0 este favorizată localizarea descărcărilor și succesiunea lor "în cuib" precum și migrarea anionilor în interstițiu, ceea ce face ca traiectoriile de evacuare să capete caracter direcțional. Efectul de grupare a descărcărilor scade cu creșterea dimensiunilor de prelucrare, anulând orientarea relativă a traiectoriilor de mișcare. La anumite valori critice ale diametrelor, ale dimensiunii de prelucrare și ale energiei impulsurilor crește temperatura medie a suprafețelor active, crește partea componentei gazoase în interstițiu, fierberea cu bule a lichidului trece în fierbere totală, cu peliculă; procesul se costurbează, apare coagulară și eroziune electrică practic încetează.

2.5. Factori finali - caracteristicii tehnologice ale prelucrării prin eroziune electrică

Principali factori și parametri care exprimă calitativ și cantitativ rezultatele transformării tehnologice de prelucrare dimensională cu îndepărtare de material prin eroziune electrică sînt

prezentată în schema din (fig.2.8).

O parte din acești factori care se definesc în principal cu măriri determinate prin măsurători asupra obiectului prelucrării sînt considerați caracteristici de prelucrare, iar altă parte care se definesc în principal cu măriri determinate prin măsurători asupra electrodului de transfer se consideră caracteristici de uzare.

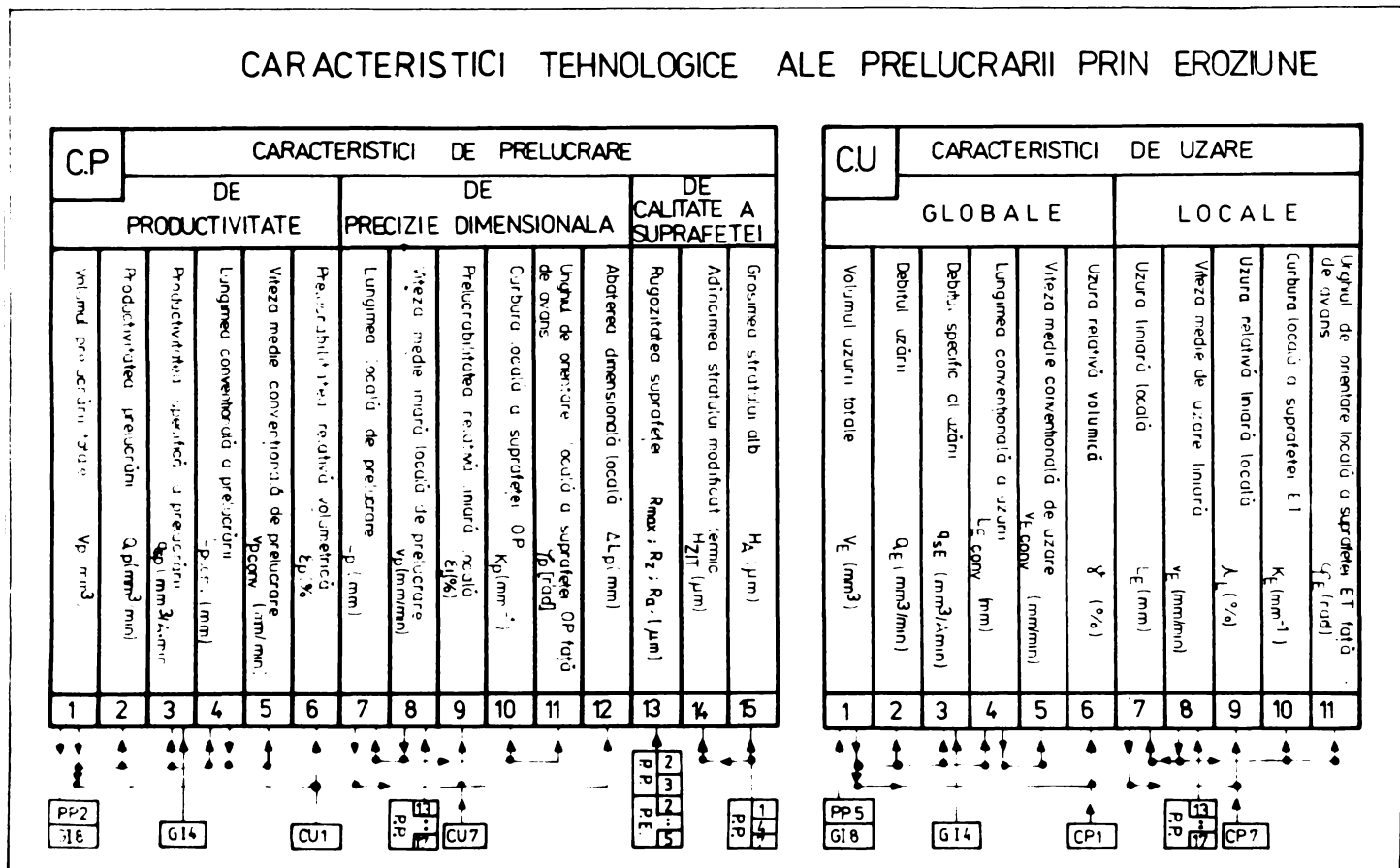


Fig.2.8.

Încadrarea sistemică a caracteristicilor tehnologice ale prelucrării prin eroziune electrică întâmpină dificultăți datorită complexității proceselor care permite definirea unor factori pentru a ilustra cel puțin parțial conceptele generale de productivitate, precizie dimensională, calitate a suprafeței și uzură a sculei. Unii factori sînt unanim acceptați și definiți, alții au circulație locală și relații de definiție care diferă de la o școală de cercetare la alta, uneori de la cercetător la cercetător. Din analiza criteriilor universal acceptate [22], [23], [38], [85], [91], [150] și încercările din nou [13], [119], [120], [121], [123], [128], [145], [148] de ordonare științifică a celor controversate precum și de definire a altora noi, se consideră că cele mai importante măriri pentru estimarea caracteristicilor tehnologice la prelucrarea prin eroziune electrică sînt:

2.5.1. Caracteristicii globale de productivitate

- Volumul prelevării totale, V_p , mărime absolută, determinată de volumul mediu al craterelor elementare, de frecvența impulsurilor și de timpul de prelucrare. Practic, volumul global al prelevării se determină prin cântărire.

$$V_p = v_{ip} \cdot f_p \cdot t = \frac{M_{P1} - M_{P2}}{\rho_p} \quad (\text{mm}^3) \quad (2.26)$$

unde v_{ip} - volumul de material îndepărtat la un impuls; f_p - frecvența impulsurilor de prelevare; t - timpul prelucrării; M_{P1} , M_{P2} - mase piesei înainte, respectiv după prelucrare; ρ_p - densitatea materialului piesei.

- Productivitatea prelucrării (debitul prelevării), Q_p , care măsoară volumul de material îndepărtat din piesă în unitatea de timp și este caracteristica tehnologică de bază pentru evaluarea cantitativă a prelucrării.

$$Q_p = v_{ip} \cdot f_p = \frac{V_p}{t} \quad (\text{mm}^3/\text{min}) \quad (2.27)$$

- Productivitatea specifică a prelucrării, q_{sp} , care caracterizează din punct de vedere tehnico-economic prelucrarea. Valoarea ei este o măsură a eficacității prelucrării, referitoare la consumul de energie și la timpul de mașină.

$$q_{sp} = \frac{Q_p}{I_{med}} \quad (\text{mm}^3/\text{A} \cdot \text{min}) \quad (2.28)$$

unde I_{med} - valoarea medie a intensității curentului de lucru.

- Lungimea convențională de prelucrare, L_{pconv} , mărime globală de calcul care exprimă adâncimea medie de prelevare în direcția de avans.

$$L_{pconv} = \frac{V_p}{A_{tp}} \quad (\text{mm}) \quad (2.29)$$

unde A_{tp} - aria secțiunii transversale medii a cavității prelucrate.

- Viteza medie convențională de prelucrare, v_{pconv} .

$$v_{pconv} = \frac{L_{pconv}}{t} = \frac{V_p}{A_{tp} \cdot t} \quad (\text{mm}/\text{min}) \quad (2.30)$$

- Coeficient de prelucrabilitate relativă volumică, ϵ_p , mărimea relativă globală care măsoară procentual cantitatea de material prelucrat din piesă la unitatea de volum usat din electrod.

$$\epsilon_p = \frac{V_p}{V_E} = \frac{Q_p}{I_{med}} \quad (2.31)$$

Se reamarcă faptul că această mărime relativă este utilizată de obicei procentual $\varepsilon_p(\%) = \varepsilon_p \cdot 100$ și poate fi considerată și ca o caracteristică tehnologică de uzare, fiind și o măsură a comportării la eroziune a electrodului [5], [18], [148], [183].

2.5.2. Caracteristici de precizie dimensională

Precizia dimensională la eroziunea electrică cu copierea formei este determinată de caracteristicile locale de prelevare, în strinsă interdependență cu cele de uzare, privind realizarea inițială și menținerea în timpul prelucrării a formei electrodului de transfer, respectiv stocarea inițială la suprafața acestuia a informației dimensionale, macro și microgeometrice și realizarea cineticii de generare prin avans, cu o anumită precizie, a formelor succesive ale ET-OP. Gradul de conservare a informației dimensionale inițiale la ET și transferul ei cu anumite pierderi la CP, poate fi evaluat după prelevare sau într-o fază intermediară a ei prin caracteristicile locale de prelucrare.

Dacă se consideră un sistem de axe de coordonate, cu ordonata pe direcția avansului și cu abscisa în planul normal (fig. 2.9) și un punct cercetare M pe suprafața prelucrată, atunci față de acesta pot fi definite următoarele mărimi care caracterizează precizia prelucrării.

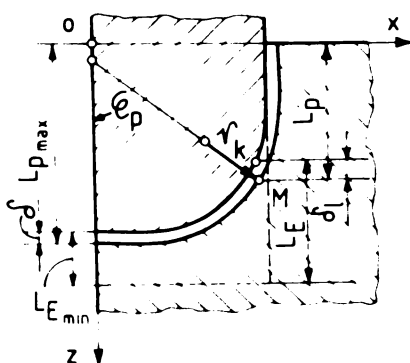


Fig. 2.9.

$$v_p = \frac{L_p}{t} \quad (\text{mm/min}) \quad (2.32)$$

- Lungimea locală de prelucrare, L_p reprezentată în direcția avansului de distanța între punctul de pe suprafață considerat și planul frontal de intrare a electrodului.

- Viteza medie liniară locală de prelucrare v_p , care determină realizarea în timp a lungimii L_p .

- Coeficientul de prelucrabilitate relativă liniară locală, ε_L , care măsoară lungimea prelucrată în direcția avansului din piesă în timpul uzării unității de lungime colineară din electrod.

$$\varepsilon_L = \frac{L_p}{L_T} \quad (2.33)$$

Utilizată procentual această mărime este denumită prelucrabilitate relativă liniară $\varepsilon_L(\%) = \varepsilon_L \cdot 100$.

- Curvura locală, k_p a suprafeței OP caracterizată de raza de curbură R_{kp} .

$$L_p = \frac{1}{R_{KP}} \quad (\text{mm}^{-1}) \quad (2.34)$$

- Orientarea locală a suprafeței, caracterizată prin unghiul φ_p format între direcția evanșului și cea a răsii de curburi.

- Abateră dimensională locală, ΔL_p , măsurabilă la sfârșitul prelucrării.

$$\Delta L_p = L_p - L_{pg} \quad (\text{mm}) \quad (2.35)$$

unde L_{pg} - lungimea locală nominală de prelucrare. Pentru fiecare caz se pot defini direcții de prelucrare critice pe care se dezvoltă abateri dimensionale maxime. Când ΔL_{pmax} devine mai mare decît abateră tolerată este necesară schimbarea electrozului de transfer.

2.5.3. Caracteristici de calitate a suprafeței prelucrate prin eroziune electrică

Prin extinderea noțiunii de calitate a suprafeței de la prelucrările convenționale și în cazul eroziunii electrice trebuie luate în considerare cele două aspecte fundamentale care condiționează funcțional suprafețele prelucrate: aspectul geometric și aspectul fizic al structurii și proprietăților straturii de material din imediata vecinătate a suprafeței.

La punct de vedere geometric eroziunea electrică prezintă caracteristicile generale ale prelucrării cu îndepărtare de material la care abaterile suprafeței reale (suprafața limită de separație între corpul prelucrat și mediul exterior) față de suprafața nominală se consideră în funcție de pasul de repetiție ca abateri macrogeometrice cînd se pasul egal cu lungimea de contur și abateri microgeometrice cînd se pas relativ mai mic.

La prelucrare prin eroziune electrică cu copierea forței abaterile macrogeometrice sînt mult mai complexe față de alte prelucrări dimensionale, peste cele provenite din metodele de confecționare a electrozilor suprapunîndu-se și cele generate de repartiția neuniformă a uzurii. Macrogeometria prelucrării este descrisă de ansamblul caracteristicilor locale.

Mughitatea suprafețelor prelucrate prin eroziune se definește ca și la aşchiere prin totalitatea microirregularităților observate pe lungimea unei porțiuni alese drept lungime de bază pentru măsurare. Utilizînd aparatul pentru măsurarea rugozității suprafețelor aşchiate se aplică și la eroziunea electrică în mod frecvent criteriile R_g (înălțimea medie a microirregularităților) și R_q (abateră medie aritmetică a profilului) și R_{max} (înălțimea maximă a

asperităților).

Forma microreliefului provenit din suprapunerea craterelor succesive de eroziune, datorită dispunerii neregulate a acestora, face ca mărimile caracteristice R_{max} , R_a și R_q să nu depindă de direcția de măsurare. Cu toate că raportul de umplere al suprafeței (între aria nominală și cea reală este la eroziune cuprins între 0,46 + 0,49, [91], comparabil cu cel de la aşchiere, cuprins între 0,4 + 0,6, gradul de neomogenitate dimensională a micronegularităților la eroziune este de 2,5 + 7 ori, [81], mai mare decât la prelucrările prin aşchiere.

Între cele trei criterii mai adecvat pentru eroziune este R_{max} , care permite alegerea optimă a adăcurilor de prelucrare la regimurile succesive, pe principiul că aceste adăcuri trebuie să permită înlăturarea completă a asperităților provenite din prelucrarea anterioară. Raportul dintre R_{max} și R_a depinde de regim astfel încât [174], [219], la regimuri fine, până la $R_a = 1 \mu m$, $R_{max} = 3 R_a$, la regimuri de trecere $1 < R_a < 6 \mu m$ $R_{max} = 4 R_a$, iar la degroșări $R_{max} = 6 R_a$.

Microgeometria suprafeței prelucrate depinde, prin intermediul proceselor de prelevare și depunere de caracteristicile electrice (în principal de energia descărcărilor) ale regimului de prelucrare, de proprietățile elementelor spațiului de lucru și de repartiția energiei între acestea. Dependența preponderantă a înălțimii microreliefului de energia impulsurilor a permis determinarea unor relații empirice de calcul al criteriilor de rugozitate [27], [78], [81], [91]. După [91], se calculează :

$$R_{max} = C_H P_1^p = C_H \left(\frac{P_{med}}{f} \right)^p = C_H \left(\frac{U_{med} \cdot I_{med}}{f} \right)^p \quad (2.56)$$

unde C_H (micrometru/Joule) și exponentul p sînt funcții de material; P_{med} - puterea medie într-două în spațiul de lucru; f - frecvența impulsurilor.

Între impulsuri dependente după [27]:

$$(R_q)^3 = a U C \quad (2.57)$$

unde a - factor de material; U - tensiunea de străpungere; C - capacitatea circuitului de relaxare.

Alte caracteristici pentru calitatea suprafeței sînt cele legate de structura tipică la eroziunea electrică a stratului de material de adincime H (fig.2.10) format din două părți distincte :

- un strat alb, de adincime H_1 , constituit în majoritate din

materialul de bază, topit dar neexpulzat de pe suprafață și resolidificat după ce în faza lichidă au difuzat elemente provenite din materialul electrodului, din produsele de decompunere ale mediului de lucru și din compuși rezultați prin procese chimice în celula descărcării (mai ales carburi metalice) [33], [34], [113], [124], [125].

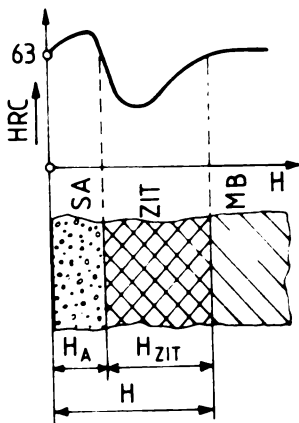


Fig. 2.10.

- un substrat, de adâncime H_{ZIT} format din metalul de bază a cărui structură a fost modificată prin transformări în stare solidă (zonă modificată termic);

În figura nr. 2.10 se prezintă după [174], variația durității în stratul de suprafață al unui oțel călit la 63 HRC, prelucrat prin eroziune electrică. Se vede că duritatea crește în zona stratului alb și scade în ZIT datorită decompunerii sub influența cimpului termic a constituenților de călire anterioră.

2.5.4. Caracteristici de uzare globală

- Volumul uzării totale, V_E , determinat de volumul elementar mediu, v_{1E} , uzat din electrod la fiecare descărcare și de frecvența impulsurilor de prelevare, f_p respectiv de mărunțire f_M .

$$V_E = v_{1E}(f_p + f_M) \cdot t = \frac{M_{K1} - M_{K2}}{\rho_E} \quad (\text{mm}^3) \quad (2.38)$$

unde M_{K1} , M_{K2} - masa electrodului înainte, respectiv după prelucrare ; ρ_E - densitatea materialului Ft.

- Debitul uzării Q_E , care măsoară volumul de material uzat din electrod în unitatea de timp.

$$Q_E = v_{1E}(f_p + f_M) = \frac{V_E}{t} \quad (\text{mm}^3/\text{min}) \quad (2.39)$$

- Debitul specific al uzării, q_E , egal cu volumul de material uzat din electrod în unitatea de timp sub acțiunea unui curent de 1 A.

$$q_E = \frac{Q_E}{I_{med}} \quad (\text{mm}^3/\text{A} \cdot \text{min}) \quad (2.40)$$

- Lungimea convențională de uzare, L_{conv} , mărime de calcul a scurtării medii a electrodului în timpul prelucrării.

$$L_{conv} = \frac{V_E}{A_E} \quad (\text{mm}) \quad (2.41)$$

- Viteza convențională de uzură, v_{Hocuz} :

$$v_{\text{Hocuz}} = \frac{L_{\text{Hocuz}}}{t} = \frac{L}{t_p} \quad (\text{mm/min}) \quad (2.42)$$

- Coeficient de uzură relativă volumică, γ , mărime relativă globală care măsoară volumul de material uzat din electrod la prelucrarea unității de volum din piesă,

$$\gamma = \frac{V_H}{V_P} = \frac{L}{L_P} \quad (2.43)$$

În mod obișnuit și această caracteristică este utilizată sub formă procentuală sub denumirea de uzură relativă volumică,

$$\gamma(\%) = \gamma \cdot 100.$$

2.5.5. Caracteristici de uzură locală

Interdependent cu mărimile locale care măsoară transformările dimensionale la GF și determină precizia prelucrării, se identifică mărimea corespunzătoare de uzură care duce la modificarea dimensiunilor ET.

- Uzura liniară locală (lungimea liniară locală de uzură), L_L , care reprezintă scurtarea liniară, în direcția de avans a electrodului într-un punct corectare de pe suprafața acestuia.

- Viteza medie de uzură liniară locală, v_L ,

$$v_L = \frac{L_L}{t} \quad (\text{mm/min}) \quad (2.44)$$

Mărime caracteristică pentru dinamica de degenerare a suprafeței ET. Distribuția spațială a câmpului de viteze v_L determină repartiția neuniformă a uzurii.

- Coeficientul de uzură relativă liniară locală, λ_L :

$$\lambda_L = \frac{L_L}{L_P} = \frac{v_L}{v_P} \quad (2.45)$$

care poate fi utilizat procentual sub denumirea de uzură relativă liniară locală, $\lambda_L(\%) = \lambda_L \cdot 100$.

- Curbura locală a suprafeței ET, K_L ,

$$K_L = \frac{1}{R_{KE}} \quad (\text{mm}^{-1}) \quad (2.46)$$

unde R_{KE} - curbura elementului local de suprafață în planul de avans, mărime ce poate fi considerată în orice punct al suprafeței ET și în orice moment al prelucrării.

- Orientarea locală a suprafeței ET, caracterizată prin unghiul φ_L format între normala locală a suprafeței și direcția de avans a electrodului.

CAPITOLUL 3

STUDII SI CERCETARI ASUPRA DINAMICII DE GENERARE A SUPRAFETELOR, PRIN LECTIONE ELECTRICA

3.1. Mecanismul apariției suprafeței la copierea formei

Generarea suprafețelor la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei se realizează prin îndepărtarea succesivă a unor straturi de material din piesă, concomitent cu uzarea altui strat din electrod.

Într-o perioadă carecure de timp se desfășoară toate procesele elementare și integrale din spațiul de lucru necesare reproducerea suprafeței active. Definia drept "durată de reproducere a suprafeței", t_p , timpul minim necesar pentru regenerarea completă a acesteia la obiectul prelucrării, adică pentru obținerea unei suprafețe secundare, S_{p2} , care să nu mai aibă nici un element din cea activă anterioară, S_{Ap1} . Elementele generate care furnează S_{p2} pot face parte dintr-o nouă suprafață activă, S_{Ap2} , sau pot trece în suprafața pasivă a piesei, integrându-se în cea finală prelucrată.

Legei procesele elementare sînt discontinue și repartizate neuniforme în spațiu și în timp, efectul lor global permite abordarea dinamicii de generare a suprafeței ca o mișcare continuă și considerarea variațiilor în raport cu timpul a dimensiunilor ca niște derivate finite. În acest mod se poate defini pe direcția de avans cîmpul de viteze liniare locale instantanee de prelucrare, v_p , respectiv de uzare, v_u .

$$v_p = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta L_p}{\Delta t} = \frac{dL_p}{dt} \quad (\text{mm/min}) \quad (3.1)$$

$$v_u = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta L_u}{\Delta t} = \frac{dL_u}{dt} \quad (\text{mm/min}) \quad (3.2)$$

Electrodul este avansat în același timp cu viteza instantanee de avans v_a .

$$v_a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta L_a}{\Delta t} = \frac{dL_a}{dt} \quad (\text{mm/min}) \quad (3.3)$$

unde ΔL_a - avansul electrocului în timpul Δt .

Definim drept "avans de reproducere", L_{Ap} , avansul electrocului în timpul de reproducere, t_p .

$$L_{AP} = v_A \cdot t_p \quad (\text{mm}) \quad (3.4)$$

La reproducere macroscopică a suprafeței pot avea loc una sau mai multe reproduceri locale ale spațiului de lucru elementar (în care are loc descărcarea electrică).

În porțiunile de suprafață activă în care elementele de suprafață au raza de curbură pe direcția avansului între cele trei viteze instantanee există relația:

$$\frac{dL}{dt} = \frac{dL_p}{dt} + \frac{dL_E}{dt} + \frac{d\delta}{dt} \quad (3.5)$$

Reacția externă a regulatorului autonom de avans tinde să mențină interstițiul la o grosime stabilită. În ipoteza $\delta = \text{constant}$ se pot scrie pentru elementele de suprafață normale pe direcția avansului relațiile :

$$L_A = L_p + L_E \quad v_A = v_p + v_E \quad (3.6)$$

unde $v_A = L_A/t$ este viteza medie de avans; v_p și v_E - vitezele medii de prelucrare respectiv de uscare.

Relațiile (3.6) nu mai sînt adevărate cînd raza de curbură conținută în planul de avans ale elementului de suprafață formează

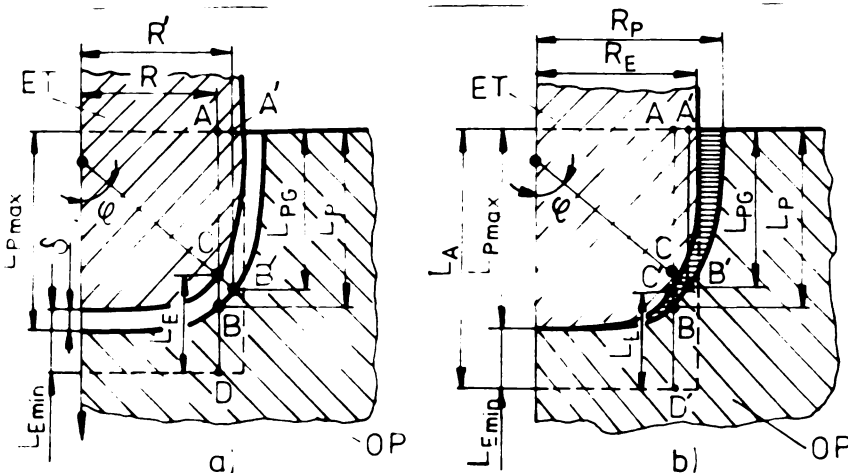


Fig. 3.1.

un unghi φ cu direcția avansului (fig. 3.1). Prin plan de avans înțelegem planul care conține direcția de avans și normala elementului de suprafață.

Se consideră electrozudul de transfer aflat la distanța δ de suprafața piesei în timpul

prelucrării (fig. 3.1, a) și un element de suprafață cu normala în punctul C, formînd unghiul φ cu direcția avansului. Prin definiție elementele liniare caracteristice procesului de generare, măsurabile la raza $r = R$ sînt $L_p = AB$ și $L_E = CD$. Dacă la un moment dat se întrerupe prelucrarea și se pornește din funcție sistemul autonom de avans, electrozudul cade cu distanța δ astfel încît punctul C ajunge prin translație în punctul C'. Se vede că în această situație se poate scrie la raza $r = R$, conform fig. 3.1, b)

$$L_A = L_{Pmax} + L_{Emin} \quad (3.7)$$

și la raza $r = R$:

$$L_A = AB + (C'D' - C'B) = L_P + L_U - C'B$$

Încă se detaliază zona punctului C (fig.3.2) pentru raze de curbura mari și unghiuri ϵ mici se poate aproxima coarda cu tangenta și se poate scrie :

$$C'B \approx \frac{\delta}{\cos \epsilon} - \delta$$

deci:

$$L_A = L_P + L_U + \delta \left(1 - \frac{1}{\cos \epsilon}\right) \quad (3.8)$$

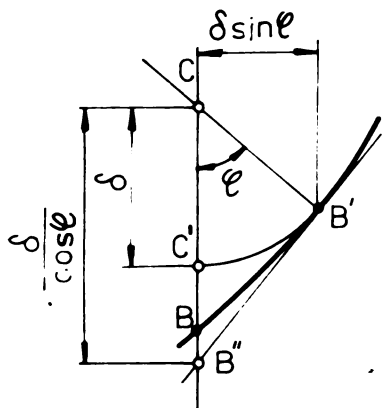


Fig.3.2.

Reconcordanța între lungimea de avans și suma lungimilor de prelucrare și uzare pe aceeași direcție provine din faptul că în procesul electroerziv lungimea uzată L_U măsurată la raza R nu corespunde din punctul

de vedere al relației fizice de generare lunginii prelucrate L_P , măsurată la aceeași rază, ci unei alte lungini generate $L_{PG} = R'B'$ (fig.3.1,a) aflată la raza R' mai mare decât R :

$$R' = R + \delta \sin \epsilon \quad (3.9)$$

Lungimea de prelucrare generată L_{PG} poate fi considerată ca fiind segmentul de dreaptă cel mai apropiat de locul geometric al punctelor conjugate la segmentul de uzură liniară locală L_U . Cu aceste concepte volumul prelevat V_P se consideră volum conjugat celui uzat V_U . Divergența volumului de material prelevat din piesă față de cel uzat din electrod duce la identificarea în cavitatea prelucrată a unui volum conjugat exterior electrodului (cărui îi aparține secțiunea hașurată orizontal în fig.3.1,b). Acest volum este repartizat neuniform.

Rezultă ca la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei, chiar dacă se lasă în considerare numai factorii geometrici, are loc schimbarea formei electrodului urmată de schimbarea succesivă, la fiecare trecută de reproducere, și a formei cavității prelucrate. Procesul are loc în toate cazurile în care apare o oit de mică uzură a electrodului și este determinat de faptul că la unghiuri $\epsilon > 0$, volumele conjugate la CP sînt exterioare celor uzate la CT.

3.2. Model matematic pentru copierea formei prin eroziune electrică

Cu toate că problema exprimării matematice a procesului de reproducere a suprafețelor la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei prezintă o importanță practică deosebită, ea nu

este pînă în prezent rezolvată corespunzător [74], [127], [144], și degradarea formei suprafeței KT nu poate fi calculată, astfel încît se recurge la metode de aproximație pentru calculul numărului de electrozi necesari pentru obținerea unei forme dorite. Cercetări teoretice și experimentale relativ puține [39], [40], [41], [52], [53], [67], [69], [74], [127], [143], [161], au furnizat unele relații de calcul variabile pentru cazuri particulare.

În cercetări anterioare efectuate de autor în colaborare cu Loria [14], [15], [17], [18], [145], [146], [149] s-au stabilit și s-au verificat experimental ecuații matematice care elucidează mecanismul macroscopic de generare a suprafeței în timpul de reproducere.

Pentru studiul teoretic al generării suprafeței la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei se acceptă, în primele analize, următoarele ipoteze simplificatoare :

- prelevarea de material se face pe direcția unei normale locale comune pentru KT și CP;
- în momentul generării suprafețele elementare medii de generare au razele de curbura colineare;
- evacuarea produselor eroziunii în afara interstițiului se face simultan cu expulzarea lor din crater;
- uzura relativă volumetrică, γ_{\bullet} , și grosimea interstițiului δ , pe direcția normalei se pot presupune constante.

Acum se consideră un element fixat din suprafața activă generată la KT, ΔS_{KP} (fig.3.3) și elementele de volum corespunzătoare : cel uzat de la electrod, ΔV_E , și cel prelevat la CP, ΔV_P , se poate scrie uzura relativă volumetrică pe direcția normală γ_{\bullet} ,

$$\gamma_{\bullet} = \frac{\Delta V_E}{\Delta V_P} = \frac{H_{KN} \cdot \Delta A_E}{H_{PN} \cdot \Delta A_P} \quad (3.10)$$

unde H_{KN} (mm) - grosimea locală pe direcția normalei a stratului de material uzat de la KT; H_{PN} (mm) - grosimea locală pe direcția normalei a stratului de material prelevat la CP. Ariile echivalente respective sînt :

$$\Delta A_E = \frac{\Delta V_E}{H_{KN}} ; \quad \Delta A_P = \frac{\Delta V_P}{H_{PN}}$$

Se definește drept coeficient de uzură relativă liniară pe direcția normalei raportul :

$$\lambda_n = \frac{H_{KH}}{H_{PH}} = \frac{\Delta V_P}{\Delta V_E} \cdot \frac{\Delta A_P}{\Delta A_E} \quad (3.11)$$

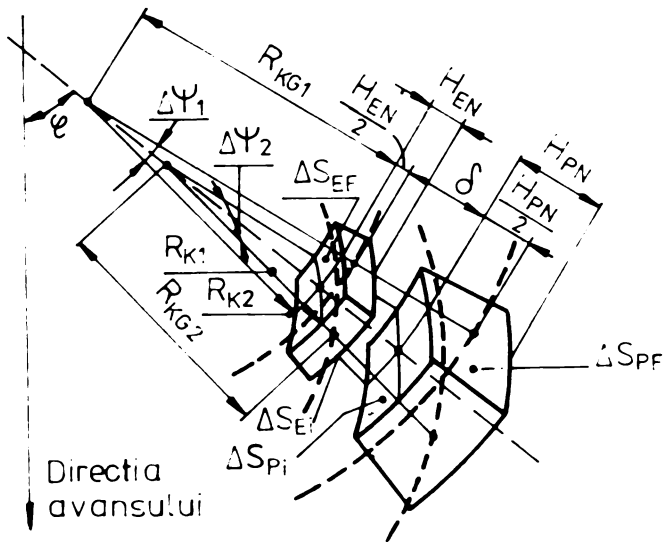


Fig. 3.3.

Pentru determinarea expresiei coeficientului C_{div} se calculează ariile ΔA_E , respectiv ΔA_P , considerându-le egale cu aria elementelor de suprafață la jumătatea adâncimii straturilor de prelucrare, respectiv de uzare (fig. 3.3) și acceptând că acestea aparțin suprafețelor convenționale de generare. Se definește drept suprafață de generare la electrod o suprafață fictivă, loc geometric a mijlocului distanțelor normale dintre suprafețe electrodului la un moment t și cea de la momentul $t + \Delta t$. Elementul de suprafață de generare la electrod, planș normal în interiorul elementului de volum ΔV_E și estimat ca având aria egală cu ΔA_P , va avea în planul de avans rază de curbura R_{KG1} și în planul normal rază de curbura R_{KG2} . Prin plan normal înțelegem planul care conține normale la suprafața elementară considerată și este perpendicular pe planul de avans.

$$R_{KG1} = R_{K1} + \frac{H_{KH}}{2}; \quad R_{KG2} = R_{K2} + \frac{H_{KH}}{2} \quad (3.14)$$

unde R_{K1} , R_{K2} - razele de curbura în planul de avans, respectiv în planul normal ale elementului ΔS_{EP} rezultat pe electrod la momentul $t + \Delta t$.

Cu aceste notații se calculează :

$$\Delta A_E = R_{KG1} \cdot \Delta \Psi_1 \cdot R_{KG2} \cdot \Delta \Psi_2 \quad (3.15)$$

unde $\Delta \Psi_1, \Delta \Psi_2$ - unghiurile corespunzătoare suprafeței ΔS_{EP} în planul de avans, respectiv în cel normal.

În mod similar se poate defini o suprafață de generare la cli-

Se vede că valoarea coeficientului linear λ_n nu este egală cu cea a coeficientului volumic λ_o și proporțională cu acesta prin raportul ariilor echivalente.

Se definește drept coeficient de divergență, C_{div} , raportul:

$$C_{div} = \frac{\Delta A_P}{\Delta A_E} = \frac{\Delta V_P}{\Delta V_E} \cdot \lambda_n \quad (3.12)$$

și se poate scrie :

$$\lambda_n = C_{div} \cdot \lambda_o \quad (3.13)$$

Pentru determinarea expresiei

ectul prelucrat conținând elementul de suprafață cu care se estileasă aria ΔA_p .

$$\Delta A_p = (R_{KG1} + \frac{H_{PH}}{2} + \delta + \frac{H_{PH}}{2}) \Delta \Psi_1 (R_{KG2} + \frac{H_{PH}}{2} + \delta + \frac{H_{PH}}{2}) \Delta \Psi_2 \quad (3.16)$$

Notăm :

$$H_N = H_{LN} + H_{PH} \quad (3.17)$$

Cu aceasta C_{div} se calculează :

$$C_{div} = \frac{(R_{KG1} + \frac{H_N}{2} + \delta)(R_{KG2} + \frac{H_N}{2} + \delta)}{R_{KG1} \cdot R_{KG2}} \quad (3.18)$$

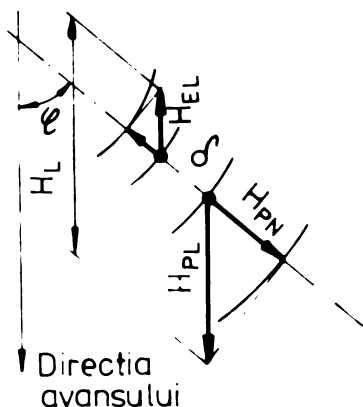
de unde,

$$C_{div} = (1 + \frac{H_N + 2\delta}{2R_{KG1}})(1 + \frac{H_N + 2\delta}{2R_{KG2}}) \quad (3.19)$$

Cu aceasta relație (3.13) devine :

$$\lambda_N = (1 + \frac{H_N + 2\delta}{2R_{KG1}})(1 + \frac{H_N + 2\delta}{2R_{KG2}}) \gamma_0 \quad (3.20)$$

Acum se consideră dimensiunea straturilor îndepărtate pe direcția avansului și se aproximează arcul cu tangenta (fig. 3.4) se obține :



$$H_{PL} = \frac{H_{PH}}{\cos \varphi}; \quad H_{EL} = \frac{H_{PH}}{\cos \varphi} \quad (3.21)$$

unde H_{PL} - adâncimea materialului prelucrat la pișcă, în direcția avansului; H_{EL} - adâncimea uzată din electrod, în direcția avansului.

Notând $H_L = H_{PL} + H_{EL}$ rezultă :

Fig. 3.4.

$$H_L = \frac{H_{PH} + H_{PH}}{\cos \varphi} = \frac{H_{PH}}{\cos \varphi} \quad (3.22)$$

Considerăm raportul dintre segmentele H_{EL} și H_{PL} = uzura relativă liniară locală λ_L .

$$\lambda_L = \frac{H_{EL}}{H_{PL}} \quad (3.23)$$

și din (3.22), (3.21), (3.20) se poate scrie:

$$\lambda_L = \gamma_0 \left(1 + \frac{H_N \cos \varphi + 2\delta}{2R_{KG1}}\right) \left(1 + \frac{H_N \cos \varphi + 2\delta}{2R_{KG2}}\right) \quad (3.24)$$

Împărțind cu Δt din (3.23) și (3.24) se obține:

$$v_p = \frac{v_L}{\gamma_0} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{H_L \cdot \cos \varphi + 2\delta}{2R_{KG1}}\right) \left(1 + \frac{H_L \cos \varphi + 2\delta}{2R_{KG2}}\right)} \quad (3.25)$$

Rezultă că atât uzura relativă locală, λ_L , cât și vitezele de prelucrare v_p sînt invariante în secțiune transversală numai în cazul suprafețelor active plane și perpendiculare pe direcția de avans (la $\varphi = 0$) și de curbura de generare nulă ($R_{KG} = \infty$).

În cazul suprafețelor active de altă formă și orientare, valorile mărimilor λ_L și v_p se modifică în funcție de curbura locală a suprafețelor și de unghiul format de normala locală cu direcția de avans.

La curbură pozitivă (suprafețe convexe ale HT) λ_L crește și v_p scade cu creșterea valorii curburii.

La curbură negativă (suprafețe concave ale HT) λ_L scade și v_p crește cu creșterea valorii absolute a curburii.

La o anumită valoare a curburilor locale variația mărimilor λ_L și v_p este accentuată de creșterea unghiului și a grosii interstițiului, δ .

Cînd unghiul $\varphi \rightarrow 90^\circ$ și $R_{KG} \rightarrow \infty$, mărimea λ_L devine nedeterminată, avînd loc trecerea de la suprafețele active la cele pasive ale interstițiului, cînd $R_{KL}/R_{PL} = 0/0$.

Relația (3.24) confirmă raționamentul dezvoltat la cap.3.1. arătînd că în condițiile unei uzuri oricît de mici a HT ($v_L \neq 0$; $\gamma_0 \neq 0$) eroziunea se repartizează neuniform din cauza divergenței geometrice a volumelor prelucrate față de cele uzate.

3.3. Cercetări experimentale asupra dinamicii de generare a suprafețelor, prin eroziune electrică

3.3.1. Metodica de lucru și condiții de experimentare.

Pentru studiul procesului de generare a suprafețelor spațiale la prelucrarea prin eroziune electrică cu copie sa forței s-a conceput și realizat un program de experimentare al cărui obiectiv a fost studierea formelor succesive ale cavităților prelucrate și ale suprafețelor electrodilor de transfer în două situații caracteristice de prelucrare: una cu evacuare naturală a produselor eroziunii, la care sînt prezente toate procesele ce determină uzura neuniformă a electrodului și alta cu evacuare ușoară, practic instantanee a acestor produse, în condiții în care uzura λ_L uniformă se realizează

exclusiv din cauza divergenței geometrice a velurilor îndepărtate din AT și GP.

Pentru evidențierea unor variații mari de formă s-au ales pentru electrozi două materiale mult diferite din punctul de vedere al constantelor termofizice: cuprul și aluminiul, precum și un regim de prelucrare mijlociu cu impulsuri dependente, având energii $W_1 = 0,25$ J, la o tensiune de lucru $U_0 = 170$ V.

Prelucrările s-au făcut pe o mașină învecinată SFT 30 G, cu generator de relaxare, pe treapta de degroșare având rezistența circuitului de încălzire $r_1 = 103 \Omega$, capacitatea condensatorului de acumulare $C = 15 \mu F$ și curent de scurtcircuit $I_{sc} = 35$ A, [217].

Pentru prima categorie de încălziri s-au utilizat electrozi cilindrici având secțiunea transversală A_{el} = 50; 100; 200; 300 mm², respectiv diametre $d_2 = 8; 11,3; 16; 20$ mm.

Ca obiect de prelucrare s-au folosit probe paralelipipedice din oțel de scule bogat aliate în crom (C 120) calite și revenite la duritatea de 56 - 58 HRC și rectificabile după tratamentul termic. Pentru ușurarea măsurătorilor probele s-au confecționat din câte două părți asamblate pe suprafețe de separație plane finite. Cavitățile au fost prelucrate astfel încât, la demontarea acestora,

să se poată efectua măsurarea dimensiunilor (fig.3.5).

S-au prelucrat cavități de adâncimi diferite, alegându-se valori nominale ale acestora, L_{nom} , în treptă corespunzătoare unor lungimi de prelucrare $L_{\text{max}} = 5; 10; 15; 20; 25$ mm.

La fiecare diametru și pentru fiecare adâncime nominală de prelucrare s-au destinat electrozi simbolizați și marcați C_{el} , respectiv A_{el} , conform tabelului nr.3.1.

Ca lichid dielectric s-a utilizat petrolul cu circulație naturală și curățire prin decantare.

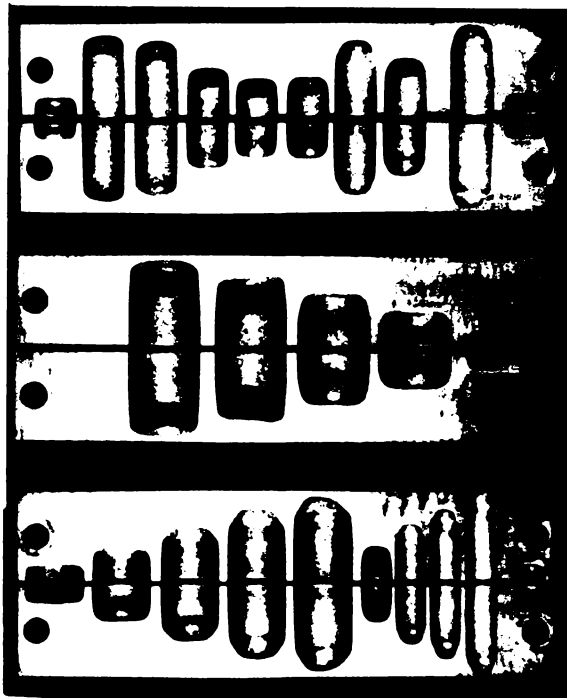


Fig.3.5.

S-au determinat:

- masele electrozilor și pieselor probă înainte și după prelucrare, cu o balanță de laborator de precizie $1 \cdot 10^{-3}$ gr;
- densitatea materialelor determinate prin metoda dublei cântărituri;

- timpul de prelucrare cronometrat;
- avansul electrodului de transfer, măsurat cu un comparator de precizie $1 \cdot 10^{-2}$ mm, montat solidar cu partea mobilă (cu dispozitivul partelectrod);
- coordonatele unor puncte de pe suprafața electrodului și de pe cea generată la piesele probă (după desmembrarea părților perechi măsurate cu ajutorul unui microscop de scale tip Zeiss-Jena, cu precizie $1 \cdot 10^{-2}$ mm).

Tabelul 3.1.

Legende de simbolizare a electrozilor cilindrici

Inel	C	A	B				R						
			indice	1	2	3	4	indice	1	2	3	4	5
simbolizate	Cu	Al	6 ₁	20	15	11,5	8	2 ₁ noz	5	10	15	20	25

Între cea de a doua categorie de încercări s-au confecționat din aceleași materiale (Cu și Al) electrozi sub formă de plăci de grosime mică (3 mm) și lățime egală cu diametrii electrozilor cilindrici.

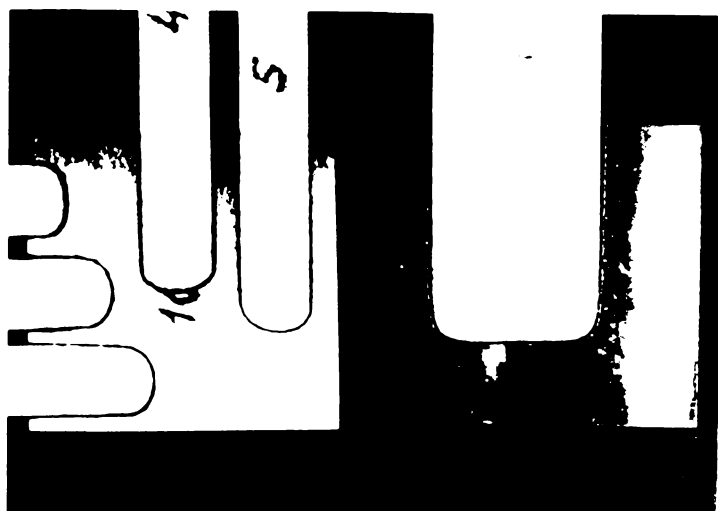


Fig. 3.6.

rețele piesa, de asemenea în formă de placă (fig. 3.6) au fost confecționate din oțel C100, calit și revent la 55 - 58 mm.

S-au efectuat prelucrări cu adâncimi de pătrundere diferite și măsurători similare celor din prima categorie, cu aceeași câștigă și masa mai mică a probelor a permis cântărire analitice de precizie $2 \cdot 10^{-4}$ gr, iar coordonatele profilelor prelucrate s-au

putut măsura cu un proiector de profile de 320 Carl-Zeiss-Jena, cu amplificare de 10 ori.

S-au mai fost efectuate, în aceleași condiții, încercări cu evluare ușoară folosind electrozi și piese probă sub formă de plăci având aceeași grosime mică dar cu lățime relativ mai mare, astfel încât suprafața activă frontală să fie egală cu suprafața frontală a electrozilor cilindrici, respectiv 50; 100; 200; 300 mm².

3.3.2. Verificarea experimentală a modelului matematic

Modelul matematic dedus în relațiile (3.24), (3.25) exprimă dependența uzurii relative liniare a electrozodului, respectiv a vitezei de prelucrare, de factorii geometrici ai suprafeței active. La copierea formulelor spațiale nu este posibilă verificarea lui experimentală întrucât nu pot fi separate efectele evacuarii produselor eroziunii care schimbă caracterul descărcărilor de prelevare. În această cauză s-a efectuat verificarea prin experimentele cu piese și electrozi plăci unde se poate face verificarea unei prelucrări cu copierea profilului la care divergența tridimensională se înlocuiește cu una bidimensională, în planul de avans. Corespunzător acestor încrețiri raza de curbura în planul normal $R_{\text{CG2}} = \infty$, iar prelevarea este divergentă față de uzura numai în planul de avans.

Ecuațiile (3.24) și (3.25) devin :

$$\lambda_L = \gamma_{\bullet} \left(1 + \frac{H_L \cos \epsilon + 2\delta}{2R_{\text{CG1}}} \right) \quad (3.26)$$

$$v_F = \frac{2R_{\text{CG1}}}{\gamma_{\bullet} (2R_{\text{CG1}} + H_L \cos \epsilon + 2\delta)} v_L \quad (3.27)$$

Pentru a urmări cât mai fidel procesul fizic real s-au făcut prelucrări și s-au efectuat măsurători asupra unor trepte de reproducere a suprafețelor active la adâncimi diferite de pătrundere, respectiv la raze de curbura diferite. Locul de măsurare al elementelor geometrice s-a ales în zonele muchiilor frontale-laterale ale electrozodurilor, respectiv în zone de trecere de la suprafața frontală la cea laterală a cavității prelucrate, unde raza de racordare a curbelor evasiparabolice de profil [53], pot fi măsurate cu mai multă ușurință.

Treptele de reproducere s-au ales de ordinul de mărime al avansului de reproducere, $\Delta L_{\text{AP}} = 1,4 - 1,5$ mm, măsurat cu comparatorul în timpul încrețirii.

S-au ridicat profilografe la scară 10 : 1 înainte și după prelucrarea fiecărei trepte. Restabilirea poziției reciproce ET-OT s-a realizat pe baza măsurării mărimilor L_A , L_{min} , L_{max} precum și a interstițiului lateral prin măsurarea la microscopul de scule a lățimilor medii la intrarea a electrozodului și a cavității prelucrate. Interstițiul frontal a fost măsurat în mod repetat pentru regiunile de prelucrare I2, folosind comparatorul de avans montat pe mașină și măsurând căderea capului de lucru la întreruperea prelu-

crării, precum și înălțimea de ridicare la pornirea din scurtcircuit nu s-au constatat diferențe sensibile la cele două metode. Media acestor măsurători a dat $\delta = 0,102$ mm și nu a diferit în funcție de înălțimea electrodului.

Pentru localizarea elementelor geometrice s-a asociat la O un sistem de coordonate în planul de avans cu ordonata Z, orientată în direcția avansului și tangentă la peretele vertical al suprafeței prelucrate. Originea s-a considerat începutul prelucrării, la $L_A = 0$.

Razele de curbură și unghiurile de poziție s-au măsurat după căutarea arcului de cerc de curbură corespunzătoare suprapunerii peste profilul celălalt. Centrul $K_1(x_1, z_1)$ al segmentului de arc s-a determinat prin unirea centrului cercului cu intersecția tangente-

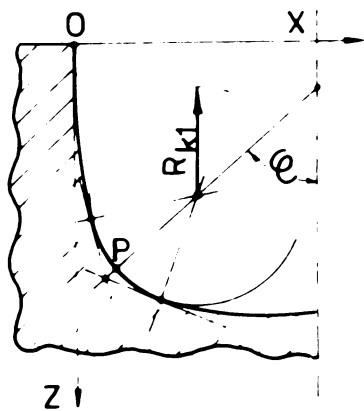


Fig. 3.7.

lor duse în punctele extreme de suprapunere a cercului cu profilul (Fig. 3.7). După prelucrarea treptei de reproducere s-a măsurat elementul $H_P = Z_{1+1} - Z_1$ și $H_Z = L_{K(1+1)} - L_{K1}$, unde L_{K1} reprezintă lungimea de uzură a electrodului măsurată la abscisa $x_{K1} = x_1 + \delta \sin e$.

Razele de generare și unghiurile corespunzătoare s-au calculat :

$$R_{K1} = \frac{R_{K1} + R_{K1(1+1)}}{2}, \quad e = \frac{e_1 + e_{1+1}}{2} \quad (3.28)$$

Pentru mărirea preciziei metodei grafice folosite, măsurătorile s-au făcut pe ambele flancuri ale profilogramelor, luându-se în considerare media.

Sintese rezultatelor experimentale se prezintă în tabelele nr. 3.2 și nr. 3.3, în care s-au înscris valorile calculate λ_{L0} și v_{p0} , rezultate din înlocuirea valorilor geometrice. Uzura relativă volumică pe direcția normală s-a calculat aproximativ că ea este egală cu raportul dintre volumele cu înălțime unitară aflate pe normala ce coincide cu direcția avansului :

$$\gamma_0 = \frac{L_{\min} \cdot \delta_T}{L_{\max} \cdot \delta_P} \quad (3.29)$$

unde δ_T și δ_P - reprezintă grosimea plăcii electrod, respectiv a piesei.

S-au determinat și valorile λ_{L0} și v_{p0} rezultate direct din raportul segmentelor H_Z și H_P , fără a ține cont de celelalte elemente geometrice.

BUPT 1402010

Intu- FC (S)	b (mm)	l_{A1} (mm)	l_{A2} (mm)	r_1 (mm)	r_2 (mm)	ϕ (°)	r_{A01} (mm)	Δt (ms)	v_{TE} (mm)	v_{FC} (mm)	θ_{VP} (°)	λ_{TE}	λ_{LE}	$\Delta \lambda$ (°)
8	1,42	2,90	0,70	0,72	46,5	0,23	1,00	0,72	0,70	-1,4	0,972	0,997	2,5	
	2,90	4,35	0,52	0,56	49,5	0,63	0,86	1,11	1,12	0,9	0,542	0,528	-0,7	
	4,35	7,85	0,44	1,01	52,0	0,89	0,76	1,33	1,24	-3,6	0,436	0,452	3,5	
	5,85	11,35	0,44	1,06	55,0	1,01	0,67	1,58	1,55	-2,9	0,415	0,427	2,8	
	11,08	11,57	0,51	1,10	65,0	1,47	0,65	1,70	1,67	-1,8	0,354	0,359	1,4	
	20,06	21,54	0,37	1,11	75,5	2,13	0,64	1,74	1,82	4,4	0,333	0,318	-4,7	
	25,10	26,56	0,36	1,12	78,3	2,45	0,63	1,76	1,84	3,4	0,321	0,309	-3,9	
	30,04	31,54	0,36	1,14	79,0	2,73	0,63	1,81	1,87	3,3	0,316	0,304	-3,9	
	1,44	2,90	0,58	0,76	46,5	0,24	2,00	0,33	0,37	-2,6	0,395	0,305	1,1	
	2,90	5,36	0,49	0,97	49,5	0,60	1,87	0,52	0,51	-1,9	0,505	0,436	-3,9	
20	5,02	6,52	0,42	1,08	56,5	1,13	1,85	0,58	0,59	1,7	0,389	0,378	-2,9	
	10,04	11,54	0,37	1,13	65,0	1,54	1,74	0,65	0,63	-3,1	0,327	0,330	0,9	
	20,12	21,60	0,34	1,16	70,0	2,16	1,63	0,71	0,72	1,4	0,293	0,294	0,3	
	25,08	26,56	0,26	1,17	79,0	2,52	1,67	0,71	0,70	-1,4	0,282	0,215	1,1	
	30,04	31,52	0,26	1,17	80,0	2,80	1,62	0,72	0,71	-1,4	0,272	0,261	2,9	

Run- No	θ (deg)	L_{A1} (mm)	L_{A2} (mm)	H_1 (m)	H_2 (m)	ω (°)	R_{301} (mm)	θ (rad)	V_{1E} (mm/min)	V_{1O} (mm/min)	θ_{VP} (°)	λ_{1m}	λ_{1o}	$\Delta\lambda_L$ (%)
11	8	1.52	3.02	0.32	0.69	45.5	0.39	1.71	0.299	0.332	1.2	1.531	1.533	-0.7
		3.02	4.50	0.68	0.92	51.0	0.75	1.67	0.411	0.472	-4.0	0.229	0.263	3.9
		4.50	5.97	0.92	0.86	55.0	1.10	1.59	0.502	0.553	2.0	0.221	0.205	-2.2
		6.01	7.52	0.96	0.95	64.5	1.39	1.43	0.589	0.658	-2.1	0.289	0.266	2.8
		7.52	9.05	0.94	0.94	67.0	2.20	1.64	0.577	0.575	-0.3	0.274	0.276	0.3
		9.05	10.56	0.93	0.97	68.5	3.00	1.60	0.577	0.572	-0.9	0.246	0.251	0.9
		10.56	12.05	0.93	0.98	69.5	3.85	1.70	0.574	0.583	0.7	0.241	0.236	-0.9
		12.05	13.52	0.91	0.98	70.5	4.36	1.66	0.298	0.276	-2.1	0.220	0.234	2.4
		13.52	15.02	0.91	0.99	71.0	4.82	1.70	0.290	0.264	-4.6	0.215	0.232	3.2
		15.02	16.52	0.82	0.62	44.0	0.35	1.70	0.122	0.124	0.8	1.205	1.242	3.5
20	20	3.99	4.51	0.62	0.97	52.5	0.90	3.68	0.242	0.237	-2.1	0.212	0.220	1.9
		4.51	5.99	0.56	0.94	60.0	1.40	1.52	0.297	0.273	2.3	0.217	0.204	-2.2
		5.99	6.97	0.53	0.95	62.0	2.00	2.07	0.273	0.232	1.2	0.228	0.243	2.0
		6.97	8.52	0.52	0.98	65.0	2.50	2.50	0.273	0.297	2.0	0.231	0.211	-2.3
		8.52	10.06	0.51	0.98	65.5	3.50	3.50	0.276	0.296	3.5	0.220	0.200	-2.2
		10.06	11.52	0.49	1.01	71.0	3.70	3.91	0.273	0.265	-4.9	0.475	0.490	1.66
		11.52	13.06	0.47	1.01	72.0	4.04	4.02	0.282	0.207	-2.6	0.405	0.447	4.5
		13.06	14.56	0.49	1.03	72.0	4.50	5.00	0.281	0.277	-1.4	0.476	0.484	1.6

S-au calculat abaterile usurii relative liniare și viteze de prelucrare măsurate față de cele calculate :

$$\Delta \lambda_L = \frac{\lambda_{L0} - \lambda_{L\Delta}}{\lambda_{L0}} \cdot 100 \quad (3.30)$$

$$\Delta v_P = \frac{v_{P0} - v_{P\Delta}}{v_{P0}} \cdot 100 \quad (3.31)$$

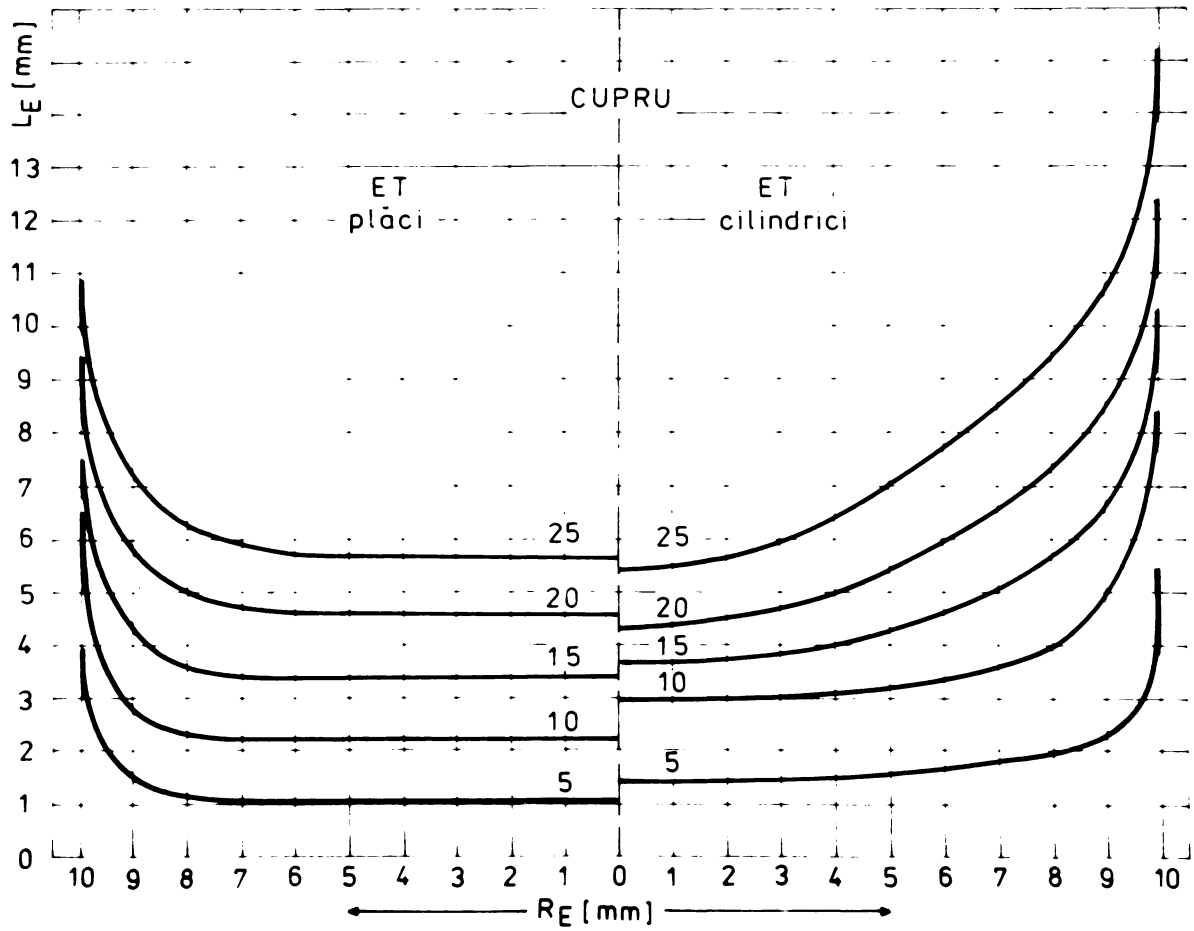
Se vede că aceste abateri se plasează într-un domeniu restrâns de $\pm 5\%$, abateri de ordinal de mărime al preciziei metodei grafice utilizate. Se constată că există o bună corespondență între valorile λ_L și v_P determinate pe cele două căi diferite, ceea ce permite să se facă afirmația că modelul matematic dată reflectă în mod satisfăcător procesul real de modificare a formei suprafeței prelucrate sub influența divergenței geometrice.

3.3.2. Studiul comparativ al procesului de generare a suprafețelor cu și fără influența proceselor de evazuire

Pe baza măsurătorilor efectuate și a profilegramelor ridicate, luându-se în considerație media ambelor flancuri, în figurile 3.8 + 3.15 s-au reprezentat comparativ variațiile lungimilor de uzură, l_T , la probele plăci (stînga) și la electrozii cilindrici (dreapta) în funcție de distanța K_T față de axa de simetrie a electrozilor care a fost luată drept ordonată, într-un sistem de axe de coordonate legat de electrozi și avînd originea pe suprafața frontală inițială a acestora.

Curbele din fig. 3.8 - 3.15, reprezintă intersecția suprafeței electrozilor cu planul de evazuire la adîncimile nominale de prelucrare $L_{\text{max}} = 5; 10; 15; 20$ și 25 mm.

Examinarea calitativă a acestor curbe arată că electrozii plăci față de cei cilindrici prezintă usuri mai uniforme și raze de curbură mai mici în zonele unghiurilor. Curburile cresc cu creșterea adîncimii de prelucrare, iar linia de profil poate fi asimilată cu o curbă compusă dintr-un arc de cerc în zona de curbură maximă (la unghiurile inițiale) recordat prin două segmente parabolice înspre linia dreaptă a pereții vertical pe de o parte și cea a părții frontale a electrodului pe de altă parte. Valorile razelor de curbură depind de materialul electrodului, de uzura și usurii relative diferite și de adîncimea de prelucrare, de uzura și succesiunii mai multor trepte de reproducere. Suprafețele generate cu electrozi plăci din aluminiu au, la aceeași adîncime, raze de curbură mai mari decât



11.3.3.

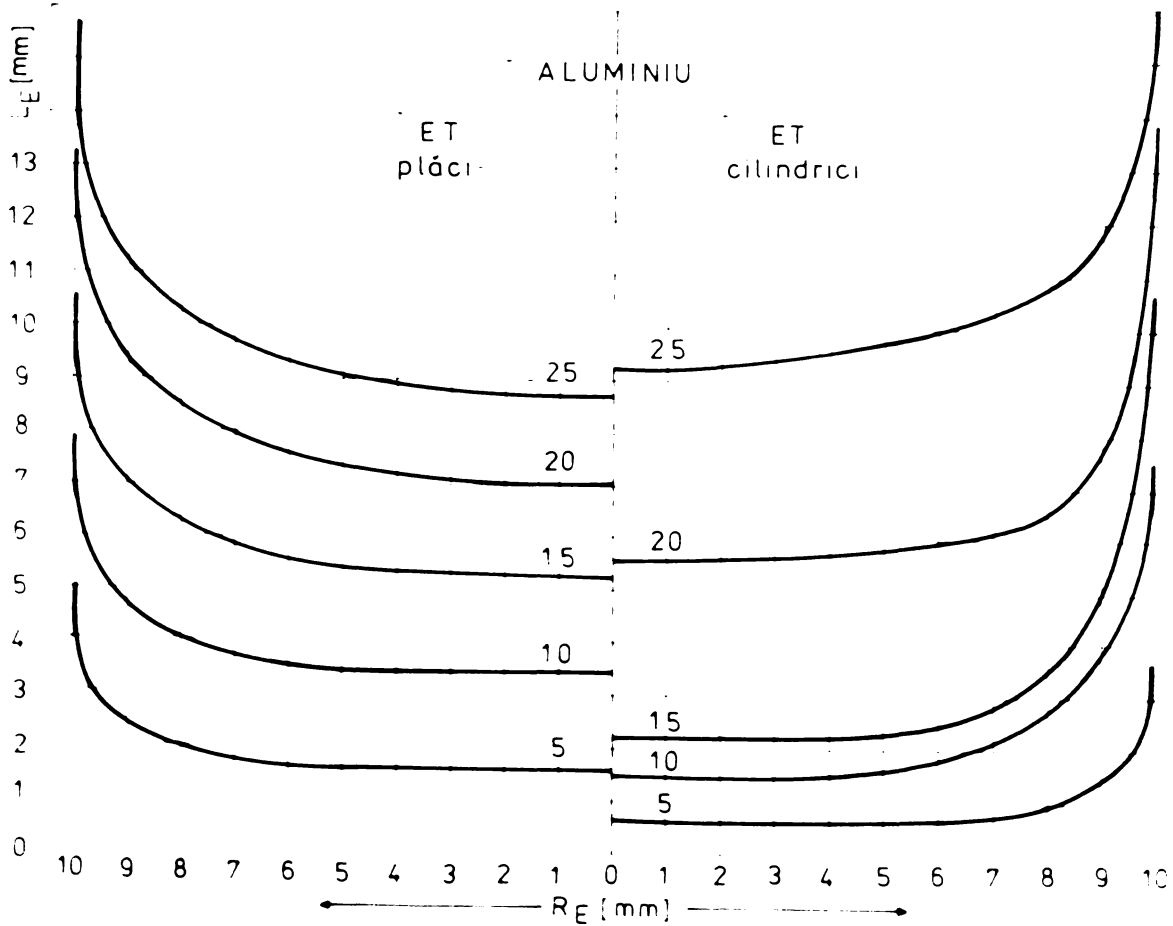


Fig. 3.

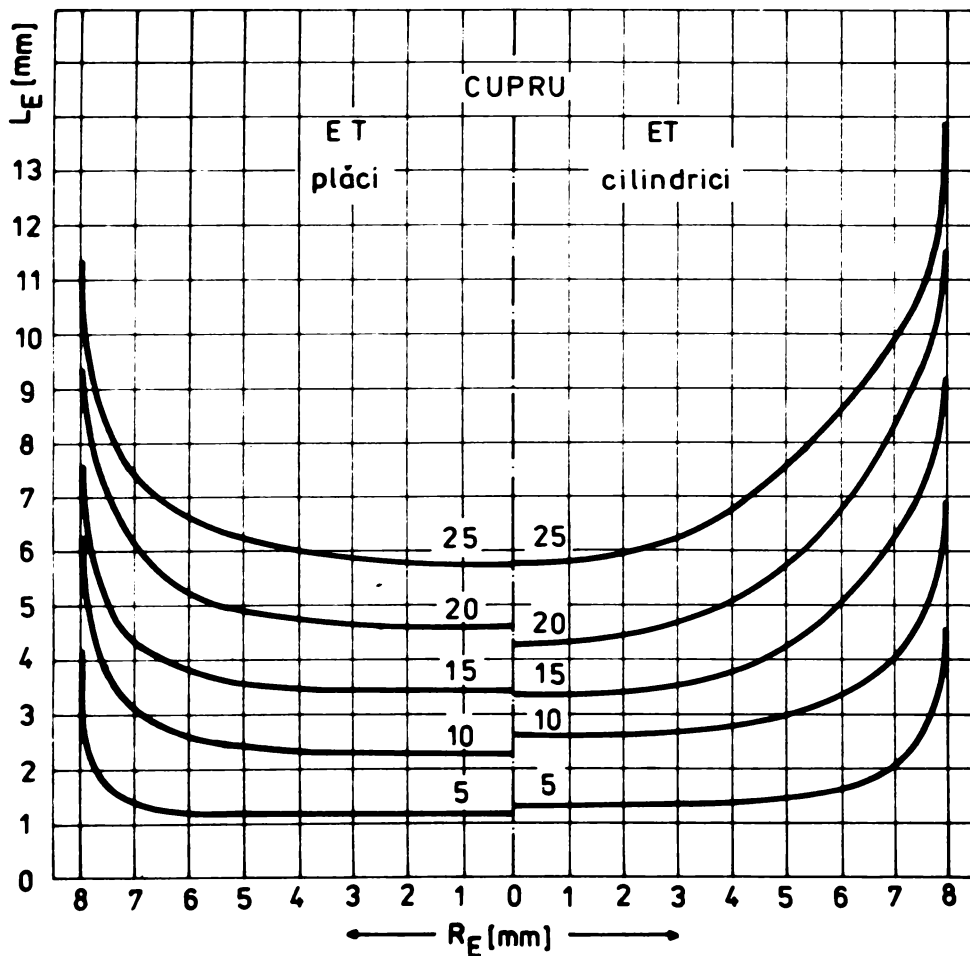


Fig.3.10.

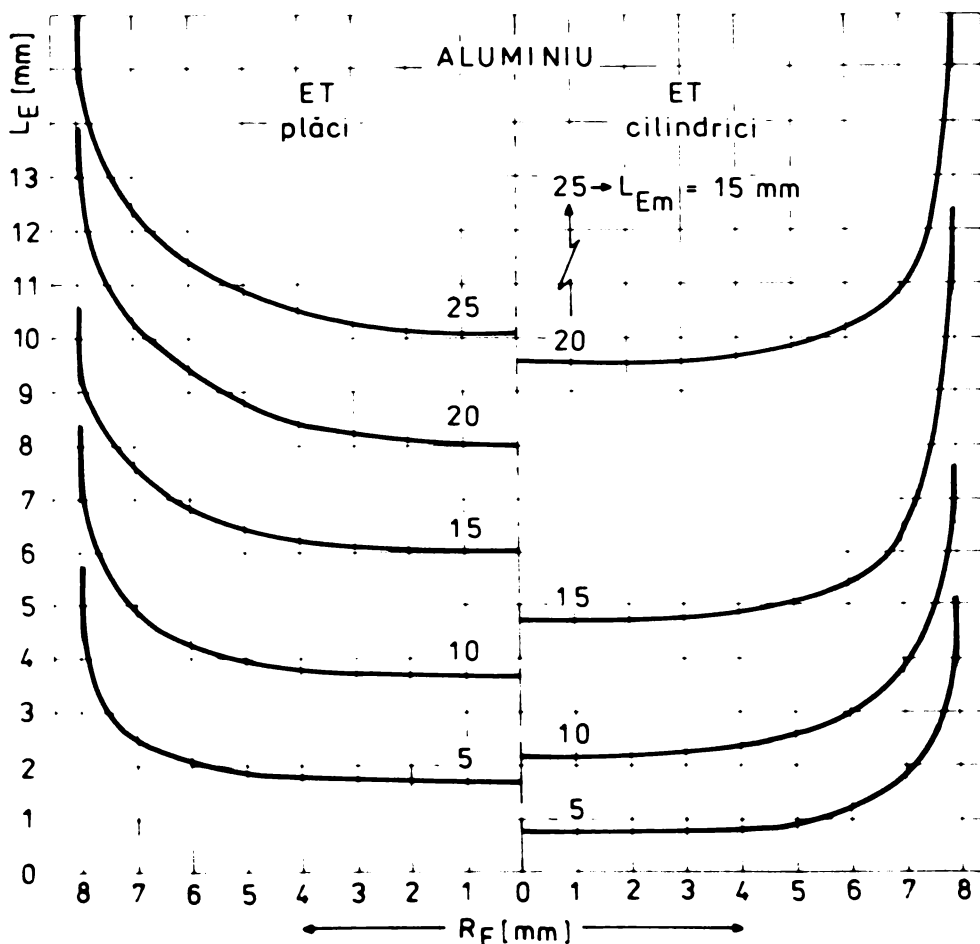


Fig.3.11.

cele corespunzătoare electrozilor din cupru, ca urmare a faptului că uzurile relative mai mari ale aluminiului micșorează mai rapid curburile mari, la fiecare treaptă de reproducere.

La electrozii cilindrici formele succesive ale saviștilor prelucrate prezintă diferențe mari, atât în raport cu schimbarea naturii materialului (T) cât și cu mărirea adâncimii de prelucrare. Creșterea neuniformității suprafețelor generate în cazul electrozilor cilindrici se explică în primul rând pe baza influenței proceselor de evacuare, așa cum s-a demonstrat la cap.1.3.16 probele plăci, cu evacuare ușoară, activitatea formelor suprafeței generate poate fi pusă exclusiv pe seama factorilor geometrici care determină creșterea densității cedinței locale a densității cedinței electrice

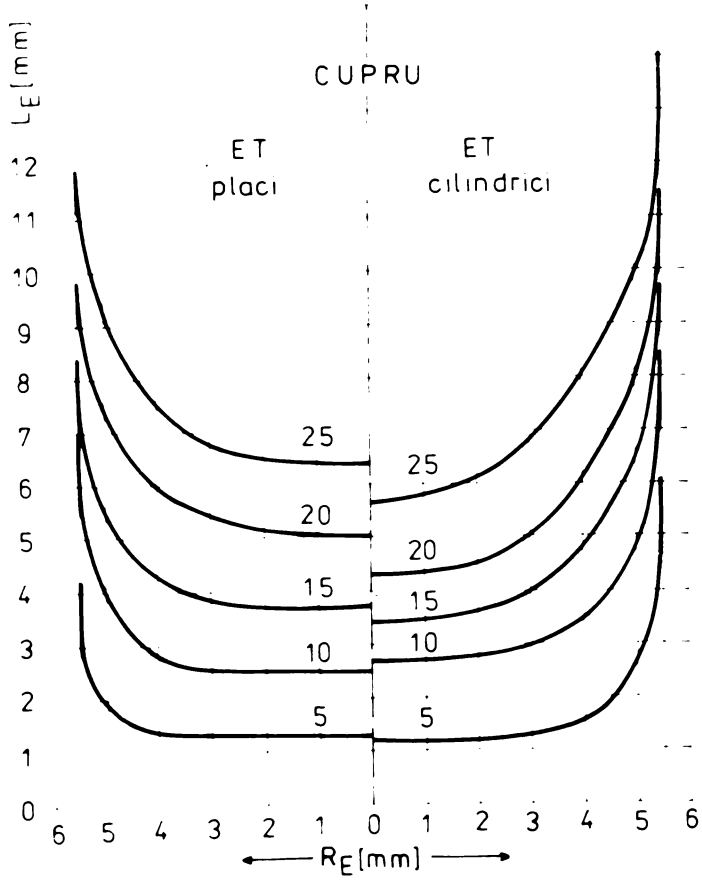


Fig. 3.12.

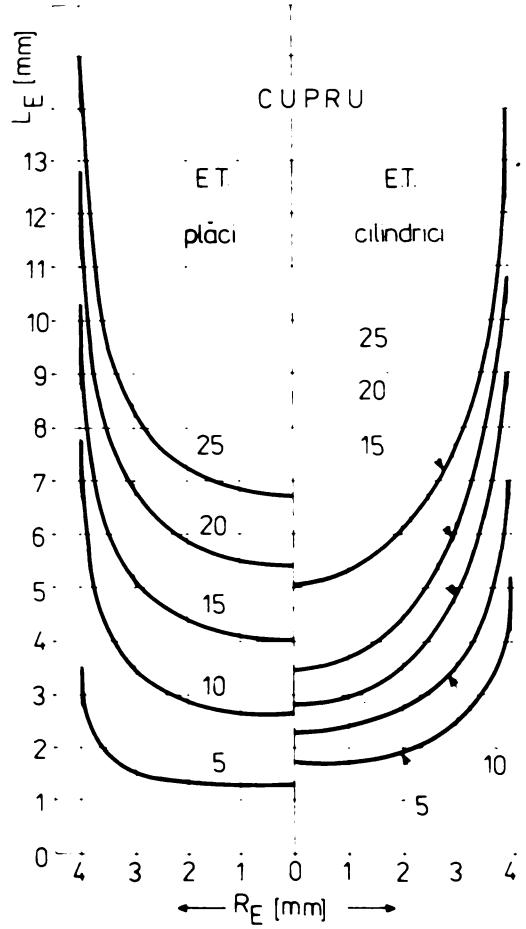


Fig. 3.14.

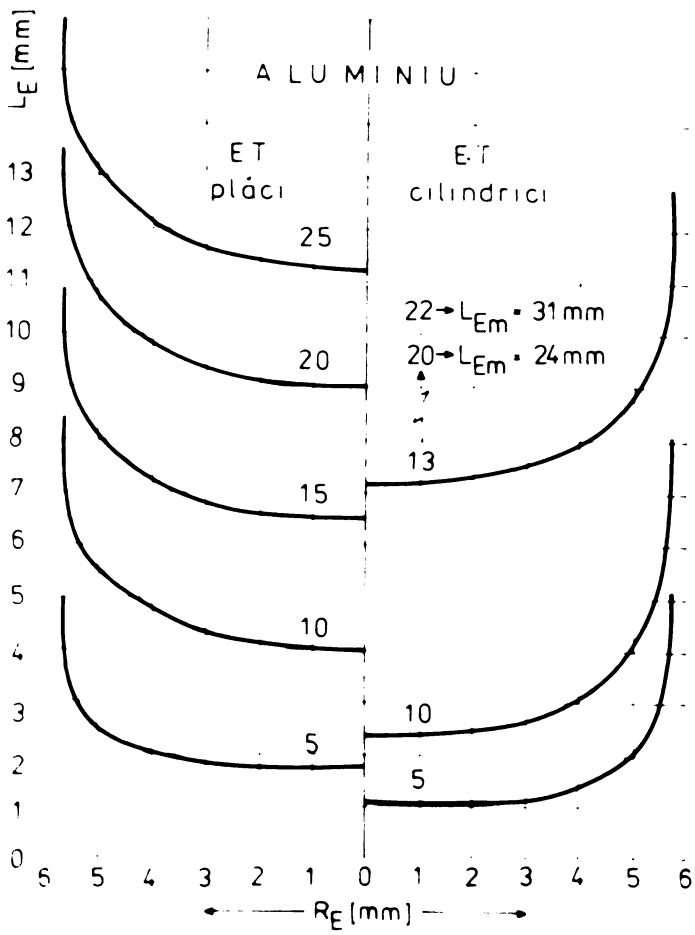


Fig. 3.13.

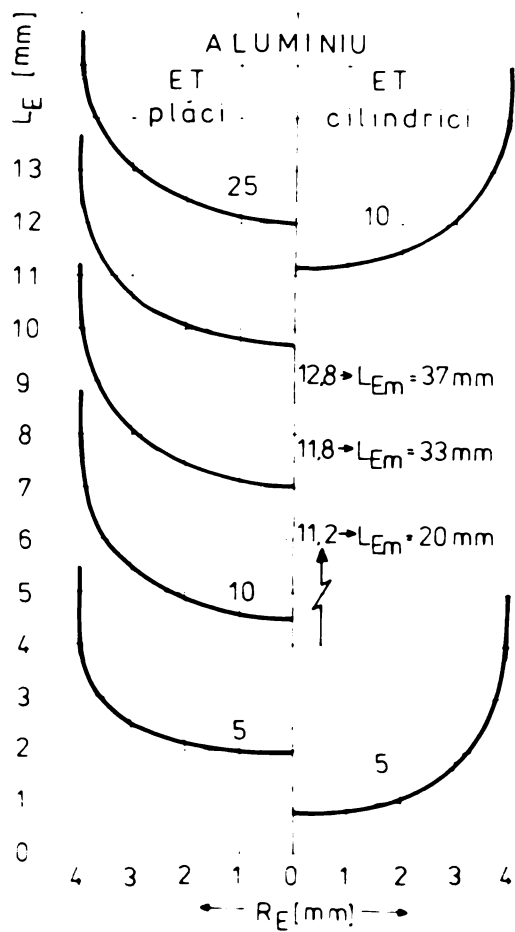


Fig. 3.15.

În sensul cu raze de curbura mici ale ET-ului electrozii cilindrici, cu evacuare prin interstițial vertical, apar în plus toate procesele de aglomerare, marunțire și dispersare a particulelor solide ale eroziunii, precum și stagnarea temperaturii în interstițiu a celor gazease, modificându-se suplimentar densitatea medie locală și caracterul descărcărilor. Creșterea adâncimii de prelucrare mărește influența acestor fenomene. Dacă la electrozii de cupru influența adâncimii de prelucrare și a diametrului este evidentă prin modificarea formelor, la cei din aluminiu ea este mai puțin pronunțată în ceea ce privește forma suprafețelor, însă mult mai accentuată din punct de vedere al uzurii globale. La scderea diametrului, lucrările de uzură ale electrozilor din aluminiu cu care s-au prelucrat cavități adânci au fost atât de mari încât nu s-au mai putut reprezenta pe figura la scară unică aleasă pentru toți electrozii. Valoarea L_{rain} a acestor electrozi s-a înscris în cifre pe figura alături de profilul suprafeței acestora nu diferă semnificativ de cel al ultimului profil reprezentat grafic.

Informații mai detaliate asupra procesului de generare a suprafețelor studiate pot să dea reprezentările grafice ale funcțiilor $L_T = f(L_p)$ la $R = ct.$ În o astfel de reprezentare (Fig. 3.16) domeniul în care pot fi trase curbele parametrice este limitat inferior de curba (1), care reprezintă $L_{Tmin} = f(L_p)$

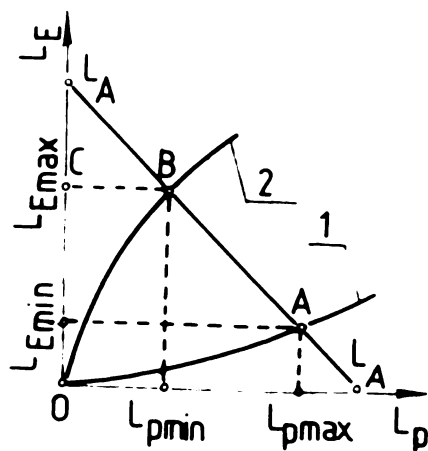


Fig. 3.16.

la $R = 0$ și superior de curba (2) care reprezintă $L_{Tmax} = f(L_p)$ la $R = R_1$, unde R_1 este raza electrodului.

Dacă se consideră un stadiu intermediar de reproducere, la o anumită lungime L_A de avans al electrodului de transfer toate punctele care reprezintă în planul $(L_T, 0, L_p)$ profilul electrodului se vor afla pe o linie a cărei ecuație este: $L_T = L_A - L_p \cdot f(\delta)$, conform (5.8). Dacă se neglijează gradientul interstițialului (valoarea sa medie fiind mică,

aproximativ 0,1 mm) această linie este dreapta $L_T = -L_p + L_A$, care are coeficient unghiular -1 și intersectează coordonatele în punctele $(L_A, 0)$ și $(0, L_A)$. Vom numi această dreaptă "dreapta de profil" și vom identifica pe ea segmentul în corespunzător suprafeței active a electrodului. Punctele 1 și 2 de pe ET le corespund pe suprafața activă a OI adâncimile L_{Tmax} , respectiv L_{Tmin} . Simplificarea $\delta = 0$ conduce la aproximația că, în această situație, și puncte-

le profilului suprafeței active a OP, după avansul electrozului cu L_1 , sînt reprezentate de segmentul AB. Profilul suprafeței pasive a OP este în acest caz reprezentat de segmentul punctat BC, corespunzător adîncimilor de prelucrare realizate în timpul avansului L_1 de la partea frontală a cavității (suprafața OP) pînă la adîncimea minimă a suprafeței active L_{min} .

Scara catelor experimentale s-au reprezentat aceste curbe în fig. 3.17, a + 3.24, a pentru electrozi cilindrici și 3.17, b + 3.24, b pentru electrozi plăci. Curbele s-au trasat pentru distanțe radiale R astfel alese încît să se distingă variațiile semnificative ale variabilelor : $R = 0$; $R = R_E/2$; $R = R_E - 1$; $R = R_E - 0,1$; $R = R_E$, asimilindu-se și pentru electrozii plăci prin R_E distanța radială corespunzătoare de la axa de simetrie pînă la muchiile laterale frontale inițiale ale electrozilor plăci.

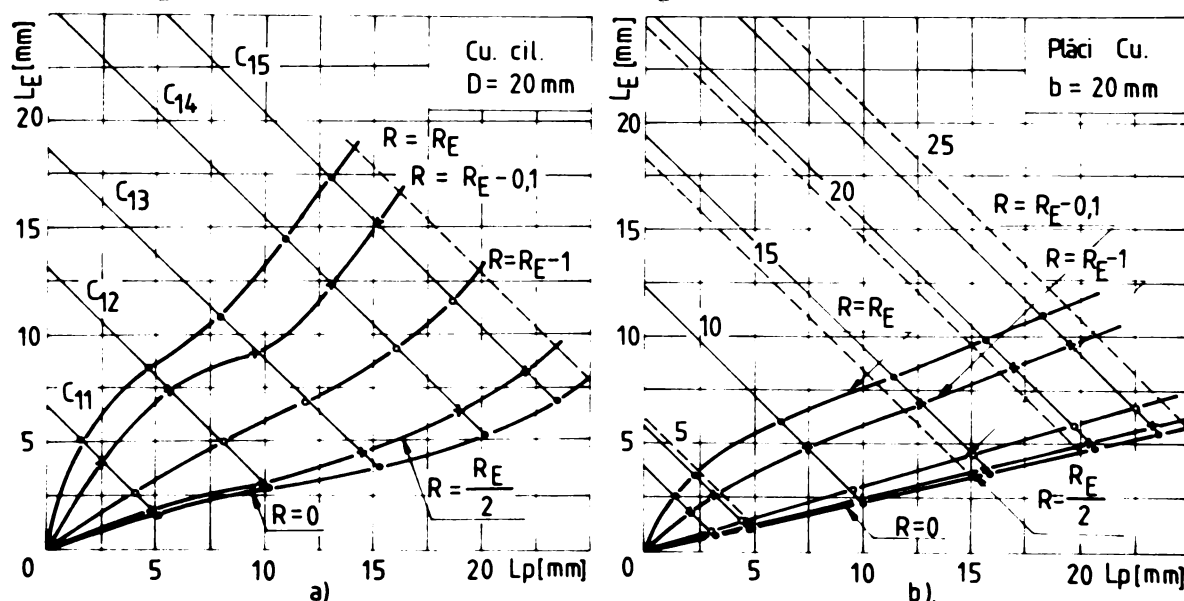


Fig. 3.17.

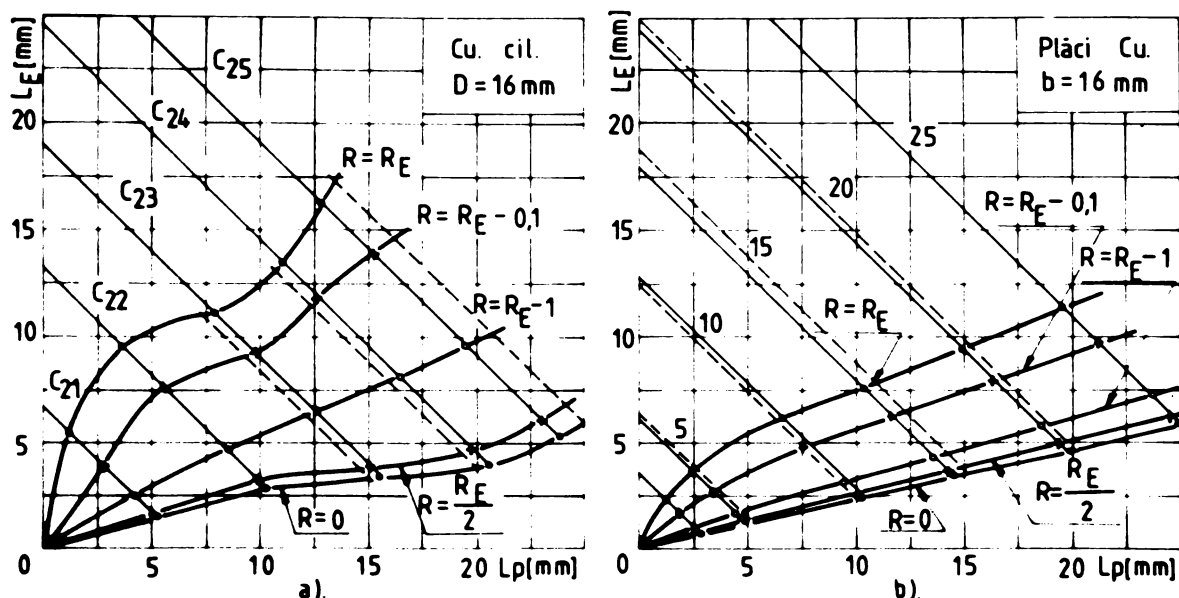


Fig. 3.18.

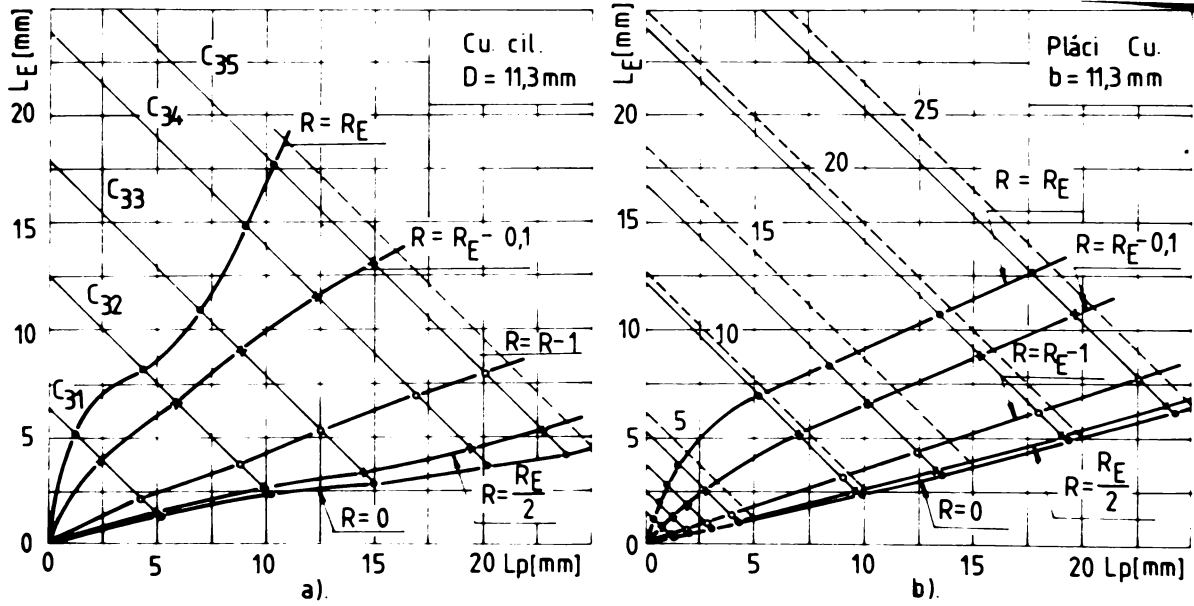


Fig. 3.19.

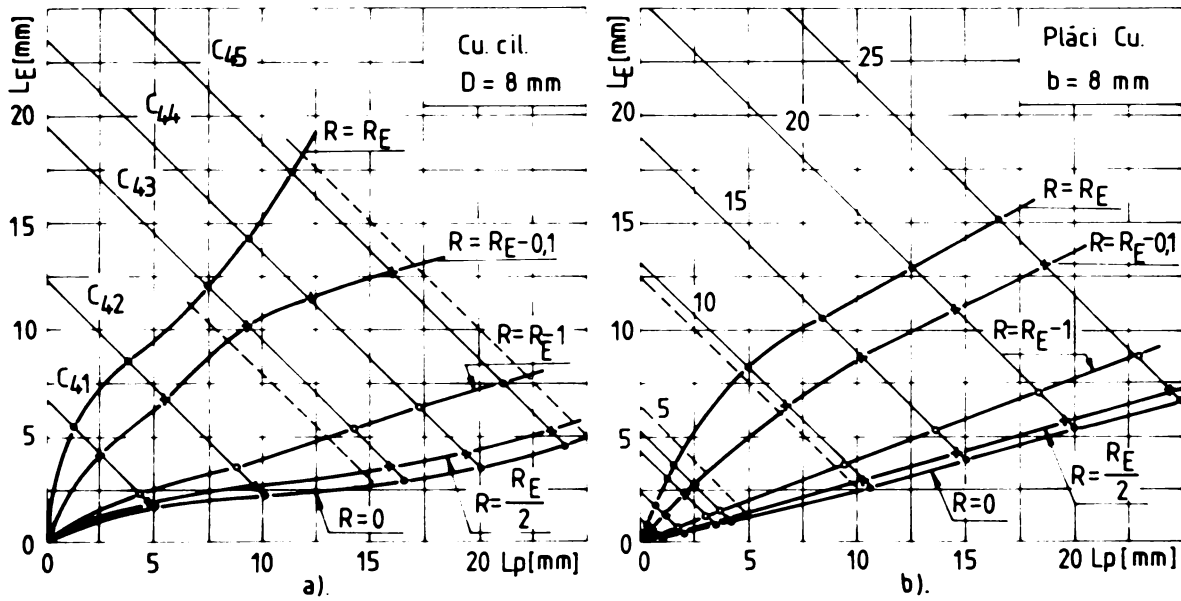


Fig. 3.20.

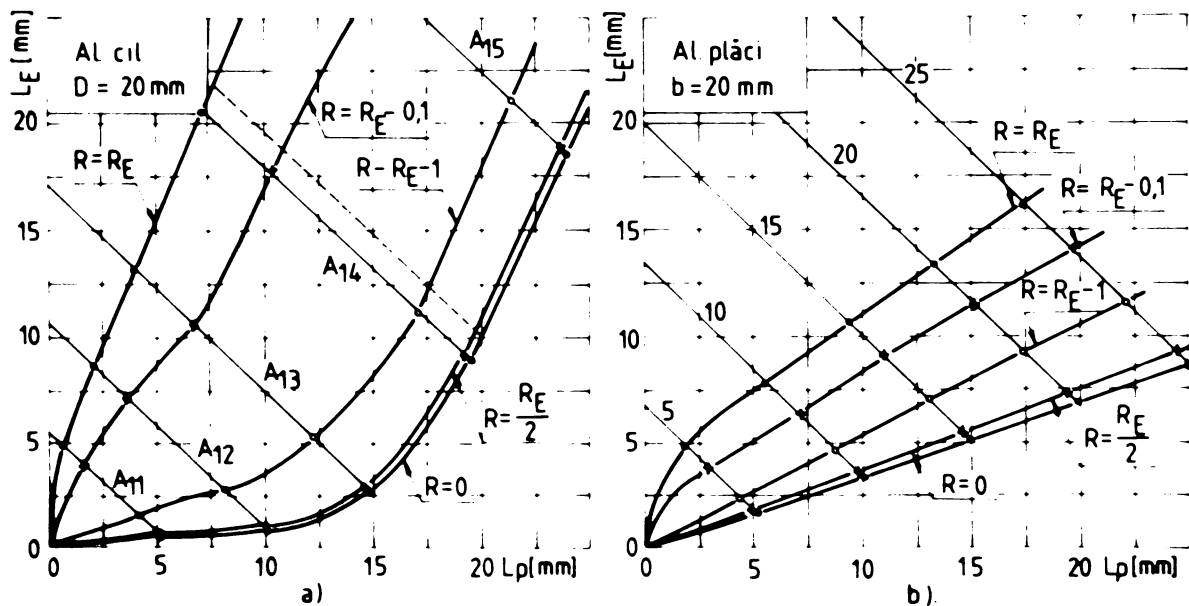
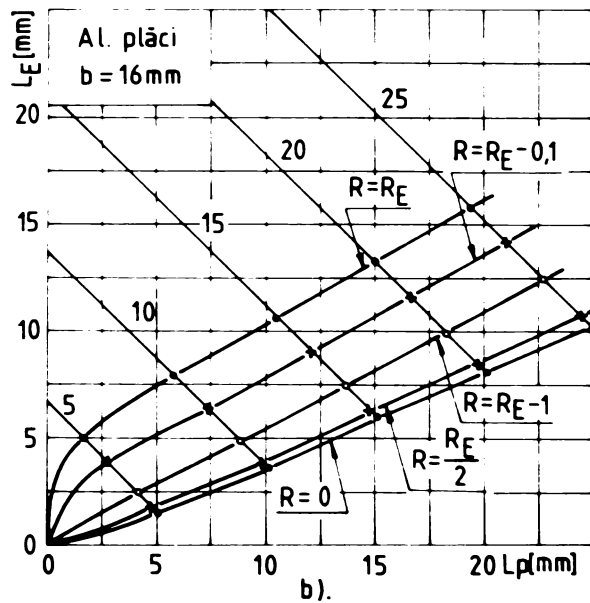
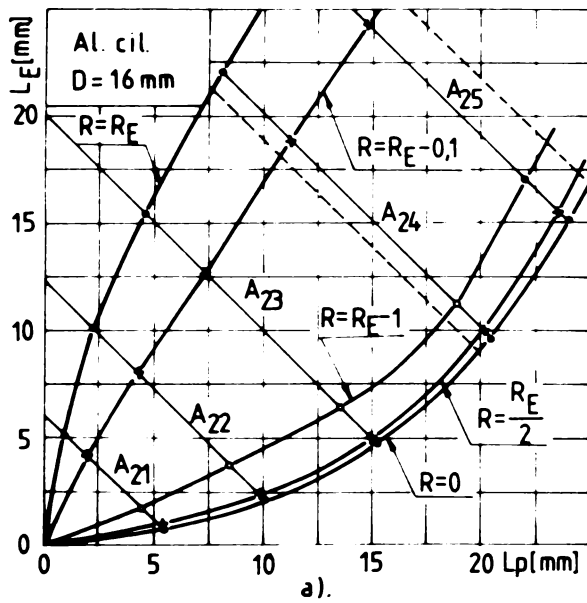
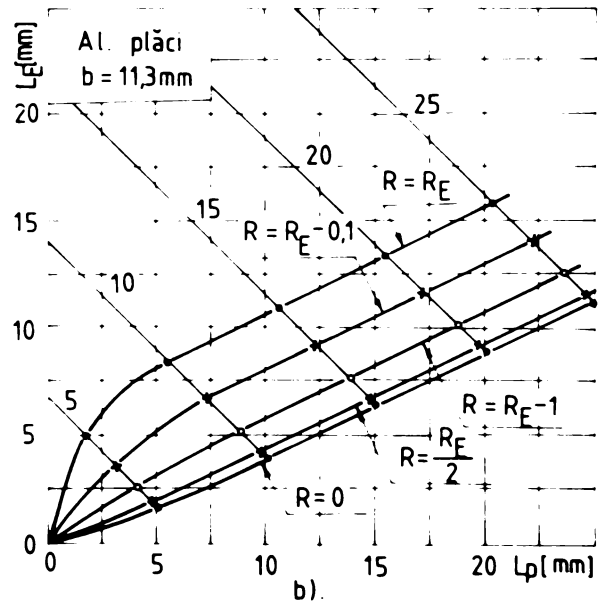
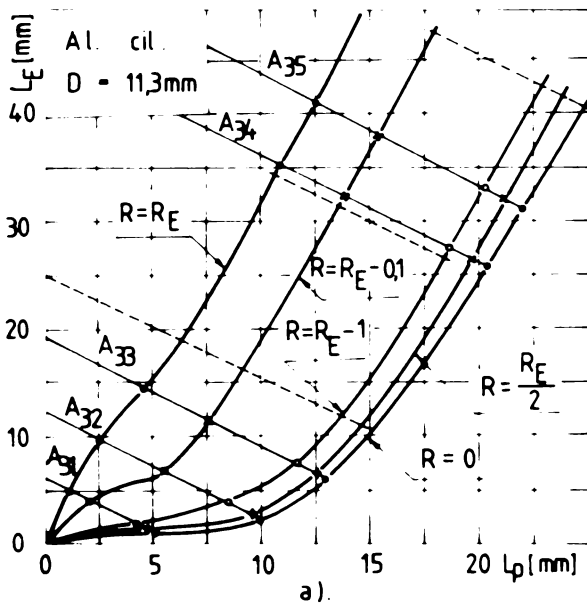


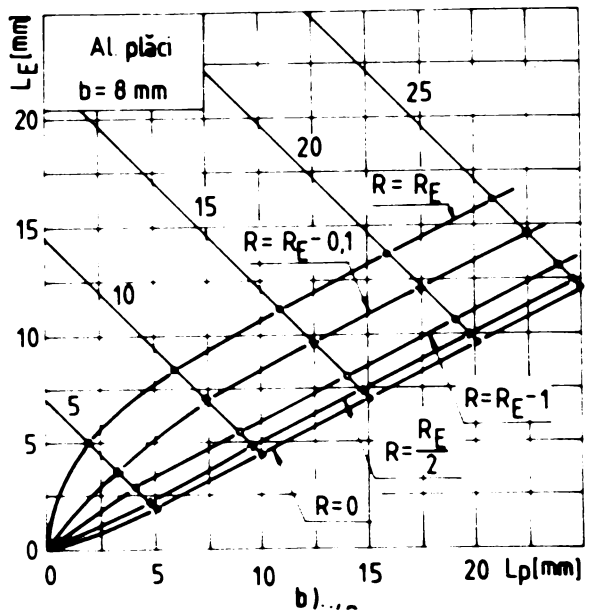
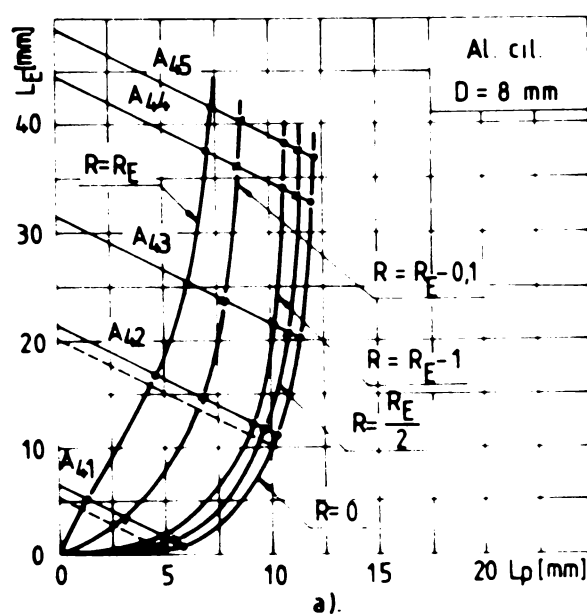
Fig. 3.21.



12.3.22.



12.3.23.



12.3.24.

S-au mai trasat dreptele de profil corespunzătoare lungimilor de avans efective (linie continuă) și a celor nominale (linie întreruptă) în cazurile în care ele nu au corespuns cu cele experimentale.

Se constată că la electrozii cilindrici din cupru (fig. 3.17, a + fig. 3.20, a) reprezentările $L_E = f(L_P)$ sînt în general linii curbe cu raze de curbura care variază cu adîncimea de prelucrare în mod diferit la distanțe radiale diferite. Aceasta presupune o modificare neuniformă a suprafeței generate, caracterizată de faptul că raportul L_E/L_P nu este constant nici în funcție de adîncime la aceeași distanță radială, nici în funcție de distanța radială la aceeași adîncime.

Atît curbele $L_{Emin} = f(L_P)$ cît și $L_{Emax} = f(L_P)$ prezintă variații cu punct de inflexiune, respectiv pornesc din origine cu valori $\lambda_L = dL_E/dL_P$ mari care scad pînă la un punct după care cresc din nou. Fenomenul este mai evident la abscise $R = R_E$, cît și prin valorile inițiale mai mari ale uzurilor relative liniare cît și prin variațiile mai mari ale acestora.

La electrozii din placă de cupru (fig. 3.17, b + fig. 3.20, b) inflexiunea lipsește. Curbele $L_E = f(L_P)$ la $R = ct.$ pleacă din origine cu pante diferite care scad diferit pînă la adîncimea nominală de aproximativ 10 mm, după care se transformă în drepte oblice avînd tendința de a deveni paralele între ele. În senele în care dreptele au pante unghiulare diferite uzurile relative liniare sînt constante în timp, dar variabile în spațiu avînd loc o modificare proporțională cu adîncimea a suprafeței prelucrate. În senele în care dreptele devin paralele uzurile relative liniare sînt constante în timp și în spațiu; profilul suprafeței reproduse rămîne constant. Se vede că profilul de egală uzură se obține mai întîi în sens axial al electrodului placă, între $R = R_E$ și $R = R_E - 0,1$ mm și apoi se extinde treptat spre axa electrodului.

Alura comună inițială a variațiilor de uzuri liniare la electrozii plăci cu cei cilindrici arată că, la începutul prelucrării, preponderenți în procesul de uzare neuniformă sînt factorii geometrici, iar după scăderea curburilor și creșterea adîncimii preponderente devin procesele de evacuare. Fenomenul este evident la electrozii cilindrici pe seciunea de milimetru din vecinătatea peretelui vertical. După tendința inițială de stingere a profilului de egală uzură, curbele de la $R = R_E$ și $R = R_E - 0,1$ ies din paralelism, depărtîndu-se, mai ales la diametre mici, cînd după o anumită adîncime apare concavitatea pereților verticali.

La electrozii cilindrici din aluminiu (fig.3.21,a + fig.3.24,a) uzurile relative mai mari decât la cupru determină o repartizare neuniformă mai rapidă a uzurilor și o influență mai pronunțată a proceselor de evacuare care duc la creșteri mari ale coeficientului unghiular al tangentelor la curbele $L_p = f(L_p)$, odată cu creșterea adâncinii de prelucrare. La diametri mici creșterea acestui coeficient este proporțională la distanța diferite de axa de simetrie ca urmare a scinderii vitezei de reproducere a suprafeței (V), în timp ce forma acestei suprafețe rămâne relativ neschimbată.

La electrozii plăci din aluminiu (fig.3.21,b + fig.3.24,b), procesul de echinare a fersei cavitații este asemănător cu cel de la electrozii plăci din cupru cu deosebirea că tangența de liniarizare a curbelor apare la adâncini mai mici și cea de stingere a profilului de egală uzură este mult mai evidentă la diametri mici. Diferențierile provin atât din valoarea absolută a coeficientului de uzură relativă volumică cât și din evoluția și interdependența proceselor din interstițiul de lucru; dimensiunile cât și natura materialului de electrod având o influență deosebită.

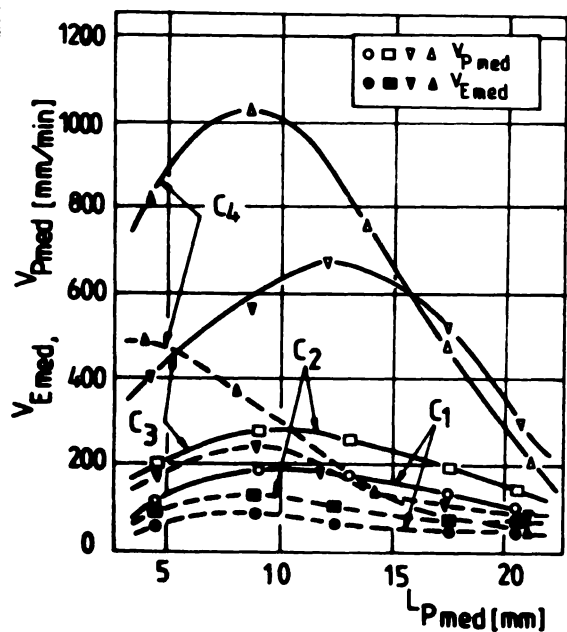


Fig.3.25.

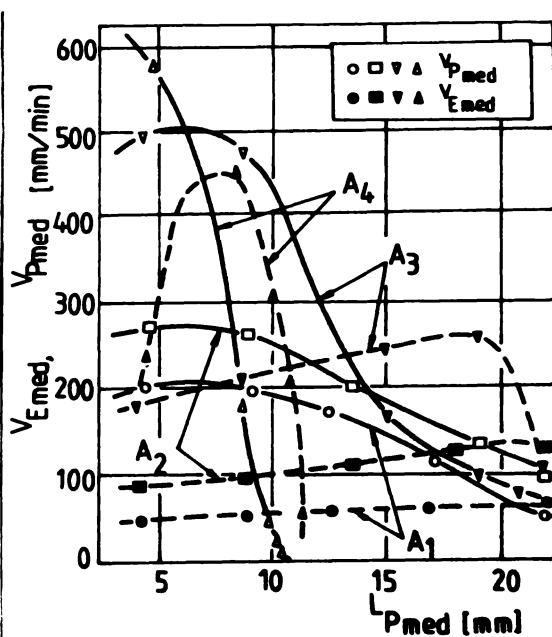


Fig.3.26.

În fig.3.25 pentru electrozii cilindrici din cupru și fig.3.26 pentru cei din aluminiu s-au reprezentat variațiile vitezelor medii de prelucrare, V_{Pmed} , și de uzură, V_{Emed} , în funcție de adâncimea medie a cavitațiilor prelucrate. Pentru o urmărire cât mai fidelă a proceselor la diferite adâncimi valorile medii ale vitezelor s-au calculat pe trepte de adâncini :

$$v_{med} = \frac{V_{PN} - V_{EN(n-1)}}{t_n - t_{(n-1)}} \cdot \frac{1}{A_{TP}} \quad (\text{mm/min)},$$

$$v_{med} = \frac{V_{PN} - V_{EN(n-1)}}{t_n - t_{(n-1)}} \cdot \frac{1}{A_{Ti}} \quad (\text{mm/min}) \quad (3.32)$$

unde V_{PN} , V_{EN} , t_n reprezintă volajul prelucrat din piesă, cel uzat de electrod și timpul prelucrării la eficiența treptei de eficiență considerată, iar $V_{P(n-1)}$, $V_{E(n-1)}$, $t_{(n-1)}$ sînt aceleași mărimi la intrarea în treapta de eficiență considerată.

Curbele $v_{med} = f(L_{Pmed})$ s-au desenat cu linie continuă, iar $v_{med} = f(L_{Pmed})$ cu linie întreruptă. Elementele de simbolizare a electrozilor sînt cele din tabelul nr.3.1. Pentru a ușura interpretarea rezultatelor se analizează în tabelul nr.3.4. variantele posibile de combinare a variațiilor vitezelor medii de reproducere a suprafețelor la Q și KT , în condițiile în care s-au desfășurat experiențele, adică pentru cazul prelucrării cu copiere forșei, cu polaritate directă, cu gaterare de impulsuri dependente și cu evacuare naturală a produselor eroziunii. Se remarcă faptul că oricare dintre cele 9 situații posibile, precum și trecerea de la una la alta pot fi (și în mod frecvent sînt) rezultatul suprapunerii mai multor efecte ale cauzelor probabile tipice menționate.

În analiza lor și studiind alure curbelor se poate recunoaște succesiunea și dinamica proceselor din interstițiu.

În general se constată că la începutul prelucrării, în prima fază a uzării muchiilor și formării zonei de racordare a interstițiului, atât vitezele de prelucrare sînt și cele de uzare cresc tindînd spre un punct de maxim. Intensitatea locală mare a deșeurilor în zona muchiilor și schimbarea bruscă a direcției de curgere a sedimentului de leuă care transportă produsele eroziunii, determină formarea prizelor aglomerări de particule solide la muchii. În același timp în partea frontală plană a electrozilor timpul de răgîzire a bulilor de gaz pînă la evacuarea lor prin interstițiu vertical este mai mare față de cel corespunzător suprafețelor curbe. Cu creșterea eficienței scade curbura muchiilor, formîndu-se trasee de evacuare mai ușoare. Probabilitatea scurtecircuitelor prin punți de aglomerări solide scade, șanțul se stabilizează micșorîndu-se numărul de impulsuri la scurtcircuit și în gol. În același timp scade și numărul impulsurilor fictive în AL , precum și al descărcărilor în gaz. Creșterea numărului de impulsuri de leuă determină în e-

Tabelul nr.3.4.

Situații de variație a vitezelor de generare a suprafețelor la prelucrarea prin eroziune electrică cu polaritate directă

Nr. crt.	Variația vitezelor de generare		Cauze probabile
	$v_p \left(\frac{dI}{dI_0} \right)$	$v_s \left(\frac{dI}{dI_0} \right)$	
1	↗	↗	Creșterea I_{p0} în cazul scăderii unor impulsuri nefective (stabilizarea anodului, înprospătarea AN, îmbunătățirea evacuarii produselor gazoase).
2	↗	→	Creșterea I_{p0} în cazul scăderii I_{s0} (îmbunătățirea evacuarii)
3	↗	↘	Modificarea raportului de repartitie a energiei între C_0 , C_1 , C_2 (modificarea proprietăților lichidului de lucru, modificarea caracteristicilor descărcărilor)
4	→	↗	Creșterea I_{p0} în cazul impulsurilor nefective (stabilizarea anodului, în paralel cu îmbunătățirea evacuarii)
5	→	→	Stabilizarea sistemului de alimentare
6	→	↘	Scăderea I_{p0} și creșterea numărului de impulsuri nefective (oscilații ale anodului prin scurtcircuite laterale prin particule mari; întreruperi ale procesului de mărunțire)
7	↘	↗	a) Modificarea raportului de repartitie a energiei între C_0 , C_1 , C_2 (modificări de caracteristici fizico-chimice ale AN și a celor dependente ale impulsurilor) b) Creșterea (f-f) și apariția peliculizării anodului.
8	↘	→	a) Creșterea I_{p0} în cazul scăderii I_{s0} prin îmbunătățirea evacuarii. b) Peliculizarea anodului (stabilizarea unor condiții de peliculizare în timpul funcționării stabile)
9	↘	↘	Scăderea (f-f) prin îngroșarea AN, oscilații ale sistemului de anod sau prin creșterea volumului de gaz în interstii.

această situație determină creșterea vitezelor de prelucrare și a celor de uzare.

Atingeres punctului de maxim și evoluția ulterioară a vitezelor medii de generare depinde mult de natura materialelor și de diametru.

La electrozii din cupru se observă că vitezele de uzare ating punctul de maxim înainte celor de prelucrare (situația nr.2 din tabelul nr.3.4.). Ele scad evident în timpul maximumului atins de v_p (trezind prin situațiile nr.2 și apoi nr.6), și au tendința de stabilizare în timp ce v_p scade cu creșterea adâncității (situația 8).

Intensitatea acestor variații este amplificată și succesiunea lor este grăbită la scăderea diametrului electrozilor. În faza inițială a prelucrării pe măsură ce se formează traseele de evacuare produsele eroziunii trec mai ușor din interstițiul frontal în cel lateral. La urmare scade frecvența impulsurilor de mărunțire și viteza de prelucrare crește. Interstițiul vertical, care se formează treptat are la început grosime mica, practic egală cu grosimea celui frontal. În acest timp pot apărea descărcări laterale favorizate și de particulele solide în treazait. Unele dintre acestea, de dimensiuni mai mari, pot da scurtcircuite laterale care nu pot fi înăbușate de către reacția externă a sistemului de avans decât printr-o retragere a electrozului pe o distanță relativ mai mare decât în cazul scurtcircuitelor frontale. Astfel apar oscilații ale electrozului care la răsă frecvența impulsurilor de aers în gol, fapt care oprește creșterea vitezei medii de prelucrare. În perioadele de aers în gol se întrerupe și procesul de mărunțire, concentrația descărcărilor în zona periferică crește în raport cu cea din zona axială, în timp ce frecvența f_m scade, cu toate că datorită retragerilor frecvente ale electrozului volumul aglomerărilor de deșeu solid în interstițiul crește temperatură. Rezultă o scădere a vitezelor de uzare în timpul lărgirii canalului vertical. Cu creșterea adâncinii procesul de mărunțire repetată a produselor solide în interstițiul activ neutralizează particulele cu diametrul mai mic care parcurg mai ușor canalul lateral lărgit, permițând astfel restabilirea avansului constant. Viteza medie de uzare tinde la rândul său să se stabilizeze în timp ce viteza medie de prelucrare scade, mai sever în cazul diametrelor mici unde evacuarea este mai dificilă.

La electrozii din aluminiu succesiunea situațiilor, conform tabelului nr. 3.3 este 1-4-7-8-9, cu observația că vitezele medii de prelucrare ating punctul de axia înainte de cel de uzare și că, la diametre mici, se pun în evidență valori critice ale adâncimii la care fiecare dintre aceste viteze scade brusc. Rezultă că după formarea traseelor de evacuare în timp ce viteza de reproducere a suprafeței electrodului continuă să crească cu creșterea frecvenței impulsurilor efective, viteza de generare a suprafeței prelucrate la CP se stabilizează și apoi scade ca urmare a schimbării raportului de repartiție a energiei între CP, AN, CL. Fenomenul poate fi influențat de apariția peliculelor protectoare pe anodul CP, de obicei pot acționa ambele cauze. Ipoteza pericolizării este mai plausibilă în cazurile în care evoluția descrisă mai sus precede scăderea brus-

că la vitezele de uzare la o anumită adâncime critică, fapt evident la electrozii A3 și A4, când s-a observat și coagificări în cavitățile prelucrate și s-a constatat în timpul încercărilor o încălzire pronunțată a electrozilor și a pieselor probă. Rezistența hidraulică a interstițiului depinde de natura mediului de lucru și de elementele geometrice ale suprafețelor active și pasive ale A3 și A4. Rezistența hidraulică depinde viteza de mișcare a mediului lichid și deci capacitatea de transport a acestuia și de r cire a electrozilor și obiectelor de prelucrare.

Fiecare poziție a unui anumit electrod la un anumit regim de prelucrare îi corespunde o temperatură medie integrală a elementelor spațiului de lucru. Această temperatură crește cu scăderea creându-se condițiile de pelicularizare a mediului până la atingerea unei valori critice la care, în condiții de evacuare naturală, începe fierberea cu bule a mediului de lucru. Cantitatea de gaz din interstițiu crește, putându-se ajunge la fierberea totală, cu peliculele a lichidului din interstițiu. În acest caz scade brusc productivitatea prelucrării și uzura electrocului; are loc coagificarea.

Fenomenele până în evidență de experiment explică mecanismul suprapunerii peste influența factorilor geometrice a efectelor determinate de înălzirea proceselor din spațiul de lucru.

CAPITOLUL 4

PROPERTĂȚI MECANICE, FIZICĂ ȘI COROZIUNĂ LA AROZIIUNE MATERIALE A UNUI TIP MATERIAL DE ELECTROZI

4.1. Rezistența la eroziune a materialelor de electrozi

Pentru a îndeplini în condiții bune funcțiile electrozului de transfer la eroziune electrică, materialul din care acesta este confecționat trebuie să prezinte o serie de însușiri, a căror însușire corelată să-și dea o bună rezistență la eroziune electrică.

Principalele condiții necesare unui bun material de electrod [49], [55], [88], [150], [157], [183], sînt :

- să înmagazineze pînă la topire și vaporizare o cantitate de energie cît mai mare, adică să aibă temperaturile de topire și de vaporizare cît mai ridicate, căldura specifică, cea latentă de topire și de vaporizare cît mai mari;
- să disipe cît mai multă energie calorică prin conducție, adică să aibă conductibilitate termică mare pentru a izita prin transmiterea de căldură, a pătrunderii izotermeic de topire și de vaporizare spre interiorul materialului;
- să fie ușor prelucrabil pentru confecționare avantajoasă din punct de vedere tehnico-economic a electrozilor;
- să prezinte stabilitate dimensională, determinată de rigiditate, absența tensiunilor interne reziduale și un coeficient de dilatare termică mic;
- să fie disponibil și la un preț de cost relativ scăzut.

Pe de altă parte, la constante termofizice date, rezistența la eroziune a materialului de electrozi depinde și de caracterul și dinamica energiei a sursei termice generată de impuls, care la rîndul ei, este determinată de parametri impulsului.

Prin rezistență la eroziune electrică a unui material conductor [48], [144], [148], se definește capacitatea acestuia de a-și păstra integritatea la acțiunea descărcărilor electrice, pe baza proprietăților sale intrinseci, independent de motorii geometrici și spațiali de lucru și fără influența proceselor secundare de peliculizare, de aglomerare a depunerilor, mărșărire, dispersare și evacuare a proceselor solide și gazoase din interstiții. Este evident că determinarea precisă a rezistenței la eroziune este difi-

oală din cauza condițiilor impuse de definiție. Cînd în prezent nu există norme standardizate pentru încercări de rezistență la eroziune.

Comportarea la eroziune electrică a materialului de electrod în condiții tehnologice de prelucrare este caracterizată de stabilitatea sa la eroziune și este măsurată de coeficientul de prelucrabilitate relativă (vezi cap.2) care, din punctul de vedere al electrodului de transfer, este denumit coeficient de stabilitate la eroziune, ϵ_{pe} [5] [183], și definit prin relația (2.31). Rezultă că rezistența la eroziune este un caz particular al stabilității.

Censurăm că noțiunea de durabilitate la eroziune electrică, cu care se confundă uneori stabilitatea, [144], trebuie păstrată exclusiv pentru definirea timpului de lucru efectiv după care un electrod nou atinge limita uzurii admise [175].

Criterial stabilității este important pentru caracterizarea materialului de electrozi, dar nu este suficient, existînd posibilitatea ca două materiale diferite să aibă același coeficient ϵ_{pe} dar să dea, în aceleași condiții, productivități mult diferite. Pentru ca productivitatea să nu fie luată numai relativ în considerare se introduce o mărime, numită "coeficient de eficacitate", η_{pe} și definită prin volumul de material prelevat în unitatea de timp și pe unitatea de uzură relativă :

$$\eta_{pe} = \frac{V}{V_0} = \epsilon_{pe} \cdot \eta_p = \frac{V}{V_0} \quad (\text{cm}^3/\text{min}) \quad (4.1)$$

Valoarea acestui coeficient este cu atât mai mare cu cît, pe lângă o bună stabilitate la eroziune, electrozii confecționați din materialul studiat dau și o productivitate mai mare.

4.2. Materiala utilizată pentru confecționarea electrozilor de transfer

La confecționarea electrozilor pentru eroziunea electrică se utilizează :

- unele materiale electroconductoare usuale, cu proprietăți termofizice și tehnologice favorabile : cupru, alame, aluminiu și aliajele lui, wolfram, oțel;

- materiale speciale, elaborate în acest scop : grafit, paeu-dealiaje cu componente refractare (wolfram, titan, carburile acestora, molibden, tantal, grafit, nitruzi, boruri, siliciuri) și componente conductoare (cupru, cupru-cobalt, argint, aliaje de cupru).

Cuprul este cel mai frecvent utilizat pentru electrozi la pre-

lucrarea oțelului. La preferință se alege cuprul electrolitic, pentru foarte bună sa conductibilitate. Prelucrarea acestuia prin aşchieră este însă greoaie din cauza aderenței aşchiiilor pe suprafețele sculelor și de aceea se aplică adesea alte procedee: deformări plastice (tragere, extrudare, ambutisare, forjare), tăiere cu tăișuri asociate (stanșare), metalizare sau depuneri galvanoplastice prin care se fabrică electrozi cu un strat activ de 2,3 mm. [59], [144], [197]. Aceștia din urmă sînt utilizați mai ales în operații de suprafiniere datorită calității suprafeței stratului de material depus electrolitic și la prelucrarea cavităților de dimensiuni mari, unde volumul electrozilor consumați este exagerat de mare.

Pentru mărirea prelucurabilității se mai folosește cuprul slab aliat. Spre exemplu $Cu + 0,5 + 0,7\%$ Zn are o uzinabilitate foarte bună, păstrînd în același timp 95% din conductivitatea termică și electrică a cuprului electrolitic.

Grafitul este al doilea material ca pondere de utilizare în metalurgie (pe plan mondial el ocupă primul loc). Grafitul pentru electrozi se deosebește de grafitul folosit în alte scopuri printr-o structură densă și de granulație fină care conferă materialului rezistență mecanică la însovelire și compresiune, puritate, conductivitate termică și electrică relativ bună. Grafitul special pentru electrozi electrici în funcție de proprietăți și de comportarea în procesul de prelucrare se clasifică [157], :

- grafit cu densitate medie ($1,6 + 1,7 \text{ g/cm}^3$), și granulație fină, avînd o porozitate de $16 + 25\%$, utilizat la prelucrarea cu productivitate mai mare a oțelurilor, în regiuni de degroșare;

- grafit cu densitate mare ($1,7 + 1,8 \text{ g/cm}^3$) și granulație fină, avînd porozitate $10 + 16\%$, cu domeniu larg de utilizare, prezentînd o uzură relativă mai scăzută la productivități ale prelucrării ceva mai mici decît grafitul mai poros;

- grafit dens (aprox. $1,85 \text{ g/cm}^3$) cu granulație foarte fină și porozitate mică ($7 + 10\%$) utilizat la confecționarea electrozilor de gașar și de dimensiuni precise. Acest material prezintă o uzură relativă mai mică și poate fi folosit și în regiuni de finisare, chiar la finisare.

În afară de grafit se elaborează materiale speciale pentru prelucrarea unor piese din aliaje greu fuzibile sau pentru efectuarea unor operații care cer precizie și finete.

Metoda de elaborare a materialelor de electrozi cea mai frecvent folosită este metalurgia pulberilor, singura capabilă să rea-

lizare materiale compuse, cu posibilități largi de variație a concentrațiilor, din componente care în sine obișnuit nu pot da împreună aliaje întrucât nu formează compuși chimici, soluții solide sau amestecuri mecanice de cristalizare. Proprietățile intrinseci ale elementelor care intră în pseudo-aliajele obținute prin presare și sinterizare, în interdependență cu tehnologia de realizare a structurii comune care imprimă corpului agregat din pulberi însușiri proprii, determină obținerea unei game largi de proprietăți putând asigură funcțiile de electrod pentru eroziunea electrică [4], [11], [36] [101], [102], [104], [190], [191].

Materialul special cel mai răspândit, după grafit, este pseudo-aliajul W-Cu având 70 + 80 % W și 30 + 20 % Cu și putând fi obținut [209], prin trei metode: sinterizarea compoziției conform rețetei de W-Cu, obținerea unui comprimat poros de W și impregnarea lui cu Cu, sau obținerea unui comprimat poros W-Cu și impregnarea suplimentară ulterioară cu Cu. Electrozii confecționați din W-Cu dau rezultate foarte bune [157], [183], [209] la prelucrarea aliajelor dure, a oțelurilor înalt aliate sau orice aliaje la care sînt necesare prelucrări de orificii calibrate [167].

S-a încercat o gamă foarte largă de alte materiale speciale pentru electrozi [44], [49], [56], [150], [163], [172], [187], [188], dintre care amintim:

- electrozi din straturi succesive de materiale refractare și cupru, depuse prin scoparire;
- electrozi din materiale usuale (Cu, Ni, Al, Zn, Fe) pe suprafața cărora se depun oxidurile;
- compoziții cu matrice de Cu 95%, sau alama 97%, cu adăcări de oxizi de cupru de mangan de siliciu de vanadiu, în proporții diferite. Oxizii din aceste compoziții duc la a rirea cantității de ioni negativi în colona descărcărilor, fapt care permite găsirea unor parametri de impuls la care se reduce uzura relativă și crește productivitatea;
- alte materiale cu matrice de cupru și cu diferite faze refractare dispersate (Cu-Mo; Cu-Al₂O₃; Cu-WO₃; Cu-TiO₂; Cu-C; Cu-N; Cu-NC; Cu-TiC; Cu-TaC).

Toate aceste materiale necesită utilaje și tehnologii de elaborare pretențioase și apelează la unele elemente cu disponibilitate redusă. În literatură nu se prezintă sistematic în legătură cu tehnologiile de elaborare și cu domeniile de optimizare a concentrației componentelor.

4.3. Influența fazelor refractare asupra procesului de masă a electrozilor

Relevarea termică, acceptată unanim ca principala componentă a îndepărtării materialului din craterul de eroziune sub formă de vapori și de picături lichide, este considerată ca un efect al sursei termice plane, nestaționară, situată pe suprafața electrozului și având forma și dimensiunile petei electrodice a descărcării. Viteza de propagare a căldurii în masa materialului este determinată în primul rând de natura acestuia, astfel încât practic, poate fi considerată limitată la un material dat. Rezultă că mecanismul transferului căldurii are loc prin acumularea acesteia în stratul de material limitrof sursei termice și apoi conducția ei spre interior.

Pentru a urmări funcționarea sursei termice se poate considera convențional, [137], că energia unei descărcări singulare, W_1 , este constituită din n porții distincte, ΔW_{1q} , transmise succesiv electrozilor:

$$W_1 = \sum_{q=1}^n W_{1q} \quad (4.2)$$

Temperatura sursei termice fiind mult mai mare decât temperatura de vaporizare a materialului metalic, cantitatea elementară ΔW_{11} transmisă la suprafața electrozului vaporizează totdeauna un volum necorespunzător oricât de mic, de metal pentru care se consumă ΔW_{11v} , iar restul energiei se acumulează în stratul de suprafață și se transmite electrozului.

$$\Delta W_{11} = \Delta W_{11v} + \Delta W_{11L} + \Delta W_{11M} \quad (4.3)$$

unde W_{11L} - energie transmisă și consumată pentru încălzirea și topirea materialului aflat sub stratul care s-a vaporizat; ΔW_{11M} - energie transmisă prin conducție în materialul solid.

Cantitatea elementară următoare, ΔW_{12} , vaporizează metalul care forma limita anterioară, I, între vapori și lichid (fig. 4.1), creând volumul fazei gazoase, concomitent cu deplasarea limitei lichid-solid, II, înspre interior.

Considerând că sursa termică se păstrează pe limita interfașă I rezultă că pe măsura incidenței energiei la suprafața electrozului, deci pe suprafața I, sursa se deplasează odată cu acest front.

Pentru studiarea calitativă a procesului se consideră următoarele ipoteze simplificatoare:

- a) materialul este omogen și caracteristicile lui termofizice

zice nu variază în timp;

b) procesul de vaporizare limitată, la un flux termic dat, creșterea temperaturii la limita vapor-lichid și determină trecerea regiunii termice nestaționară într-una staționară față de un sistem de coordonate legat de frontul de vaporizare;

c) temperatura la interfața vapor-lichid este constantă și egală cu temperatura de vaporizare;

d) transmiterea căldurii prin convecție în metalul lichid se neglijează; și

e) transmiterea căldurii se face unidirecțional, în direcția scăderii X a materialului, iar variația temperaturii acestuia are loc după o lege exponențială, depinzând de densitatea de energie a sursei termice și de conductibilitatea termică a materialului.

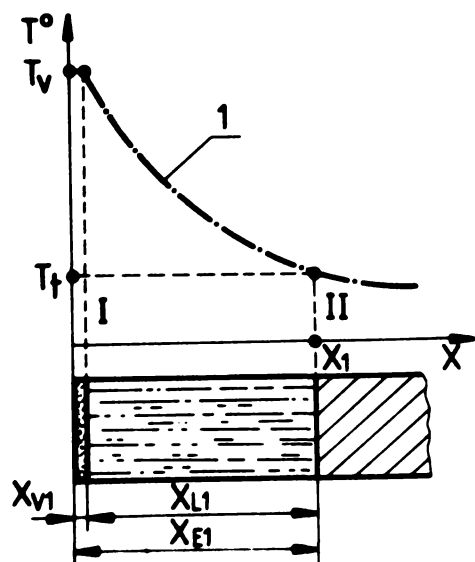


Fig. 4.1.

În timpul Δt în care sursa termică furnizează cantitatea elementară de energie ΔH_1 , ea se deplasează în rîndul în direcția X cu distanța X_{v1} , determinată de volumul de material vaporizat V_v . Concomitent se deplasează și limita lichid-solid pe distanța X_{l1} , determinată de volumul de material trecut în stare lichidă, V_{l1} . Dacă se presupune că întreg materialul care a suferit transformări de fază este expulsabil, rezultă că volumul erodat, V_{h1} , la materialul monolit omogen ar fi:

$$V_{h1} = V_{v1} + V_{l1} \quad (4.4)$$

respectiv adîncimea de pătrundere, X_{h1} , va fi :

$$X_{h1} = X_{v1} + X_{l1} = X_1 \quad (4.5)$$

...acă în aceleași condiții se consideră un material cu structură eterogenă, avînd în masa metalică de bază o fază dispersă cu constante termofizice diferite, cîmpul temperaturilor în interiorul electrocului suferă modificări.

În cazul simplificat al unei faze refractare lamelare de grosime X_2 , dispusă la abscisa $X > X_1$, perpendicular pe direcția de propagare a căldurii (fig. 4.2) și înglobată în masa metalică de bază curba 2 de repartiție a temperaturii se modifică față de exponențiala 1, lamela refractară comportîndu-se ca un ecran cu difuzivitate termică $a_2 < a_1$; a_1 fiind difuzivitatea materialului de bază.

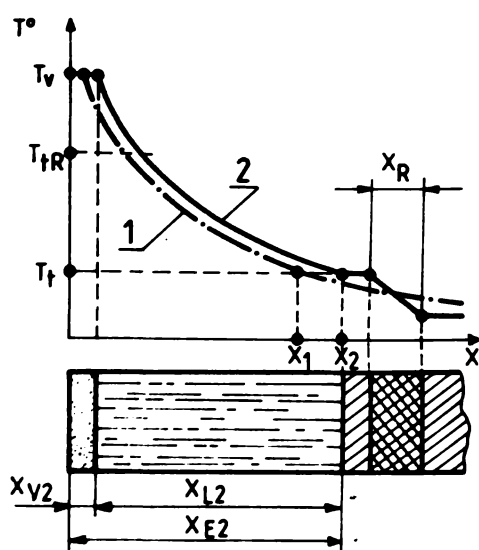


Fig. 4.2.

$$a_R = \frac{\lambda_R}{c_R \cdot \rho_R} ; \quad a_M = \frac{\lambda_M}{c_M \cdot \rho_M} \quad (4.6)$$

λ - conductivitatea termică
 c - căldura specifică
 ρ - densitatea

Pept urmare, la aceeași energie incidentă la suprafața electrodului, volumul de lichid V_{L2} este mai mare datorită efectului de ecran termic exercitat de lamela refractară. Adâncimea lichidului crește de la X_1 la X_2 , corespunzător intersecției dintre curba 2 și temperatura de topire T_f . Acumularea de căldură în fața ecranului duce la o ușoară mărire a fazei de vapori astfel că rezultă și o adâncime erodabilă $L_{L2} > L_{L1}$.

ce la o ușoară mărire a fazei de vapori astfel că rezultă și o adâncime erodabilă $L_{L2} > L_{L1}$.

Acum materialul refractar se află la o abscisă $X_3 < X_1$ (fig. 4.3) volumul de lichid V_{L3} limitat la distanța X_3 este mai mic, temperatura se medie mai ridicată, iar procesul de vaporizare este mai activ, mărind în continuare volumul fazei de vapori.

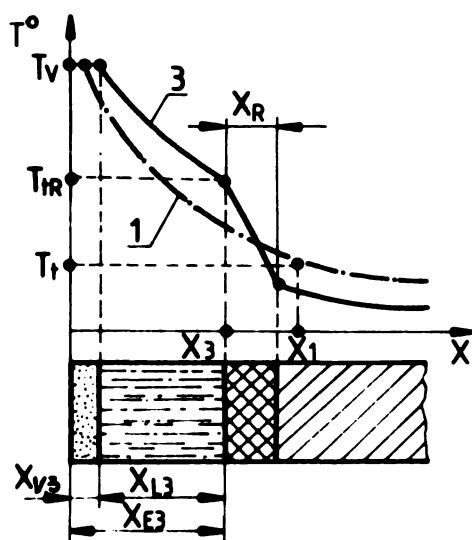


Fig. 4.3.

La o dispunere și mai apropiată a ecranului refractar (fig. 4.4) temperatura acestuia la suprafața anterioară poate depăși un punct critic de topire T_{CR} , cu apariția fazei lichide a materialului refractar și adâncirea L_{L4} . În timp ce faza lichidă provenită din metalul de bază se supraîncălzește. Consumul energetic mai mare în fața ecranului termic determină micșorarea adâncimii erodeabile, $L_{L4} < L_{L3}$.

În sfârșit, la o poziție a ecranului termic și mai apropiată de sursă se poate ajunge la situația în care temperatura în spatele lamelei să depășească temperatura de topire a masei metalice de bază. Se ajunge în acest caz la fragmentarea fazei lichide într-una anterioară, supraîncălzită, de adâncime L'_{L5} , formată din lichid provenit din metalul de bază și lichid provenit din materialul refractar și dintr-una posterioară de temperatură mai joasă și de grosime L''_{L5} . Dezvoltată în spatele ecranului, adâncimea erodabilă termică L_{L5} în acest caz va fi :

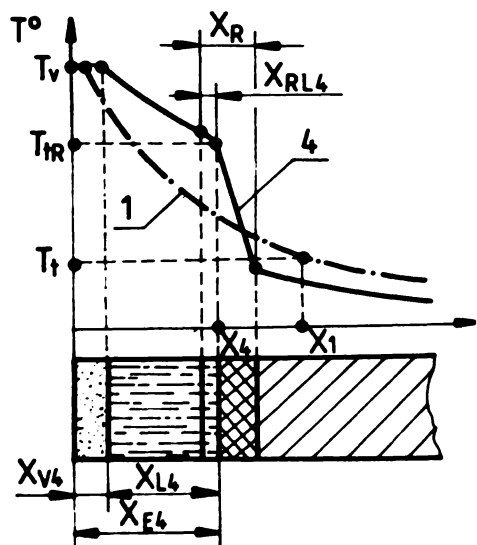


Fig. 4.4.

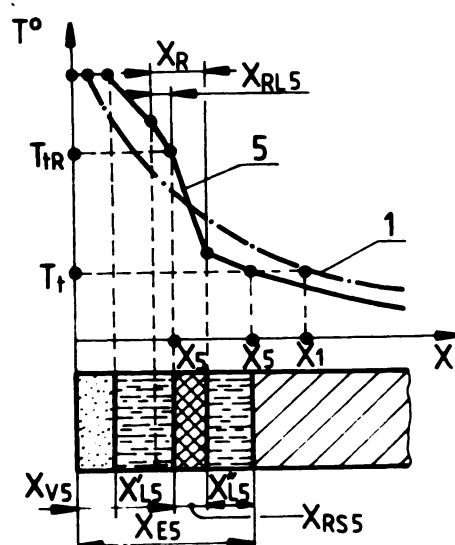


Fig. 4.5.

$$\lambda_{L5} = \lambda_{L5}^I + \lambda_{RS5} + \lambda_{L5}^V \quad (4.7)$$

unde λ_{RS5} reprezintă scăderea netransformată de fază din materialul refractar care, deși rămas în stare solidă pierde legătura mecanică cu matricea solidă a electrodului și poate fi expulsat odată cu restul lichidului, fapt care face ca abscisa λ_{L5} să fie mai mare decât λ_{L4} . Avînd în vedere gradientul mare al câmpului termic în lăsaia ecran se vede că o creștere mică a abscinței λ_{L5} ar fi suficientă pentru trecerea cazului 5 în cazul 4. Pe de altă parte discontinuitatea refractară poate fi menținută în structură prin legăturile sale laterale.

Cu excepția dispunerii din cazul 2, în toate celelalte poziții analizate faze greu fuzibilă joacă rol de ecran, absorbînd la încălzire și la topire o cantitate mai mare de căldură și împiedicînd propagarea fluxului termic în corpul electronic. Efectul ecranant este cu atât mai important cu cît mai mare este inegalitatea $\alpha_R < \alpha_M$.

Cu cît distanța între ecranul refractar și sursa termică este mai mică cu atât crește faza de vapori și supraîncălzirea lichidului din matrice precum și probabilitatea formării fazei lichide secundare (postericare). Apariția și dezvoltarea acestei faze fiind legată de timpul necesar coacșției, depinde în mod esențial de timpul de acțiune al sursei termice.

Acă se iau în considerare cazurile reale la care poziția, mărimea, orientarea și forma fazei refractare dispuse cu valori corectare și plasate în limite largi, iar câmpul termic este nestabil, procesul devine complicat și dificil de urmărit. Cu toate acestea, raționamentele prezentate calitativ permit presupunerea că

un material cu fază dispersă refractară peste constituit un electrod cu stabilitate la eroziune mai mare decât cel constituit exclusiv din masa metalică de bază.

4.4. Alaborarea pseudoceliazilor cu matrice de cupru și fază dispersă de grafit

4.4.1. Caracteristici ale materialului compus cupru-grafit

Materialulele compuse Cu-C pot fi elaborate în două variante calitative:

- grafit impregnat, fiind într-o rețea de grafit sinterizat cu porozitate mare se impregnează 25 + 35 % Cu;

- cupru grafitat, fiind în masa metalică de bază constituită din cupru, grafitul se află sub formă de fază dispersă.

Leși în prezent această categorie de materiale este ierarhizată după pseudoceliazile cuprului cu metalele greu fusibile, ea devine eficientă în foarte multe cazuri datorită prețului de cost relativ scăzut. Principalele sale performanțe sînt uzura relativ mijlocie, productivitate specifică a prelevării mijlocie, stabilitate a fermei la coeficient de umplere mijlocie, uzinabilitate bună [86], [150], [169], [173]. Iată de ce s-a considerat oportun să se elaboreze și să se cerceteze comportarea la eroziune a unui pseudoceliaz Cu-C, cu fază dispersă de grafit la care, occlinu-se dificultățile de obținere a scheletului refractar de la electrozii impregnați, este mult mai ușor să se obțină astit materialul ca stare cit și electrozii la formă și dimensiuni date.

Materialulele cu fază dispersă de grafit sînt, în marele lor majoritate anisotrope [163], [185], ca urmare a așezării orientate a grafitului în timpul procesului de presare.

Primele încercări de elaborare în R.S.R. a materialulelor Cu-C destinate confecționării electrozilor de eroziune electrică s-au inițiat la laboratorul de cercetări pentru metalurgia pulberilor de la Catedra de Tehnologia metalelor de la I.P. Cluj-Napoca [101]. În colaborare cu I.P. "T.V." Timișoara, Catedra Tehnologie Mecanică, în anii 1973-1975 s-a desfășurat un program de cercetări [7], [8], [16], [45], [102], care a urmărit influența regiunii mecanic de presare, a concentrației componentelor și a regiunii termic de sintezare asupra comportării la eroziune a acestui material.

4.4.2. Determinarea regiunii mecanic de presare a materialului Cu 95 C 5

4.4.2.1. Variante tehnologice de elaborare

În prima fază a cercetărilor s-a ales o concentrație fixă a componentelor (95% Cu și 5% grafit) și au fost realizate loturi de materiale cu regimul de sinterizare constant și regimuri de presare diferite [10], [102], [103], [105], tehnologia de elaborare fiind următoarea :

- amestecarea și omogenizarea pulberilor de cupru din sort MC mai-tare, avind granulație de 0,063 mm cu 5% grafit lamelar natural sort V40c, cu granulație de 0,040 mm;
- presare bilaterală pentru formarea precompactului;
- precintarizare de consolidare;
- presare izostatice I, de compactizare, cu presiuni P_1 diferite, între 1000 și 6000 daN/cm^2 ;
- sinterizare de detensionare la 500°C ;
- presare izostatică II, de recompactizare, cu presiuni P_2 diferite, între 1000 și 6000 daN/cm^2 ;
- sinterizare finală la 900°C .

upă modul cum s-au combinat regimurile de presare s-au realizat 18 variante tehnologice (tabelul nr.4.1).

Tabelul nr.4.1.

Variante tehnologice de presare a pseudopulberiiului Cu75-05

Nr. variantă	Presare I		ρ_a (g/cm^3)	C_p (%)	Nr. variantă	Presare II		ρ_a (g/cm^3)	C_p (%)
	P_1 ($\frac{\text{daN}}{\text{cm}^2}$)	P_2 ($\frac{\text{daN}}{\text{cm}^2}$)				P_1 ($\frac{\text{daN}}{\text{cm}^2}$)	P_2 ($\frac{\text{daN}}{\text{cm}^2}$)		
1	1000	1000	5,23	67,27	10	2000	4000	6,83	91,78
2	1000	1500	5,36	76,65	11	2000	6000	7,15	91,70
3	1000	2000	6,27	80,64	12	2000	5000	7,23	93,75
4	1000	2500	6,55	84,24	13	2000	6000	7,22	92,85
5	1000	3000	6,75	86,81	14	3000	3000	6,72	96,42
6	1000	3500	7,01	90,15	15	3000	3500	7,17	92,21
7	1000	4000	7,12	91,57	16	3000	6000	7,25	93,24
8	1000	4500	7,14	91,82	17	4000	4000	7,24	92,34
9	2000	2000	6,39	82,15	18	4000	6000	7,19	91,95

Materialele obținute cu densități aparente, ρ_a , variind între 5,23 și 7,29 g/cm^3 , respectiv compactități C_p , între 67 și 96%.

Compactitatea a fost determinată cu relația:

$$C_p = \frac{\rho_a (\rho_{Cu} \cdot S_{Cu} + \rho_{Gr} \cdot S_{Gr})}{\rho_{Cu} \cdot S_{Cu} + \rho_{Gr} \cdot S_{Gr}} = \frac{\rho_a (95 \cdot S_{Cu} + 5 \cdot S_{Gr})}{\rho_{Cu} \cdot S_{Cu} + \rho_{Gr} \cdot S_{Gr}} \quad (4.7)$$

unde ρ_a - densitatea aparentă calculată din raportul dintre greutatea și volumul materialului; ρ_{Cu} - densitatea granulei de cupru, de

$8,93 \text{ mg./mm}^3$; ρ_{gr} - densitatea lamei de grafit, de $2,25 \text{ mg./mm}^3$.

S-au efectuat în studiu metalografic asupra setului de electrozi pe probe alefuite și stațate cu persulfat de amoniu 10% și pe suprafețe de rupere cu forțe dinamice.

Micrografiile optice a trei materiale cu compacități mult diferite : 67% - fig.4.6; 67% - fig.4.7; 92% - fig.4.8, arată că în masa metalică de bază din cupru naclarea de recoccare localizată la presările mici (fig.4.6) se extinde la presările mijlocii (fig.4.7) și este generalizată la presările mari (fig.4.8). Acest fenomen poate fi atribuit vitezei de recristalizare, diferită la gradele de deformare diferite și extinderii selective a alunecărilor și naclărilor de pe direcțiile preferențiale de orientare a planelor de alunecare și naclare la compacțiile mici în toată matricea de cupru la compacțiile mari. Masa de grafit este dificil de urmărit din cauza lipsei de distincție la microscopii optice între grafit și porii existenți între particulele de grafit din aceeași insulă sau între ele și matricea de cupru, fapt care poate da impresia existenței unor formațiuni de grafit de dimensiuni aparente mai mari decât cele reale. Cu toate acestea aspectul general al structurilor parește presupunerea că faza dispersă de grafit în materialele cu compacții mari este fragmentată în raport cu cea inițială și are o distribuție mai omogenă.

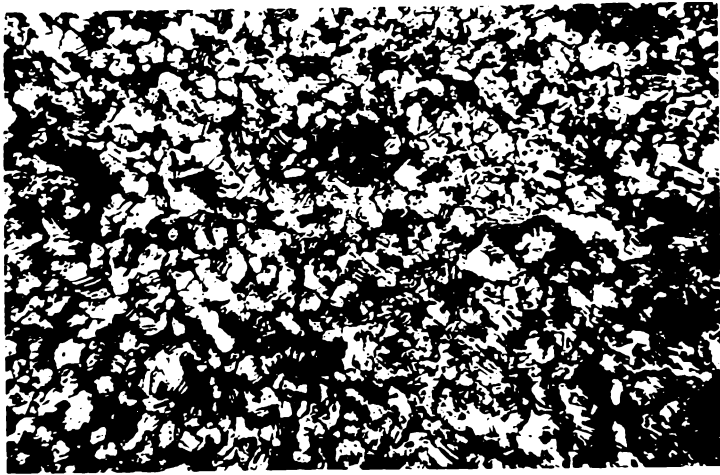
Microfotografiile electronice, executate asupra aceluiași material² arată că în electrozii poroși grafitul se păstrează în fragmente sferoidale (fig.4.9), se fragmentează prin fragmentare (fig.4.10) și se dispersează cu mărirea compacției (fig.4.11).

La asemenea se confirmă aspectul global evaluat prin microscopia optică asupra masei metalice de bază. La o mărire de peste $100\times$ se poate observa că relieful cristalelor de cupru se păstrează cu rotunjiri la electrozii presăți mai slab (fig.4.12), spurișt păstrarea unei porozități ridicată, 33% . Se întrevede însă tendința de formare a nodulelor după recoccare.

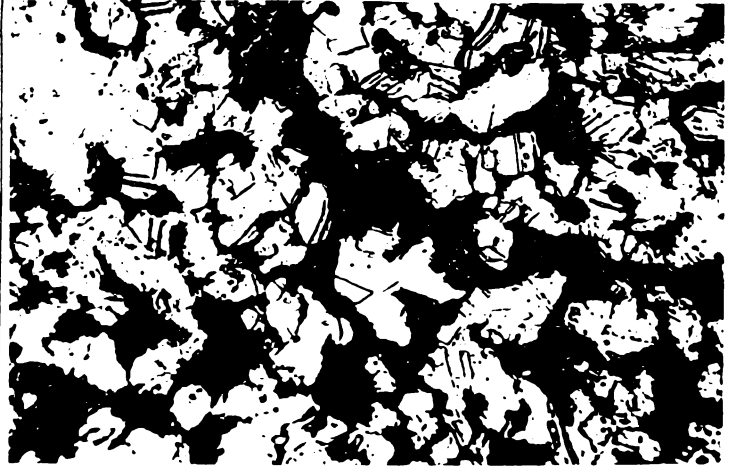
La electrozii intermediari, cu 13% porozitate spațiile intergranulare se micșorează, rotunjirile scad și orientarea structurii se accentuează (fig.4.13).

La electrozii puternic reconectizați, cu 6% porozitate, rotunjirile dispar, nodulele de cupru ocupă aproape integral câmpul observat (fig.4.14).

² Examinările microelectronice s-au făcut în laboratorul de microscopie electronică al Institutului de Mecanică a I.Ș. "T.V".I., Catedra Tehnologiei Construcțiilor de Mașini. Replicile au fost executate de fizician Șerban Valeria.

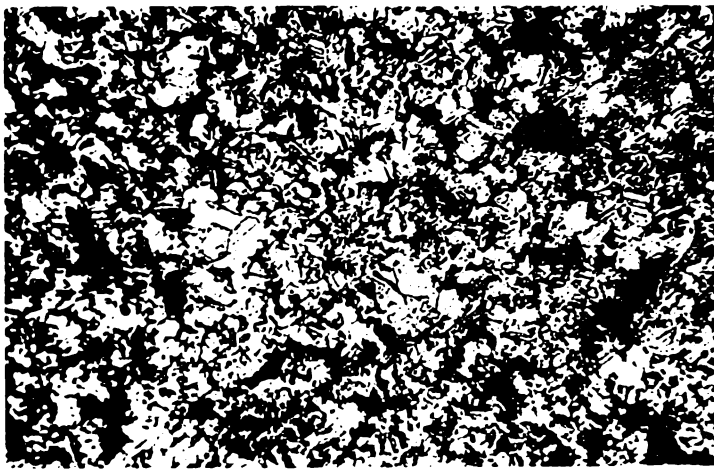


a) $P_1/P_2 = 1000/1000 \text{ daN/cm}^2$
(200x)

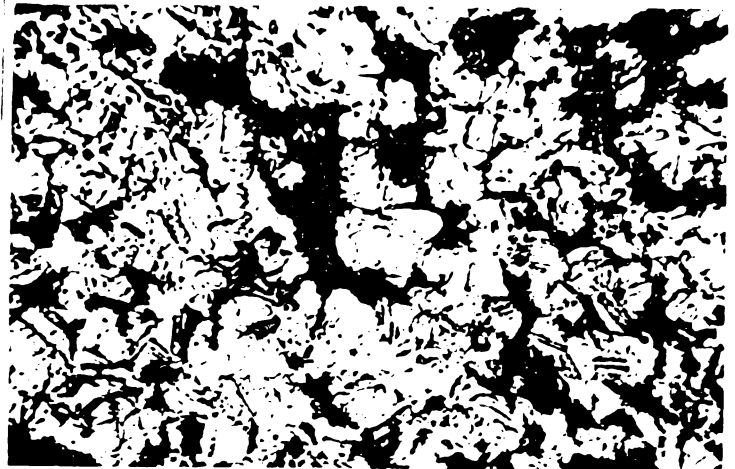


b) $P_1/P_2 = 1000/1000 \text{ daN/cm}^2$
(600x)

Fig. 4.6.

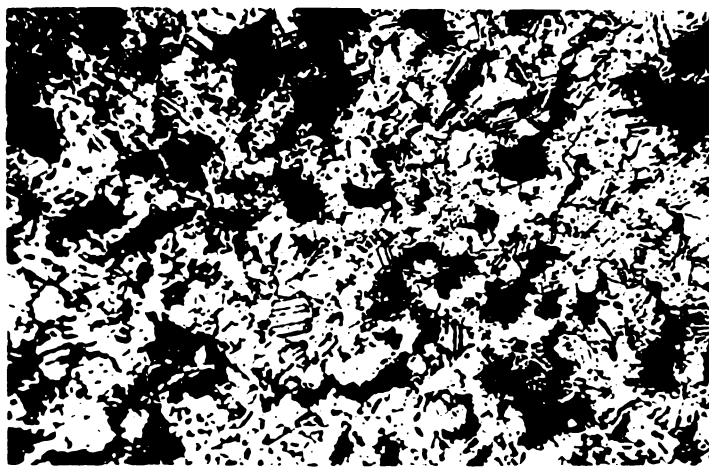


a) $P_1/P_2 = 1000/3000 \text{ daN/cm}^2$
(200x)

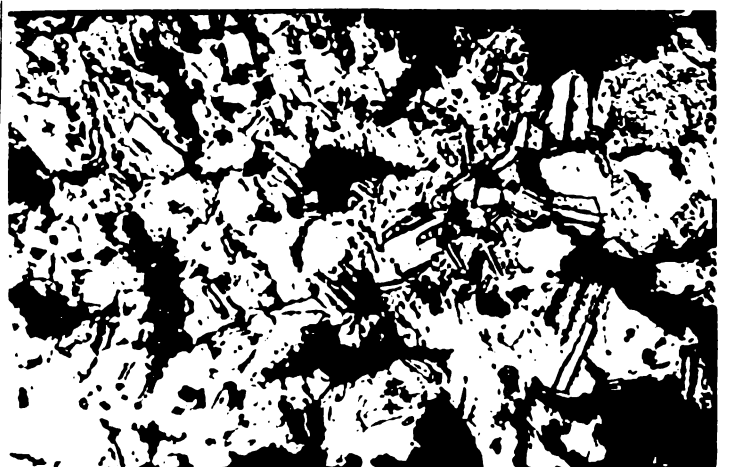


b) $P_1/P_2 = 1000/3000 \text{ daN/cm}^2$
(600x)

Fig. 4.7.



a) $P_1/P_2 = 4000/1000 \text{ daN/cm}^2$
(200x)



b) $P_1/P_2 = 4000/1000 \text{ daN/cm}^2$
(600x)

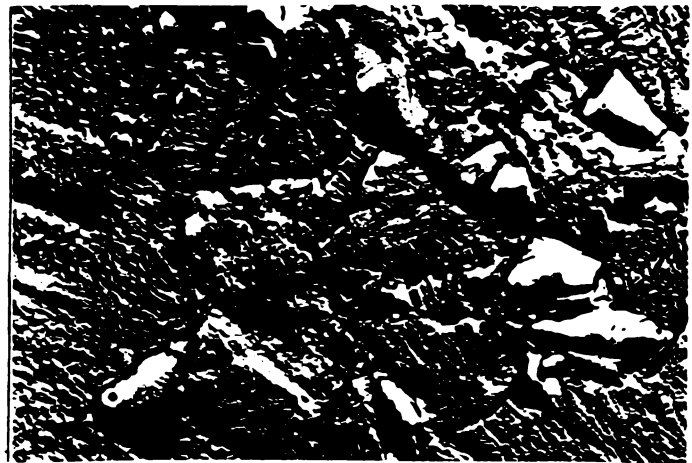
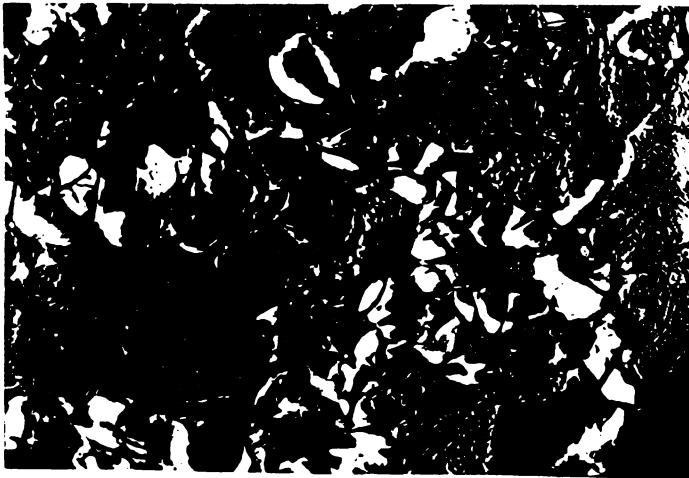
Fig. 4.8.



a) $P_1/P_2 = 1000/1000 \text{ daN/cm}^2$
(2700x)

b) $P_1/P_2 = 1000/1000 \text{ daN/cm}^2$
(4700x)

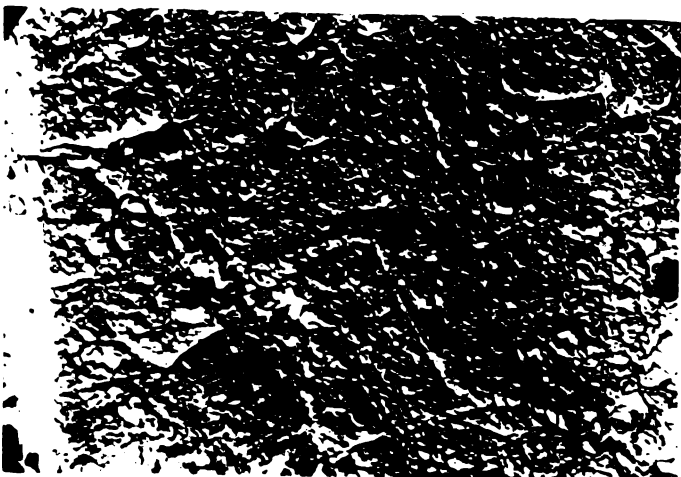
Fig. 4.9.



a) $P_1/P_2 = 1000/3000 \text{ daN/cm}^2$
(2700x)

b) $P_1/P_2 = 1000/3000 \text{ daN/cm}^2$
(4700x)

Fig. 4.10.



a) $P_1/P_2 = 4000/6000 \text{ daN/cm}^2$
(2700x)

b) $P_1/P_2 = 4000/6000 \text{ daN/cm}^2$
(4700x)

Fig. 4.11.

Fig. 4.12.
 $P_1/P_2 = 1000/1000 \text{ daN/cm}^2$
(10800x)



Fig. 4.13.
 $P_1/P_2 = 1000/3000 \text{ daN/cm}^2$
(10300x)



Fig. 4.14.
 $P_1/P_2 = 4000/6000 \text{ daN/cm}^2$
(10800x)



Fig. 15.
 $P_1/P_2 = 1000/1000 \text{ da/cm}^2$
fractografie (400x)



Fig. 16.
 $P_1/P_2 = 1000/3000 \text{ da/cm}^2$
fractografie (9400x)

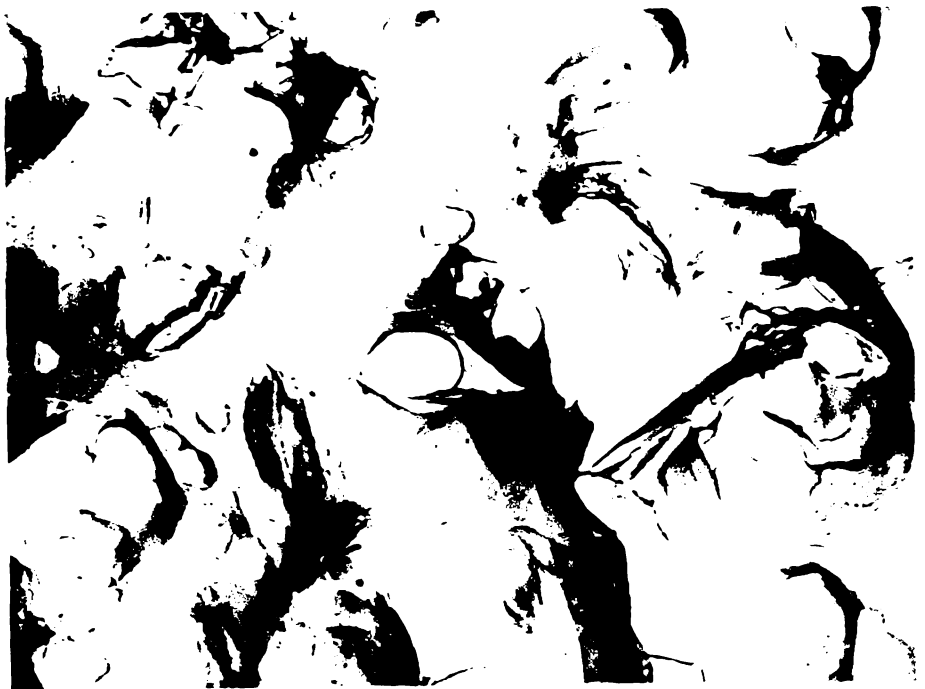
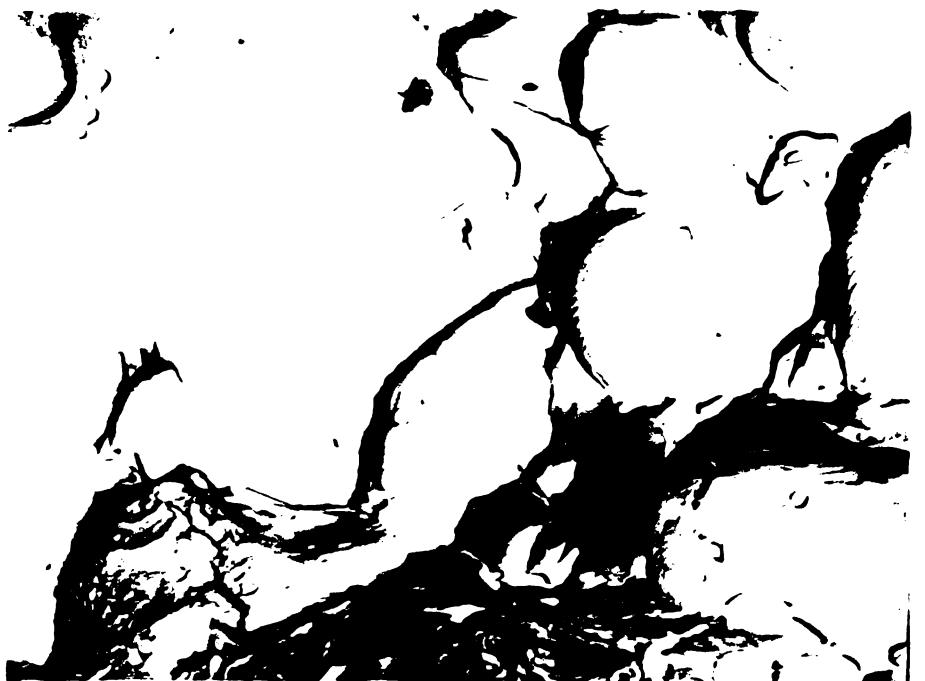


Fig. 17.
 $P_1/P_2 = 4000/6000 \text{ da/cm}^2$
fractografie (9400x)



Se remarcă faptul că în toate aceste imagini nu s-au observat de fapt direct granulele de grafit ci locul ocupat de ele în matricea de cupru. Tratamentele termice aplicat, $T_1/T_2 = 500/900^\circ\text{C}$, creează condiții de sinterizare numai pentru cupru, nu și pentru grafit. Aceste din urmă, pe lângă absența oricărei legături de difuzie cu matricea de cupru, nu realizează nici punți de legătură între fragmentele proprii. El este reținut în masa metalică de bază prin stringere mecanică datorată contracției acestuia în timpul presării și sinterizării. Asupra structurii masei metalice de bază informații interesante furnizează microfotografiile electronice ale fracturilor materialului.

Electrozii slab presări (fig. 4.15) au zone în care, pe lângă punțile de recristalizare ce leagă granulele, prezintă și suprafețe de contact între care aderența din presare și gradul de deformare au fost atât de mici încât procesul de recristalizare nu a reușit să facă decât punți discontinue. Existența icarte aici a acestor punți a dirijat fractura de-a lungul spațiilor intergranulare, urmele rupei putându-se observa distinct pe suprafețele de separație ale granulelor.

La presări mai mari se observă pe fractografiile electrozilor mai compacți (fig. 4.16), și mai ales pe a celor foarte compacți (fig. 4.17), urmele deformării plastice care a precedat ruperea; pe obetele de stonci alunecate în straturi paralele formează imagini clare de nivelment în trepte.

Rezultă că faza dispersă de grafit, fiind numai mecanic menținută în matricea de cupru poate să o părăsească atunci când cuprul care o înconjoară este erodat, chiar dacă izotermia de topire a cuprului nu a depășit bariera refractară de grafit. Acest proces este mai probabil în cazul compacțiilor mici la care învelirea dispersiilor de grafit în masa metalică de bază este mai puțin continuă.

4.4.2.2. Încercări asupra comportării la eroziune a materialului Cu95-C5

Loturile de electrozi, de formă paralelipipedică, cu secțiune pătrată având latura de 9 mm și cu lungime de 70 mm, au fost supuse unor încercări la prelucrarea prin eroziune electrică, [16], pe mașini Eroziat SFH, 300, echipate cu generatoare de impulsuri de relaxare și pe mașini Mill L.D. și Charvilles IT, echipate cu generatoare de impulsuri de comutație.

Toate încercările asupra unui set cuprinsînd cele 18 variante

tehnologice s-au efectuat pe fiecare din aceste instalații păstrându-se constante toți parametri reglabili ai utilajului tehnologic și toate condițiile de experimentare.

Pentru piesele probă s-au ales două materiale frecvent utilizate pentru fabricarea sculelor și mult diferite ca structură: oțelul C120 (cu 11 + 13 % Cr, max. 0,55% Ni), calit și revenit la 56 HRC, făcând parte din categoria oțelurilor pentru scule de prelucrare la rece fără dezagajare de așchii, greu prelucrabil în stare caldă și aliajul dur G10 (cu 90% Cr și 6% Co) folosit la confecționarea filierelor și pieselor de uzură și a sculelor pentru prelucrarea prin așchiere a metalelor (fontă, aliaje neferoase) care dau așchii scurte.

La fiecare set de electrozi s-au încercat în condiții identice și electrozi din cupru electrolitic anodit, pentru comparație.

Masa electrozilor și a pieselor probă s-a determinat prin cântărire cu o balanță de precizie $5 \cdot 10^{-4}$ g. Volumele preluate din piese, respectiv usate din electrozi, s-au determinat prin calcul raportându-se diferențele masice la densitatea aparentă. Volumul inițial în funcție de care s-a determinat densitatea aparentă a fost calculat pe baza măsurării așchiilor. Unele suprafețe au fost rectificaste, pentru fiecare dimensiune s-au măsurat cu ajutorul microscopului de scule Karl-Zeiss Jena fiecare dintre cele patru muchii ale fiecărei suprafețe ap paralelipipedului, cu o precizie de 10^{-2} mm. Cântăririle după prelucrare, atât la electrozi cât și la piesele din aliaj dur, s-au făcut numai după o uscare în aer cald timp de 24 ore pentru evaporarea dielectricului absorbit. Densitatea obiectelor de prelucrat, având forme geometrice regulate, s-a determinat individual prin metoda dublei cântăririi în aer și în apă distilată. La fiecare operație de prelucrare s-a măsurat timpul cu precizie de 1 sec., avansul capului de lucru în mm, adâncimea maximă de prelucrare și scurțarea minimă a electrozului, cu precizie de 10^{-2} mm.

Rezultatele experimentale s-au prelucrat prin calcul și s-au grupat pe seturi de electrozi și variante tehnologice.

Pentru analiza rezultatelor s-au ales drept variabile independente cele două valori ale presiunilor regimului mecanic, iar ca funcții de răspuns coeficientul de stabilitate la eroziune electrică, ξ_p , și factorul de eficiență q_p .

S-au reprezentat grafic în curbe parametrice dependențele $\xi_p = f(p_2)$, respectiv $q_p = f(p_2)$, la $p_1 = \text{ct.}$

Rezultatele s-au studiat separat pentru prelucrarea oțelului

C120 și separat pentru prelucrarea aliajului dur C10.

a) Prelucrarea otelului C120

Incarcerile cu impulsuri dependente s-au făcut în două regiuri electrice: o degroșare folosind impulsuri cu energie de 260 mJ (capacitatea condensatorului de acumulare de 18 μF și tensiune de străpungere 170 V) și o finisare cu impulsuri de energie de 43 mJ (cu acitate 3 μF, tensiune 170 V).

La degroșare, stit coeficientul de stabilitate la eroziune (fig.4.18) și factorul de eficacitate (fig.4.19) au valori

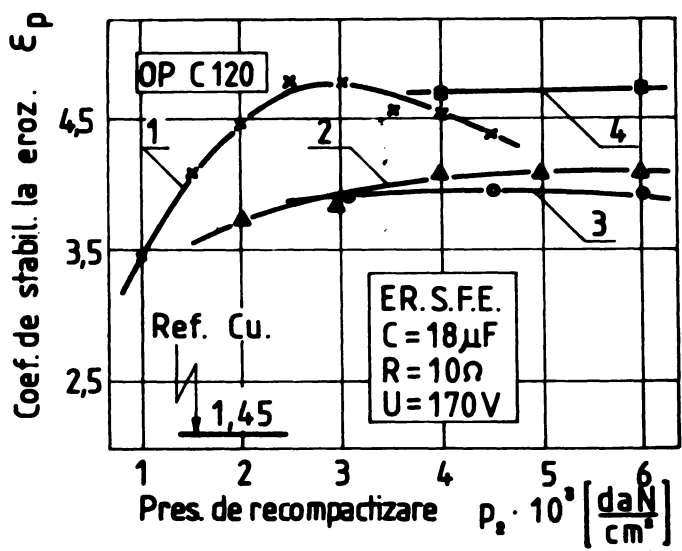


Fig.4.18.

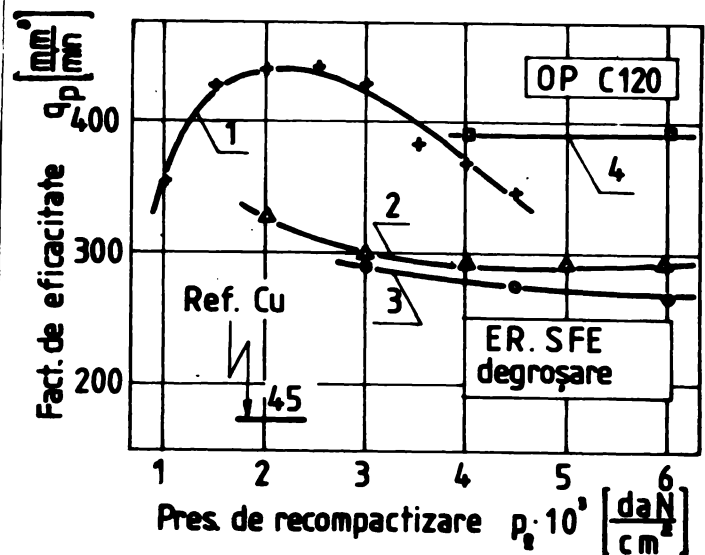


Fig.4.19.

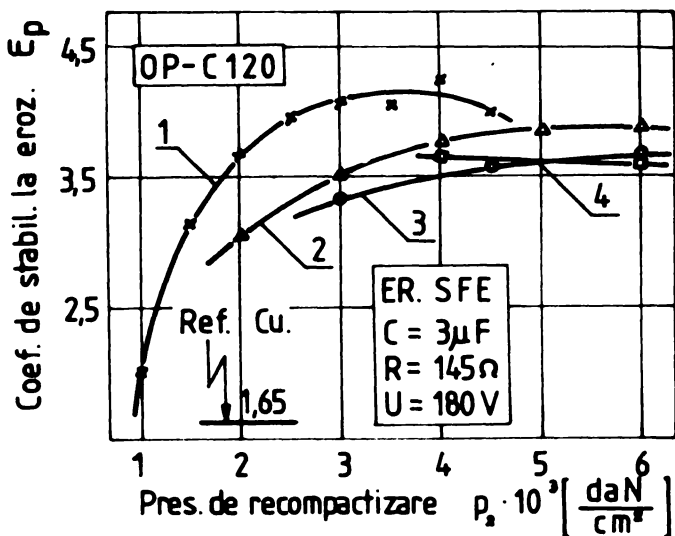


Fig.4.20.

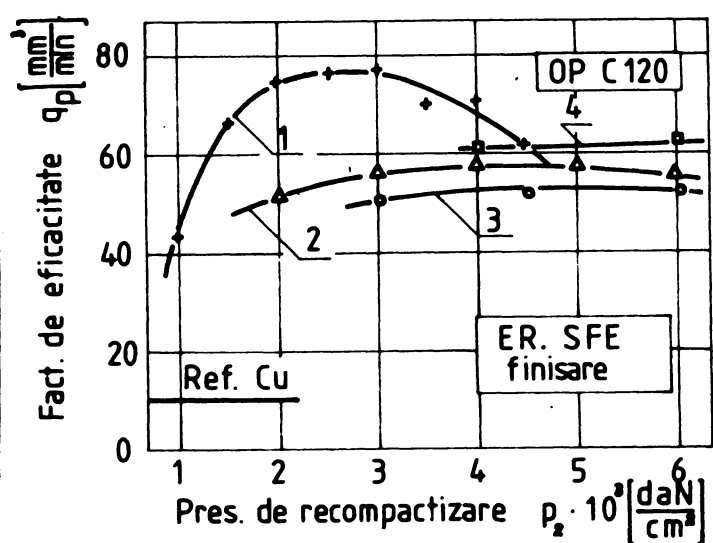


Fig.4.21.

sau mari pentru electrozii cu $p_1 = 1000 \text{ daN/cm}^2$ (cursele 1) și cei cu $p_1 = 4000 \text{ daN/cm}^2$ (segmentele 4).

În funcție de presiunea de recomprimare electrozii 1 au o variație cu maxim. Coeficientul de stabilitate se află pentru stabilitatea la eroziune în jurul valorii $p_2 = 3000 \text{ daN/cm}^2$ și pentru coeficientul de eficacitate se află în jurul valorii de 2500 daN/cm^2 . Aceeași comportare o au și electrozii cu $p_1 = 1000 \text{ daN/cm}^2$ (cursele 1 în fig. 4.20 și fig.4.21), cu singura deosebire că maximala stabilității

se deplasează spre valori ceva mai mari ale recompactizării, $p_2 = 3500 \text{ daN/cm}^2$). Electrozii 4 nu sînt practic influențați prea mult de presiunea de recompactizare. La finisare și recompactizări mari și au valori mijlocii, însă la diferențe neglijabile, avînd în vedere gruparea strînsă a tuturor rezultatelor. Electrozii 2, cu $p_1 = 2000 \text{ daN/cm}^2$ și 3 cu $p_1 = 3000 \text{ daN/cm}^2$ ocupă în general poziții intermediare sau inferioare.

Important este faptul că toți electrozii Cu-C au eficacitate și stabilitate mai mare decît cei din cupru electrolitic tras, încercați pentru referință.

Încercările cu impulsuri de comutație pe instalația AGIE LD, s-au făcut cu $t_i = 100 \mu\text{s}$; $\zeta = 94\%$; $I = 9,5 \text{ A}$.

Rezultatele, (fig.4.22; fig.4.23), au arătat că stabilitatea la eroziune și factorul de eficacitate cresc cu creșterea presiunii

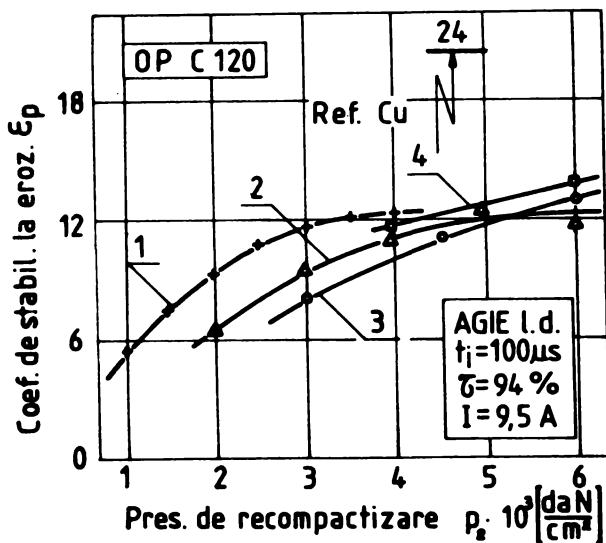


Fig.4.22.

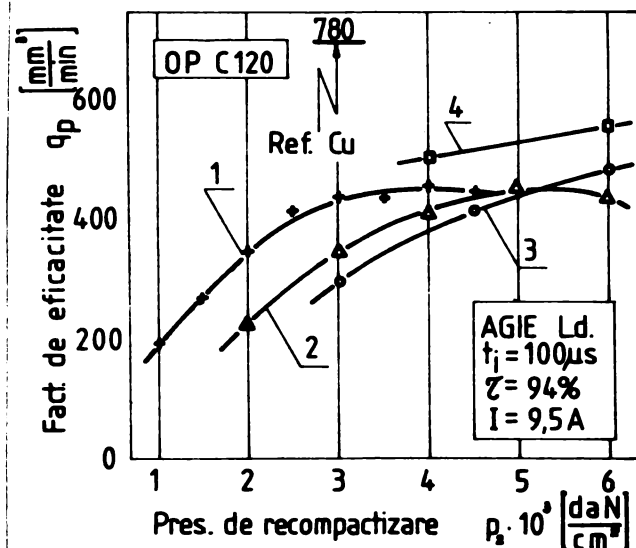


Fig.4.23.

de recompactizare, creșterea aplatizată spre presiunile mari, și au valori mai mici decît cele de referință ale cuprului. Se reține și în acest caz comportarea relativă mai bună a electrozilor 1, la recompactizări relativ mici (sub 4000 daN/cm^2) și a electrozilor 4 la recompactizări mari. Comparativ cu electrozii din cupru electrolitic însă toate variantele au dat în acest caz rezultate mai slabe.

b) Încercările aliajului dar Gle

Încercările cu impulsuri dependente asupra probelor din aliaj dar Gle arată că, în general indicii de performanță a electrozilor Cu-C (fig.4.24 + fig.4.27) cresc cu presiunea de recompactizare p_2 aplatizându-se spre compactivitățile mari. Diferențele sînt nesemnificative la degroșare, unde nu se pot face practic ierarhizări, iar la finisare se remarcă o comportare relativă mai bună a electrozilor 1 cu recompactizări mici și a electrozilor 4, cu recompactizări mari.

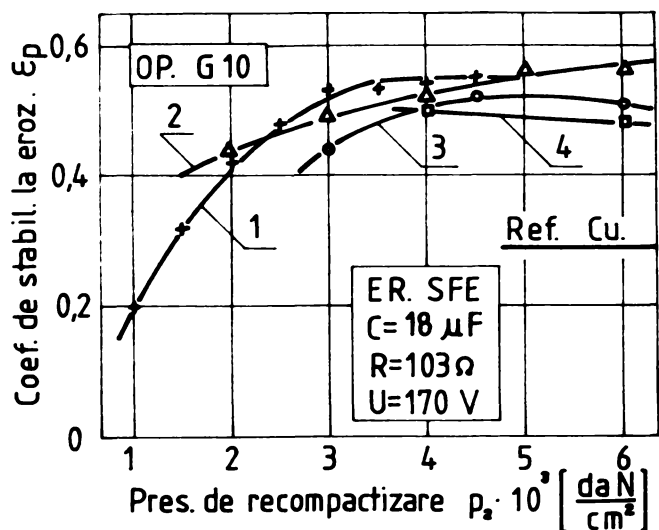


Fig. 4.24.

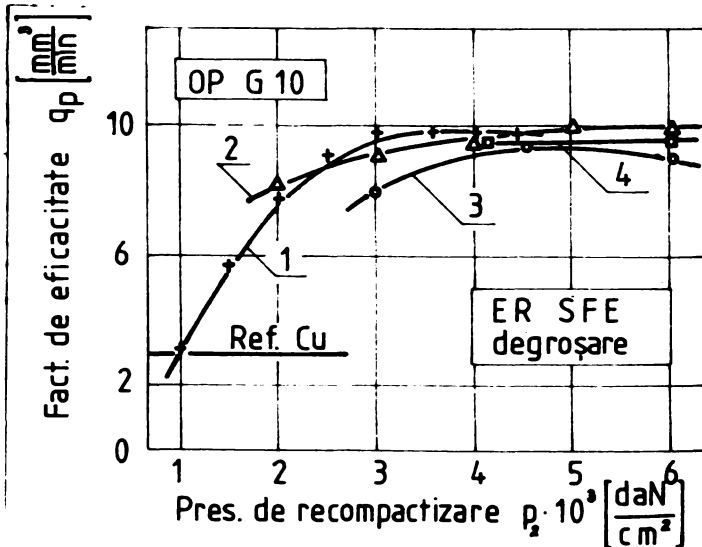


Fig. 4.25.

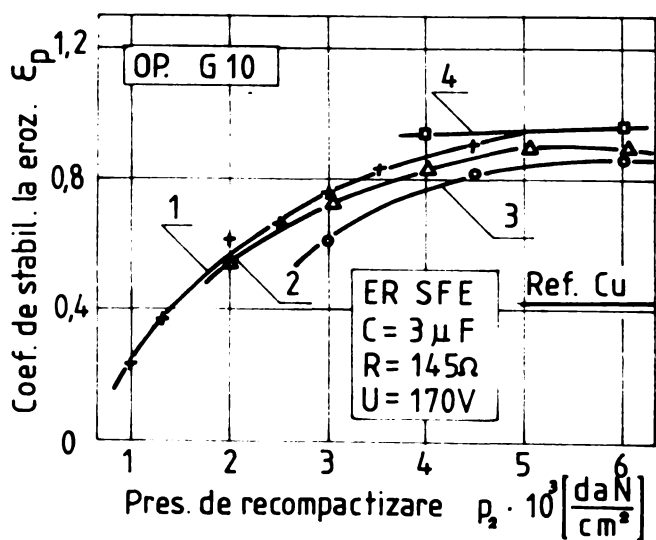


Fig. 4.26.

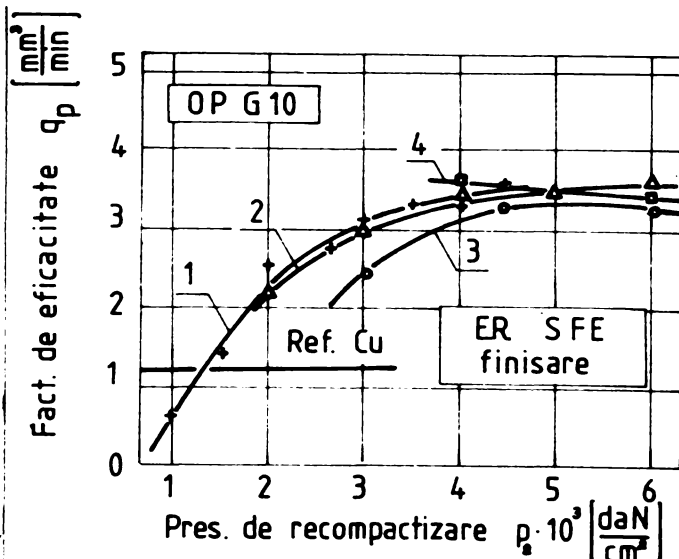


Fig. 4.27.

Referindu-se la cupru electrolitic tras 16 variante tehnologice prezintă stabilități la eroziune și eficacități ale prelucrării sale mari; excepția fiind constituită de electrozii cu cele mai mici compacități $p_1/p_2 = 1000/1000$, 2000 daN/cm^2 .

Încercările asupra aliajului 3ur G10, cu impulsuri comandate s-au efectuat cu o instalație Charilles 217 cu $t_1 = 40 \mu\text{s}$, $t_p = 1600 \mu\text{s}$, $I = 6,5 \text{ A}$. Interpretarea rezultatelor în fig. 4.28 și fig. 4.29, arată că electrozii poroși, cu recompacțieri sub $p_2 = 3000 \text{ daN/cm}^2$ au stabilitate la eroziune și eficacitate mici, între $p_2 = 3000$ și $p_2 = 4000 \text{ daN/cm}^2$ sînt mai stabili electrozii 1, iar la recompacțieri mai mari sînt mai stabili electrozii 4.

Față de cupru electrolitic în cazul acestei încercări s-au obținut performanțe mai slabe de stabilitate și eficacitate la toate variantele tehnologice, însă rezultate mai bune de productivitate la variantele cu compacități mari. Spre exemplu electrozii 4 au dat productivități $q_p = 10,31 \text{ mm}^3/\text{min}$, față de $9,44 \text{ mm}^3/\text{min}$ obținută

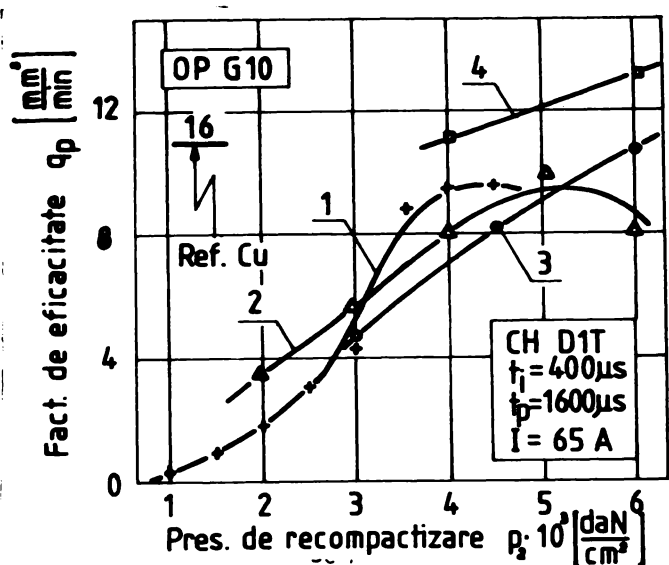


Fig. 4.28.

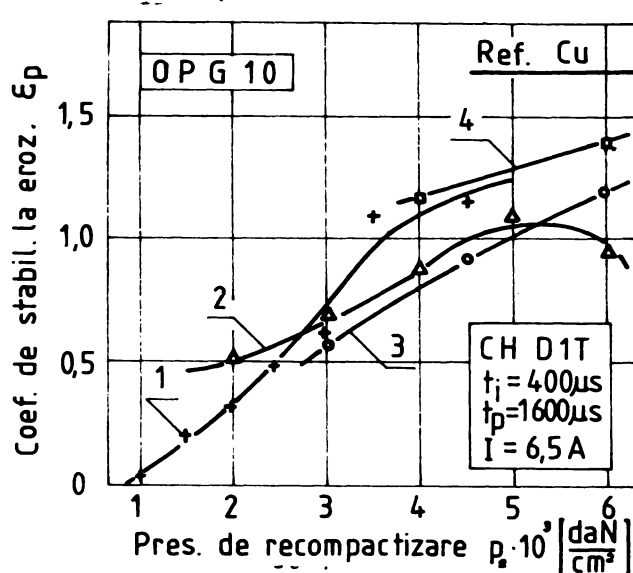


Fig. 4.29.

ca electrozi din cupru electrolitic.

Analizând în ansamblu comportarea electrozilor din Cu95-C5 se poate trage concluzia că ei au dat rezultate mai bune la prelucrarea cu impulsuri de relaxare decât la cea cu impulsuri de comutație. Fenomenul poate fi atribuit variației în timp a cîmpului termic care dă gradienti mai mari în cazul relaxărilor exponențiale decât în cazul variațiilor în trepte dreptunghiulare ale impulsurilor comutate. Neomogenitățile termofizice din stratul de material respectiv faza dispersă de grafit și perii dau, la evoluții în timp diferite ale puterii sursei termice ptrunderi diferite ale izotermelor în masa electrodului, faza refractară avînd eficacitate mai mare la impulsurile de relaxare. În al doilea rînd materialul Cu95-C5 a dat rezultate mai bune la prelucrarea oțelului C120 față de aliajul dur G10. Explicația nu poate fi decât cea general valabilă a comportării materialelor diferite de electrozi împerechiate cu materiale diferite ale OP, respectiv schimbarea coeficientului de polaritate, care aduce după sine modificări în repartiția energiei asupra elementelor spațiului de lucru, cu toate consecințele ei. Se poate de asemenea presupune că granulatia și concentrația fazei disperse a determinat condiții nefavorabile față de noua repartiție a energiei de efect.

Lin punctul de vedere al regimului mecanic de elaborare, studiul comparativ al variantelor tehnologice arată ca cele mai bune rezultate s-au obținut cu electrozi presăți cu $p_1/p_2 = 1000/3000$ daN/cm² în special la prelucrarea oțelului aliat și cu $p_1/p_2 = 4000/6000$ daN/cm², mai ales la prelucrarea aliajului dur.

4.4.3. Determinarea concentrației optime a componentelor materialului Cu-C

Pentru urmărirea influenței concentrației componentelor s-au elaborat la LFC - I. I. Cluj-Măpoca seturi de electrozi în zece noi variante tehnologice care, funcție de regimul mecanic s-au grupat în două tipuri, I și II (vezi tabelul nr.4.2), fiecare având câte cinci variante cu concentrații diferite de grafit. Celelalte condiții de elaborare s-au păstrat identice cu cele în care s-a studiat anterior influența regimului mecanic.

Având în vedere că procesele de prelevare de materii din ET și OF se urmăresc la eroziunea electrică prin volunele îndepărtate a fost calculată și concentrația volumetrică de grafit C_V din structura acestor materiale. Calculul s-a făcut în funcție de concentrațiile gravimetrice C_M a grafitului și Cu % a cuprului și de densitățile corespunzătoare lor S_G , respectiv S_{Cu} .

$$C_V = \frac{C_M}{C_M + Cu(S_G/S_{Cu})} \cdot 100 \quad (4.3)$$

Fiecare set de electrozi a fost supus unor serii de încercări de comportare la eroziune electrică cu impulsuri dependente, lărgindu-se plaja de investigație de la 2 la 5 regimuri de lucru diferite : 3 regimuri de degroșare și 2 regimuri de finisare (vezi tabelul nr.4.3).

Încercările s-au făcut pe aceeași instalație, Eroziat 101 303, în aceleași condiții experimentale cu cele de la determinarea tehnologiei de presare cu descăbire că aliajul dur G10 a fost înlocuit, din necesitate cu plăcuțe de aliaj dur 83, utilizate pentru placarea sculelor achiziționate.

S-au analizat toate caracteristicile tehnologice rezultate din încercări.

În fig.4.20 se reprezintă grafic variația coeficientului de stabilitate la eroziune în funcție de procentul volumetric de grafit, C_V la prelucrarea oțelului G120, iar în fig.4.31 aceeași funcție pentru prelucrarea aliajului dur 83. Valorile corespunzătoare fiecărui regim de prelucrare s-au marcat cu puncte grafice distincte și s-au trasat reprezentările funcției $E_p = f(C_V)$. Curbele desenate cu linii pline corespund variantei tehnologice I, cele desenate cu linii întreruptă corespund variantei tehnologice II. Având în vedere gruparea relativ restrinsă a valorilor la regimurile de degroșare au s-au mai trasat curbe individuale pentru fiecare

Tabelul nr.4.2.

Variante tehnologice de elaborare a materialului Cu-C, de concentrații diferite-seria A

Tipul variantei	Nr. variantei	Simbol C	C _v (%)	a (mg/cm ³)	C _o (%)
P ₁ - 1000 daN P ₂ - 3000 cm ² I	1	Cu100	0	8,30	92,91
	2	Cu97C5	5	6,82	87,65
	3	Cu90C10	10	5,89	85,54
	4	Cu85C15	15	5,27	85,30
	5	Cu80C20	20	4,78	86,36
P ₁ - 4000 daN P ₂ - 6000 cm ² II	6	Cu100	0	8,62	96,49
	7	Cu95C5	5	7,42	95,48
	8	Cu90C10	10	6,41	93,11
	9	Cu85C15	15	5,66	91,66
	10	Cu80C20	20	5,14	91,79

Tabelul nr 4.3.

Regimuri electrice de încercare cu impulsuri dependente

Categoria de regim	Simbol C	R (μF)	U ₀ (V)	I _{sc} (A)	W ₁ (mJ)	
regre- care	D3	30	64	170	5,6	433,5
	D2	18	103	170	3,5	260,1
	D1	10	180	170	2,0	144,5
Finisare	F5	3	145	170	2,5	43,3
	F4	0,565	145	170	2,5	8,2

C - capacitatea condensatorului de acumulare
R - rezistența circuitului de încălzire
U₀ - tensiunea de străpungere (reglată)
I_{sc} - curentul de scurtcircuit
W₁ - energia impulsurilor.

regim, limitându-se numai domeniul de variație (figurile punctate).

Analiza comportării electrozilor Cu-C la prelucrarea oțelului C120 arată că, în condițiile în care s-au făcut încercările concentrate optima în grafit se găsește sub procentul de 20% C_v. Peste această valoare la toate regiunile stabilitatea scade practic proporțional cu creșterea concentrației. Este de presupus că la materialul cu concentrații mici sunt realizate condiții mai bune de încu-

mare a efectelor conductibilității termice, foarte bună la cupru și refractarității, bună la grafit. Pe de altă parte o masă mai mare de cupru permite o ancorare mecanică mai bună a particulelor de grafit și menținerea acestora timp mai îndelungat pînă la eventuale desprindere în stare solidă. Nu se întâmplă același lucru la concentrații mai mari la care masa metalică de bază, cantitativ mai redusă eliberează mai ușor particulele mai aglomerate de grafit. Este de presupus că materialul C200-C20 care are aproximativ 50% din volum ocupat de grafit, în condițiile în care ar fi tratat cu un regim termic favorabil sinterizării grafitului, ar forma o rețea a acestuia cu continuitate refractară și ar împiedica desprinderea mecanică a particulelor de grafit.

Rate gravimetrice constantă a creșterii concentrației de grafit dăce la creșterea unor intervale neegale ale concentrației volumetrică din cauza diferenței mari de densitate între cele două componente. Așa se face că tocmai în domeniul în care stabilitatea la eroziune electrică variază extremal să nu fie suficiente puncte de referință pentru aproximarea concentrațiilor de stabilitate maximă. Și la prelucrarea aliajului dur (fig.4.31.) la regimurile de deproșare are loc o variație cu un maxim greu de aproximat. La regim

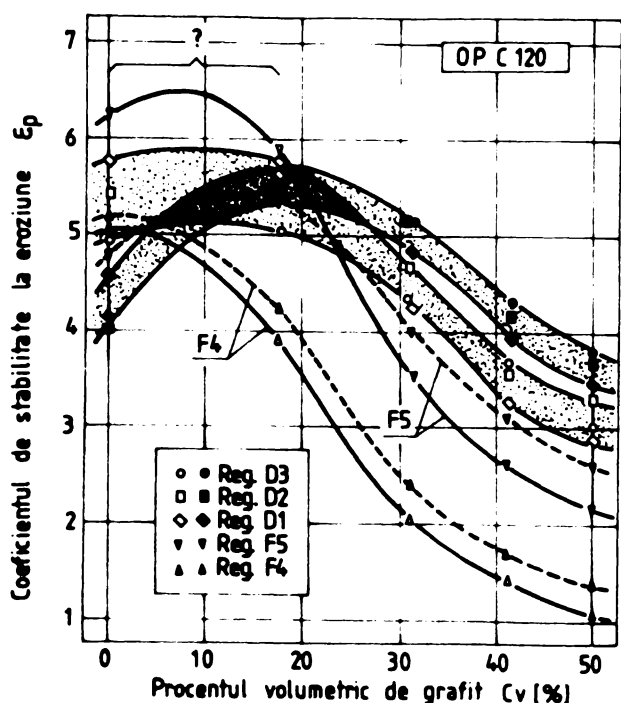


Fig.4.30.

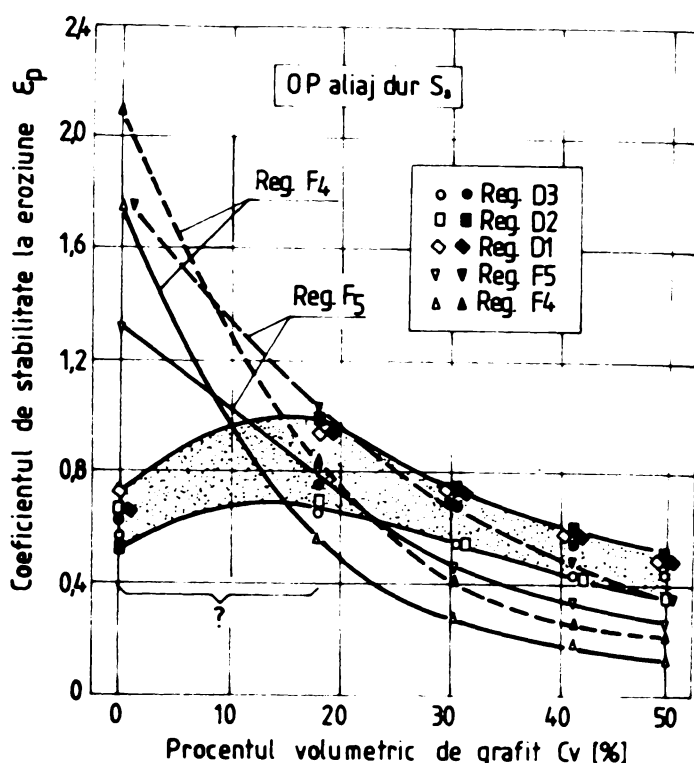


Fig.4.31.

curile fine scaderă stabilității cu creșterea concentrației în grafit este mai accentuată, iar în domeniul concentrațiilor mici nu se mai remarcă variația extremală.

Apreciind că rezultatele generale obținute din această se

rie de încercări nu sînt corelente s-a elaborat un alt lot la care concentrațiile au fost dirijate cu o rată volumetrică constantă și cu valori în domeniul de variație extremă a indicilor de performanță, respectiv la concentrații cuprinse între 0 și 25% C_v .

Tabelul nr 4.4.

Varianțe tehnologice de elaborare a materialului Cu-C, de concentrații diferite - seria B

Tipul variantei	Nr. variantei	Simbol	C (%)	C_v (%)	S_a (mg./cm ³)	C_0 (%)
$P_1 = 1000 \text{ daJ}$ $P_2 = 3000 \text{ cm}^2$ I	1	Cu100V	0	0	3,154	91,31
	2	Cu95C5V	1,3	5	7,762	90,27
	3	Cu90C10V	2,7	10	7,275	86,00
	4	Cu85C15V	4,3	15	6,955	87,53
	5	Cu80C20V	5,9	20	6,439	84,74
	6	Cu75C25V	7,8	25	6,039	83,29
$P_1 = 2000 \text{ daJ}$ $P_2 = 6000 \text{ cm}^2$ II	7	Cu100V	0	0	8,761	98,11
	8	Cu95C5V	1,3	5	8,370	97,35
	9	Cu90C10V	2,7	10	8,007	96,85
	10	Cu85C15V	4,3	15	7,593	95,38
	11	Cu80C20V	5,9	20	7,178	94,46
	12	Cu75C25V	7,8	25	6,788	93,62

Cele 12 variante noi (tabelul nr.4.4) au fost încercate la aceleași regimuri de lucru cu piese probă din oțel C120 și aliaj dur C10.

La prelucrarea oțelului C120 se observă (fig.4.32) o grupare relativ bună a valorilor stabilității la eroziune la regimurile de degroșare în limitele $E_p = 4 + 6,2$, înprăștirile lor fiind mai mare la concentrații mici de grafit și rămînd aproximativ constantă la concentrațiile mari. La finisarea cu regimul P5, cu energie impulsurilor $w_1 = 43 \text{ mJ}$, se păstrează alura de variație de la degroșare întrucît acest regim este de fapt un regim de trecere, practic de semifinisare, și de instalația utilizată are aceeași schemă constructivă ca și regimurile de finisare. Varianta tehnologică II la acest regim se integrează în domeniul de variație al degroșărilor, iar varianta tehnologică I prezintă stabilități relativ mai mari. Regimul de finisare P4, cu impulsuri de energie mică $w = 3 \text{ mJ}$ prezintă stabilități corespunzătoare cu concentrația, peste 5% C_v , ieșind din domeniul de valori corespunzătoare degroșărilor.

Se apreciază că valoarea optimă a stabilității la eroziune

electrică a are materialul cu concentrația $C_{vo} = 8\%$ la care, la toate regiunile de degroșare și la cel de trecere spre finisare, are valori în zona punctelor de maxim, iar la regiunea de finisare F4 ea nu prezintă încă scăderi severe cu creșterea concentrației.

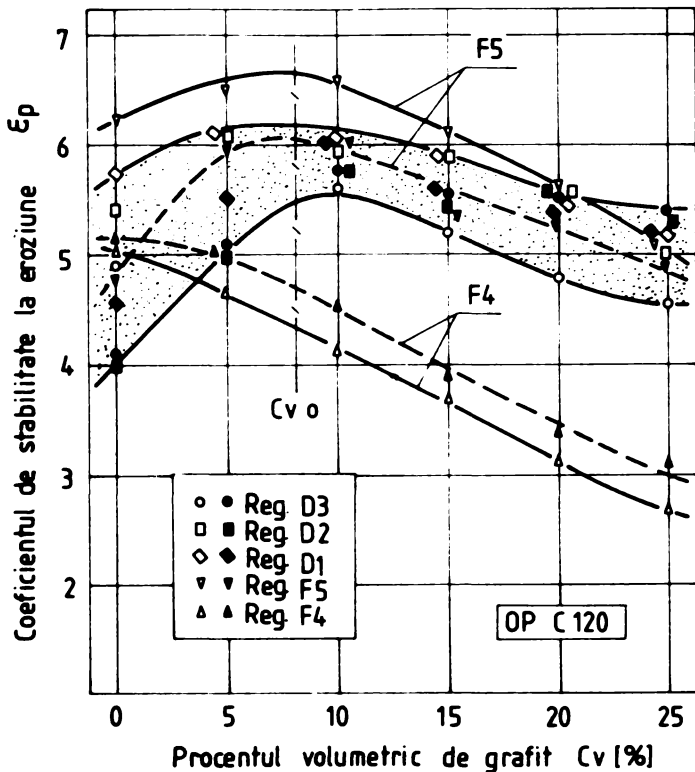


Fig. 4.32.

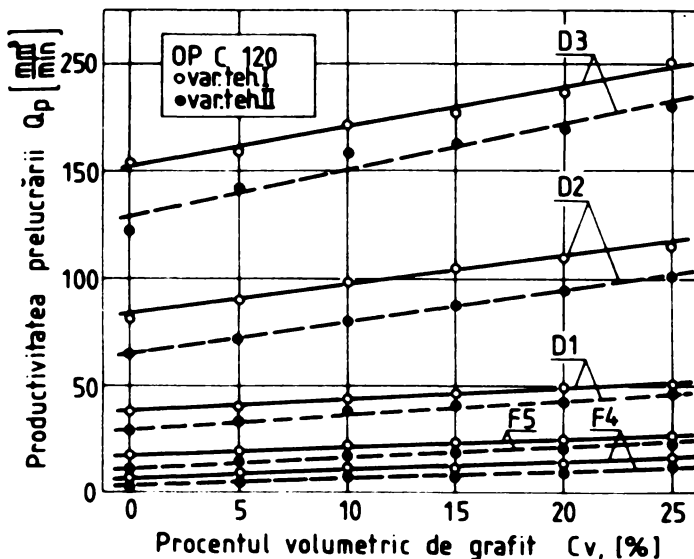


Fig. 4.33.

Apreciind în ansamblu la concentrația volumetrică optimă în grafit variantele tehnologice I au rezultate mai bune decât variantele tehnologice II.

Productivitatea prelucrării crește în toate cazurile cu procentul volumetric de grafit (fig. 4.33) și este în toate cazurile superioară la variantele tehnologice I. Creșterea este liniară și, cu excepția regiunilor foarte dure, nesemnificativă; astfel încât la alegerea variantei optime preponderentă trebuie să fie stabilitatea.

Înă se analizează coeficientul de stabilitate la eroziune în funcție de energia impulsurilor, se constată că toți electrozii care conțin fază dispersă de grafit au o comportare caracteristică (fig. 4.34). Energia W_1 a fost considerată în această reprezentare pe abscisă la scara logaritmică naturală, pentru a se putea distinge variațiile în domeniul energiilor mici.

La prelucrările de finisare cu energii mici (până la 10 mJ), electrozii Cu-C prezintă stabilități comparabile cu cele ale cuprului tras. Faptul acesta valoare, în timp de stabilitate acestuia scade tinsind spre constantă la impulsuri cu energii mai mari de 100 mJ, cea a electrozilor cupru - grafit crește pronunțat până la $W_1 = 50 - 100$ mJ, după care scade ușor cu creșterea energiei. Este interesant de remarcat comportarea electrozilor Cu 100 pentru care s-a trasat curbă separată,

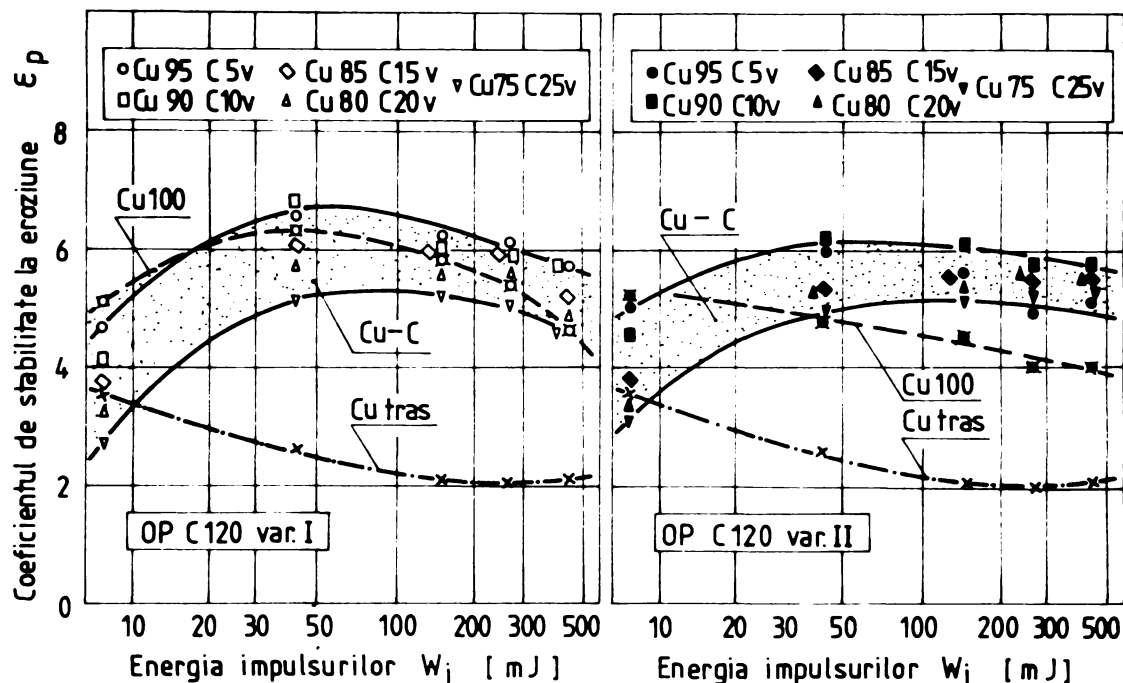


Fig.4.34.

cu linie întreruptă. În varianta tehnologică I (fig.4.34,a) aliajul păstrează variația cu maxim caracteristică a materialului Cu-C, însă cu valori mai mari în domeniul energiilor mici și cu scăderi mai pronunțate în domeniul energiilor mari. În varianta II (fig.4.34,b) alura de variație a coeficientului de stabilitate la eroziune electrică se apropie mai mult de cea a cuprului tras, însă la valori sensibile mai ridicate. Aceste fenomene sînt dificil de interpretat numai pe baza discontinuităților termodinamice: pori și dispersii refractare. Este evident că trebuie să intervină și modificări în repartiția energiei între elementele spațiului de lucru, probabil în legătură cu existența grafitului care mărește concentrația de ioni de carbon în coloana descărcării electrice. Avînd în vedere disponibilitățile de captură electronică a acestor ioni se poate presupune formarea altui raport între componentele curentului în coloana $i(+)/i(-)$. Creșterea componentei $i(-)$ cu procentul de grafit poate explica în acest mod creșterea productivității prelucrării, astfel în vedere că încercările s-au făcut cu polaritate directă.

La prelucrarea aliajului dur G10, urmărind dependența coeficientului de stabilitate în funcție de procentul volumetric de grafit (fig.4.35) se constată că materialul Cu-C prezintă stabilități cu valori mult dispersate la regiunile de finisare și relativ restrinse la cele de degroșare. Mai stabile sînt variantele tehnologice de tip II, adică cele cu structuri mai dense.

Concentrația optimă se poate fi considerată 0% pentru finisare și 15% G₁₀ pentru degroșare. Maximizarea domeniilor de variație arată

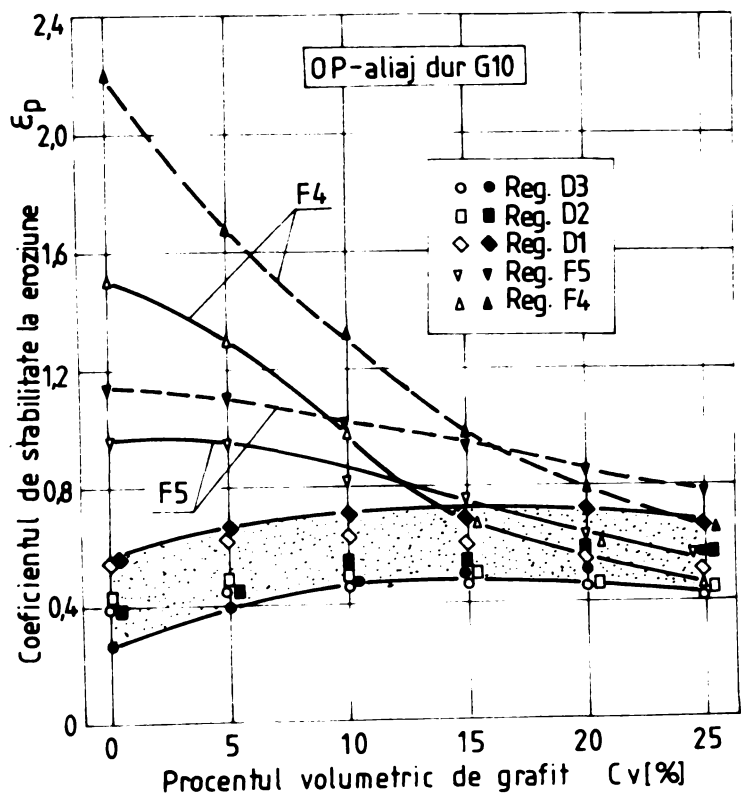


Fig. 4.35.

Se vede că la energii mici influența compoziției chimice este foarte pronunțată (dispersie foarte mare a valorilor stabilității)

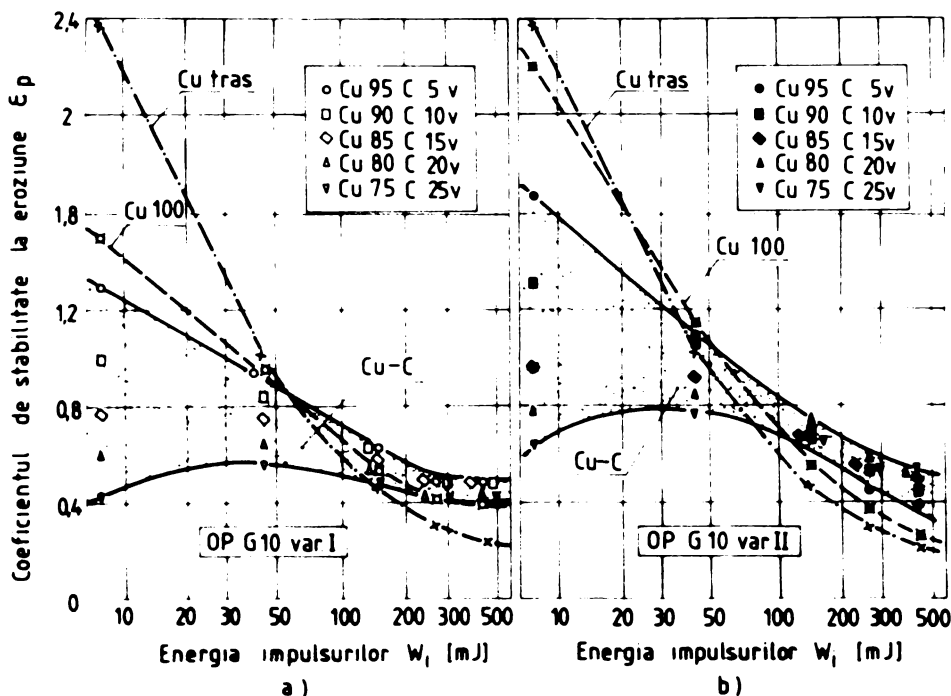


Fig. 4.36.

la impulsuri dependente cu energii mai mari de 100 mJ.

Rezultă că materialele cu fază dispersă de grafit dau performanțe mai bune în domeniul prelucrărilor de degroșare cu generatoare de impulsuri dependente.

Însă odată față de pseudoaliajul de oțel la prelucrarea oțelului C120, $C_v = 8\%$, în varianta I, nu există diferențe substanțiale în domeniul degroșării, iar la finalizare valorile stabilității se mențin relativ ridicate. În consecință, în ipoteza elaborării unui material Cu-C de concentrație unică se poate accepta opțiunea de la prelucrarea oțelului C120 respectiv Cu92-C8V.

Fațura comparativă cu electrozii din cupru tras s-a făcut și reprezentarea coeficientului ϵ_p în funcție de energia impulsurilor (fig. 4.36).

iar rezultatele sînt mai slabe decît la cupru tras

și de această dată se recunoaște tendința cuprului sinterizat Ca loc de a se alinia spre comportarea materialului Cu-C la varianta tehnologică de tip I și spre comportarea Cu tras la varianta tehnologică de tip II.

Față de cuprul electrolitic tras, electrozii confecționați din Cu-C nu sînt mai stabili decît

4.4.4. Regimul termic optim de sinterizare a pseudoaliajului cupru-grafit

În varianta tehnologică optimizată din punct de vedere al concentrațiilor și al regimului de presare s-au elaborat la I.M. Cluj-Napoca materiale Cu30-C8V cu $p_1/p_2 = 1000/3000 \text{ daN/cm}^2$ și în 9 variante ale regimului termic de sinterizare, din combinațiile $T_1 = (500; 700; 900)^\circ\text{C}$ și $T_2 = (500; 700; 900)^\circ\text{C}$ (tabelul nr.4.5).

Tabelul nr.4.5.

Sorturi de electrozi Cu-C sinterizați cu temperaturi diferite

T_1 ($^\circ\text{C}$)	T_2 ($^\circ\text{C}$)	ρ_a ($\frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}$)	ϵ_0 (%)
500	500	6,704	79,85
	700	6,780	80,74
	900	7,497	89,29
700	500	6,969	83,00
	700	6,976	83,08
	900	7,387	87,98
900	500	7,332	87,32
	700	7,377	87,86
	900	7,380	87,89

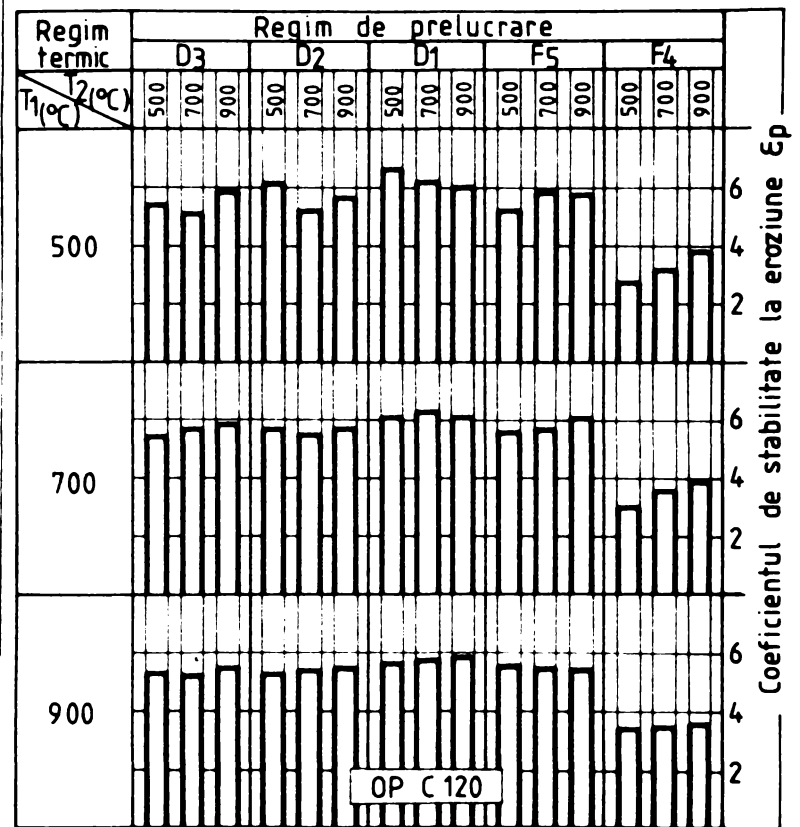


Fig.4.37.

Asupra acestor materiale s-au efectuat încercările corespunzătoare celor cinci regimuri de lucru și pe baza datelor obținute s-au construit histogramele din fig.4.37 și fig.4.38.

La prelucrarea oțelului C120 (fig.4.37), la regimuri de degroșare nu este evidentă o legătură după care temperaturile de sinterizare influențează stabilitatea la eroziune a materialului. Numai la regimul F5 se întrevăde și la F4 devine evident că, la temperaturi de sinterizare de detensionare T_1 constante, stabilitățile cresc cu creșterea temperaturii de sinterizare finală T_2 .

La prelucrarea aliajului dur G10 (fig.4.38) creșterea coeficientului de stabilitate la creșterea temperaturii T_2 (la $T_1 = \text{ct}$) se respectă în toate cazurile. Aceste creșteri sînt mari la $T_1 = 500^\circ\text{C}$ mijlocii la $T_1 = 700^\circ\text{C}$ și mici la $T_1 = 900^\circ\text{C}$.

Avînd în vedere relativa lipsă de eroziune a indicilor de performanță în funcție de temperaturile T_1 și T_2 , s-a făcut o cla-

Tabelul nr.4.6.

Clasificarea electrozilor cupru-grafit în funcție de temperaturile de sinterizare

Temperatura de sinterizare		Ordinea de clasificare							
		Oțel C120			Aliaj dur 10			Punctaj general	Clasificarea generală
		Criterii		Punctaj	Criterii		Punctaj		
T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	ε _p	q _p		ε _p	q _p			
500	500	5	2	44	9	9	90	134	9
	700	6	4	48	6	5	54	102	4
	900	3	6	44	1	2	21	65	2
700	500	4	5	47	8	8	76	123	6
	700	2	1	28	4	3	38	66	3
	900	1	3	29	2	1	18	46	1
900	500	9	8	73	7	4	56	129	7
	700	8	9	74	5	7	56	130	8
	900	7	7	62	3	6	41	103	5

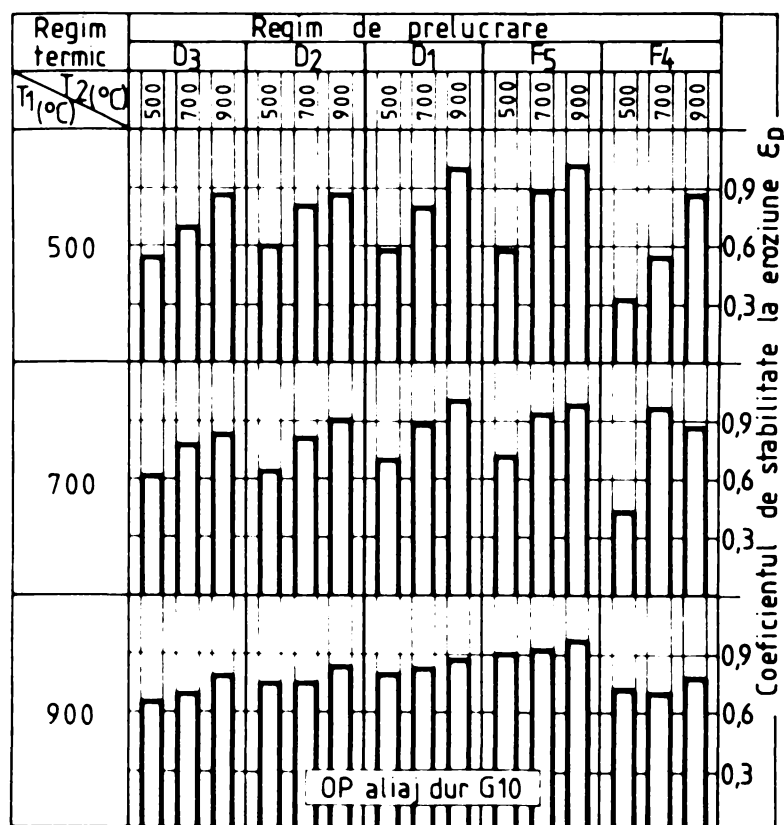


Fig.4.38.

cu cea mai bună comportare este cel obținut în varianta tehnologică de elaborare $p_1/T_1/p_2/T_2 = 1000 \text{ daN/cm}^2/500^\circ\text{C}/3000 \text{ daN/cm}^2/900^\circ\text{C}$.

Ca rezultat al acestor cercetări au fost dezvoltate două sorturi de materiale noi pentru electrozi, conform procesului verbal comun al IPTV înregistrat la Catedra Tehnologia Materialelor și I.P.Cluj-Napoca, Laboratorul de Cercetări pentru Metalurgia Pulverilor

Clasificarea materialelor după un punctaj de performanță (Tab.4.6). -au ales două criterii și anume : criteriul stabilității și criteriul eficacității, după care s-a stabilit ordinea crescătoare la fiecare regim de prelucrare, a celor 9 variante de sinterizare, acordându-se drept punctaj numărul locului ocupat în această ordine. Totalizându-se punctele pe regiuri de lucru și pe criterii s-a făcut clasificarea integrală.

Conform acestei clasificări materialul Cu92-C8V

S-au simbolizat (tabelul nr.4.7) materialele de electrod EOG-2 și EOG-5, cu recomandarea utilizării lor la prelucrarea prin eroziune electrică a oțelurilor de scule înalt aliate și a aliajelor dure.

Tabelul nr.4.7.

Prototipuri de material cupru-grafit izotrop pentru electrozi de eroziune electrică

Numele electrodului		EOG-2	EOG-5
Compoziția chimică	Cupru %	97,8 ± 0,1	95,0 ± 0,2
	Grafit %	2,2 ± 0,1	5,0 ± 0,2
Densitatea aparentă (g/cm ³)		7,30 ± 7,45	6,65 ± 6,85
Duritatea Brinell HB/5/31,25/60		28 ± 34	17 ± 24
Rezistivitatea electrică. 10 ⁻⁶ Ω·m		max.0,03	max.0,04

4.5. Elaborarea electrozilor din cupru sinterizat izotrop

Cuprul sinterizat se utilizează în tehnică sub formă de semifabricate sau repere în construcția de mașini și aparate și în electrotehnică. Studii asupra regimurilor termomecanice de elaborare și proprietățile fizicomecanice ale cuprului sinterizat presat izostatic au fost efectuate pentru prima dată în A.S.R. la LGAP - I.F. Cluj-Napoca [104]. Un astfel de material, în care cuprul obținut prin agregare de pulbere, cu regim mecano-termic dat era utilizat ca material de concentrație limită, Culec, în șirul materialelor Cu-C de concentrații diferite [7],[8], a constituit punctul de plecare pentru utilizarea cuprului sinterizat izotrop în vederea utilizării lui ca material pentru electrozi la eroziunea electrică.

Rezultatele încercărilor efectuate în condiții identice cu cele prezentate la cap.4.4.2 (două variante a regimului mecanic, $p_1/p_2 = 1000/3000 \text{ daN/cm}^2$, respectiv $p_1/p_2 = 4000/6000 \text{ daN/cm}^2$, la o singură variantă a regimului termic $T_1/T_2 = 500/900^\circ\text{C}$) au fost sintetizate în fig.4.39 și fig.4.40, unde s-au reprezentat în funcție de energia impulsurilor variațiile coeficientului de stabilitate la eroziune a materialului, respectiv productivitatea prelucrării.

Se vede că o comportare evident mai bună o are cuprul sinterizat în varianta tehnologică I de presare cere, pe lângă faptul că este mai stabil, dă și productivități ale prelucrării mai mari. Cercetarea metalografică a structurilor a arătat că materialul Culec în varianta I are o granulație mai fină la o porozitate totală mai

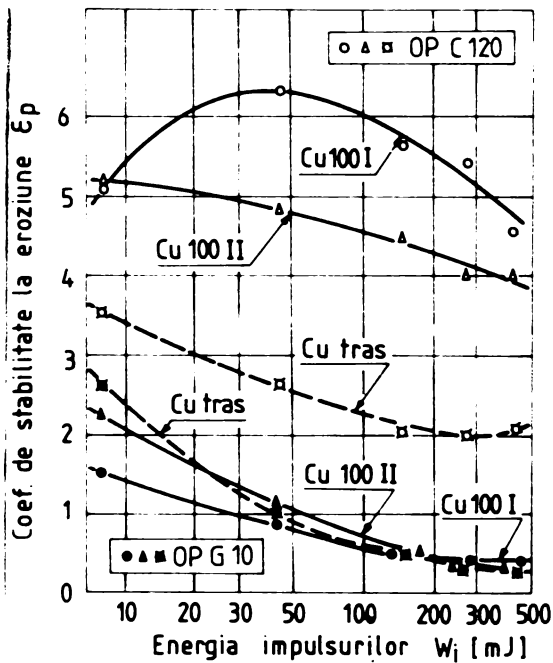


Fig. 4.39.

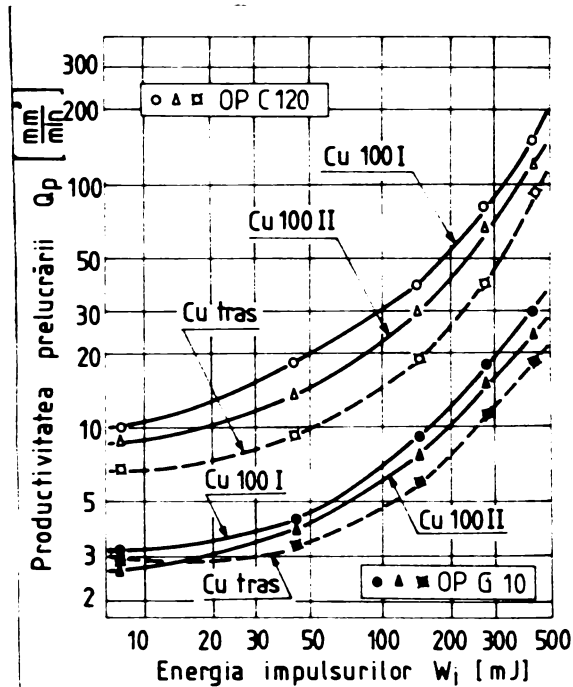


Fig. 4.40.

mare față de structura măgrobă, la porozitate totală mai redusă a variantei II [11].

Pentru explicarea acestor structuri este interesant să se urmărească variația porozității în timpul procesului de elaborare (tabelul nr.4.8).

Tabelul nr.4.8.

Variația compoziției suprafeței sinterizată izotrop în timpul procesului de elaborare

Varianta tehnologică $P_1/T_1/P_2/T_2$	P o r o z i t a t e (%)			
	după P_1	după T_1	după P_2	după T_2
I-1000 daN/cm ² /500°C/ /3000 daN/cm ² /900°C	49,84	49,76	32,63	8,68
II-4000 daN/cm ² /500°C/ /6000 daN/cm ² /900°C	17,94	14,78	10,00	1,90

Se observă că după primele procese porozitățile sînt mult diferite, ca urmare a variației mari a gradului de deformare, în primul rînd în zonele limitrofe suprafețelor de contact ale granulelor. Treptat urmare la varianta tehnologică I, cu porozitate mare după prima presare, sinterizarea de detensionare practică nu modifică porozitatea. Acest fapt se datorează temperaturii relativ scăzute și gradului de deformare relativ mic care permit păstrarea continuității rețelei de pori la o valcare de aproximativ 50%; procesul de recristalizare are o activitate scăzută, iar granulele rămîn la dimensiuni relativ mici. La cea de-a doua presare procesul de

recompactizare este mai eficientă, modificându-se porozitatea cu peste 17%. În același timp creșterea gradului de deformare și temperatura de 900°C, înaltă pentru cupru, permit o recristalizare cu viteză mai mare și reducerea substanțială a porozității, cu 24%. Este de presupus că porii fragmentați la presarea a două au o repartiție relativ omogenă și dimensiuni mai mici. Pe baza eredității unei structuri mai fine și granulele finale sînt mai mici.

La varianta a doua gradul de deformare ridicat după prima presare mărește viteza de recristalizare și în cazul sinterizării de detensionare, deși temperatura T_2 depășește cu puțin pe cea critică de recristalizare a cuprului; acest proces fiind suficient de activ pentru a mări germeni de recristalizare din zonele de contact și a mișca volumul porilor prin difuzii în straturile de suprafață ale granulelor. Acest fapt se pune în evidență printr-o contracție de sinterizare care reduce porozitatea cu peste 3%. Cu toate că cea de a doua presare se realizează la varianta II cu presiune de două ori mai mare decît la varianta I, recompactizarea este mai slabă. În acest mod se dovedește lipsa de continuitate a rețelei de porii, care este fragmentată încă de la prima presare și sinterizare. Sinterizarea finală dă în acest caz o structură mai groasă, bazată pe ereditatea unei granulații mai mari și realizată sub acțiunea unei recristalizări mai eficiente.

Comportarea mai bună la eroziune electrică a materialului elaborat în varianta tehnologică I a condus la alegerea acestei variante pentru elaborarea unui nou lot de electrozi din cupru sinterizat izotrop cu regimul de presare $p_1/p_2 = 1000/3000 \text{ daN/cm}^2$ și cu temperaturi de sinterizare diferite (tabelul nr.4.9).

Inferenții asupra structurii acestor materiale pot să aducă valorile porozităților, P_{01} , determinate înainte și P_{02} determinate după sinterizarea finală precum și resistivitățile electrice respective, R_1 și R_2 , măsurate la L&P - IF Cluj-Sapoca cu metoda celor patru sonde [105]. Se vede că, după recompactizare, cele trei grupe de electrozi care se diferit între ele numai prin temperatura primei sinterizări, au porozități și conductivități electrice mult diferite, scăzătoare cu creșterea temperaturii T_2 . Cea de-a doua sinterizare acționează pe fondul acestor structuri diferite dînd la rîndul ei rezultate diferite. Astfel, varianta de sinterizare I, cu $T_2 = 500^\circ\text{C}$, la care acționează complet revenirea și incomplet recristalizarea, nu dă scăderi semnificative ale porozității însoțite mult de scăderea rezistivității electrice. Aceasta este rezultatul deten-

Tabelul nr.4.9.

Electrozii din cupru isotrop sinterizat cu temperaturi diferite

T_1 (°C)	P_{o1} (%)	$r_1 \times 10^{-6}$ (ohm.cm)	Nr. variantei de sinterizare	T_2 (°C)	P_{o2} (%)	$r_2 \times 10^{-6}$ (ohm.cm)
500	21,25	0,0775	1	500	20,19	0,0560
			2	700	18,71	0,0256
			3	900	8,58	0,0198
700	18,90	0,0503	4	500	17,48	0,0312
			5	700	17,37	0,0236
			6	900	11,77	0,0209
900	14,22	0,0224	7	500	12,64	0,0226
			8	700	12,84	0,0216
			9	900	13,04	0,0223

sionării și consolidării punților de legătură prin difuzii pe distanțe scurte, cu realizarea unei continuități relative a materialului.

La electrozii sinterizați în variante 2 cu $T_2=700^\circ\text{C}$, aceste procese sînt mai avansate, rezarcindu-se scăderi semnificative atât ale porozității cit și ale resistivității electrice.

Electrozii 3, din aceeași categorie (cu $T_1=500^\circ\text{C}$) sinterizați final la $T_2=900^\circ\text{C}$, prezintă cele mai mari scăderi ale porozității și resistivității electrice ca urmare a acțiunii complete a recristalizării asupra înecării rețelei de pori, rețea care a fost fragmentată prin recompactizarea mecanică.

La electrozii 4, 5 și 6, sinterizați primar la o temperatură mai înaltă, $T_2=700^\circ\text{C}$, efectele sinterizărilor secundare își păstrează sensul, însă cu efecte mult atenuate de relativă stabilitate a unei structuri cu un grad mai avansat de recristalizare în timpul primei sinterizări. Așa se face că deși electrozii 6 intră în sinterizarea finală cu porozități și resistivități sensibile mai mici decât electrozii 3, iar cu valori mai ridicate ale acestor proprietăți după cea de-a doua sinterizare.

La electrozii 7, 8 și 9 sinterizarea inițială înaltă, $T_1=900^\circ\text{C}$, reduce porozitatea, grăunții recristalizați înconjoară și izolează porii, astfel încît aceștia se opun recompactizărilor ulterioare la represare și resinterizare. Resistivitatea electrică rămîne practic neeschimbată, iar porozitatea scade nesemnificativ; rezarcindu-se caier un proces de dilatare a porilor închiși, fapt care determi-

e creștere relativă apare a porozității cu creșterea temperaturii T_2 .

Încercările de comportare la eroziunea electrică cu impulsuri dependente în aceleași condiții de experimentare au permis compararea acestor electrozi. Clasificarea lor, în tabelul nr.4.10, s-a făcut după aceleași criterii ca și la electrozii Cu-C.

Tabelul nr.4.10.

Clasificarea electrozilor din cupru sinterizat izotrop în funcție de temperaturile de sinterizare

Nr. variantei de sinterizare	O r d i n e d e c l a s i f i c a r e							
	Ţel Cl20			Aliaj dur Cl0			Func-taj general	Clasi-ficare gene-rală
	Criterii		Func-taj	Criterii		Func-taj		
	ϵ_p	q_p		ϵ_p	q_p			
1	9	9	74	9	9	83	157	9
2	6	4	48	4	4	31	79	3
3	1	1	22	1	3	28	50	1
4	8	3	65	8	5	57	122	7
5	3	3	43	3	1	38	81	4
6	2	2	30	2	2	31	61	2
7	7	7	59	7	7	62	121	8
8	4	5	48	5	6	55	103	5
9	5	6	51	6	8	58	108	6

Analiza datelor arată că cea mai bună comportare o au electrozii cu $T_1/T_2=500/900^\circ\text{C}$. Rezultă că la eroziunea electrică cu impulsuri dependente poate fi folosit cu rezultate bune drept material de electrozi cupru sinterizat izotrop cu variante tehnologică de elaborare $p_1/T_1/p_2/T_2=1000\text{ daN/cm}^2/500^\circ\text{C}/5000\text{ daN/cm}^2/900^\circ\text{C}$.

Stabilitatea mai mare la eroziune electrică a acestor electrozi poate fi explicată prin acțiunea următoarelor fenomene:

a) modificarea câmpului de temperaturi dat de sursa termică a descărcărilor electrice pe electrod rezultând mărirea locală a gradientilor acestui câmp și creșterea componentei energice de evacuare a materialului în stare de vapori. Pentru ca acest fenomen să fie efectiv din punctul de vedere al eroziunii este necesar ca ecranarea termică locală dată de discontinuitățile termofizice formate de peri să fie asociată cu o bună conductivitate electrică și termică pentru a limita efectul Joule-Lents în masa de cupru și a evacua o mai mare cantitate de căldură înspre interiorul electrodului prin punțile conductoare;

b) inhibarea perilor deschisi la suprafața activă cu produse de piroliză a mediului de lucru și cu formarea de micropeliculi-sări locale în vecinătatea creterilor de eroziune, cu efect global

de protecție a electrodului;

e) modificări în repartiția energiei de efect, cu creșterea celei dezvoltate la obiectul prelucrării, fapt pus în evidență de productivitățile sensibil mai mari față de cele obținute cu electrozi din cupru electrolitic tras.

Raportul în care se află toate aceste efecte și ponderea lor în procesul de eroziune global este determinat în interdependență cu elementele spațiului de lucru și cu regimul de prelucrare.

C A P I T O L U L 5

INFLUENȚA REGIMULUI DE LUCRU ȘI A NATURII MATERIALULUI DE FINIȚIE ASUPRA CARACTERISTICILOR TECHNOLOGICE

5.1. Sistemul de acțiune tehnologică la prelucrarea prin eroziune electrică

Procesul de prelucrare prin eroziune electrică se studiază ca un sistem de acțiune, format dintr-un ansamblu de elemente, legate între ele prin relații interdependente care dirijează dinamica transformării tehnologice și valoarea factorilor și parametrilor care intervin.

În practica prelucrării prin eroziune electrică o parte din elementele de intrare în sistem sînt alese prin proiectarea și realizarea utilajului tehnologic, fie la valori determinate aprioric fie în domenii de valori reglabile continuu sau discret, variabile sau fixe în timpul transformării tehnologice. O altă categorie de relații de intrare în sistem sînt determinate de elementele spațialului de lucru care îndeplinesc funcțiile de suport și de transfer ale informației apriorice și adaptive și ai energiei utile.

Pentru un caz de prelucrare desfășurat în condiții care sînt date de mijloacele tehnice utilizate, este foarte importantă alegerea marilor de intrare la valori optime ale stărilor sau treptelor de reglare care definesc echilibrul regim de prelucrare.

Problema stabilirii unei ierarhizări a influenței factorilor și parametrilor de intrare reglabili, care în final determină relațiile de ieșire ale sistemului prin valorile caracteristicilor tehnologice, nu este univoc rezolvată în cazul eroziunii electrice.

Este conturată însă clar, atât din studiul procesului cit și din rezultatele practice [216], [223], constatarea că în toate cazurile influențasă determinant următoarele intrări opționale pentru operator :

- natura materialelor, respectiv perechea GP-ET și ML. Obiectul prelucrării este factor aprioric, mediul de lucru este de obicei prestabilit prin alegerea utilajului; opțională rămîine alegerea electrodului de transfer;

- polaritatea conectării, variabilă calitativ cu numai două stări : polaritatea directă și polaritatea inversă, criteriile de alegere fiind în general stabilite funcție de forma și caracteristicile impulsurilor [29], [73], [77], [91], [96], [108], [126], [137], [139],

[150], [163], [164], [194], [205];

- durata impulsului, t_1 , variabilă cu acțiune directă la toate tipurile constructive de generatoare de impulsuri, reglabilă direct la începutul prelucrării [216] + [223], sau adaptată în trepte la comanda adaptivă [37];

- treapta de curent, I , se măsoară și determină împreună cu tensiunea medie pe spațiul de lucru și cu timpul de impuls puterea electrică introdusă în fiecare descărcare. Nivelul de intensitate a curentului se determină de obicei prin numărul de transistoari introduși în paralel pe spațiul de lucru și se stabilește în funcție de valoarea dorită a mărimilor de ieșire conform unor grafice sau tabele experimentale pentru fiecare utilaj [216] + [223], ținând cont de restul factorilor de intrare. Treapta de curent și durata impulsului se aleg de obicei concomitent, ele fiind cele mai importante mărimi ale regimului electric;

- factorul de umplere (de exemplu [216]) respectiv timpul de pauză (de exemplu [219]) reprezintă o variabilă ajutătoare pentru stabilirea frecvenței impulsurilor;

- tensiunea de lucru care poate fi variată în limitele stricte se prin reglări ale sistemului de comandă, determinând indirect grosimea interstițiului, deci și caracteristica volt-ampereometrică a descărcării, cu influența asupra stabilității prelucrării;

- forma impulsului, la instalații care au variante de formă comandabile [216], cu implicații asupra repartizării energiei între electrod și piesă.

În cazul generatoarelor dependente [217], toate mărimile la cerute de impulsuri sînt determinate indirect prin capacitatea condensatorului de acumulare, valoarea reglată a tensiunii de străpungere și impedanța circuitului de încălzire.

Printre caracteristicile tehnologice pentru proiectarea proceselor de prelucrare prin eroziune se iau în considerare în cazul general cele care definesc incizii de performanță și transformării tehnologice prin prelucrări dimensionale.

Precizia prelucrării este determinată la eroziunea electrică prin precizia de execuție a electrozilor de transfer și dinamica schimbării formei acestuia în timpul prelucrării măsurată prin debitul uzării \dot{V}_z (mm^3/min), o măsură a vitezei de uzare volumică și prin uzura relativă volumică χ (%), o măsură a uzării sculei în timpul îndepărtării unității de volum din obiectul de prelucrat.

Productivitatea prelucrării, \dot{V}_p (mm^3/min), o măsură a vitezei de prelucrare volumică se determină în ultimă instanță timpul activ

de lucru pe utilajul tehnologic.

Calitatea suprafeței definită prin mărimea rugozității și adâncimea stratului de suprafață modificat structural.

Deși nu se ține cont de alți factori de intrare care sînt relativ independenți de natura O_1 și A_2 (compoziția NL sistemul de circulație și evacuare a produselor eroziunii, caracteristicile sistemului de avans, etc.), studiul comportării la eroziune a materialelor de electrozi trebuie efectuat în funcție de parametri impulsurilor ca variabile independente și de caracteristicile tehnologice, ca funcții de răspuns.

5.2. Planificarea statistică a experimentelor

Metoda clasică de cercetare experimentală prin variația succesivă a cîtei unei singure variabile și menținerea celorlalte la valori constante, nu dă rezultate satisfăcătoare, stît din cauza volumului exagerat de experimentări cît și din cauza neevidențierii interacțiunilor dintre mai multe variabile. În acest considerent s-a adoptat un sistem de experimente programate statistic la care valorile mai multor factori independenți au fost variate simultan iar efectele fiecărui precum și ale interacțiunilor lor au fost determinate separat [28], [97], [132], [133], [192], [193].

5.2.1. Alegerea variabilelor independente și a funcțiilor de răspuns

Ținînd cont de ierarhizarea factorilor de intrare [12], [118], s-au ales următoarele variabile independente de intrare:

- \tilde{x}_1 - materialul electrodului, variabilă calitativă;
- \tilde{x}_2 - durata impulsului de curent (ms);
- \tilde{x}_3 - tensiunea medie pe interstițiul de lucru (V);
- \tilde{x}_4 - intensitatea curentului (A);
- \tilde{x}_5 - factorul de umplere al impulsurilor de curent (τ);
- \tilde{x}_6 - regîsul impulsurilor de tensiune, mono sau bipuls, variabilă calitativă.

Preț indicator de performanță s-au determinat experimental:

- debitul uzării electrodului q_e (mm³/min);
- productivitatea prelucrării q_p (mm³/min);
- uzura relativă volumică (λ);
- rugozitatea suprafeței, R_a (μ m).

Considerînd fiecare indicator ca o funcție de răspuns a celor k variabile care pot fi măsurate și controlate, realitatea fizică va satisface dependența:

$$\eta = f(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_k) \quad (5.1)$$

Interivă complexității fenomenelor, adevărata dependență funcțională nu poate fi cunoscută exact, însă poate fi determinată cu o corectare aproximație, pe cale experimentală.

Dezvoltând în serie Taylor funcția (5.1) în jurul unui punct convenabil, considerat centrul experimentului de coordonate $\tilde{x}_{10}, \dots, \tilde{x}_k$, se obține :

$$\eta = f(\tilde{x}_{10}) + \sum_{i=1}^k \frac{\partial f}{\partial \tilde{x}_i} \Big|_{\tilde{x}_{i0}} \tilde{x}_i + \sum_{i < j}^k \frac{\partial^2 f}{\partial \tilde{x}_i \partial \tilde{x}_j} \Big|_{\tilde{x}_{ij0}} \tilde{x}_i \cdot \tilde{x}_j + \dots \quad (5.2)$$

Pentru că derivatele parțiale din relația (5.2) nu se pot calcula se înlocuiește funcția f necunoscută cu o expresie polinomială :

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \tilde{x}_i + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} \tilde{x}_i \cdot \tilde{x}_j + \dots \quad (5.3)$$

Pe cale experimentală coeficienții $\beta_0, \beta_1, \beta_{ij}$, nu pot fi determinați decât cu o corectare aproximație, răspunsul experimental corespunzător unui polinom de aproximare y definit experimental și diferind de cel adevărat datorită erorii experimentale :

$$\eta = y + \varepsilon \quad (5.4)$$

Funcția de aproximare va fi :

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j}^k b_{ij} x_i x_j + \dots \quad (5.5)$$

unde coeficienții b_0, b_1, b_{ij} reprezintă estimările coeficienților $\beta_0, \beta_1, \beta_{ij}$.

Pentru obținerea unei imagini globale asupra caracteristicilor luate în studiu s-a propus estimarea lor prin experiment cu ajutorul a trei selecții de explorare : una în regiă de creștere (fin) și două în regiă de degrașare. Limitele și mărimile corespunzătoare acestor selecții sînt prezentate în tabelul nr.5.1.

În mulțimea punctelor discrete, posibile în domeniul de selecție s-a ales combinații ale variabilelor pe cele două nivele extreme atribuite fiecăreia dintre selecții și s-a format un program experimental planificat statistic.

Valorile naturale ale variabilelor s-au transferat în valori codificate care permit explorarea fiecărui interval de sondaj între limitele -1 și +1, conform relației :

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i0}}{I_i} \quad (5.6)$$

unde x_i - valoarea codificată a variabilei; \tilde{x}_i - valoarea naturală a variabilei considerate; \tilde{x}_{i0} - valoarea naturală a nivelului de bază; I_i - intervalul de variație, în valoare naturală.

Tabelul nr.5.1.

Variabilele și limitele domeniilor de experimentare

Categoriile de regim	Mărimi caracteristice ale domeniului	Variabilele independente					
		\tilde{x}_1 nat. nat.	\tilde{x}_2 t_1 (ms)	\tilde{x}_3 U (V)	\tilde{x}_4 I (A)	\tilde{x}_5 (λ)	\tilde{x}_6 Tip imp.
Fin	Nivel sup.	Cu	20	45	14	62	mono
	Nivel inf.	M ^{II}	10	40	7	40	bi
F	Nivel de bază	-	15	42,5	10,5	51	-
	I_V	-	5	2,5	3,5	11	-
agregare 1	Nivel sup.	Cu	200	40	34	80	mono
	Nivel inf.	M ^{II}	50	35	27	58	bi
D ₁	Nivel de bază	-	125	37,5	30,5	69	-
	I_V	-	75	2,5	3,5	11	-
agregare 2	Nivel sup.	Cu	500	40	34	80	mono
	Nivel inf.	M ^{II}	100	35	27	58	bi
D ₂	Nivel de bază	-	300	37,5	30,5	69	-
	I_V	-	200	2,5	3,5	11	-

M^{II} - simbol ce corespunde, în mod succesiv, materialelor de electrozi Cu-d; Cu-C; Cu sintetizat izotrop.

Elementul matricii complete de experimentare este :

$$X = \begin{cases} i = 0, 1, \dots, k \text{ coloane} \\ j = 1, 2, \dots, 2^k \text{ linii} \end{cases} \quad (5.7)$$

o variabilă fictivă x_0 este necesară în matrice pentru calculul mediei răspunsurilor $\bar{y} = f(x_{10})$.

Se poate constata că, deși s-au ales populații de selecții restrinse numărul de încercări N_0 necesar pentru fiecare experiment factorial complet este mare :

$$N_0 = p^k = 2^6 = 64 \quad (5.8)$$

unde p - numărul de nivele al variabilelor ; k - numărul de variabile

5.2.2. Determinarea matricii de experimentare

Întru reducerea volumului de experiențe s-a ales o replică fracționată a programului statistic de experiențe, de tipul $K_{2^{6-2}}$ încercări.

Introducându-se valorile coeficienți ale variabilelor (+1 pentru nivelul superior și -1 pentru nivelul inferior) s-a alcătuit matricea de planificare din tabelul nr.5.2.

Relațiile de generare adoptate au fost :

$$x_5 = x_1 x_2 x_3 ; \quad x_6 = x_1 x_2 x_4 \quad (5.9)$$

care conduc la contrastul definitiv generalizat :

$$I = x_1 x_2 x_3 x_5 = x_1 x_2 x_4 x_6 = x_3 x_4 x_5 x_6 \quad (5.1c)$$

Tabelul nr.5.2.

Matricea planificării experiențelor

Experiența	Codul	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
1	123	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1
2	12	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1
3	145	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1
4	134	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1
5	136	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1
6	156	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1
7	1246	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1
8	123456	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1
9	35	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1
10	()	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
11	245	+1	-1	+1	-1	+1	+1	-1
12	234	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1
13	236	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
14	256	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1
15	46	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1
16	3456	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1

Efectele confundate (incluse) sînt determinate de relațiile :

$$x_1 = x_2x_3x_5 = x_2x_4x_6$$

$$x_2 = x_1x_3x_5 = x_1x_4x_6$$

$$x_3 = x_1x_2x_3 = x_4x_5x_6$$

$$x_4 = x_1x_2x_6 = x_3x_5x_6$$

$$x_5 = x_1x_2x_3 = x_3x_4x_6$$

$$x_6 = x_1x_2x_4 = x_3x_4x_5$$

$$x_1x_2 = x_3x_5 = x_4x_6$$

$$x_1x_3 = x_2x_5 \quad x_1x_4 = x_2x_6$$

$$x_1x_5 = x_2x_3 \quad x_1x_6 = x_2x_4$$

$$x_3x_4 = x_5x_6 \quad x_3x_6 = x_4x_5$$

$$x_1x_3x_6 = x_2x_5x_6 = x_2x_3x_4 = x_1x_4x_5$$

$$x_2x_3x_6 = x_1x_5x_6 = x_1x_3x_4 = x_2x_4x_5$$

(5.11)

Efectele liniare nu sînt confundate și implicit nu includ efecte de interacțiune ale unor perechi de variabile.

rezultă că modelul polinomial adoptat pentru funcțiile y avute în vedere va fi de forma :

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_6 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{15}x_1x_5 + b_{16}x_1x_6 + b_{34}x_3x_4 + b_{36}x_3x_6 + b_{136}x_1x_3x_6 + b_{236}x_2x_3x_6$$

(5.12)

5.3. Execuarea încercărilor experimentale

Programul experimental a fost realizat prin încercări în regim bipuls pe o instalație echipată cu un generator Agipuls și un generator suplimentar pentru stimularea arzării, cuplat în paralel, suprapunând peste impulsurile de bază impulsuri de tensiune mai mare, sincronizate cu un mic decalaj în avans față de cele principale.

Piesele probă din oțel C120, având un orificiu axial cu diametrul $d = 12$ mm, călitate și revenite la 58 HRC, au fost montate pe masa mașinii conform schemei din fig.5.1. Forțele de strângere ale

tridelor de prindere au asigurat menținerea probei față de piesa intermediară PI și camera de injecție CI.

Electrozii de transfer cilindric prelucrați la un diametru $\phi = 20$ mm s-au poziționat coaxial cu piesa probă, realizându-se repartiția simetrică a suprafeței frontale de interacțiune, cu aria $A_f = 200$ mm². Calizarea nivelului fiecărei variabile din experiment, în

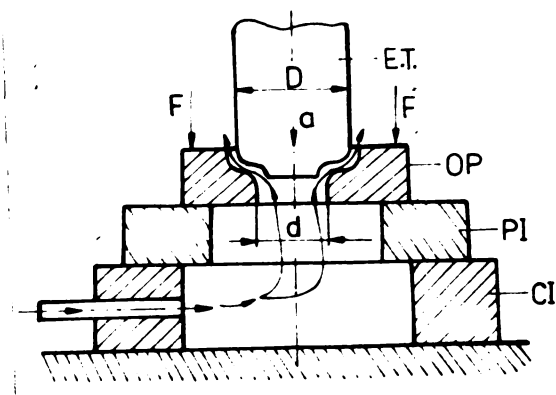


Fig.5.1.

coordonată cu linia matricei de experimentare s-a obținut prin programarea generatorului de impulsuri și reglarea corecționatoare a servomecanismului de avans autecat.lichidul dielectric a fost montat, s-a adoptat spălarea interstițiului prin injecție cu o presiune constantă $p_j = 0,125$ daN/cm². Fiecare experiență a fost replicată de $n = 2$ ori.

În matricea planificată s-au ordonat nivelele $x_1 = +1$, în primele opt linii pentru utilizarea lor în mod succesiv cu liniile 9 + 16 în care s-au luat în paralel, cu nivel codificat $x_2 = -1$, materialele diferite Ni-Cu, Cu-C, Cu sint. Realizarea efectivă a experiențelor s-a desfășurat în succesiune randomizată cu ajutorul unui generator de numere aleatoare.

Pentru determinarea valorilor funcțiilor de răspuns s-a măsurat timpul prelucrării. Masăle pieselor probei și electrozilor s-au cântărit cu precizie de 2×10^{-4} g; rugozitatea suprafețelor generate s-a măsurat după criteriul R_a folosind un aparat de tip surtronic. În toate încercările s-a folosit polaritatea inversă (+ pe ET).

5.4. Metodele de analiză a funcțiilor de răspuns prin determinarea regresiei

5.4.1. Calculul dispersiilor funcțiilor de răspuns

Pentru fiecare măsurătoare s-au calculat valorile funcțiilor

caracteristicilor $\psi_1(\text{mm}^3/\text{min})$, $\psi_2(\text{mm}^3/\text{min})$ și $\psi_3(\text{mm}^3/\text{min})$. În valorile y_q ale acestor funcții s-au calculat mediile \bar{y}^{ale} încercărilor.

$$\bar{y} = \frac{\sum_{q=1}^n y_q}{n} \quad (5.13)$$

unde n - numărul de replici

Acceptându-se a priori o repartiție normală a rezultatelor, s-au calculat dispersiile funcțiilor de răspuns :

$$s_1^2 = \frac{\sum_{q=1}^n (y_q - \bar{y})^2}{n - 1} \quad (5.14)$$

precum și valoarea coeficientului maxim, G_{exp} , al dispersiilor experimentale.

$$G_{\text{exp}} = \frac{\max s_1^2}{\sum_{i=1}^N s_1^2} \quad (5.15)$$

Acest coeficient a fost comparat cu valoarea teoretică pentru a verifica omogenitatea dispersiilor în intervalul de încredere acceptat [192].

5.4.2. Calculul coeficienților de regresie

Estimațiile coeficienților de regresie pentru ecuația (5.11) se pot calcula aplicând metoda celor mai mici pătrate [26].

Intrucît experimental a fost realizat după o schemă ortogonală variabilele în valori codificate au proprietățile :

$$\sum_{j=1}^N x_{1j} = 0 ; \quad \sum_{j=1}^N x_{1j}^2 = N \text{ și } \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N x_{1j} \cdot x_{ij} = 0 \quad (5.16)$$

Expresia de calcul este :

$$b_1 = \frac{1}{\sum_{j=1}^N x_{1j}^2} \sum_{j=1}^N x_{1j} \cdot y_j = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{1j} \cdot \bar{y}_j \quad (5.17)$$

Pentru calculul estimațiilor coeficienților de interacțiune s-a format din matricea de bază o altă matrice, de calcul (tabelul nr.5.3) în care s-au determinat valorile codificate pentru interacțiuni.

Calculul se face utilizând coloanele matricei din tabelul nr.5.3 după relații similare ecuației (5.17).

$$b_{1v} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (x_1 \cdot x_v)_j \cdot \bar{y}_j \quad (5.18)$$

$$b_{1vz} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (x_1 \cdot x_v \cdot x_z)_j \cdot \bar{y}_j \quad (5.19)$$

unde ($i \neq v \neq n$) = 1,2...6, reprezintă numărul de ordine al variabilelor independente în interacțiune, considerate.

Tabloul nr.5.3.

Matricea de calcul a interacțiunilor

Indicele funcției de răspuns	Variabilele interacțiunilor									
	X_1X_2	X_1X_3	X_1X_4	X_1X_5	X_1X_6	X_3X_4	X_3X_6	$X_1X_3X_6$	$X_2X_3X_6$	
1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	
2	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	
3	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	
4	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	
5	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	
6	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	
7	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	
9	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	
10	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	
11	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	
12	-1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	
13	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	
14	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	
15	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	
16	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	

5.4.3. Testarea semnificației coeficienților de regresie

Pentru ca estimările să fi semnificative coeficienții de regresie b_j trebuie să depășească o valoare critică de semnificație TB .

$$b_j > TB \tag{5.20}$$

unde

$$TB = t_{T;n}(b_j) \tag{5.21}$$

t_T - valoarea tabulată a unei variabile aleatoare cu distribuție de repartiție cunoscută [97] cu care se testează semnificația coeficienților, funcție de nivelul de semnificație acceptat și numărul de grade de libertate, adică numărul de interacții referitoare la cele n observații y_i ($1 \leq i \leq n$) cu care se determină dispersia valorilor medii ale funcțiilor de răspuns; $S(b_j)$ - abaterea standard a estimărilor coeficienților de regresie care au expresia :

$$S(b_j) = \sqrt{s^2(b_j)} = \sqrt{\frac{S^2(y)}{N}} = \sqrt{\frac{S^2(y)}{N \cdot n}} = \frac{1}{N} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N s_i^2}{n}} \tag{5.22}$$

unde

$$S^2(y) = \frac{\sum_{i=1}^N s_i^2}{N} - \text{media aritmetică a dispersiilor funcțiilor de răspuns;}$$

$$S^2(y) = \frac{S^2(\bar{y})}{n} - \text{dispersia valorilor medii ale funcției de răspuns}$$

$$s^2(b_j) = \frac{s^2(\bar{y})}{n} - \text{dispersia estimărilor coeficienților de regresie.}$$

5.5. Inercări cu electrosi W75-Cu25

5.5.1. Elaborarea materialului W75-Cu25

În funcție de tehnologia de elaborare aplicată [104], pot fi obținute două categorii de materiale W-Cu :

- cu structuri de înglobare la care componentul minoritar se află dispersat în cel de bază, iar materialul se obține prin presarea și sinterizarea amestecului de pulberi,

- cu structuri de întrepătrundere la care constituenții formează rețele continui întrepătrunse, iar materialul se obține prin prelucrarea succesivă a constituenților, fie prin presarea și sinterizarea unui schelet de wolfram și imbinarea ulterioară cu cupru lichid a acestuia; fie prin topirea cuprului și turnarea lui peste pulbera de wolfram plasată anterior prin umplere în recipiente de grafit.

Odată cu dezvoltarea procedurii de prelucrare prin eroziune electrică, acest material, elaborat inițial pentru contacte electrice la curenți mari, încearcă și ca material de electrod a dat rezultate foarte bune, [36], [83], [225].

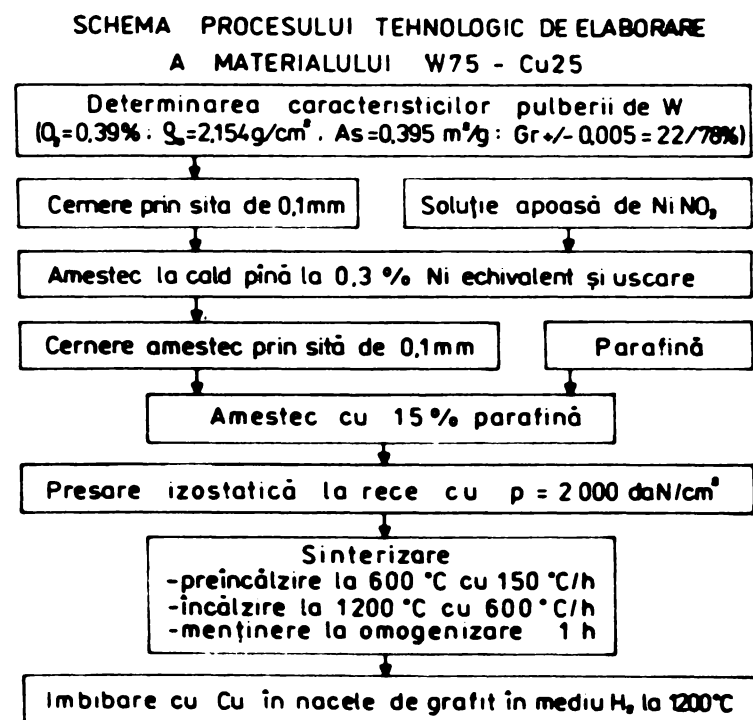


Fig.5.2.

recuperarea depozitelor de filamente, pe baza căreia s-a elaborat [104] un proces tehnologic de obținere a unui material W75-Cu25 (fig.5.2).

În R.N.R. prizele precupări pentru obținerea unui material W-Cu încep în jurul anului 1970 și se concretizează [184], prin obținerea la ICRN București a unui material compus W(77-81,5)-Cu(18-22)-Ni(0,5-1), cantitatea de Cu fiind extinsă ulterior până la max.32%. Reajunsul acestei tehnologii constă în faptul că se bazează pe pulberi de wolfram din import.

În anii 1973-1976 s-a pus la punct la ICRP-I.F.Cluj-Napoca o tehnologie de obținere a pulberii de wolfram prin re-

Iupă această tehnologie s-a elaborat lotul experimental de materiale W/5-Cu25 avind densitate $\rho = 14,9 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$, duritate HB = $203 \pm 5 \text{ daN/m}^2$, rezistivitate electrică $\rho_r = \text{max. } 0,005 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$

5.5.2. Caracteristici de productivitate și uzare obținute cu electrozi de transfer din W/5-Cu25 și Cu

Rezultatele experimentale date de încercările cu electrozi din aceste materiale au fost prelucrate conform cap.5.4. Mediile și dispersiile valcrilor experimentale s-au înscris în tabelele nr.5.4, 5.5 și 5.6.

Tabclul nr.5.4.

Valori medii și dispersiile funcțiilor de răspuns la regimul de finisare cu electrozi de Cu și W-Cu

Linia matriciei de exper- imentare	\bar{y}		\bar{y}_p		\bar{y}_t	
	$y(-\frac{R}{U})$	s^2	$y(-\frac{R}{U})$	s^2	$y(\lambda)$	s^2
1	1,455	1,318	8,016	4,500	17,050	15,346
2	1,121	1,112	6,333	4,447	17,525	13,836
3	4,352	1,114	9,338	5,214	46,720	23,591
4	1,961	1,091	3,093	1,067	63,215	19,469
5	0,521	0,104	5,204	0,004	10,020	1,881
6	0,247	0,001	0,602	0,031	5,190	0,304
7	2,810	0,410	20,180	2,880	13,840	14,32
8	2,296	0,020	25,585	1,022	8,835	0,594
9	0,069	0,000	1,224	0,008	5,645	0,432
10	0,067	0,001	0,766	0,012	0,500	4,147
11	0,411	0,001	20,353	3,678	1,354	0,344
12	0,212	0,001	9,410	0,241	2,257	0,014
13	0,263	0,033	9,671	0,868	3,510	0,002
14	0,809	0,000	8,253	0,266	3,010	0,000
15	1,054	0,015	20,933	15,401	3,135	1,201
16	0,850	0,034	22,253	10,331	3,791	0,101
G_{exp}	-	0,3284	-	0,2362	-	0,2476

entre $n = 16$ estimări independente, fiecare avind un grad de libertate și pentru o probabilitate de încredere adoptată la 95% s-a calculat prin interpolare [192], valoarea critică tabelată $G_{tab} = 0,4546$.

Pentru a putea considera omogen dispersiile conform testului Cochran [192, pg.372] s-a verificat $G_{exp} > G_{tab}$

Coefficientul maxim G_{exp} a fost calculat și înscris în ultima linie a tabelelor 5.4 - 5.6. Se constată că în toate cazurile dispersiile sînt omogene în intervalul de încredere acceptat.

Tabelul nr.5.5.

Valorile medii și dispersiile funcțiilor de răspuns la regimul de degroșare I1, cu electrozi din Cu și n-Cu.

Linia matricii de expe- rimentare	I		II		I	
	$y\left(\frac{E}{E_{12}}\right)$	s^2	$y\left(\frac{E}{E_{12}}\right)$	s^2	$y(\omega)$	s^2
1	7,425	9,680	130,945	269,516	5,565	2,815
2	11,060	15,070	96,025	1,638	11,492	15,129
3	15,660	3,050	108,605	3,092	8,239	0,704
4	29,738	0,510	151,520	603,434	19,863	7,722
5	8,123	1,948	83,495	57,352	9,345	0,577
6	4,580	0,181	120,420	101,074	3,832	0,455
7	10,312	10,580	133,435	21,346	7,776	7,344
8	3,452	2,464	136,030	1,125	2,527	1,362
9	2,735	1,000	144,495	201,104	1,935	0,832
10	3,080	0,423	107,940	64,071	2,880	0,673
11	2,435	0,048	63,230	219,661	2,810	0,520
12	1,975	0,036	101,230	45,315	1,945	0,004
13	1,130	0,024	83,230	10,125	1,345	0,018
14	1,000	0,180	120,230	91,395	0,815	0,024
15	2,395	0,031	136,335	37,932	1,710	0,045
16	2,005	0,048	154,615	41,861	1,230	0,007
G_{exp}	-	0,3323	-	0,3404	-	0,3416

Tabelul nr.5.6.

Valorile medii și dispersiile funcțiilor de răspuns la regimul de degroșare I2, cu electrozi din Cu și n-Cu

Linia matricii de expe- rimentare	I		II		I	
	$y\left(\frac{E}{E_{12}}\right)$	s^2	$y\left(\frac{E}{E_{12}}\right)$	s^2	$y(\omega)$	s^2
1	0,460	0,115	141,390	126,723	0,440	0,018
2	0,755	0,048	105,725	28,200	0,710	0,029
3	23,570	4,605	177,155	45,030	13,340	3,026
4	25,960	2,031	129,070	1,522	20,634	4,234
5	6,210	4,205	80,625	9,901	7,660	5,056
6	2,090	0,245	110,850	82,947	1,905	0,361
7	0,895	0,042	145,230	12,103	0,620	0,024
8	0,485	0,031	133,695	245,754	0,365	0,006
9	1,355	0,026	113,020	0,001	1,730	0,020
10	1,910	0,013	86,670	43,431	2,215	0,004
11	2,255	0,101	119,315	6,230	1,875	0,054
12	1,820	0,051	82,990	25,633	2,225	0,162
13	0,450	0,024	87,620	6,771	0,505	0,026
14	0,145	0,004	74,830	141,120	0,200	0,013
15	2,375	0,046	124,880	72,963	1,895	0,002
16	1,915	0,151	144,550	160,545	1,320	0,240
G_{exp}	-	0,4008	-	0,2347	-	0,3766

5.5.5. Estimarea caracteristicilor tehnologice prin metode sistematice experimentale la utilizarea AT din 175-1025

Tabelul nr.5.7.

Estimările coeficienților de regresie la prel. în reg. de finisare cu AT din cupru și 175-1025

Coeficient	Caracteristici dependente		
	\bar{y}	\bar{x}_1	\bar{x}_2
b ₀	1,121	10,920	13,592
b ₁	0,729	0,676	0,215
b ₂	-0,020	2,760	-4,943
b ₃	-0,168	-0,435	0,343
b ₄	0,622	5,430	4,039
b ₅	0,120	1,540	-1,955
b ₆	-0,005	2,573	-0,831
b ₁₂	0,095	2,174	-2,435
b ₁₃	-0,119	0,616	1,245
b ₁₄	0,357	-1,225	5,623
b ₁₅	0,122	0,051	-1,238
b ₁₆	-2,232	0,006	-2,738
b ₃₄	-2,236	-0,358	0,466
b ₃₆	0,114	1,522	-0,325
b ₁₃₆	0,115	-0,201	-1,191
b ₂₃₆	-0,193	0,560	0,334
TR	0,2148	0,6756	0,3146

Utilizând valorile numerice din tablele nr.5.4,5.5 și 5.6 și matricea de calcul din tabelul nr.5.2 s-au calculat estimările coeficienților de regresie (tabelul nr.5.7 și nr.5.8).

Intrucât s-a acceptat intervalul de încredere pentru limitele care încadrează răspunsul exact cu probabilitatea de 95%, la nivelul de semnificație corespunzător $\alpha = 0,05$ și la frecvența gradeilor de libertate

$$v = n(n-1) + b(2-1) = 16,$$

se determină valoarea tabelată $F_p = 2,12$ (28, nr.321).

Tabelul nr.5.8.

Estimările coeficienților de regresie la prelucrarea în regim de degroșare cu AT din cupru și 175-1025

Coeficient	Degroșare 1			Degroșare 2		
	\bar{y}	\bar{x}_1	\bar{x}_2	\bar{y}	\bar{x}_1	\bar{x}_2
b ₀	6,697	123,595	5,249	4,552	115,904	2,603
b ₁	4,603	0,566	2,401	2,372	11,691	2,107
b ₂	-1,848	-12,334	-0,964	-3,597	-4,573	-2,735
b ₃	0,382	0,299	0,291	0,306	-2,272	0,757
b ₄	1,403	12,244	0,535	2,805	15,897	1,682
b ₅	-1,735	11,042	-1,865	-0,446	11,038	-0,375
b ₆	-2,572	-2,517	-1,000	-2,731	-2,110	-1,704
b ₁₂	-1,489	6,480	-0,546	-2,203	3,493	-2,441
b ₁₃	0,515	-3,183	0,509	0,371	-4,375	0,808
b ₁₄	1,697	4,693	0,431	2,321	2,141	1,349
b ₁₅	-1,735	2,098	-1,230	0,407	2,140	-0,729
b ₁₆	-2,110	-1,092	-1,055	-2,353	-6,830	-1,273
b ₃₄	0,488	0,010	0,332	-0,216	-7,840	0,074
b ₃₆	-2,829	-2,314	-0,188	0,133	1,100	-0,132
b ₁₃₆	-0,897	0,235	-0,419	0,112	-4,395	-0,087
b ₂₃₆	0,099	3,970	0,447	0,065	-0,672	0,100
TR	0,651	3,996	0,623	0,320	3,031	0,402

cu aceasta și cu abaterile standard corespunzătoare s-au calculat pragurile de semnificație F_{α} , conform relației (5.20). Valorile lor s-au inserat în ultima linie a tabelelor nr.5.7 și nr.5.8. Toți coeficienții semnificativi : b_1 ; b_{1V} ; b_{1Vn} mai mari decât valoarea F_{α} s-au subliniat.

Valoarea coeficienților de regresie este o măsură cantitativă a influenței variabilei respective asupra caracteristicii tehnologice considerate. Valori relativ mai mari ale acestor coeficienți indică o influență relativ mai intensă, iar semnul arată sensul influenței.

Cu valorile estimate ale coeficienților de regresie se pot scrie modele matematice (conform relației 5.5) pentru fiecare funcție de răspuns.

cu excepția tensiunii medii pe spațiul de lucru (variabila x_3) care determină modificări nesemnificative, toți ceilalți factori dau direct sau prin interacțiuni dependențe semnificative ale funcțiilor de răspuns; cele mai intense fiind natura materialului MT (variabila x_1) și intensitatea curentului de lucru (variabila x_2).

Influențele separate ale variabilelor pot fi studiate pornind din centrul domeniului de experimentare în care variabilele au valoarea nivelului de bază, adică valori codificate nule, iar funcțiile de răspuns au valori estimate prin coeficientul aceste b_0 . Mutând o parte dintre factori la valoarea codificată nulă, x_{10} , și dând valori altora în limitele domeniului se pot determina ecuații de regresie parțiale cu care se pot estima prin interpolare orice valori în interiorul domeniului.

Pentru separarea influenței materialului de electrod s-au considerat mai întâi numai $x_1 \neq 0$ și anume $x_1 = \pm 1$, variabila fiind calitativă și s-au calculat funcțiile:

$$y(x_1) = f(x_{10}) \pm \beta_1 \approx b_0 \pm b_1 \quad (5.22)$$

pentru separarea succesivă a influențelor celorlalți factori s-au calculat :

$$y(x_1, x_2) = f(x_{10}) \pm \beta_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1 x_2 \quad (5.23)$$

$$b_0 \pm b_1 + b_2 x_2 + b_{11} x_1 \cdot x_2$$

unde i a fost luat pe rând, $i = 2, 3, 4, 5$.

s-au calculat valorile la limitele (+) și (-) codificate ale funcțiilor de răspuns după care s-a făcut trecerea la valorile naturale, conform relației nr.5.6 și s-au determinat ecuațiile de regresie parțiale. Variabila x_6 , fiind calitativă, nu are sens decât în punctele $x_6 = +1$ pentru monopulsuri și $x_6 = -1$ pentru regimul bipuls. Introducerea sa cu aceste valori ar duce la dublarea numărului ecua-

știilor experimentale prin determinarea unor modele matematice separate pentru fiecare funcție de răspuns: unele pentru $x_6 = +1$, altele pentru $x_6 = -1$. Pentru simplificarea s-a păstrat variabila x_6 la un nivel de bază fictiv, $x_6 = 0$, influența sa păstrându-se implicită în funcția medie a răspunsului $f(x_{10})$.

S-au determinat în acest mod ecuațiile experimentale:

a) pentru electrozi din Cu

a.1) în regiunea P:

$$Q_{\text{CuP}} = 1,845 \text{ cm}^3/\text{min}; \quad Q_{\text{PCuP}} = 10,294 \text{ cm}^3/\text{min}; \quad Y_{\text{CuP}} = 22,9\% \quad (5.24)$$

$$Q_{\text{CuP}}(x_1) = 1,62 + 0,015 t_1 = 6,72 - 0,115 U = 0,298 I - 1,182 = \\ = 0,723 + 0,022 \tau = 1,845 - 0,377 x_6 \quad (5.25)$$

$$Q_{\text{PCuP}}(x_1) = 0,947 t_1 - 3,91 = 13,37 - 0,072 U = 1,216 I - 2,471 = \\ = 2,917 + 0,145 \tau = 10,294 + 3,6 x_6 \quad (5.26)$$

$$Y_{\text{CuP}}(x_1) = 48,047 - 1,676 t_1 = 50,40 - 0,835 U = 17,186 + 0,545 I = \\ = 46,397 - 0,431 \tau = 22,9 - 13,42 x_6 \quad (5.27)$$

a.2) în regiunea D1:

$$Q_{\text{CuD1}}(x_6) = 11,3 \text{ cm}^3/\text{min}; \quad Q_{\text{PCuD1}} = 130,16 \text{ cm}^3/\text{min}; \\ Y_{\text{CuD1}} = 8,65\% \quad (5.28)$$

$$Q_{\text{CuD1}}(x_1) = 10,695 - 0,053 t_1 = 24,74 - 0,358 U = 1 - 19,2 = \\ = 33,38 - 0,32 \tau = 11,3 - 4,68 x_6 \quad (5.29)$$

$$Q_{\text{PCuD1}}(x_1) = 139,918 - 0,078 t_1 = 197,09 - 1,785 U = 0,411 I - 65,37 = \\ = 42,095 - 1,276 \tau = 130,16 - 11,61 x_6 \quad (5.30)$$

$$Y_{\text{CuD1}}(x_1) = 11,667 - 0,024 t_1 = 20,65 - 0,32 U = 0,232 + 0,276 I = \\ = 31,201 - 0,327 \tau = 8,65 - 2,65 x_6 \quad (5.31)$$

a.3) în regiunea I2:

$$Q_{\text{CuD2}}(x_6) = 7,504 \text{ cm}^3/\text{min}; \quad Q_{\text{PCuD2}} = 127,595 \text{ cm}^3/\text{min} \\ Y_{\text{CuD2}} = 5,71\% \quad (5.32)$$

$$Q_{\text{CuD2}}(x_1) = 7,786 - 0,034 t_1 = 17,66 - 0,271 U = 1,465 I - 37,16 = \\ = 12,855 - 0,077 \tau = 7,504 - 5,08 x_6 \quad (5.33)$$

$$Q_{\text{PCuD2}}(x_1) = 121,715 + 0,0196 t_1 = 199,84 - 1,86 U = 5,128 I - 20,81 = \\ = 44,928 + 1,192 \tau = 127,595 + 9,99 x_6 \quad (5.34)$$

$$Y_{\text{CuD2}}(x_1) = 13,474 - 0,0259 t_1 = 27,31 - 0,572 U = 0,866 I - 20,7 = \\ = 16,273 - 0,153 \tau = 5,71 - 3,07 x_6 \quad (5.35)$$

b) REACTIA electrochimică din H₂S-2H₂S

b.1) în regiunea I:

$$Q_{\text{HWCuF}} = 0,397 \text{ m}^3/\text{min}; \quad Q_{\text{P-CuF}} = 11,672 \text{ m}^3/\text{min}; \quad \gamma = 4,28(\%) \quad (5.36)$$

$$Q_{\text{HWCuF}}(x_1) = 0,742 - 0,023 t_1 = 0,067 I - 0,31 - 0,406 - 0,0002 \tau = \\ = 0,397 + 0,207 x_6 \quad (5.37)$$

$$Q_{\text{P-CuF}}(x_1) = 10,51 + 0,077 t_1 = 1,916 I - 0,44 - 4,768 + 0,135 \tau = \\ = 11,672 + 3,59 x_6 \quad (5.38)$$

$$\gamma_{\text{HWCuF}}(x_1) = 0,81 - 0,302 t_1 = 7,23 - 0,281 I = 7,37 - 0,061 \tau = \\ = 4,28 - 0,34 x_6 \quad (5.39)$$

b.2) în regiunea II:

$$Q_{\text{HWCuII}} = 2,094 \text{ m}^3/\text{min}; \quad Q_{\text{P-CuII}} = 117,03 \text{ m}^3/\text{min}; \\ \gamma_{\text{HWCuII}} = 1,85(\%) \quad (5.40)$$

$$Q_{\text{HWCuII}}(x_1) = 2,86 - 0,006 t_1 = 1,17 + 0,030 I = \\ = 2,41 - 0,000 \tau = 2,02 - 0,46 x_6 \quad (5.41)$$

$$Q_{\text{P-CuII}}(x_1) = 148,39 - 0,251 t_1 = 90,45 + 0,871 I = \\ = 55,28 + 0,895 \tau = 117,03 + 6,58 x_6 \quad (5.42)$$

$$\gamma_{\text{HWCuII}}(x_1) = 2,005 - 0,002 t_1 = 0,942 + 0,030 I = \\ = 2,69 - 0,0123 \tau = 1,85 - 0,54 x_6 \quad (5.43)$$

b.3) în regiunea D2:

$$Q_{\text{HWCuD2}} = 1,6 \text{ m}^3/\text{min}; \quad Q_{\text{P-CuD2}} = 104,2 \text{ m}^3/\text{min}; \\ \gamma_{\text{HWCuD2}} = 1,5(\%) \quad (5.44)$$

$$Q_{\text{HWCuD2}}(x_1) = 2,26 - 0,002 t_1 = 2,62 + 0,138 I = \\ = 1,845 - 0,003 \tau = 1,6 - 0,38 x_6 \quad (5.45)$$

$$Q_{\text{P-CuD2}}(x_1) = 123,81 - 0,065 t_1 = 3,907 I - 14,95 = \\ = 48,4 + 0,809 \tau = 104,2 + 2,77 x_6 \quad (5.46)$$

$$\gamma_{\text{HWCuD2}}(x_1) = 1,9 - 0,001 t_1 = 0,095 I - 1,41 = \\ = 2,91 - 0,025 \tau = 1,5 - 0,52 x_6 \quad (5.47)$$

Inconferențele de influență a diferiților factori x_1 s-au putut studia urmărindu-se reprezentarea grafică a modelelor matematice prin care s-au separat influențele.

Dependențele caracteristicilor tehnologice în funcție de durata impulsului și de factorul de umplere s-au reprezentat pentru regiunea I în fig.5.3, pentru regiunea D1 în fig.5.4 și pentru regiunea D2 în fig.5.5.

La regiunea D1 de prelucrare valorile medii ale productivității prelucrării, Q_D sînt de același ordin de mărime la ambele este-

riale de electrod (doar cu lea mai mari la cei din W-Cu), debitul uzării Q_p este mult diferit, de 4,6 ori mai mare la Cu decât la W-Cu, iar uzura volumetrică relativă este de 5,3 ori mai mică la electrozi din W-Cu.

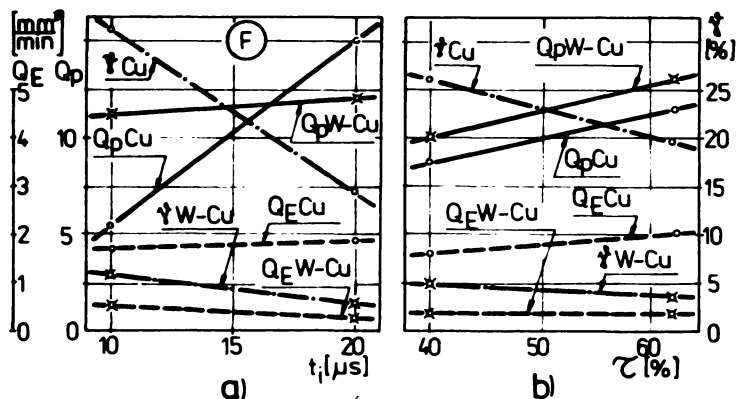


Fig. 5.3.

În funcție de durată impulsului, t_1 , (fig. 5.3.a), Q_p crește cu timpul de impuls, creșterea fiind mai pronunțată la ST din Cu, iar Q_p suferă o ușoară creștere la ST din Cu și o ușoară scădere la cei din W-Cu. În același timp γ scade clar cu creșterea timpului de impuls, scăderea mai pronunțată la Cu

fiind determinată de creșterea productivității Q_{pCu} precum și de scăderea debitului uzării Q_{pW-Cu} .

La valoarea medie a duratei, la $t_1 = 15 \mu s$, variația caracteristicilor tehnologice în funcție de factorul de umplere τ (fig. 5.3.b) arată că această variabilă are aceeași influență la ambele materiale de electrozi, păstrând proporțiile de valoare medie la toate valorile factorului de umplere, fără schimbări semnificative ale acestor proporții. Rezultă că modificarea acestui factor influențează caracteristicile tehnologice fără a interacționa cu natura materialului de electrod, fapt evidențiat și de valorile nesemnificative ale coeficienților de regresie b_{15} corespunzătoare funcțiilor de răspuns Q_p și Q_r .

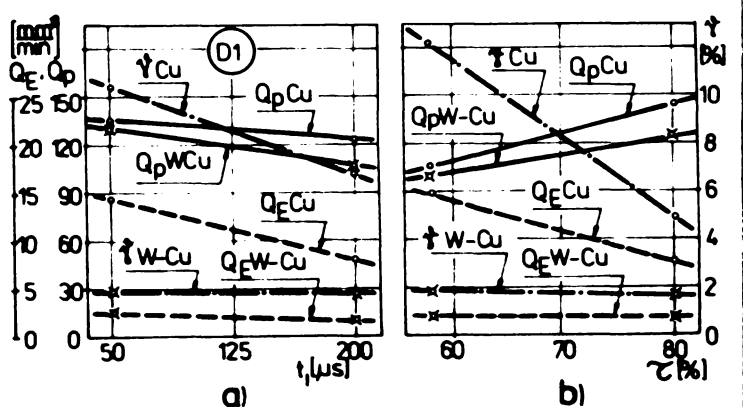


Fig. 5.4.

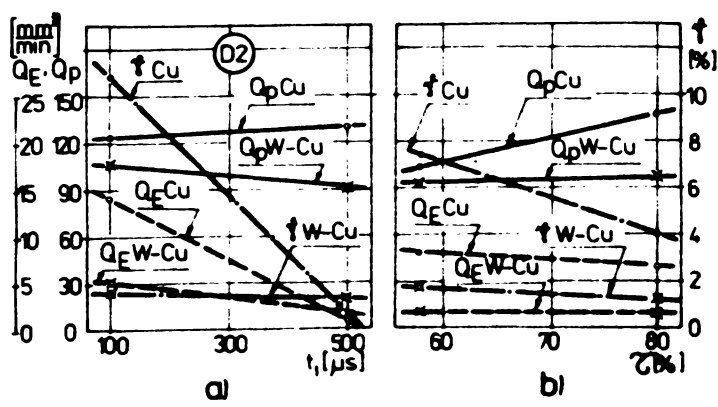


Fig. 5.5.

În regiunile de degrațare (fig. 5.4 și fig. 5.5) valorile medii ale lui Q_{pW-Cu} sînt mai mici de 5,4 ori la regiunea D1 și de 4,7 ori la D2. Productivitățile corespunzătoare sînt puțin mai mici de 1,1 ori la regiunea D1 și de 1,2 ori la regiunea D2. În consecință rezultă și uzurile relative de 4,7 ori mai mici la D1 și 3,8 ori la

regional L2.

La electrozii din cupru (fig.5.4, a; 5.5, a) Q_p scade pronunțat cu creșterea duratei impulsurilor în timp ce Q_p variază foarte puțin, domeniul aflându-se în apropierea pelicularii dependenței $Q_p = f(t_1)$. Caracterul variației căștoare cu t_1 a uzurii relative este imprimat de debitul uzurii.

La electrozii din W-Cu, Q_p scade ușor în ambele sondaje, domeniile aflându-se pe ramura coborâtore a dependenței $Q_p = f(t_1)$. Q_p scade la rindul său compensând practic influența productivității asupra uzurii relative, care nu se modifică mult.

La creșterea factorului de umplere (fig.5.4, b; 5.5, b) Q_{p-Cu} scade, Q_{p-Cu} crește și uzura relativă volumetrică scade ca urmare a influenței cucerate a prizelor deșă, iar la W-Cu se constată același fenomen însă cu intensitate de variație atenuată.

Se poate aprecia că în domeniul deșăării caracterul comportării la eroziune al electrozilor este determinat mai ales de debitul uzurii care scade la impulsuri de curăta mare și la valori mari ale factorului de umplere, fiind se crează condițiile compensării uzurii KT prin pelicularizare. Influența tensiunii ascii pe spațiul de lucru este nesemnificativă. Calitativ ea corespunde unei tendințe de scădere a caracteristicilor de uzura și de productivitate, constatată prin semnul (-) în toate ecuațiile $y=f(U)$, ecuață cu creșterea valorii tensiunii U . Treptele de carent, în condițiile menținerii celorlalți factori la valorile corespunzătoare centrului coanșilor de sondaj, determină o influență previsibilă; prin creșterea curentului crește piererea introdusă în spațiul de lucru și în mod firesc creșe atit debitul uzurii cit și productivitatea prelucărării. Fenomenul se confirmă atit la finisare (fig.5.6) cit și la deșăări (fig.5.7 și 5.8).

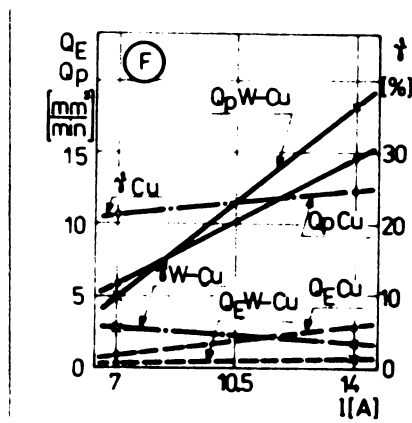


Fig.5.6.

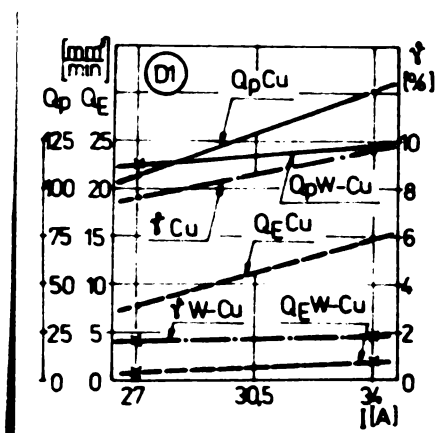


Fig.5.7.

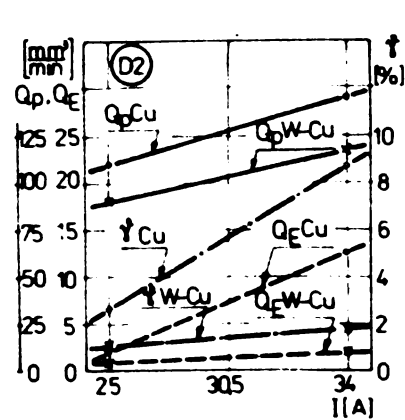


Fig.5.8.

Caracterul variației uzurii volumetrică este determinat în mod diferit. La regi ul fin t_{Cu} crește datorită creșterii t_{Cu} , t_{W-Cu}

suferă o scădere ușoară, impusă de creșterea η_p , iar la regiunile dure crește ușor cu intensitatea curentului datorită măririi η_p , mai accentuată, preponderantă față de creșterea η_p .

Stabilitatea la eroziune mai mare a electrozilor din λ -Cu se explică ușor pe baza constantelor termodinamice ale acestui material care ajunge în stare energetică de expulzare, în fază lichidă sau gazoasă, printr-un consum specific de energie mai ridicat decât cel corespunzător la electrozii din cupru. Faptul că raportul între uzura relativă a λ T din cupru și λ T din λ -Cu nu se menține la o valoare constantă, ea scăzând la trecerea de la regiunile fine spre cele dure, în timp ce productivitățile au departajare inversă, permite emiterea ipotezei că repartiția energiei între anod și catod se schimbă în mod diferit la cele două materiale și că principalul factor de variație al acestui raport îl constituie durata impulsurilor.

În cazul impulsurilor scurte, unde la cupru reducerea uzurii relative volumetrice se realizează în principal pe baza creșterii productivității, la cel din wolfram-cupru are un rol mai mare reducerea volumului uzat de la electrozii în unitatea de timp, reducerea ușurată de pragul energetic mai ridicat la care are loc eroziunea componentei λ .

La impulsuri mai lungi se pare că rata de energie repartizată pe electrod este mai mare la materialul λ -Cu, fapt care micșorează decalajul relativ dintre cele două materiale. Este posibil ca acest fenomen să fie însoțit și de o mărire relativă a timpului de amersa a impulsurilor de curent la electrozii din λ -Cu, modificând în acest mod valoarea reală a factorului de umplere și micșorând suplimentar productivitățile date de acești electrozi.

Alt factor care ar mai putea contribui la diferențierea comparativ a productivităților îl constituie reacția externă a sistemului autoexcitat de avans care, în funcție de cea internă a procesului (modificată fizic prin componenta gros λ , în procesul de evacuare) poate determina modificări în distribuția impulsurilor pe categorii de eficiență, schimbând numărul celor efective de lucru.

5.6. Incereri cu electrozi din Cu₂S

5.6.1. Caracteristici de productivitate și uzură obținute cu electrozi Cu-C și Cu electrolitic

Pentru studiul comparativ al comportării la eroziune electrică pe mașini echipate cu generatoare de impulsuri de conutație s-au efectuat concomitent și încercări cu electrozi din Cu₂S după aceeași matrice de experimentare (tab.5.2) realizându-se cu acest material șirul de experiențe la care $x_2 = -1$, în aceeași linie de sondaj cu cele de la materialul W-Cu. S-au calculat mediile și dispersiile valorilor experimentale ale funcțiilor de răspuns (pentru economie de spațiu nu se prezintă aceste date).

Pentru completarea programului statistic adoptat s-au considerat și valorile determinate experimental pentru cupru electrolitic ($x_2 = +1$) în liniile 1 + 9 ale matricei de experimentare (tab.5.4 + + 5.6). Pentru verificarea omogenității dispersiilor s-a calculat valoarea G_{exp} care a fost comparată cu valoarea critică tabelată $G_{tab} = 0,4546$, considerându-se aceeași probabilitate de încreștere de 95%. Și în acest caz dispersiile au fost omogene.

Recapitularea valorilor medii ale mediilor și dispersiilor se rezintă în tabelul nr.5.9.

Tabelul nr.5.9.

Recapitularea principalelor mări de calcul ale funcțiilor de răspuns la prelucrarea cu AF din Cu și Cu-C

Măria de prelucrare	Valorile calculate	Funcția de referință		
		\bar{y}_1	\bar{y}_2	\bar{y}
F	Max. S_1^2	2,604	15,020	11,291
	G_{exp}	0,263	0,208	0,137
	b_{exp}	2,414	17,016	13,113
	b_{TB}	0,306	0,818	1,056
L1	Max. S_1^2	42,458	389,763	11,144
	G_{exp}	0,291	0,255	0,164
	b_{exp}	11,752	7,582	5,759
	b_{TB}	1,361	4,555	0,899
L2	Max. S_1^2	3,346	291,795	12,011
	G_{exp}	0,161	0,219	0,198
	b_{exp}	14,492	158,895	5,474
	b_{TB}	0,458	3,137	0,729

S-au calculat estimațiile coeficienților de regresie b_1, b_{1y}, b_{1y_2} conform cu matricea de calcul din tabelul 5.3 și s-au determinat relațiile experimentale pentru utilizarea electrozilor confec-

țiență din Cu9208 :

1) în regiul F.

$$Q_{CuCF} = 2,983(\text{m}^3/\text{min}); \quad Q_{PCuCF} = 23,74(\text{m}^3/\text{min}); \quad \gamma_{CuCF} = 13,519 \quad (5.48)$$

$$Q_{CuCF}(x_1) = 0,73 + 0,150 t_1 = 6,3 - 0,0780 = 0,4461 - 1,703 = \\ = 2,25 + 0,0144 \tau = 2,983 - 1,033 x_6 \quad (5.49)$$

$$Q_{PCuCF}(x_1) = 1,63 + 1,436 t_1 = 85,12 - 1,4440 = 3,6781 - 14,88 = \\ = 7,91 + 0,3103 \tau = 23,74 - 4,9116 \quad (5.50)$$

$$\gamma_{CuCF}(x_1) = 16,68 - 0,3576 t_1 = 37,04 - 0,5580 = 16,68 - 0,321 = \\ = 16,38 - 0,0599 \tau = 13,32 - 2,4616 \quad (5.51)$$

2) în regiul D1.

$$Q_{CuCD1} = 12,204(\text{m}^3/\text{min}); \quad Q_{PCuCD1} = 196,45(\text{m}^3/\text{min}); \quad \gamma_{CuCD1} = 0,59 \quad (5.52)$$

$$Q_{CuCD1}(x_1) = 17,99 - 0,0463 t_1 = 29,93 - 0,47280 = 0,74 + 0,3761 = \\ = 17,3 - 0,0738 \tau = 12,2 - 1,45 x_6 \quad (5.53)$$

$$Q_{PCuCD1}(x_1) = 185,94 + 0,034 t_1 = 298,4 - 2,7180 = 6,521 - 2,41 = \\ = 84,06 + 1,629 \tau = 196,45 - 7,29 x_6 \quad (5.54)$$

$$\gamma_{CuCD1}(x_1) = 9,66 - 0,026 t_1 = 11,01 - 0,1230 = 4,93 + 0,0481 = \\ = 12,42 - 0,007 \tau = 6,39 - 0,755 x_6 \quad (5.55)$$

3) în regiul D2

$$Q_{CuCD2} = 9,29(\text{m}^3/\text{min}); \quad Q_{PCuCD2} = 190,19(\text{m}^3/\text{min}); \quad \gamma_{CuCD2} = 5,24 \quad (5.56)$$

$$Q_{CuCD2}(x_1) = 17,16 - 0,026 t_1 = 10,21 - 0,0248 = 2,54 + 0,2211 = \\ = 11,7 - 0,0352 \tau = 9,31 - 0,721 x_6 \quad (5.57)$$

$$Q_{PCuCD2}(x_1) = 171,7 + 0,0162 t_1 = 264,15 - 1,9720 = 10,3721 - 126,16 = \\ = 43,41 + 2,127 \tau = 190,19 - 12,49 x_6 \quad (5.58)$$

$$\gamma_{CuCD2}(x_1) = 10,04 - 0,0259 t_1 = 9,9 - 0,1240 = 9,39 - 0,1361 = \\ = 10,78 - 0,08 \tau = 5,24 + 3,07 x_6 \quad (5.59)$$

Firma constatare care se impune din analiza acestor ecuații este faptul că valoarea medie a productivității prelucrării este mult mai mare la utilizarea electrozilor din CuC și anume de 2,3 ori mai mare la regiul fin și, în medie de 1,5 ori mai mare la degroșare. În același timp crește și valoarea medie a debitului usării însă cu o pondere sensibil mai mică decât productivitățile, de 1,6 ori la finisare și de 1,1 + 1,2 ori la degroșare. Fluxul de productivitate

fiind predominant rezultă usuri relative medii mai mici la materialul cupru-grafit de 1,7 ori la finisare și 1,1 + 1,3 ori la degroșare, față de cuprul electrolitic.

În regiunile F sînt productivitățile cit și debitele uzării cresc cu durata impulsurilor (fig.5.9,a).

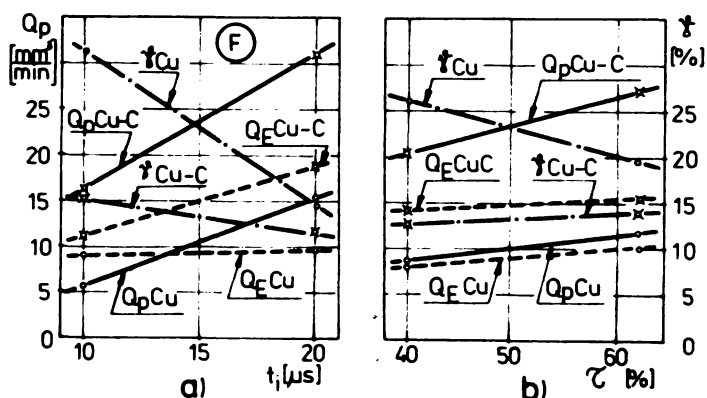


Fig.5.9.

ușoară a γ_{Cu-C} cu $tg \alpha = -0,55$. Rezultă că în cazul cuprului electrolitic odată cu mărirea duratei impulsului de la 10 la 20 μs , se mărește cantitatea de energie repartizată în unitatea de timp pe catod, iar în cazul materialului compus Cu92C8 această mărire este mai intensă însă se repartizează pe ambii electrozi. Procesul este și mai evident la influența factorului de umplere (fig.5.9,b). Cu mărirea valorii acestui factor între 40 și 60 % crește și frecvența impulsurilor prin scurtarea timpului de pauză (t_1 fiind constant). În acest sens este logică mărirea productivităților la creșterea valorii τ iar faptul că γ_{Cu-C} crește cu τ cu o pantă foarte apropiată de creșterea Q_{pCu} la $t_1 = 0,8 = 15 \mu s$, arată că principalul factor care re-uniformizează variațiile în acest domeniu este durata impulsurilor și că numai în al doilea rând exercită și factorul de umplere o influență departajatoare între cele două materiale prin împărțirea unor creșteri diferite ale productivităților, creșteri care determină de fapt caracterul diferit al uzării relative: γ_{Cu-C} crește ușor cu τ iar γ_{Cu} scade.

În regiunile de degroșare (fig.5.10 și fig.5.11) sînt caracteristice micșorările debitelor de uzare cu creșterea duratei impulsurilor. În domeniul $t_1 = 50 + 200 \mu s$ se păstrează între caracteristicile tehnologice corespunzătoare celor două materiale diferențe practice proporționale. γ_{Cu-C} variază în limită restrînsă de $\pm 6\%$ în interiorul domeniului și este cu 50% mai mare decît γ_{Cu} care la rîndul său suferă variații mici ($\pm 3\%$); debitul uzării scade practic cu aceeași pantă la ambele materiale ($tg \alpha = -0,04$), de unde re-

Fapta de creștere diferă, intensitatea creșterii fiind ie-rarhizată în ordinea: Q_{pCu-C} , Q_{FCu-C} , Q_{FCu} , Q_{pCu} , ultima avînd o valoare foarte mică, $tg \alpha = -0,015$. Acest fapt face ca uzurile relative volumice să scadă cu intensități diferite, γ_{Cu} fiind puternic cășăteare la creșterea t_1 ($tg \alpha = -1,7$) față de o cădere

zultă scideri cu pantă practic egală ($\text{tg } \alpha = -0,025$) a uzurilor relative volumetrice, cea a electrozilor din cupru pătrundu-se tot timpul cu 14% mai mare.

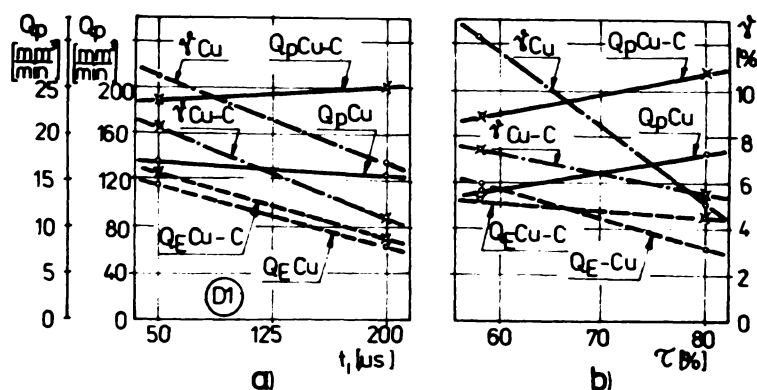


Fig. 5.10.

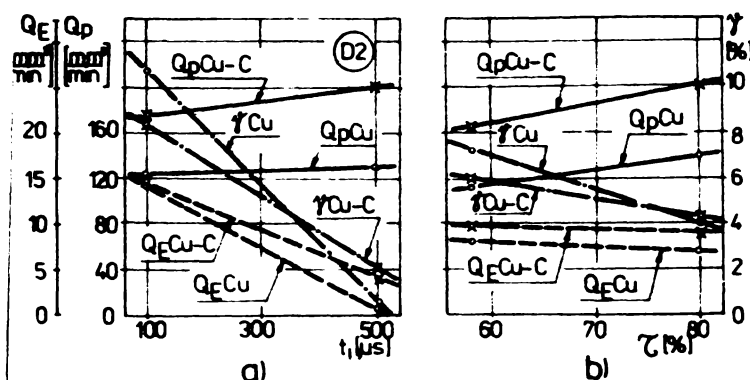


Fig. 5.11.

În domeniul curătelor cuprinse între 100 și 500 μs se păstrează caracterul variațiilor de la regiunile I, cu descoperirea că vitezele de uzare ale ET din cupru scad mai repede cu t_1 , determinând și o pantă mai mare de micșorare a uzurii relative a electrozilor din CuC.

În ceea ce privește influența factorilor de umplere în domeniul 60 + 80% se observă o variație proporțională a productivităților fără ca practic să se schimbe ierarhia și proporția diferenței în favoarea electrozilor din CuC; numai tendința de scideri are pantă mai mare o vitezei de uzare la electrozii din cupru, mai ales în regiunile I și imprimă diferențieri ale uzurii relative volumice mai accentuate la curata medie de 125 μs decât la cea de 300 μs . Ce și în cazul electrozilor din W-Cu influența tensiunii scade pe spațiul de lucru se realizează printr-o scideri a indicatorilor de uzare, concomitent cu o reducere a productivității prelucrării.

Intensitatea curentului este factorul determinant al puterii introduse în spațiul de lucru și deci în mod firesc modifică substanțial caracteristicile tehnologice (de altfel toți coeficienții de regresie ai variabilei x_0 sînt semnificativi și au valori relative mari). În domeniul de soncaj P (fig. 5.12) la creșterea curentului de la 7 la 14 A, respectiv la o densitate de curent de 0,035 $\text{A}/\text{mm}^2 + 0,07 \text{ A}/\text{mm}^2$, productivitatea obținută cu electrozi din cupru electrolitic crește de 2,4 ori, iar cea cu electrozi din CuC de 3,4 ori, în timp ce η_{Cu} crește de 3,4 ori, iar η_{CuC} de 3,1 ori. Aceste diferențe de intensitate de variație duc la modificarea caracterului dependenței în funcție de curentul de lucru a uzurii relative volumetrice: γ_{Cu} crește cu creșterea curentului, γ_{CuC} scade ușor cu creșterea curentului.

În deceniile de sondaj L1 și L2 (fig.5.12 și fig.5.14) la creșterea curentului de la 27 la 34 A respectiv la creșterea densității de curent de la 0,14 A/mm² la 0,17 A/mm², influența intensității curentului se caracterizează printr-o creștere mai intensă a vitezei de

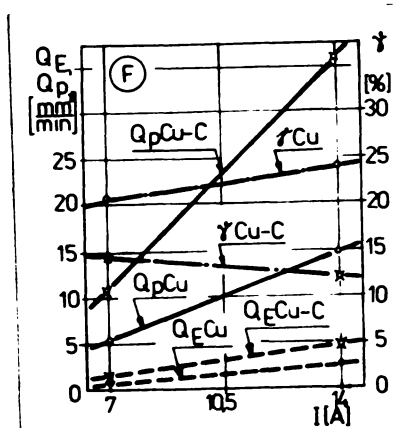


Fig.5.12.

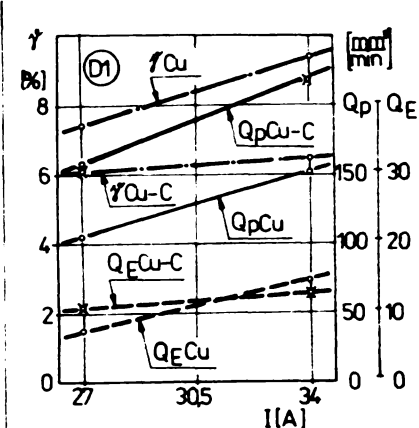


Fig.5.13.

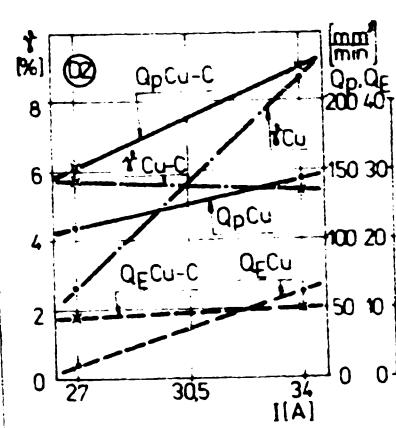


Fig.5.14.

uzare la electrozii din cupru electrolitic, concomitent cu creșterea vitei ale aceluiași parametru la electrozii din CuC, în timp ce creșterile de productivitate sînt preponderante la CuC. Aceste diferențe sînt mai mari în regiunea L2 fapt care determină variații diferite ale uzurii relative volumetrice, concretizate prin creștere mai intensă a γ_{Cu} și prin schimbarea sensului de variație la γ_{CuC} , de la creștere ușoară în regiunea L1 la scădere ușoară în regiunea L2.

Studiul valorilor medii în centrul selecției de sondaj experimental care păstrează informații asupra caracterului determinant corelat al tuturor variabilelor considerate precum și analiza influenței separate a fiecăreia dintre ele permit emiterea unor ipoteze privind comportarea electrozilor din material compus Cu₂C₃.

Productivitățile sensibile mai mari în raport cu cele obținute cu electrozi din cupru, fiind însoțite și de viteze de uzare ceva mai mari decât a acestora, arată că la aceleași valori de reglare ale parametrilor regimului de lucru pînă la electrozide (obiectul de prelucrat și electrozodul propriu-zis) primesc mai multă energie. Acest plus de energie poate fi furnizat pe două căi :

- la aceeași putere absorbită de spațiul de lucru se repartizează mai multă energie, dintr-unul pe cea preluată de mediul de lucru în interstițiu;

- la același reglaj al regimului de prelucrare spațiul de lucru absoarbe mai multă putere și ea atare crește și energia transmisă anodului și catodului.

Cele două fenomene se pot suprapune și pot fi însoțite și de modificarea efectului de polaritate.

În cazul materialului Cu92-C8 mai plauzibilă este cea de-a doua ipoteză, diferența de productivitate fiind prea mare ca să poată fi explicată numai prin schimbarea ratelor de repartiție a unei puteri constante. Este mult mai probabil că prezente fazei dispersate fin, de grafit, să modifice mecanismul anodării impulsurilor de curent, având drept principal efect reducerea timpului de întârziere la arcarea. În acest caz se poate ajunge în situație în care, la același timp t_1 corespunzător la impulsul de tensiune să corespundă un timp real de impuls de curent mai mare. În esența acestei ipoteze vine și constatarea că la impulsuri scurte, fiind efectul timpului de întârziere are pondere mai mare, diferențele de productivitate sînt mai pronunțate, iar la impulsurile lungi, fiind întârzierea anodării are pondere mică, diferențele sînt și ele mai mici.

5.7. Încercări cu electrozi din cupru sinterizat izotrop

5.7.1. Caracteristici de productivitate și uzură obținute cu electrozi din Cu sinterizat

S-au efectuat încercări cu electrozi din cupru sinterizat izotrop în aceleași condiții experimentale, introducînd în program variante Cu8 pentru variațiile $x_1 = -1$. S-au calculat valorile medii ale determinărilor experimentale corespunzătoare liniilor de program 9...16 din tabelul nr.5.2 și dispersiile funcțiilor de răspuns. S-a verificat omogenitatea dispersiilor și valorile calculate pentru mărimea critică au fost confruntate cu valoarea tabelată. În toate cazurile s-a constatat $G_{exp} = G_{tab} = 0,4506$, dispersiile fiind omogene.

Acumularea globală a valorilor medii ale mediilor și a dispersiilor se prezintă în tabelul nr.5.10.

5.7.2. Estimația caracteristicilor tehnologice prin metode matematice experimentale la utilizarea electrozilor din cupru sinterizat izotrop

În valorile medii ale funcțiilor de răspuns pentru cupru electrolitic tras ($x_1 = +1$) și cele pentru cupru sinterizat izotrop ($x_1 = -1$) s-au calculat estimațiile coeficienților de regresie pentru sistemul $Q_n - C_{ns}$, determinîndu-se cei semnificativi, adică cei care îndeplinesc condiția (b_1, b_{1v}, b_{1vm}) TP.

Pe baza coeficienților b_0 și b_1 s-au estimat valorile caracteristicilor tehnologice în centrul domeniilor de sondaj și apoi funcțiile separate pe categorii de variabile principale ale regi-

Tabela nr. 5.10.

Rescapitulatia principalelor sarini de calcul ale functiilor de raspuns la prelucrare cu electrozi din cupru sinterizat izotrop

Regia de prelucrare	Sarina calculata	Functia de referinta		
		\bar{x}_1	\bar{x}_p	\bar{y}
F	Max. S_1^2	0,802	23,168	4,053
	G	0,184	0,298	0,228
	b _{exp}	1,588	10,458	19,226
	σ_{TB}	0,250	0,826	0,958
D1	Max. S_1^2	22,329	402,175	20,895
	G	0,198	0,216	0,194
	b _{exp}	10,470	133,638	7,855
	σ_{TB}	0,996	4,753	0,973
D2	Max. S_1^2	1,895	199,001	1,098
	G	0,272	0,245	0,341
	b _{exp}	6,347	120,287	5,392
	σ_{TB}	0,394	0,268	0,361

mului de lucru (x_1), rezultand relatiiile :

1) in regiunea F:

$$\bar{x}_{CuSF} = 1,33(\text{mm}^3/\text{min.}); \quad \bar{x}_{pCuSF} = 10,623(\text{mm}^3/\text{min.}); \quad \bar{y}_{CuSF} = 15,5458 \quad (5.60)$$

$$\begin{aligned} \bar{x}_{CuSF}(x_1) &= 0,49 + 0,0058 t_1 = 6,52 - 0,122U = 0,48 + 0,0152T = \\ &= 1,33 - 0,377x_0 = 0,2643 - 1,441 \end{aligned} \quad (5.61)$$

$$\begin{aligned} \bar{x}_{pCuSF}(x_1) &= 6,68 + 0,1296t_1 = 32,84 - 0,523U = 1,235I - 2,35 = \\ &= 0,2113T - 0,15 = 10,62 + 3,45x_0 \end{aligned} \quad (5.62)$$

$$\begin{aligned} \bar{y}_{CuSF}(x_1) &= 19,1 - 0,237t_1 = 17,52 - 0,0064U = 9,33 + 0,5443I = \\ &= 27,5 - 0,2345T = 15,54 - 9,69x_0 \end{aligned} \quad (5.63)$$

2) in regiunea D1

$$\bar{x}_{CuSD1} = 9,64(\text{mm}^3/\text{min}); \quad \bar{x}_{pCuSD1} = 137,12(\text{mm}^3/\text{min}); \quad \bar{y}_{CuSD1} = 7,06(x) \quad (5.64)$$

$$\begin{aligned} \bar{x}_{CuSD1}(x_1) &= 14,07 - 0,0355t_1 = 40,53 + 0,802U = 4,43 + 0,171I = \\ &= 13,82 - 0,133T = 9,64 - 4,101x_0 \end{aligned} \quad (5.65)$$

$$\begin{aligned} \bar{x}_{pCuSD1}(x_1) &= 134,6 + 0,0201t_1 = 150,97 - 0,577U = 7,52 + 4,29I = \\ &= 68,19 + 0,999T = 137,12 + 12,7x_0 \end{aligned} \quad (5.66)$$

$$\begin{aligned} \bar{y}_{CuSD1}(x_1) &= 11,19 - 0,033t_1 = 22,06 - 0,48U = 8,98 - 0,0629I = \\ &= 17,06 - 0,1565T = 7,06 - 3,26x_0 \end{aligned} \quad (5.67)$$

3) in regiunea D2

$$\bar{x}_{CuSD2} = 6,39(\text{mm}^3/\text{min}); \quad \bar{x}_{pCuSD2} = 126,27(\text{mm}^3/\text{min}); \quad \bar{y}_{CuSD2} = 9,02(x) \quad (5.68)$$

$$Q_{pCuS2}(x_1) = 13,35 - 0,0233t_1 = 23,35 - 0,4524U = 3,45 + 0,0503I = 13,35 - 0,1095\tau = 6,39 - 1,03x_6 \quad (5.69)$$

$$Q_{pCuS2}(x_1) = 121,71 + 3,0196t_1 = 131,86 - 0,824U = 4,19 + 4,1563I = 54,24 + 1,1119\tau = 126,27 - 15,01x_6 \quad (5.70)$$

$$\gamma_{pCuS2}(x_1) = 10,99 - 0,0197t_1 = 24,25 - 0,5115U = 4,03 + 0,0337I = 14,06 - 0,1302\tau = 9,02 - 0,68x_6 \quad (5.71)$$

Variabilele independente au valori naturale cuprinse în interiorul domeniilor de sondaj respective, iar variabila x_6 , fiind alternativă are valorile +1 la utilizarea regiunii anodului și -1 la utilizarea regiunii catodului.

Ca o primă constatare cu privire la valorile adevărate ale funcțiilor de răspuns se vede că la productivități practice egale (numai cu 3 + 5% mai mari față de electrozii de cupru) corespund viteze de uzură mai mici (cu 39% la finisare și 17% la degroșări), fapt care determină și uzuri relative mai mici (47% la finisare, 22% la degroșare 1 și 12% la degroșare 2).

Urmasrind influența caracteristicilor impulsului se constată că în regiunea F (fig.5.15) la valori mici ale duratei (10 μs) diferențele dintre caracteristicile tehnologice obținute cu cele două

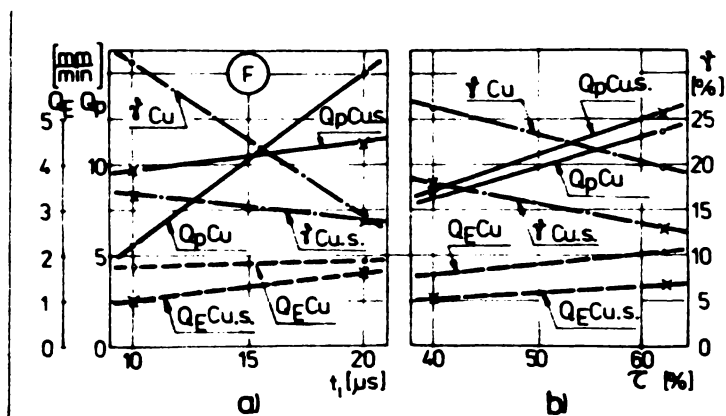


Fig.5.15.

material își păstrează ordinea, însă sunt mai mari, în favoarea cuprului sintetizat izotrop, atât din punctul de vedere al vitezei de uzură volumică Q_p , cât și din punctul de vedere al productivității care este sensibil mai mare. La trecerea spre limita superioară a domeniului de sondaj, la $t_1 = 20 \mu s$, productivitățile își schimbă ierarhia, cea dată de Cu devenind mai mare, în timp ce diferența dintre vitezele de uzură se apropie fără a-și schimba sensul.

În funcție de această comportare uzurile relative evoluează descendent cu timpul de impuls, cu panta sensibil mai mare la electrozii din Cu ($\tau \alpha = 1,7$) față de electrozii din CuS ($\tau \alpha = 0,24$).

În funcție de factorul de umplere τ , (fig.5.15, b) la creșterea acestuia de la 40 % la 60%, practic toate caracteristicile își păstrează proporțiile stabilite la nivelul valorilor medii. Productivitățile, puțin mai mari la electrozii CuS, cresc sensibil cu în timp ce creșterea vitezelor de uzură (mai mici la CuS) este ceva

mai puțin intensă, fapt care determină scăderea cu pantă relativ egală a uzurilor relative volumetrice.

În regiunile de degroșare (fig.5.16 și fig.5.17) vitezele de uzare volumică Q_v scad cu creșterea duratei impulsului și tind

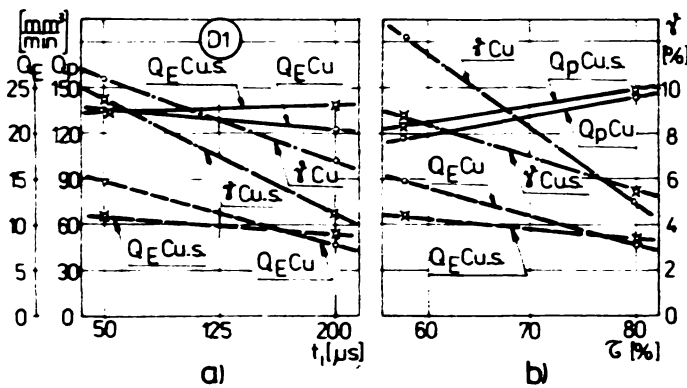


Fig.5.16.

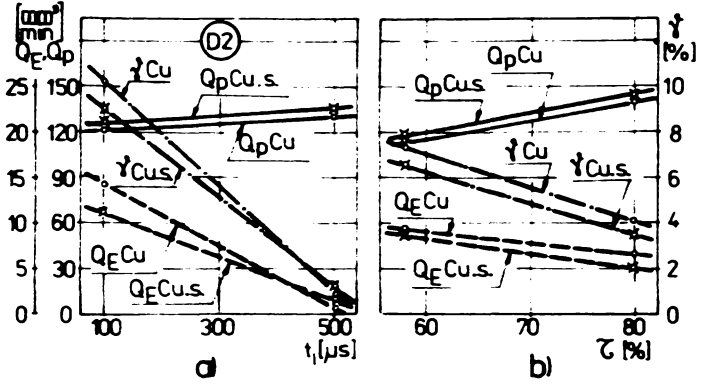


Fig.5.17.

să se egalizeze la durate lungi, prin scăderi cu pantă mai mare la electrozii din Cu. În același timp productivitățile nu suferă nici variații, nici diferențieri mari, astfel încât uzurile relative urcescă practic alina vitezelor de uzare volumice Q_v .

Caracterul influenței neselective a factorului de umplere este evident la degroșare 2 (fig.5.17,b) și se recunoaște în esență și la regiul de degroșare 1, când numai o scădere mai pronunțată a Q_{vCu} cu creșterea factorului de umplere τ , de la 60 la 80%, determină scăderea mai pronunțată a uzurii relative volumice γ_{Cu} . Această excepție poate avea caracter aleator din cauza nuz rului mic de replici ale experimentului, dar poate fi și explicată pe seama influenței factorului de umplere asupra proceselor de poliu-lizare. Influența caldră de la regiul 1 și 2 permite presupunerea că schimbarea factorului de umplere nu acționează diferențiat asupra celor două materiale. Creșterea factorului τ mărește frecvența impulsurilor prin reducerea timpului de pauză, fără a micșora pe cel al impulsurilor, astfel încât efectul cumulat al acestora crește.

Tensiunea medie pe spațiul de lucru are asupra electrozilor din cupru sintezizat același sens cu cea exercitată asupra celor din cupru electrolitic tras, intensitatea de scădere a debitului uzurii fiind practic egală la cele două materiale ($\alpha = 0,1148$ la Cu și $\alpha = 0,122$ la Cu.s).

Intensitatea curentului exercită în regiul 1 (fig.5.15) influență practic proporțională asupra celor trei caracteristici, păstrând repartiția în favoarea unei cauzi relative volumetrice

mai mici a electrozilor din Cu_s , rezultată din debite ale uzurii ceva mai mici și productivități ceva mai mari date de acești electrozi față de cei din Cu electrolitic tras.

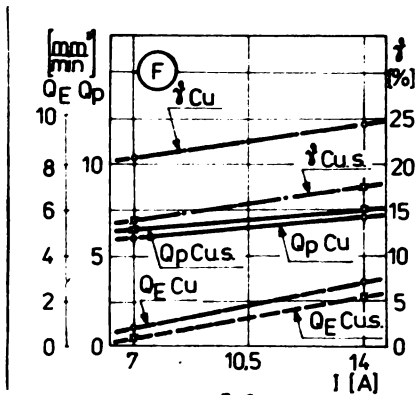


Fig. 5.18.

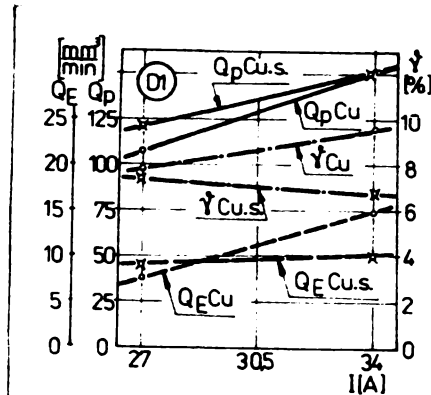


Fig. 5.19.

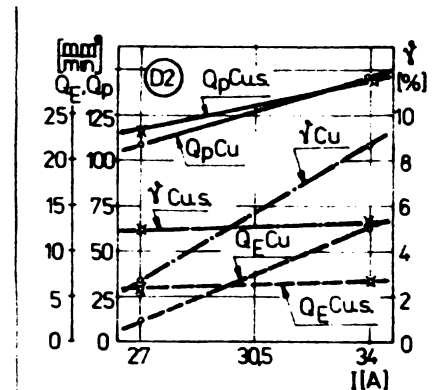


Fig. 5.20.

În regiunile de deplasare (fig. 5.19 și fig. 5.20) productivitățile se păstrează la valori foarte apropiate, crescând cu intensitatea curentului cu puține puține diferite, în timp ce vitezele de uzură volumice cresc pronunțat la Cu în ambele domenii studiate, odată cu creșterea intensității curentului de la 27 la 34 A, în timp ce la Cu_s această creștere este nelăsătoare, drept urmare rezultă influențe diferite ale intensității curentului asupra uzurii relative volumice caracterizate de creșterea în funcție de valoarea I a \dot{V}_{Cu} și variații în limite mici a $\dot{V}_{Cu.s}$.

În studiul comparativ al tuturor acestor observații rezultă ca principalul factor care modifică afinitatea la eroziune a cuprului sintetizat izotrop față de cel electrolitic tras îl constituie debitul uzurii $\dot{V}_{Cu.s}$ care este măscat de prezența porilor dispersi care modifică mecanismul transferului căldurii și care pot deveni cauze de reținere a unor suspensii de carbon pe suprafața electrodului, cu rol de protecție relativă a acestuia.

5.8. Studiul comparativ al rugozității suprafețelor prelucrate prin eroziune electrică cu diferite materiale de electrozi

Rugozitatea suprafețelor este o caracteristică care are la proiectarea proceselor tehnologice de prelucrare prin eroziune electrică o importanță mai mare decât la procedeele clasice din cauză că în afara valorii de performanță ce element de ieșire din sistem, ea este esențială în determinarea dimensiunilor electrozilor de transfer precum și la stabilirea adăcurilor de prelucrare. În această cauză este necesar să se cunoască valoarea rugozității pentru fiecare regiune de lucru și pentru fiecare material de electrozi.

Rugozitatea suprafețelor prelucrate cu cele patru materiale de electrozi adoptate în programul de experimentări a fost măsurată luându-se în considerare pentru o replică medie aritmetică a 10 determinări efectuate asupra aceleiași probe, iar numărul de replici a fost considerat egal cu numărul probelor.

S-a ales pentru măsurare criteriul R_a .

S-au calculat valorile medii și dispersiile lor pentru cele trei domenii de investigație conform matricii de experimentare pregătite.

Recapitularea principalelor mărimi statistice de calcul se prezintă în tabelul nr.5.11.

Tabelul nr.5.11.

Recapitularea principalelor mărimi de calcul la determinarea funcțiilor $R_a = f(x_i)$ la utilizarea materialelor de electrozi diferite.

Regiunea de prelucrare	Mărimea de calculată	Materialul de electrod			
		Cu	75-Cu25	Cu92-08	Cu8
P	Max S_1^2	0,080	0,072	0,125	0,080
	G	-	0,115	0,128	0,096
	b _{exp}	3,21	2,370	2,433	3,303
	TS	-	0,078	0,093	0,085
D1	Max S_1^2	0,245	0,180	0,320	0,320
	G	-	0,148	0,138	0,148
	b _{exp}	7,47	0,591	7,959	7,521
	TS	-	0,121	0,142	0,138
D2	Max S_1^2	0,245	0,320	0,320	0,320
	G	-	0,128	0,117	0,118
	b _{exp}	9,36	8,254	9,507	9,470
	TS	-	0,151	0,174	0,155

(neogenitatea mare a dispersiilor (toate valorile G_{exp} G_{tab}) se explică prin faptul că măsurile calculate reprezintă secii ale mediilor.

Coefficienții de regresie calculați pentru cele trei regiuni de lucru arată influențe semnificative ale materialului de electrozi pentru toate cazurile (h_1 - TB).

Separind influențele în funcție de x_1 și x_2 se determină estimările secii pentru diferitele materiale și modelele matematice empirice pentru dependențele $R_2 = f(x_1)$.

1) în regiunea F:

$$R_{CuF} = 3,21(\text{um}); \quad R_{Zn-CuF} = 2,53(\text{um}); \quad R_{Cu-O} = 3,66(\text{um});$$

$$R_{CuS} = 3,40(\text{um}). \quad (5.72)$$

$$R_{CuF}(x_1) = 1,9 + 0,087 x_1 = 3,45 + 0,0058U = 1,99 + 0,1157I =$$

$$= 3,04 + 0,0032\tau = 3,21 + 0,0552 x_2 \quad (5.73)$$

$$R_{Zn-Cu}(x_1) = 1,56 + 0,065 x_1 = 3,21 - 0,016U = 1,23 + 0,1243I =$$

$$= 2,56 - 0,0004\tau = 2,50 + 0,0456 x_2 \quad (5.74)$$

$$R_{Cu-O}(x_1) = 2,43 + 0,0819 x_1 = 4,34 - 0,016U = 2,45 + 0,1157I =$$

$$= 3,70 - 0,0009\tau = 3,66 + 0,1096 x_2 \quad (5.75)$$

$$R_{CuS}(x_1) = 2,08 + 0,088 x_1 + 4,08 - 0,016U = 2,11 + 0,123I =$$

$$= 3,35 - 0,0004\tau = 3,4 + 0,0696 x_2 \quad (5.76)$$

2) în regiunea D1

$$R_{CuD1} = 7,47(\text{um}); \quad R_{Zn-Cu-1} = 5,71(\text{um}); \quad R_{Cu-1} = 8,41(\text{um});$$

$$R_{CuS-1} = 7,71(\text{um}) \quad (5.77)$$

$$R_{CuF-1}(x_1) = 4,57 + 0,0248 x_1 = 8,15 - 0,0181U = 4,61 + 0,0939I =$$

$$= 7,18 + 0,0042\tau = 7,49 + 0,1007 x_2 \quad (5.78)$$

$$R_{Zn-Cu-1}(x_1) = 1,84 + 0,0268 x_1 = 6,15 - 0,0117U = 4,15 + 0,0513I =$$

$$= 5,58 + 0,0019\tau = 5,71 + 0,054 x_2 \quad (5.79)$$

$$R_{Cu-O-1}(x_1) = 5,47 + 0,0235 x_1 = 7,72 + 0,0184U = 4,78 + 0,1191I =$$

$$= 8,15 + 0,0057\tau = 8,41 + 0,183 x_2 \quad (5.80)$$

$$R_{CuS-1}(x_1) = 4,65 + 0,0234 x_1 = 7,81 - 0,0059U = 4,19 + 0,1107I =$$

$$= 7,39 + 0,0027\tau = 7,57 + 0,130 x_2 \quad (5.81)$$

3) în regiunea D2

$$R_{Cu-2} = 9,36(\text{um}); \quad R_{Zn-Cu-2} = 7,15(\text{um}); \quad R_{Cu-O-2} = 10,45(\text{um});$$

$$R_{CuS-2} = 9,58; \quad (5.82)$$

$$R_{\text{Cu}_2}(x_1) = 5,25 + 0,0137t_1 = 9,7 - 0,009U = 5,14 + 0,1385I = 9,22 + 0,0021\tau = 3,36 + 0,2273x_6 \quad (5.83)$$

$$R_{\text{W-Cu}_2}(x_1) = 4,72 + 0,0076t_1 = 7,82 - 0,0182U = 5,36 + 0,0585I = 6,66 + 0,0041\tau = 7,15 + 0,0036x_6 \quad (5.84)$$

$$R_{\text{Cu-C}_2}(x_1) = 9,87 + 0,0069t_1 = 11,22 - 0,0221U = 5,33 + 0,1676I = 16,38 + 0,001\tau = 10,45 + 0,2467x_6 \quad (5.85)$$

$$R_{\text{CuS}_2}(x_1) = 5,47 + 0,0137t_1 = 10,36 - 0,0211U = 5,9 + 0,1822I = 9,29 + 0,0041\tau = 9,58 + 0,2418x_6 \quad (5.86)$$

Mediile statistice ale valorilor rugozității în centrul dozelor de experimentare (fig.5.21) arată că anodurile de electrozi studiate au diferențe relativ mici ale susterii medii aritmetice a rugozității, care își plasează

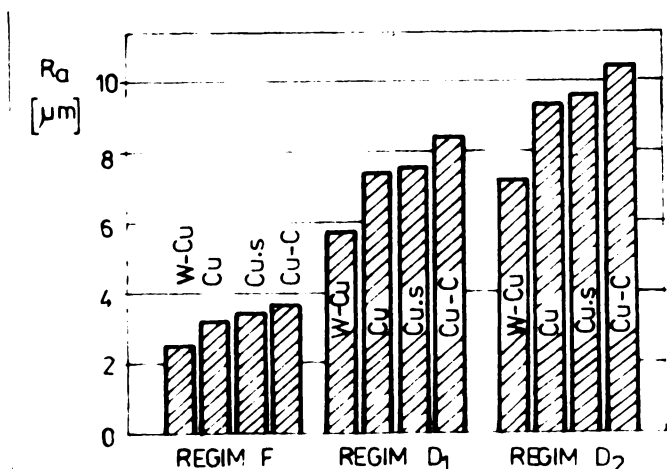


Fig.5.21.

cu 1,34 în regiunile D1 și cu 1,26 în regiunea D2 în timp ce cuprul sintetizat izotrop ca valori R_a foarte apropiate de cel electrolitic tras, și mari cu 6,5 în regiunea F și numai cu 3,1 respectiv 2,8 în regiunile D1 și D2.

Ordinea creșterii: Cu electrolitic, Cu sintezat izotrop, W-Cu se păstrează în teste cele trei domenii de variație explicate și nu se schimbă sub influența variabilelor independente, așa cum reiese din reprezentările grafice ale dependențelor $R_a=f(x_1)$ pentru regiunea F, fig.5.22; pentru D1, fig.5.23 și pentru D2, fig.5.24

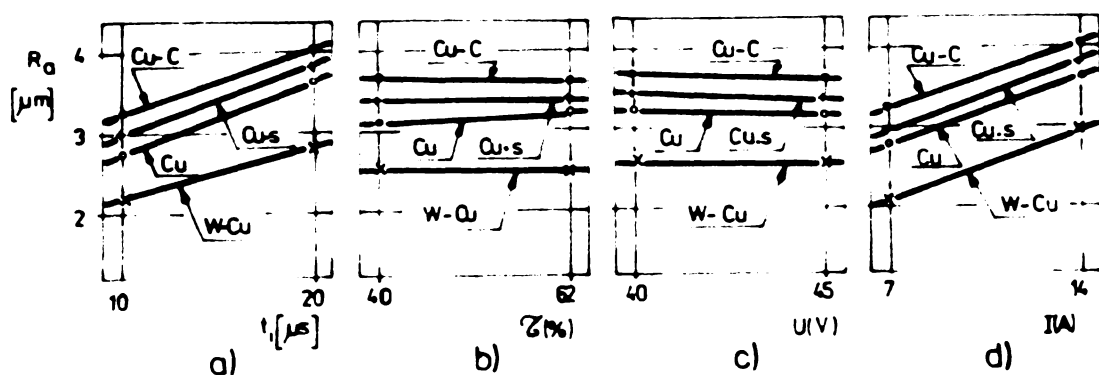


Fig.5.22.

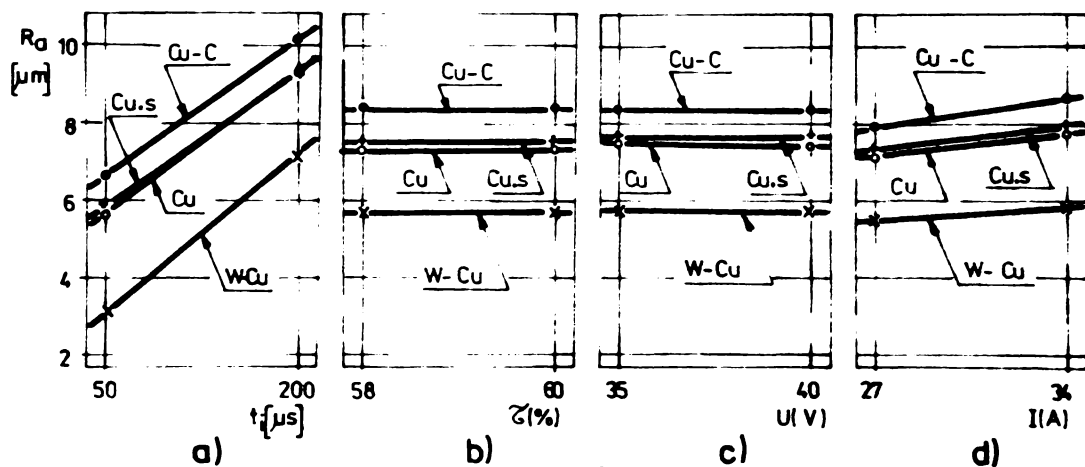


Fig. 5.23.

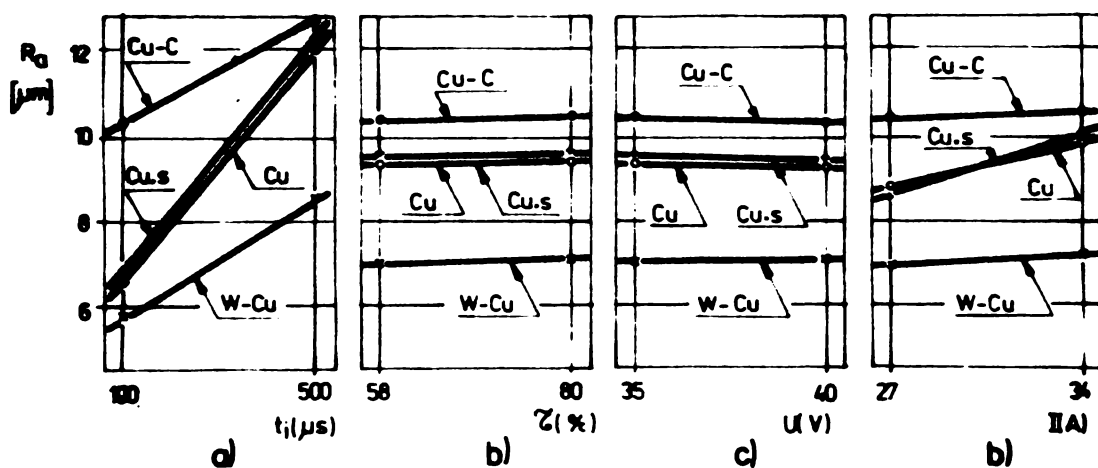


Fig. 5.24.

De vece că în toate cazurile influența factorilor de comandă a regiunilor de lucru este caracteristică pentru fiecare dintre ei.

Factorul de umplere (fig. 5.22...24 b) practic nu modifică rugozitatea; numai semnul algebric al termenului B din ecuațiile $R_a = A + B$ indică la creșterea factorului de umplere tendința de scădere a R_a la regiul F și de creștere la regiunile I . Valoarea lui B este însă de fiecare dată neglijabilă.

Tensiunea U (fig. 5.22 ... 24 c) exercită asupra asperităților suprafeței o influență care este de asemenea neglijabilă, dar evidentă în sensul tendinței de scădere a rugozității (nesemnificativă dar sesizabilă) cu creșterea tensiunii pe spațiul de lucru.

Intrucât această tensiune nu poate fi modificată decât în limite restrinse din cauza polarității caracteristicii volt-ampere-trice a descărcării, timpul de impuls t_i (fig. 5.22 ... 24 a) și treapta de curent comandat I (fig. 5.22 ... 24 d) sînt factori determinanți ai energiei impulsurilor, ceci și ai volumului craterelor elementare care formează adîncimea microasperităților.

În regiul F și I creșterile normale ale R_a cu timpul de impuls și cu intensitatea curentului își conservă stît ierarhia

materialelor cât și intensitatea de influență. În regiunile B2 se pierd ierarhia însă intensitatea influenței este mai accentuată la utilizarea electrozilor din Cu electrolitic tras și Cu sinterizat isotrop.

Rezultă că la timpuri de impuls lungi creșterea energiei impulsurilor determină în măsură mai mare o creștere în scăderea a creșterilor la utilizarea electrozilor cu 10% Cu, comparativ cu cei care au și componentă refractară.

În concluzie, toate materialele studiate se pretează utilizării în regiunea de semifinisare și finisare. Cele mai bune rezultate le dă materialul W75-Cu25 care pe lângă stabilitatea mare a formei, având uzuri relative mici și rugozități mici. Cupru sinterizat isotrop din punctul de vedere al calității suprafeței prelucrate nu prezintă diferențe față de cuprul electrolitic tras. Materialul Cu92-C8 este un foarte bun material pentru electrozi de trecere (semifinisare) el dând productivități mari la rugozități comparabile cu cele ale altor materiale pe bază de Cu.

C A P I T O L U L 6

CONCLUZII

Perfecționarea procesului de prelucrare dimensională prin eroziune electrică poate fi realizată în prezent în următoarele direcții:

- îmbunătățirea caracteristicilor funcționale ale utilajelor tehnologice prin automatizarea avansată a prelucrării, mai ales prin comanda adaptivă a factorilor primari proveniți de la generatoarele de impulsuri și de la sistemele de avans. Optimizarea productivității, minimizarea și chiar anularea uzurii electrolitice pe această cale nu este în prezent posibilă decât în cazuri particulare;

- conceperea și aplicarea unor tehnologii de prelucrare cu o corelare corespunzătoare între regimurile de lucru, elementele geometrice ale spațiului de lucru activ și cele substanțiale ale electrozilor și obiectelor de prelucrat;

- reducerea costurilor prelucrării prin mărirea productivității și mai ales prin micșorarea consumului de electrozi pe baza creșterii rezistenței la eroziune a materialului de constituție și a proiectării lor în funcție de dinamica de generare a suprafețelor prelucrate.

Încercările anterioare de a participa la rezolvarea acestor probleme s-au concretizat în prezenta lucrare de doctorat prin următoarele contribuții originale :

A. În domeniul cercetării fundamentale

1. S-a introdus o ordine sistematică în studiul proceselor de eroziune electrică elaborându-se scheme originale pentru urmărirea nodului în care se integrează și se diferențiază principalele etape generii de impulsuri electrice și procesele interdependente declanșate de ele în spațiul de lucru, în condiții de prelucrare tehnologică. S-a pus în evidență relația dintre caracteristicile programate la generarea de impulsuri și răspunsul final al spațiului de lucru, precum și ordinea de selecție a impulsurilor de un anumit tip.

2. S-a determinat un model matematic al deafigurării procesului de eroziune electrică în funcție de variația concentrației particulelor solide, aglomerate, mărunțite și disperse în interstițiul activ și s-a demonstrat că procesul global de eroziune electrică este aperiodic în raport cu produsele solide aflate în interstițiu; el are totdeauna tendința de stabilizare și nu se autoîntrerupe. Oscilațiile

periodice sințesate de alte procese, mai ales de apariția descărcărilor în gaz la stagnarea temperaturii a produselor gazease în interstițiu.

3. A fost concepută teoria treptelor de reproducere la generarea suprafețelor cu copierea formei, punându-se în evidență relația reală care se stabilește pe direcția avansului între volumele prelucrate și cele unste. Pe baza noțiunii de divergență volumică s-a explicat influența factorilor geometrici asupra repartiției neuniforme a uzurii electroscului de transfer.

4. S-a dedus un model matematic care descrie din punct de vedere geometric procesul de degradare a formei topologice a suprafeței prelucrate prin eroziune electrică din cauza repartiției neuniforme a uzurii. S-a demonstrat că în cazul suprafețelor generate de formă și orientare oarecare, valoarea uzurilor relative liniare locale și a vitezelor liniare locale de prelevare se modifică în funcție de geometria interstițiului activ, de curbura locală și de unghiul dintre normala la suprafață și direcția avansului.

5. Interpretându-se rezultatele unor încercări experimentale complexe s-a elucidat mecanismul suprapunerii peste influența directă a factorilor geometrici a efectelor determinate de înclinarea celorlalte procese desfășurate în spațiul de lucru la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei.

6. Studiindu-se rolul discontinuităților termofizice la transmiterea căldurii de la sursele termice de suprafață spre interior s-a elucidat procesul prin care un material cu fază dispersă refractară poate constitui un electrod cu stabilitate la eroziune electrică mai bună decât unul constituit exclusiv din masă metalică de bază.

7. S-au evidențiat unele fenomene fizice prin intermediul cărora pot fi explicate unele modificări ale efectului de polaritate care apar pe baza contribuțiilor ionilor proveniți din elementele refractare ale materialelor cu fază refractară dispersă.

8. În domeniul cercetării aplicative

1. Introducându-se noțiunea de calcul noi (lungimea de prelucrare generată, coeficient de divergență al volumelor, rază de curbura generată) s-a elaborat o metodă practică de urmărirea geometriei succesive a suprafețelor obținute prin prelucrare cu copierea formei prin eroziune electrică, metoda ce deschide perspectiva determinării, la un caz de prelucrare dat, a unor trepte de calcul pentru

utilizarea calculatului numeric la proiectarea formei cavității pentru un anumit avans al electrodului, respectiv pentru proiectarea formei compensate a electrodului în vederea obținerii unei suprafețe gelerate dorită în a anumite lungime de avans. Verificarea experimentală a modelului matematic dedus a arătat o bună concordanță între rezultatele teoretice și cele experimentale, erorile de calcul plătându-se într-o bandă restrinsă de $\pm 5\%$ față de cele determinate prin măsurători.

2. S-au pus în evidență prin microscopia optică și electronică și prin încercări la eroziune electrică modificările care apar în matricea de cupru și în forma și repartiția fazei dispersate de grafit la eroziunea din material cupru-grafit obținută prin metalurgia pulberilor.

3. În studiul comparativ al comportării la eroziune a 40 de variante tehnologice de elaborare a materialului Cu-C au fost determinate concentrațiile optime ale componentelor și regiunile tehnologice optime de presare și sinterizare pentru elaborarea acestui material.

Ca rezultat al cercetărilor au fost obținute două sorturi de materiale noi, speciale pentru electrozi, KGG2 și KGG5, elaborate cu pulbere de grafit indigenă, specificându-se domeniul de utilizare a lor la prelucrarea prin eroziune electrică a oțelurilor de vârf înalt aliate și a aliajelor dure.

4. S-a determinat regiunea mecanică și termică optimă de elaborare a cuprului sinterizat izotrop pentru electrozi de eroziune electrică stabilindu-se varianta tehnologică cu cea mai bună comportare în procesul de prelucrare: $p_1 = 1000 \text{ daN/cm}^2$, $T_1 = 900^\circ\text{C}$, $p_2 = 3000 \text{ daN/cm}^2$, $T_2 = 900^\circ\text{C}$. Din acest material s-au confecționat electrozi cu stabilitate la eroziune mai bună decât cei constituiți din cupru electrolitic tras.

5. S-au determinat indicii de performanță și s-au stabilit domeniile de utilizare a materialelor de electrozi K75 - Cu25, elaborate la Laboratorul de cercetări pentru metalurgia pulberilor de la I. P. Cluj-Napoca, cu verificarea materialelor reciclabile rezultate de la filamentele de wolfram.

6. A fost aplicată în studiul comparării la eroziune electrică a materialelor de electrozi metoda planificării statistice a experiențelor, la care valorile a șase variabile independente au fost variate simultan, iar efectele fiecăreia asupra funcțiilor de răspuns s-au

determinat separat. Au fost stabilite pe această cale un număr de 288 ecuații de regresie experimentale pentru estimarea principalelor caracteristici tehnologice la prelucrarea prin erosiune electrică în funcție de valorile parametrilor de regie programate, în cazul prelucrării cu electrozi confecționați din materiale speciale fabricate în țară : 975 - Cu25, cupru-grafit, cupru sinterizat izotrop.

11. Achimescu A., Moldovanu A., Cuciu V. - Electrozi sculă din cupru sinterizat pentru prelucrarea prin eroziune electrică., Conferința Națională de Mașini unelte, București dec.1976, pag. 111-118.
12. Achimescu A., Michici Al. - Aprecierea comportării la eroziune electrică a electrozilor din Cu și -Cu pe baza experiențelor planificate statistic, "Probleme tehnologice ale prelucrării mecanice în construcția de mașini", Iași 1980, pg.17-23.
13. Achimescu A., Michici Al., Popovici I. - Corelația material-electrod-rugozitatea suprafețelor prelucrate prin eroziune electrică., I.I.S. Tirgu-Mureș. Lucrări științifice, vol.3, seria 1, 1981, pg.23-34.
14. Achimescu A., Popa M. - Influența factorilor geometrici asupra uzurii electrodului la prelucrarea electroerozivă cu copierea formei., DITZ seria mecanică Tom.17(31) Fasc.2, 1972, pg.215-220.
15. Achimescu A., Popa M. - Distribuția vitezelor de uzură a electrodului la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei., CMT 1, Sibiu, 1971.
16. Achimescu A., Popa M. - Stadiul comportării la eroziune electrică a electrozilor din material cupru - Cu95-C5., -retocol, IPTVT - IF Cluj - CMI București, 1973.
17. Achimescu A., Popa M. - Studiu experimental al vitezelor de uzură la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei., -IPTZ, seria mec. tom.25(39), Fasc.1, 1980, pg.123-136.
18. Achimescu A., Popa M. - Acupura procesului de generare a suprafețelor la prelucrarea prin eroziune electrică., CMT 3, Sibiu, 1982.
19. Afanasiev A.V. - Unele legi ale fenomenelor eroziunii electrice și căile de mărirea productivității prelucrării electroerozive a artelor., CMT 1, Sibiu, 1981, pg.39-49.
20. Afanasiev A.V. - Nekotore voprosi teorii i rasciety profesee elektricskoi erozii., Elektricskrovaia obrabotka metallov, Moskva Izd. AN SSSR, 1963, pg.73-78.
21. Albinski A. - Studiul stabilității în eroziune electrică a electrozilor în cazul prelucrării prin acțiune electrică și prin impulsuri electrice., Mașini unelte și scule, IAF, nr.10 din 1964, pg.602-605.
22. Aleksandrov V.I. - Issledovanie tehnologicskih harakteristik elektroeroziionnoi obrabotki jareprecnih materialov. Izd. Voen. Akad. ,1964.
23. Artamonov I.A. g.a. - Kozmernia elektricsknaia obrabotka metallov, Moskva, Vissiaia Șkola, 1973.
24. Iakinto I.A. g.a. - O voprosiaov vlianii sostoiania mejelektrodnovo promejuška na profesee elektroeroziionnoi obrabotki., A.O.M. Kijiev, nr.1, 1975, pg.12-15.
25. Iakinto I.A. g.a. - Sviaci ferai elektrodno-instrumenta s formoi palesti obrabotivaiiaia pri elektroeroziionnoi obrabotke.
26. Balleye P. g.a. - Etude de la distribution spatiale des décharges en électroérosion., CMT, nr.1, 1973.
27. Marech A. - quelques propriétés des surfaces produites par électroérosion., Microtechnie, vol.12, nr.1, pg.1-5.

28. Baron F. - Metode statistice pentru analiza și controlul calității produselor., 1972, București, 1973.
29. Volkov G.S. - Vlianie teplofiziceskih svoystv materiala kontaktov na velicina elektriceskoi erozii., Elektricoostvo, Moskva, 1970, nr.2, 1970, pg.56-58.
30. Lemeli L. - Etude de l'influence de la contamination sur l'amarçage des décharges dans les diélectriques liquides., Thèse nr.1982, Univ.de Genève, 1979.
31. Bruas A., Baccin J. - L'usinage par électro-érosion, La Machine Outil française, nr.13, mars, 1958.
32. de Bruyn J. - Slope control: a great improvement in spark erosion., CIM, nr.14, 1967, pg.487-489.
33. Cartig I. - Distribuția spațială și natura transformărilor structurale ce au loc la prelucrarea prin electroeroziune., A I.I. - a Conf. IURK, Sibiu 1978, pag.216-222.
34. Cartig I. - Cercetări teoretice și experimentale asupra structurii, proprietăților fizice și rugozității suprafețelor prelucrate prin eroziune electrică., teză de doctorat, 1977, 1973.
35. Ceaptescu Nicu, Popescu I. - Tehnologii neconvenționale., Ed. Cercul Științ., Craiova, 1982.
36. Chilerie A. - Matériaux frittés peuvent être utilisés comme électrodes dans l'usinage par électro-érosion., Usine Carbon Creusot, 1976.
37. Chincelle M. - Jetal removal and adaptive control in ..., 1977, pg.57-62.
38. Clasen J.H. - L'usinage et le curçage par étincelage., Société de Publication Mécaniques, Paris, 1958.
39. Conrad G. p.a. - Optimierung des EDM - Processes. I.I. 4, Bratislava 1974, pg.100-101.
40. Crookall J.H., Houbelmas C.F. - Electro-discharge machining the state of the art., CIM, vol.21/2, 1971, pg.113-120.
41. Crookall J.H., Veredey A.J. - Une détermination expérimentale de la dégradation de la forme de l'électrode-outil dans l'usinage par électroeroziune., Iarstehnik 1973, 2, Leuven, 1973, pg.196-200.
42. Crookall J.H., Conrict A.J.H. - A theory and evaluation of tool-electrode shape degeneration in electro discharge machining., Proc. Instn. Mech. Engrs 1973, vol. 6/73, pg.51-61
43. Rijk van P., p.a. - Some results of physical research in ..., I.I. 4, Bratislava 1974, pg.68-75.
44. Volkov G.S. p.a. - Prizvedstvo elektrod-instrumentov s vichimi eksplatacionimi svoystvami iz kompozitsionih materialov., 1978, 3, 3, pg.84-86.
45. Longa A. - Cercetări în metalurgia pulberilor, la Institutul Politehnic Cluj, Conferința națională de metalurgia pulberilor., Cluj-apoca, 1975, vol.1, pg.1-6.
46. Eriner Delphi - asupra pregătirii specialiștilor în domeniul tehnologiilor neconvenționale., CIM 3, Sibiu 1982, Comunicări în plan, pg.26-30.

47. Potsev I.K. - Tverozapalavnia stampi i ih ingeterionie elektro-
lahrevaia spetsien. *Magistralnitsa* 1961, nr.12.
48. Potsev I.K. - Elektrozapalavnia obrabotka glubokia silindriches-
kih otveretii. *MA, Kishinev*, 1970, nr.3, pg.9-15.
49. Pralov F.R. - Sporevi vuzroshnia iznosia elektrodinamicheska pri
elektroshirovoi obrabotke temperaturiatsia materialov. *MA,
Kishinev*, 1974, nr.4, pg.27-30.
50. Punt L. - Die Schlanzenartige Metallverteilung bei elektrischen
Entladungen kleiner Energie auf kurzer Dauer. *Dissertation, Th.
arnehmweig, Maschinenbau Institut d. Angewandte, 1968.*
51. Punt L. - Metallverteilung metallischer Werkstoffe durch fun-
kenartige Entladen. *Dissertation an der RWTH, Aachen, BRD, 1961.*
52. Popoviciu G. - Experimentala metode in studierea mecanismului
produselor electrice i eroziunii pe suprafasa electrodilor i
modul electrozapalavniei strabotii. *autoreferat disertatii,
MOSU, 1963.*
53. Popoviciu G. - A rapoartu de iznosie electrod-instrumenta pri
elektroshirovatai obrabotke. *MA, Kishinev*, 1966, pg.77-95.
54. Popoviciu G. - Cercetari tehnologice privind posibilitatile de ex-
tindere a proceselor de prelucrare prin electroeroziune in
industria. *MA, Kishinev*, 1971, nr.4-5.
55. Pöhlner H. - Schmelzelektrodenmaterialien. *Beitragstechnik 19
(1970) nr.2, pg.34-40.*
56. Pöhlner H. - Beitrag zur Abzug des Verschleißproduktes bei der
Einkathodischen Metallbearbeitung. *Archiv für wissenschaftliches Maschinenbau
Klub der Helveten, Lucerne, 1963, Band 9, pg.61-65.*
57. Pöhlner H. - "Schmelzelektroden", *Werkstofftechnik nr.6/1975,
pg.43-44.*
58. Pöhlner H. - Abtragung des Verschleißproduktes. *Wissenschaftliches
Maschinenbau, nr.22, 1970, pg.88-93.*
59. Pöhlner H. - Große Silberformen in der Werkzeug- und Formtechnik.
Werkstofftechnik und Metallbau, nr.4, 1972, pg.233-237.
60. Purcell J., Zisman J. - Composite (superposed) current pulses in
electroerosion. *Journal of Applied Electrochemistry, nr.5, 1973, pg.1-4.*
61. Purcell J., Zisman J. - An introductory investigation of the break-
down mechanism in electro-discharge machining. *Annals of the
N.Y. Acad. of Sciences, nr.1, 1971, pg.40-44.*
62. Rindler J., Rindler G. - Neuere Verfahren der Metallbearbeitung,
insbesondere die Elektroerosion. *Verfahren der Metallbearb., nr.2
1954, pg.53-57.*
63. Rockswold J.V., et al. - Dynamic evaluation of events accom-
panying the low-voltage discharges employed in the erosion
process in industry and control applications. *nr.4, 1977, pg.301-309*
64. Rockswold J.V., et al. - Further research on the transient mech-
anism in electro-discharge machining. *Journal of Applied Electrochemistry, nr.3, (1973), pg.49-50.*
65. Rostov I. - Cercetari privind prelucrarea cu suprafata electrica
in cazul de suprapunere. *Teza de doctorat, IMVT, 1973.*
66. Rostov I. - Cercetari privind electrozapalavniea si eroziunea
electrica. *Electrozapalavniea si eroziunea electrica, teza de doctorat 1972, pg.49-6*

67. - Kalinin A.A., Krasniuk B. - Charakteristika zakonomenosti iznosa elektrodeov-instrumentov pri elektroerozijski obrabotki., IVUZ Magistrovanje 1978, nr.2 pg.136-139 oi pg.140-151 nr.1.
68. Krasniuk B. - O kolebanjih instrumenta v procesu elektroerozijske obrabotki., IVUZ Magistrovanje, 1966 nr.2, pg.168-172, 1967, nr.1 pg.153-157.
69. Kaspigov I., Dyakov V. - Vlijanie materiala elektrodov na vreme zapezdivania razviada v jidnih dielectrical., 21: nr. 6/1979, pg.9-11.
70. Kobanovskaia I.S. - Neotornie dannie o zakonomenostiah izmenenii na jelektrodov zasora v area razlicnoi stepeni nagriaznenosti., 200, Krevan, nr.3, 1969, pg.10-17.
71. Kobanovskaia I.S. - Zavisimosti tertoviu na jelektrodnih zasorov ot velicini rahnoda jitzosti., 200, Krevan, 1971, nr.6, pg.1-7.
72. König H., Reiss H. - Funkenerosive Bearbeitung von Hartmetall., Westdeutscher Verlag, 1974.
73. König H., Harttz L. - Systeme für die Prozessoptimierung bei der funkenerosiven Bearbeitung., Band 4, Bratislava 1974, pg.97-99.
74. König H. g.a. - The Flow Fields in the working gap with dielectric-charge-machining., J. Appl. vol.25/1, 1977, pg.71-76.
75. Korobliuk A.V. g.a. - Elektroerozijskaja obrabotka instrumentov iz metalokoranijskoj kompozicii., Stanki i instrument, nr.2, Moskva, 1972, pg.30-32.
76. Kocik J. - Metallurgical problems associated with EDM., Band 3, Vienna 1970, A 54.
77. Kovalenko V.S. - Elektrofizicheskie i elektrohimijskie metody obrabotki materialov., Kiev, Izd. Visschishkoh, 1975.
78. Kriacht L.S. - Technische Zeitschrift für praktische Metallbearbeitung, nr.5/1975 pg.167-173.
79. Krasnits E., Neyman B. - Stand und Entwicklungstendenzen der funkenerosiven Materialbearbeitung., Electric, nr.9, 1975, pg.407-409.
80. Krasniuk B.A. - Issledovanie poroshkov - promastov erozii elektroiskrovei obrabotki., Elektroerozijskaja obrabotka metallov, Moskva, Izd. Akad. S. SSSR, 1963, pg.126-133.
81. Kravet A.T. g.a. - Technological characteristics of EDM, range of application and problems of increasing efficiency., Band 5, Wolfberg, 1977, pg.73-77.
82. Kuzin V.L. - Ob opredelenii elektroerozijskoi ustoičivosti tviordih tel., 204, Kuznetz, 1969, nr.4, pg.16-18.
83. Kurz E. g.a. - Die Auswirkung der Energieverteilung auf Abtrag und Verschleiss bei der funkenerosiven Bearbeitung., Industrie-Anzeiger nr. 31, 1972, pg.692-693.
84. Lasarenko M., Lasarenko I.I. - Elektroiskrovaia obrabotka metallov. Izd. Akad. SSSR, Moskva, 1967.
85. Levinson B. g.a. - Elektroerozijskaja obrabotka materialov., Izd. Magistrovanje, Leningrad, 1979.
86. Levinson B. - Spravočnik po elektrotehnologii., Magistrovanje, Leningrad, 1972.
87. Levit A.L. - Issledovanie vlijanja glubini obrabotki na proces evakuacii produktov erozii iz na jelektrodnoi polosti., 200, Krevan, 1970, nr.2, pg.31-39.

- 100 -
88. Livsit A.L., Melamed L.H. - O toplivom kriterii eroziionnoi stoi-
kosti materialov., *AVIA*, Aravan, 1970, nr.3 (5), pg.1-7.
 89. Livsit A.L., G.S. - Viskostoihia elektrody dlia elektroimpulnoi
obrabotki metallov., *Stanki i instrument*, 1958, nr.5, pg.23-25.
 90. Livsit A.L. - Fiziceskaia model' protessa oblianoi elektroerozi-
ionnoi obrabotki., *Stanki i instrument* nr.9 Moskva, 1977, pg.4-8.
 91. Livsit A.L., G.S. - Elektroimpulnnaia obrabotka metallov., *Izd. Mashino-
stroenie*, Moskva, 1967.
 92. Livsit A.L. - Mekhanizm protessa elektroeroziionnoi obrabotki metallov
Stanki i instrument, nr.9, 1967.
 93. Manitu C., Leihorn H. - Auswahl der optimalen elektrischen Arbeit-
sparameter für die elektroerosive Metallbearbeitung; (Lit.).,
Vertigungstechnik und Betrieb nr.12/1976, pg.742-745.
 94. Manitu C. - Contribuții la teoria generală a stabilirii parametrilor
de lucru la prelucrarea prin eroziune electrică., *C. I. 2*,
Iucurești, 1977, pg.38-47.
 95. Marty C. - Etude thermocinetique de l'électro-érosion, Recherche des
parametres adimensionels., *CIRP* 24-1975, pg.131-134.
 96. Popcoriacov G.S. - Electro-physical processes in electric pulse
Metal Cutting from the Point of view of efficiency and polarity
of electrode wear., *CIRP*, nr.18, 1970, pg.491-499.
 97. Ghail I. - Introducere în strategia experimentării cu aplicații
din tehnologia cunich., *Ed. Șt. și Enciclopedică*, Iucurești, 1976.
 98. Aronoff A.L. - Electro-erosion, sa nature physique et son emploi dans
l'industrie., *Microtechnie*, nr.3/1965, pg.143-153, nr.4/1965, pg.171-
177, nr.5/1965, pg.233-258.
 99. Aronoff A.L. - Thermal effects of erosive pulses., *IEEE* 5, - Ols-
borg, 1977, pg.43-47.
 100. Litkeviči A.A. - Vlianie vibracii elektroda na protsess elektro-
skrovoi obrabotki, *Elektroiskvnaia obrabotka metallov.*, *Izd. Akad.
Nauk SSSR*, Moskva, 1963, pg.173-178.
 101. Moldovanu M. - Cercetări referitoare la elaborarea materialelor
sinterizate cupru-grafit pentru electrozi sculă ai mașinilor de
prelucrat metale prin electroeroziune., *Protocol I. Cluj-apoca*,
1972, pg.1-41.
 102. Moldovanu M., Suciu V. - Studiu privind elaborarea materialului
compus Cu25-G5, în formă de laborator., "Protocol: "Produse pe bază
de cupru și grafit sau alte elemente", *Ist. Șt. Cluj-apoca*, 1973.
 103. Moldovanu M., Suciu V. - Studiul influenței conținutului în grafit
cupru proprietăților unor materiale din sistemul cupru-grafit.,
Conf. naț. de metalurgie pulberilor, Cluj-apoca, 1975, vol.3, pg.
111-115.
 104. Moldovanu M., Suciu V. - Cercetări privind elaborarea de materiale
sinterizate pentru electrozi de eroziune electrică., *Protocol IP
Cluj-apoca - I. TV. 2 - Electrofizic*, 1977.
 105. Moldovanu M., G.S. - Studiul conductivității electrice la unele mate-
riale compuse din sistemul cupru-grafit. *Conf. națională de met.
pulberilor*, Cluj-apoca, 1975, vol.3, pg.137-142.
 106. Otski H., Masigami K. - Energy distribution at the gap in electric
discharge machining., *Annals of the CIRP* 14(1967) pg.485-488.
 107. Kubayama Y. - The mechanism of EDM., *Jap. Soc. Res. Eng.* 2 (1968)
pg.288-295.

108. Iamatove A. - Nekotore osobennosti poliarnevo effekta elektriceski erozii pri povtorinussihia razlicah., 304, Kijinev, 1967, nr. 1 (13) pg. 25-30.
109. Manitozov K. A. - Nekotore vaprosi fiziki protessa elektriceskoj erozii metallov pri nis kovel'tah impul'snih razriadah., vlek-triskvovaja obrabotka metallov. Izd A.S. SSSR 1963, pg. 56-68.
110. Manu A. - Tehnologiile neconventionale, prezent si perspective., CMT 3, Sibiu 1982, Comunicari in print, pg. 20-26.
111. Manu A. - Perspectivele tehnologiilor neconventionale in industria., CMT 2, Bucuresti, 1977, pg. 1-5.
112. Manu A. - Tehnologia materialelor, Ed. Bucuresti, ed. II, 1977.
113. Manu A., Achimescu M., Vega I. - Studiul caracteristicilor structurii de suprafata obtinut la durificarea prin scintei electrice a pieselor din OLC 10 cu cizaj dar P 10., B.I.T., Tom 11(25), fasc. 2, 1966, pg. 551-562.
114. Manu A., Achimescu M., Velicescu C. - Acupra echilibrului de prelevare, mrunzire si evacuare a materialului din interstitial co-tiv la prelucrarea prin eroziune electrica., Bul. st. al I.I.T. Sibiu, Seria Tehnic-mat. vol 3, 1966, pg. 127-131.
115. Manu A., Achimescu M., Velicescu C. - Acupra modelului matematic al reccetiei interne inverse a procesului de prelucrare prin eroziune electrica., CMT 3, Sibiu, 1982.
116. Manu A., g. a., Achimescu M. - Consideratii privind autoreglarea si reglarea automatului la debitarea electroerozivă., B.I.T., Tom 1(23), fasc. 2, 1964, pg. 419-430.
117. Manu A., Pope H., Achimescu M. - Particularitati ale generării cu-prafetei la prelucrarea prin eroziune electrica cu copierea formei., Sesiunea de lucrari stiintifice I.T.V., 1979.
118. Manu A., Achimescu M., g. a. - Studiul prelucrării dimensionale prin eroziune electrica a oțelurilor bogat aliate, utilizate in fabricarea seculilor și matrițelor., Protocol I, II, I.T.V. - electro-tinș 1976, 1977.
119. Manu A., Luculescu M., Manu D. - Posibilități de optimizare a pro-gra-mării parametrilor electrici la prelucrarea prin eroziune elec-trică., C.M.T. 1, Timisoara 1971, pg. 87-95.
120. Manu A., Michici A., Pope H. - O nouă conceptie asupra noțiunii de prelucrare dimensională prin eroziune., C.M.T. 1, 1971, pg. 11-20.
121. Manu A., Michici A. - Definirea, clasificarea și caracteristicile generale ale metalelor de prelucrare dimensională prin eroziune. Standardizarea nr. 21, 1969, nr. 2, pg. 57-62.
122. Manu A., Michici A. - Prelucrarea dimensională prin eroziune elec-trică., Manualul inginerului mecanic, T. 1, ed. tehnică, 1972, pg. 657-681.
123. Manu A., Manu D. - Prelucrarea dimensională prin eroziune electri-că in cimp magnetic., Ed. Facula, Timisoara, 1981.
124. Manu D. - Modificări structurale determinate de cimpuri magnetice cu sensuri diferite suprapuse prelucrării prin eroziune electri-că., IIS Ig. - ureq, Lucrări stiintifice, vol 3, seria 1, 1981, pg. 35-40.
125. Manu D., Urdaș F. - Studiul microscopic si a soci influențe te ter-mie la prelucrarea prin eroziune electrică in cimp magnetic cu electroai-sculă din oțel., A III-a conf. P.U.P.R. Timisoara 1978, pg. 505-508.

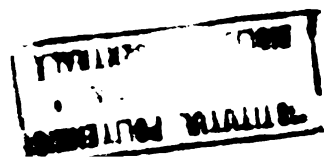
126. Dekrazevici I.G., Bacute I.A. - A vaprosu o navicnosti elektroznojnogo efekta ot dlini rasriadnogo praznjutka v ustavevnikh s karentnom tipa I.C., Jurnal tehnicnoji fiziki, Tom. 32, Vip. 5, 1962, p. 641-643.
127. Nereslavski A.P. - Issledovanie ismenenija formi elektrodov v protse elektroznojnogo obrabotki, in "Izmenenie metodi obrabotki materialov", Minsk Izd Nauka i tehnika, 1977, pg. 171-175.
128. Michici A. - Fenomene fundamentale la prelucrarea cu scintei electrice cu electrod oscilant. Teza de doctorat, I.P. Timisoara, 1970.
129. Michici A. - Tendinte actuale in modelarea proceselor de prelucrare prin eroziune electrice, C.T.S., 2, Lucurcuti, 1977, pg. 9-13.
130. - Michici A. - Contributie la determinarea regiunilor optime de prelucrare cu scintei electrice in functie de marimea suprafetei prelucrate., Constructia de masini XVIII, 1966, nr. 11, pg. 645-649.
131. Michici A., Achimescu M. - Aspecte ale influentei porozitatii prin electrozile asupra indicatorilor tehnici ai prelucrării prin eroziune electrică., Bul. st. IIS Sibiu, seria tehnica-astematica, vol. III, 1980, pg. 132-133.
132. Michici A., Cucurus C. - Evidentierea statistica a factorilor semnificativi la prelucrarea prin eroziune electrica pe masina...-ol Comunicările primei sesiuni tehnico-stiintifice săptămânale, octombrie, 1979, pg. 26-30.
133. Michici A., Achimescu M., Cucurus C. - Probleme ale aplicării planificării statistice a experimentărilor in modelarea funcțiilor de raspuns ale sistemelor de prelucrare prin eroziune electrică., Probleme tehnologice ale prelucrărilor mecanice in constructia de masini, Iasi 1980, pg. 12-17.
134. Nicolae V. ș.a. - Influenta morfologiei pulberilor asupra unor proprietăți tehnologice și de exploatare a electrozilor poroși pentru procese electrochimice., Conf. șt. de metalurgia pulberilor. Cluj-Napoca, 1975, pg. 103-110.
135. Obociu Gh., Wertholz A. - Acupra unei metode pentru analiza zonilor cîtă a uzurii electrocului-șculă la prelucrarea electroerosivă., Bul. Univ. Iragov, nr. 4/3, 1974, pg. 55-64.
136. Obociu Gh., Murr H. - Messung der Temperaturen bei der funkenerosiven Bearbeitung., Ind. Ans. 33, 1971, p. 86.
137. Obociu Gh. - Contribuții la studiul distribuției energiei impulsului la prelucrarea electroerosivă., C.T.S. 1, Timisoara, 1971, pg. 171-185.
138. Obrig H. W. - Grundlagen der funkenerosiven Gessakbearbeitung., Dissertation Ed Aachen, 1961.
139. Sahlitsch G., Avisser, Funk W. - Der Polaritätseffekt beim Funken erodieren., CLP, Vol. 16, nr. 3, 1960, pg. 243-248.
140. Peciușo M. Ș. ș.a. - Vliianie sostava majelektrodnoi sredy na eroc elektrodov pri rozdeistvii edinicainia rasriadov., BOM, Kijev, 1969, nr. 6, pg. 33-37.
141. Pfau J. - Les disciplines de l'electroerosion., Informations techniques Charnilles, nr. 11, 1960, pg. 3-5.
142. Peters A. - Ein Grundlagenbeitrag zur funkenerosion., Ind. Flekt + Elektron, nr. 18, 1970, pg. 449-453.
143. Polanski Z. - Cercetari asupra compensării electrozilor la prelucrarea prin electroerodare a metalelor., "Prelucrarea metalelor" IET nr. 7, 1967, pg. 393-397.

144. Popa H. - Influența metodelor de execuție a electrozilor asupra caracteristicilor tehnico-economice ale prelucrării prin eroziune electrică cu copierea formei., Tesă de doctorat I.T.V.-Timișoara, 1980.
145. Popa H., Achimescu N. - Procese și factori care determină uzura electrodului la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei., B.I.P.T., Seria mecanică Tom 17 (31) Part. 2, 1972, pg. 221-228.
146. Popa H., Achimescu N. - Studiul generării suprafeței piesei la prelucrarea prin eroziune electrică în condiții de evacuare instantanee a materialului excedent., Sesiunea de comunicări științifice a IPT, 1979.
147. Popa H., Achimescu N. - Mecanismul uzurii electrodului de transfer la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei., A V-a Conferință R.P.R., I.T.V.-Timișoara, 1981, vol. 2, pg. 39-45.
148. Popa H., Achimescu N. - Caracterizarea uzurii și durabilității electrodului la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei., În curs de apariție în IPT, 1982.
149. Popa H., David I., Achimescu N. - Model matematic pentru procesul de uzură a electrodului la prelucrarea prin eroziune electrică cu copierea formei., IPT, nr. 1, 1981, pg. 31-37.
150. Pipilov L.I. - Spravochnik o elektriceskii i ultrasvukovii motodam obrabotki materiallov., Mashinostroenie, Leningrad, 1971.
151. Popovici I. - Relația interstițiu-productivitate-uzură relativă și rugozitate la prelucrarea prin eroziune electrică., Pul. Șt. III Sibiu, vol. 3, 1980, pg. 159-164.
152. Popovici I. - Influența tipurilor de descărcări asupra factorilor productivitate, uzură relativă și rugozitate la prelucrarea prin eroziune electrică., Pul. Șt. III Sibiu, vol. 3, 1980, pg. 165-170.
153. Popovici I., Michici A., Achimescu N. - Cu privire la relația interstițiu-curent la prelucrarea prin eroziune electrică., în Șt. și rev. "Lucrări științifice" vol. 3, serie I, 1981, pg. 23-28.
154. Popovici V., Michici A. - Asupra relației de interdependență dintre structura și comportarea la eroziune electrică a aliajelor dure pe bază de Cr, TiC-CO., Comunicările primei sesiuni tehnico-științifice sătărene, Satu-Mare, 1979, pg. 47-52.
155. Rhyner H. - Betrachtung über einige der neuesten Entwicklungen auf dem Gebiet der Entladungsgeneratoren., ISMIL, Viena, 1970, Al. 3.
156. Rhyner H. - L'influence des paramètres variables des décharges sur les résultats d'usinage., Informations techniques Charvilles nr. 1968, pg. 32-38.
157. Roche A. g. a. - Le diélectrique et les matériaux constituant l'électrode de la pièce en usinage par électroérosion., ISMIL 4, Bratislava, 1974, pg. 118-126.
158. Koethel P. g. a. - Contribution to the Micro-Analysis of the Spark Eroded Surfaces., CIMT vol. 25/1, 1976, pg. 135-140.
159. Roman I. - Preocupări actuale și de perspectivă în deceniul tehnologiilor neconvenționale de prelucrare în construcția de mașini și dezvoltarea coordonată a acestora., Șt. III Sibiu 1982, Comunicări în plen, pg. 36-39.

160. Roman I. - Tehnologiile neconvenționale în prezent și perspectiva dezvoltării lor în viitor., *Constr. de mașini nr.2-3*, 1977 pg.69-77.
161. Beth A.,g.a. - *Saikraforgásolás.*, Műszaki Könyvtárs Budapest, 1961, pg.168-175.
162. Kosanov V.A. - Elektroiskravnaia obrabotka bes iznosn instrumenta, *Novos v elektrofiziceskim i elektroniceskim obrabotka metallov.*, Leningrad, Mashin, 1972, pg.177-179.
163. Sansonov G.V., Luha I.A. - Analiza dannih po isposu materiala obrobivaniem elektrodov., *STI, Kijinev*, 1967, nr.3 (15), pg.3-12.
164. Sansonov G.V., Luha I.A. - Zaccnoveriesti opredelianiocie iznosn koda pri elektroiskrovei obrabotka metallov., *STI, Kijinev*, 1967, nr.1 (3) pg.17-24.
165. Savii Gh. - Studiu asupra prelucurabilității fontelor nodulare prin procedee electroerozive., *Tezi doct. IPTVI*, 1970.
166. Savii Gh., Trăghici Gh. - Particularități tehnologice la prelucurarea microalegajelor prin eroziune electrică., *A II-a Conf. PFTI, Timișoara*, 1978, vol.1.
167. Schmidt P. - Integration de l'électro-érosion dans un chaîne transfert dans l'industrie automobile., *ISMA, Bratislava*, 1974, pg.150-154.
168. Schreiner H. - *Pulvermetallurgie elektrischer kontakte.*, Springer-Verlag, Berlin, 1964.
169. Schumacher B. - Elektredenwerkstoffe-Auswahl, Fertigung der Elektreden., *Vortrag AGIE Lesens. Locarno*, 1969.
170. Schumacher B. - Das Leistungsverhalten und der Werkzeugverschleiß bei der Funkenerosiven Bearbeitung von Stahl mit Speicher und Impulsgeneratoren., *Disertation T.U. Aachen* (1966).
171. Schumacher B. - Die vorfabrikationgerechte Planung und Ausführung der Fredierarbeiten., *ISMA 4, Bratislava*, 1974, pg.113-117.
172. Segal Z.A., Sapirev K.L. - Stoikosti pri elektroiskrovei obrabotka karbitnih materialov., *STI, Kijinev*, 1967, nr.6 (18) pg.19-21.
173. Semenov I.S.,g.a. - Metallekeramiceskii elektrod-instrument povirgennoi stoikosti., *STI, Kijinev*, 1971, nr.6.
174. Semov G. - *Guide pratique d'usinage par étincelage.*, Genève, 1975.
175. Sivnyk M. - Einige Probleme der Projektierung der Werkzeugelektreden für die electroerosive Bearbeitung., *ISMA, Viena* 1970 A 4, pg.1-18.
176. Sonea I., Kincă M. - Contribuții privind studiul structurii zonei superficiale la prelucurarea prin eroziune., *C.TM 1, Timișoara*, 1971, pg.187-191.
177. Snoeys R., Lijck Van F. - Investigations of electrodischarge machining operations by means of thermo-mathematical models., *CIRP General Assembly-Krakovia*, 1971, 71 p-1-71 p-25.
178. Snoeys R., Lijck Van F. - Plasma channel Diameter growth effects steherozovul in ADM., *CIRP - General Assembly-Stockholm*, 1972, pg.72 p.1 - 72 p.32.
179. Snoeys R., Cornelissen H. - Correlation between electro-discharge machining data and machining settings., *CIRP 24-1975*, pg.83-88.
180. Sovenko Ab. - Invlenie v sajelektrodovaz sazore pri elektroerosionoi obrabotke., *Stanki i instrument nr.1, Moskva*, 1976, pg.33-35.
181. Stavitskain I.V., Stvitkii B.I. - Issledovanie form i razmerov ero-

- zionih lunok, obrazovanih na razlicnih materialah na iskov-
vinsvrasviadai., *BOH, Kijinev*, 1960, nr. 1, pg. 9-13.
182. Stavitski B.I., Lesruk A.I. - Vlianie velikini mejelektronovo
promajutka na efekt erozii i raspredelenie energii mejdu
anodou i katodou., *BOH, Kijinev*, 1969, nr. 5, pg. 7-14.
183. Steapel G. - Vergleichende Untersuchungen an gesinterten Verb-
undmetallen als Elektrodenwerkstoffe für die Funkenerosion
(EDM),, IV Symposium européen de metalurgie des poudres, Gre-
noble, 1975, pg. 862-866.
184. Storin Adina - Material sintezat pe bază de wolfram și procedeu
de obținere a acestuia., *S.I. 54107, MSR și B.I. 60429, RSR*.
185. Suciu V., Moldovanu Emilia - Aspecte privind compactizarea prin
presare izostatică a materialului compus Cu95-C5., *Conf. Naț. de
metalurgia pulberilor, Cluj-Apoca*, 1975, vol. 3, C15, pg. 1-5.
186. Seropot I., Samviri V. - Pristavka k elektroerozivni ustanovkam
dla sizenia iznoza elektrod-instrumenta., *BOH, Kijinev*, 1981
nr. 1, pg. 77-79.
187. Smakov G.C. - Vlianie otzovoi strukturi elektrodove materiala na
ege eroziv i agregatnoe sostoianie v zona elektriceskovo raz-
riada., *BOH, Kijinev*, 1978, nr. 6, pg. 5-8.
188. Smakov G.C. - Elektroeroziionnaia stoikosti elektrod-instrumentov
izgotovlennih iz porogkvoi medi., *BOH, Kijinev*, 1978, nr. 1, pg.
17-19.
189. Smakov G.C. - Izgotovlenie krupnogabaritnih elektrod-instrumentov
iz porogkvih kompozicii., *BOH, Kijinev* nr. 4, 1979, pg. 29-30.
190. Sontea S. - Studii și experimentări tehnologice pentru realizarea
unor materiale noi de electrozii., *Contract ICTOM, Univ. Craiova*,
1973.
191. Sontea S., ș.a., Achimescu N. - Considerații privind calitatea unor
pseude-aliaje Ag, destinate electrozilor pentru prelucrări e-
lectroerozive., *Conf. Naț. de met. pulberilor, Cluj-Apoca*, 1975,
vol. 3, pg. 115-119.
192. Tiron M. - Prelucrarea statistică și informațională a datelor de
măsurare., *Ed. Tehnică București*, 1976.
193. Văduva I. - Analiza dispersională., *Ed. Tehnică București*, 1970.
194. Veroman V.I. - Visokocastotnaja elektroeroziionnaia obrabotka me-
tallov i tverdih splavov., *L.D.M.T.P., Leningrad*, 1963.
195. Veroman V.I. - O nekotarih napravleniah razvitiia elektro obro-
botki., *ISOM 4, Bratislava*, 1974.
196. Vlasenko V.A., Perisainen N.A. - Proțess elektroeroziionnoi kak
obiekt avtomaticeskovo upravleniia., *BOH, Kijinev*, nr. 1, 1979.
pg. 19-24.
197. Weiler G.G. - Salvanelektroden zum erodieren grosser Hohlform-
werkzeuge., *Industrie Anzeiger*, nr. 55, 1975, pg. 12-16.
198. Wertheim K. - Untersuchung der energetischen Vorgänge bei der Bear-
beitung als Grundlage für eine Verbesserung des Prozessablaufs:
Teză de doctorat, Aachen 1975.
199. Williams K.M. - Theory of Electric Spark machining., *Electrical
Engineering* 1962, vol. 71, nr. 3, pg. 257-260.

201. Volkov I. S., Mivait A. L. - Hidromehanika procesov evakuaciji produktov erozii iz majelektrodnevo masora., *Fizica i himia obrabotki materialov*, nr. 3, 1968, p. 14-22.
202. Zimanyi I. - Zu einigen Fragen der Dynamik der elektrischen Entladungen bei Anwendung des unabhängigen Generators., *Acta Phys. Hungarica*, 3, Vienna 1970, A. 2.2., pg. 1-33.
203. Zingerman A. S., Mivait A. L. - O fizicheskoj prirode elektroeroziionoi obrabotki metallov., *IVUZ Elektromechanika*, nr. 7, 1959, p. 70-93.
204. Zingerman A. S. - Osnovy teorii elektriceskoj erozii metallov., *Electromechanika* nr. 5, 1960, pg. 87-98.
205. Zingerman A. S., Mivait A. L., Aronov A. I. - Iznos elektronov-instrumentov iz grafitirovannogo materiala pri elektroimpulsnoi obrabotke., *Stanki i instrument* nr. 6, 1961, pg. 20-22.
206. Zingerman A. S. - O mehanizme elektriceskoj erozii., *Fizica* nr. 1, 1963, pg. 20-30.
207. Zingermann A. S. - Problema besiznosnogo elektroda-instrumenta., *Stanki i instrument*, nr. 1(43), 1972, pg. 32-41.
208. Zingerman A. S. - Issledovanie procesa vidrosa metalla pri elektriceskoj erozii., *IVUZ, Elektromechanika* nr. 1, 1962.
209. Zlobin G. P. - Jednopolnnyje elektrody instrumenti povichennoi stoicoosti dlia elektroiskrovoi obrabotki., *Stanki i instrument*, nr. 1(43), 1972, pg. 27-31.
210. Zlobin G. P. - Nednie elektrody-instrumenti povichennoi elektroeroziionoi stoicoosti., *Stanki i instrument*, nr. 2, 1975, pg. 9-11.
211. Zelotih E. N. - Fenomenologiceskaja teorija elektroiskrovoi razmurnoi obrabotki., *Stanki i instrument*, nr. 3, Vienna, 1970, A. 2.5. pg. 1-31.
212. Zelotih E. N. - Fiziceskie osnovy elektro i skrovoi obrabotki metallov., *Moskva, Gostekhteorizdat*, 1953.
213. Zelotih E. N. - O fiziceskoj prirode elektroiskrovoi obrabotki metallov., *Elektroiskrovskaja obrabotka metallov*, Izd. A. S. SSSR, Vol. 1, Moskva, 1957.
214. Zelotih E. N. - Osnovnye voprosy kachestvennoj teorii elektroiskrovoi obrabotki v zhidkoj dielektriceskoj srede., *Problemy elektriceskoj obrabotki materialov*, Izd. AN CCCP, 1962, pg. 35.
215. Zelotih E. N. - O roli mehaniceskix faktorov v processe erozii v impulsnov razriede., *Stanki i instrument*, nr. 5/1966, pg. 329-339.
216. x x x AGIE - Mode d'emploi de la machine d'usinage par électro-érosion type AGIEBAGI LL - A, Lesons, Locarno, Suisse, 1972.
217. x x x Bedienungsanleitung zur Erosion mit 30 C., Budapest, 1965.
218. x x x Carteaz masinii E-100 - el., Electrotinaj, Timisoara, 1977.
219. x x x Characilite - Uetranzheanovisung für die Puhgenerationsmaschine, Technologie Generatoren, Geneva, 1971.
220. x x x Dekal AG, Technologie für Kreidiermaschinen, München, 1977.
221. x x x Manualul operatorului, Masina de electroeroziune GMA-110.
222. x x x Manuelul Tehnic Electro-eroziune cu 36, Bernault Coma, Ve Velisy-Villacoubly, 1974.



- 223. x x x Operation manual for H.P. spark electro-erosion machine, Model D 6140 A, Shanghai, 8 th, Machine Tools Works.
- 224. x x x Diélectriques pour l'usinage par électroérosion A&I&E Lesone-Locarno, 1978.
- 225. x x x A&I&E, elektrodens material, fertigung, Verwendung, Lesone-Locarno, 1978.
- 226. x x x Manualul inginerului mecanic, TOM, ed. tehnică Bucureşti, 1972.
- 227. x x x Dicţionarul Tehnic Român, vol. 1-18. - C. Tehnică, Bucureşti, 1957-1966.
- 228. x x x L'usinage par electro-érosion. Machine Outil nr. 354/78 pg. 27-29, nr. 355/78, pg. 115-123.