

UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI

Cu titlul de manuscris

CZU:

PÎNZARU NATALIA

**CERCETĂRI PRIVIND CONCEPEREA, PROIECTAREA ȘI
ELABORAREA „ELECTROZILOR-SCULE” PENTRU FORMAREA
STRATURILOR DE SUPRAFAȚĂ CU APLICAREA DESCĂRCĂRILOR
ELECTRICE ÎN IMPULS**

**Specialitatea științifică 242.05 TEHNOLOGII, PROCEDEE ȘI UTILAJE DE
PRELUCRARE**

Teza de doctor în tehnică

Conducători științifici:

Topală Pavel,

prof.univ., dr.hab.tehn.
Specialitatea științifică 242.05

Stoicev Petru,

prof.univ., dr.hab.tehn.
Specialitatea științifică 242.05

Autorul:

Chișinău, 2018

© Pînzaru Natalia, 2018

CUPRINS

I. STUDIUL BIBLIOGRAFIC PRIVIND PROIECTAREA ELECTROZILOR-SCULE APLICAȚI LA PRELUCRAREA PRIN ELECTROEROZIUNE

- 1.1. Principiul prelucrării prin eroziune electrică
- 1.2. Efectele descărcării electrice în impuls
- 1.3. Stabilirea electrodului-sculă (ES) pentru prelucrarea dimensională
 - 1.3.1. Stabilirea polarității electrodului-sculă
 - 1.3.2. Stabilirea parametrilor regimului de lucru
 - 1.3.3. Dimensionarea electrodului-sculă
- 1.4. Materiale și tehnologii de obținere a electrozilor pentru prelucrarea prin electroeroziune
- 1.5. Metode de proiectare a electrozilor-sculă pentru prelucrarea dimensională
- 1.6. Procedee de prelucrare superficială cu aplicarea DEI (descărcărilor electrice în impuls)
 - 1.6.1. Durificarea prin descărcări electrice în impuls
 - 1.6.2. Funcția procedeei de lucru
 - 1.6.3. Stabilirea tipului de electrozi
 - 1.6.4. Parametrii regimului de lucru la durificarea prin descărcări electrice în impuls
- 1.7. Electrozi-sculă utilizați la alierea superficială prin electroeroziune. Tipurile de electrozi-sculă utilizate la alierea prin electroeroziune.
- 1.8. Electrozi-scule aplicați la formarea depunerilor
- 1.9. Electrodul – sculă aplicat la formarea depunerilor în regim de subexcitare
- 1.10. Concluzii la capitolul I

II. STRATEGIA CERCETĂRILOR EXPERIMENTALE

- 2.1. Standul experimental și componentele lui
- 2.2. Partea mecanică a standului experimental
- 2.3. Instalații și echipamente aplicate la formarea depunerilor
- 2.4. Materialul, geometria probelor și schemele tehnologice de prelucrare
- 2.5. Modul de prelucrare a suprafețelor
- 2.6. Determinarea mărimii masice a eroziunii
- 2.7. Aplicarea microscopiei optice la cercetarea suprafețelor
- 2.8. Metode de planificare matematică a experimentului
- 2.9. Concluzii la capitolul II

III. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND COMPORTAREA ELECTROZILOR-SCULE ÎN DIFERITE PROCEDEE DE PRELUCRARE

- 3.1. Rezultatele preliminare a aplicării DEI în prelucrarea suprafețelor cu diferite destinații

3.2. Eroziunea ES la formarea depunerilor prin rupere de contact

3.3. Influența mărimii energiei acumulate pe baterea de condensatoare asupra eroziunii electrodului-sculă (regim de subexcitare)

IV. CRITERII DE PROIECTARE A ELECTROZILOR-SCULE APLICAȚI LA FORMAREA STRATURILOR DE SUPRAFAȚĂ CU DESCĂRCĂRI ELECTRICE ÎN IMPULS

4.1. Criterii propuse de proiectare a electrozilor-scule

4.2. Alegerea formei și materialul electrodului

4.3. Elaborarea electrodului-sculă la formarea depunerilor din pulberi

4.4. Tratamentul termochimic a suprafețelor. Aplicații tehnologice ale tratamentelor termochimice prin descărcări electrice în impuls în diferite medii

4.5. Proiectarea electrodului-sculă pentru tratarea termică

4.6. Construcția electrodului-sculă pentru oxidarea suprafețelor complexe cu aplicarea DEI

4.7. Formarea peliculelor de grafit. Rezultatele cercetărilor experimentale

4.8. Elaborarea electrodului-sculă pentru modificarea microgeometriei suprafeței piesei

ADNOTARE

Autor – Pînzaru Natalia. **Titlul** – Cercetări privind conceperea, proiectarea și elaborarea „electrozilor-scule” pentru formarea straturilor de suprafață cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls

Lucrarea este compusă din introducere, patru capitole, concluzii generale și recomandări, bibliografie din 135 titluri, 2 anexe, 118 pagini (pînă la bibliografie), 48 figuri, 9 tabele. Rezultatele obținute sunt publicate în 25 lucrări științifice.

Cuvinte cheie: descărcări electrice în impuls, electrod-sculă, eroziune.

- **Domeniul de studiu** – tehnică. **Scopul tezei** este proiectarea și elaborarea electrozilor-scule pentru formarea straturilor de suprafață cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls. **Obiectivele lucrării:** elaborarea modelului fizic de formare a peliculelor de oxizi pe suprafețele metalice cu aplicarea DEI; cercetarea teoretică și experimentală privind procesele erozive de interacțiune a canalului de plasmă al DEI cu suprafețele electrozilor-sculă; proiectarea și elaborarea construcției, formei geometrice și alegerea materialului electrozilor-sculă cu rezistență sporită la electroeroziune; analiza rezultatelor cercetărilor experimentale privind eroziunea electrozilor-scule în diferite procedee de prelucrare cu aplicarea DEI.

Noutatea și originalitatea științifică a lucrării constă în: dezvoltarea bazelor teoretice, privind procesele erozive de interacțiune a canalului de plasmă al DEI cu suprafețele electrozilor-sculă, analiza rezultatelor cercetărilor experimentale privind eroziunea electrozilor-scule în diferite procedee de prelucrare cu aplicarea DEI și elaborarea propunerilor construcției, formei geometrice și materialelor pentru confecționarea electrozilor-scule de durabilitate sporită utilizate la prelucrarea dimensională prin electroeroziune.

Problema științifică importantă soluționată: *sporirea rezistenței electroerozive a electrozilor-sculă utilizate la prelucrarea dimensională cu aplicarea DEI.*

Importanța teoretică și valoarea aplicativă a lucrării este asigurată de: elaborarea bazelor teoretice privind procesele erozive de interacțiune a canalului de plasmă al DEI cu suprafețele electrozilor-sculă; recomandările teoretico-experimentale privind proiectarea și elaborarea construcției, formei geometrice și alegerea materialului electrozilor-sculă cu rezistență sporită la electroeroziune. Pe baza rezultatelor lucrării au fost obținute 2 brevete de invenții.

LISTA ABREVIERILOR ȘI SEMNE CONVENȚIONALE UTILIZATE ÎN LUCRARE

DEI – descărcările electrice în impuls;

ASE – alierea prin scînteii electrice;

LRU – lichidul de răcire-ungere;

BC – blocul de comandă;

BA – blocul de amorsare;

G – generatorul;

O – osciloscopul;

SEM – Scanning electron microscopy – microscopie electronică;

EDX – Energy dispersive X-ray analysis – analiza compoziției chimice a suprafețelor;

XPS – X-ray photoelectron spectroscopy – determinarea spectrului fazic a peliculelor de oxizi cu ajutorul spectroscopiei fotoelectronice;

CMMP – metoda celor mai mici pătrate de analiza statistico-matematică a rezultatelor cercetărilor experimentale;

ZC – zona de conductibilitate;

ZV – zona de valență;

ES – electrod-sculă;

EP – electrod piesă;

V – volumul substanței, m³;

m – masa, kg;

ρ – densitatea materialului, $\frac{kg}{m^3}$;

e – sarcina electronului, C;

W – energia, J;

W_s – energia descărcării degajată în interstițiu, J;

W_a – energia descărcării transmisă anodului, J;

W_k – energia descărcării transmisă catodului, J;

W_c – energia descărcării transmisă canalului de descărcare, J;

f – frecvența, Hz;

U – cădere de tensiune, V;

U_C – tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare generatorului de impulsuri, V;

U_s – cădere de tensiune în interstițiu, V;

U_a – tensiunea arcului, V;

L_a – lungimea arcului, cm;

I – intensitatea curentului, A;

d – diametrul, m;

d_c – diametrul canalului de plasmă, m;

S – distanța dintre electrozi (mărimea interstițiului), m;

Q – căldura, J;

Q_{top} – densitate de căldură volumică de topire a materialului, $\frac{J}{m^3}$;

P – puterea, W;

P_m – puterea medie, W;

P_r – puterea pierdută prin radiație, W;

P_c – puterea pierdută prin conductibilitate termică, W;

P_s – puterea impulsului de descărcare, W;

Φ – fluxul termic, $\frac{J}{m^2 \cdot s}$;

λ – conductibilitatea termică a materialului, $\frac{J}{kg \cdot K}$;

T – temperatura, K;

j – densitatea curentului, $\frac{A}{m^2}$;

φ_{ef} – lucrul efectiv de ieșire, eV;

g – accelerația căderii libere, m/s^2 ;

A – aria suprafeței, m^2 ;

p – presiunea, Pa;

E – modulul lui Young, Pa;

$\Delta\gamma$ – adaosul (pierdere) masei la prelucrarea prin electroeroziune, g;

q_{top} – căldură specifică de topire a materialului, $\frac{J}{kg}$;

η – randamentul, productivitatea procesului;

b – lățimea fâșiei de oxidare, m,

δ – grosimea stratului, m;

h – înălțimea, m;

τ – timpul, durata, s;

C – capacitatea, F;

R – rezistența electrică activă, Ω ;

n – frecvența de rotație, rot/min;

v_s – viteza de avans, mm/min;

i – numărul de treceri, numărul de impulsuri de descărcare.

Introducere

Dezvoltarea tehnicii contemporane este cauzată de criza energetică și cea a materialelor care a cuprins întreaga omenire. Rezolvarea problemelor principale a acestei crize poate fi rezolvată pe mai multe căi, însă în calitate de sursă principală a acestei crize poate fi menționată tehnologia de elaborare și prelucrare a materialelor. Acesta din urmă poate fi transformată în același timp și în principala sursă de economisire a materialelor prin reciclarea materialelor uzate, prin elaborarea de noi materiale și aliaje, prin înlocuirea construcțiilor pieselor executate dintr-o bucată prin cele compuse multi-strat și prin formarea prin diferite metode a straturilor de protecție pe suprafețele pieselor ce funcționează în medii agresive și la temperaturi înalte, ori în condiții de uzură mecanică, chimică etc.

Descărcările electrice în general reprezintă o sursă concentrată de energie care în prezent s-au afirmat într-un domeniu larg aplicativ în tehnologiile de prelucrare a materialelor. Astfel putem constata că, descărcările electrice sub formă de arc se aplică pe larg în tehnologiile de sudare și debitare a materialelor [1, 2], de formare a depunerilor [3], de microoxidare a suprafețelor pieselor aplicate în diferite construcții industriale [4] etc.

Odată cu inventarea de către soții B.R. Lazarenko și N.I. Lazarenko a metodei de prelucrare a materialelor prin electroeroziune, aceștea au introdus în uz un nou termen „descărcare electrică prin scîntee” sau „scîntee electrică”. Acest tip de descărcări electrice a fost aplicat la început pentru prelucrarea dimensională [5, 12,13, 14, 17, 20], iar apoi și la formarea superficială a straturilor de depunere din materiale compacte [18] și pulberi [8]. Dezvoltarea de mai departe a acestei metode de prelucrare a făcut posibilă și rectificarea suprafețelor până la clase superioare de rugozitate [19]. Însă în literatura de specialitate ce ține de acest domeniu de aplicare a descărcărilor electrice se întâlnesc diferiți termeni cum ar fi: descărcare electrică în impuls, „microspark” etc. Utilizarea de către diferiți autori a diferitor termenologii duc în eroare cercetătorii creînd senzația că se vorbește de diferite metode de prelucrare. Din acest motiv pentru început vom determina ce au în vedere aceștea și dacă în fond este o deosebire esențială între acești termeni.

Astfel pentru „scîntea electrică” [12, 13, 14, 15], „micro-electro discharge” [7, 9, 10, 11] și „descărcarea electrică în impuls” [8] este caracteristică: prezența a doi electrozi, între electrozi se formează un joc, numit interstițiu, cuprins în limitele de la $2 \cdot 10^{-6}$... 10^{-3} m, o durată a impulsului de curent din interstițiu de 10^{-8} ... 10^{-4} s, căderea sumară de tensiune pe electrozi constituie cca 20V, iar între electrozi se formează un nor de plasmă și toate acestea decurg în medii dielectrice. Din cele menționate mai sus rezultă că, de fapt, aceste noțiuni reflectă aceeași esență, adică pot fi precăutate ca sinonime. În lucrarea [6] sunt aduse argumente elocvente în conformitate cu care acestea sunt precăutate ca faza incipientă a descărcării electrice prin arc.

În timpul prelucrării dimensionale cu aplicarea DEI, între sculă și piesa de prelucrat nu există contact direct, ele fiind permanent despărțite de o peliculă de lichid dielectric, sau gaz - la formarea straturilor de depunere. Prin tensiunea produsă de generator mediul dielectric (gaz sau lichid) este străpuns printr-o descărcare electrică în impuls de durată scurtă ($10^{-8} \dots 10^{-4}$ s) care, datorită temperaturii ce o dezvoltă (peste 10000°C) topește local piesa de prelucrat și electrodul-sculă. După o pauză necesară deionizării mediului dielectric, electrodul-sculă și piesa de prelucrat sunt supuse din nou acțiunii tensiunii și are loc o nouă descărcare electrică ce produce topirea locală și prelevarea de material dintr-un alt punct al piesei (la prelucrarea dimensională) sau al electrodului – sculă (la formarea straturilor de depunere). Frecvența descărcărilor poate atinge pînă la 400kHz. Descărcarea electrică în impuls ce se produce între electrodul-sculă și piesă este de fapt o descărcare în plasmă [6, 13, 14, 16] și are toate caracteristicile acesteia, care o deosebesc fundamental de o descărcare prin arc electric. Este vorba în primul rînd de densitățile de curent de ordinul 10^6 - 10^8A/cm^2 și apoi de valorile cîmpului electric de cca 10^4V/cm , ce nu se pot atinge la descărcarea prin arc electric. O altă caracteristică importantă a descărcării electrice în impuls este aceea că, pe parcursul ei, tensiunea pe interstițiu scade totdeauna la o valoare cuprinsă în limitele 15-25V pentru generatoarele de impulsuri comandate și 40-70V pentru generatoarele de relaxare. Datorită acestor caracteristici prelucrarea prin electroeroziune cu aplicarea DEI are un caracter intens de eroziune, bine orientat și bine dozat spre deosebire de descărcarea în arc electric care are efect distructiv, neregulat, conducând la productivități mici, dar producând uzuri mari ale electrodului-sculă.

În același timp tehnologia de prelucrare a materialelor în scopul micșorării cheltuielilor energiei poate deveni o sursă de economisire a acestora prin aplicarea a noi procedee de prelucrare în baza tehnologiilor neconvenționale. Din această categorie fac parte tehnologiile ce utilizează în calitate de energie de efect arcul electric, descărcările electrice în impuls, plasma, razele laser etc.

Stratul de suprafață poate fi ca element constructiv al pieselor își poate modifica proprietățile de emisie și absorbție a diferitor tipuri de radiație și prin modificarea micro-geometriei de suprafață.

Proprietățile electrice și rezistența la coroziune pot fi modificate prin formarea în acesta a fazelor și compozițiilor specifice (oxizi, hidro-oxizi, nitruri, etc.).

Scopul lucrării constă în proiectarea și elaborarea construcției, formei geometrice și materialelor pentru confecționarea electrozilor-scule privind eroziunea electrozilor-scule în diferite procedee de prelucrare cu aplicarea DEI.

În calitate de **obiect al cercetărilor** au servit probele executate din materialele larg aplicabile în construcția de mașini și aparate.

Pentru realizarea scopului tezei au fost focalizate următoarele **obiective majore**:

- elaborarea modelului fizic de formare a peliculelor de oxizi pe suprafețele metalice cu aplicarea DEI;
- cercetarea teoretică și experimentală privind procesele erozive de interacțiune a canalului de plasmă al DEI cu suprafețele electrozilor-sculă;
- proiectarea și elaborarea construcției, formei geometrice și alegerea materialului electrozilor-sculă cu rezistență sporită la electroeroziune;
- analiza rezultatelor cercetărilor experimentale privind eroziunea electrozilor-scule în diferite procedee de prelucrare cu aplicarea DEI.

I. STUDIUL BIBLIOGRAFIC PRIVIND PROIECTAREA ELECTROZILOR-SCULE APLICAȚI LA PRELUCRAREA PRIN ELECTROEROZIUNE

1.1. Principiul prelucrării prin eroziune electrică

Prelucrarea prin eroziune electrică este un proces de prelevare a materialului prin acțiunea repetată a descărcărilor electrice în impuls, desfășurate într-un lichid dielectric, între două obiecte metalice conectate la o sursă de energie.

Cuplul „sculă – semifabricat” este format din electrodul-catod, numit **electrod** și electrodul-anod, numit **semifabricat**.

Prelevarea de material reprezintă, în sens tehnic, mijlocul de separare a unor particule de dimensiuni submilimetrice din materialul de bază al semifabricatului prin fenomene nemecanice [21].

Eroziunea electrică este procesul de prelucrare, în care particulele de material de pe suprafața semifabricatului sunt îndepărtate prin efect preponderent termo-eroziv, asociat descărcărilor electrice într-un mediu dielectric. Descărcările electrice se amorsează succesiv și se localizează selectiv în diferite zone ale spațiului dintre electrod și semifabricat, numit **interstițiu**, în funcție de realizarea locală a condițiilor de formare a descărcării.

Acționînd discontinuu fiecare descărcare electrică constituie un **proces elementar de eroziune**, desfășurat într-un spațiu restrîns limitat de coloana descărcării și de petele electrodice, de contact cu stratul de material.

Transformarea energiei primare (electrică) în energie de efect (termică) se realizează la nivelul petelor electrodice și duce la formarea unui crater de eroziune (prelevare) pe suprafața de prelucrat a semifabricatului, respectiv a unui crater de eroziune (uzare) pe suprafața activă a electrodului [22, 23].

La nivelul industriei constructoare de mașini, în domeniul fabricației de scule, se utilizează două procedee de prelucrare dimensională prin eroziune electrică, diferențiate atît prin forma și dimensiunile electrodului, cît și prin cinematica generării suprafețelor [22].

Prelucrările prin electroeroziune sau bifurcat în două direcții distincte: cu prelucrare de material (prelucrare dimensională) și depunere de material (formare de depunere și îmbogățire cu elementele metalului).

Deci ne referim la prelucrarea dimensională o funcție, ea la rîndul ei se ramifică în **prelucrarea cu electrod masiv și prelucrarea cu electrod filiform**.

1.2. Efectele descărcării electrice în impuls

Efectul eroziv al descărcărilor electrice într-un mediu lichid a fost descoperit de fizicianul englez J. Priestley (1800).

Drumul spre aplicarea acestui proces la prelucrarea dimensională a materialelor metalice a fost deschis prin cercetările întreprinse de omul de știință rus A.V. Lazarenko (1942). Împreună cu cercetătorul rus I. Solotych au pus bazele teoriei eroziunii electrotermice, utilizată și astăzi pentru explicarea fenomenului de eroziune produs de descărcările electrice în impuls [1, 24].

Descărcările electrice în impuls sunt caracterizate prin transformarea concentrată, în timp și spațiu, a energiei electrice în energie termică, mecanică, chimică, acustică, luminoasă, etc., densitatea volumică de energie atingând valori maxime de $30\,000\text{ J/mm}^3$, iar densitatea de putere de aproximativ 300 kW/mm^3 .

Teoria eroziunii electrotermice are la bază următoarele ipoteze [12, 25]:

- interstițiul de lucru este considerat ca un element al circuitului electric catod – dielectric (canal ionizat) – anod, fiind asimilat cu o rezistență neliniară;
- plasma din canalul descărcării poate fi considerată izotermă;
- densitatea electronilor este constantă în interiorul canalului de descărcare, iar distribuția lor este maxwelliană;
- pe suprafața electrozilor se formează surse de căldură plane de scurtă durată.

Bilanțul puterilor medii din zona descărcării poate fi scrisă prin relația:

$$P_m = P_r + P_c, \quad (1.1)$$

în care: P_r – este puterea pierdută prin radiație;

P_c – puterea pierdută prin conductibilitate termică.

Considerînd densitatea electronilor constantă în interiorul canalului de descărcare, atunci puterea medie de descărcare are relația generală:

$$P_m = \frac{c\rho^3 E_T^2}{\sqrt{g_r} e \left(\frac{eV_i}{2hT_p} \right)}, \quad (1.2)$$

în care: g_r – masa gazului pe unitatea de lungime a canalului;

ρ – raza canalului de descărcare;

E_T – potențialul total de descărcare din canal;

e – sarcina electrică;

V_i – potențialul de ionizare;

T_p – temperatura plasmei în canal.

Puterea de radiație se poate determina cu relația lui Boltzman:

$$P_r = C g_r \frac{1}{e \left(\frac{V_{ex}}{kT_p} \right)}, \quad (1.3)$$

unde V_{ex} este nivelul mediu al potențialului de excitație.

Din cele două relații se obține expresia potențialului de descărcare în funcție de timpul de descărcare, sub forma:

$$E_T = C \frac{g_r \left(\frac{1}{4} + \frac{V_i}{4V_{ex}} \right)}{t \left(\frac{3}{4} \right)}. \quad (1.4)$$

Densitatea de curent din canalul de descărcare este dată de relația lui Sach:

$$j = \frac{C \sqrt{g_r} \rho^3 E_T}{e \left(\frac{eV_i}{2kT_p} \right)}. \quad (1.5)$$

Din relațiile prezentate rezultă următoarele:

- variațiile mici ale razei canalului ionizat conduc la variații mari ale densității de curent din canal;

- potențialul de descărcare (E_T) depinde de mărimea interstițiului.

Rezultă că energia totală a impulsului de descărcare din interstițiu se distribuie între anod – W_a , catod – W_c și canalul de descărcare – W_{CD} , astfel:

$$W_d = W_A + W_C + W_{CD}. \quad (1.6)$$

Anodul primește energie, în timpul descărcării, de la:

- electronii emiși de catod;
- radiația termică a canalului;
- bombardarea termică de către gazele rezultate în canal;
- jeturile de vapori metalici emiși de catod;
- prin efectul Joule – Lentz.

La un impuls de o anumită durată, energia transmisă de electroni anodului se poate calcula cu relația:

$$W_A = (U_A + \varphi) \int I(t) dt, \quad (1.7)$$

în care: U_A – căderea de tensiune pe anod;

φ – lucrul mecanic pentru emisia unui electron.

În aceleași condiții pot fi calculate și celelalte forme de energie care se transmit anodului, similar se poate calcula energia transmisă de ionii catodului.

Prin interpretarea rezultatelor obținute cu aceste relații se constată că valoarea curentului ionic reprezintă doar $0,2 \div 0,5$ din curentul total de descărcare și, din această cauză, eroziunea la catod este mult mai redusă decât la anod (rezultate confirmate experimental).

Efectele generale ale proceselor fizice care au loc în interstițiu sunt prezentate în figura 1.1.

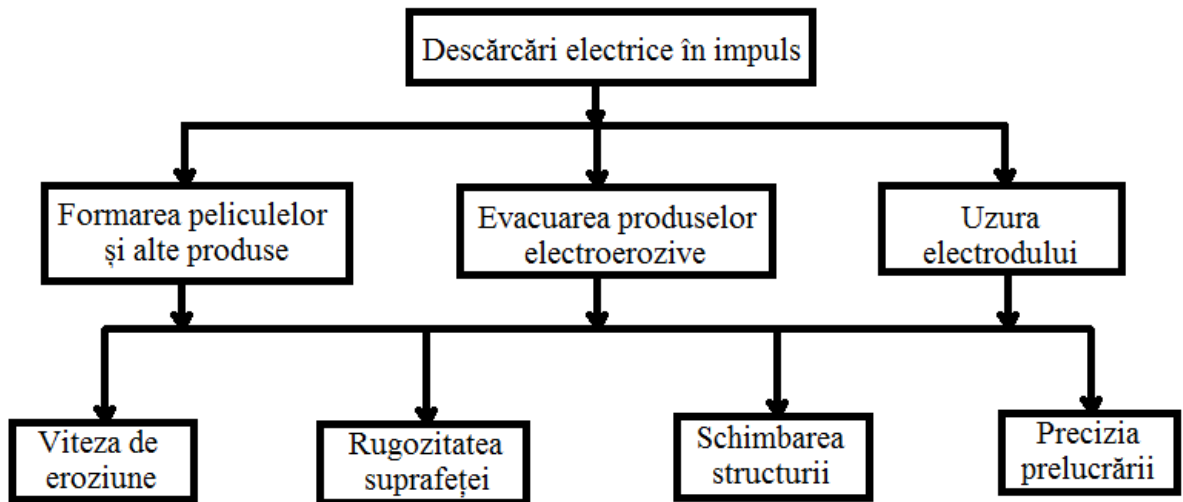


Fig. 1.1. Efectele proceselor fizice din interstițiu

Dintre acestea, principalele efecte ale descărcărilor electrice sunt:

- îndepărtarea (expulzarea) materialului de pe suprafața electrozilor;
- fenomene specifice în lichidul dielectric.

La sfârșitul unei perioade a impulsului de tensiune, în spațiul elementar de eroziune s-a format:

- crater de eroziune la electrodul-anod, numit **crater de prelevare**;
- crater de eroziune la electrodul-catod, numit **crater de uzare**;
- **deșeu tehnologic** format din mulțimea particulelor solide din interstițiu.

Rezistența la eroziune a electrozilor-scule se exprimă prin capacitatea materialului de a-și păstra integritatea la acțiunea erozivă a descărcărilor electrice, indiferent de factorii geometrici ai zonei de lucru.

Această caracteristică poate fi utilizată pentru a caracteriza nivelul de prelucrabilitate a materialului supus eroziunii și poate fi apreciată folosind **criteriul stabilității termice** a lui Palatnik:

$$P = \rho_M \lambda C (T_t - T_0)^2 \left(\frac{\tau^2}{\text{sm}^3} \right), \quad (1.8)$$

în care: ρ_M – densitatea materialului;

λ – conductivitatea termică;

C – căldura specifică;

T_t – temperatura de topire;

T_0 – temperatura mediului ambiant.

Valorile mari ale factorului P indică un material rezistent la eroziune electrotermică, iar valorile mici, caracterizează un material cu o bună prelucrabilitate prin eroziune.

În urma analizei principalelor efecte ale descărcărilor electrice în impuls rezultă că desfășurarea în condiții optime a procesului de eroziune electrică depinde de următorii factori și parametri: materialul electrodului-catod, materialul electrodului-anod, mediul de lucru, puterea electrică a descărcării electrice, perioada impulsului de tensiune, grosimea interstițiului de scînteiere.

Procesele microscopice de eroziune determină formarea, pe suprafața semifabricatului, a unei mulțimi de cratere de eroziune elementare, care, prin dimensiunile și numărul lor influențează viteza de eroziune a materialului și textura suprafeței prelucrate.

Volumul craterelor elementare de eroziune este direct influențat de energia descărcărilor electrice.

Adîncimea craterelor de eroziune este direct influențată de energia descărcărilor electrice și determină, la rândul ei, microgeometria asperităților de pe suprafața prelucrată (rugozitatea).

1.3. Stabilirea electrodului-sculă (ES) pentru prelucrarea dimensională

Numărul electrozilor-scule sau al treptelor de lucru, în cazul unui electrod unic, se stabilește în funcție de fazele de prelucrare necesare. În ceea ce privește materialul părții active a electrodului-sculă, acesta se va alege prin luarea în considerare a materialului semifabricatului, a formei, dimensiunilor și rugozității suprafeței de prelucrat, a schemei de prelucrare stabilite anterior, a procedeelelor de obținere a electrozilor, a costurilor acestora etc. Vom ține seama, însă și de unele recomandări, ca de exemplu: pentru obținerea de rugozități mici se recomandă folosirea aliajelor Cu – CuW, Cu – CuW – (Cu – grafit), că aliajul Cu – W asigură durabilități mai mari ale electrodului-sculă, că la prelucrarea carburii de wolfram se va prefera folosirea aliajelor Cu – W sau Cu – grafit, pentru degroșare și respectiv Cu – W, la finisare.

1.3.1. Stabilirea polarității electrodului-sculă

Electrozii din grafit pot fi conectați atât la polul pozitiv, cât și la cel negativ al generatorului de impulsuri; o polaritate pozitivă asigură o uzură mai redusă, o rugozitate mai bună a suprafeței și o productivitate acceptabilă. Conectarea la polul negativ permite o creștere a productivității și conduce la o uzură relativă cu valori de 15 ÷ 30 %.

În cazul cuprului sau aliajelor Cu – W, firma Charmilles recomandă [25] conectarea electrodului la polul pozitiv al generatorului de impulsuri.

1.3.2. Stabilirea parametrilor regimului de lucru

În unele cazuri, o dată cu stabilirea parametrilor regimului de lucru, pot fi abordate și elemente de proiectare a părții active aferente electrodului-sculă. Constatăm că recomandările existente în instrucțiunile de utilizare a diferitelor tipuri de echipamente destinate prelucrării prin electroeroziune prevăd luarea în considerare (la stabilirea parametrilor regimului de lucru) a caracteristicilor prelucrării, a naturii și rugozității suprafețelor de obținut, a densității maxime de curent admise de materialul electrodului-sculă, a unuia sau a mai multor criterii considerate importante (productivitate ridicată a prelucrării, uzură scăzută a electrodului-sculă, rugozitate prestabilită a suprafeței prelucrate, condiții bune de circulație a lichidului dielectric și de filtrare a acestuia etc.).

La prelucrarea de degroșare a semifabricatelor din oțel cu electrozi-scule din cupru, densitatea de curent nu va depăși 15 A/cm^2 (polaritate pozitivă), în timp ce în cazul electrozilor din grafit, densitatea de curent va fi de maxim 10 A/cm^2 , polaritate pozitivă, și de 6 A/cm^2 , polaritate negativă. Dacă se cunoaște aria A_{sf} a suprafeței semifabricatului expuse acțiunii descărcărilor electrice, intensitatea curentului va fi:

$$I = J \cdot A_{sf}, \quad [A], \quad (1.9)$$

unde J este densitatea de curent, în A/cm^2 .

Cunoscându-se valoarea intensității curentului electric și plecând de la criteriile considerate importante, devine posibilă stabilirea duratei impulsurilor, a pauzelor dintre impulsuri și eventual a altor caracteristici de regim, utilizându-se, în acest sens, recomandări ale firmei ce a construit mașina de prelucrat prin electroeroziune.

Mașinile de prelucrat prin electroeroziune cu sistem de comandă numerică au prevăzută o carte din documentația tehnică în care sunt reprezentate curbele de dependență pentru diferite cupluri (electrod-sculă – semifabricat) din care se poate stabili regimul de lucru necesar a fi introdus în programul de comandă pentru prelucrarea respectivă.

1.3.3. Dimensionarea electrodului-sculă

Procedeele de prelucrare prin eroziune, ajungând la un anumit stadiu de dezvoltare, s-au integrat firesc în procesele tehnologice de fabricare a pieselor.

Un exemplu reprezentativ de electrod-sculă pentru această dimensionare este cel din figura 1.2.

În timpul prelucrării prin procedeele considerate electrozii-sculă se uzează diferit: cel mai mult la prelucrarea abraziv-ultrasonoră și cel mai puțin (practic nu se uzează) la cea electrochimică. În cazurile în care electrozii-sculă se uzează repede (eroziune abraziv-ultrasonoră, electrică etc.) durabilitatea lor poate constitui o problemă chiar și la obținerea unei

singure suprafețe prelucrate. În consecință, figura 1.2 a fost astfel concepută, încât pe baza ei să se determine dimensiunile optime ale ES, atât din punct de vedere al preciziei prelucrării, cât și a durabilității electrodului-sculă.

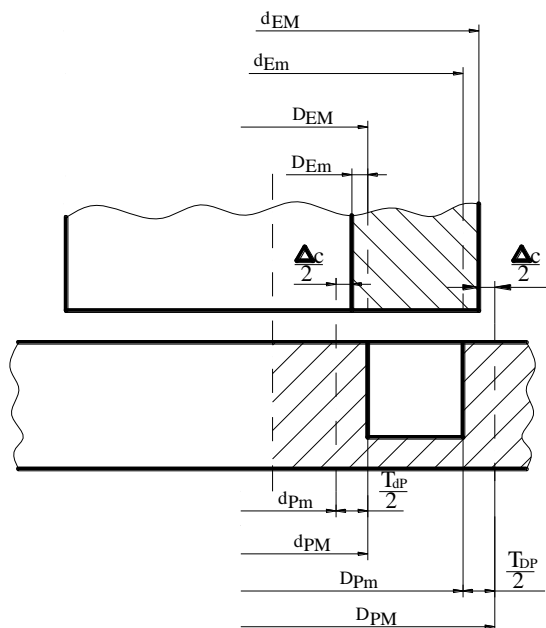


Fig. 1.2. Dependența dimensiunilor electrodului-sculă de cele ale suprafeței prelucrate

Pentru dimensionarea în discuție se cunosc dimensiunile suprafeței prelucrate și se determină dimensiunile corespunzătoare ale părții active a electrodului-sculă. Prin suprafață prelucrată se înțelege cea obținută la operația / faza pentru care se proiectează electrodul-sculă respectiv; această suprafață poate fi suprafața piesei sau o suprafață intermediară.

Determinarea acestor dimensiuni constă în:

- calcularea dimensiunilor părții active în secțiune transversală;
- stabilirea lungimii acestei părți.

Calcularea dimensiunilor părții active în secțiune transversală presupune:

- calcularea valorilor nominale ale acestor dimensiuni;
- stabilirea toleranțelor dimensiunilor respective.

Calcularea valorilor nominale ale dimensiunilor părții active a electrodului-sculă, în secțiune transversală, prin analogie cu reglarea sistemului tehnologic la dimensiune, se face diferit în cazul în care uzura electrodului-sculă nu are / are influență asupra preciziei suprafeței prelucrate.

Dacă electrodul-sculă nu se uzează în timpul prelucrării, ca în cazul eroziunii electrochimice, dimensiunile sale se calculează astfel:

- la exterior:

$$d_{EM} = D_{PM} - \frac{T_{DP}}{2} - D_c \quad [mm] \quad (1.10)$$

– la interior:

$$D_{Em} = d_{Pm} + \frac{T_{dP}}{2} + D_c \quad [mm] \quad (1.11)$$

Dacă electrodul-sculă se uzează în timpul prelucrării, ca în cazul eroziunii electrice, a celei abraziv - ultrasonore etc., dimensiunile optime ale lui se calculează cu relațiile:

– la exterior:

$$d_{EM} = D_{PM} - \Delta_c \quad [mm], \quad (1.12)$$

– la interior:

$$D_{Em} = d_{Pm} + \Delta_c \quad [mm], \quad (1.13)$$

unde Δ_c este reducerea / majorarea calculată a dimensiunii electrodului-sculă față de dimensiunea corespunzătoare a suprafeței prelucrate.

Toleranțele dimensiunilor nominale calculate se stabilesc în funcție de toleranțele corespunzătoare ale dimensiunilor suprafețelor prelucrate cu electrozii respectivi; de exemplu, considerînd că suprafața prelucrată din figura 1.2 se obține prin finisare, toleranța dimensiunii d_{Ef} a electrodului-sculă se determină cu relația:

$$T_{dEf} \leq \frac{T_{DPf}}{2} \quad (1.14)$$

Considerînd că o suprafață componentă a unei piese (un alezaj, de exemplu) se obține prin mai multe operații / faze (de exemplu, prin degroșare finisare și netezire), rezultă că:

$$T_{dEd} > T_{dEf} > T_{dEn} \quad (1.15)$$

Relația (1.14) este valabilă pentru suprafața respectivă a electrodului-sculă dacă această suprafață respectă condițiile, următoare: abaterile de la formă și de la pozițiile ei să se încadreze în toleranța dimensională a suprafeței respective; rugozitatea suprafeței în discuție și toleranța ei dimensională să respecte legătura standardizată dintre ele.

Dacă suprafața frontală a părții active a electrodului-sculă este profilată / complexă, stabilirea formei și dimensiunilor acestei suprafețe se va face, în funcție de forma și dimensiunile suprafeței prelucrate, pe baza celor prezentate anterior.

Stabilirea lungimii părții active a electrodului-sculă depinde de mai mulți factori, dintre care:

- forma și dimensiunile suprafeței prelucrate;
- forma constructivă a părții în discuție a electrodului-sculă;
- materialul electrodului-sculă.

Privind factorii arătați există cazurile reprezentative următoare:

– suprafața prelucrată nu străpunge obiectul prelucrării, când lungimea părții active a electrodului-sculă se adoptă în funcție de adâncimea arătată, indiferent de forma constructivă și de materialul electrodului-sculă;

– suprafața prelucrată străpunge obiectul prelucrării, când lungimea arătată se adoptă după normative, în funcție de forma constructivă a electrodului-sculă și de materialul acestuia.

La determinarea dimensiunii / dimensiunilor transversale ale părții active a electrozilor – sculă cu relațiile (1.10) ... (1.13), principalul aspect specific constă în stabilirea mărimii reducerii / majorării de dimensiune Δ_c .

Mărimea reducerii / majorării de dimensiune Δ_c depinde de mai mulți factori, în primul rând de procedeul de prelucrare.

La prelucrarea prin **eroziune electrică** mărimea reducerii / majorării de dimensiune Δ_c depinde de condițiile prelucrării, în primul rând de felul acesteia (degroșare, finisare sau netezire).

Considerînd că precizia sistemului tehnologic adoptat pentru obținerea unei suprafețe prelucrate corespunde preciziei suprafeței respective și că suprafața se obține prin degroșare, finisare și netezire, mărimea reducerii / majorării de dimensiune se calculează cu relațiile:

– la netezire:

$$\Delta_c = 2 \cdot I_l \quad [mm], \quad (1.16)$$

– la degroșare și finisare:

$$\Delta_c = \Delta_m \pm A_t \quad [mm], \quad (1.17)$$

unde: I_l – mărimea interstițiului lateral, mm;

Δ_m - mărimea minimă a reducerii / majorării de dimensiune, mm;

A_t – mărimea adaosului pentru dilatarea termică a electrodului-sculă / obiectul prelucrării, mm.

Mărimea minimă a reducerii / majorării de dimensiune se calculează cu relația:

$$\Delta_m = 2 \cdot (I_l + R_z), \quad (1.18)$$

unde R_z – este rugozitatea maximă a suprafeței prelucrate.

La prelucrarea prin **eroziune abraziv-ultrasonoră** cu suspensie abrazivă, mărimea reducerii / majorării de dimensiune în discuție se calculează cu relația:

$$\Delta_c = k \cdot d_M \quad [mm], \quad (1.19)$$

unde: k este un coeficient;

d_M – dimensiunea maximă a particulelor abrazive ale suspensiei folosite la prelucrare.

Mărimea coeficientului k depinde de felul circulației suspensiei abrazive în spațiul de lucru (liber sau forțat) și se ia din literatura de specialitate ($k \geq 2$) [23].

Mărimea particulelor abrazive depinde de felul prelucrării (degroșare, finisare sau netezire) și dimensiunea lor maximă se ia din STAS; orientativ, pulberile abrazive cu granulația minimă (3) au $d_M = 40 \mu m$, iar cele cu granulație maximă (12) au $d_M = 120 \mu m$.

1.4. Materiale și tehnologii de obținere a electrozilor pentru prelucrarea prin electroeroziune

Un factor esențial care influențează procesul de prelucrare dimensională prin electroeroziune este *tipul de material folosit pentru obiectul de transfer precum și procedeul de confecționare a acestui electrod* [23].

La prelucrarea prin eroziune electrică pot fi utilizați în mod practic ES din orice material bun conductor de electricitate sau semiconductor și cu o conductivitate termică bună.

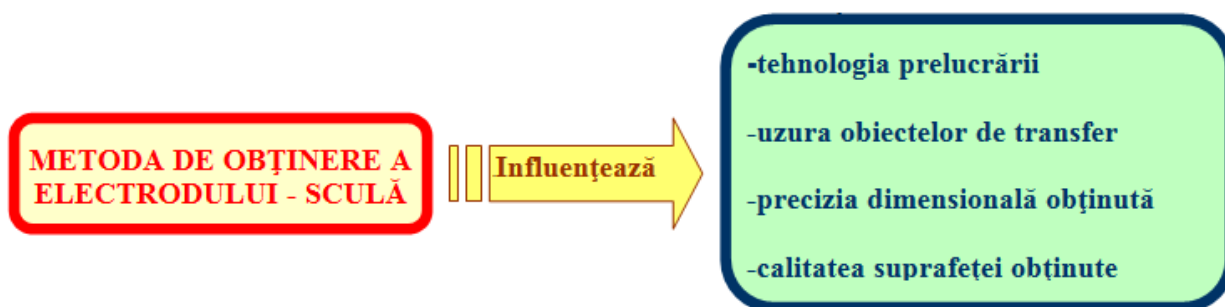


Fig. 1.3. Metoda de obținere a electrodului-sculă

Pe considerentul condițiilor specifice de muncă, în procesele de eroziune apar probleme complexe rezultate din proprietățile fizice și mecanice ale materialului, din care este executat obiectul de transfer. Cele mai frecvente proprietăți luate în considerare sunt: proprietățile fizice și mecanice.

Pînă în prezent, materialul cel mai frecvent folosit în lume pentru a se confecționa obiecte de transfer este cuprul electrolitic, pe considerentul accesibilității lui, ușurinței de prelucrare precum și costului acceptabil [26].

Electrozii din cupru se caracterizează totuși printr-o „mare” uzură volumică, ceea ce atrage după sine o precizie mică de prelucrare. În prezent un mare accent în producția de electrozi s-a pus pe elaborarea unor materiale compozite policomponente care asigură un mare randament de prelucrare precum și o uzură mică a electrodului. Aceste materiale sunt produse după metoda metalurgiei pulberilor.

Materialele compozite de bază sunt: metalice (cuprul și aliajele sale, aluminiul și aliajele sale, oțelul, fonta, aliaje pe bază de zinc, aliaje pe bază de staniu, wolfram, molibden, pulberi metalice sinterizate, carburi metalice), nemetalice (grafitul) și combinații metalice și nemetalice (pulberi din grafit și pulberi din cupru).

ES confecționați din diferite materiale se recomandă a fi utilizate cum urmează: cei din cupru – prelucrării dimensionale de degroșare, alamă – prelucrării de finisare, din Al – la prelucrarea pieselor din oțel, Wolfram – la prelucrarea găurilor și fontelor și cei confecționați din grafit la prelucrări de degroșare și finisare.

În ultimul timp s-a constatat faptul că electrozii din grafit sunt tot mai des utilizați.

Utilizarea ES executați din grafit și cupru prezintă un șir de avantaje: insensibilitatea la șocuri termice, păstrează proprietățile mecanice la temperaturi ridicate, deformațiile în timpul prelucrării sunt foarte mici, greutatea electrozilor-sculă este mică, posibilitatea fixării în dispozitive interschimbabile pentru prelucrare și exploatare, posibilitatea obținerii unor electrozi cu profile complexe și grosimi foarte mici, ușor de prelucrat, cost scăzut.

Electrozii din grafit și cupru prezintă avantaje destul de evidente față de restul materialelor în ceea ce privește exploatarea lor. Datorită acestui fapt cele mai utilizate materiale pentru confecționarea electrozilor în vederea prelucrării prin eroziune electrică sunt cuprul și grafitul.

1.8. Metode de proiectare a electrozilor-sculă pentru prelucrarea dimensională

Calculul poate fi îndeplinit prin metoda analitică și grafoanalitică [24, 25].

Calculul analitic al electrozului – sculă. Profilul, geometria și dimensiunea unei părți de lucru a electrozului – sculă reprezintă cele trei grupe de factori importanți care trebuie asigurați în procesul proiectării. Dimensiunile sculei vor fi o copie a piesei numai de dimensiuni mai mici. În caz general dimensiunile nominale ale electrozului – sculă, într-o secțiune transversală se determină cu relația:

$$B = A \pm 2(\delta + Z_{\min}), \quad (1.20)$$

în care A este dimensiunea prescrisă a elementelor piesei pe desen;

δ – mărimea interstițiului (MI);

Z_{\min} – adaosul de prelucrare minim obținut la prelucrarea anterioară.

Semnul „plus” se ea la prelucrarea suprafețelor exterioare, iar semnul „minus” – pentru obținerea profilelor interioare.

Suma $(\delta + Z_{\min})$ reprezintă creșterea dimensiunilor corecției electrozului – sculă, în care:

$$Z_{\min} = R_{\max} + H, \quad (1.21)$$

unde: R_{\max} este rugozitatea înaltă a prelucrării suprafeței;

H – zona de influență termică.

Lungimea l (mm) a prelucrării unei părți a electrodului – sculă se determină cu relația:

$$l = h + \frac{v_{fl}}{100} h, \quad (1.22)$$

în care h este grosimea piesei brute;

v_{fl} – viteza uzurii liniare a electrodului – sculă, %.

Pentru determinarea mărimii B trebuie de știut valorile pentru δ și Z_{\min} .

În tabelele 19 și 21 [21] sunt prezentate reducerile la valorile dimensiunilor și formei părților de lucru a electrodului – sculă.

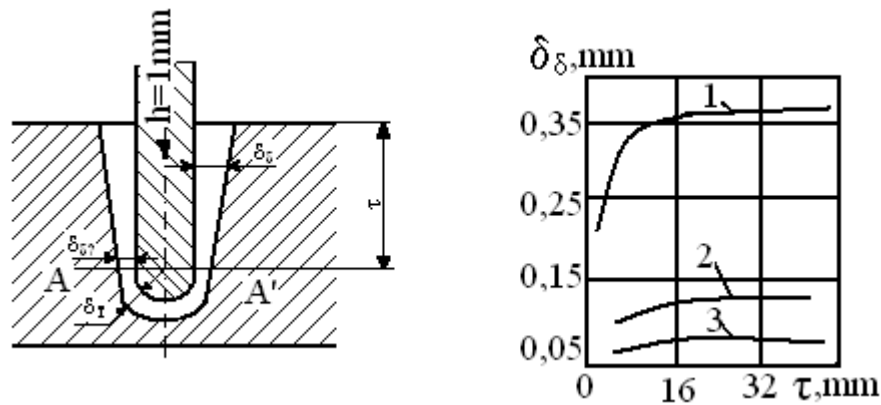


Fig. 1.4. Tipurile MI de SEE orificii:

A – A' – începutul direcției verticale de evacuare a lichidului; δ_{σ} - începutul jocului lateral; $h=1\text{mm}$ de la A – A'; δ_T - secțiunea capetelor interstițiului; l – lungimea verticală a distanței de evacuare a lichidului; δ_{σ} - jocul lateral.

Calculul analitic al volumului electrodului – sculă și alcătuirea valorii corecției acestuia poate fi îndeplinită după trei modele de interpolare.

Calculul grafoanalitic a electrodului sculă. Acest calcul se execută în felul următor:

- desenăm cele necesare în proiecție și profilul în scara de lucru în adâncitură (orificiu);
- după tabelul 25 [22] experimental sau calculat și determinăm δ_T și δ_{σ} ;
- după normala la suprafața prelucrată adâncirii (orificiu) se depune dimensiunile jocului δ_T și δ_{σ} ;
- se construiește linia variației formei capetelor electrodului – sculă, pînă la suprafața laterală a sectorului de suprafață; orice punct de variație a jocului și poate fi calculată cu relația:

$$\delta_i = (\delta_\sigma - \delta_T) \frac{l_i}{l_k}, \quad (1.23)$$

unde: l_i este distanța de la suprafața frontală pînă la punctul de calculat al profilului adînciturii;
 l_k – lungimea conturului adînciturii semifabricatului.

Alegerea electrodului – sculă la REE. Diametrul discului se alege din calculul necesar aprovizionării vitezei de șlefuire a discului, care se află la limita $v = 40 \div 50 \frac{m}{s}$. Diametrul discului d_{ES} se calculează după formula $d_{ES} = \frac{v_0}{\pi n_0}$,

unde n_0 este frecvența de rotația a axului principal a mașinii unelte.

Alegerea electrodului – sculă la prelucrarea electroerozivă de debitare. Diametrul discului electrodului – sculă se determină ca și diametrul REE. Grosimea discului se află în limitele de la 1,5 pînă la 50mm.

Alegerea conductorului pentru electrodul – sculă. De la DEE pe lîngă alegerea electrodului – sculă și regimul electric de lucru a generatorului necesită determinarea materialului și diametrul, și chiar efortul tensiunii și viteza de bobinare a firelor electrodului – sculă. În tabelul 26 [22] informații recomandate pentru alegerea acestor parametri ce asigură rugozitatea suprafeței prelucrate $R_a \leq 3,5 \mu m$.

Alegerea electrodului – sculă pentru durificarea electroeroziunii materialului. Materialul electrodului – sculă se alege, reeșind din proprietățile durificării suprafeței, forma și dimensiunile ce se observă comoditatea de alimentare a electrodului – sculă la prelucrarea semifabricatului și construcția diferită a lui.

Calculul de uzură a electrodului – sculă. Transformarea în procesul prelucrării electroeroziunii dimensiunile geometrice a electrodului-sculă cu scăderea preciziei de prelucrare a electroeroziunii. Uzura v a electrodului – sculă depinde de materialul electrodului-sculă, de formă și W_U , ca și viteza de pompare și gradul de poluare și a presiunii de lucru.

Gradul uzurii se evaluează ca raportul volumic de uzură și se determină cu relația, ca uzură volumică relativă:

$$v_{o\sigma} = \left(\frac{V_{ES}}{V_{m\sigma}} \right) 100\% . \quad (1.24)$$

La străpungerea prin EE a orificiilor este mai comod a folosi valoarea absolută a uzurii liniare:

$$v_{o.l} = \left(\frac{\Delta l_{ES}}{l_{a.p.o}} \right) 100\% , \quad (1.25)$$

unde: V_{ES} este volumul electrodului – sculă;

$V_{m.i.s}$ – volumul metalului înlăturat din semifabricat;

Δl_{ES} – transformarea dimensiunilor liniare a electrodului – sculă în procesul de lucru;

$l_{a.p.o}$ – adâncitura de perforare a orificiului.

Uzura electrodului – sculă din cupru crește la mărirea vitezei de pompare a lichidului de lucru, iar cea a electrodului – sculă din grafit – scade.

1.9.Procedee de prelucrare superficială cu aplicarea DEI (descărcărilor electrice în impuls)

1.9.1. Durificarea prin descărcări electrice în impuls

Realizarea acoperirii muchiilor active a matrițelor sau sculelor cu depuneri de materiale dure conduce la majorări semnificative ale duratei de folosire a lor, cât și la îmbunătățirea calității prelucrării în sine. Experiența mondială, materializată în acest scop de producătorii consacrați de instalații pentru durificare cu metale dure (KARBIDUR - Elveția, TUKADUR - Germania, ELFA - Bulgaria, ELITRON - Moldova) stau mărturie rezultatele lor spectaculoase pe care le oferă metoda.

1.9.2. Funcția procedului de lucru

Principiul metodei de durificare prin descărcări electrice în impuls (DEI) este deosebit de accesibil, în esență bazându-se pe efectul de eroziune de natură electrică, în urma căruia apare un transfer controlat de material dinspre electrodul-sculă (ES) înspre electrodul piesă (EP) (fig. 1.5).

Astfel, sub influența unui câmp electric datorat unui generator de impulsuri comandate se creează posibilitatea apariției descărcărilor sub formă de microcanale de plasmă. În interstițiul de lucru a $ES-EP$ se va produce transferul materialului dur de aport spre suprafața piesei de durificat.

Deplasarea electrodului-sculă pe suprafața piesei va urma traiectoria conturului durificat, asigurându-se respectarea unui interstițiu de lucru necesar desfășurării optime a procesului de formare a canalelor de plasmă, cauzate de energia impulsurilor produse de descărcările electrice dintre electrodul –sculă și electrodul – piesă. Calitatea depunerii depinde esențial de menținerea unei distanțe constante și permanent controlate între electrodul –sculă și electrodul – piesă.

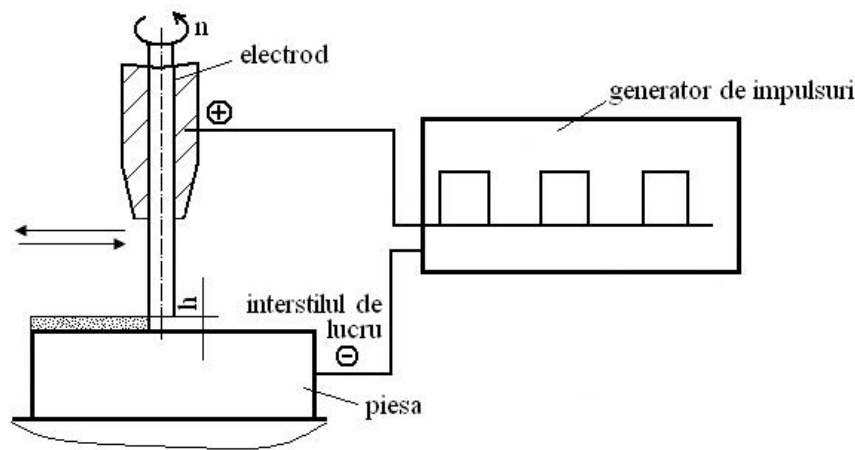


Fig.1.5. Schema de lucru la durificarea cu descărcări electrice în impuls [29]

Caracteristica acestei metode este faptul că la formarea acoperirilor nu apar schimbări liniare sau de volum ale materialului supus durificării. Pentru a se putea realiza durificarea prin descărcări electrice în impuls, trebuie îndeplinite următoarele condiții:

- conductibilitatea înaltă a piesei ce se prelucrează, cu cât conductibilitatea este mai mare cu atât sunt mai mici pierderile de energie electrică;
- înainte de durificare scula trebuie supusă prelucrării termice standard;
- scula (placa sau poansonul) să nu prezinte neuniformități sau defecte;
- suprafețele supuse durificării trebuie să fie degresate cu benzină sau alcool tehnic pur.

Dacă suprafețele au acoperiri de protecție sau sunt acoperite cu rugină, trebuie să se curețe mai întâi cu foaie abrazivă.

Prelucrarea se poate realiza atât cu partea frontală a electrodului cât și cu partea cilindrică. În primul caz electrodul se poziționează perpendicular pe suprafața prelucrată, iar în al doilea caz se poziționează paralel cu suprafața de durificat (fig.1.6).

Durificarea prin descărcări electrice în impuls se poate realiza:

- în regim de contact electric;
- în regim de subexcitare (fără contact).

De asemenea durificarea se poate realiza:

- manual cu ajutorul unui pistol vibrator;
- automat cu ajutorul mașinilor de durificat.

La durificarea manuală pistolul vibrator se plimbă pe suprafața ce urmează să se durifice, cu o ușoară apăsare, realizându-se depunerea pe suprafața respectivă. Datorită depunerii manuale apar o serie de inconveniente cum ar fi:

- duritatea insuficientă a acoperirii;

- grosimea neegală a acoperirii;
- dependența acoperirii de calificarea și starea operatorului.

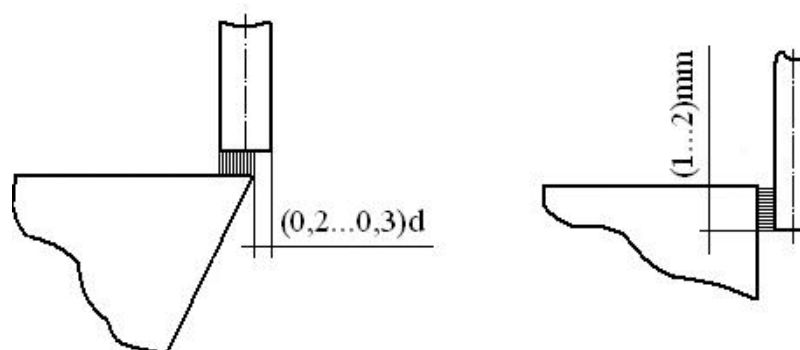


Fig.1.6. Poziționarea electrodului [29]

Aceste neajunsuri sunt înlăturate de mașinile de durificat. Caracteristic depunerile cu aceste mașini este faptul că electrodul se rotește (400-4000) rot/min îmbunătățindu-se astfel simțitor calitatea acoperirii datorită eroziunii uniforme pe suprafața electrodului. Interstițiul de lucru este menținut de un sistem electronic, asigurându-se evitarea apariției scurtcircuitului între electrozi, precum și mărirea productivității procesului. Mașina este dotată cu lanțuri cinematice pentru deplasarea electrodului pe cele trei direcții, asigurându-se astfel o viteză de lucru constantă. La durificarea sculelor și a elementelor active ale ștanțelor și matrițelor cu mașina, trebuie să se respecte următoarea succesiune tehnologică:

- se determină suprafața care trebuie durificată;
- se determină tipul electrodului de prelucrat;
- suprafața supusă durificării se curăță și se degresează;
- se alege dispozitivul adecvat;
- se determină regimul de durificare și se reglează mașina pentru acest regim;
- se execută durificarea și se face un control vizual al calității stratului depus (cu lupa sau la microscop).

La durificare există posibilitatea ca stratul depus să nu corespundă din punct de vedere al calității, datorită următoarelor cauze:

- duritate necorespunzătoare a piesei supusă durificării;
- existența porțiunilor cu defecte pe suprafața supusă durificării;
- alegerea incorectă a regimului de prelucrare;
- suprafața de durificat murdară (substanțe organice, oxizi, acoperiri de protecție);
- alegerea incorectă a materialului electrodului;

– trasarea imprecisă a muchiei așchietoare cu electrodul, rezultând o densitate mică a acoperirii sau teșirea muchiei așchietoare.

1.6.3. Stabilirea tipului de electrozi

Proprietățile și parametrii calitativi ai depunerii depind în mare măsură de compoziția, structura și geometria electrodului folosit. La aplicarea acoperirilor rezistente la uzură ca materiale pentru electrozi se folosesc aliaje dure mono și bicarbide (VK6M, VK20 respectiv T5K10, T15K6 etc.). Este posibilă, de asemenea, aplicarea unor aliaje dure nestandardizate [8].

Electrozii se execută sub forma unor baghete cilindrice, cel mai des folosindu-se electrozi cu diametrul de 0,8-1 mm, dar putându-se utiliza și electrozi de 0,5...2 mm. Diametrul electrodului se alege în funcție de diametrul craterelor care apar la descărcarea electrică între electrod și piesă. La aplicarea unor electrozi cu diametre mai mari de 1,5 mm se înrăutățește densitatea acoperirii. Cel mai utilizat material pentru electrozi este VK20 indiferent de sculele supuse durificării. Pentru sculele așchietoare se mai pot folosi și electrozi din VK6M sau T15K6. Pe lângă aceste tipuri de electrozi se mai pot utiliza așa electrozi ca cupru, argint, wolfram, nichel, grafit etc. Necătfind la faptul, că sunt menționate un șir de materiale și respectiv diametre și forme ale E-S, nu se stabilește modul de proiectare a acestuia.

1.6.4. Parametrii regimului de lucru la durificarea prin descărcări electrice în impuls

Realizarea unei depuneri corespunzătoare din punct de vedere calitativ trebuie să țină cont de parametrii de regim care intervin în mod direct în procesul de durificare [8]:

a) parametrii electrici:

- capacitatea bateriei de condensatoare C (F);
- intensitatea curentului de lucru I (A);

b) parametrii temporali:

- durata impulsului τ (s);

c) parametrii tehnologici;

- turația electrodului n (rot/min);
- viteza de deplasare v (mm/rot);
- dimensionarea electrodului-sculă.

După caz, se pot adopta regimuri mai moderate pentru scule de finisare, în vederea obținerii unei rugozități mici și regimuri mai intense pentru sculele de degroșare la care rugozitatea nu este foarte importantă.

La alegerea regimului de lucru se ține cont și de următoarele momente:

- cu mărirea turației electrodului crește cantitatea de material depus;
- creșterea curentului și a tensiunii duc la mărirea grosimii;
- mărirea frecvenței impulsurilor determină creșterea cantității de material transferat la catod.

1.7. Electrozi-sculă utilizați la alierea superficială prin electroeroziune

Tipurile de electrozi-sculă utilizate la alierea prin electroeroziune. Pentru conducerea stabilă a procesului de aliere cu scînteie electrică este necesară contactarea periodică a electrodului cu piesa, aceasta se realizează utilizînd mecanisme speciale. La ele se referă oscilatorul de vibrații și corpurile rotative cu mulți electrozi [21].

La alierea cu oscilator de vibrații lovirea electrodului de piesă produce depunerea materialului detașat de descărcarea prin scînteie electrică de la anod la catod, ceea ce contribuie la îmbunătățirea parametrilor tehnologici ai învelișului. Alierea cu capete rotative crează „întinderea” materialului transportat pe suprafața piesei, ceea ce contribuie la îmbunătățirea purificării stratului aplicat.

În procesul dezvoltării tehnicii de vibrație a fost creată o mare diversitate de excitatori de vibrație, care pot fi clasificați după următoarele criterii:

- după numărul maselor ce oscilează;
- după numărul coordonatelor ce oscilează (de la una pînă la șase coordonate);
- după caracterul structurii interne (ce se exprimă prin ecuație diferențială, liniară și neliniară);
- după libertatea deplasării de-a lungul coordonatelor ce variază – fără lovituri și cu lovituri de vibrații;
- după principiul de excitări – cinematice, dinamice, parametrice, autooscilatoare;
- după caracterul forței de excitație, după semnul forței de excitație – cu semne ce alternează și cu semn constant;
- după forma forței de excitație sinusoidale, cu impulsuri, alte periodici;
- după metoda creării rezistenței elastice (remanente) – cu elemente mecanice elastice (arcuri, resorturi, arcuri de torsiune), cu sisteme remanente pneumatice, electrodinamice, magnetostatice și cu sisteme neremanente (alternează numai semnul);
- după metoda creării forței de excitație – mecanice, electromagnetice, pneumatice, hidraulice, inerțiale, electrodinamice, magnetodinamice, magnetostrictive, piezoelectrice ș.a.

Ultimele două criterii de clasificare determină diversitatea excitantă a construcțiilor excitatorilor de vibrație.

Pentru alegerea celor mai acceptabile construcții ale excitatorilor de vibrații pentru alierea cu scînteie, să cercetăm particularitățile de lucru ale lor la aliere și prescripțiile impuse pentru procesul dat.

Cei mai importanți indici tehnologici ai instalațiilor alierii cu scînteie sunt: puritatea depunerii aplicate la aliere și productivitatea procesului.

Astfel la o frecvență constantă a impulsurilor de eroziune, unei productivități mai înalte a instalației îi corespunde o suprafață mai brută. Putem împiedica acest lucru dacă odată cu micșorarea energiei impulsurilor vom spori frecvența lor. Cercetările au arătat că în mare măsură productivitatea instalației crește proporțional cu frecvența impulsurilor de eroziune, iar puritatea prelucrării suprafeței rămînînd neschimbată. Pentru realizarea acestor condiții este necesar un excitator de vibrație de frecvență înaltă. Însă funcționarea instalației la o frecvență sporită, mai ales la o energie mare a impulsurilor, poate duce la supraîncălzirea electrodului și înrăutățirea calității stratului aliat, deaceia pentru fiecare regim electric trebuie să-i corespundă o frecvență a vibrațiilor bine determinată. Astfel diapazonul de frecvențe al instalațiilor trebuie să fie între 20 și 1000Hz și mai mult, dar deoarece reacordarea excitatorului de vibrație la schimbarea regimurilor electrice și deci la schimbarea frecvenței de vibrație, poate condiționa incomodități operatorului și să complice construcția excitatorului de vibrație.

De asemenea excitatoarele de vibrații trebuie să fie universale, nu prea scumpe și rezistente, adică să aibă aceeași capacitate de abatere la alierea manuală și automatizată.

Excitatorul de vibrații care corespunde cel mai mult cerințelor în diapazonul de frecvențe de pînă la 1000Hz este excitatorul de vibrații electromagnetic, de aceea el se utilizează pe larg în instalațiile pentru alierea cu scînteii.

În diapazonul 1000-5000Hz un excitator de vibrații cu perspectivă poate fi cel electrodinamic, în diapazonul ultrasunetelor și cel magneto.

De asemenea se cunoaște și folosirea la aliere a altor tipuri de excitatoare cu vibrații, în particular mecanice dar din cauza unor neajunsuri ale lor ele n-au primit utilizare largă.

1.8. Electrozi-scule aplicați la formarea depunerilor

Printre variantele existente de formare a straturilor de depunere din pulberi cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls pot fi evidențiate două grupe: cu rupere de contact, la care pulberea este liber turnată pe suprafața de prelucrat [27] sau cu rupere de contact la care pulberea este alipită prealabil de suprafața prelucrată și apoi prin contactările periodice a electrodului-sculă și dezvoltarea descărcărilor electrice în impuls este topită și depusă pe suprafața piesei cu formarea stratului depunerii [15]. Cea de-a doua variantă presupune utilizarea pulberilor fine și

prezența unui liant care influențează compoziția chimică și proprietățile stratului format. La realizarea primei variante materialul pulberii este consumat neeconom.

Autorii lucrării [28] au propus un procedeu de formare a depunerilor din pulberi cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls cu rupere de contact esența căruia constă [28] în aceea, că materialul pulverulent se introduce între electrozi în zona de acțiune a descărcărilor în momentul deplasării electrodului-sculă (anod) în jos spre suprafața piesei-catod (fig. 1.7). Acesta se realizează ușor cu instalațiile industriale de tipul EFI și Elitron, port sculele cărora sunt dotate cu dispozitive speciale de alimentare a interstițiului cu pulberi.

Deoarece procesul de formare a depunerilor și calitatea acestora sunt funcție de precizia de dozare a pulberii și introducerea continuă sau sacadată a acesteea în interstițiu vom analiza câteva scheme tehnologice de realizare a acestui procedeu. În unul din cazuri, materialul pulberii se introduce în zona de prelucrare prin electrozi tubulari (schema axială de introducere) (fig. 1.8) aceasta permite o prelucrare mai completă a pulberii, deoarece ieșirea pulberii din electrodul-sculă totdeauna are loc în zona de acțiune a canalului de plasmă al descărcării electrice în impuls.

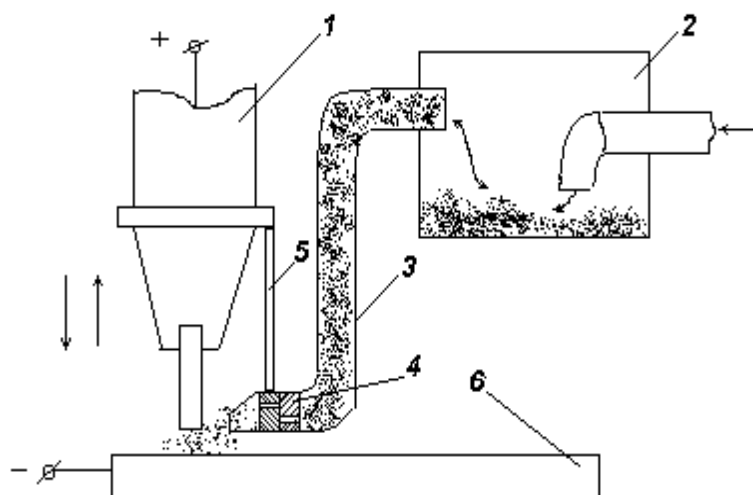


Fig. 1.7. Dispozitiv pentru formarea depunerilor cu rupere de contact din pulberi cu introducerea dozată a acesteea în interstițiu în perioadele de apropiere a electrozilor: vibrator (1); alimentator cu pulbere (2); tub de racordare (3); clapetă (4); pîrghie (5); piesă de prelucrat (6)

Cercetările experimentale au demonstrat, că această schemă de introducere a pulberii în interstițiu este mai eficientă la formarea depunerilor pe suprafețe plane. Necătfînd la simplitatea realizării acestui procedeu el necesită fabricarea electrozilor-scule tubulari executați din același material cum și cel de fabricare al pulberii pentru a evita influența materialului acestuia asupra compoziției și proprietăților depunerilor formate.

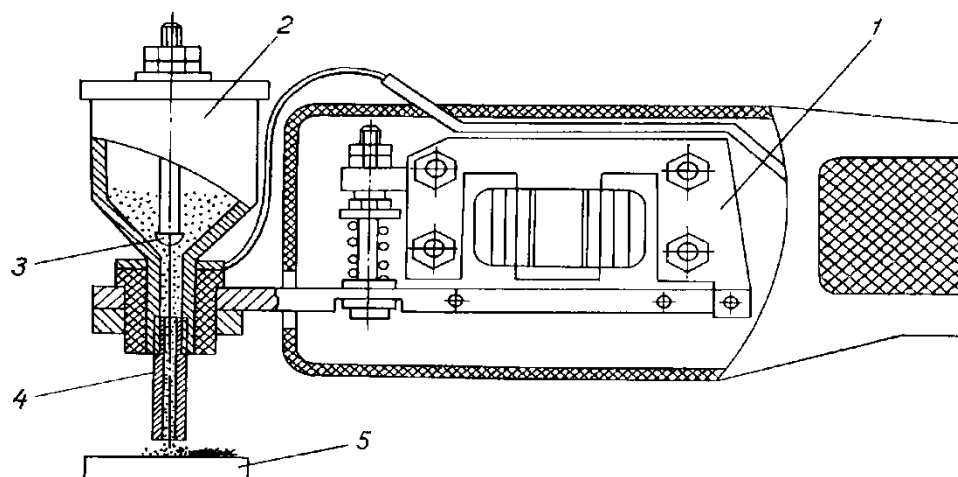


Fig. 1.8. Dispozitiv pentru formarea depunerilor din pulberi cu introducerea dozată a materialului dispers prin electrodul tubular: vibrator (1); alimentator cu pulberi (2); element de dozare (3); electrod (4); piesă de prelucrat (5).

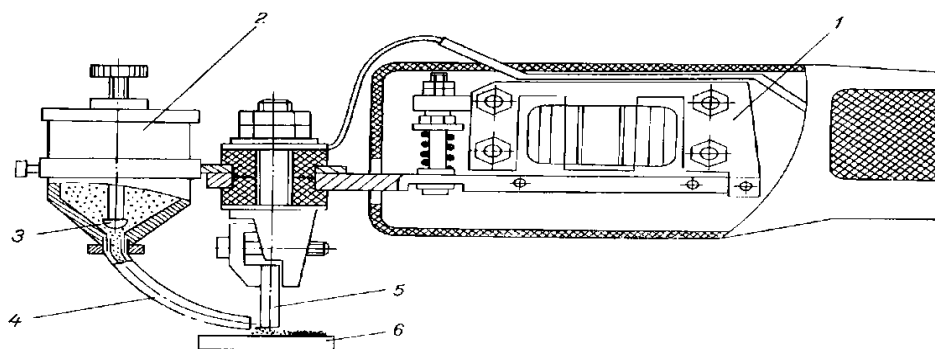


Fig. 1.9. Schema introducerii frontale a materialului dispers: 1) vibrator; 2) alimentator de pulberi; 3) element de dozare; 4) niplu; 5) electrod; 6) piesa de prelucrat

Un caz aparte îl prezintă, schema de introducere a pulberii în interstițiu prin partea laterală sau prin partea frontală a electrodului-sculă (fig. 1.9) creînd astfel posibilitatea ca la contactarea electrozilor și amorasarea descărcării electrice în impuls, canalul de plasmă al acesteea să atace suprafața de prelucrat a piesei, deja acoperită cu pulberi.

Aceste scheme de introducere a pulberii în interstițiu sunt mai tehnologice și permit aplicarea depunerilor și pe suprafețele pieselor cilindrice (fig. 1.10). Ultima schemă de realizare a procedului permite mecanizarea procesului de formare a depunerii și îi asigură stratului format continuitate deplină și uniformitate după grosime. În scopul realizării celor menționate mai sus dozatorul cu pulbere este instalat în așa mod, ca getul de pulberi să pătrundă în interstițiu tangențial la suprafața piesei de prelucrat. Particulele de pulberi, nimerind în interstițiu, sub acțiunea schimbului de căldură cu plasma descărcărilor electrice în impuls și căldurii Joule-Lentz

degajate pe rezistența activă a acestora la parcurgerea lor de către curentul descărcărilor electrice în impuls se topesc. Sub acțiunea forțelor electrodinamice sunt transferate pe suprafața de prelucrat a piesei și interacționând cu faza lichidă a materialului acestea formează stratul de depunere.

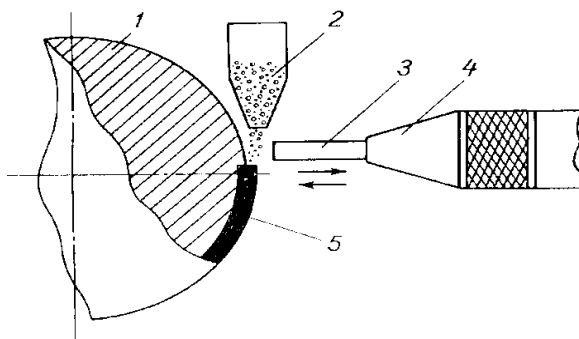


Fig. 1.10. Schema formării depunerii pe suprafețele de rotație a pieselor cilindrice:

1) piesă (catod); 2) alimentator cu pulbere; 3) anod; 4) vibrator; 5) strat aliat

Schemele tehnologice prezentate mai sus permit realizarea dozării relativ fine și introducerii pulberii în interstițiu însă, pentru fiecare caz aparte (regim de formare a depunerii și material al piesei de prelucrat) debitul pulberii din dozator se determină în mod experimental reeșind din condiția de prelucrare și cea de utilizare maximă a pulberii [35, 36].

Comparând rezultatele obținute la formarea depunerilor din materiale compacte cu cel al formării straturilor cu aplicarea pulberilor pot fi puse în evidență un șir de avantaje ale ultimului.

De exemplu, acesta asigură formarea depunerilor pe suprafețele pieselor executate din materiale ușor fuzibile cum ar fi aluminiul și magneziul, din motivul redistribuirii energiei degajate în interstițiu între canalul de plasmă, suprafețele electrozilor și particulele de pulberi. Acest efect condiționează micșorarea energiei de activare a suprafeței prelucrate ce condiționează eroziunea mai mică a acesteea.

Pe de altă parte, considerabil se ușurează formarea depunerilor (cu grosimea de 0,2...0,3 mm) din pulberi executați din materiale ușor fuzibile (cositor, plumb, cadmiu, stibiu ș.a.) pe suprafețele pieselor executate din aliajele de construcție. Prelucrarea cu electrozi compacți din materialele enumerate este neefectivă, iar în unele cazuri practic imposibilă. În timpul impactului cu suprafața piesei de prelucrat electrozii-scule se deformează. În afară de aceasta, din cauza temperaturii de topire joase a anodului, prelucrarea chiar și la regimuri cu valori minime ale energiei descărcării (1,0...0,1 J) provoacă transferul unei cantități considerabile a fazei lichide de material de depunere la o descărcare solitară și, ca urmare, formarea unor depuneri cu denivelări.

Este necesar a pune în evidență posibilitatea formării depunerilor cu mai multe faze din amestecuri de pulberi executate din diferite materiale. De exemplu, la alierea superficială cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls la introducerea în interstițiu a pulberilor din metale ușor fuzibile (cositor, stibiu) și metale greu fuzibile sau cu compușii lor (Ti, Zr, TiC, ZrC) au fost realizate depuneri compozite cu structuri eterogene.

1.9. Electrocul – sculă aplicat la formarea depunerilor în regim de subexcitare

Cercetările anterioare au demonstrat că în procesul formării stratului de depunere în câmp electric constant are loc o lipire a particulelor pe suprafața de lucru a electrocului-sculă sau alipirea particulelor cu formarea depunerii [29], ceea ce conduce la nerespectarea regimului de prelucrare. A fost evidențiată influența asupra acestor efecte, a materialului sculei și a dimensiunilor acesteia. Procesul formării depunerilor pe anod este explicat pe baza încălzirii lui datorită energiei descărcării fără a ține seama de efectul Joule- Lentz, determină valoarea medie a intensității curentului ce curge în sculă și piesă [7].

Pentru această variantă a formării depunerilor, mai durabil s-a dovedit a fi electrocul cilindric din cupru ajustat sub unghi de 15...20° față de axa piesei.

Mai târziu a apărut necesitatea de a se transmite acestuia o mișcare de rotație [30, 38], astfel încât pentru primele instalații experimentale a fost recomandat electrocului-sculă de formă conică (figura 1.11, a) având o mișcare de rotație [43]. Încercările îndelungate ale acestor instalații au evidențiat neajunsurile esențiale ale acestor electrozi-sculă. În primul rând sub acțiunea descărcărilor electrice are loc o eroziune a vârfului conului, în urma căreia se modifică valoarea interstițiului și configurația câmpului electric la anod [44]. Studiul aprofundat al fenomenelor electroeroziunii a demonstrat că acestea reprezintă o parte componentă a procesului formării depunerilor pentru $S=0,1...0,5$ mm. În al doilea rând, se constată că lucrând cu frecvențe și energii relativ mari ($f= 15...20$ Hz, $W>1...2$ J), are loc o încălzire a electrocului-sculă conform legii lui Joule-Lentz care determină topirea, oxidarea și distrugerea acestuia. Acești factori nu permit prelucrarea îndelungată în scopul obținerii stratului. Omiterea totală sau parțială a acestor factori, evident poate fi realizată prin conceperea unei scule la care suprafața de lucru se înnoiește continuu. Obținerea în practică a acestei idei [8, 38, 68, 45-47] s-a materializat prin realizarea anodului-sculă sub formă de disc rotitor (figura 1.11, b).

Avantajele acestui electrod față de cel conic sunt evidente, deoarece el permite desfășurarea procesului în așa fel încât fiecare descărcare să înceapă de pe o suprafață nouă ce a avansat în zona de lucru a interstițiului. Pentru satisfacerea acestei cerințe este necesar să se calculeze viteza lineară, cu relația:

$$v=60 \cdot d_z \cdot f \text{ m/min,} \quad (1.26)$$

unde: d_z este diametrul zonei de interacțiune a plasmei cu anodul la o descărcare singulară;
 f —frecvența descărcărilor.

Alegerea unui anumit regim de lucru al electrodului asigură participarea ciclică a porțiunilor de suprafață în procesul tehnologic.

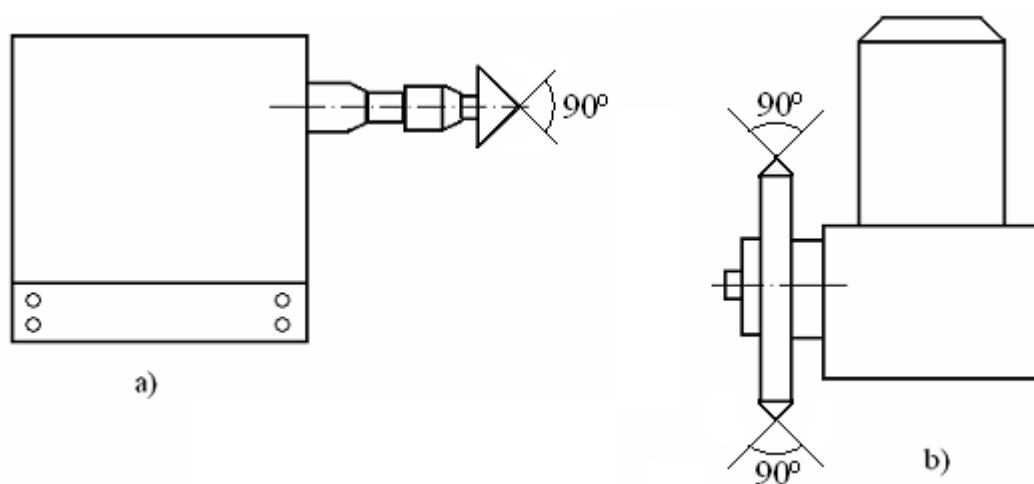


Fig. 1.11. Electrocul-sculă pentru formarea straturilor de depuneri din pulberi:

a) electrod-sculă (anod) conic; b) electrod-sculă (anod) disc

Datele privind influența materialului din care este realizat electrodul-sculă asupra eroziunii și depunerii particulelor pe suprafața de lucru, coincid cu cele din cazul aplicării câmpului electrostatic [31] (fig. 1.39). Din figură se constată că din punct de vedere al eroziunii și al depunerii particulelor, materialele studiate se comportă la fel.

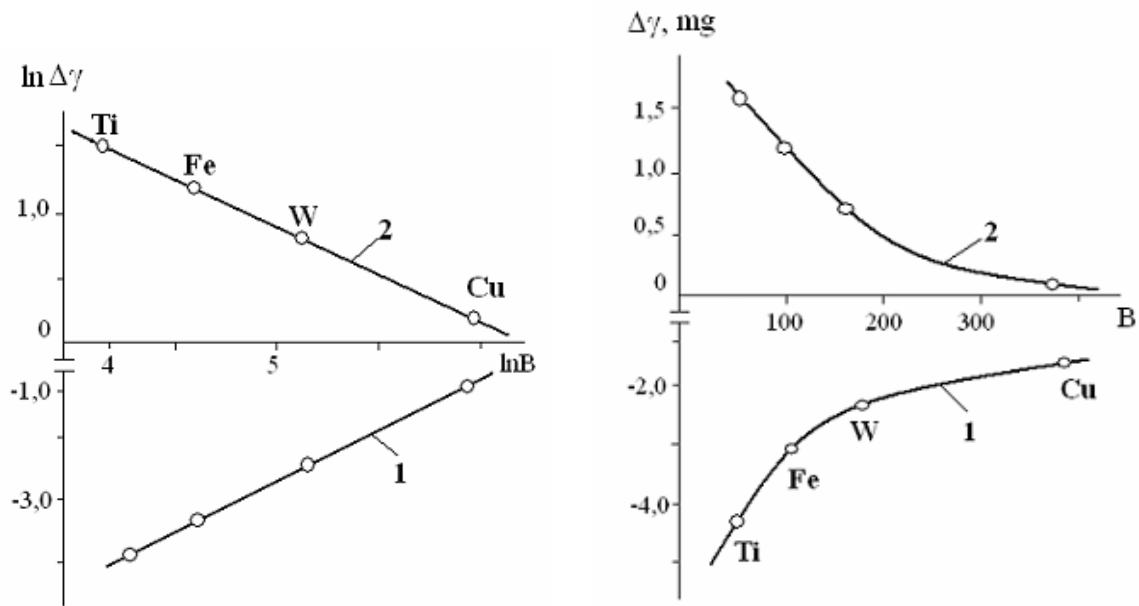


Fig. 1.12. Dependența cantității de pulbere depusă pe electrodul-sculă (anod) –2 și a eroziunii masice a acestuia –1, în funcție de coeficientul de acumulare a căldurii [31]

Atât curba 1, care descrie reducerea masei electrodului-sculă (anod) din cauza eroziunii, cât și curba 2 care indică creșterea acesteia pe seama depunerii particulelor [48], pot fi approximate cu relația:

$$\pm \Delta\gamma_E = m \cdot B^n, \quad (1.27)$$

unde B este coeficientul de acumulare a căldurii care poate fi calculat cu expresia [32]:

$$B = \sqrt{c\rho\lambda}, \quad (1.28)$$

în care c , ρ , λ sunt respectiv capacitatea termică specifică, densitatea și conductivitatea termică a materialului de execuție a electrodului-sculă.

Din analiza rezultatelor cercetărilor experimentale se observă ușor că, cu cât este mai mare coeficientul de acumulare a căldurii a materialului de execuție a electrodului-sculă, cu atât mai mare este rezistența lui la eroziune și respectiv pe suprafața lui se alipește o mai mică cantitate de particule de pulberi la formarea depunerilor. Ultima constatare experimentală conduce la necesitatea elaborării de noi aliaje care ar satisface această prescripție [50].

În ultimul timp prelucrările superficiale cu aplicarea DEI și-au găsit un nou domeniu de utilizare, și anume la formarea straturilor de oxizi. La acest tip de prelucrări electrodul-sculă are forma suprafeței capului de lucru – ca una conjugată a suprafeței piesei de prelucrat. Între aceste componente ale sistemului tehnologic nu există mișcări relative deoarece prelucrarea este realizată prin migrarea canalului de plasmă pe suprafața prelucrată a piesei cu formarea peliculei

de oxizi. Formarea peliculei de oxizi are loc la interacțiunea ionilor de oxigen din canalul de plasmă al descărcărilor electrice în impuls cu suprafața prelucrată a piesei.

Cimentarea suprafețelor se execută cu utilizarea electrozilor-scule confecționați din grafit-tehnic. Acesta servește pentru introducerea în interstițiu a energiei de efect și saturarea suprafeței prelucrate cu carbon, din care motiv este necesară menținerea mărimii constante a interstițiului. În scopul asigurării acestui deziderat electrodul-sculă se realizează sub formă de bară sau disc rotitor.

Concluzii capitolul I:

Analizând literatura de specialitate putem face următoarele concluzii:

- prelucrările tehnologice cu aplicarea efectului electroeroziunii s-a bifurcat în două direcții principale: prelucrarea dimensională și modificarea proprietăților suprafeței;
- prima direcție (prelucrarea dimensională) este dezvoltată pe larg și aplicată în practică pe când cea de-a doua are un caracter mai puțin desăvârșit atât din punct de vedere a utilajului aplicat cât și dotărilor tehnice;
- atât pentru prima direcție cât și pentru cea de-a doua electrozii-sculă aplicați (constructiv, mod de execuție, material de execuție, dimensionare, etc.) joacă un rol important în obținerea rezultatului scontat;
- pentru prima direcție există metodologia de proiectare și elaborare a electrozilor-scule, atunci pentru cea de-a doua se întâlnesc doar constatări secvențiale;
- se impune stabilirea clară a principiilor de proiectare și elaborare a electrozilor-scule pentru cazul prelucrărilor superficiale (formare a depunerilor din materiale compacte și pulberi, modificarea microgeometriei suprafețelor și aplicarea tratamentelor termice și chimico-termice).

II. STRATEGIA CERCETĂRILOR EXPERIMENTALE

2.1. Standul experimental și componentele lui

Pentru efectuarea cercetărilor privind modificarea microgeometriei suprafețelor pieselor metalice sub acțiunea descărcărilor electrice în impuls, a fost proiectată și elaborată o instalație experimentală, vederea generală a cărei este prezentată în figura 2.1. Instalația este alcătuită din următoarele părți principale: generatorul de impulsuri de tipul-RC (1); blocul de amorsare (2); blocul de comandă (3) și autotransformator (4). Blocul de comandă permite reglarea fină a frecvenței de descărcare în limitele 1...300 Hz. Schema electrică a instalației este prezentată în figura 2.2. Dacă ne referim la această schemă, se observă că blocul de comandă este destinat nu numai pentru variația frecvenței de descărcare, dar permite și efectuarea sincronizării impulsurilor de amorsare cu impulsurile de putere [33].

Generatorul de impulsuri este alcătuit din următoarele elemente: autotransformatorul (T1), transformatorul de putere (T2), redresorul (D1-4), rezistența de balast (R1), bateriile de condensatoare (C1-C6), întrerupătoarele (k1-k6), blocul de diozi (D5), dioda (D6), tiristor (D7).

Blocul de amorsare conține următoarele elemente: transformatorul (T4), redresor (D9-12), capacitatea (C7), tiristor (D8), transformatorul de tensiune înaltă (T3).

Principiul de funcționare a generatorului se bazează pe acumularea unei cantități mari de energie electrică pe bateria de condensatoare și descărcarea ei într-un impuls de durată scurtă ($\tau = 220\mu\text{s}$). De la o sursă de curent continuu, care este formată din autotransformator (T1), transformatorul de putere (T2) și redresor (D1-4), sunt alimentate, prin impedanța de încărcare (R1), capacitățile (C1, C2, C3, C4, C5, C6), în dependență de poziția întrerupătoarelor (k1-6).

Autotransformatorul (T1) permite reglarea fină a tensiunii de lucru și alimentează generatorul de impulsuri. Blocul de diode (D5) este destinat pentru protejarea generatorului de pătrunderea tensiunii înalte în acesta. Rezistența (R1) – are funcția de limitare a curentului de încărcare, ceea ce împiedică transformarea descărcării electrice în impuls în descărcarea prin arc electric.

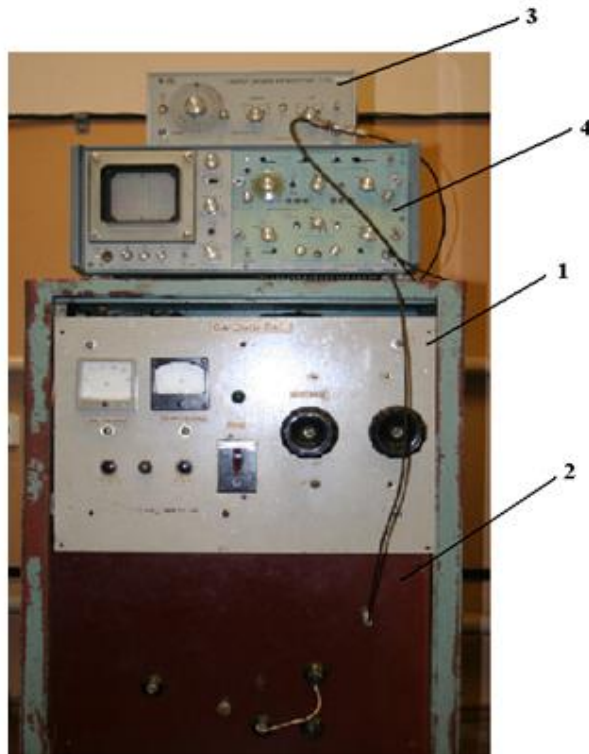


Fig. 2.1. Vederea generală a instalației: (1-generatorul de impulsuri de tipul RC; 2-blocul de amorsare; 3-blocul de comandă; 4-osciloscop).

În procesul funcționării instalației are loc încărcarea simultană a bateriei de condensatoare (C1-C6) și (C7). Blocul de comandă emite un semnal care provoacă deschiderea tiristorului (D8).

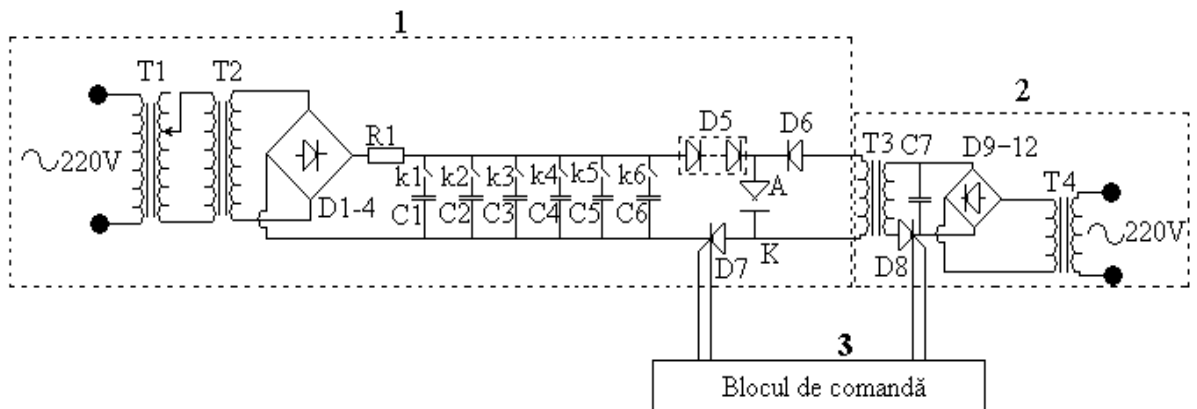


Fig. 2.2. Schema electrică principală a instalației

1- generator de impulsuri de putere; 2- blocul de amorsare

Datorită acestui fapt, capacitatea (C7) se descarcă prin bobina primară a transformatorului de tensiune înaltă (T3) și prin ea începe să circule curentul electric [8, 38]. Acest curent electric provoacă apariția tensiunii înalte (de străpungere) la bornele bobinei secundare, care se unesc respectiv cu anodul și catodul instalației de cercetare. Datorită tensiunii înalte, are loc străpungerea interstițiului și formarea canalului de conductibilitate. În același

moment, blocul de comandă emite un alt semnal, care provoacă deschiderea tiristorului (D7) și descărcarea bateriei de condensatoare (C1-C6), cu formarea impulsului de bază. După aceasta, procesul se repetă din nou. Defazajul dintre momentele de deschidere a tiristorului (D7) și tiristorului (D8) este foarte mic și poate fi reglat în limitele largi, datorită blocului de comandă. Schema electrică a blocului de comandă este prezentată în figura 2.3. Blocul de comandă constă din următoarele părți componente: generatorul de impulsuri de putere mică (1); blocul de reținere a impulsurilor (2); blocul de formare a impulsurilor de putere (3).

Generatorul generează impulsuri de durată scurtă, frecvența cărora se stabilește cu ajutorul rezistorului R1. Acest generator este elaborat în baza elementului logic K156JIA7.

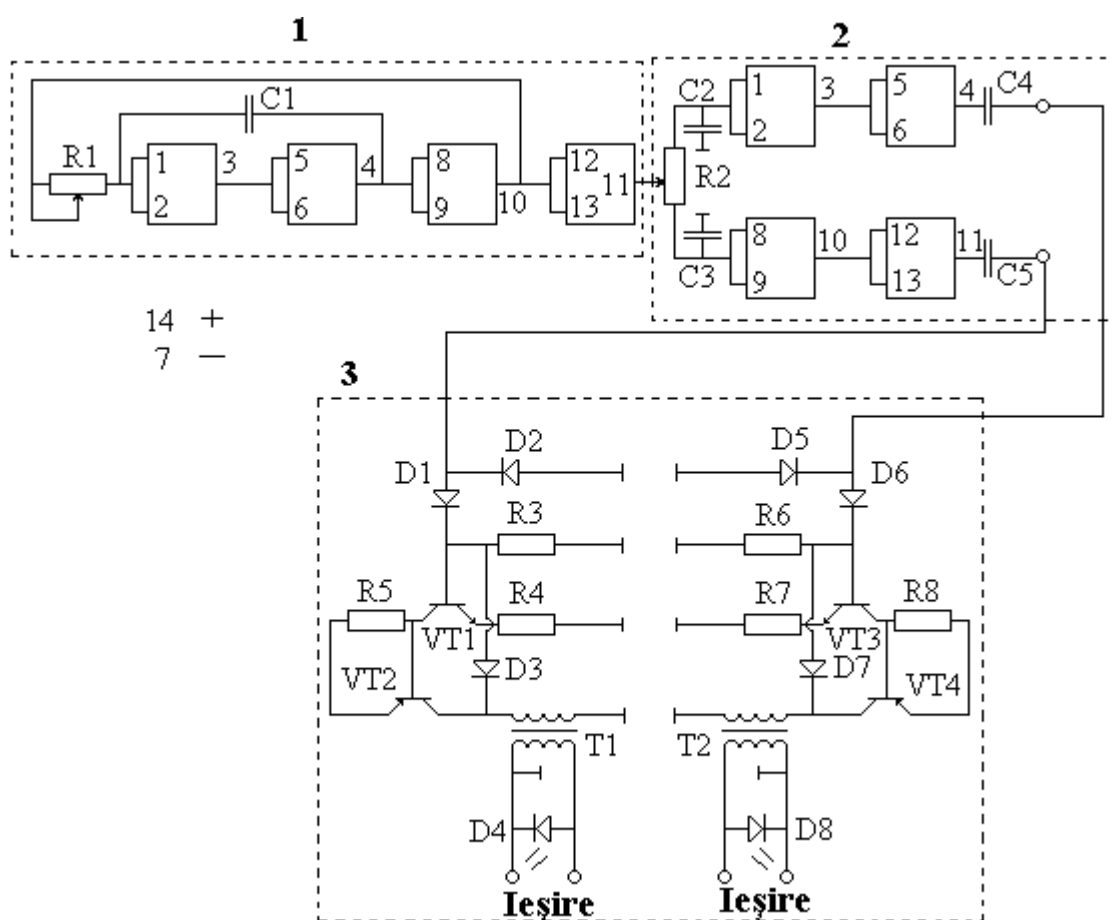


Fig.2.3. Schema electrică a blocului de comandă.

Blocul de reținere a impulsurilor (2) permite de a efectua defazajul între două impulsuri identice. Deplasarea impulsurilor unul față de altul se efectuează cu ajutorul rezistorului R2. Blocul de formare a impulsurilor de putere (3) reprezintă un amplificator de putere. Trecând prin acest bloc, impulsurile generate de generator și defazate unul față de altul se amplifică.

2.2. Partea mecanică a standului experimental

Pentru variația mărimii interstițiului, în procesul cercetărilor sa utilizat dispozitivul care este reprezentat în figura 2.4. Dispozitivul dat a fost confecționat în baza unui microscop cu scopul stabilirii precise a distanței dintre electrozi. Acest dispozitiv permite fixarea electrozilor sub formă de bare, bile și în formă de sîrmă întinsă orizontal în dispozitive de întindere (1). Masa de lucru (4) în procesul cercetărilor se deplasa atît longitudinal cît și transversal, cu scopul obținerii meniscurilor unitare pe suprafața anodului. Cu ajutorul mînerului (2) se efectua reglarea brută a interstițiului.

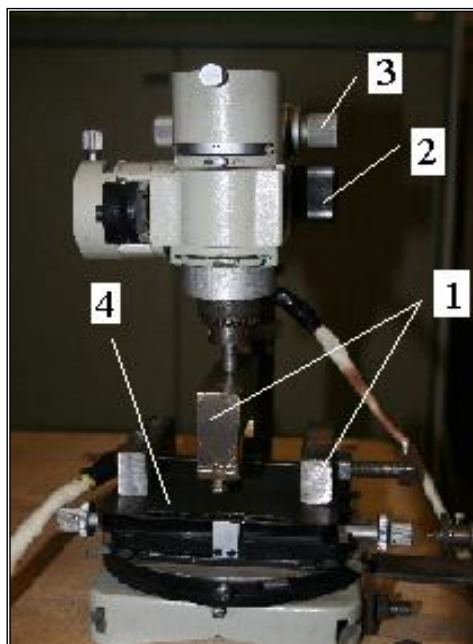


Fig.2.4. Dispozitiv pentru variația interstițiului în baza microscopului: 1- dispozitive de întindere a electrozilor sub formă de sîrmă; 2 - mîner de reglare brută a interstițiului; 3- mîner de reglare fină a interstițiului; 4- masa de lucru

Pentru reglarea fină (precisă) a interstițiului se folosește mînerul (3). Măsurarea interstițiului se efectua cu ajutorul unui comparator cu cadran cu precizia de 0,01mm. După stabilirea interstițiului, mărimea lui se controla permanent cu ajutorul microscopului de măsurat MPB-2.

Pentru siguranță, în procesul măsurărilor electrozii au fost legați la un indicator de curent și aduși în contact în stare de scurtcircuit. Măsurarea începe din momentul întreruperii circuitului, adică din poziția „zero” a indicatorului de curent [37].

2.3. Instalații și echipamente aplicate la formarea depunerilor

În ultimele decenii a secolului al XX-lea au fost inventate și elaborate o serie de instalații ce permit formarea straturilor de depunere, atît a suprafețelor plane cît și a celor cu o

configurație complexă ale pieselor [34-36]. În scopul lărgirii domeniilor de utilizare au fost elaborate mai multe instalații experimentale atât cu dirijare manuală cât și automată. Caracteristicile principale a acestor instalații sunt prezentate în tabelele 2.1 și 2.2.

Ambele tipuri de instalații au frecvența impulsurilor de curent de la 1 la 100 Hz; productivitatea 2-10 cm^2/min ; capacitatea bateriei de condensatoare – 600 μF ; timpul de funcționare neîntrerupt – 8 ore; diametrul granulelor de pulberi $3 \leq d \leq 200 \mu m$.

Tabelul 2.1. Caracteristicile tehnologice a instalațiilor manuale de formare a straturilor de depunere

Denumirea instalației	Productivitatea (cm/min).	Productivitatea ($\mu g/cm$).	Grosimea stratului depus, (mm).	Înălțimea neregularităților, (μm)	Tensiunea de lucru, (V).	Pute-rea, (kW).	Dimensiunile instalației	Masa
EFI-10M	0,25-2	0,6/14,7	0,05-0,1	10	220	0,5	546x360x318	60
EFI-45	0,5-2	0,5-14,7	0,05-0,1	10	220	0,5	546x360x318	40
EFI-46,46A	05-2	0,5-18	0,05-0,12	10	220	0,5	411x286x303	27,5
EFI-23M	1,5-5	18-80	0,14	20-160	220	1	555x350x365	50
EFI-25M	3,3	10-65	0,3	40-80	220	1,6	420x490x750	200
EFI-25A	6	52-168	0,05-0,3	15-50	380/220	2,5	590x530x1190	80
EFI-7M	3-6	9,1-106	0,04-0,14	12-60	380/220	3,2	590x530x1200	180
EFI-22	4-12	0,29-19,2	0,05-0,15	2-40	380/220	3,5	590x530x1200	185
ELITRO N-12	până la 3		0,01-0,1	40	220	0,22	12	12
ELITRO N-14	până la 3		0,01-0,03	25	220	0,33	25	25
ELITRO N-22	până la 5		0,01-0,12	16-80	220	0,4	22	22

Evacuările electrice au fost aplicate pentru a obține straturi de depunere pe suprafețele piesei de lucru atunci când sunt necesare proprietăți speciale. În general, astfel de straturi au proprietățile materialului sculei de electrod. Dacă se folosesc pulberile de depunere, există posibilitatea de a obține straturi cu proprietăți îmbunătățite. În acest ultim caz, trebuie îndeplinite anumite condiții:

- pe suprafața piesei de prelucrat trebuie să se creeze faza lichidă;
- particulele de pulbere trebuie topite înainte de impactul lor cu suprafața piesei de prelucrat;
- îmbinarea particulelor topite cu faza lichidă a materialului piesei de prelucrat trebuie să aibă loc în timpul descărcării electrice impulsive.

Faza lichidă apare pe suprafața piesei de prelucrat atunci când este îndeplinită următoarea relație:

$$Q = \frac{4W}{\pi d^2 S} \geq Q_m, \quad (2.1)$$

unde W este energia pulsului, d - diametrul craterului de fază lichidă pe suprafața catod, S - dimensiunea medie a spațiului și Q_m - căldura de topire a materialului piesei de prelucrat, care poate fi determinată cu relația:

$$Q_m = q_m \rho, \quad (2.2)$$

unde ρ fiind densitatea materialului de prelucrat și q_m - căldura specifică de topire a densității materialului de prelucrat.

Dacă tensiunea U aplicată la decalajul și capacitatea circuitului de descărcare C sunt cunoscute, energia W poate fi scrisă ca:

$$W = \eta \frac{CU^2}{2}, \quad (2.3)$$

unde η este eficiența echipamentului.

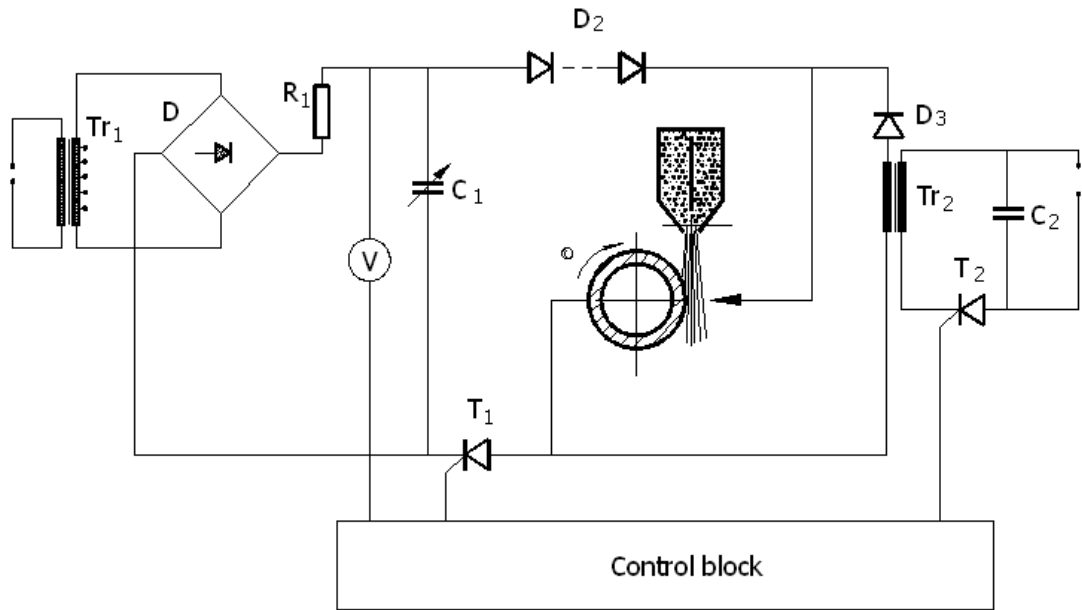


Fig. 2.5. Reprezentarea schematică a echipamentului utilizat pentru depunerea straturilor prin utilizarea pulberilor metalice

Pentru a studia aspectele fizice și tehnologice ale procesului de depunere prin utilizarea descărcărilor electrice pulsate, a fost utilizat echipamentul prezentat schematic în figura 2.5. Echipamentul experimental include câteva componente aparținând instalației Razriad - M [38]. Echipamentul permite depunerea straturilor metalice pe piese care au lungimi de pînă la 250 mm și diametre de pînă la 50 mm. Un bloc de control asigură schimbarea vitezei de rotație a piesei de prelucrat fixate într-o mandrină. Impulsurile de putere sunt obținute cu ajutorul bateriei de condensatoare C1, inclusiv 2 condensatoare ($U = 1000 \text{ V}$, $C = 100 \mu\text{F}$). Transformatorul Tr1 permite obținerea unei tensiuni de lucru adecvate. Curentul direct este transmis de către redresorul D la bateria de condensatoare C1. Rezistența R1 limitează mărimea curentului electric pentru încărcarea condensatoarelor. Diodele D2 protejează blocul de putere al generatorului de impulsuri.

Impulsurile de inițiere sunt generate atunci cînd condensatorul C2 se descarcă pe bobina primară Tr2. Pulsul primar obținut de la bobina secundară a transformatorului Tr2 este transmis la electrozi prin diodele D3 ($I = 0,2 \text{ mA}$, $U = 10\text{-}24 \text{ kV}$). Tiristoarele T1 și T2 și blocul de control concretizează un multivibrator. Ambele circuite de evacuare sunt deschise simultan; fapt care asigură sincronizarea impulsurilor și stabilitatea procesului.

Controlul treptat al tensiunii aplicate condensatorilor C1 este posibil datorită existenței blocului de control. Pulberea metalică plasată în pîlnie se alimentează la spațiul de lucru, ca urmare a gravitației. Un dispozitiv de dozare adecvat permite controlul alimentării cu pulbere în spațiul de lucru.

Tabelul 2.2. Caracteristicile tehnice a instalațiilor experimentale pentru obținerea straturilor din pulberi metalice

Instalația	Alimentarea	Puterea, (kW).	Tensiunea de lucru, (V)	Dimensiunile de gabarit, (mm)
RAZREAD	Rețea trifazată, 380/200±5%; f=50Hz	<6,0	100-500	Generator – 1670x1340x890 Strungul – 1670x1340x890
RAZREAD-M	Rețea monofazată 220±10%; f=50Hz	<5,0	140; 200; 260; 340; 400	Generator – 600x650x500 Strungul – 955x460x50

Există diverse metode de inițiere și facilitare a transportului materialului prin descărcări electrice pe suprafețele plane ale pieselor de prelucrat, în timpul procesului de descărcare electrică; o astfel de metodă utilizează vibrațiile electromagnetice ale sculei electrodice. Ca o consecință a contactelor intermitente dintre electrozi, se generează o descărcare electrică, iar materialul de pe scula electrodului poate fi separat și transportat pe suprafața piesei de prelucrat, de obicei datorită gravitației. Alte metode utilizează o cantitate suficientă de tensiune ridicată între electrod și piesa de prelucrat, astfel încât contactul intermitent direct între electrozii, pentru inițierea descărcării electrice, nu este necesar [40].

Ulterior, procesul de aliere se poate dezvolta pe suprafața piesei de prelucrat; picăturile de material topit de pe electrod penetrează stratul topit de suprafață al piesei de prelucrat, generând un strat cu proprietăți îmbunătățite. Așa cum s-a menționat mai sus [39], uneori particulele rezultate din descompunerea fluidului dielectric ca o consecință a descărcărilor electrice pot reacționa chimic cu materialul topit al piesei de prelucrat și pot genera straturi dure pe piesa de prelucrat.

Pentru a face procesul de depunere mai eficient, au fost căutate și găsite proceduri diferite pentru a introduce cantități mici de material suplimentar în stratul de suprafață al piesei de prelucrat. De exemplu, astfel de metode ar putea fi bazate pe transportul pulberii de material de depozit chiar în canalul de plasmă [40].

Pe de altă parte, există situații practice în care suprafețele de revoluție externă sau internă trebuie să garanteze o rezistență ridicată la uzură sau alte proprietăți operaționale importante, iar una dintre metode ar putea fi aliată prin descărcare electrică.

Pentru a realiza procesul de aliere sau depunere prin descărcarea electrică pe suprafețele cilindrice externe ale pieselor de prelucrat, se utilizează de obicei o configurație de lucru bazată pe rotirea electrosculii (figura 2.6). Electroscuia este conectată la un pol pozitiv, în timp ce piesa de prelucrat este conectată la un pol negativ al alimentării cu curent continuu cu ajutorul unui subsistem perie colector de inele. În plus, pentru a acoperi o anumită suprafață, este necesară o mișcare de avans f de-a lungul axei cilindrice a piesei de prelucrat.

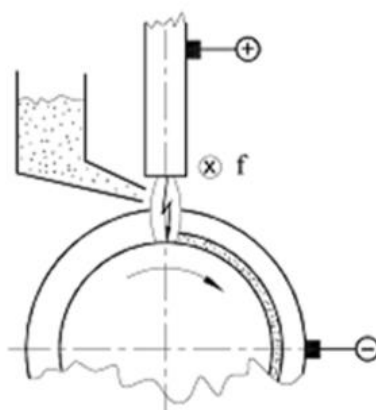


Fig. 2.6. Pulverizarea canalului de plasmă cu descărcări electrice

După cum sa menționat mai sus, există moduri diferite de a alimenta materialul pentru aliere sau depunere în canalul de plasmă al descărcării electrice. Aplicațiile practice au arătat că rezultate bune pot fi obținute atunci când materialul care urmează să fie adăugat pe stratul de suprafață al piesei de prelucrat este alimentat în formă de pulbere în canalul de plasmă cu descărcării electrice (figura 2.6).

Principali factori care pot afecta dimensiunile și calitatea stratului depus sunt mărimea spațiului de lucru dintre electroscuia și piesa de prelucrat, debitul pulberii P , energia W_d livrată în spațiul gol, energia specifică W_s disipată de-a lungul distanței de lucru, raza particulelor care trebuie depozitate, frecvența pulsului și timpul specific de acoperire. Dimensiunea spațiului de lucru poate fi măsurată direct prin intermediul unor instrumente de măsurare liniară. Fluxul de pulbere P poate fi evaluat folosind raportul dintre cantitatea m a pulberii introduse în spațiul de lucru și timpul t al acestei operații. Debitul pulberii P poate fi considerat un factor care caracterizează fluxul de pulbere către suprafața piesei de prelucrat:

$$P = m_p / t \quad (2.5)$$

Energia W_d livrată în spațiul de lucru poate fi estimată utilizând următoarea formulă:

$$W_d = CU^2 / 2 \quad (2.6)$$

unde C este capacitatea circuitelor de descărcare, în pF , iar U este tensiunea dintre electrozii, în V .

Nu toată energia este livrată în golul de lucru; aceasta înseamnă de obicei că condensatorul inclus în circuitul de descărcare nu este complet descărcat după scînteia electrică [41], dar în scopuri generale se poate considera că energia este definită de Eq (2.6).

În cazul depunerii electrosarkului fără contact între electrozi, energia specifică Ws poate fi determinată de raportul dintre energia W livrată în spațiul de lucru și dimensiunea spațiului de lucru s :

$$Ws = W / s. \quad (2.7)$$

Evacuările electrice între electrodul sculă și piesa de prelucrat au fost obținute cu ajutorul unui dispozitiv de tip Razriad (fabricat în Rusia). Schema electrică a echipamentului este prezentată în figura 2.7. Transformatorul Tr1 și redresorul diodelor D1 reprezintă alimentarea cu energie pentru un circuit de tip RC. Valorile diferite ale energiei pulsului generate de circuitul RC pot fi obținute prin schimbarea tensiunii furnizate de transformatorul Tr1 și a capacității condensatorului C1. Rezistorul R1 limitează valoarea curentului electric pentru încărcarea condensatorului C1. Dioda D3 împiedică modificarea direcției curentului electric din circuitul de alimentare.

Tabelul 2.3. Valorile factorilor de intrare corespunzător celor trei nivele

Factorul de intrare	Valorile factorilor de intrare		
	Nivel minim (codificare: -1)	Nivel mediu (codificare: 0)	Nivel maxim (codificare: +1)
Dimensiunea spațiului, s , mm	0.3	0.9	1.5
Flux de pulbere, P g/min	0.3	1.7	3.1
Energie livrată, W_d , J	0.8	4.3	7.8
Densitatea specifică a energiei, W_s , J/mm	2	9.25	16.5

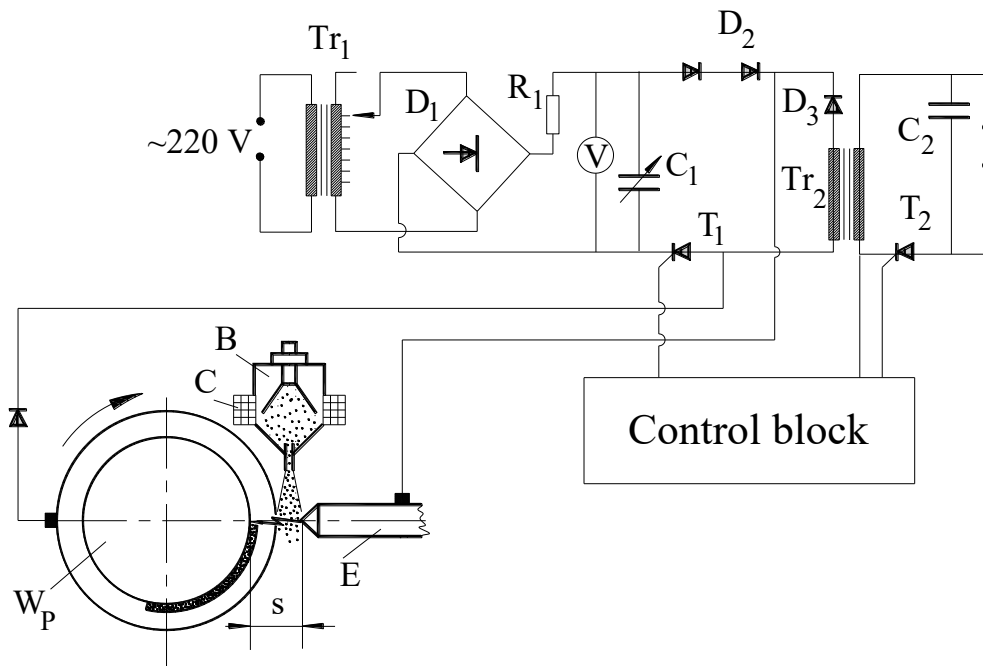


Fig. 2.7. Schema electrică a echipamentului utilizat pentru îmbunătățirea proprietăților stratului de suprafață prin descărcări electrice.

Un al doilea circuit furnizează impulsurile de tensiune ridicată necesare pentru inițierea descărcărilor electrice între piesa de prelucrat W_p și electrodul-sculă E. Acest circuit include transformatorul Tr_2 , care asigură creșterea tensiunii de pînă la 12 kV. Curentul utilizat pentru declanșarea scînteii electrice are o intensitate de 0,1mA și durata de 10ps.

Evacuarea electrică între electrozi determină încărcarea din nou a condensatorului C_2 . Pentru a evita posibila influență a impulsurilor de înaltă tensiune asupra circuitului de putere, se utilizează diodele D_2 . Afît circuitul de alimentare cît și circuitul de înaltă tensiune sunt controlate cu ajutorul unui circuit multivibrator prezent în blocul de comandă; semnalele generate de blocul de comandă sunt aplicate la cele două circuite menționate mai sus prin intermediul porților tiristoarelor T_1 și T_2 .

Conectarea piesei de prelucrat W_p în circuitele electrice se face prin utilizarea unui subsistem de perie colectoare, deoarece piesa se rotește deja. Mărimea spațiului de lucru s între electrodul E și piesa de prelucrat W_p poate avea valori cuprinse între 0 și 3 mm. Capacitatea condensatoarelor incluse în circuitul de descărcare este de 600F; tensiunea utilizată pentru încărcarea condensatoarelor a fost de la 80 pînă la 500 V.

O soluție îmbunătățită [42] a fost utilizată pentru a asigura dozarea și alimentarea pulberii spre descărcarea electrică; pulbera existentă în buncărul B este fluidizată utilizînd o bobină C

plasată în jurul buncărului. Granulele magnetizate, amestecate cu granulele care urmează să fie depuse, asigură fluidizarea pulberii și avansarea treptată de către un tub-electrod.

În canalul de plasmă, corespunzător descărcării electrice, granulele se topesc și aderă la suprafața cilindrică exterioară a piesei de prelucrat în rotație. Pentru a asigura depunerea pulberii topite pe o anumită suprafață, este necesară o mișcare de alimentare longitudinală a dispozitivului care ține dispozitivul de electrozi.

Trei materiale pulverulente au fost depuse pe suprafețele cilindrice ale pieselor de testare după cum urmează:

1. Bronz BrAJN-10-4-4, conținând cupru, 10,25% aluminiu, 4% fier și 4,5% nichel. Acest material a fost utilizat pentru a crea stratul de depunere cu proprietăți antifricțiune;

2. Material rezistent la coroziune și rezistență la uzură de tip PT-19N-01, care conține 11% Cr, 2,1% tungsten, 2,2% Si, 0,45% C, 3,5% Fe (duritate 28-40 HRC);

3. Oțel cu conținut redus de carbon (0,03% carbon, acest oțel fiind utilizat numai ca material de comparație);

4. Carbura de bor (B₄C), caracterizată prin duritate mare (9,3 pe scara Mohs), punct de topire ridicat (2350°C) și inerție chimică mare. Carbura de bor este folosită în armura tancurilor, vestele bulletproof, etc.

Piese de testare au fost fabricate din oțel conținând 0,45% carbon.

2.4. Materialul, geometria probelor și schemele tehnologice de prelucrare

În calitate de materiale pentru probe de cercetare au fost alese aliajele fierului (oțel St. 3, oțel 45), aliajele titanului (BT-8, BT 1-0), aliajul aluminiului (Д16) și aliajele cuprului (M0, alamă JI63, bronz БрА5). Conținutul chimic al materialelor [89] este prezentat în tab. 2.3. Pentru evitarea influenței elementelor ce intră în componența materialului electrodului-sculă și care pot pătrunde în suprafața probei în procesul formării peliculelor de oxizi sub acțiunea DEI, electrodul-sculă a fost confecționat din același material ca și piesa supusă prelucrării.

Tabelul 2.4. Conținutul chimic al materialelor pentru probe de cercetare

Aliajul	Conținutul chimic
Aliajele fieroase	
Oțel St. 3	0,14-0,22 % C; 0,05-0,17 % Si; 0,4-0,65 Mn; ≤0,30 % Cr; ≤0,05 % S; ≤0,04 % P; ≤0,30 Cu; ≤0,30 % Ni; ≤0,08 % As; restul (bază) – Fe
Oțel 45	0,42-0,50 % C; 0,17-0,37 % Si; 0,5-0,8 Mn; ≤0,25 % Cr; ≤0,04 % S; ≤0,035 % P; ≤0,25 Cu; ≤0,25 % Ni; ≤0,08 % As; restul (bază) – Fe
Aliajele titanului	
BT-8	5,8-7,0 % Al; 2,8-3,8 % Mo; ≤0,5 % Zr; 0,2-0,4 % Si; ≤0,30 % Fe; restul (bază) – Ti
BT 1-0	Bază – Ti, impurități – ≤0,18 % Fe; ≤0,10 % Si; ≤0,07 % C; ≤0,12 % O; ≤0,04 % N; ≤0,010 % H; alte impurități – ≤0,3 %
Aliajele aluminiului	
Д16	3,8-4,9 % Cu; 1,2-1,8 % Mg; 0,3-0,9 Mn; ≤0,5 % Fe; ≤0,5 % Si; ≤0,1 % Ni; ≤0,30 Zn; ≤0,1 % Ti; restul (bază) – Al
Aliajele cuprului	
Cupru tehnic pur M0	Bază – 99,95 % Cu, impurități – ≤0,05 %
Alamă Л63	Bază – 62,0-65,0 % Cu; 34,5-37,5 % Zn; impurități – ≤0,5 %
Bronz БрА5	3,5-6 % Al; impurități – ≤0,5 %; restul (bază) – Cu

Pentru realizarea cercetărilor experimentale în calitate de piese supuse prelucrării, au fost confecționate probele cilindrice cu diametrul de 11,28 mm de diferită lungime în dependență de schema tehnologică de prelucrare. În acest caz aria secțiunii transversale a probelor constituie aproximativ 1 cm². Electrocul-sculă, la prelucrarea suprafețelor conjugate plane, reprezintă un cilindru cu diametrul suprafeței de lucru de 15 mm, avînd o coadă cilindrică pentru fixarea în mandrina instalației experimentale. La oxidarea suprafețelor cilindrice exterioare, electrocul-sculă a fost confecționat sub formă de bară cilindrică cu Ø 6 mm cu capăt semirotund.

Suprafețele active ale probelor supuse prelucrării au fost șlefuite cu hîrtie abrazivă de Șmirghel (3-0) și lustruite cu pasta Goya pînă la luciul de oglindă. Pentru prepararea suprafețelor plane, probele au fost fixate în dispozitiv special de fixare și prelucrate pe o suprafață de sticlă, pentru ca în procesul prelucrării prin DEI suprafețele opuse ale electrozilor să fie paralele între ele.

2.6. Modul de prelucrare a suprafețelor

Pentru realizarea cercetărilor se elaborau probe de formă cilindrică sau plană din aliajul wolframului și reniului, cupru, aluminiu, grafit și oțel cu proprietățile prezentate în tabelul 2.5.

Tabelul 2.5. Proprietățile materialelor utilizate în procesul cercetărilor experimentale

Materialul	Temperatura de topire (°C)	Duritatea (HB)	Densitatea (kg/m ³ *10 ⁻³)	Capacitatea termică specifică (cal/(g grad))
W + 10% Re	3180	200	21,02	0,0326
Cu	1083	2,5-3	8,96	
Al	660		2,7	
Grafit	3700 C		2,22	
Oțel	1450 - 1520		7.7 ÷ 8.1	

Electrozii prelucrați prealabil după metoda descrisă mai sus, se prindeau în elementele de poziționare ale dispozitivului de fixare. Apoi, electrozii se apropie manual unul de altul, pînă la contactul acestora, și se selectează mărimea interstițiului.

În figura 2.8 sunt prezentate scheme de poziționare a electrozilor utilizate în procesul cercetărilor experimentale și conectarea acestora în circuitul de descărcare al generatorului de impulsuri.

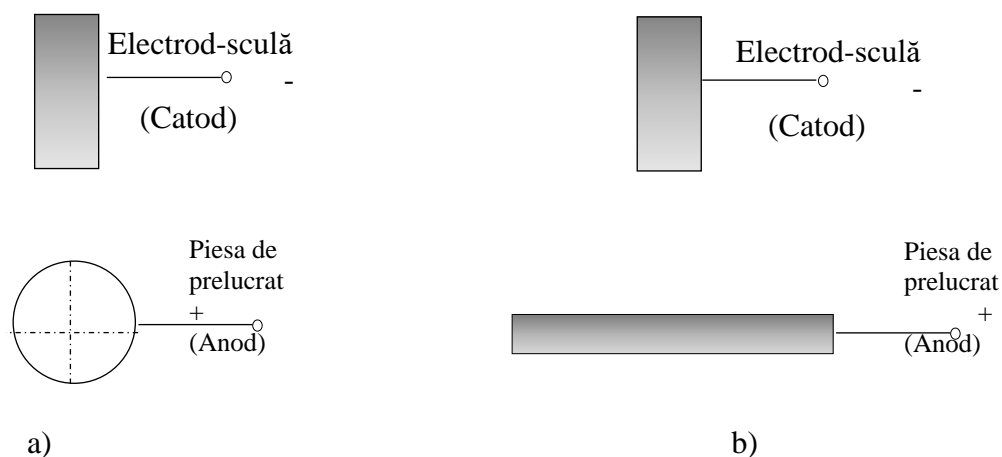


Fig. 2.8. Scheme de poziționare a electrozilor utilizate în procesul cercetărilor experimentale și conectarea acestora în circuitul de descărcare al generatorului de impulsuri de putere:

a) cazul piesei cilindrice; b) cazul piesei plane.

Pentru cercetări experimentale pe suprafața plană cu aplicarea DEI a fost utilizată perechea de electrozi: piesa – placă din W + 10% Re cu suprafața de prelucrare plană și electrodul-sculă executat din același material (fig. 2.8 b).

2.6. Determinarea mărimii masice a eroziunii

Electrozii-scule pentru cercetarea eroziunii electrice au fost conectați în circuitul de descărcare a generatorului de impulsuri în calitate de anod, iar în calitate de contraelectrod a servit proba plană de secțiune dreptunghiulară confecționată din oțel 45.

Pentru determinarea influenței materialului, formei și dimensiunilor electrozilor-scule, cât și regimul energetic de prelucrare asupra mărimii masice a electroeroziunii, cercetările au fost efectuate în regim de menținere a 2 minute ale descărcărilor electrice consecutive la frecvența de 4 Hz pentru toate tipurile de materiale utilizate în calitate de electrozi-scule-catozi, după care urma cântărirea la cântarul analitic de marca BJI-200, cu precizia de măsurare 10^{-4} g.

Încercările se repetau din nou, astfel obținând adaosul sau eroziunea masică a electrozilor. Rezultatele încercărilor pot fi reprezentate sub formă de tabel sau grafic.

Mărimea masică a eroziunii pentru un regim constant de lucru se execută prin cântărirea probei pînă și după prelucrare cu cântarul analitic KERN ABJ 120-4NM.

2.10. Aplicarea microscopiei optice la cercetarea suprafețelor

În această lucrare pentru analiza morfologiei suprafețelor prelucrate a fost utilizat microscopul optic XIM600 [94] care lucrează în regimuri de lumină reflectată și parcursă.

Microscopul optic reprezintă dispozitivul optic, care folosește lumina pentru obținerea imaginilor mărite ale obiectelor mici, ce permite analiza microobiectelor cu rezoluția pînă la $0,15\mu\text{m}$.

Modelul microscopului utilizat în cercetare permite vizualizarea obiectelor în lumina parcursă (pentru probe transparente și semitransparente) sau în lumina reflectată în câmpul luminos sau întunecat, în lumina albă sau polarizată, cu aplicarea filtrelor verde, albastru sau neutru.

Cercetarea suprafețelor după prelucrare sa executat prin:

- microscopie optică la microscopul [94];
- microscopie electronică la microscopul Vega TeScan 5130.
- Analize EDX la cercetarea suprafețelor.

2.11. Metode de planificare matematică a experimentului

Prelucrarea matematică a datelor experimentale. La obținerea rezultatului experimentului care brusc diferă de toate celelalte rezultate apare probabilitatea că a fost emisă o eroare grosolană. În acest caz este necesar imediat de controlat condițiile în care se promovează experimentul.

Dacă acest control nu a fost efectuat la timp atunci eliminarea valorii respective a rezultatului „greșit” se rezolvă prin comparația cu celelalte rezultate ale experimentului.

Pentru analiza matematică a datelor experimentale a fost folosită metoda eliminării erorilor grosolane folosind criteriul lui Student la valoarea necunoscută a abaterii mediei pătratice σ [95-103].

Fie că sunt date n rezultate ale măsurărilor independente ai unei mărimi x_1, x_2, \dots, x_n . Algoritmul evaluării valorii adevărate a mărimii măsurate este următorul:

- 1) Valoarea medie aritmetică:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i . \quad (2.5)$$

- 2) Abaterea medie pătratică corectată:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} . \quad (2.6)$$

- 3) Abaterea maximală posibilă:

$$\Delta x = 3S . \quad (2.7)$$

- 4) Dispersia:

$$D = S^2 . \quad (2.8)$$

- 5) Abaterea medie pătratică a rezultatelor luate în parte:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} . \quad (2.9)$$

- 6) Abaterea medie pătratică a mediei aritmetice:

$$\sigma^* = \frac{S}{\sqrt{n}} . \quad (2.10)$$

- 7) Limitele intervalului de încredere a valorilor măsurărilor:

$$|x_i - \bar{x}| < t(P; k) \cdot S , \quad (2.11)$$

unde $t(P; k)$ - coeficientul lui Student; $k=n-1$. Pentru probabilitatea P și argumentul k distribuirea coeficientului lui Student se ia din tabelul 2.6 [105].

8) Valoarea erorii aleatoare:

$$\Delta x = t(P; k) \cdot \sigma^* . \quad (2.11)$$

9) Limitele intervalului de încredere a lotului în întregime:

$$|x_i - \bar{x}| < t(P; k) \cdot \sigma^* . \quad (2.12)$$

10) Valoarea adevărată a mărimii măsurate:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x . \quad (2.13)$$

Calculul valorii adevărate a mărimilor măsurate a fost efectuat cu ajutorul programului Microsoft Office Excell pentru nivelul probabilității minimale de apariție a erorilor de $\pm 5\%$ ($P=0,95$).

Aproximarea funcțiilor dependențelor tehnologice. Pentru aproximarea funcțiilor s-a folosit **metoda celor mai mici patrate (CMMP)**. Esența metodei CMMP constă în determinarea parametrilor ecuației căutate pe cale analitică. Teoria probabilității arată, că cea mai apropiată de dreapta căutată, va fi dreapta, pentru care suma pătratelor distanțelor măsurate pe verticală de la puncte pînă la dreapta căutată, va fi minimală.

Așadar, pentru o linie dreaptă, această cerință se reduce la ecuația:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - B - Ax_i)^2 \rightarrow \min, \quad (2.14)$$

unde n reprezintă numărul de puncte experimentale.

Pentru determinarea minimumului este necesar de calculat derivatele parțiale după A și B , și să le egalăm cu zero. Vom obține:

$$\begin{cases} -2 \sum_{i=1}^n (y_i - B - Ax_i) = 0; \\ -2 \sum_{i=1}^n (y_i - B - Ax_i)x_i = 0; \end{cases}$$

ori (2.15)

$$\begin{cases} nB + A \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i; \\ B \sum_{i=1}^n x_i + A \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i x_i. \end{cases}$$

Rezolvînd sistemul de ecuații, vom obține:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i)^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n (x_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}, \quad (2.16)$$

$$B = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n (x_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}.$$

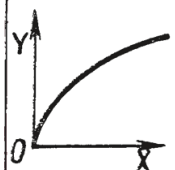
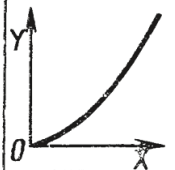
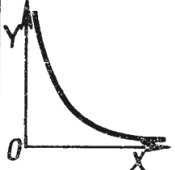
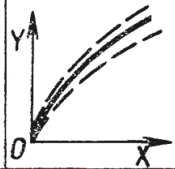

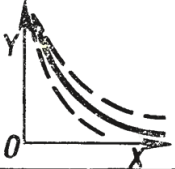
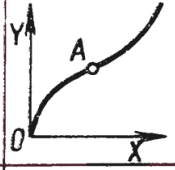
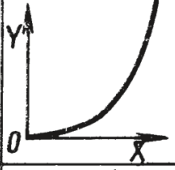
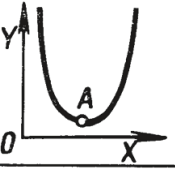
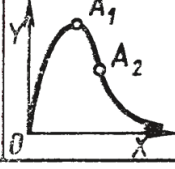
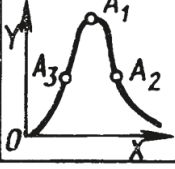
Curbele care au extremele (maximuri sau minimuri) construite după punctele experimentale în majoritatea cazurilor nu pot fi aproximate cu ajutorul ecuațiilor de putere [104]. În aceste cazuri se poate proceda în diferite feluri: curbele pot fi exprimate cu ajutorul șirurilor matematice, cu ajutorul formulelor de interpolare sau cu ajutorul unor formule empirice, care au caracter extremic.

Șirurile matematice permit exprimarea cu un grad diferit de exactitate dependențele cantitative ale variabilelor indiferent de complexitatea graficului construit după datele experimentale. Totodată cu ajutorul lor este foarte greu de efectuat analiza comparativă a influenței diferitor parametri asupra legităților generale ale dependențelor cercetate. Șirurile pot fi utilizate în calitate de formă matematică comodă de exprimare și memorizare a rezultatelor experimentelor efectuate. În caz de necesitate după șiruri se poate de efectuat calculul valorilor cantitative.

Formulele de interpolare permit aproximarea dependențelor factorilor cu un anumit grad de exactitate care depinde, în primul rînd, de numărul experiențelor efectuate. Cu cît numărul acesta este mai mare cu atît exactitatea este mai înaltă.

Dintr-o mulțime de formule empirice pentru aproximarea rezultatelor experimentului [104] interesul deosebit reprezintă ecuația $y = a \cdot x^b \cdot e^{cx}$. În afară de argumentul x , ecuația mai conține încă trei constante a , b și c . În cazul descrierii rezultatelor cercetărilor experimentale ale proceselor tehnologice, constanta a are valori numerice fracționare sau întregi strict pozitive ($a > 0$). Constanta b (indicile de putere pe lîngă argumentul x) și constanta c (care reprezintă înmulțitorul în indicile de putere pe lîngă e) pot avea valori atît pozitive, cît și negative. În caz particular, cînd constanta $c=0$, ecuația empirică primește forma ecuației de putere, exprimată de parabolă (cînd $b > 0$) sau de hiperbolă (cînd $b < 0$). Pentru $b=0$, ecuația empirică are forma ecuației exponențiale.

Tabelul 2.7. Forma graficelor ecuației $y = a \cdot x^b \cdot e^{cx}$ în dependență de valoarea constantelor [104]

$0 < b < 1$		$b > 1$		$b < 0$				
1		$Y = aX^b$ $c = 0$	5		$Y = aX^b$ $c = 0$	9		$Y = \frac{a}{X^b}$ $c = 0$
2		$Y = aX^b e^{cx}$ $c = -0,05 + 0,05$	6		$Y = aX^b e^{cx}$ $c = -0,05 + 0,1$	10		$Y = \frac{a}{X^b e^{cx}}$ $c = 0,1 \div 0,05$
3		$Y = aX^b e^{cx}$	7		$Y = aX^b e^{cx}$	11		$Y = \frac{a e^{cx}}{X^b}$
4		$Y = \frac{aX^b}{e^{cx}}$	8		$Y = \frac{aX^b}{e^{cx}}$		—	—

Așa dar, ecuația empirică cercetată reprezintă formarea matematică din produsul ecuației de putere $y = a \cdot x^b$ cu funcția exponențială naturală $y = e^{cx}$ (tab. 2.8 [105]).

Caracterul graficilor care exprimă ecuația $y = a \cdot x^b \cdot e^{cx}$ este determinat de ecuația de putere, deoarece x^b poartă caracter hotărâtor. Înmulțitorul al doilea e^{cx} , în dependență de valoarea numerică și semnul constantei c , conduce la abateri mai mari sau mai mici ai graficului de la forma dependențelor inițiale parabolice sau hiperbolice. În fond, componenta e^{cx} poate fi considerată drept înmulțitor de corecție.

Cele trei constante a , b și c cu valorile numerice și semne diferite pot forma o mulțime de combinații și atribuie ecuației $y = a \cdot x^b \cdot e^{cx}$ universalitate și posibilități largi de utilizare pentru aproximarea funcțiilor de diferită formă ce exprimă rezultatele cercetărilor experimentale.

$$p_{j+1}(x) = (x + \beta_{j+1}) \cdot p_j(x) - \frac{H_j}{H_{j-1}} p_{j-1}(x), j = \overline{1, n}, \quad (2.20)$$

unde:

$$H_j = \sum_{k=1}^N p_j^2(x_k) \cdot \omega_k, \beta_{j+1} = -\frac{1}{H_j} \sum_{k=1}^N x_k \cdot p_j^2(x_k) \cdot \omega_k, j = \overline{0, n-1} \quad (2.21)$$

Simplificarea semnificativă a calculului coeficienților se atinge în cazul când toate ponderile măsurărilor $\omega_k = 1$ și toate punctele experimentale x_k sunt distribuite simetric față de

$$\text{valoarea medie } \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k.$$

În acest caz este rațional de scris polinoamele ortogonale după puterile diferenței $u = x - \bar{x}$.

Ecuțiile (2.19)-(2.21) obțin forma:

$$p_0(u) = 1, p_1(u) = u \quad (2.19^*)$$

$$p_{j+1}(x) = u \cdot p_j(u) - \frac{H_j}{H_{j-1}} p_{j-1}(u), j = \overline{1, n}, \quad (2.20^*)$$

unde:

$$H_j = \sum_{k=1}^N p_j^2(u_k), j = \overline{0, n-1}. \quad (2.21^*)$$

Să precăutăm cazurile particulare:

1) $a > 0, b \neq 0, c = 0$. Obținem ecuația $y = a \cdot x^b$, care reprezintă parabolă cu axa orizontală (pentru $0 < b < 1$), parabolă cu axa verticală (pentru $b > 1$) sau hiperbolă (pentru $b < 0$) (tab. 2.8, fig. 1, 5, 9).

Determinarea coeficienților ecuației se efectuează cu ajutorul metodei CMMP pentru graficul funcției în coordonate logaritmice:

$$\ln y = \ln(a \cdot x^b),$$

$$\ln y = \ln a + b \ln x.$$

Obținem ecuația liniei drepte:

$$Y = A \cdot X + B,$$

$$\text{unde } Y = \ln y, X = \ln x, A = b, B = \ln a.$$

2) $a > 0, b = 0, c \neq 0$. Obținem ecuația funcției exponențiale naturale $y = a \cdot e^{c \cdot x}$.

Determinarea coeficienților ecuației are loc în coordonate semilogaritmice:

$$\ln y = \ln(a \cdot e^{c \cdot x}),$$

$$\ln y = \ln a + c \cdot x.$$

Obținem ecuația liniei drepte:

$$Y = A \cdot X + B,$$

unde $Y = \ln y$, $X = x$, $A = c$, $B = \ln a$.

3) $a > 0, b \neq 0, c \neq 0$. Funcția $y = a \cdot x^b \cdot e^{cx}$ are punctul de extremum (minimum sau maximum):

$$x_0 = -\frac{b}{c} \quad (2.22)$$

și două puncte de curbură:

$$x_{1,2} = -\frac{b \pm \sqrt{b}}{c} \quad (2.23)$$

Consecutivitatea determinării coeficienților:

$$\ln y = \ln(a \cdot x^b \cdot e^{c \cdot x}),$$

$$\ln y = \ln a + b \ln x + c \cdot x. \quad (2.24)$$

Exprimându-l pe $c = -\frac{b}{x_0}$ din formulă (2.25) și substituind în (2.27), obținem:

$$\ln y = \ln a + b \ln x - \frac{b}{x_0} x, \quad (2.25)$$

$$\ln y = \ln a + b \left(\ln x - \frac{x}{x_0} \right), \quad (2.26)$$

$$Y = A \cdot X + B, \quad (2.27)$$

unde $Y = \ln y$, $X = \ln x - \frac{x}{x_0}$, $A = b$, $B = \ln a$.

Coeficienții ecuațiilor dependențelor tehnologice au fost determinate cu ajutorul programelor Microsoft Office Excell 2010 și Matlab ver. 6.5 release 13 [105, 106].

Concluzii capitolul II

Din cele prezentate în materialele de mai sus putem concluda că:

- instalațiile experimentale aplicate cuprind spectrul celor existente în prezent și asigură tehnologia prelucrării;
- măsurarea energiei DEI prin metoda osciloscopăriei permite a stabili corect un parametru tehnologic important;
- metodele de determinare a calității suprafeței piesei și E-S se încadrează în limitele impuse de proces;
- metodele contemporane de analiză a conținutului chimic și de fază a suprafeței pieselor și electrozilor-scule permit a determina efectiv influența tehnologiei aplicate și E-S asupra rezultatului obținut;
- metodele matematice de planificare a experimentului reduce esențial numărul încercărilor experimentale.

III. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND COMPORTAREA ELECTROZILOR-SCULE ÎN DIFERITE PROCEDEE DE PRELUCRARE

3.4. Rezultatul preliminar a aplicării DEI în prelucrarea suprafețelor cu diferite destinații

Metoda prelucrărilor prin electroeroziune s-a bifurcat în două direcții distincte cum ar fi prelucrarea dimensională [51] și formarea straturilor de suprafață cu: formarea depunerilor din materiale compacte [52], pulberi [53] sau modificarea compoziției chimice a acestora prin difuzia elementelor din mediul de lucru [51]. Dacă în cazul prelucrării dimensionale procesul de proiectare și elaborare a electrozilor-scule este și pus bine la punct, atunci pentru formarea straturilor de suprafață în literatura de specialitate sunt lucrări separate [52-56] care elucidează problema compoziției chimice a materialului de confecționare a electrozilor aplicați la formarea depunerilor, însă nu este clar cum se determină forma geometrică constructivă și dimensionarea lor în funcție de elementele regimului tehnologic de prelucrare.

În cazul formării depunerilor din materiale compacte [53] de obicei se aplică electrozi-anodi executați sub formă de bare din materiale cu proprietăți prescrise în funcție de proprietățile necesare de a fi conferite piesei (materiale antifricțiune de tipul bronzurilor, materiale anticorozive Pd și Rt, materiale de durificare ca carburile diferitor metale și grafit sau combinații ale acestora, etc.). De obicei cercetările intensității formării depunerilor se executau în funcție de regimul energetic de prelucrare și frecvența impulsurilor de descărcare indicându-se materialul de execuție a electrodului și diametrul lui (pentru barele de secțiune cilindrică) sau grosimea și lățimea secțiunii transversale (pentru barele de secțiune dreptunghiulară). Este necesar a stabili care este rolul ariei secțiunii transversale a electrodului-sculă în formarea depunerii. Din rezultatele cercetărilor experimentale prezentate în lucrarea [53] devine clar că, energia degajată în interstițiu este devizată în câteva componente: W_p - energia degajată în canalul de plasmă, W_a - energia degajată la suprafața anodului și W_c - energia degajată la suprafața catodului.

Mărimile indicate sunt diferite, iar redistribuirea lor are loc atât în funcție de materialul de execuție al piese-catod, electrodului-anod și a proprietăților mediului de lucru din interstițiu. De obicei o tehnologie este mai performantă dacă nu se impun condiții speciale de realizare, din care motiv în prezenta sau realizat cercetări ale eroziunii electrozilor în mediu atmosferic obișnuit pentru electrozi executați din oțel 45, grafit, aluminiu, cupru sub formă de bare de secțiune cilindrică la unul și același regim energetic cu una și aceeași frecvență a impulsurilor de descărcare. În fig. 3.1 este prezentată intensitatea eroziunii masice a electrozilor în funcție de aria secțiunii transversale a acestora. Din curbele prezentate în fig. 3.1 devine evident clar că, aria secțiunii transversale a electrozilor aplicați la formarea depunerilor din materiale compacte influențează intensitatea eroziunii acestora.

Acesta poate fi explicat prin faptul că secțiunea transversală a electrozilor împiedică sau favorizează răcirea electrozilor și împiedică sau favorizează dezvoltarea fenomenului de acumulare a căldurii în aceștea. Pe de altă parte procesele ce se produc pe suprafețele electrozilor și în deosebi topirea și prelevarea de material sunt funcție de densitatea de energie ce se degajă în interstițiu. În lucrarea [53] este demonstrat că diametrul craterului cu fază lichidă este direct proporțional cu energia degajată în interstițiu la o descărcare solitară. Totdeauna, și practic de către majoritatea absolută a cercetătorilor [51-56], în calitate de parametru principal care influențează în cea mai mare măsură procesele erozive este precăutată dependența acestora în principal de factorul energetic al descărcărilor electrice în impuls. Astfel de către unii dintre aceștea au fost stabilite relații de tipul [52]:

$$d_c = kW, \quad (3.1)$$

$$h_c = kW, \quad (3.2)$$

$$\Delta\gamma = k \frac{CU^2}{2}, \quad (3.3)$$

$$\Delta\gamma = kW, \quad (3.4)$$

în care: d_c - este diametrul craterului format în rezultatul unei descărcări electrice solitare;

h_c - adâncimea craterului;

$\Delta\gamma$ - cantitatea masică de material prelevat sau depus;

k - este un coeficient de proporționalitate dependent de proprietățile materialului de execuție al electrozilor și condițiile de prelucrare;

C -capacitatea bateriei de condensatoare a generatorului de impulsuri de curent;

U -tensiunea de încărcare a acestora;

W - energia descărcărilor electrice în impuls.

Din rezultatele cercetărilor executate de mai mulți cercetători [51, 53] se cunoaște faptul că, în condiții identice mai puternic erodează electrodul care îndeplinește funcția de anod. În cazul în care se precaută circuitul format de cei doi electrozi și canalul de plasmă ca unul în serie, putem admite că în acesta circulă în mod integral unul și același curent din care rezultă eroziunea masică a anodului respectiv a catodului, este funcție de căderea de tensiune la suprafețele acestora cum urmează:

$$-\Delta m_a = -k\rho U_a \int_0^{\tau} i(t) dt, \quad (3.5)$$

$$\Delta m_k = k\rho U_k \int_0^{\tau} i(t) dt. \quad (3.6)$$

Reeșint din cele stabilite anterior în lucrarea [54] și în scopul omiterii degajării minime de căldură în volumul electrodului-sculă vom determina diametrul acestuia ca cel egal cu diametrul craterului cu fază lichidă cu relația:

Diametrul mediu al craterului cu faza lichidă pe suprafața catodului, pentru descărcarea solitară poate fi determinat cu relația:

$$d_c = \sqrt{\frac{4W}{\pi QS}}, \quad (3.7)$$

unde, $Q \geq Q_{top}$.

Cercetarea uzurii electrodului-sculă, în funcție de durata de procesare a electrozilor de oțel-45 (fig. 3.1), cu diametre diferite au arătat că, în general, pentru electrozi cu diametre mici uzura este variabilă. Acest lucru este aparent din cauza faptului că există o schimbare la suprafața electrozilor și suprafețele de piese folosite. Caracterul variabil de distrugere a electrozilor poate fi explicat, de asemenea și procesul de migrație inversă în procesul de prelucrare a suprafeței. Cu toate acestea, trebuie remarcat faptul că, în caz de creștere în diametru a electrodului-sculă există o reducere semnificativă a eroziunii. Pentru un electrod cu un diametru de 3,98 mm, eroziunea de-a lungul timpului nu se schimbă. Acest lucru se datorează probabil faptului că, la acest mod de energie de prelucrare este o răcire uniformă, dar și eficientă. În cazul în care prelucrarea este efectuată în condițiile în care este necesar pentru a procesa cu eroziune a prezis cu diametrul electrodului poate fi considerat că diametrul critic este egal cu 4 mm. În cazul în care diametrul este mai mare de 4 mm, uzura va fi chiar mai mică, deoarece condițiile de răcire a îmbunătăți sale prin conductivitate. Dacă vom analiza eroziunea electrozilor din bronz (fig. 3.1), putem vedea că caracterul general al eroziunii este observat exact ca electrozii pentru structura de oțel. Este posibil ca electrozii să fie fabricați din metale ce au proprietăți similare: capacitate de căldură mare, bună conductivitate termică, capacitatea de elemente îmbogățit de mediu, de înaltă densitate, conductivitate electrică, etc. care determină caracterul general al eroziunii electrice.

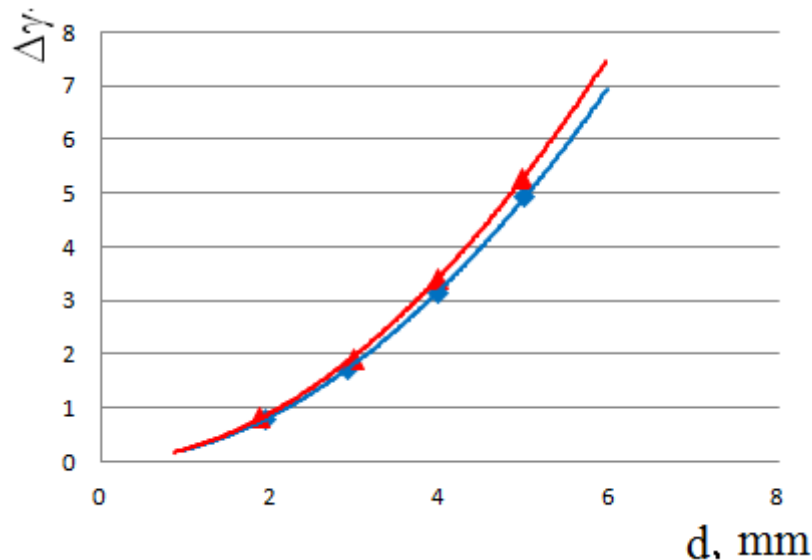
În cazul bronzurilor după 6 minute de proces de tratare pentru eroziune electrică a electrozilor este stabilizat și primește o valoare minimă. Acest lucru este aparent din cauza faptului că bronzul conține un număr mare de elemente, printre care și cuprul. Cuprul are un coeficient ridicat de acumulare de căldură.

$$B = \sqrt{c\rho\lambda}, \quad (3.8)$$

în care: c - capacitatea termică specifică;

ρ - densitatea;

λ - conductivitatea termică a materialului.



3.1. Eroziunea ES la formarea depunerilor prin rupere de contact

Parametrii regimului de lucru la durificarea prin descărcări electrice în impuls

Realizarea unei depuneri corespunzătoare din punct de vedere calitativ trebuie să țină cont de parametrii de regim care intervin în mod direct în procesul de durificare [57]:

a) parametrii electrici:

- capacitatea bateriei de condensatoare C(F);
- intensitatea curentului de lucru I (A);

b) parametrii temporali:

- durata impulsului τ (s);

c) parametrii tehnologici:

- turația electrodului n (rot/min);
- viteza de deplasare v (mm/rot);
- dimensionarea electrodului-sculă.

După caz, se pot adopta regimuri mai moderate pentru scule de finisare, în vederea obținerii unei rugozități mici și regimuri mai intense pentru sculele de degroșare la care rugozitatea nu este foarte importantă.

La alegerea regimului de lucru se ține cont și de următoarele momente:

- cu mărirea turației electrodului crește cantitatea de material depus;
- creșterea curentului și a tensiunii duc la mărirea grosimii;
- mărirea frecvenței impulsurilor determină creșterea cantității de material transferat la catod.

Rezultate experimentale privind influența marimii curentului mediu al impulsurilor asupra efectelor erozive

Următoarele rezultate s-au obținut în urma finalizării experimentelor, conform planului experimental prezentat în paragraful anterior. Rezultatele obținute permit definirea funcțiilor de proces cu ajutorul metodei analizei de regresie și a software-urilor specializate. Astfel, devine posibilă reprezentarea grafică a relațiilor existente între variabilele independente și variabilele dependente studiate.

În urma introducerii datelor experimentale în software-ul de analiză statistică Gretl, am obținut coeficienții A_0 , A_1 și A_2 ai funcției de regresie. Astfel, avem coeficientul A_0 aferent curentului de descărcare = 8,18669, coeficientul A_1 aferent timpului de impuls = 0,312739 și coeficientul A_2 aferent timpului de pauză = -0,0169214.

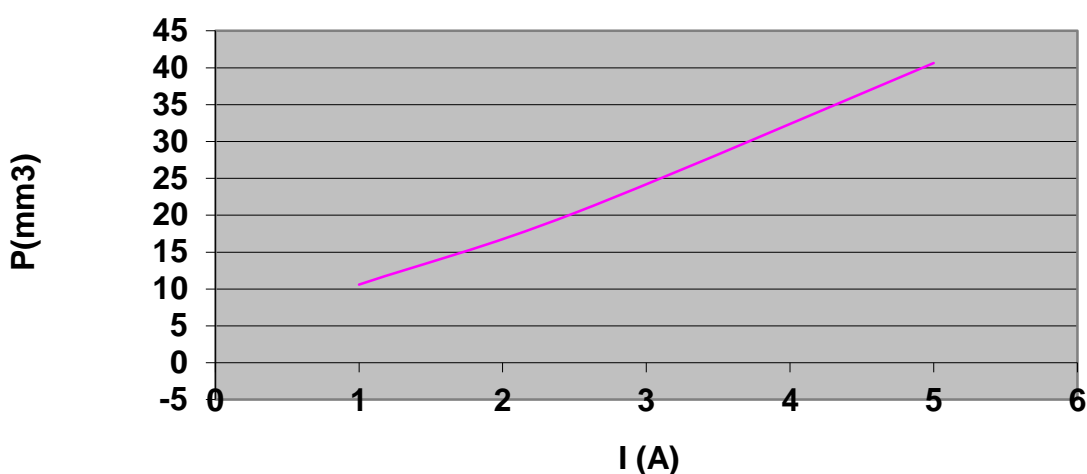


Fig. 3.2. Dependența productivității prelucrării față de curentul de descărcare

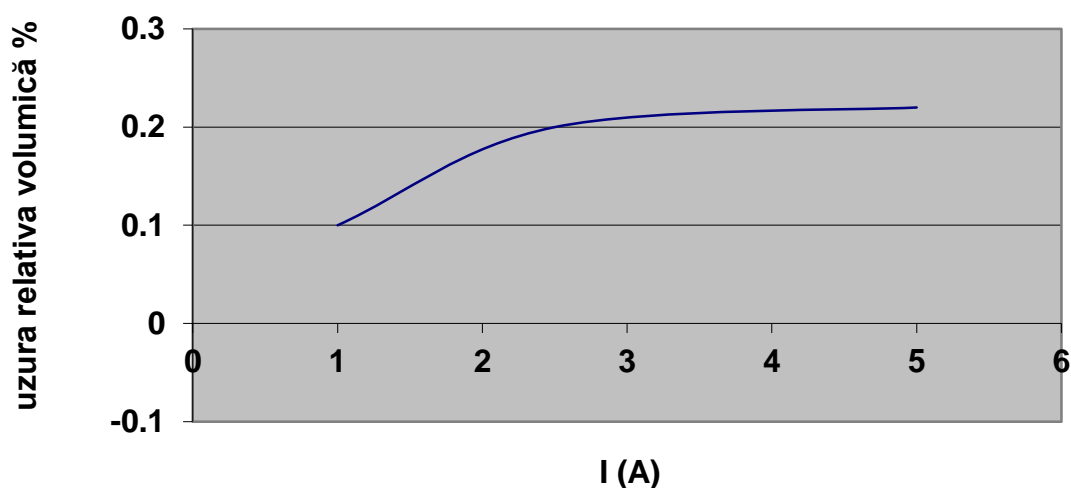


Fig. 3.3. Dependența uzurii relative volumice a electrodului față de curentul de descărcare

În figura 3.2 este reprezentată dependența productivității prelucrării față de curentul de descărcare, iar în figura 3.3 dependența uzurii relative volumice a electrodului față de curentul de descărcare. Timpul de impuls a fost de 260 microsecunde, iar timpul de pauză 180 microsecunde.

Cercetările experimentale realizate de către autorii [58, 60] au demonstrat că, pentru cazul prelucrărilor dimensionale, odată cu creșterea intensității a curentului descărcării electrice în impuls (I) crește și productivitatea prelucrării, fig. 3.8. Totodată uzura relativă a sculei Q , definită ca raportul dintre uzura absolută a sculei (V_s) și productivitatea prelucrării (V_p) scade [7]:

$$Q = \frac{V_s}{V_p} \cdot 10^2 \quad (\%). \quad (3.9)$$

Cu cât productivitatea este mai mare cu atât uzura relativă a sculei este mai mică, fapt ce se observă în fig. 3.4. Referitor la intensitatea maximă admisă există limitări impuse de natura celor doi electrozi (proprietăți termice și electrice) precum și de posibilitatea îndepărtării rapide a căldurii ce ia naștere în interstițiul de lucru.

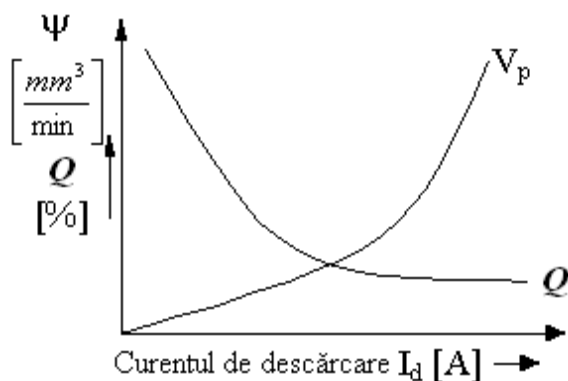


Fig. 3.4. Influența curentului de descărcare (I_d) asupra productivității Ψ procesului de eroziune și asupra uzurii relative Q a sculei [50, 51, 52]

Cu cât coeficientul de acumulare a căldurii a materialului electrozilor este mai mare, cu atât crește și rezistența lor la eroziune, iar ca rezultat productivitatea scade. În cazul organizării unei circulații intensive a lichidului dielectric ce condiționează răcirea sculei, aceasta la rândul său provoacă micșorarea uzurii sculei.

Rezultatele cercetarilor experimentale privind influența parametrilor temporari asupra intensității uzurii E-S

Menținând curentul de descărcare la o valoare constantă de 2,5 A, am analizat variația productivității prelucrării și a uzurii relative a electrodului în funcție de variația timpului de impuls și a timpului de pauză. Rezultatele obținute sunt reprezentate grafic în figurile 3.5, 3.6, 3.7 și 3.8.

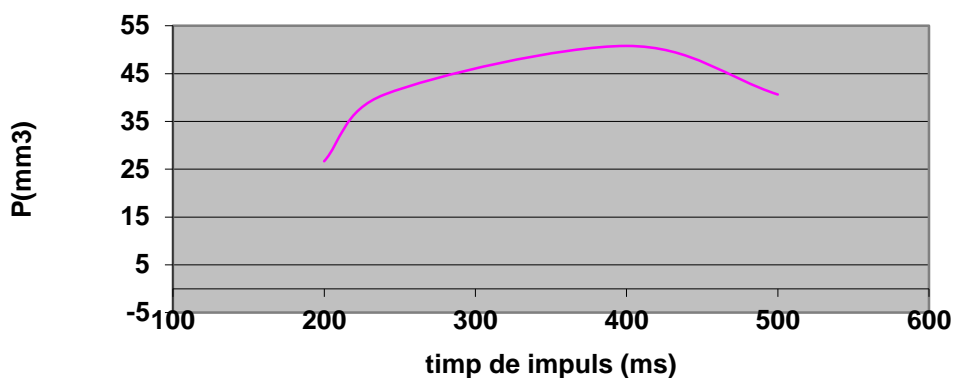


Fig. 3.5. Dependența productivității prelucrării față de timpul de impuls cu timpul de pauză constant

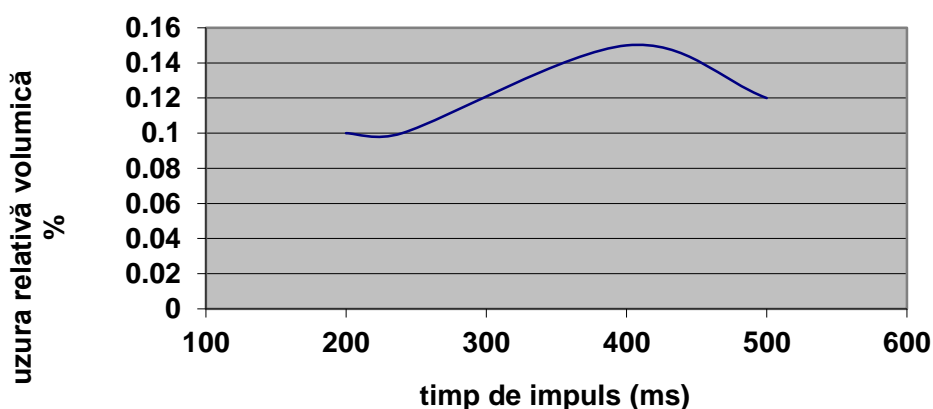


Fig. 3.6. Dependența uzurii relative volumice a electrodului față de timpul de impuls cu timpul de pauză constant

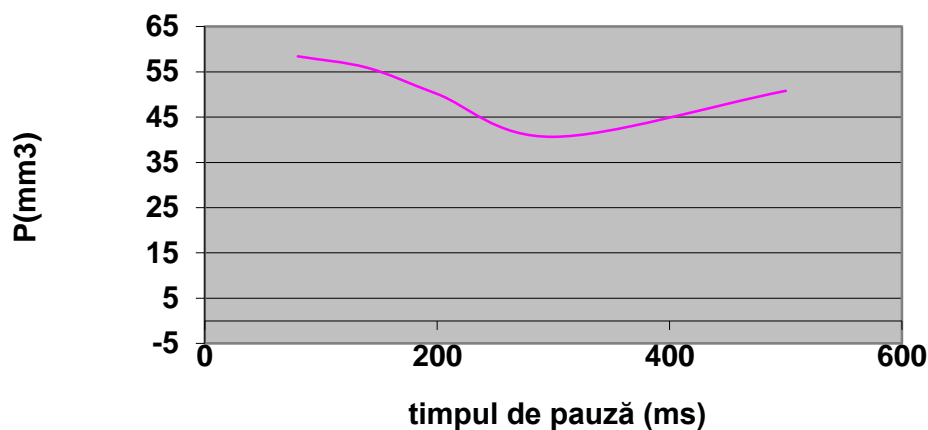


Fig. 3.7. Dependența productivității prelucrării față de timpul de pauză cu timpul de impuls constant

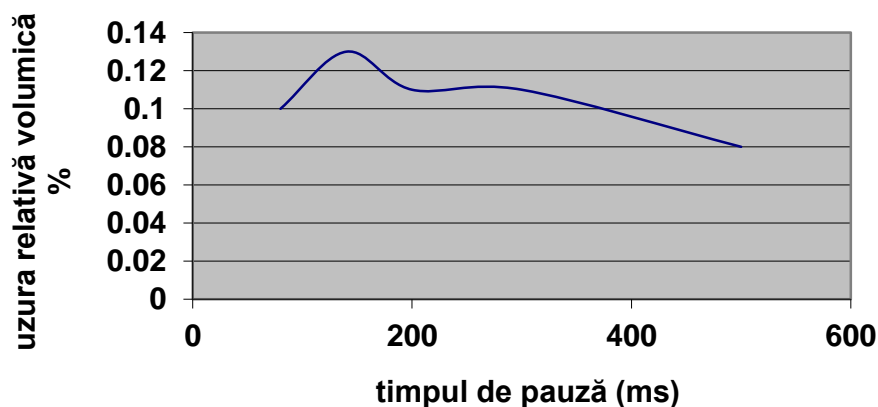


Fig. 3.8. Dependența uzurii relative volumice a electrodului față de timpul de pauză cu timpul de impuls constant

Rezultatele cercetărilor experimentale privind influența marimii interstițiului asupra intensității eroziunii E-S

Pentru cazul prelucrărilor de suprafață în condiții de aer se modifică atât comportamentul materialelor de execuție a electrozilor, cât și condițiile de funcționare a acestora.

Aprecierea cantitativă a procesului electroeroziunii electrozilor (anod sau catod) pentru descărcări solitare în cazul unor valori mici ale interstițiului ($S < 0,2 \div 0,3 \text{ mm}$) este practic imposibil de realizat din cauza transferului reciproc de masă între electrozi, formării legăturilor chimice (oxizi, nitrați ș.a.) și în deosebi, datorită schimbării foarte mici a masei probei cercetate, masa erodată la o descărcare fiind de cca ($10^{-6} - 10^{-4} \text{ g}$).

În figurile 3.9 și 3.10 sunt prezentate variațiile maselor catozilor executați din oțel și titan și, respectiv, a anozilor executați din cupru, oțel și grafit în funcție de mărimea interstițiului

la energii constante acumulate pe bateria de condensatoare a generatorului de impulsuri de curent. Pentru valori ale interstițiului de $S \leq 0,2 \div 0,3$ mm, se observă o creștere a masei catozilor (fig. 3.9) care poate fi explicată în baza prelevării și transferului preponderent a materialului anodului pe suprafața catodului. În domeniul valorilor interstițiului $S = 0,3 \div 0,8$ mm se atestă o uzură prin eroziune a catodului, iar pentru $S > 1,2 \div 1,5$ mm, uzura catodului este foarte mică.

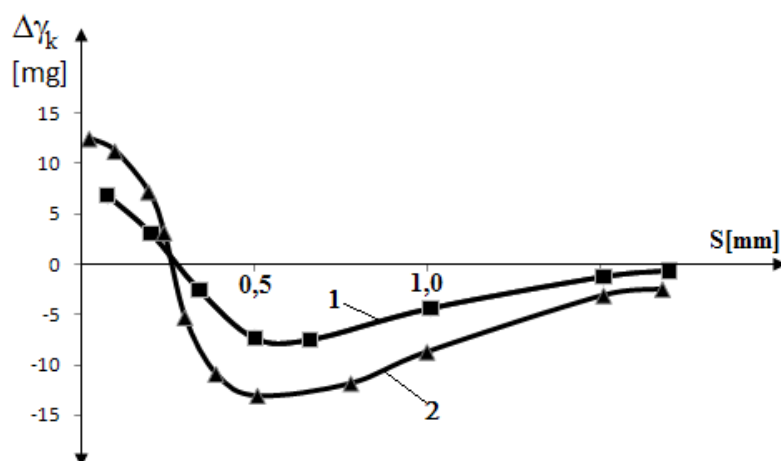


Fig. 3.9. Variația masei catodului din oțel (1) și titan (2) în funcție de mărimea interstițiului;
 $U_c=240V$; $f=40Hz$; timpul specific de prelucrare $1min/cm^2$.

Cu creșterea valorilor interstițiului se micșorează, de asemenea și eroziunea anozilor din cupru și oțel (fig. 3.10). Eroziunea anodului din grafit are un caracter diferit de cel al anozilor din oțel și cupru (fig. 3.10) și asemănător cu cel al catodului metalic (fig. 3.9).

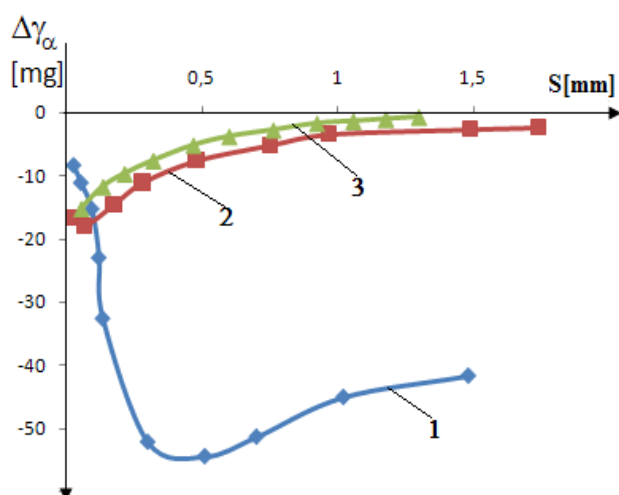


Fig. 3.10. Variația masei anodului din grafit (1), oțel (2) și cupru (3) în funcție de mărimea interstițiului; $U_c=240V$; $f=40Hz$; $t=1min/cm^2$.

Constatările experimentale prezentate mai sus pot fi explicate prin faptul că, se produc mai mult efecte concurente simultan în volume relativ mici și în durate de timp foarte scurte. Astfel în lucrările [60] a fost menționat că odată cu creșterea mărimii interstițiului are loc: redistribuirea energiei între suprafețele electrozilor și canalului de plasmă din el în favoarea ultimului; se evidențiază structura policanalică a plasmei în interstițiu, interacțiunea canalului de plasmă cu suprafețele electrozilor se realizează prin intermediul petelor electrodice „reci” și „calde” care și determină în fond caracterul eroziunii (vaporizare, topire cu prelevare de material sau interacțiune de natură termică însoțită de eroziune în stare solidă).

Dacă se ține cont de cele expuse, atunci devine evident că, starea în care se produce eroziunea este determinată de tipul petelor electrodice prin care se produce interacțiunea. În lucrările [51] a fost deja menționat că, petele electrodice „reci” poartă în sine o interacțiune cu caracter termic, pe când cele „calde” prezintă motivul topirii, vaporizării și prelevării de material. În același timp după cum s-a menționat în [52] petele electrodice sunt atât surse de căldură, cât și surse de câmpuri electrice foarte puternice (dacă pentru condițiile de prelucrare intensitatea câmpului electric pe interstițiu constituie 10^3 V/m, sub acțiunea petelor electrodice nemijlocit la suprafețele electrozilor iau naștere câmpuri electrice cu intensitatea de 10^6 V/m), căderile de tensiune anodică și catodică diferă atât după semn (prima este negativă, iar cea de a doua este pozitivă) cât și după valoarea absolută (cea anodică este de câteva ori mai mare decât cea catodică și se exprimă cu raportul $\Delta\gamma_a/\Delta\gamma_k$) fapt prin care se explică atât cantitatea de material topit și prelevat diferit de pe suprafețele anodului și catodului în condițiile aceleiași descărcări.

Astfel pentru una și aceeași energie acumulată pe bateria de condensatoare, numai prin modificarea mărimii interstițiului se poate trece la trei tipuri distincte de interacțiuni: topire și cu vaporizare; topire cu prelevare în stare lichidă și interacțiune termică; numai interacțiune termică.

În conformitate cu teoria electroeroziunii, de pe suprafața anodului materialul este prelevat sub formă de picături ionizate sau de ioni pozitivi, pe când din cea a catodului sunt emiși în esență electroni. Aceste constatări nu sunt valabile și pentru electrodul executat din grafit utilizat în calitate de catod. Dacă analizăm caracterul eroziunii electrodului executat din grafit (fig. 3.10, a) atunci se observă evident că, acesta este total diferit în raport cu eroziunea masivă a materialelor metalice. Acest fenomen poate fi explicat în baza modelului de electroeroziune a grafitului elaborat în lucrarea [60]. Dacă ținem cont de faptul că, procesul electroeroziunii este unul electrochimic, ce decurge la temperaturi înalte, atunci putem presupune că procese recombinatorice și disociative au loc, atât la suprafața electrodului-anod a electrodului-catod, cât și în canalul de plasmă.

Reeșind din condițiile reale (mediul de lucru aer, la presiunea atmosferică), am putea presupune că, datorită faptului că oxigenul din canalul de plasmă interacționează mai intensiv cu

suprafața electrodului-catod, au loc reacții de oxidare cu degajarea oxidului de carbon CO și posibil formarea bioxidului de carbon CO₂ conform reacțiilor (fig. 3.10, b):



3.5. Influența mărimii energiei acumulate pe baterieea de condensatoare asupra eroziunii electrodului-sculă (regim de subexcitare)

După cum a fost menționat mai sus, în procesul prelucrării prin electroeroziune fie prelucrare dimensională sau formarea straturilor de depunere, are loc prelevarea anumitei cantități de material de pe suprafața electrodului-sculă. Datorită acestui fapt electrodul-sculă își schimbă dimensiunile sale ceea ce duce la micșorarea preciziei de prelucrare. Reșind din aceste considerente pentru sporirea preciziei de prelucrare, prealabil este necesar de ales corect materialul electrodului-sculă și de selectat un regim energetic la care uzura acestuia va fi minimă.

În continuare se precaută influența energiei acumulate pe bateria de condensatoare asupra uzurii electrodului-sculă. Cu acest scop, cum a fost menționat mai sus, au fost selectate patru valori ale energiei acumulate pe bateria de condensatoare: 0,5J; 1J; 1,5J; 2J.

În figurile 3.11, 3.12 și 3.13 se prezintă dependențele uzurii electrozilor-sculă confecționați din diferite materiale conductibile. După cum se poate observa din aceste dependențe, uzura electrozilor-sculă crește în toate cazurile cu creșterea energiei acumulate pe baterieea de condensatoare.

Cea mai intensivă uzură (eroziune electrică) a electrodului-sculă se observă pentru cazul când acesta este confecționat din grafit. Acesta poate fi explicat prin faptul că, acest material nu este un metal, iar legăturile dintre constituienții lui sunt de tip Wan der Wales (legături slabe). În același timp este necesar a menționa că, grafitul interacționează cu plasma și orice punct de vedere chimic (este activ la oxidare) ceea ce produce suplimentar eroziunea lui.

În cazul electrodului-sculă confecționat din W, variația uzurii acestuia în funcție de energia acumulată pe bateria de condensatoare este destul de mică. Fenomenul dat se lămurește prin aceea că temperatura de topire a wolframului este destul de mare și constituie aproximativ 3337 °C.

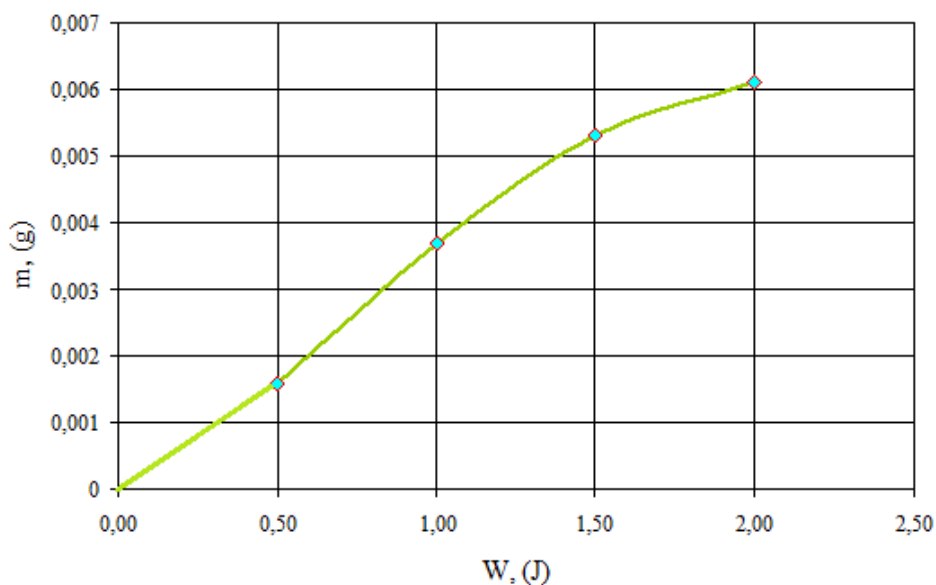


Fig. 3.11. Variația uzurii electrodului-sculă confecționat din Cu în funcție de energia acumulată pe baterie de condensatoare:

(partea activă a electrodului-sculă are forma unei semisfere)

În afară de aceasta este necesar de menționat, că pentru toate încercările, electrozii-scule confecționați din diferite materiale conductibile serveau în calitate de anod, ceea ce la rândul său joacă un rol nu mai puțin important pentru sporirea preciziei de prelucrare. Din analiza surselor bibliografice s-a constatat că practic în toate cazurile prelevarea materialului de pe suprafața anodului este mai pronunțată în raport cu prelevarea materialului de pe suprafața catodului.

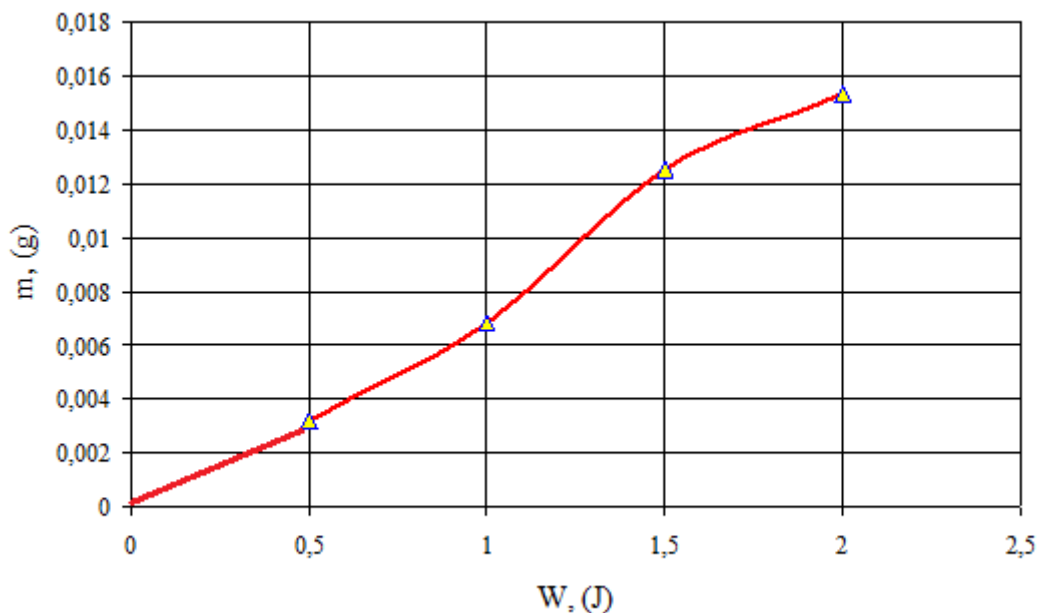


Fig.3.12. Variația uzurii electrodului-sculă confecționat din grafit în funcție de energia acumulată pe baterie de condensatoare:

(partea activă a electrodului-sculă are forma unei semisfere)

Rezultă că, în funcție de procedeul de prelucrare, fie, prelucrarea dimensională a materialelor sau formarea straturilor de depunere este necesar a alege corect polaritatea de conectare a electrozilor-sculă în conturul de descărcare.

Pentru compararea calitativă a uzurii electrozilor-scule confecționați din diferite materiale conductibile în raport cu variația energiei acumulate pe baterea de condensatoare dependențele sus precăutate le vom prezenta pe un singur grafic fig. 3.6.

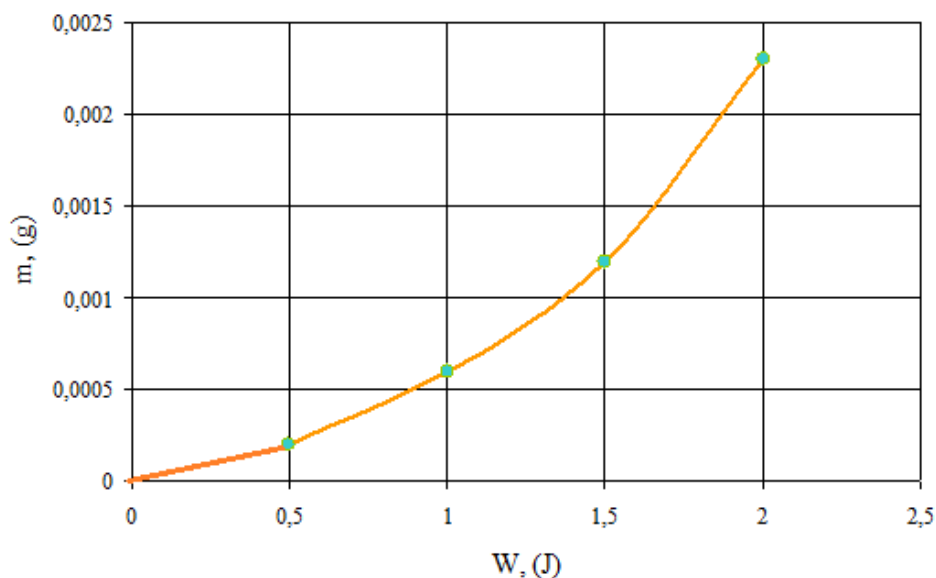


Fig. 3.13, Variația uzurii electrodului-sculă bară confecționat din W în funcție de energia acumulată pe baterea de condensatoare: (partea activă a electrodului-sculă are forma unei semisfere)

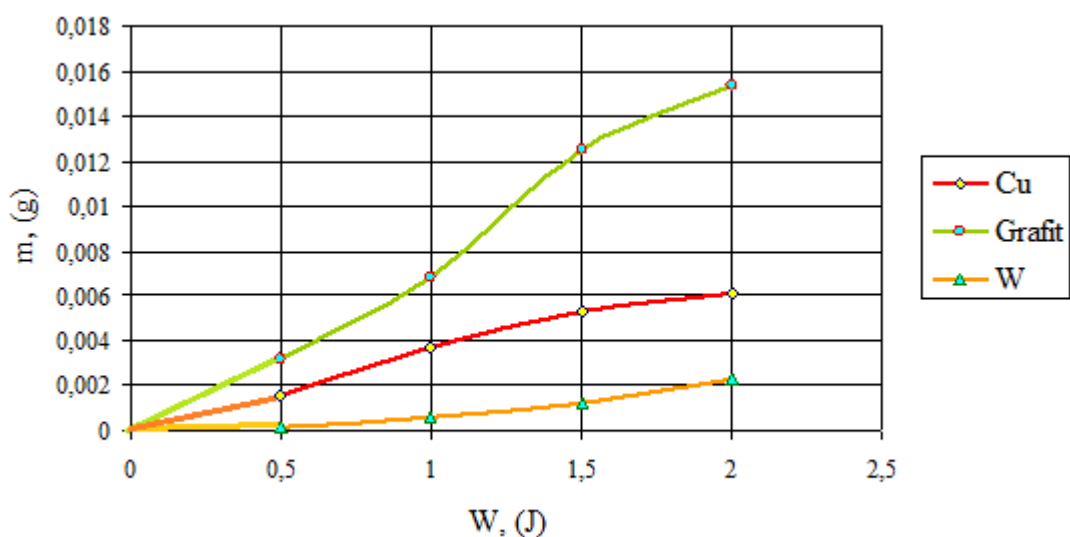


Fig. 3.14. Variația uzurii electrozilor-sculă confecționați din diferite materiale conductibile în raport cu energia acumulată pe baterea de condensatoare: (partea activă a electrozilor-sculă are forma unei semisfere)

După cum a fost menționat mai sus, cercetările au fost supuse nu numai electrozii-sculă cu suprafața activă ascuțită până la semisferă dar și electrozi-sculă cu partea activă ascuțită sub formă de con. Acest lucru a fost realizat în scopul determinării influenței geometriei suprafeței de lucru a electrodului-sculă asupra uzurii acestuia.

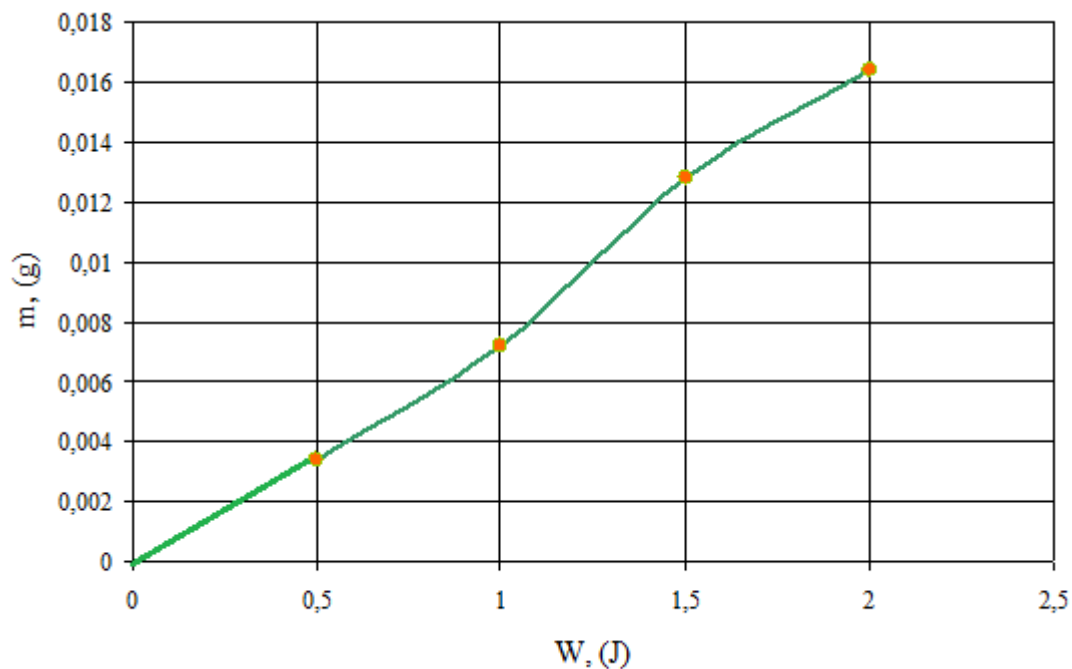


Fig.3.15. Variația uzurii electrodului-sculă confecționat din grafit în funcție de energia acumulată pe baterea de condensatoare: (partea activă a electrodului-sculă are forma unui con)

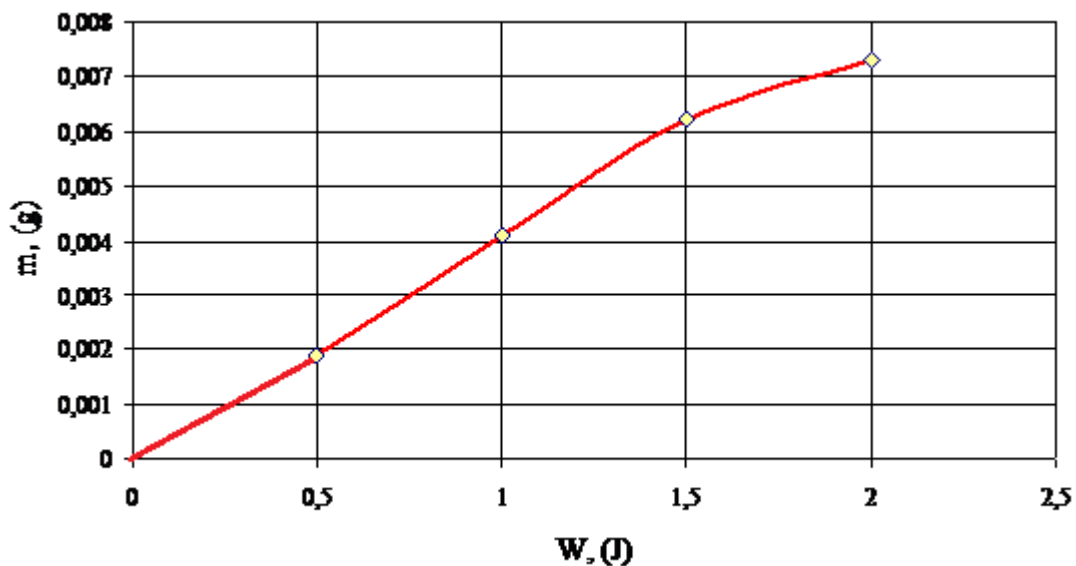


Fig.3.16. Variația uzurii electrodului-sculă confecționat din Cu în funcție de energia acumulată pe baterea de condensatoare: (partea activă a electrodului-sculă are forma unui con)

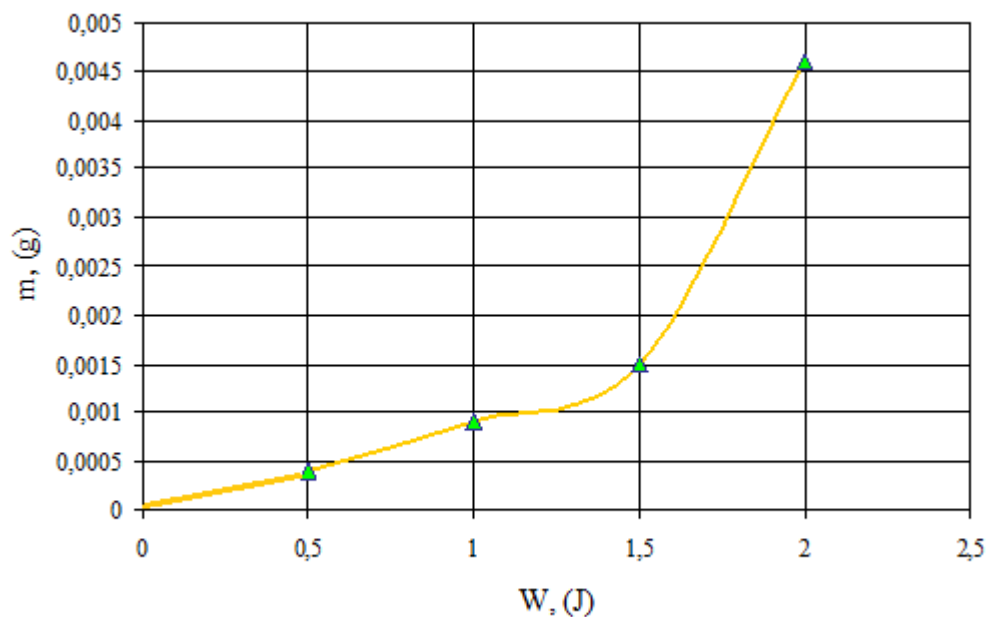


Fig.3.17. Variația uzurii electrodului-sculă confecționat din W în funcție de energia acumulată pe baterieea de condensatoare: (partea activă a electrodului-sculă are forma unui con)

În figura 3.18 se prezintă variația uzurii electrozilor-sculă pentru toate trei materiale în raport cu variația energiei acumulate pe bateria de condensatoare.

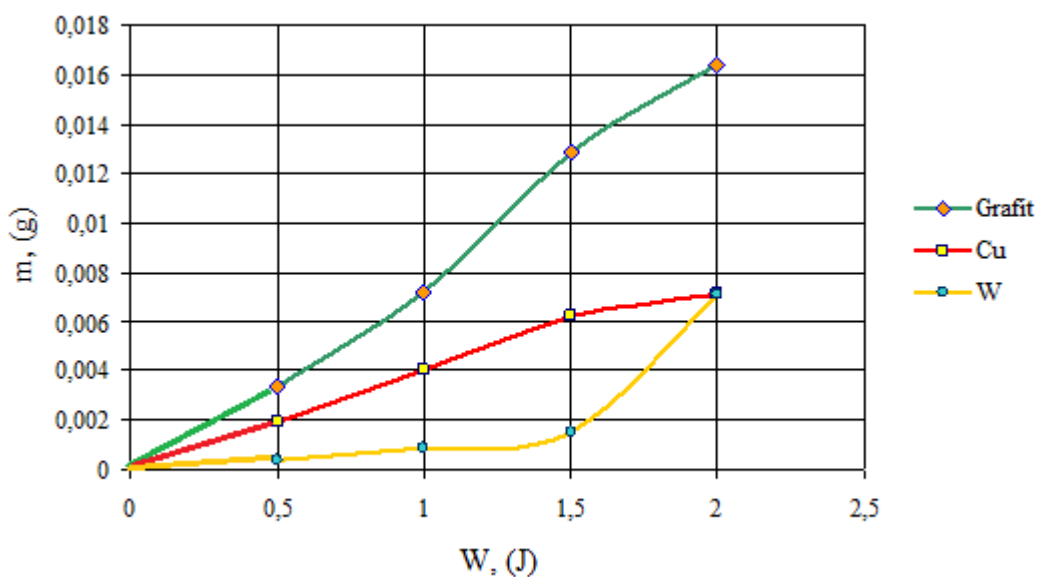


Fig.3.18. Variația uzurii electrozilor-sculă confecționați din diferite materiale conductibile în raport de energia acumulată pe baterieea de condensatoare: (partea activă a electrodului-sculă are forma unui con)

Din analiza rezultatelor obținute în urma cercetărilor experimentale se poate menționa că uzura electrozilor-sculă depinde nu numai de parametrii energetici și materialul din care sunt confecționați aceștia, dar și de geometria suprafețelor active ale acestora.

Influența intensității eroziunii E-S în funcție de forma geometrică capatului activ al E-S

Mai jos în figurile 3.15, 3.16 și 3.17 se prezintă dependențele uzurii electrozilor-sculă cu părțile active ascuțiți prealabil sub formă de con în raport cu variația energiei acumulate pe bateria de condensatoare. Cum și în cazul precedent, se observă că uzura electrozilor-sculă bară ascuțiți sub formă de con crește cu creșterea energiei acumulate pe baterea de condensatoare. În afară de aceasta, s-a observat că în acest caz uzura electrozilor-sculă este puțin mai intensivă decât în cazul când corpul de lucru a acestora este ascuțit sub formă de emisferă.

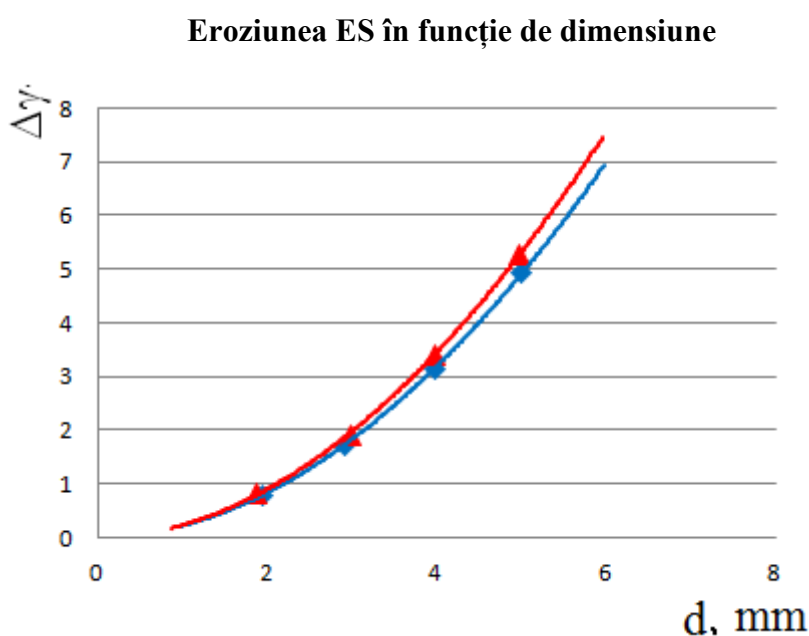


Fig. 3.19. Curbele comparativă a eroziunii electrice a electrozilor din oțel și bronz, în funcție de diametrul și frecvența de lucru

În construirea dependenței de eroziune a electrodului în funcție de diametrul (fig. 3.19) ar fi mai bine să vorbesc despre dependența de eroziune electrică, de masa electrodului deoarece, în ambele cazuri, electrozii au fost făcuți din același material (oțel-45 sau bronz) de formă cilindrică, cu diferite diametre și lungimi egale. Din aceasta rezultă și schimbarea masei fiecărui electrod. Din analiza acestei dependențe, rezultă că formarea depunerilor de material compact (sârmă), este de dorit de a utiliza electrozi cu diametrul cel mai mic, iar formarea depunerilor din pulberi fără participarea materialului electrodului este mai bine să utilizați

electrozi cu diametre mai mari (de sîrmă sau tije), și ar fi mai corect să vorbim mai mult despre secțiunile transversal mari.

Din ultima figură putem observa că, pentru electrozii de oțel dimensiunea transversală (diametrul) afectează în mod semnificativ mai mult cu privire la natura de eroziune electrică decât pentru electrozii din bronz. Acest lucru poate fi explicat, valori mai mari pentru proprietățile termofizice ale acestuia din urmă.

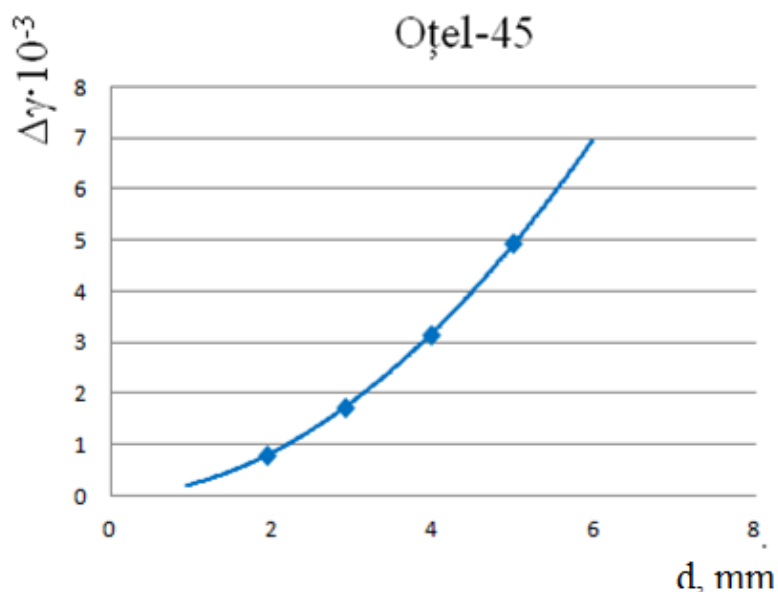


Fig. 3.20 (a). Viteza relativă de eroziune electrică a rezistivității electrodului-sculă de timpul de procesare pentru electrozii din oțel-45 cu diametrele de 1,93, 2,97, 3,98 și 2,9mm

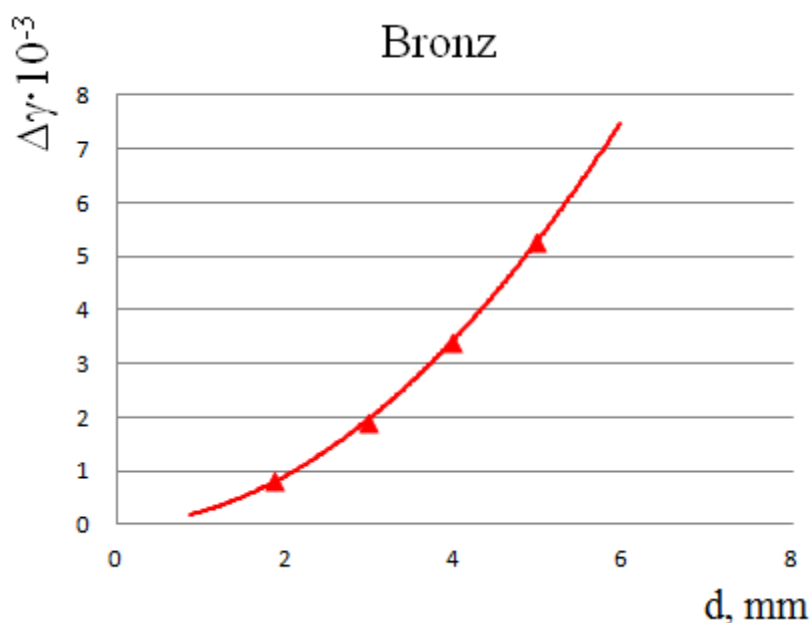


Fig. 3.20 (b). Viteza relativă de eroziune electric a rezistivității a electrodului-sculă de timpul de procesare pentru electrozii din bronz cu diametrul de 1,87, 2,97, 3,96 și 4,96

Dependența eroziunii în funcție de materialul de execuție

Rezultatele cercetării eroziunii masei catodice la prelucrarea suprafețelor metalice cu aplicarea DEI în medii gazoase în funcție de materialul de execuție a electrozilor-scule este prezentată în fig. 3.21. După cum se observă din fig. 3.21 dependența poartă un caracter parabolic, fiind cea mai pronunțată la wolfram, iar cel mai rezistent la eroziune electrică – oțel inox.

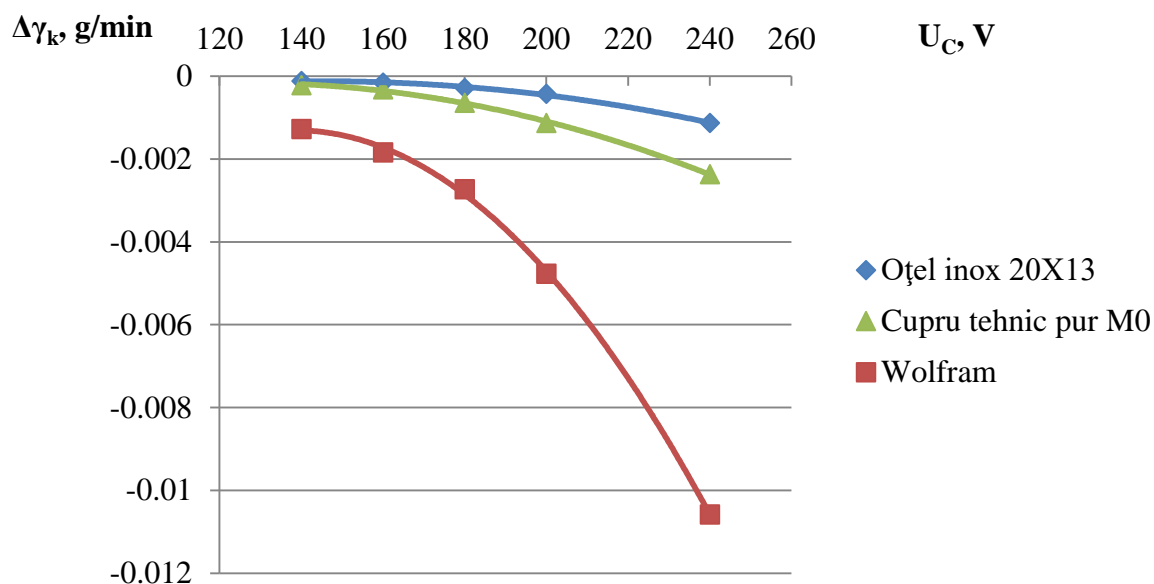


Fig. 3.21. Dependența eroziunii masei catodice de tensiune de încărcare a bateriei de condensatoare a generatorului de impulsuri funcție de materialul de execuție a electrodului-sculă

Eroziunea mai esențială a catodului din wolfram se datorește oxidării mai intensive a suprafeței lui active, ceea ce duce la distrugerea (prin rupere) a masei de material mai mare. Pentru evitarea acestui neajuns se propune a utiliza electrozii din wolfram în medii de prelucrare inerte.

Necătînd la faptul că la prelucrarea prin eroziune electrică în medii lichide cel mai des se utilizează aliajele cuprului și fontele, în cazul prelucrării în medii gazoase crește esențial eroziunea prin oxidare a suprafeței lor active.

Dependența eroziunii în funcție de regimul energetic

Influența regimului energetic de prelucrare (s-a schimbat tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare a generatorului de impulsuri) asupra eroziunii electrozilor-scule-catozi sunt prezentate în fig. 3.22-3.24.

După cum se observă din aceste figuri dependența poartă un caracter liniar, adică cu creșterea duratei de prelucrare eroziunea masică a electrozilor crește liniar.

Cu creșterea valorii tensiunii de încărcare a bateriei de condensatoare crește și enegia care se degajă în interstițiu și pe suprafața electrozilor, ceea ce duce la intensificarea procesului de eroziune electrică.

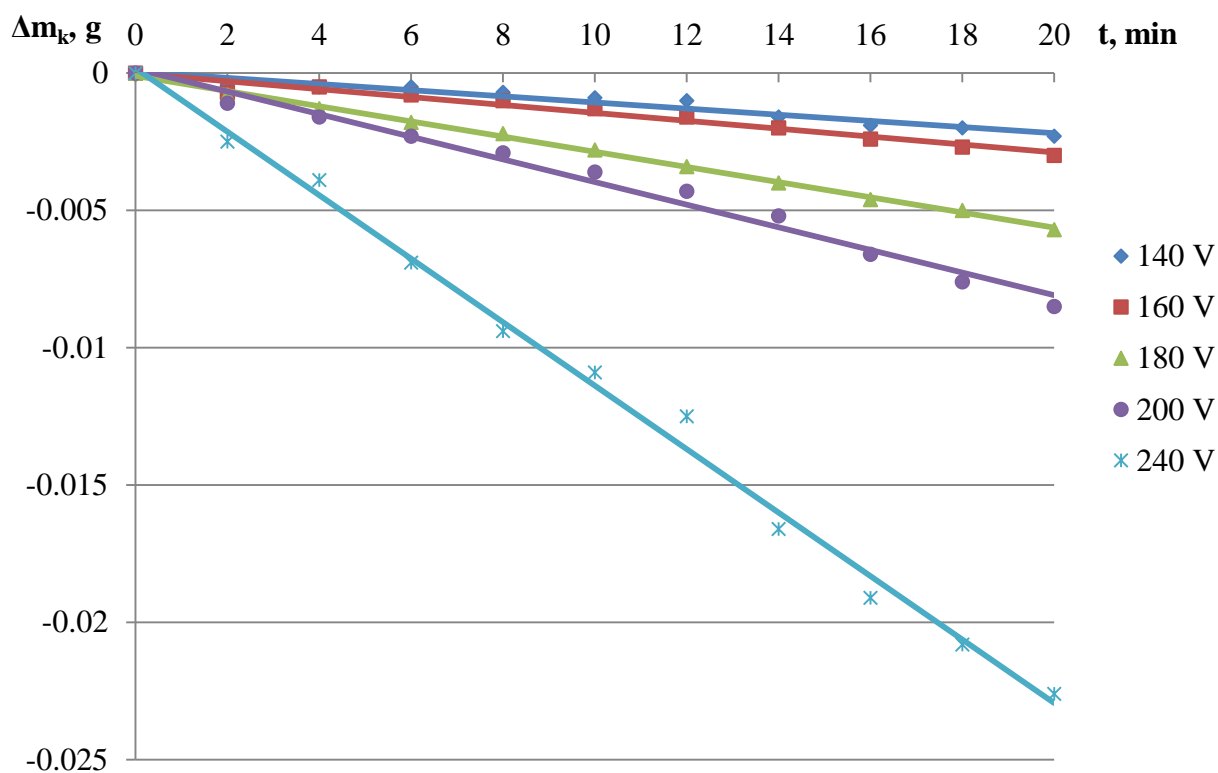


Fig. 3.22. Eroziunea masei electrodului-sculă-catod din oțel inox 20X13 funcție de regimul energetic de prelucrare (tensiune de încărcare a bateriei de condensatoare a generatorului de impulsuri)

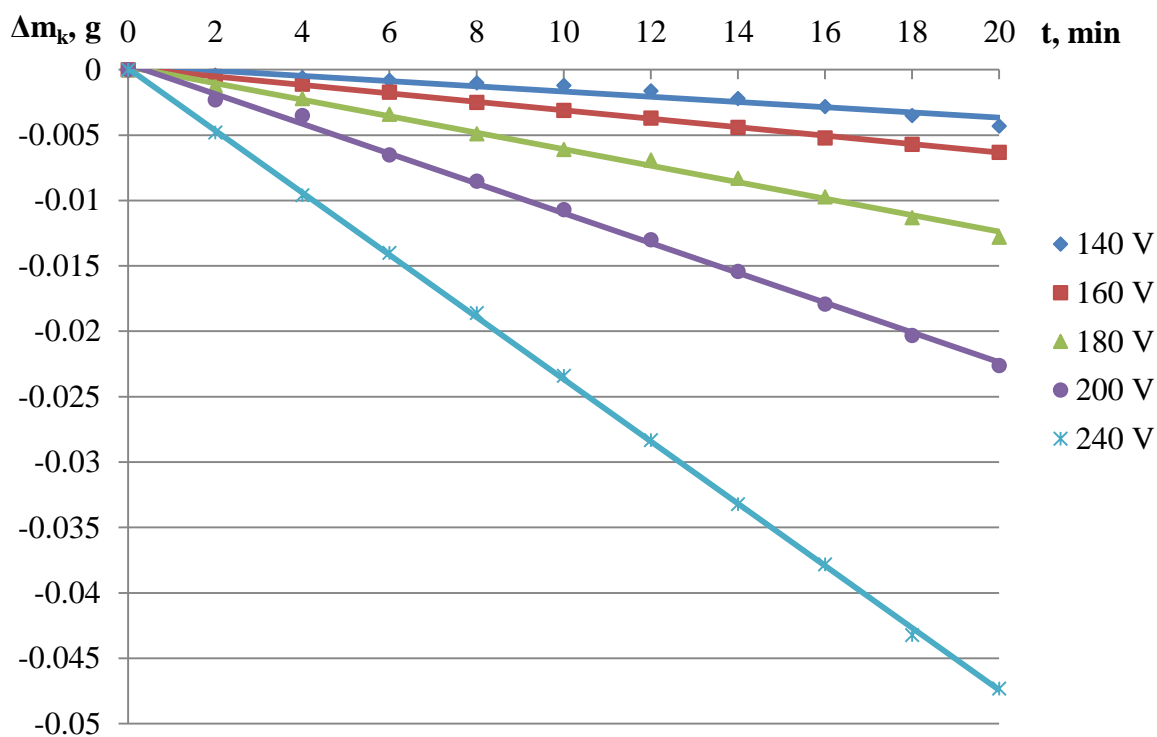


Fig. 3.23. Eroziunea masei electrodului-sculă-catod din wolfram funcție de regimul energetic de prelucrare (tensiune de încărcare a bateriei de condensatoare a generatorului de impulsuri)

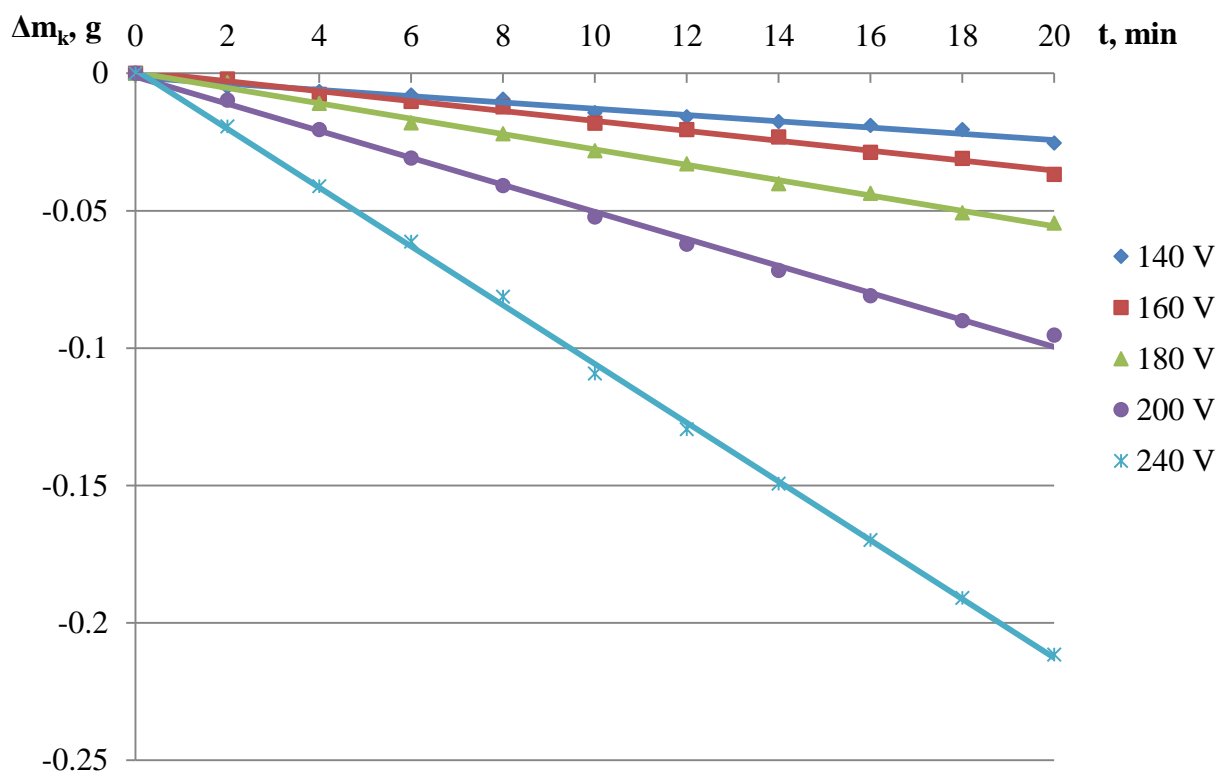


Fig. 3.24. Eroziunea masei electrodului-sculă-catod din cupru tehnic pur M0 funcție de regimul energetic de prelucrare (tensiune de încărcare a bateriei de condensatoare a generatorului de impulsuri)

Concluzii la capitolul III

Din cele expuse mai sus putem concluda că:

- electrozii-scule utilizați în toate cazurile servesc pentru a introduce energia de efect de la generator în interstițiul format de piesă și sculă;
- uzura electrozilor-scule se datorează următorilor factori și condiții: proprietățile fizico-mecanice și termice ale materialului de execuție, particularitățile micro sau macrogeometrice ale suprafețelor sculei și piesei, parametrilor electrici și neelectrici a regimului de prelucrare, proprietăților mediului de lucru și procedului de prelucrare;
 - la proiectarea electrozilor-scule se va ține cont de condițiile de funcționare (mediul de lucru, parametrii temporali, regimul energetic de prelucrare și procedeul de realizare);
 - în cazul, cand este necesară minimalizarea sau omiterea eroziunii E-S în procesul de prelucrare, forma electrodului-sculă îi va permite funcționarea astfel ca suprafața de lucru a acesteia să se relaxeze timp de câteva cicluri de prelucrare;
 - materialele pentru elaborarea electrodului-sculă vor întruni condițiile impuse de procedeul de prelucrare (proprietățile stratului de depunere, tratarea termico-chimică cu sau fără influența compoziției suprafeței, curățarea sau modificarea microgeometriei suprafeței prelucrate);
 - dimensiunile electrodului-sculă sunt funcție de dimensiunile suprafeței de prelucrat și regimul energetic de prelucrare, cat si materialul de executie si condițiile de racire;
 - electrozii-scule pot fi de formă cilindrică, sferică, conică sau combinații a formelor geometrice și sunt executați dintr-o bucată sau compuse din diferite materiale.

IV. CRITERII DE PROIECTARE A ELECTROZILOR-SCULE APLICAȚI LA FORMAREA STRATURILOR DE SUPRAFAȚĂ CU DESCĂRCĂRI ALECTRICE ÎN IMPULS

Una din metodele contemporane de prelucrare a materialelor, este cea a electroeroziunii [12]. Ea permite realizarea pieselor de forme complicate și dimensiuni mici prin prelevare de material de pe suprafața semifabricatului [12, 13], sau formarea straturilor de depunere cu aplicarea electrozilor executați [7, 52, 63] din materiale compacte sau prin introducerea în spațiul de lucru a pulberilor [7, 48] sau amestecurilor de pulberi [64]. Această metodă de prelucrare dispune de anumite priorități față de metodele clasice și anume: poate realiza prelucrarea tuturor materialelor conductibile de electricitate indiferent de proprietățile fizico-mecanice ale acestora [12, 13]; este simplu realizabilă în practică prin ajustarea mașinilor-unelte existente la noile condiții de funcționare și dotarea acestora cu surse de impulsuri de curent, sculele și dispozitivele specifice necesare [17]; nu necesită pregătiri speciale ale suprafețelor înainte de prelucrare [48]; asigură precizie înaltă de prelucrare a suprafețelor și rugozitate joasă [65], etc.

Necătfînd la atuurile acestei metode enumerate mai sus implementarea ei pe larg în industria constructoare de mașini, aparate și scule, nu a atins nivelul necesar din cauza productivității relativ joase a prelevării de material (de cca mm^3/min [60, 65, 66]) la prelucrarea dimensională a pieselor și respectiv a intensității relativ scăzute a sporului de masă a pieselor (de cca $1,2 \text{ g/min}$ [7, 67, 68]) la formarea straturilor de depunere. Chiar dacă aplicarea surselor suplimentare de energie asupra interstițiului [72], sporirea frecvenței descărcărilor electrice în impuls și energiei acestora [71], aplicarea asupra interstițiului a câmpurilor electrice și magnetice [69, 72, 73], a radiațiilor laser [70] etc. au permis întrucâtva a spori performanțele metodei menționate de prelucrare a materialelor, aceasta nu este suficient pentru a susține că, a avut loc un salt calitativ și cantitativ în acest domeniu.

Un loc aparte în dezvoltarea de mai departe a acestor tehnologii le revine proiectării și elaborării electrozilor-scule, care trebuie să asigure precizia înaltă și productivitatea sporită de prelucrare. Electrozii-scule trebuie să dispună de o rezistență înaltă la electroeroziune și să asigure formarea suprafețelor de o configurație complicată, din care motiv pentru proiectarea lor este necesară determinarea criteriilor de proiectare a acestora. Asigurarea rezistenței înalte la electroeroziune este funcție de proprietățile materialului de fabricare a sculei și condițiile de răcire a acesteea în procesul prelucrării.

4.1. Criterii propuse de proiectare a electrozilor-scule

Reeșind din cele expuse mai sus privind influența diferitor factori asupra proceselor erozive și intensitatea acestora, din destinația electrozilor-scule pentru prelucrarea dimensională, celor pentru formarea straturilor de depunere și tratare termică, și chimico-termică a suprafețelor cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls pentru proiectarea electrozilor-scule pot fi înaintate următoarele criterii:

- **formeii** – care este determinat de caracterul suprafeței prelucrate (de obicei la formarea straturilor de depunere și tratarea termică superficială este necesar a menține interstițiul constant). În acest caz acest deziderat poate fi realizat pe două căi: prima prin înnoirea permanentă a suprafeței de lucru la deplasarea unei sârme prin depănarea ei pe o rolă și cea de a doua prin realizarea sculei și formeii de disc rotitor prin asigurarea demarării fiecărei descărcări premergătoare de pe o nouă porțiune de suprafață;

- **materialul – de execuție** (acesta presupune aplicarea unui material cu un coeficient mare de acumulare a căldurii, care va asigura în aceleași condiții un timp mult mai mare de topire – care va depăși durata descărcării electrice în impuls);

- **vitezei de deplasare a suprafeței de lucru** (acesta va fi mai mare decât viteza de deplasare a petelor electrodice „reci” orientativ în conformitate cu [74, 75] cca $10 \dots 10^2$ cm/s);

- **răcirii**- în procesul de prelucrare (de obicei în procesul prelucrării electrodul-sculă se încălzește datorită acumulării căldurii la repetarea descărcărilor electrice, și aceasta poate condiționa procese erozive sau dilatare termică din care motiv se modifică atât regimul de prelucrare cât și interstițiul) care poate fi realizată prin organizarea răcirii cu mediu lichid ce va circula prin interiorul corpului sculei sau prin execuția unui disc de dimensiuni masive; răcirea poate fi executată și prin dotarea cu o sistemă de insuflare a gazelor răcitoare inerte sau a celor de saturare a suprafeței prelucrate;

- **compatibilității materialului sculei cu cel al pulberii** în cazul formării straturilor de depunere;

- **conjugării suprafeței sculei cu celei a piesei prelucrate** când prelucrarea se execută în regim static și canalul descărcării migrează atât pe suprafața piesei, cât și pe a sculei.

4.2. Alegerea formeii și materialul electrodului pentru formarea depunerilor din pulberi

Pentru confecționarea electrodului este necesar de ales un material mai rezistent la eroziune, deoarece uzarea electrodului implică la schimbarea interstițiului dintre electrozi, iar aceasta la rândul său conduce la nerespectarea procesului tehnologic de prelucrare. În

conformitate cu rezultatele obținute anterior de către autorul [76]. Stabilitatea la eroziune a materialelor se determină de proprietățile termofizice ale lor:

$$\gamma = C\rho\lambda T_{mn}^2, \quad (4.1)$$

în care: C - capacitatea termică;

ρ - densitatea;

λ - conductibilitatea termică corespunzător;

T_{mn}^2 - temperatura de topire.

Conform acestor indici mai bine s-ar potrivi Cu, W și grafitul, iar cel mai bine compoziția CuW. Însă wolframul curat se aplică rar în industrie, iar aliaje speciale nu se produc, de aceea s-a ales cuprul M-3 cu grosimea de 2mm.

Pe de altă parte în procesul formării depunerilor din pulberi, materialul pulverulent poate să se depună și pe anod cum a fost indicat anterior în lucrarea [76]. Cauzele depunerii pulberilor pe suprafața anodului sunt următoarele: încălzirea puternică a capului de lucru a electrozului (se utilizează electrod conic cu unghiul la vârf de 60°), micșorarea de către particule a interstițiului dintre electrozi la utilizarea câmpului electric continuu. Din această dependență se vede că în cazul unor condiții egale mai bine se comportă iarăși cuprul.

Pentru alegerea formei electrozului se impune condiția ca, fiecare descărcare ce se recepționează să se înceapă de la o nouă suprafață rece. Cel mai bine satisface această condiție forma de disc sau de sârmă rezultată de disc, deoarece cunoscând frecvența impulsurilor de lucru și diametrul zonei de interacțiune a descărcării pe suprafața electrozului, se poate determina viteza lui liniară cu relația:

$$V=fd \quad (4.2)$$

În care: f – frecvența succesiunii impulsurilor de lucru;

d – diametrul zonei de interacțiune a canalului de plasmă cu suprafața electrozului.

Frecvența impulsurilor de lucru se stabilește la generator, iar d – diametrul zonei de interacțiune a descărcării unitare pe anod, se calculează cu relația:

$$d = \sqrt{\frac{4W}{QS}} \quad (4.3)$$

sau se determină experimental.

În relația (4.2) $W = \int_0^{\tau} i(t)U(t)dt$ - energia degajată în interstițiu, $Q = q\rho$ - căldura de

topire, S – mărimea interstițiului.

Rezultate experimentale

O primă serie de cercetări experimentale are ca obiectiv stabilirea unui model empiric capabil să sublinieze influența exercitată de unii factori de intrare (dimensiunea spațiului, debitul pulberii, energia pulsului și densitatea energetică asupra cantității (masei) materialului depus.

Ca material pentru depunere, s-a utilizat carbură de bor. Dimensiunile factorilor de intrare și ale parametrului de ieșire sunt prezentate în tabelul 4.1.

Tabelul 4.1. Rezultatele experimentale

Nr. exp.	Dimensiunile factorilor de intrare				Dimensiunea medie a masei de material depus, Δm , g
	Mărimea interstițiului, S , mm	Debitul de pulberi, P , mg/min	Energia, W , J	Densitatea energiei, δ , J/mm	
1	1.5	3.1	4.3	9.25	0.408
2	1.5	0.3	4.3	9.25	0.438
3	0.3	3.1	4.3	9.25	0.410
4	0.3	0.3	4.3	9.25	0.440
5	0.9	1.7	7.8	2	0.683
6	0.9	1.7	0.8	16.5	0.415
7	0.9	1.7	0.8	2	0.320
8	0.9	1.7	4.3	9.25	0.532
9	1.5	1.7	4.3	16.5	0.508
10	1.5	1.7	4.3	2	0.413
11	0.3	1.7	4.3	16.5	0.510
12	0.3	1.7	4.3	2	0.415
13	0.9	3.1	7.8	9.25	0.678
14	0.9	3.1	0.8	9.25	0.315
15	0.9	0.3	7.8	9.25	0.708
16	0.9	0.3	0.8	9.25	0.345
17	0.9	1.7	4.3	9.25	0.532
18	1.5	1.7	7.8	9.25	0.663
19	1.5	1.7	0.8	9.25	0.300
20	0.3	1.7	7.8	9.25	0.665
21	0.3	1.7	0.8	9.25	0.615
22	0.9	3.1	4.3	16.5	0.522

23	0.9	3.1	4.3	2	0.428
24	0.9	0.3	4.3	16.5	0.553
25	0.9	0.3	4.3	2	0.458
26	0.9	1.7	4.3	9.25	0.532

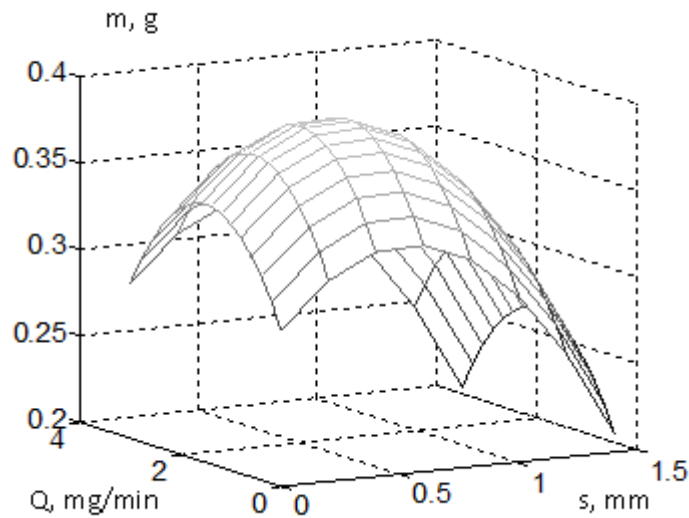


Figura 4.1. Influența exercitată de dimensiunea interstițiului S și de debitul pulberii P asupra masei stratului depus ($W = 4,3 \text{ J}, = \text{J} / \text{mm}$)

Rezultatele experimentale au fost prelucrate prin software bazat pe metoda celor mai mici pătrate [77]. Astfel, a fost determinată următoarea relație:

$$m = 0.212 + 0.162s - 0.115s^2 + 0.0790P - 0.0264P^2 + 0.0134W - 0.00354W^2 + 0.0122\delta - 0.000319\delta^2 \quad (4.4)$$

Pentru a obține o imagine mai directă cu privire la influența exercitată de factorii de intrare asupra parametrului de ieșire, funcția de tip putere a fost determinată prin utilizarea aceluiași rezultate experimentale:

$$m = 0.314s^{-0.0530}P^{-0.00386}W^{0.216}\delta^{0.0579} \quad (4.5)$$

Analizând relația (5) se poate concluziona că pentru domeniul experimental investigat, masa m a materialului depus diminuează la creșterea mărimii spațiului s și crește la creșterea energiei W și a densității energetice δ . Cea mai mare influență este exercitată de energia W, deoarece exponentul atașat la acest factor (0,216) are cea mai mare dimensiune absolută.

Unele reprezentări grafice elaborate prin luarea în considerare a relației (4.4) sunt prezentate în figurile 4.1 și 4.2.

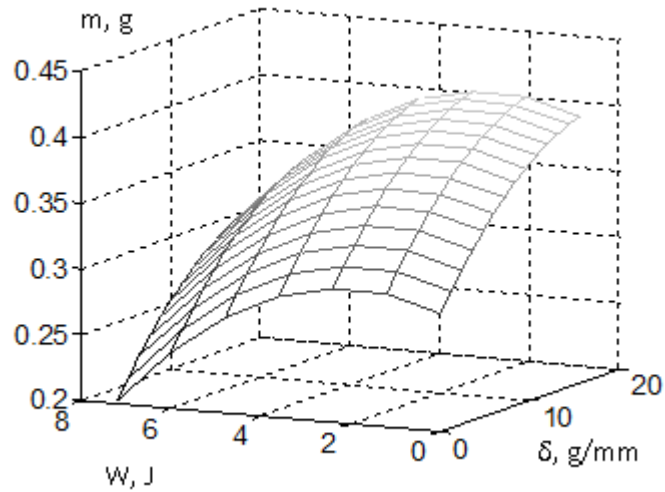


Figura 4.3. Influența exercitată de energia de descărcare pulsată W și de densitatea energetică δ asupra masei stratului depus ($S = 0,9 \text{ mm}$, $Q = 1,7 \text{ J / mm}$)

Studiul fenomenelor fizice care apar în spațiul de lucru a subliniat rolul important exercitat de energia pulsului de descărcare.

Pentru a investiga influența exercitată de diferiți factori de muncă asupra masei stratului depus, s-au folosit echipamente adecvate. Cercetările experimentale permit stabilirea unor modele empirice capabile să demonstreze influența exercitată de mărimea gap-ului, de debitul pulberii, de energia impulsurilor de descărcare și de densitatea energetică pe masa straturilor depuse.

Această cercetare experimentală a fost efectuată în conformitate cu principiile experimentelor fracționate pentru patru variabile la trei nivele. Valorile reale ale variabilelor sunt prezentate în tabelul 1. Pentru fiecare experiment, valorile codificate ale factorilor de intrare (+1 pentru un nivel maxim, 0 pentru un nivel mediu și -1 pentru un nivel minim) și valorile factorii de ieșire sunt prezentați în tabelul 4.2. Experimentul sa bazat pe trei niveluri de variabile independente (factori de intrare) și preferat deoarece unele dintre testele preliminare au arătat o variație non-monotonă a parametrului de ieșire (cantitatea materialului depus) în funcție de factorii de intrare.

Pentru a evalua debitul pulberii P , *Eq. (1)*, după o calibrare prealabilă a dispozitivului de dozare și alimentare a pulberii în spațiul de lucru. Energia Wd livrată în spațiul de lucru poate fi estimată luând în considerare *Eq. (2)*; de asemenea, *Eq. (3)* a fost utilizat pentru a calcula energia specifică Ws . Cantitatea m de material depus a fost determinată prin cântărirea pieselor de testare înainte și după procesul de depunere.

Celelalte valori specifice condițiilor de lucru au fost: frecvența pulsului $f = 70 \text{ Hz}$, diametrul granulelor de $120...130 \mu\text{m}$, viteza de rotație periferică a piesei de testare - $0,1...2,3 \text{ m/min}$ și un timp specific de depunere $0,8 \text{ min/cm}^2$.

Software-ul specializat, bazat pe metoda celor mai mici pătrate, a fost utilizat pentru a procesa informația numerică inclusă în tabelul 4.2. Astfel, au fost stabilite relațiile matematice empirice de mai jos:

1. Pentru bronz:

$$\begin{aligned}
 m = & 0,041805 + 0,9924184S - 0,5516513S^2 \\
 & + 0,2548314P - 0,046921P^2 \\
 & + 0,2639871W_d - 0,02933949W_d^2 \\
 & + 0,0345012W_s - 0,0002513869W_s^2
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

2. oțel

$$\begin{aligned}
 m = & 0,03776562 + 0,9796631S - 0,5211094S^2 \\
 & + 0,022934P - 0,04590233P^2 \\
 & + 0,003846714W_d + 0,004700639W_d^2 \\
 & + 0,029666W_s - 0,0001197065W_s^2
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

3. nichel

$$\begin{aligned}
 m = & 0,01154771 + 0,6676656S - 0,3476997S^2 \\
 & + 0,227277P - 0,059651P^2 \\
 & + 0,09708263W_d - 0,005840178W_d^2 \\
 & + 0,03104264W_s - 0,003670184W_s^2
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

4. Carbura de bor

$$\begin{aligned}
 m = & 0,212089 + 0,1626123S - 0,1154172S^2 \\
 & + 0,07908089P - 0,02642789P^2 \\
 & + 0,01340891W_d + 0,00354948W_d^2 \\
 & + 0,01221529W_s - 0,003190312W_s^2
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

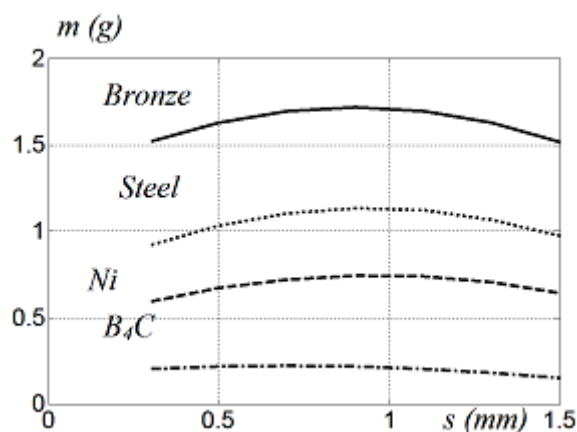


Fig. 4.4. Influența exercitată de dimensiunea interstițiului S de masa materialului depus m ($P = 3,1\text{mg/min}$, $W_d = 4,3\text{J}$, $W_s = 9,25\text{J/mm}$).

Tabelul 4.2. Dimensiuni codificate ale factorilor de intrare corespunzători fiecărui experiment și dimensiunile factorilor de ieșire

Nr. exp.	Dimensiunea interstițiului, S, mm	Debitul de pulbere, P, mg/min	Energia livrată, W_d , J	Energia specifică, W_s , J/mm	Cantitatea m din materialul depus, g			
					Bronz	Oțel	Material pe bază de nichel	Carbură de bor
1	+1	+1	0	0	1.518	0.975	0.928	0.408
2	+1	-1	0	0	1.237	0.770	0.858	0.438
3	-1	+1	0	0	1.522	0.925	0.877	0.410
4	-1	-1	0	0	1.243	0.720	0.808	0.440
5	0	0	+1	+1	1.557	1.527	1.085	0.671
6	0	0	+1	-1	1.125	1.130	1.007	0.683
7	0	0	-1	+1	1.470	1.223	1.03	0.415
8	0	0	-1	-1	1.037	0.820	0.680	0.320
9	0	0	0	0	1.675	1.125	1.110	0.532
10	+1	0	0	+1	1.683	1.157	1.165	0.508
11	+1	0	0	-1	1.250	0.755	0.815	0.413
12	-1	0	0	+1	1.688	1.107	1.115	0.510
13	-1	0	0	-1	1.255	0.705	0.765	0.415
14	0	+1	+1	0	1.393	1.350	1.120	0.678

15	0	+1	-1	0	1.305	1.040	0.792	0.315
16	0	-1	+1	0	1.112	1.145	1.050	0.708
17	0	-1	-1	0	1.105	0.835	0.722	0.345
18	0	0	0	0	1.675	1.125	1.110	0.532
19	+1	0	+1	0	1.175	1.175	1.103	0.663
20	+1	0	-1	0	1.063	0.865	0.775	0.300
21	-1	0	+1	0	1.155	1.125	1.053	0.665
22	-1	0	-1	0	1.067	0.815	0.725	0.615
23	0	+1	0	+1	1.925	1.333	1.183	0.522
24	0	+1	0	-1	1.492	0.930	0.832	0.428
25	0	-1	0	+1	1.645	1.127	1.120	0.553
26	0	-1	0	-1	1.212	0.725	0.763	0.458
27	0	0	0	0	1.675	1.125	1.110	0.532

Unele dintre reprezentările grafice pe baza informațiilor furnizate de relațiile (4) - (7) sunt prezentate în fig. 4.4-4.7; diagramele evidențiază influența exercitată de factorii de intrare cosiderați asupra cantității m a materialului depus.

Analiza modelelor matematice empirice și a reprezentărilor grafice din fig. 4.4-4.7 arată că ordinea descrescătoare a capacităților diferitelor materiale evaluate din punct de vedere al cantității depuse de evacuările electrice în condițiile menționate mai sus este următoarea: 1) bronz, 2) oțel carbon, 3) nichel material și 4) carbură de bor.

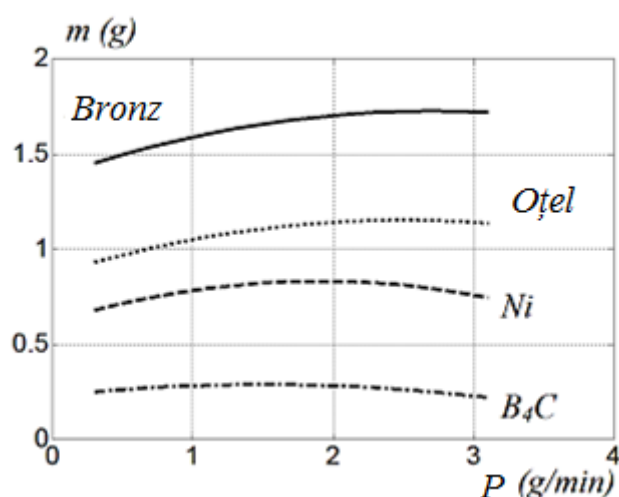


Fig. 4.5. Influența intensitatii de depunere de debitul de pulveri P pentru materialele Br, oțel, Ni, B₄C, m la regimul de prelucrare $S=0,9\text{mm}$, $W_d=4,3\text{J}$, $W_s=9,25\text{J/mm}$, $f=50\text{Hz}$)

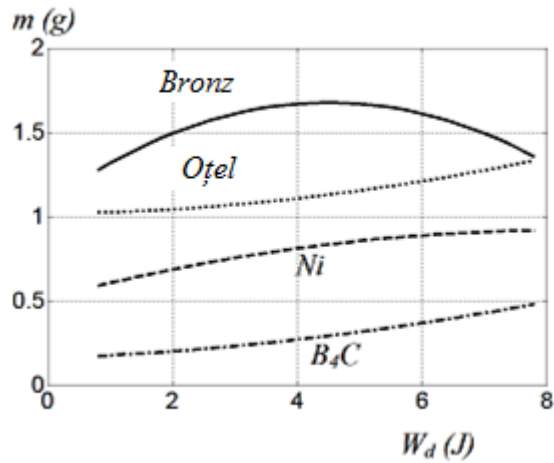


Fig. 4.6. Influența externată de energia furnizată W_d asupra masei materialului depus m ($S=0,9\text{mm}$, $P=1,7\text{mg/min}$, $W_s=9,25\text{J/mm}$ și $f=50\text{Hz}$)

Valoarea mai mare a parametrului m în cazul oțelului carbon și a bronzului poate fi explicată prin temperaturile mai scăzute ale topirii, în comparație cu temperaturile de topire ale oțelului inoxidabil și carburii de bor.

Atunci când se iau în considerare valorile coeficienților S și S^2 , ordinea aceluiași materiale din punct de vedere al influenței exercitate de dimensiunea interstițiului S este: 1) bronz, 2) oțel carbon, 3) nichel material și 4) carbură de bor.

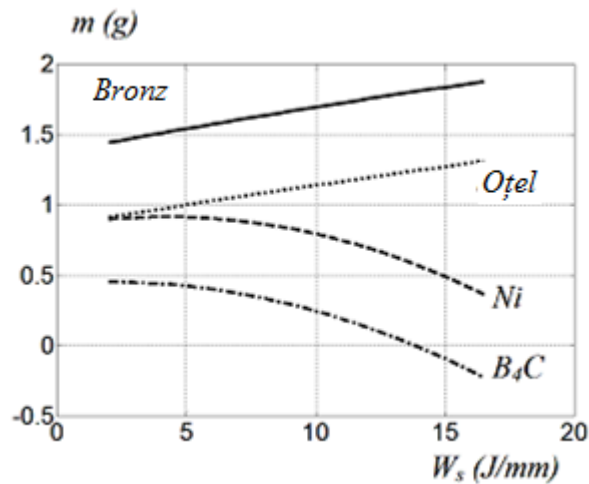


Fig. 4.7. Influența externată de energia specifică W_s asupra masei materialului depus m ($S=0,9\text{mm}$, $Q=1,7\text{J}$, $W_d=4,3\text{J/mm}$)

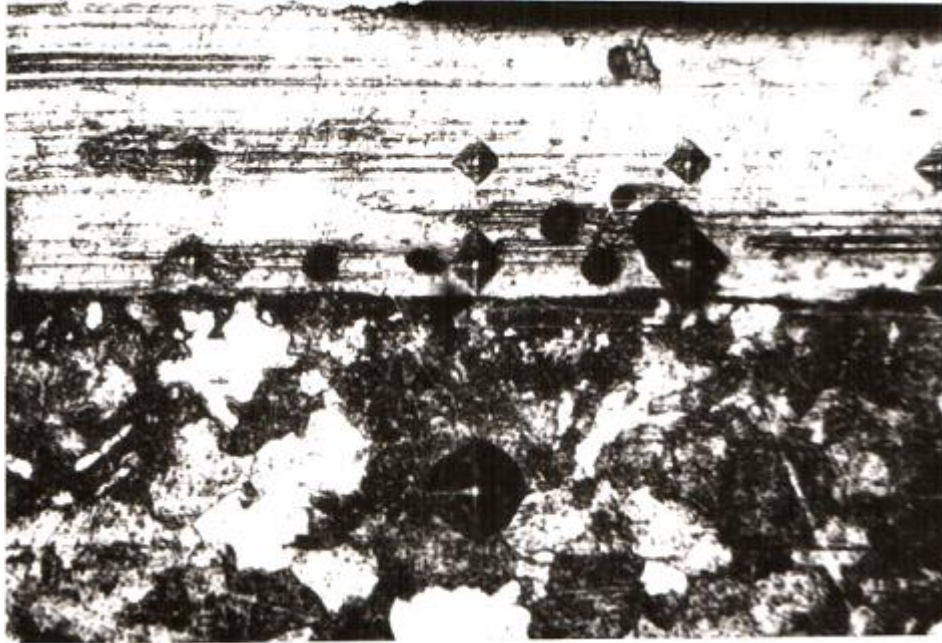


Fig. 4.8.

Valorile coeficienților din modelul empiric de carbură de bor sunt cele mai mici, în comparație cu coeficienții din modelele empirice corespunzătoare celorlalte materiale. Adică, factorii de intrare considerați influențează cel mai puțin masa depozitată în cazul carburii de bor.

Modelele matematice empirice au arătat existența unui punct extrem în intervalul examinat când funcțiile valide pentru m sunt analizate luând în considerare fiecare parametru de intrare (dimensiunea interstițiului S , debitul pulberii P , energia livrată W_d , energie specifică W_s). Punctul extrem este mai evident în cazul dimensiunii gap-ului, ceea ce înseamnă că influența exercitată de parametrul s asupra cantității m a materialului depus este mai intensă.

Morfologia secțiunii transversale în cazul stratului de bronz pe o piesă de testare din oțel este prezentată în figura 4.8. După cum era de așteptat, microduratea stratului depus este diferită în comparație cu microduratea materialului de bază.

4.3. Elaborarea electrodului-sculă la formarea depunerilor din pulberi

Reeșind din criteriile de proiectare, funcțiile pe care le va îndeplini electrodul-sculă în procesul de prelucrare și fenomenele ce însoțesc procesul de formare a depunerii din pulberi vom determina parametrii constructivi a acestuia.

De obicei procesul de formare a depunerilor din pulberi se execută cu regimuri ale căror elemente sunt: energia descărcărilor electrice în impuls (W), frecvența descărcărilor electrice în impuls (f), mărimea interstițiului (S) și debitul pulberii din dozator (P). Din literatura de specialitate se cunoaște că, pentru formarea depunerilor din pulberi se aplică regimuri cu

următorii parametri: $W=0,1...3J$, $f=20...120\text{ Hz}$, $S=0,3...1,2\text{ mm}$ și $P=0,05...2\text{ g/min}$. Reșind din valorile acestor mărimi poate fi determinat diametrul electrodului – sculă cu condiția că fiecare descărcare nouă să înceapă pe o nouă porțiune de suprafață cu relația:

$$D = dfk / \pi , \quad (4.10)$$

în care: d – diametrul amprentei descărcării electrice în impuls pe suprafața electrodului;

f – frecvența descărcărilor electrice în impuls;

k – coeficientul de suprapunere a amprentelor pe suprafața electrodului.

Pentru regimul de prelucrare $d=2\text{ mm}$, $f=120\text{ Hz}$, $k=1$ din care rezultă:

$$D = 2 \cdot 120 \cdot 1 / 3,14 = 80\text{ mm} . \quad (4.11)$$

Materialul din care va fi executat electrodul-sculă reșind din condiții minime a eroziunii, poate fi cuprul de puritate tehnică, wolframul sau aliaj al cuprului cu wolframul. Din motivul deficienței de a găsi semifabricate din wolfram sau cupru-wolfram pentru execuția electrodului se va aplica cuprul de puritate tehnică.

Reșind din faptul că, în procesul de prelucrare este necesară răcirea permanentă a electrodului-sculă constructiv acesta va fi executat așa cum este prezentat în fig. 4.9.

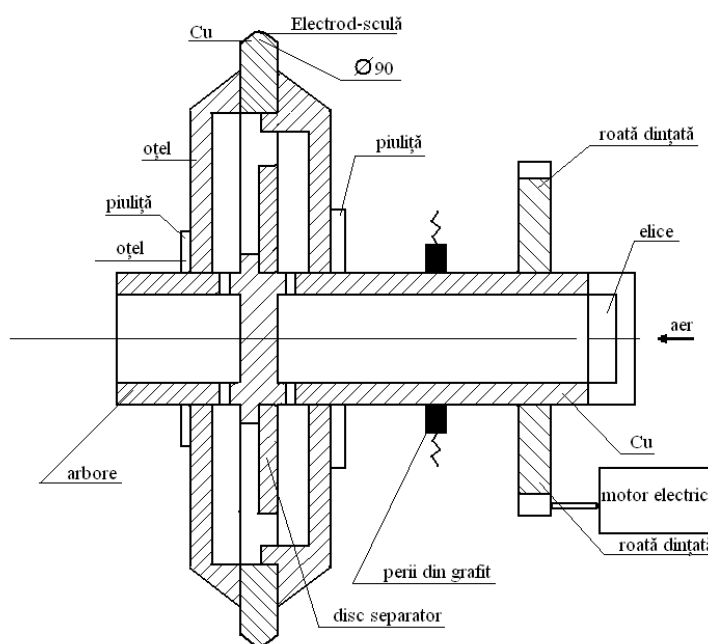


Fig.4.9. Electrodul-sculă în vedere de ansamblu

Din fig. 4.9 se poate observa că, construcția propusă conține: arborele pentru fixarea electrodului-sculă, discul separator, falanșe de fixare a discului electrodului, piulițe de fixare, perii de colectare a electricității, roata dințată pentru acționare de la motorul electric, elicea de pompare a mediului de răcire. Principiul de funcționare a acestui electrod este următorul: de la motorul electric acesta este acționat și pus în mișcare de rotație, sub acțiunea elicei fixate la

capătul arborelui găunos aerul este pompat în interiorul electrodului-sculă îl răcește și pe la celălalt capăt a acestui arbore se evacuează în atmosferă, motorul electric fiind de curent continuu asigură reglarea lentă a frecvenței de rotație a electrodului-sculă și respectiv deplasarea suprafeței lui de lucru în raport cu suprafața de prelucrat a piesei. Pentru fixarea electrodului executat sub formă de inel pe arbore se aplică piulițele prezentate în fig. 4.10.

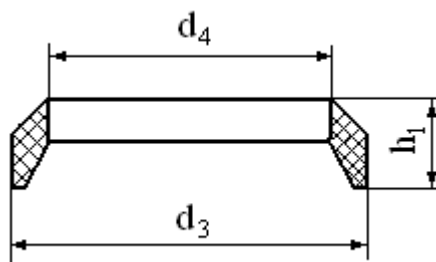


Fig.4.10. Piuliță pentru fixarea electrodului-inel

Arborele electrodului-sculă se execută dintr-o bucată din cupru tehnic de marca M-3 în scopul asigurării unei rezistențe electrice cât mai mici.

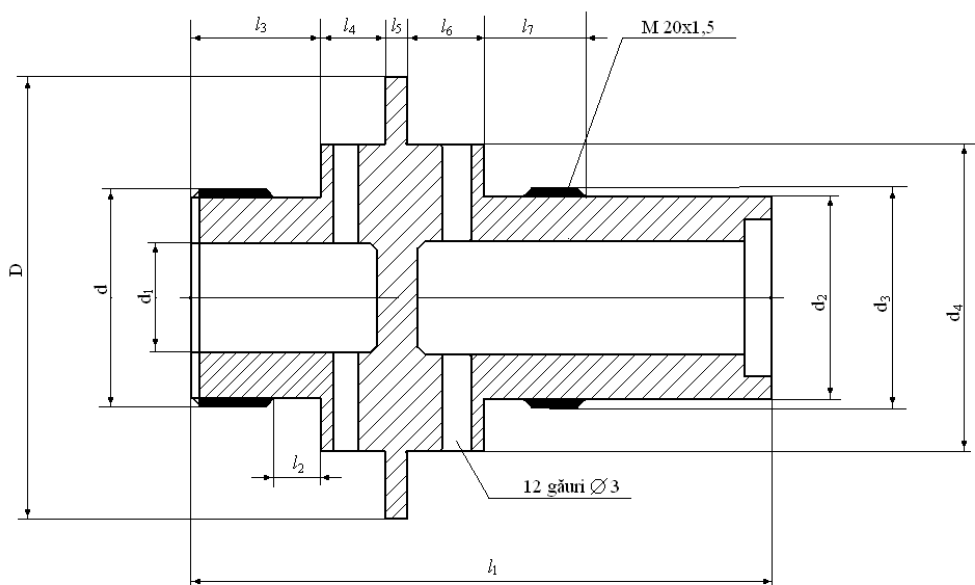


Fig. 4.11. Arbore pentru fixarea electrodului-sculă și componentelor de asamblare

Dimensionarea acestui arbore se execută în funcție de parametrii funcționali ai instalației de lucru. Din fig. 4.11 se poate observa că acesta este executat în mai multe trepte din motivul fixării pe el a mai multor componente (vezi fig. 4.9). Este necesar a menționa că, în corpul acestuia sunt executate două găuri longitudinale și 12 găuri transversale care asigură circulația mediului de răcire.

Pe suprafața arborelui alunecă câteva perii executate din grafit, care servesc pentru transmiterea energiei de efect de la generatorul de impulsuri de curent la electrodul –disc și respectiv în interstițiul format de acesta cu suprafața piesei prelucrate.

4.9.Tratamentul termochimic a suprafețelor. Aplicații tehnologice ale tratamentelor termochimice prin descărcări electrice în impuls în diferite medii

Lucrarea [78] este dedicată cercetării proceselor combinate de prelucrare ce constau din două etape: alierea cu crom și titan prin descărcări electrice în impuls în mediu carburant cu nitrurarea preventivă sau ulterioară.

Nitrurarea preventivă a probelor s-a realizat la temperatura 853°K în timp de două ore în atmosferă ce conține 20% amoniac și 80% argon. Alierea ulterioară cu elemente carburigene prin descărcări electrice în impuls – cu titan (crom) s-a realizat în mediu ce conține atomi de carbon (propan-butan) la intensitatea curentului 2A, tensiunea 50V în decurs de 5minute.

Analiza microdurimetrică a stabilit că microduratea fierului după alierea cu titan (9GPa) prin descărcări electrice este mai mare ca microduratea fierului aliat cu crom prin aceeași metodă (fig.4.12).

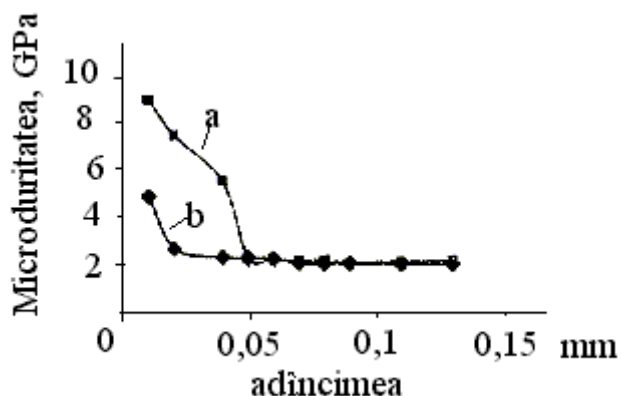


Fig.4.12. Microduratea oțelului după descărcări electrice în impuls cu nitrurarea preventivă: a – anod titan; b – anod crom [71]

Probabil, mărirea microdurateții stratului aliat prin descărcări electrice în mediu propan-butan este cauzat de difuzia carbonului atât în materialul anodului cât și în topitura stratului aliat, pe catod, cu formarea carbizilor cu dispersie fină a elementelor de aliere, soluțiilor solide de pătrundere pe bază de fier și elementul de aliere, urmată de formarea structurilor martensitice în rezultatul răcirii rapide.

Mai mult decât probabil la formarea depunerilor de titan în mediul carburant are loc formarea carburilor de titan, ultimul având o capacitate deosebită de interacțiune cu carbonul și azotul din mediul de lucru.

Deoarece titanul este unul din cele mai active elemente carburigene, interacțiunea lui cu azotul și carbonul este mai mare ca cea a cromului. Prin descărcări electrice în impuls titanul interacționează cu atomii de carbon și azot care se află în soluția solidă a fierului preventiv nitrurat. În rezultatul acestei interacțiuni pot să se formeze carburi și nitruri de titan ce duc la mărirea microdurității stratului superficial aliat. Microduritatea mai mică a stratului superficial aliat cu crom poate fi lămurită de faptul că cromul este mai puțin activ cu atomii de carbon și azot.

După schimbarea consecutivității realizării prelucrării combinate (aliera prin descărcări electrice urmată de nitrurare), cu respectarea acelorași parametri ai procesului, analiza microdurimetrică a probelor opuse cercetării a demonstrat că alierea cu electrod din titan mărește microduritatea în zona difuzională (până la 10GPa), în comparație cu alierea cu crom (până la 8Gpa).

Microduritatea înaltă în stratul aliat după aplicarea a acestui tip de prelucrare combinată poate fi lămurită prin faptul că distribuția materialului în acest strat posedă o concentrație neomogenă destul de mare atât în adâncime cât și în plan paralel cu suprafața probei. Porțiunile locale îmbogățite cu titan după nitrurarea ulterioară pot forma zone cu o mare cantitate de incluziuni de nitrură de titan cu o duritate înaltă. Aceasta demostrează cercetările roengenografice [78].

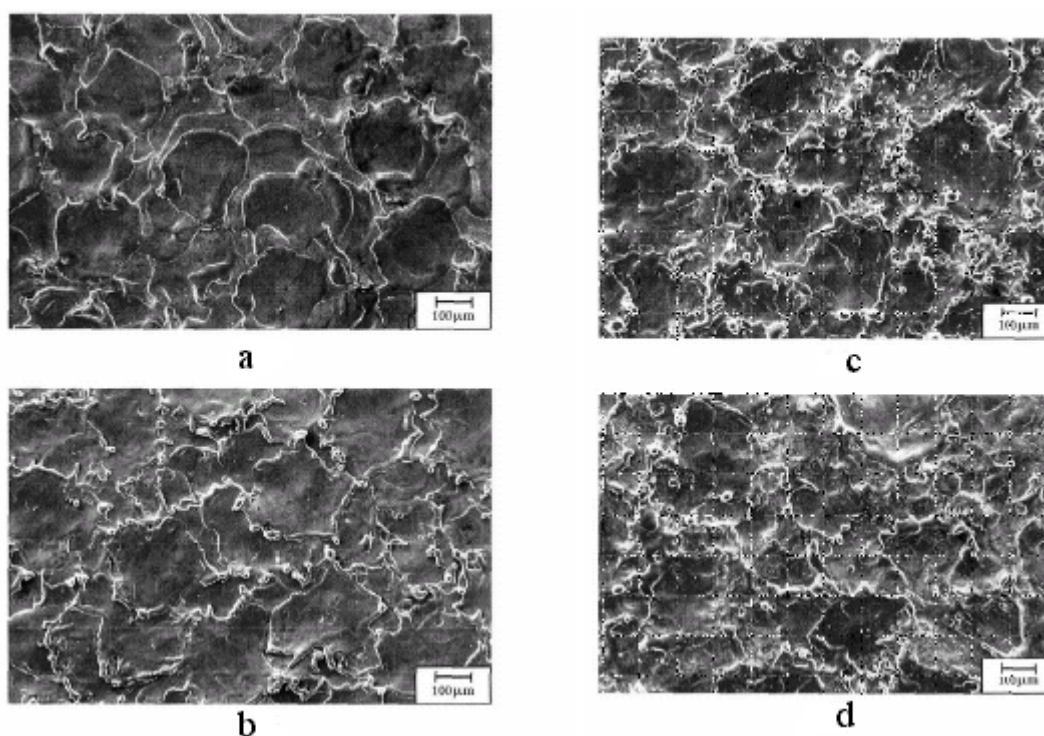


Fig. 4.13. Vederea generală a suprafeței pieselor după prelucrare $I=16A$, $\tau=25\mu s$. Dielectric: apă destilată, electrod: a) cupru, b) grafit. Dielectric: cherosin, electrod: c) cupru, d) grafit [72]

Autorii lucrării [79] au efectuat cercetări experimentale cu electrozi-sculă din cupru și grafit în apă distilată și cherosin piesele fiind confecționate din oțel în stare recoaptă. Încercările au fost efectuate la un generator de impulsuri de curent care posedă o valoare medie a curentului de descărcare $I=1, 2, 4, 8, \text{ și } 16\text{A}$ și o durată de descărcare de $\tau= 6, 12,25, 50, 100, 200, 400, 800$ și $1600 \mu\text{s}$. În această lucrare sunt prezentate vederile generale a suprafeței piesei după prelucrarea prin descărcări electrice în impuls, în apă destilată și cherosin cu electrod-sculă din grafit și cupru fig. 4.13.

Cercetarea microșlifurilor acestor piese au demonstrat faptul că pe suprafața piesei apare stratul alb cu duritatea cea mai înaltă (fig. 4.13) urmată de zona influențelor termice și materialul de bază. Măsurarea microdurității piesei după Vickers s-a efectuat cu o greutate de 10g timp de 15s .

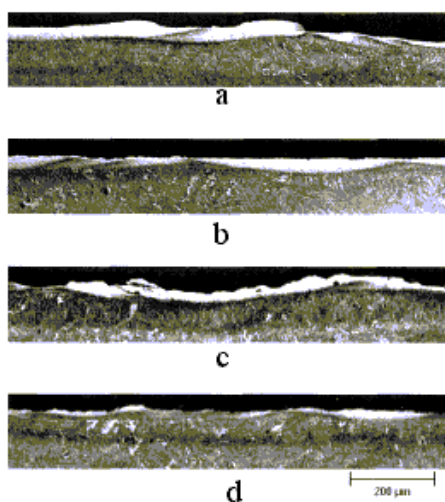


Fig. 4.14. Vederea generală a microșlifurilor piesei în apă destilată [78]

- a) $I=16\text{A}$ electrod: grafit;
- b) $I=16\text{A}$ electrod: cupru;
- c) $I=8\text{A}$ electrod: grafit;
- d) $I=8\text{A}$ electrod: cupru

Renghenograma acestor microșlifuri a arătat faptul că la folosirea cherosinului pe suprafața piesei apare cementita spre deosebire ca în cazul folosirii apei destilate fig.4.15.

În lucrarea [80] încercările experimentale au fost efectuate în regim de subexcitare, pe pete electrodice „reci”, în care electrodul-sculă confecționat din grafit, posedă polaritatea catod, iar piesa confecționată din oțel 45 în stare normalizată. Experiențele s-au efectuat la interstițiul $S=1,5 \text{ mm}$, capacitatea $C=100\mu\text{F}$, durata descărcării $80\mu\text{s}$, numărul de descărcări $n=90$, frecvența 3 Hz , iar tensiunea pe bateria de condensatoare varia $100\text{V}, 150\text{V}, 200\text{V}, 250\text{V}, 300\text{V}$.

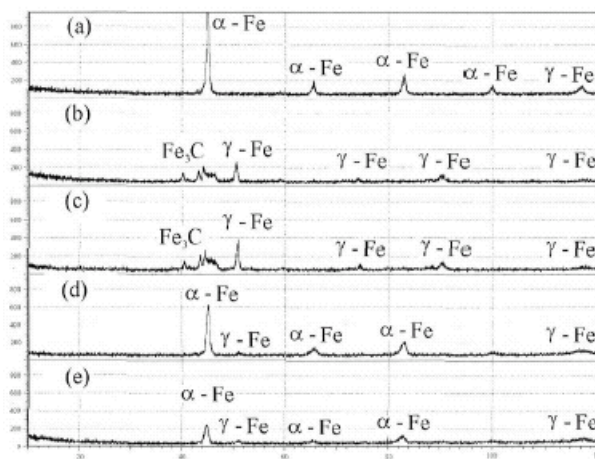


Fig.4.15. Renghenograma oțelului în stare recoaptă $I=16A$, $\tau=400\mu s$ [80]

- a) înainte de prelucrare;
- b) electrod cupru în cherosin;
- c) electrod grafit în cherosin;
- d) electrod cupru în apă distilată;
- e) electrod grafit în apă distilată

Analizând cele expuse în lucrarea [35] când electrodul-sculă este conectat în calitate de catod putem concluda că în acest caz avem depuneri de grafit pe suprafața piesei prelucrate prin descărcări electrice în impuls, care prezintă pelicule subțiri din grafit (fig.4.16). Aceste depuneri pot fi explicate, după cum este menționat în lucrare [35], prin faptul că materialul electrodului-sculă nu este un metal, iar procesele la descărcări electrice în impuls au loc altfel ca în cazul alierii obișnuite.

Analiza microșlifurilor au demonstrat faptul că în cazul în care electrodul din grafit este catod pe suprafața piesei se observă zonele ca și în cazul descărcărilor electrice când piesa se află în calitate de anod, adică avem zona influenței termice. Aceasta provocând schimbări de structură la suprafața piesei, la adâncimi de ordinul μm .

Asemenea confirmări, că electrodul-sculă din grafit în calitate de catod erodează mai mult ca în calitate de anod, au fost constatate și în lucrările [67, 82].

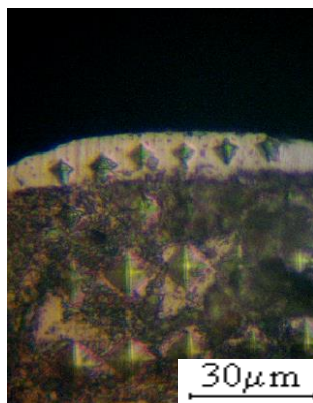


Fig.4.16. Microstructura piesei din oțel 45 după aplicarea descărcărilor electrice în impuls pentru: $C=8\mu\text{F}$; $f=8\text{Hz}$; $V=1\text{mm/s}$; $S=0,5\text{mm}$; $W=0,26\text{J}$, $n=3$ treceri, electrodul-sculă catod-anod [35]

În lucrările [35, 82] au fost aplicate descărcări electrice în impuls cu electrodul-sculă din grafit, aplicând impulsurile bipolare, în regimul de întreținere a petelor electrolice „reci”. S-a observat că în rezultatul acțiunii descărcărilor electrice în impuls asupra oțelului 45 recopt, cu electrodul-sculă din grafit, pe suprafața piesei au loc depuneri de grafit atât la utilizarea electrodului-sculă în calitate de anod cât și ca catod. Studiul morfologiei suprafeței piesei, după interacțiunea cu plasma descărcărilor electrice în impuls, ne atestă faptul că în cazul utilizării electrodului executat din grafit în calitate de catod stratul depus este mai mare. Iar pentru același număr de treceri, cu cât valoarea energiei degajate în interstițiu e mai mare cu atât și stratul depus din grafit este mai mare fig.4.17.

Analiza metalografică a straturilor superficiale ale pieselor prelucrate a demonstrat că în afara depunerilor din grafit mai apare și stratul alb, separat de materialul de bază prin intermediul stratului de trecere. Cercetarea microdurității acestor straturi demonstrează faptul că microduratea staratului alb poate fi de 2-10 ori mai mare ca a materialului de bază, iar grosimea lui variază în limitele 5-10 μm .

$H_{med} \times 10^8, Pa$

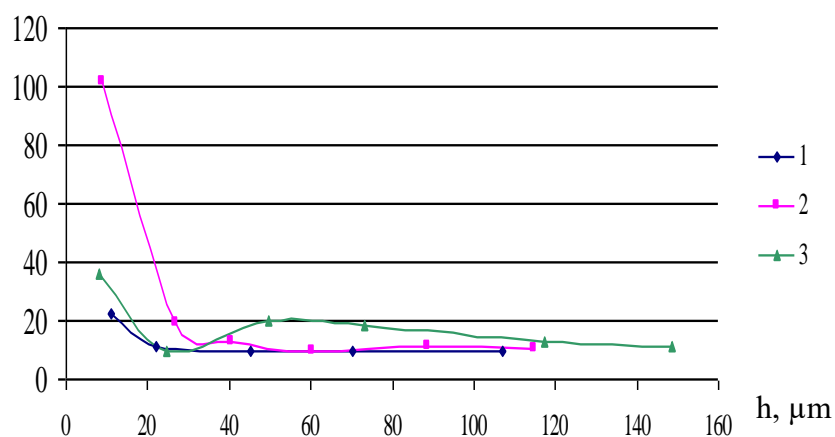


Fig.4.17. Dependența valorii microdurității de adâncimea stratului superficial a pieselor executate din oțel-45 după interacțiunea descărcărilor electrice în impuls la două treceri pentru: $C=8\mu F$; $f=8Hz$; $V=1mm/s$; $S=0,5mm$; 1- $W=0,26J$; 2- $W=0,42J$; 3- $W=0,58J$; electrodul sculă-anod [19]

În această lucrare s-a stabilit că: indiferent de polaritatea electrozudului-sculă pe suprafața piesei s-au depistat nu numai depuneri de grafit dar și apariția stratului alb de o microduritate înaltă; din cercetările experimentale prezentate putem afirma faptul că microduritatea suprafeței poate fi mărită de circa 2-10 ori față de materialul de bază. De asemenea se afirmă faptul că la aplicarea descărcărilor electrice în impuls asupra oțelurilor au loc tratamente termice și termochimice, datorită atât încălzirii și răcirii bruște cât și a fenomenelor de difuzie, ce influențează considerabil asupra proprietăților fizico-chimice a stratului superficial al pieselor.

În același timp în lucrarea analizată [67 ,82] nu este pus în evidență modul de dimensionare a E-S.

4.10. Proiectarea electrozudului-sculă pentru tratarea termică

La etapa contemporană, în tehnologiile de prelucrare a materialelor tot mai insistent își fac loc metodele de formare a straturilor de protecție. Printre acestea un loc de frunte îl ocupă formarea straturilor de depunere în pulberi metalice cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls. Pentru realizarea acestora se utilizează instalații speciale, generatoare de impulsuri de curent și electrozi- sculă. Pentru a obține straturi cu proprietăți prescrise este necesar să se evite electroeroziunea electrozudului-sculă și transferul materialului pe suprafața prelucrată a piesei.

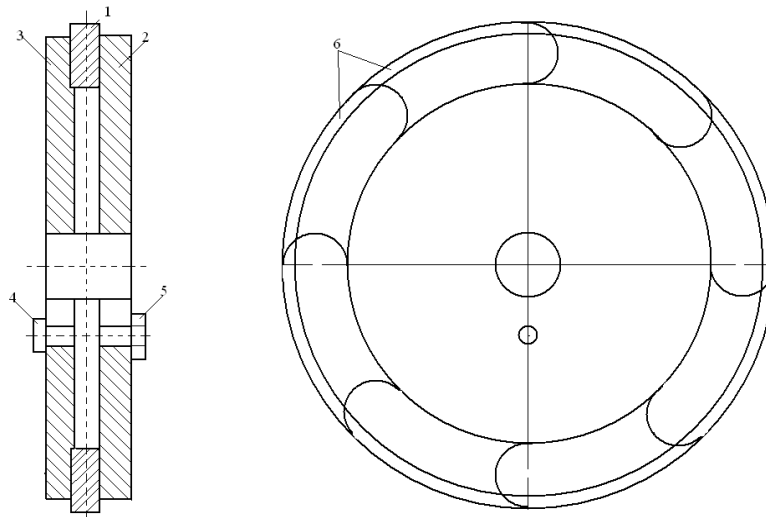


Fig. 4.18. Electrocul - sculă proiectat și realizat în ansamblu. Acesta conține inelul 1, flanșele 2 și 3 buloanele de fixare 4, piulițele de fixare 5 și segmente constituente ale discului 6

În lucrare se propune ca materialul de confecționare a electrocului - sculă să fie ales în așa mod ca coeficientul de acumulare a căldurii acestuia:

$$b = \sqrt{C\rho\lambda}, \quad (4.12)$$

să fie cât mai mare. În acest scop mai conveniente sunt așa materiale ca cupru, wolframul și pseudoaliajele lor.

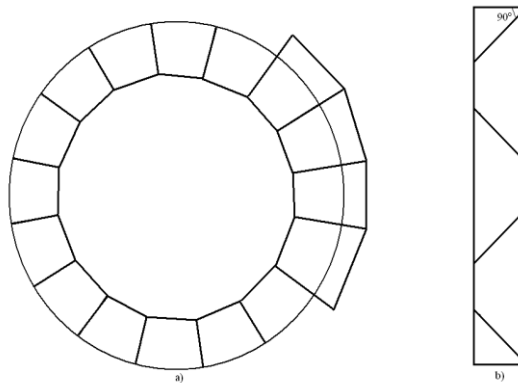


Fig. 4.13. Asamblarea segmentelor executate din fășie în cadrul unui electrocul - sculă

Electrocul - sculă în ansamblu să fie executat sub formă de disc. Partea funcțională a acestuia poate fi executată în formă de inel dintr-o bucată sau unul segmentat. În primul caz se asigură economie de material scump sau dificil de procurat, deasemenea se asigură confecționarea acestuia prin așchiere la producerea de unicat sau prin ștanțare la producerea în serie și de masă. În cazurile când materialul elaborat la uzine este realizat sub formă de fășii din acestea se decupează segmente care se assemblează în inel. Formarea inelului de lucru din

segmente permite realizarea lui și din diferite materiale alternând, ceea ce asigură și prelucrarea combinată termică și chimico-termică ca de exemplu când segmentele ce alternează sunt executate din cupru și respectiv grafit. Diametrul exterior al inelului de lucru se va calcula cu relația:

$$D = \frac{fd}{\pi \cdot n}, \quad (4.14)$$

în care: f – este frecvența impulsurilor;

d – diametrul de sprijin a canalului de plasmă;

n – frecvența de rotație a dispozitivului de acționare a discului.

Din mărimile indicate mai sus, toate pot fi numite în afară de diametrul peșii de sprijin al canalului de plasmă pe suprafața sculei.

Aceasta este funcție de regimul energetic și poate fi calculat cu relația:

$$d \geq \sqrt{\frac{4Ep}{\pi Q_{ms}}}, \quad (4.15)$$

unde: $Q_{ms}=q \cdot \rho$ – căldura specifică de topire și densitatea materialului sculei,

$E = \int_0^{\tau} I(t)U(t)dt$ - energia degajată în interstițiu în decursul unei descărcări.

Astfel în lucrare au fost determinate principiile de proiectare a electrozilor-sculă pentru instalațiile de formare a straturilor de depunere de tipul „Razread” și este descrisă metoda alegerii materialului pentru executarea lui.

Cercetările anterioare au demonstrat că în procesul tratării termice este necesar a se ține seama de efectul Joule-Lentz care se determină de valoarea medie a intensității curentului ce curge în sculă și piesă.

Studiul aprofundat al fenomenelor electroeroziunii a demonstrat că are loc o încălzire a electrodului-sculă conform legii lui Joule-Lentz care determină topirea, oxidarea și distrugerea acestuia. Acești factori nu permit prelucrarea îndelungată în scopul obținerii stratului. Omiterea totală sau parțială a acestor factori, evident poate fi realizată prin conceperea unei scule la care suprafața de lucru se înnoiește continuu. Obținerea în practică a acestei idei s-a materializat prin realizarea anodului-sculă sub formă de disc rotativ.

Avantajele acestui electrod față de cel conic sunt evidente, deoarece el permite desfășurarea procesului în așa fel ca fiecare descărcare să înceapă de pe o suprafață nouă ce a avansat în zona de lucru a interstițiului. Pentru satisfacerea acestei cerințe este necesar să se calculeze viteza liniară, cu relația:

$$V=60d_z \cdot f, \text{ mm/min}, \quad (4.16)$$

unde: d_z – diametrul zonei de interacțiune a plasmei cu anodul o descărcare singulară;
 f – frecvența descărcărilor.

Alegerea unui anumit regim de lucru al electrodului asigură participarea ciclică a porțiunilor de suprafață în procesul tehnologic.

Dintre materialele experimentate, o eficiență mai mare s-a obținut pentru cuprul tehnic marca M-3.

În ceea ce privește electrodul-sculă s-a constatat că din punct de vedere a durabilității la electroeroziune și a formării depunerilor pe suprafața de lucru, pentru procesul formării straturilor de depunere, ca optim poate fi considerat electrodul-sculă rotitor sub formă de disc.

În această situație grosimea discului va fi egală cu diametrul zonei de interacțiune a canalului de plasmă la suprafața prelucrată:

$$h_d = d, \quad (4.17)$$

$$h_d \geq \sqrt{\frac{4E}{\pi Q_m}}. \quad (4.18)$$

Dacă ne referim la valoarea diametrului E-S, atunci aceasta poate fi calculată din condiția suprapunerii zonelor de interacțiune sau alăturarea una lângă una a acestora și frecvența descărcărilor electrice. Astfel putem scrie:

$$D = \frac{kfd}{n}, \quad (4.19)$$

unde: k – coeficient de suprapunere a zonelor de prelucrat;

f – frecvența DEI;

d – diametrul zonelor de prelucrare la o rotație a discului;

n – numărul de rotații.

4.11. Construcția electrodului-sculă pentru oxidarea suprafețelor complexe cu aplicarea DEI

În fig. 4.19, *a* este prezentat desenul de ansamblu a electrodului sculă, specificul constructiv al unei plăci conductoare fig. 4.19, *b* și al unei plăci de fixare fig. 4.19, *c*.

Electrodul-sculă propus în invenție [83] conține: plăcile conductoare – 1 și 2; două plăci de fixare 3; electrozii elementari – 4; tije de reazem – 5; buloane de deplasare și fixare a plăcilor de fixare – 6; capetele semi-rotunde de lucru a electrozilor elementari – 7, elemente de asamblare – 8.

Electrodul-sculă propus funcționează după cum urmează: pe masa de lucru al mașinii-unelte se fixează piesa de prelucrat cu suprafața de prelucrare orientată spre dispozitivul de fixare a electrodului sculă; electrodul-sculă este fixat în dispozitivul de prindere și fixare al

mașinii-unelte; acestea se apropie una în raport cu alta la un interstițiu de 1...2 mm; se deșurubează buloanele plăcilor de fixare 3 după care manual fiecare dintre electrozii elementari 4 se aduce în contact cu suprafața prelucrată a piesei; apoi prin intermediul plăcilor de fixare 3 se fixează simultan toți electrozii elementari 4 – poziție în care se copie suprafața prelucrată a piesei, după acesta se stabilește interstițiul de prelucrare (de 1,5...2,5 mm) prin îndepărtarea electrodului-sculă de la suprafața de prelucrare a piesei, apoi se cuplează generatorul de impulsuri de curent. Pe perioada de prelucrare fiecare dintre electrozii elementari prelucrează o anumită porțiune din aria suprafeței piesei, iar piesa conectată în calitate de catod la generatorul de impulsuri de curent și electrodul-sculă conectat în funcție de anod se află în poziție nemișcată în raport unul cu altul, și la unul și același interstițiu ceea ce asigură tratarea termică (în lipsa mediilor de prelucrare s-au prezența gazelor inerte ca de exemplu argon) sau chimico-termică a acesteia (în prezența aerului - cu formare de pelicule de oxizi, hidro – oxizi și nitrați în prezența azotului).

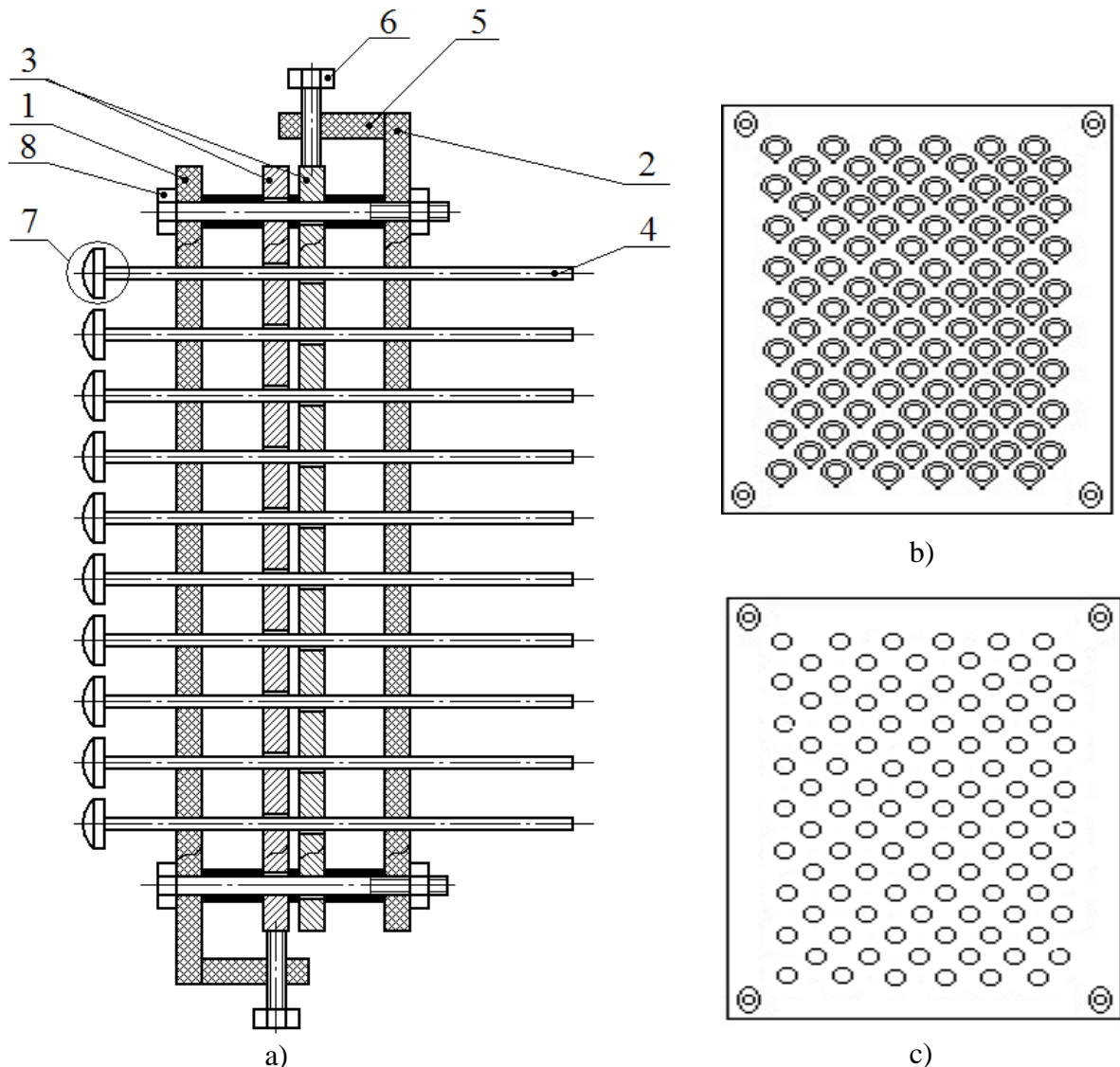


Fig. 4.19. Electrodul-sculă pentru oxidarea suprafețelor complexe cu DEI

Poziționarea electrozilor elementari pe direcția Y este asigurată de plăcile conductoare 1 și 2 în care sunt executate găuri cilindrice, iar fixarea pe direcțiile X-Y-Z de către plăcile de fixare 3 (la deplasare în sensuri opuse sub acțiunea buloanelor de fixare 6) în care sunt executate găuri excentrice. Mărimea constantă a interstițiului și a regimului de prelucrare se asigură și prin aceea că capetele de lucru al electrozilor elementari sunt executați sub formă de semi-sferă dintr-un aliaj cu rezistență înaltă la electroeroziune de tip W-Cu cu conținutul procentual respectiv 72 și 28%. Executarea sub formă de semi-sferă a capetelor de lucru a electrozilor sub formă de semi-sferă asigură precizia de formare a interstițiului de lucru indiferent de precizia de prindere și fixare a piesei și electrodului-sculă pe mașina-unealtă [83].

4.12. Formarea peliculelor de grafit

Încercările experimentale de formare a depunerilor din grafit pe suprafețe metalice au fost executate în condiții normale în mediul de lucru – aer. În acest scop au fost aplicate descărcări electrice în impuls, canalul de plasmă a căroră interacționa cu suprafețele electrozilor în regimul de întreținere pe pete electrodice ”reci” pentru a evita topirea , vaporizarea și prelevarea de material de pe acestea. În calitate de electrozi-scule erau luate bare executate din grafit tehnic de formă cilindrică cu aria secțiunii transversale de 6 mm². În scopul formării depunerilor de grafit în lipsa topirii și vaporizării suprafeței prelucrate a piesei în calitate de sursă de energie se aplica generatorul de impulsuri de curent.

Rezultatele cercetărilor experimentale

În lucrările [84, 85] au fost aplicate descărcări electrice în impuls cu electrod –sculă din grafit, aplicând impulsurile bipolare, în regimul de întreținere a petelor electrodice „reci”. În timpul experimentului sa observat că în rezultatul acțiunii descărcărilor electrice în impuls asupra grafitului, cuprului și alamei cu electrod-sculă din grafit, pe suprafața piesei au loc depuneri de grafit atât la utilizarea electrodului-sculă în calitate de anod cât și ca catod. Studiul morfologiei suprafeței piesei, după interacțiunea cu plasma descărcărilor electrice în impuls, ne atestă faptul că în cazul utilizării electrodului executat din grafit în calitate de catod stratul depus este mai mare.

Caracteristica acestei metode este faptul că la formarea acoperirilor nu apar schimbări liniare sau de volum ale materialului supus durificării. Pentru a se putea realiza durificarea prin descărcări electrice în impuls, trebuie îndeplinite următoarele condiții:

- conductibilitatea înaltă a piesei ce se prelucrează, cu cât conductibilitatea este mai mare cu atât mai mici sunt pierderile de energie electrică;
- înainte de durificare scula trebuie supusă prelucrării termice standard;

- scula (placa sau poansonul) să nu prezinte neuniformități sau defecte;
- suprafețele supuse durificării trebuie să fie degresate cu benzină sau alcool tehnic pur. Dacă suprafețele au acoperiri de protecție sau sunt acoperite cu rugină, trebuie să se curețe mai întâi cu foaie abrazivă.

Prelucrările superficiale cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls în prezent sau divizat în următoarele direcții principale:

- prelucrările dimensionale care au ca scop principal prelevarea unei părți de material de pe suprafața semifabricatului în scopul modificării formei și dimensiunilor acestuia pentru obținerea produsului în condiții tehnice impuse;
- formarea stratului de depunere care are ca scop principal transferul materialului prelevat de pe suprafața unuia dintre electrozi pe suprafața celuilalt pentru ai modifica proprietățile și compoziția stratului de suprafață a piesei prelucrate;
- formarea straturilor de suprafață prin îmbogățirea suprafeței prelucrate a piesei cu elemente din mediul de lucru.

Analizând cele expuse când electrodul-sculă este conectat în calitate de catod putem concluda că în acest caz avem depuneri de grafit pe suprafața piesei prelucrate prin descărcări electrice în impuls, care prezintă pelicule subțiri din grafit (fig. 4.20). Aceste depuneri pot fi explicate, prin faptul că materialul electrodului-sculă nu este un metal, iar procesele la descărcări electrice în impuls au loc altfel ca în cazul alierii obișnuite.

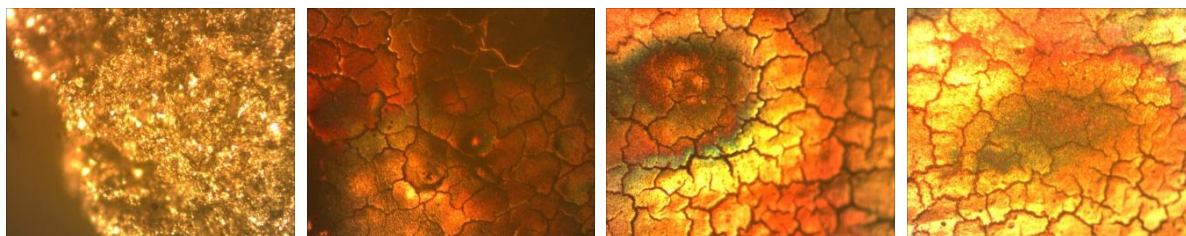


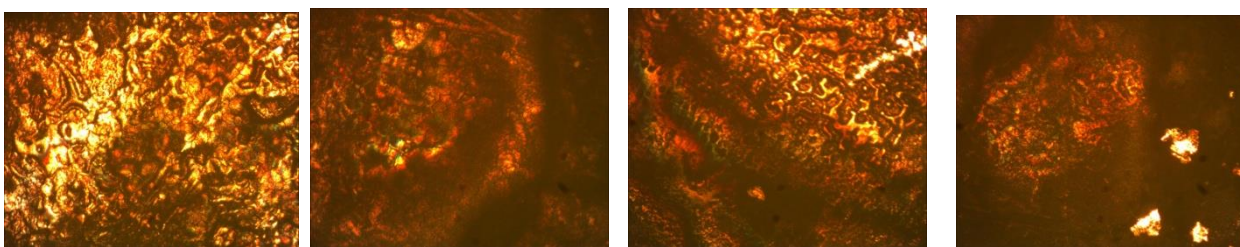
Fig. 4.20. Microstructura piesei după aplicarea descărcărilor electrice în impuls pentru:

grafit- anod; grafit – catod:

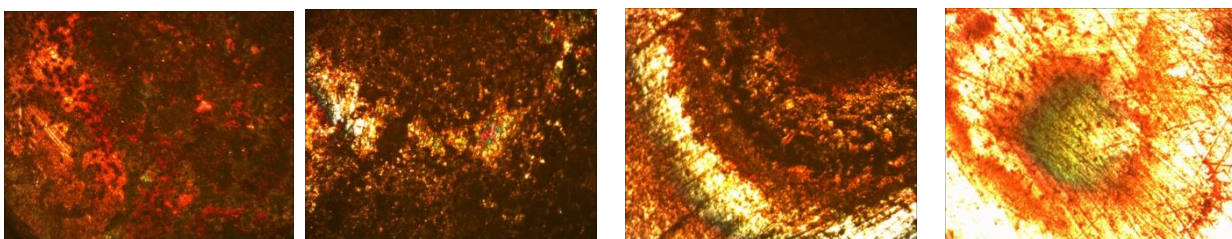
- 1) $C=600\mu\text{F}$; $f=5\text{Hz}$; $S=0,55\text{mm}$; $U=60\text{V}$,
- 2) $C=600\mu\text{F}$; $f=5\text{Hz}$; $S=0,55\text{mm}$; $U=100\text{V}$
- 3) $C=600\mu\text{F}$; $f=5\text{Hz}$; $S=0,55\text{mm}$; $U=160\text{V}$
- 4) $C=600\mu\text{F}$; $f=5\text{Hz}$; $S=0,55\text{mm}$; $U=220\text{V}$
- 5) $C=600\mu\text{F}$; $f=5\text{Hz}$; $S=0,55\text{mm}$; $U=260\text{V}$

Analiza microșlifurilor au demonstrat faptul că în cazul în care electrodul din grafit este catod pe suprafața piesei se observă zonele ca și în cazul descărcărilor electrice când piesa se află în calitate de anod, adică avem zona influenței termice.

Asemenea confirmări, că electrodul-sculă din grafit în calitate de catod erodează mai mult ca în calitate de anod, au fost constatate și în lucrările [33]. Analiza metalografică a straturilor superficiale ale pieselor prelucrate a demonstrat că în afara depunerilor din grafit mai apare și stratul alb, separat de materialul de bază prin intermediul stratului de trecere. Cercetarea microdurității acestor straturi (fig. 4.21) demonstrează faptul că: indiferent de polaritatea electrodului-sculă pe suprafața piesei s-au depistat nu numai depuneri de grafit dar și apariția stratului alb de o microduritate înaltă; din cercetările experimentale prezentate putem afirma faptul că microduritatea suprafeței poate fi mărită de circa 2-10 ori față de materialul de bază, iar grosimea lui variază în limitele 5-10 μ m.

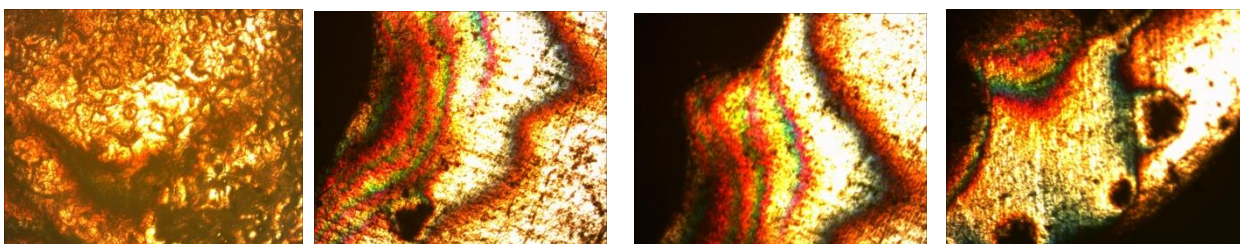


grafitul - catod; cuprul - anod

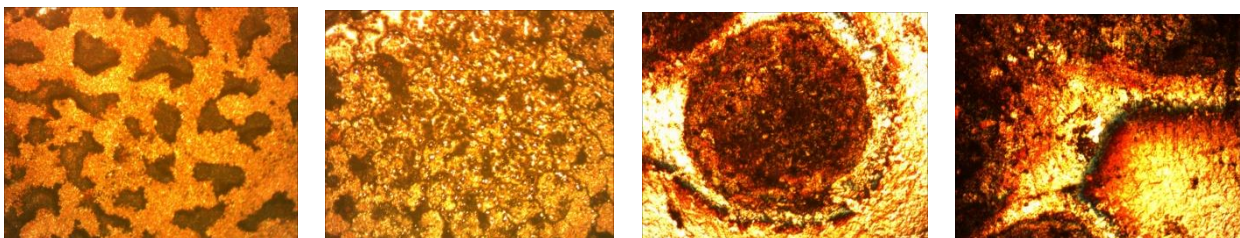


grafitul - anod; cuprul - catod

a)

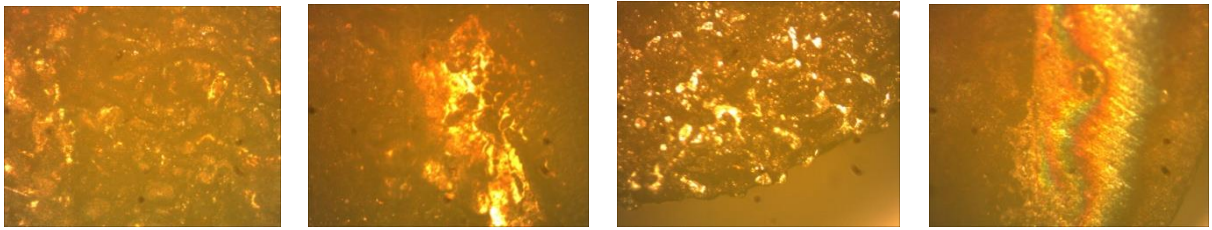


grafitul - catod; alama - anod

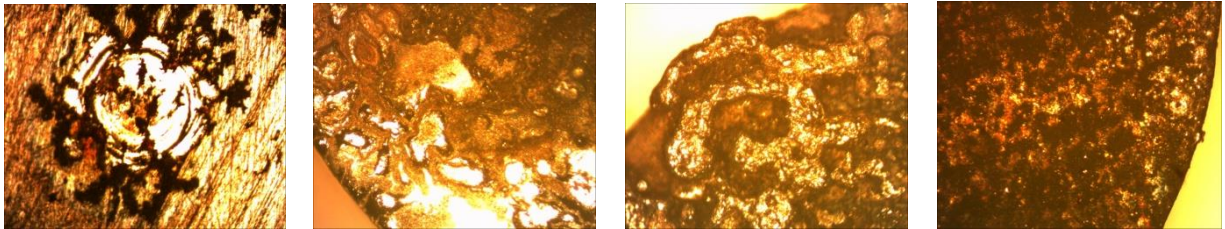


grafitul - anod; alama - catod

b)



grafitul - catod; aluminiu - anod



grafitul - anod; aluminiu - catod.

c)

Fig. 4.41. Microstructura piesei după aplicarea descărcărilor electrice în impuls pentru:

- a) grafit-cupru; b) grafit – aluminiu; c) grafit - alamă:
- 1) $C=600\mu\text{F}$; $f=5\text{Hz}$; $S=0,55\text{mm}$; $t = 30\text{s}$; $U=60\text{V}$;
 - 2) $C=600\mu\text{F}$; $f=5\text{Hz}$; $S=0,55\text{mm}$; $t = 30\text{s}$; $U=100\text{V}$;
 - 3) $C=600\mu\text{F}$; $f=5\text{Hz}$; $S=0,55\text{mm}$; $t = 30\text{s}$; $U=160\text{V}$;
 - 4) $C=600\mu\text{F}$; $f=5\text{Hz}$; $S=0,55\text{mm}$; $t = 30\text{s}$; $U=220\text{V}$;
 - 5) $C=600\mu\text{F}$; $f=5\text{Hz}$; $S=0,55\text{mm}$; $t = 30\text{s}$; $U=260\text{V}$;

Prima direcție de aplicare a acestui procedeu de prelucrare și-a găsit o aplicabilitate destul de diversă în construcția de mașini și aparate permițând în primul rând prelucrarea acelor materiale care nu se supun prelucrărilor prin metodele clasice (carburi metalice cu temperaturi înalte de topire de tipul WC, TiC, TaC, semiconductori etc.), asigurând prelucrarea suprafețelor cu caracter complex (găuri, orificii, cavități, proeminente etc.) și nu în ultimul rând asigurând o automatizare totală a procesului de prelucrare [86, 87].

Cea de a doua direcție de aplicare a acestei metode legată de modificarea compoziției și structurii stratului de suprafață a pieselor aplicate în construcția de mașini și aparate în prezent sa ramificat cum urmează:

- formarea straturilor de depunere din materiale compacte la care rolul principal în modificarea stratului de suprafață al piesei prelucrate îl joacă materialul prelevat de pe suprafața electrodului – sculă;

- formarea straturilor de depunere din pulberi și amestecuri de pulbere în care rolul principal în formarea proprietăților stratului de suprafață a piesei prelucrate le revine materialelor pulberilor în principal și electrozilor – scule în secundar, sau în cazuri aparte materialul sculei

practic nu influențează compoziția și proprietățile depunerii.

Cea de-a treia direcție asigură modificarea compoziției și proprietăților stratului de suprafață a piesei în lipsa modificării dimensiunilor piesei sau însoțită de micșorarea rugozității suprafeței prelucrate, care de fapt este o direcție relativ nouă și în literatura de specialitate se găsește mai mult ca o constatare științifică decât ca un procedeu bine definit și aplicat în practică.

Pentru toate cazurile aplicative a acestei metode de prelucrare se presupune, că rugozitatea suprafeței prelucrate este în mod direct legată de mărimea craterelor cu fază lichidă ce iau naștere pe suprafața prelucrată, însă în cazul formării straturilor de depunere se observă creșterea unor zone separate ale depunerilor ce încalcă condiția de formare a straturilor continui [88-91]. Aceasta se datorează apariției unor aspirități inițiale sau induse ce servesc în calitate de concentratoare pentru câmpul electric al descărcării electrice în impuls și direcționarea prelevării și transferului de material fie din faza lichidă a electrodului sculă, fie din materialul pulbere introdus în interstițiu pentru formarea depunerii cu proprietăți speciale.

Prelucrarea superficială cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls se caracterizează prin următoarele avantaje [91, 92]:

- materialului depus i se asigură adeziune bună cu materialul piesei;
- depunerile se pot forma nu numai din metale pure, dar și aliajele pe baza lor, aliaje dure (metaloceramice);
- în procesul prelucrării practic lipsește încălzirea metalului piesei;
- la alierea de suprafața catodului decurg procese micrometalurgice. Astfel este posibilă formarea unor aliaje, ce conferă suprafeței proprietăți noi în raport cu materialul catodului, cât și cea a materialului de depunere;
- îmbogățirea difuzională a suprafeței catodului cu elementele componente ale anodului fără a schimba dimensiunile piesei – catod;
- e posibilă alierea numai localizată;
- suprafața înainte de aliere nu cere o curățare bună de impurități în comparație cu alte metode.

Tehnologia formării de depunere este foarte simplă, iar utilajul necesar e de dimensiuni mici, ușor transportabil.

În cazul formării depunerilor din materiale compacte [90] de obicei se aplică electrozi executați sub formă de bare din materiale cu proprietăți prescrise în funcție de proprietățile necesare de a fi conferite piesei (materiale antifricțiune de tipul brozurilor, materiale anticoroziune Pd și Rt, materiale de durificare ca carburile diferitor metale și grafit sau combinații ale acestora, etc.). De obicei cercetările intensității formării depunerilor se executau

în funcție de regimul energetic de prelucrare și frecvența impulsurilor de descărcare indicându-se materialul de execuție a electrodului și diametrul lui (pentru barele de secțiune cilindrică) sau grosimea și lățimea secțiunii transversale (pentru barele de secțiune dreptunghiulară). Este necesar a stabili care este rolul ariei secțiunii transversale a electrodului-sculă în formarea depunerii. Din rezultatele cercetărilor experimentale prezentate în lucrarea [90] devine clar că, energia degajată în interstițiu este devizată în câteva componente: W_p - energia degajată în canalul de plasmă, W_a -energia degajată la suprafața anodului și W_c - energia degajată la suprafața catodului.

Mărimile indicate sunt diferite, iar redistribuirea lor are loc atât în funcție de materialul de execuție al piese-catod, electrodului-anod și a proprietăților mediului de lucru din interstițiu. De obicei o tehnologie este mai performantă dacă nu se impun condiții speciale de realizare, din care motiv în prezenta sau realizat cercetări ale descărcării electrice în impuls a electrozilor în mediu atmosferic obișnuit pentru electrozi executați din cupru, grafit, alamă. Acești electrozi sub formă de bare de secțiune cilindrică la unul și același regim energetic cu una și aceeași frecvență a impulsurilor de descărcare.

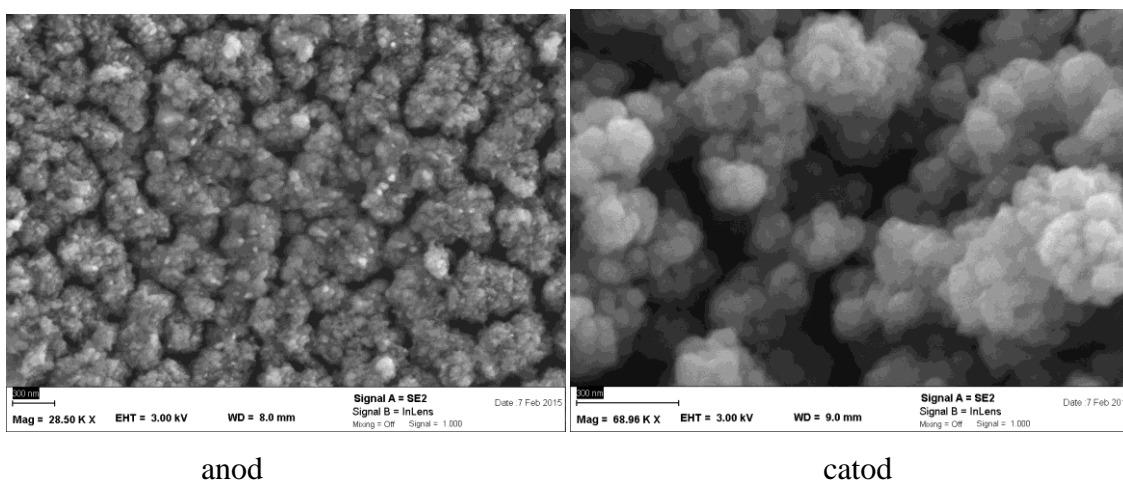


Fig. 4.22. Analiza SEM a suprafeței electrodului-sculă executat din grafit pirolitic

La cercetarea SEM a suprafeței electrodului-sculă executat din grafit pirolitic s-a constatat că pe suprafața acestuia se formează formațiuni macro constituite la rândul lor din formațiuni nano, care atestă că de fapt au loc un șir de fenomene specifice eroziunii grafitului. Aceste fenomene sunt similare pulverizării catodice cu atomi și ioni separați ai mediului de lucru (atomi de azot, oxigen și hidrogen) și desigur cu electroni. Deosebirea de pulverizarea catodică constă în faptul că, la suprafața catodului executat din grafit se mai produc și reacții intense de oxidare, care servesc în calitate de surse suplimentare de energie. Toate cele menționate servesc în calitate de argumente pentru a explica eroziunea mai intensivă a electrodului de grafit la includerea lui în calitate de catod în circuitul de descărcare a generatorului de impulsuri de curent.

4.13. Elaborarea electrodului-sculă pentru modificarea microgeometriei suprafeței piesei

După cum a fost menționat deja în anumite condiții din suprafețele prelucrate pot fi extrase meniscuri de formă conică. Este cunoscut faptul, că proprietățile suprafețelor se pot diviza în: mecanice, fizice, chimice, tehnologice, etc. În cazul în care se ia în considerație aria suprafeței active a piesei, atunci se poate constata că acesta influențează esențial proprietățile de absorbție și emisie a diferitor tipuri de radiație. Astfel modificând microgeometria suprafețelor poate fi sporită esențial capacitatea ei de absorbție a diferitor tipuri de radiație și capacității schimbului de căldură în diferite tipuri de dispozitive. Cum a fost demonstrat în unele lucrări, pentru obținerea suprafețelor cu meniscuri distribuite pe ea într-o anumită ordine este necesar să se satisfacă următoarele condiții:

- a crea așa condiții energetice în interstițiu ca pe suprafața prelucrată să formeze faza lichidă;
- în interstițiu se va crea intensitatea necesară a câmpului electric;
- intensitatea câmpului electric va purta un caracter strict localizat;
- electrodul-sculă va fi executat dintr-un material cu rezistență sporită la eroziune electrică;
- forma suprafeței active a electrodului-sculă va corespunde geometriei meniscurilor obținute;
- electrodului-sculă i se vor crea condiții de răcire prin construire s-au prin introducerea unui mediu de lucru.

Reeșind din cele expuse la proiectarea electrodului-sculă se va ține cont și de condițiile de modificarea a microgeometriei suprafeței prelucrate.

În fig. 4.23 sunt prezentate două procedee aplicate la modificarea microgeometriei suprafețelor. Schema prezentată în fig. 4.23, *a* presupune utilizarea unui electrod executat din grafit și ascuțit conic la capătul activ sub un unghi de $88...90^\circ$. În acest caz electrodului-sculă i se vor transmite mișcări de avans după toate cele trei direcții ale spațiului: x , y și z .

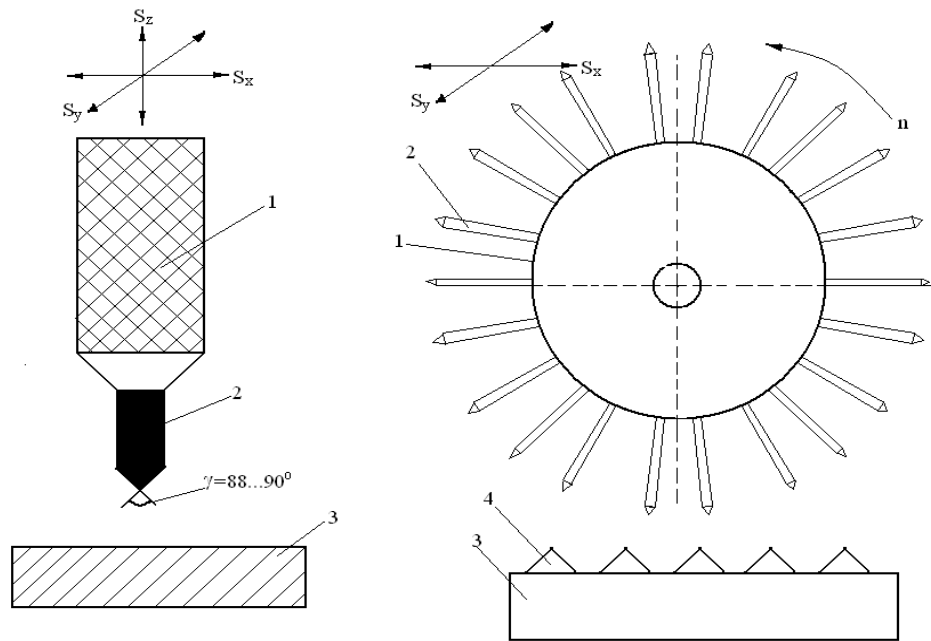


Fig. 4.23 Scheme de prelucrare la modificarea micro geometriei suprafețelor:
 a) prelucrarea suprafeței plane (3) cu electrod-bară (2) fixat în mandrină, și deplasat după cele trei direcții ale spațiului x , y și z ; b) prelucrarea suprafeței plane cu aplicarea electrodului-sculă rotitor (1) în corpul căruia sunt fixate barele (2) a căror capete active sunt ascuțite și orientate spre suprafața prelucrată a piesei (3) pe care se formează meniscuri de formă conică (4)

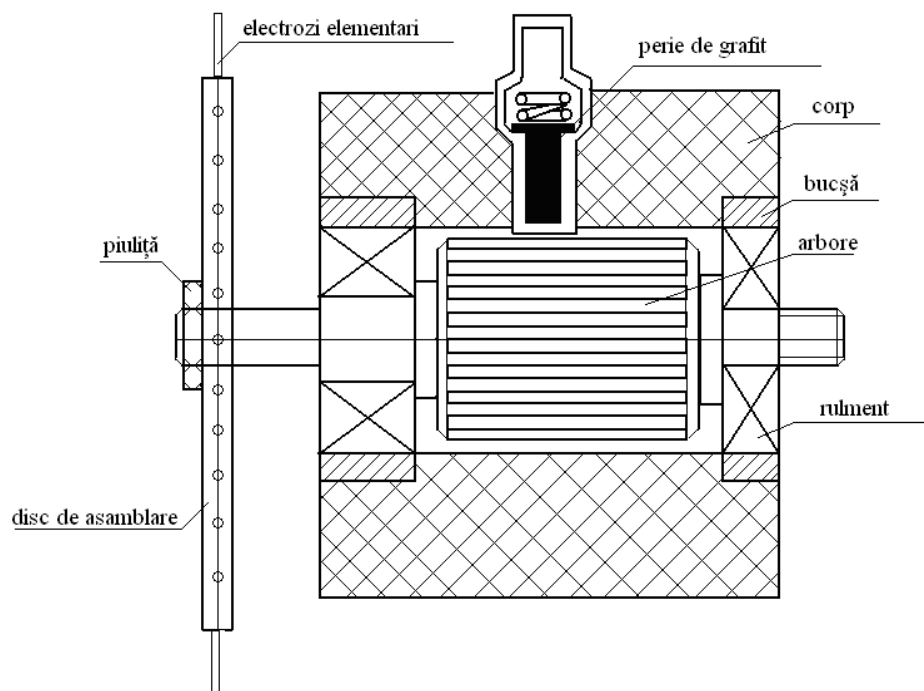


Fig. 4.24. Electrocul-sculă în ansamblu

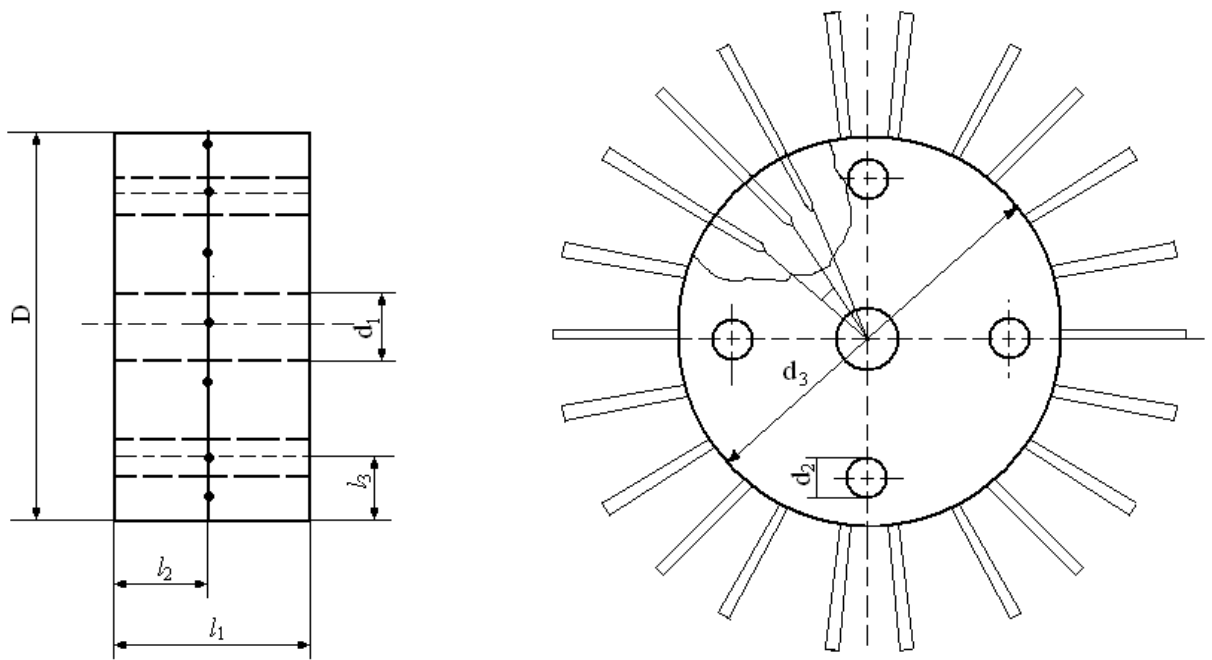


Fig. 4.27. Electrocul în ansamblu

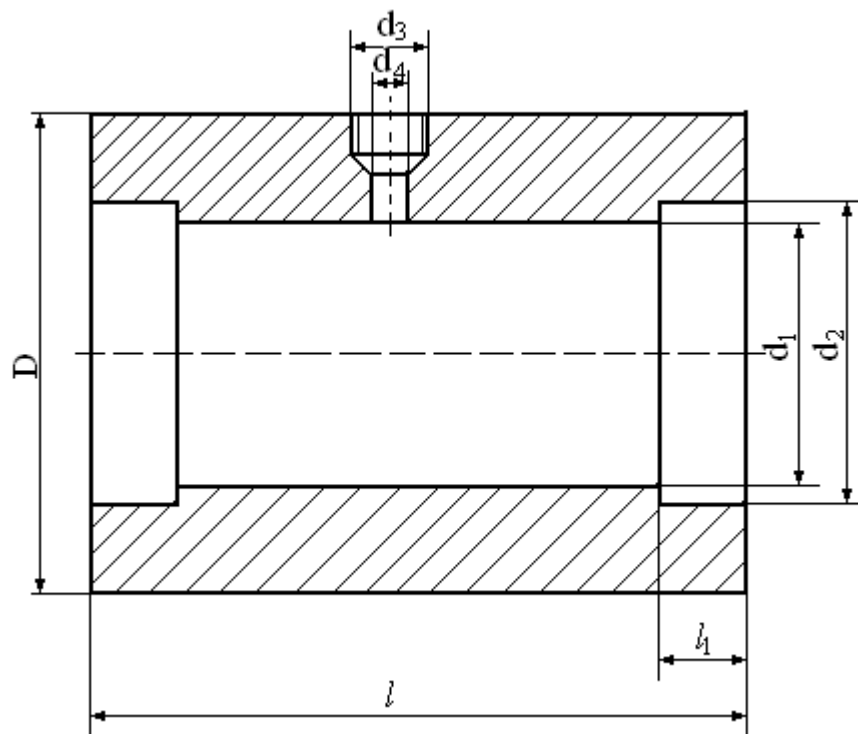


Fig. 4.28 Corpul electrocului-sculă

Utilizarea primului procedeu este irațională din motivul uzării prin eroziune electrică a electrocului-sculă, modificării microgeometriei lui și încălcării regimului tehnologic de

prelucrare (sporește mărimea interstițiului, crește mărimea căderii de tensiune pe el, intensitatea curentului în impulsul de descărcare se micșorează). Cele expuse mai sus impun schimbarea frecvență a electrodului, iar ca rezultat se complică procesul de prelucrare și scade productivitatea.

Analizînd cel de-al doilea procedeu de prelucrare putem observa, că în acest caz fiecare electrod elementar participă ciclic la prelucrarea suprafeței (o singură dată la o cantitate de n descărcări electrice). Dacă admitem că prelucrarea se execută cu frecvența de 20 Hz, atunci rezultă că fiecare dintre ei participă la prelucrare o singură dată în decurs de 1 secundă. La prima constatare s-ar părea că electrodul-sculă ar trebui să se încălzească foarte repede, iar dacă se ține cont de faptul că durata unui impuls este de numai $20\mu\text{s}$, atunci se poate ușor stabili că, durata de răcire a acestuia în raport cu cea de funcționare este relativ mare, cu atît mai mult că dimensiunile zonei de încălzire nu depășesc limitele de $100\mu\text{m}$.

Astfel pentru realizarea în practică a procesului de modificare a microgeometriei suprafețelor este necesară utilizarea unui electrod-sculă ce ar satisface prescripțiile tehnologiei descrise. Studiind literatura de specialitate și particularitățile constructive ale diferitor tipuri de electrozi-scule a fost propusă și realizată următoarea construcție (vezi fig. 4.24): corpul electrodului-sculă (executat din textolită asigură izolarea electrică a sculei de corpul instalației) – 1, electrozii elementari – 2, discuri de asamblare – 3, arborele electrodului-sculă – 4 (executat secționat ceea ce asigură alimentarea cu energie numai a electrodului elementar ce se află în zona de lucru), perii electrice – 5, rulmenții – 6, buloanele – 7, piulițele de fixare – 8, motorul electric pas cu pas – 9 (ceea ce asigură rotirea sculei cu un anumit pas necesar distribuției meniscurilor pe suprafața prelucrată).

Discurile de asamblare 3 îndeplinesc momentan și cea de-a doua funcție – cea de răcire a electrozilor elementari prin prelucrarea unei cantități considerabile de căldură prin contact direct a două suprafețe metalice.

Concluzii capitolul 4

Procesul de aliere a suprafețelor pieselor prin electroeroziune are specificul său și respectiv se aplică electrozi-scule față de care se impun anumite cerințe. Din studiul efectuat putem concluda:

- electrozii materialului căruiia participă direct la formarea straturilor de depunere vor poseda proprietăți prescrise;
- în funcție utilajul aplicat la laliere electrozii pot fi vibrați, rotativi sau combinați;
- în cazul când materialul electrozilor nu trebuie să participe la formarea stratului de depunere acestea se vor executa din materiale ce dispun de un coeficient mare de acumulare al căldurii.

CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI

Din analiza rezultatelor cercetărilor teoretice și experimentale care prezintă realizarea obiectivelor tezei de doctorat, reiese următoarele **concluzii generale**:

- la proiectarea electrozilor-scule se va ține cont de condițiile de funcționare;
- forma electrodului-sculă îi va permite funcționarea astfel ca suprafața de lucru a acesteia să se relaxeze timp de câteva cicluri de prelucrare;
- materialele accesibile pentru elaborarea electrodului-sculă sunt: cuprul de puritate tehnică, grafitul tehnic, precum și oțelurile inoxidabile;
- dimensiunile electrodului-sculă sînt funcție de dimensiunile suprafeței de prelucrat și regimul energetic de prelucrare;
- electrozii-scule utilizați în toate cazurile servesc pentru a introduce energia de efect de la generator în interstițiul format de piesă și sculă;
- electrozii-scule pot fi executați dintr-o bucată și să fie compuși din segmente din același material sau materiale diferite;
- cercetările eroziunii masei electrodului-sculă-catod din materialele cercetate au arătat că eroziunea minimală la prelucrarea suprafețelor metalice cu DEI o are oțelul inox, urmat de cupru și wolfram;
- pentru executarea electrozilor-scule la prelucrarea termică a suprafețelor se recomandă a utiliza materiale cu coeficient mare de acumulare a căldurii;
- electrozii-sculă utilizați la tratarea termică vor avea forma de disc, ceea ce permite a organiza funcționarea lor în așa fel ca, fiecare nouă descărcare începe pe o porțiune nouă de suprafață, astfel evitîndu-se încălzirea sculei și micșorarea eroziunii ei;

BIBLIOGRAFIE

1. Stoian, Leonard; Palfavi, Atilia; Vintilă, Nicolae; Alexandru, Maniu. Tehnologia materialelor. București: Ed. Didactică și pedagogică, 1980. 656 p.
2. Topală, Pavel, Tehnologia materialelor, Universitatea de Stat Alecu Russo, Bălți 2001. 188 p.
3. Kiseliiov, Iurii. Studiul și elaborarea tehnologiei și a utilajului de tăiere a metalelor cu arcul de plasmă la polaritate inversă, Autoreferat al tezei de doctor habilitat în tehnică. Chișinău: 2005. 39 p.
4. Черненко, В. И.; Снежко, Л.А.; Папанова, И.И. Получение покрытий анодно-искровым электролизом. Л.: Химия. 1991. 128 с.
5. Артамонов, Б.А.; Вишницкий, А.Л.; Волков, Ю.С.; Глазков, А.В.; Размерная электрическая обработка металлов, Москва: Высшая школа, 1979, 336 с.
6. Носуленко, В.И. О физической природе, об общих отличиях и технологических возможностях электрических разрядов и классификации способов электроразрядной
7. Гитлевич, А. Е.; Михайлов, В. В.; Парканский, Н. Я.; Ревуцкий, В.М. Электроискровое легирование металлических поверхностей, Кишинев: Штиинца, 1985. 196 с.
8. Topala, Pavel, Cercetări privind obținerea straturilor de depunere din pulberi metalice cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls. Rezumatul tezei de doctorat. București: Universitatea Politehnica. 1993. 32 p.
9. Tosun, N.; Cogun, C.; Pihili, H. The Effect of Cutting Parameters on Wire Crater Sizes in Wire EDM, Springer-Verlag London Limited. Int.: Adv Manuf. Technol (2003) 21: 857-865.
10. Her, M-G.; Weng, F.-T.; Micro-hole Machining of Copper Using the Electro-discharge Machining Process with a Tungsten Carbide Electrode Compared with a Copper Electrode, Springer-Verlag London Limited, Int: J Adv Manuf. Technol. 2001. 17: 715-719.
11. Yu, S. F., Lee; B.Y.; Lin, W.S. Waveform Monitoring of Electric Discharge Machining by Wavelet Transform, Springer-Verlag London Limited, Int.J. Manuf. Technol. 2001. 17: 339-343
12. Лазаренко, Б. Р. Способ нанесения металлических покрытии. /Авт. Изобрет. Авт. свид. 89933 (СССР). Опубл. в Б.И. 12.
13. Лазаренко, Б. Р.; Лазаренко, Н.И. Электрическая эрозия металлов, Госэнергоиздат 48. Москва: Ленинград. 1944.
14. Лазаренко, Б. Р.; Лазаренко Н. И. Физика электроискровой обработки металлов. КБТИ Министерство электропромышленности. Москва: 1946. 76 с.

15. Электроискровое легирование металлических поверхностей, Библиографический указатель литературы за 1974-1979 г.г., Кишинёв: Штиинца. 1981 60 с.
16. Золотых, Б. Н. Электроискровой контактный способ упрочнения металлических поверхностей. Госэнергоиздат. Москва: Ленинград. 1951. 54 с.
17. Мицкевич, М. К.; Бушик, А.И.; Бакуто, И. А.; Шилов, В. А.; Мрочек, Ж.А. с. 730522 (С.С.С.Р.) Способ электрического нанесения тонкослойных покрытий. Авт. изобрет. Ад. – Оpubл. в БИ № 16 1980.
18. Коваленко, В.С.; Верхотуров, А.Д.; Головкин, Л.Ф.; Подчерняева Ю. А. Лазерное и электроэрозионное упрочнение материалов Москва, 1986, 276 с.
19. Попилов, Л.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов. Справочник. М.: Машиностроение, 1982. 399 с.
20. Gavrilaş, I.; Marinescu, N.; Visan, A. Modern technologies in machine-building. Bucharest: Politechnics Institute, 1997, 199 p.
21. Gavrilaş, I., Marinescu, N.I. *Prelucrarea prin electroeroziune și electrochimic - abrazivă*. Vol. 1 și 2. Bucureşti: Editura Tehnică, 1980;
22. Nanu, A., Nanu, D. *Prelucrarea dimensională prin eroziune electrică în câmp magnetic*. Timișoara: Editura Facla, 1981;
23. Некрашевич И.Г., Бакуто И.А. Механизм эрозии металлов при электрическом импульсном разряде. В кн.: Сб. научных трудов ФТИ АН БССР, вып. 6, Минск: изд-во АН БССР, с. 193-215.
24. Гитлевич А.Е., Топала П. А, Снегирёв В.А. Игнатьков Д.А. Особенности электрической эрозии электродов при импульсных разрядах, протекающих в режиме недонапряжения. ЭОМ, 1988, №3, с.9-12.
25. Topală P., Stoicev P. Tehnologii de prelucrare a materialelor conductibile cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls Chişinău, TECHNO-INFO, 2008, p.265
26. Aurel Nanu, „*Tehnologia materialelor*”, Chişinău, „Ştiinţa” 1983.
27. Лазаренко, Б. Р. Способ нанесения металлических покрытий. Авт. Изобрет. Авт. свид. 89933 (СССР)., Оpubл. в Б.И. 12.
28. Абрамчук, А. П.; Бовкун, Г. А.; Михайлов, В. В.; Ткаченко, Ю. Г. Антифрикционные покрытия на алюминии и его сплавах, сформированные электроискровым легированием их порошковых материалов. Порошковая металлургия 7, 1983. с. 23 – 26.
29. Ghitlevici A. E., Revuţkii V.M. Osobennosti iavlenii ni promejutkah bolise probivnih . Tezisi dokladov . Vsesoiuznoi konferenţii po impulsnîm metodam obrabotki materialov, Minsk, FTIAN BSSR, 1978, PG. 196-197.

30. Parkanskii N. Ia. Issledovanieia proțessa electroiskrovogo pocrıtii iz porořkovıh materialov v electriceskom pole. Avtorev. dis. kand. teh.nauk IPM. AN USSR, Kiev, 1979.
31. Topala P.A. Osobennosti iavlenii na elektrodah pri nizkovolitnıh razreadah na promejutkah boliře probivnıh. Trzisı dokladov Respublikanskoi konferenții molodıh ucionıh. Chiřinev , řtiința 1986, pg. 252-253.
32. Borisov. Iu. S., Borisova A.L. Plazmennıe porořkovıe pokrıtıea. Kiev, Tehnika. 1986.
33. TOPALA A. PAVEL. Studiul fundamental ři aplicativ al efectelor electroerozive în tehnologiile neconvenșionale. Teza de doctor habilitat în tehnică. Universitatea Tehnică a Moldovei. CZU 621.0.484.755. Chiřinău 2008. P. x-xx.
34. Золотых, Б. Н. Электроискровой контактный способ упрочнения металлических поверхностей. Госэнергоиздат, Москва, Ленинград, 1951. – 54 с.
35. Коробейник, В. Ф.; Жеребцов, В. М. Электроискровое восстановление рабочей поверхности прокатных валков. Электронная обработка материалов № 6, 1981. – С. 40 – 43.
36. Кжен, Иг. А.; Золотов, А. А.; Потехин, К. Ф.; Максимов, Н. Г. Исследование вливания некоторых факторов на интенсификацию механизированного электроискрового легирования металлических поверхностей. Электронная обработка материалов 4, 1982. – С. 26-28.
37. Бекренев, А. Н.; Камасев, А. В.; Путилин, В. А. Массоперенос в металлах при короткоимпульсном лазерном воздействии. Письма в Ж ТФ 19 вип.13, 1992. – С. 14 – 15.
38. Topala, P., Stoicev, P. Tehnologii de prelucrare a materialelor conductibile cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls. Chiřinău (Republic of Moldova): Editura Tehnica-Info, 2008.
39. . Wang, Z.L.; Fang, Y.; Wu, P.N.; Zhao, W.S.; Cheng, K. Surface modification process by electrical discharge machining with a Ti powder green compact electrode. Journal of Materials Processing Technology 2002, 129, 139–142.
40. Topală P., Slătineanu L., Dodun O., **Pınzaru N.** Influence of some factors on the powder deposition process by electrical discharges. MECHANICS 2008. Proceedings of the International Scientific Conference. Rzeszów University of Technology, Poland. Rzeszów, June 2008. ISSN 0209-2689. pg. 277-282.
41. Topală P., Slătineanu L., Dodun O., Coteață M., and **Pınzaru N.** Electrospark Deposition by Using Powder Materials. Materials and Manufacturing Processes, 25: 932–938, 2010 Copyright © Taylor & Francis Group, LLC ISSN: 1042-6914 print/1532-2475 online DOI: 10.1080/10426910903447238. p. 932-938

42. . Gitlevich, A.E.; Topală, P.; Kuku, I.I. Device for powder material supply (in Russian). Patent Soviet Union no. 1574385, 1988.
43. Lilian, P. Davila; Valerie, J. Leppert; Subhash, H. Risbud. Microstructure and microchemistry of silicon particles formed during electrical-discharge machining. Journal of materials science: Materials in electronics 14, 2003. - P 507 – 510.
44. Ставицкий, В.И. Электроискровая прецизионная обработка материалов. Научные основы точных материалов формообразования поверхностей, ЭОМ, №.6, Кишинев, 2001. – С. 5 – 32.
45. Топала, П.; Стойчев, П.; Епуряну, А.; Бешлиу, В. Упрочнение металлических поверхностей на участках для электроискрового легирования. International Scientific and Technical conference „Machine-bulding and technospere of the XXI century”, Donetsk, 2006. – С. 262 – 66.
46. Топала, П.; Стойчев, П.; Епуряну, А.; Руснак, В. О возможности легирования металлических поверхностей на установках для электроискровой обработки в режиме недонапряжения. International Scientific and Tecnical conferance „Machine-Bulding and technospere of the XXI century”, Donetsk 2006. – P. 266 – 270.
47. Топала, П.А. Массоперенос и диффузионные процессы в поверхностных слоях деталей машин при электроискровой обработке. “Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования и технологической оснастки” Санкт-Петербург 2007. – 11 с.
48. Парканский, Н.Я. Исследования процесса электроискрового нанесения покрытий из порошковых материалов в электрическом поле. Дисс. канд. техн. наук, Киев. Институт проблем материаловедения АН УССР.
49. А.С. 1151403 (СССР). Способ электроискрового нанесения покрытий и устройство для его осуществления. Михайлов, В.В.; Гитлевич, А.Е.; Ревуцкий, В.М.; Абрамчук, А.П. Оpubл. в Б.И. №15, 1985.
50. Топала, П. А. Упрочнение металлических поверхностей при электроискровом нанесении порошковых материалов. Повышение надежности и долговечности материалов на основе новых методов термической обработки, Хмельницк, 1988. – 91 с.
51. Бакуто И.А. О зависимости электроэрозионного эффекта от электрического режима разряда; - В кн.: Сб. научных трудов ФТИ АН БССР вып.6, Минск, изд-во АН БССР, 1969, с.213-222.

52. Гитлевич А.Е., Топала П. А, Снегирёв В.А. Игнатьков Д.А. Особенности электрической эрозии электродов при импульсных разрядах, протекающих в режиме недонапряжения. ЭОМ, 1988, №3, с.9-12.
53. Topală, Pavel. The energy distribution in the gap at the gap technological applying of the electrical discharges in impulses. Iași: Editura PIM, Nonconventional Tehnologies Review, Nr.1, 2007. p. 129 – 132.
54. Топала Павел, Стойчев Петру, Технологии обработки токопроводящих материалов с применением импульсных разрядов. Кишинев, TEHNICA-INFO, 2008, с. 265.
55. Топала П., Баланич А., Пынзару Н., Стойчев П., Слэтиняну Л. Способы увеличения стойкости электродов-инструментов применяемых при формировании поверхностных слоев импульсными разрядами. Машиностроение и техносфера XXI века. Донецк-2009, ISBN 966-7907-25-2, с. 168-172.
56. Topala P., Pinzaru N., Stoicev P. Transformations in the surfaces of tool-electrodes during surfaces layer formation by applying electric discharges in impulse. ModTech International Conference, Iași-Chișinău-Belgrad, 2010, p.639-642.
57. Doru Bardac, Constantin Rânea, Dragoș Paraschiv. Tehnologii de procesare a suprafețelor / Iași: Junimea, 2005, p. 180;
58. Топала, П. А., Ревуцкий, В.М. Процессы на электродах при низковольтных разрядах на промежутках больше пробивных. Пятое Всесоюзное совещание по электрической обработке металлов, Кишинев, 1985. – С. 73 – 74.
59. José Carvalho Ferreira. A study of die helical thread cavity surface finish made by Cu-W electrodes with planetary EDM. Printed Int J Adv Manuf Technol, 2006.
60. Gavrilaş, I.; Martinescu, N.; Vișan, A. Modern technologies in machine-building. Bucharest, Politechnics Institute, 1997.
61. Marinescu, N.I.; Sturzu, A.; Vișan, A.; Gavrilaş, I. Tehnologii moderne în construcția de mașini, București 1984. – 199 p.
62. Лазаренко, Н. И. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Машиностроение 44, Москва, 1976.
63. Лазаренко, Б. Р.; Лазаренко, Н. И.; Лазаренко, В. Р. А.с. 7065 51 (СССР), Устройство для нанесения покрытий из металлов и сплавов./Авт. изобрет. – опубл. в Б.И. 22.
64. А.С. 1151403 (СССР). Способ электроискрового нанесения покрытий и устройство для его осуществления. Михайлов, В.В.; Гитлевич, А.Е.; Ревуцкий, В.М.; Абрамчук, А.П. Опубл. в Б.И. №15, 1985.

65. Некрашевич, И.Г.; Бакуто, И.А. Механизм эрозии металлов при электрическом импульсном разряде. В кн.: Сб. научных трудов ФТИ АН БССР, вып.6, Минск, изд-во АН БССР 1960. – С. 193 – 215.
66. Бакуто, И.А. О зависимости электроэрозионного эффекта от электрического режима разряда. В кн.: Сб. научных трудов ФТИ АН БССР. – С. 213 – 222.
67. Антоско, В. Я.; Гитлевич, А. Е.; Коваль, Н. П. К вопросу об ограничении толщины упрочненного слоя при электроискровом легировании. Электронная обработка материалов № 4, 1975. – С. 21-22.
68. Гитлевич, А.Е.; Топала, П.А.; Куку, И.И.; Иванов, В.И.; Снегирев, В.А. О возможности упрочнения металлических поверхностей на установках для электроискрового легирования типа «Разряд».- ЭОМ, №2, 1987. – С. 24 – 26.
69. Перетятку, П. В.; Михайлов, В. В.; Герцрикен, П. С.; Мазанко, В. Ф. Влияние магнитного поля на структуру и фазовый состав покрытый, полученных при электроэрозионном легировании. Электронная обработка материалов 4, 1995.
70. Леонтьев, П.А.; Чекалова, Н.Г.; Хан, М.Г. Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов. М.: Metallurgia, 1986. – 144 с.
71. Balanici, Alexandru; Topală, Pavel; Abramciuc, Alexandru; Pereteatcu, Pavel; Rusnac, Vladislav; Beşliu, Vitalie; Cazacu, Ala. Noi tehnologii avansate de prelucrare, recondiționare și de tratare a pieselor de construcții de mașini utilizate în industria alimentară,electrotehnică și electronică, în vederea creșterii performanțelor industriale, Raport științific/ Universitatea de Stat “A.Russo”, Bălți. Num. înregist. de Stat 0101 MD.00143, 2005. – 144 p.
72. Balanici, A.; Ambramciuc, A.; Topală, P.; Pereteatcu, P.; Znovenco, S. Cercetări privind procesul de prelucrare complexă a suprafețelor metalice prin electroeroziune și plasmă electrolitică, Raport științific/Universitatea de Stat „A. Russo“, Bălți. Num. Înregist. de Stat 0197MD. 001238, 2000. – 66 p.
73. Ghitlevici, A.E.; Mihailov, V.V.; Parkansky, N.A.; Revutsky, V.M. Electro-spak alloying of metallic surfices///Chișinău: Știința, 1985. – 180 p.
74. Некрашевич, И. Г.; Бакуто, И. А. К вопросу о современном состоянии теоретических представлений об электрической эрозии металлов. – В.кн.: Электроискровая обработка металлов. – Москва, Изд-во АН СССР, 1963. – С. 24 – 28.
75. Намитоков, К.К. Электроэрозионные явления. Энергия 456, Москва, 1978.
76. Золотых, Б. Н. О физической природе электроискровой обработки металлов. изд-во АН СССР, Москва, 1957. – С. 38 – 69.

77. Чяругин, Н. В. Физико-химические явления при электроискровом легировании металлов. Физико-химическая механика материалов 4, 1989. – С. 43 – 48.
78. Crețu, G. Bazele cercetării experimentale. Îndrumar de laborator, Iași (Romania): Universitatea Tehnică “Gh. Asachi”, 1992.
79. Topala, Pavel, Cercetări privind obținerea straturilor de depunere din pulberi metalice cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls. Rezumatul tezei de doctorat. București: Universitatea Politehnica. 1993. 32 p.
80. Гитлевич, А. Е.; Парканский, Н. Я.; Игнатков, Д. А. Об ограничении толщины слоев, формируемых в процессе электроискрового легирования. Электронная обработка материалов 3, 1981. – С. 25 – 29.
81. Бакуто, И. А.; Мицкевич, М. К. О факторах, влияющих на образование покрытий при электроискровом способе обработки. Электронная обработка материалов 3, 1977. – С. 17 – 19.
82. Чяругин, Н. В. Влияние физико-химических явлений на технологические показатели процесса электроискрового легирования. Авт. дис. канд. техн. наук, Тула 1984.
83. Brevet de invenție Nr. 4325, Sculă cu mulți electrozi pentru prelucrarea suprafețelor prin descărcări electrice în impuls / Topala P., Ojegov A., Beșliu V., Hirbu A., Pînzaru N. / data publicării 2015.02.26, BOPI Nr. 2/2015, pp. 25-26. MD 4325 C1 2015.09.30.
84. Буравлев, Ж. М.; Рудневски, Н. К.; Грикит, И. А. Спектральный анализ металлов и сплавов. Техника, Киев, 1976, 190 с.
85. ***Электроискровое легирование металлических поверхностей. Библиографический указатель литературы за 1943-1973 г.г., Кишинёв: Штиинца, 1974. – 87 с.
86. Topală, P., The energy distribution in the gap at the gap technological applying of the electrical discharges in impulses, Nonconventional Technologies Review, No.1, pp. 129 – 132, (2007).
87. Gavrilov, P., Lesnevski, L., Tverishin, V., Tyurin, V., Chernovski M., (2007). Micro-arc oxidation of work surfaces of technological equipment elements made of aluminum alloys. Materials of the 9th international practice conference, 10-13 April 2007, pp. 77-79, (2007).
88. Topală P., Beshliu V., Graphite deposits formation on innards surface on adhibition of electric discharges in impulses, Bulletin of the Polytechnic Institute of Iassy, Vol. LIV, pp. 105111, (2008).
89. Cernenco, L., Snejco, L., Papanova, I., Acquisition of surfaces by means of anodesparking electrolysis, Himia, 2, pp. 128, (1991).
90. Topală, P., Ghitlevich, A., Kornienko, L., Corrosive behavior of titanium with electrosparking surfaces, Protection of metals, Vol. 29, No. 3, pp. 351-356, (1989).

91. Alai, S. et al., Practical studies in machinery. Manual for teacher training institute students, pp. 67-70, Prosveshenie, Moscow, (1979).
92. Nemoshkalenko, V., Topala, P., Tomashevskii, N., Mazanko V., Nosovskii O., Peculiarities of forming surface layers at spark discharges. Metallophysics, Vol.12, pp.132-133, (1990).
93. Коваленко, В.С.; Верхотуров, А.Д.; Головкин, Л.Ф.; Подчерняева, И.А. Лазерное и электроэрозионное упрочнение металлов. М.: Наука, 1986. – 276 с.
94. Broşura microscop
95. Румшинский, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. Москва: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1971. 192 с.
96. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. 540 с. ISBN 5-03-001071-8.
97. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерения. Л.: Наука, 1967. 88 с.
98. Математические методы обработки экспериментальных данных. Расчетные задания. Методические указания к практическим занятиям. / Кункин С.Н. и др. Санкт-Петербург, 2002. 68 с.
99. Лунев В.А. Планирование и обработка технологического эксперимента: Учебное пособие. Л.: ЛПИ, 1985 г. 84 с.
100. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. М.: Финансы и статистика, 1983. 471 с.
101. Востров В.Н., Макутов В.С., Юргенсон Э.Е. Статистические методы исследования процессов обработки металлов давлением. Учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1997. 95 с.
102. Грановский, Г.И. Обработка результатов экспериментальных исследований резания металлов. М.: Маш., 1982. 112 с.
103. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. 2-е изд. М.: Наука, 1976. 279 с.
104. Зингерман, А.С.; Каплан, Д.А. Зависимость электрической эрозии анода от расстояния между электродами. ЖТФ, Т. XXVIII, в.2, 1958. – С. 386 – 393.
105. Самоходский, А.И.; Кулявский, М.Н. Лабораторные работы по металловедению. М.: Машиностроение, 1971.
106. ГОСТ 9350-76. Изменение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников.- Ввод 01.01.1977.

107. Topala P., Stoicev P., Ojegov A., Pinzaru N. Effects of abnormal dissolving of oxygen in metals under the influence of electrical discharges in impulse plasma. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*. Vol. 2, 2010, pp. 95-102. ISSN 2067-3604. Revista cotată SCOPUS.
108. Pînzaru N. Experimental investigations on the durability of toolectrodes at the surface processing by pulsed electrical discharge. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*. Vol. IX, No. 2, 2017, p. 59-64. ISSN 2067-3604, 2017. Revista cotată SCOPUS.
109. Topala P., Rusnac V., Beşliu V., Ojegov A., Pînzaru N. Physical and chemical effects of EDI processing. *Internet Journal of Engineering and Technology*, Vol. II, 2011, No. 2, Issue 1, 6 p. ISSN 1338-2357.
110. Topală P., Slătineanu L., Dodun O., Coteață M., and Pînzaru N. Electrospark Deposition by Using Powder Materials. *Materials and Manufacturing Processes*, 25: 932-938, 2010 Copyright © Taylor & Francis Group, LLC ISSN: 1042-6914 print/1532-2475 online DOI: 10.1080/10426910903447238. p. 932-938
111. Topala P., Pinzaru N., Guzman D., Ojegov A., Besliu V. Peculiarity of the tool-electrode wear mechanism during surface machining with electric discharges in impulse. *Advanced Materials Research*, Vol. 1036, Trans Tech Publications, Switzerland, 2014, pp. 470-475. ISSN 1662-8985. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1036.470.
112. Pînzaru N. Experimental research on the behavior of tool-electrodes made of conductive materials by applying DEI. *Nonconventional Technologies Review*. 2016 Romanian Association of Nonconventional Technologies Romania, December, 2016. p. 15-20.
113. Marin L., Topala P., Stoicev P., Beşliu V., Ojegov A. Pînzaru N., Guzman D., Platon A. Influența parametrilor tehnologici – tensiune, cantitate de electricitate – la generarea formațiunilor spațiale alcătuite din atomi de carbon de tipul fullerenilor, la aplicarea descărcărilor electrice în impuls. *Meridian ingineresc*. Nr. 1, 2017. Editura „TEHNICA UTM”, p. 30-35. ISSN 1683-853X. Categoria C.
114. Topală P., Beşliu V., Rusnac V., Ojegov A., Pînzaru N. Modificarea structurală a compoziției chimice și a microgeometriei suprafețelor pieselor cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls. *Fizică și tehnică: Procese, modele, experimente*. Vol. I, 2011. Bălți: Presa univ. bălțeană, 2011, pp. 36-42. ISSN 1857-0437.
115. Топала П., Стойчев П., Баланич А., Пынзару Н. Исследования изменения интенсивности формирования покрытий из порошковых материалов с применением импульсных разрядов, *Материалы международной конференции ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА, ВОСТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН*,

МЕХАНИЗМОВ, ОБОРУДОВАНИЯ, ИНСТРУМЕНТА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ, Санкт-Петербург, 2008, часть 2. p. 118-129.

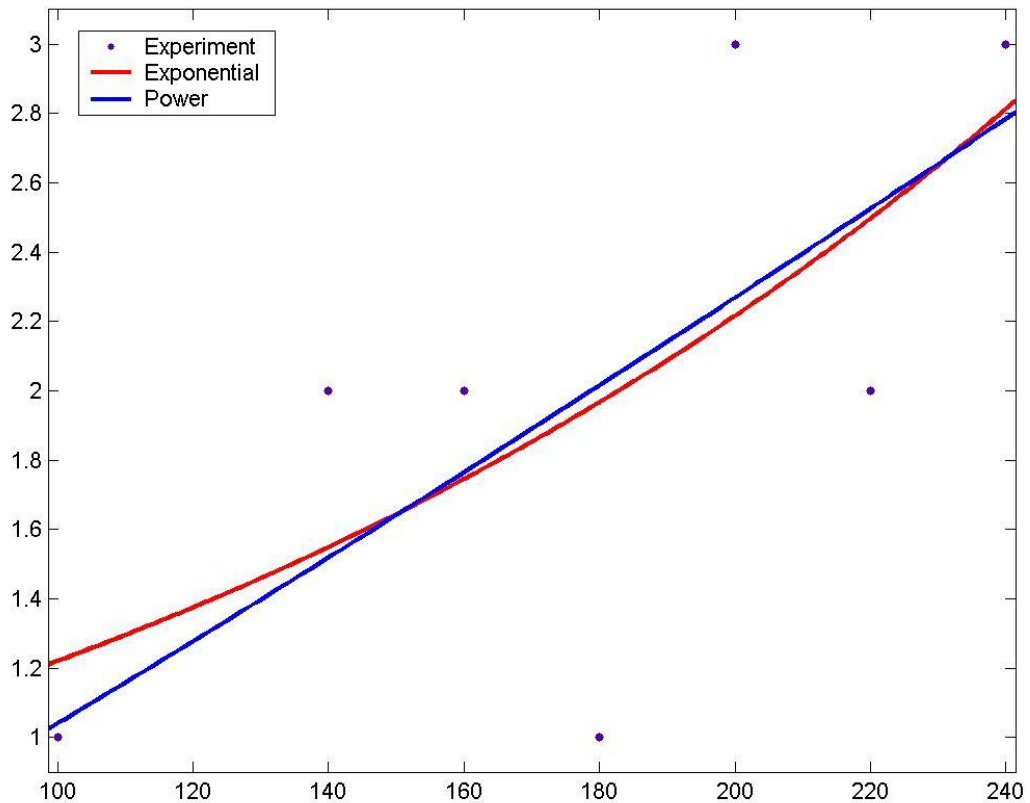
116. Topală P., Slătineanu L., Dodun O., Pînzaru N. Influence of some factors on the powder deposition process by electrical discharges. MECHANICS 2008. Proceedings of the International Scientific Conference. Rzeszów University of Technology, Poland. Rzeszów, June 2008. ISSN 0209-2689. pg. 277-282.
117. Topală P., Pînzaru N. Criteria for projecting tool-electrodes applied in the formation of surface layers with electric discharges in pulse. Buletinul Institutului Politehnic din Iași. Universitatea Tehnică „Gh. Asachi” din Iași. Tomul LIV (LVIII), fasc. 2, 2008. Secția Construcții de mașini. 12th International Conference-TMCR-2008. Iași, România, May 29-31, 2008. ISSN 1011-2855. pg.
118. Topala P., Stoicev P., Pînzaru N. Constructive and material peculiarities used at elaborating electrode-tools for the processing of surfaces by applying electrical discharges in impulse. Creativitate și Management. Culegeri de lucrări științifice. Ediția XIII-a. Editura U.T.M., ISBN 978-9975-45-115-4. Chișinău, 2009, p. 169-171.
119. Топала П., Пынзару Н., Стойчев П. Упрочнение и восстановление деталей машин нанесением покрытий из порошковых материалов электроимпульсными разрядами. I. Анализ процессов происходящих в межэлектродном промежутке. Машиностроение и Техносфера Сборник трудов XVII международной научно-технической конференции. Том 3, Донецк 2010. стр. 156-159.
120. Топала П., Пынзару Н., Стойчев П. Упрочнение и восстановление деталей машин нанесением покрытий из порошковых материалов электроимпульсными разрядами. II. Исследование процесса формирования покрытий из порошков. Машиностроение и Техносфера. Сборник трудов XVII международной научно-технической конференции. Том 3, Донецк 2010. стр. 160-163.
121. Topala P., Stoicev P., Ojegov A., Pinzaru N., Monaco E. Analysis of processes occurring on the tool and piece electrode surface during the formation of oxide pellicles by applying electrical discharges in impulse. Proceedings of the 14th International Conference Modern Technologies, Quality and Innovation, ModTech 2010 – New face of TMCR, Iasi: ModTech Publishing House. 20-22 May, 2010. Slănic-Moldova, România, pp. 631-634. ISSN 2066-3919.
122. Topala P., Pinzaru N. & Stoicev P. Transformations in the surfaces of tool-electrodes during surface layer formation by applying electric discharges in impulse. ModTech 2010. 20-22 May, 2010. Slănic-Moldova, România. p. 639-642.

123. Пынзару Н. Электроэрозионные эффекты на поверхности электрода-инструмента, используемого для формирования поверхностных слоев деталей. Машиностроение и техносфера XXI века, Донецк, 2011
124. Topala P., Pînzaru N., Guzman D. Specifics of tool-electrodes wear mechanism at surface processing by applying electrical discharges in impulse (EDI). ModTech 2014. p. 40.
125. Topală P., Guzman D., Rusnac V., Beşliu V., Pînzaru N., Balandin A., Botnari D. și Pulbere E. Experimental investigations aimed at the formation of silicon carbide by direct applying pulsed electrical discharge machining. ModTech 2016. p. 211.
126. Pînzaru N. Experimental investigations AIMED at behavior of tool-electrodes made of conductible materials by applying PEDM. ModTech 2016. p. 210.
127. Pînzaru N. Experimental investigations on the durability of tool-electrodes applied at the surface processing by PEDM. ModTech 2017. p. 61.
128. Topală P., Beşliu V., Ojegov A., Pînzaru N. Investigations AIMED at surface adherence of graphite pellicles formed by applying PEDM. ModTech 2017. p. 211.
129. Topală P., Stoicev P., Balanici A., Pînzaru N. Упрочнение и восстановление деталей машин нанесением покрытий из порошковых материалов электроимпульсными разрядами. Universitatea Agrară de Stat din Moldova. Lucrări științifice, volumul 21. Chișinău, 2008. ISBN 978-9975-64-132-6. стр. 164-170.
130. Topala P., Luca D., Ojegov A., Stoicev P., Pînzaru N. Results on metal surface nano-oxidation by electrical discharges in impulse. ICCCI 2012. The Fourth International Conference on The Characterization and Control of Interfaces for High Quality Advanced Materials. Kurashiki, Japan. September 2-5, 2012, p. 85.
131. Topala P., Pînzaru N., Guzman D. Specifics of tool-electrodes wear mechanism at surface processing by applying electrical discharges in impulse (EDI). ModTech International Conference “Modern Technologies in Industrial Engineering”, Book of Abstracts ModTech 2014. p. 40. ISSN 2286-4369.
132. Topala P., Besliu V., Ojegov A., Guzman D., Pinzaru N., Rusnac V. Investigations on anti-corrosion properties of the surface layers formed by applying EDI. ModTech 2015. June 17-20, 2015. Mamaia, Romania The Third International Conference on Modern Manufacturing Technologies in Industrial Engineering. Book of Abstracts. Romania, 2015. p. 257. ISSN 2286-4369.
133. Topala P., Ojegov A., Stoicev P., Pînzaru N. Oxide pellicle formation technology. The 16th International Salon Inventica 2012, June 13-15, 2012, Iași, România. Editura Performantica, Institutul Național de Inventică, Iași. pp. 625-626. ISSN 1844-7880.

134. Topala P., Ojegov A., Stoicev P., Beşliu V., Hirbu A., Pînzaru N. Tool-electrode for surface thermo-chemical treatment by applying electrical discharges in impulse. The 18th International Conference „Inventica 2014”, Editura PERFORMANTICA, pp. 551-553. ISSN 1844-7880.
135. Topala P., Ojegov A., Besliu V., Hirbu A., Pinzaru N. Tool-electrode for surface thermo-chemical treatment by applying electrical discharges in impulse. Materials of the XIX-th Internation Exhibition of Research, Inovation and Tehnological Transfer. Inventica 2015. pp. 324-326. ISSN 1844-7880.

ANEXE

MATLAB 5.0 MAT-file, Platform: PCWIN, Created on: Fri Mar 16 18:52:13 2018
Electrod – catod – Cu



$$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.6716 \quad (-0.4061, 1.749)$$

$$b = 0.005968 \quad (-0.001973, 0.01391)$$

Goodness of fit:

SSE: 2.147

R-square: 0.4631

Adjusted R-square: 0.3558

RMSE: 0.6554

$$f(x) = a \cdot x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.005821 \quad (-0.03968, 0.05132)$$

$$b = 1.126 \quad (-0.3544, 2.606)$$

Goodness of fit:

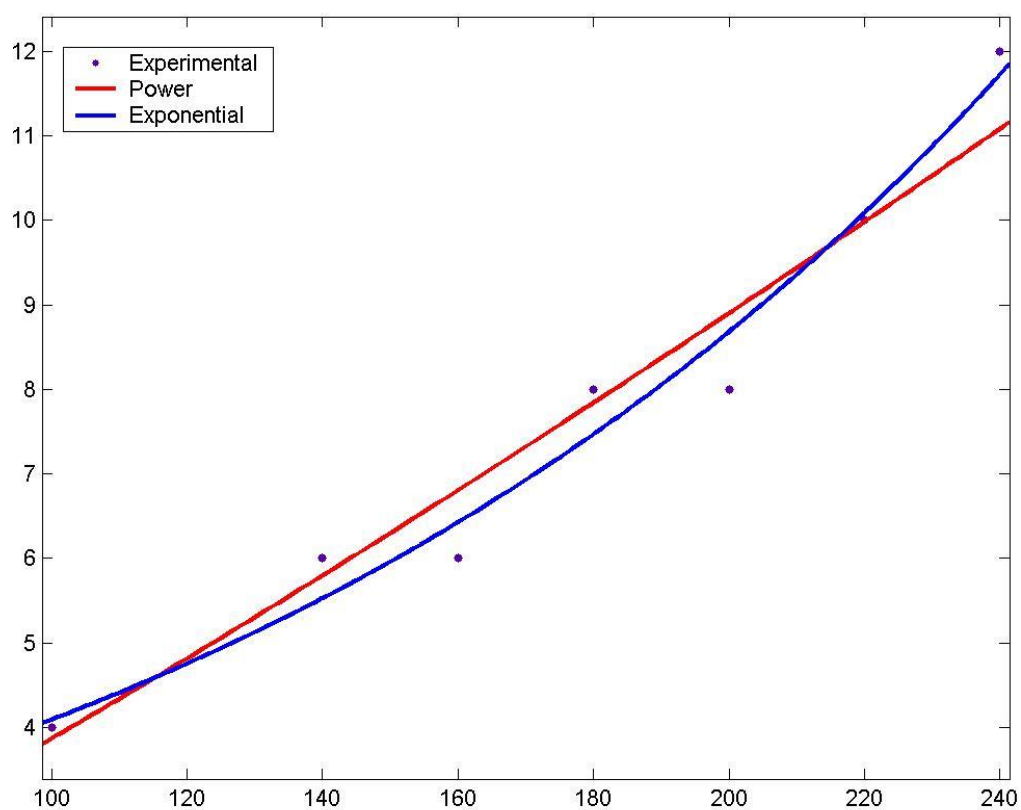
SSE: 2.176

R-square: 0.456

Adjusted R-square: 0.3472

RMSE: 0.6597

Electrod – catod – Al



$$f(x) = a \cdot x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.01512 \quad (-0.01717, 0.04742)$$

$$b = 1.204 \quad (0.7997, 1.608)$$

Goodness of fit:

SSE: 2.382

R-square: 0.9451

Adjusted R-square: 0.9342

RMSE: 0.6902

$$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 1.927 \quad (1.282, 2.571)$$

$$b = 0.007525 \quad (0.005902, 0.009148)$$

Goodness of fit:

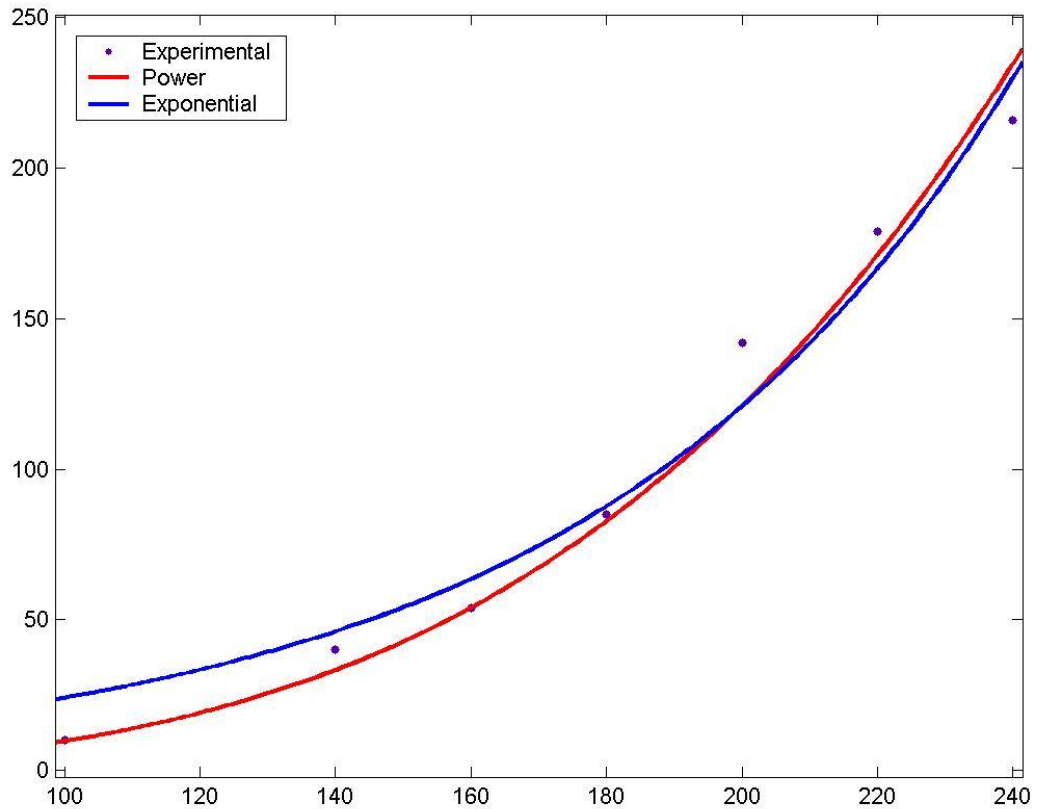
SSE: 1.24

R-square: 0.9714

Adjusted R-square: 0.9657

RMSE: 0.498

Electrod – catod – Otel



$$f(x) = a \cdot x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 5.627e-007 \quad (-2.215e-006, 3.341e-006)$$

$$b = 3.621 \quad (2.707, 4.536)$$

Goodness of fit:

SSE: 888.3

R-square: 0.9749

Adjusted R-square: 0.9699

RMSE: 13.33

$$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 4.857 \quad (0.08854, 9.625)$$

$$b = 0.01607 \quad (0.01163, 0.02051)$$

Goodness of fit:

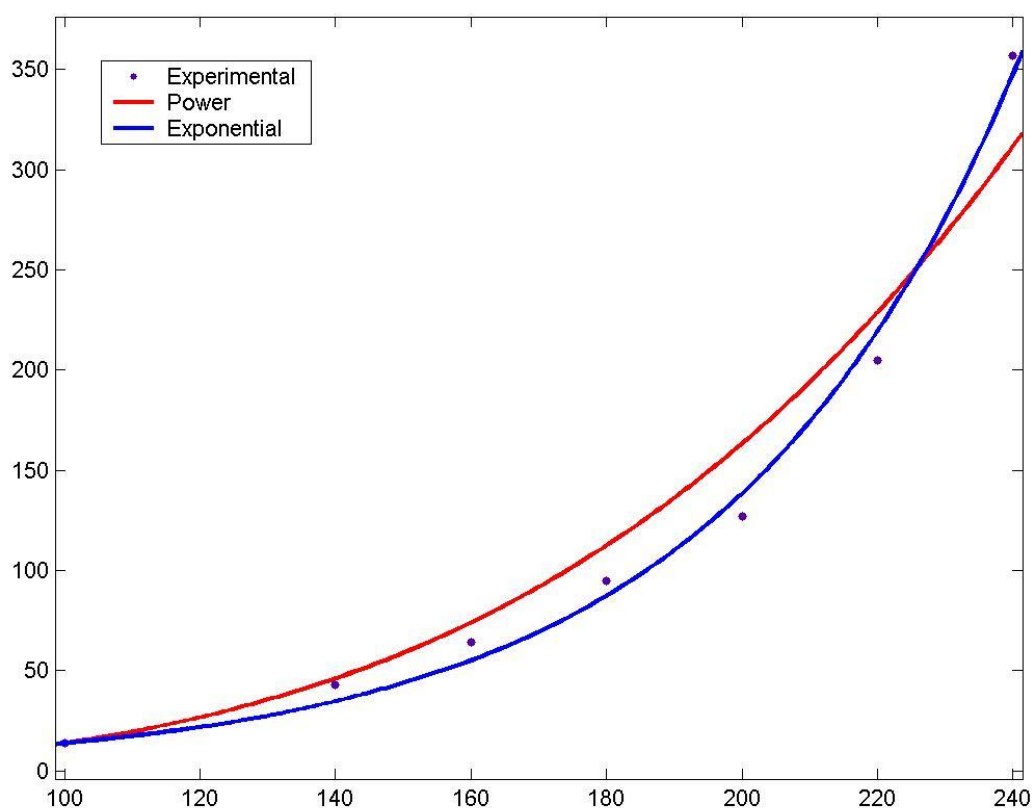
SSE: 1128

R-square: 0.9681

Adjusted R-square: 0.9618

RMSE: 15.02

Electrod – catod – W



$$f(x) = a \cdot x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 1.138e-006 \quad (-8.019e-006, 1.03e-005)$$

$$b = 3.545 \quad (2.054, 5.035)$$

Goodness of fit:

SSE: 4361

R-square: 0.9479

Adjusted R-square: 0.9375

RMSE: 29.53

$$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 1.384 \quad (0.363, 2.406)$$

$$b = 0.02302 \quad (0.01979, 0.02626)$$

Goodness of fit:

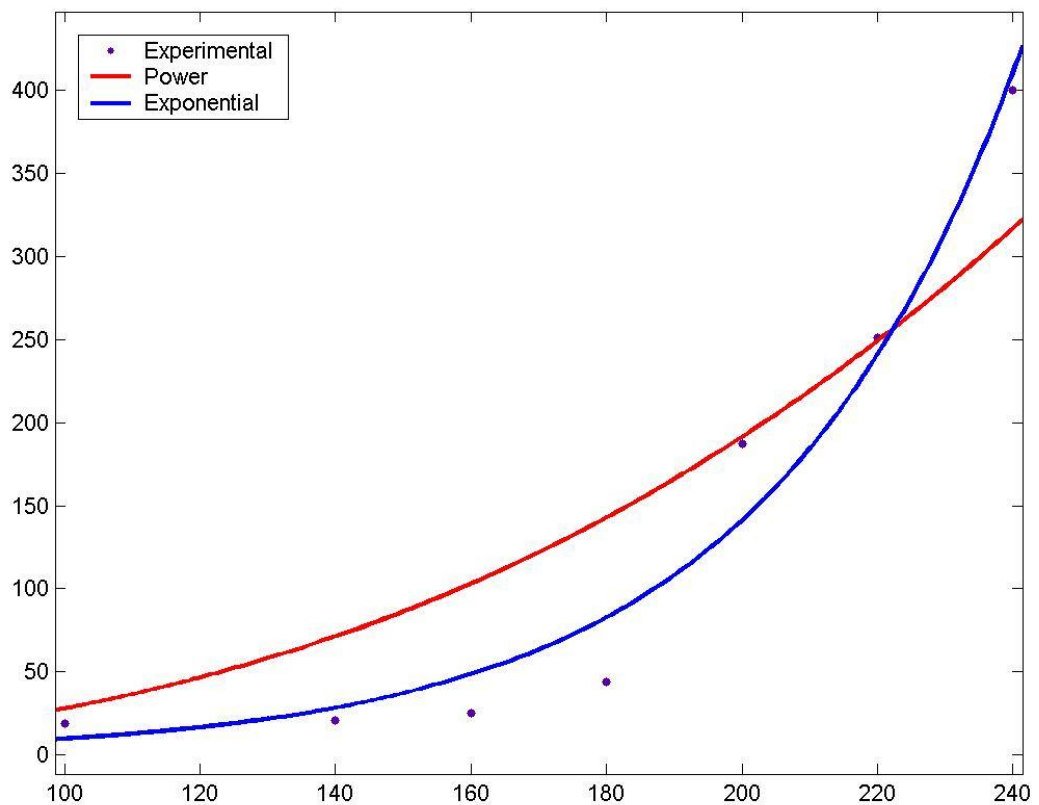
SSE: 629.4

R-square: 0.9925

Adjusted R-square: 0.991

RMSE: 11.22

Electrod – catod – C



$$f(x) = a \cdot x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 8.139e-005 \quad (-0.001126, 0.001289)$$

$$b = 2.769 \quad (0.007986, 5.53)$$

Goodness of fit:

SSE: 2.542e+004

R-square: 0.8092

Adjusted R-square: 0.771

RMSE: 71.3

$$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.6765 \quad (-0.6917, 2.045)$$

$$b = 0.0267 \quad (0.01792, 0.03549)$$

Goodness of fit:

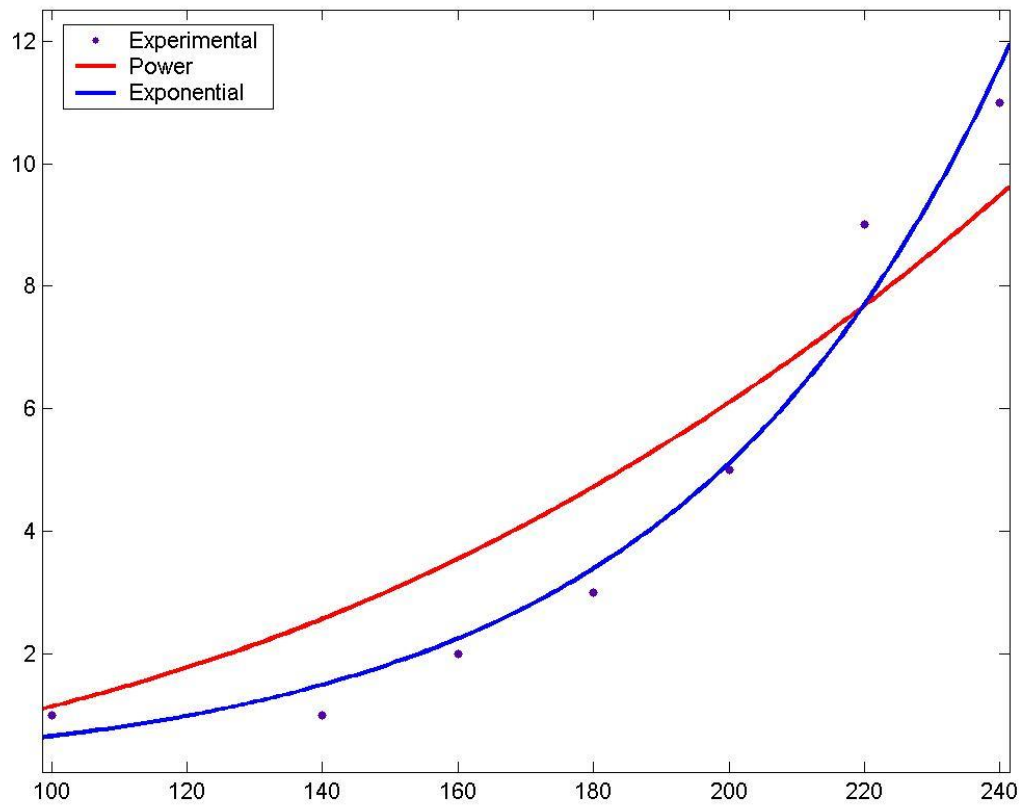
SSE: 4516

R-square: 0.9661

Adjusted R-square: 0.9593

RMSE: 30.05

Electrod – anod – Cu



$$f(x) = a \cdot x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 1.632e-005 \quad (-0.0001456, 0.0001783)$$

$$b = 2.422 \quad (0.5699, 4.273)$$

Goodness of fit:

SSE: 13.12

R-square: 0.863

Adjusted R-square: 0.8356

RMSE: 1.62

$$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.08438 \quad (-0.02045, 0.1892)$$

$$b = 0.02052 \quad (0.01502, 0.02601)$$

Goodness of fit:

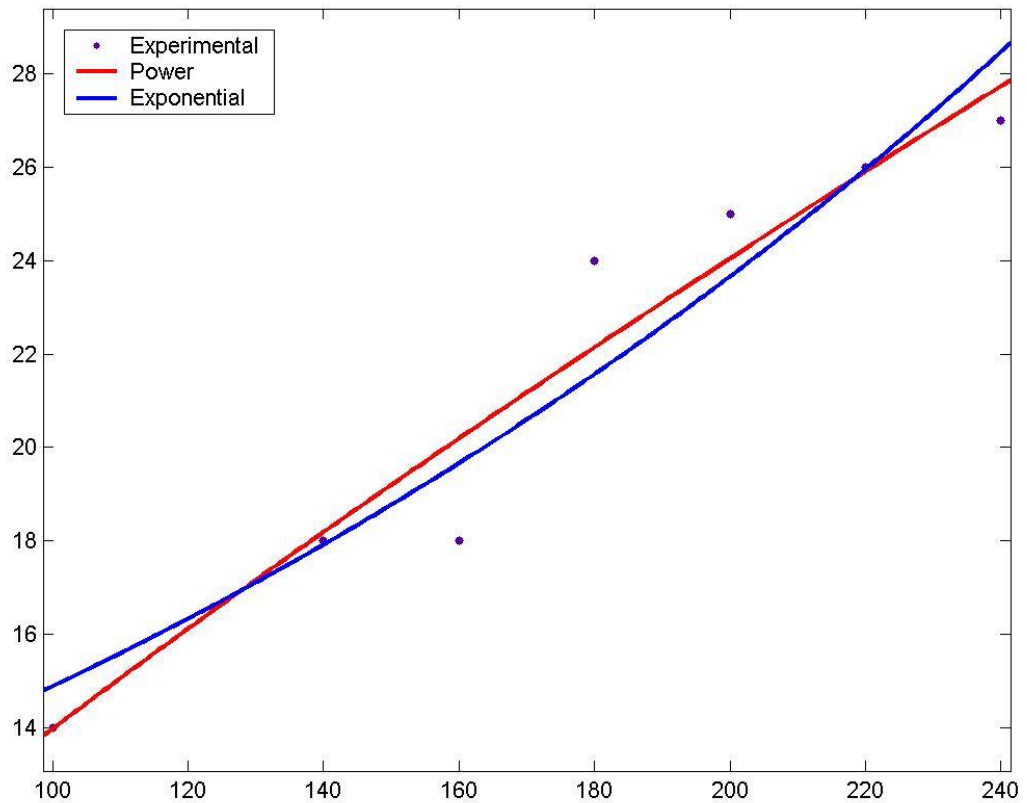
SSE: 2.642

R-square: 0.9724

Adjusted R-square: 0.9669

RMSE: 0.7269

Electrod – anod – Al



$$f(x) = a \cdot x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.3817 \quad (-0.1505, 0.9138)$$

$$b = 0.7819 \quad (0.5162, 1.048)$$

Goodness of fit:

SSE: 9.756

R-square: 0.9347

Adjusted R-square: 0.9217

RMSE: 1.397

$$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 9.38 \quad (6.075, 12.69)$$

$$b = 0.004624 \quad (0.002847, 0.006401)$$

Goodness of fit:

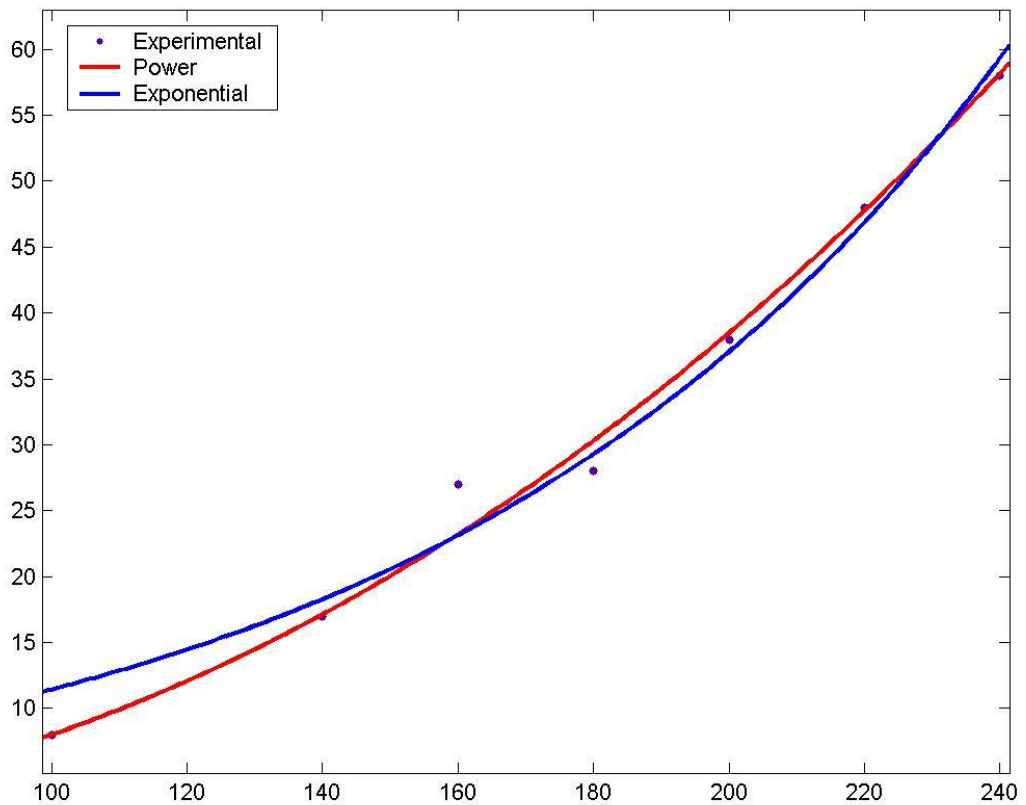
SSE: 13.44

R-square: 0.91

Adjusted R-square: 0.8921

RMSE: 1.64

Electrod – anod – otel



$$f(x) = a \cdot x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.0002328 \quad (-0.0002064, 0.0006719)$$

$$b = 2.268 \quad (1.915, 2.62)$$

Goodness of fit:

SSE: 20.09

R-square: 0.9889

Adjusted R-square: 0.9867

RMSE: 2.004

$$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 3.518 \quad (1.813, 5.223)$$

$$b = 0.01177 \quad (0.009516, 0.01403)$$

Goodness of fit:

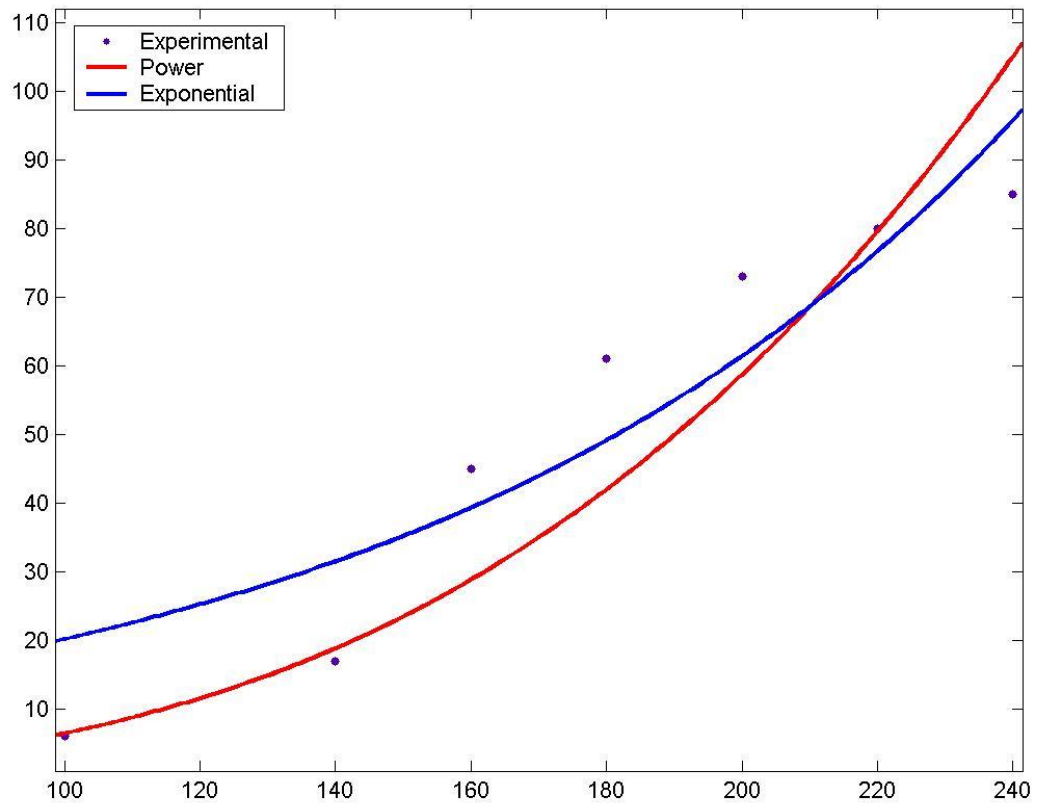
SSE: 33.8

R-square: 0.9813

Adjusted R-square: 0.9776

RMSE: 2.6

Electrod – anod – W



$$f(x) = a \cdot x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 2.667e-006 \quad (-2.766e-005, 3.299e-005)$$

$$b = 3.191 \quad (1.08, 5.302)$$

Goodness of fit:

SSE: 1235

R-square: 0.7865

Adjusted R-square: 0.7438

RMSE: 15.72

$$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 6.621 \quad (-2.849, 16.09)$$

$$b = 0.01113 \quad (0.004443, 0.01782)$$

Goodness of fit:

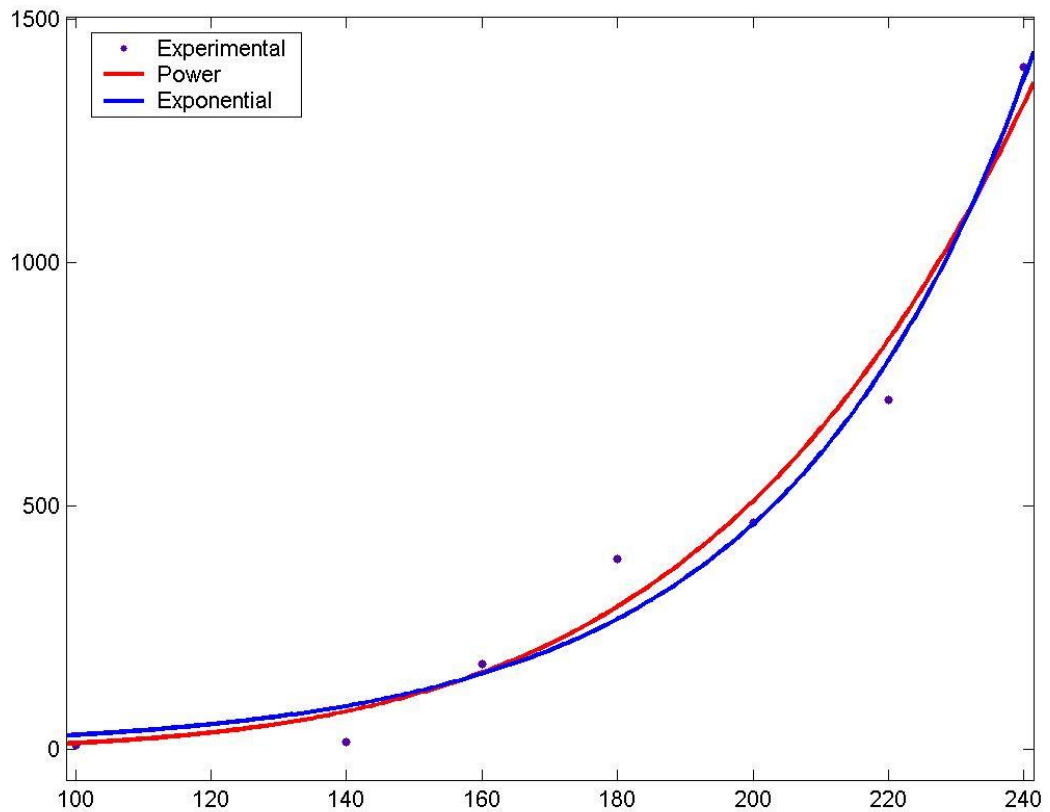
SSE: 846.1

R-square: 0.8537

Adjusted R-square: 0.8244

RMSE: 13.01

Electrod – anod – C



$$f(x) = a \cdot x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 4.309e-010 \quad (-3.239e-009, 4.101e-009)$$

$$b = 5.247 \quad (3.678, 6.816)$$

Goodness of fit:

SSE: 3.643e+004

R-square: 0.9747

Adjusted R-square: 0.9697

RMSE: 85.36

$$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 1.976 \quad (-1.107, 5.058)$$

$$b = 0.02728 \quad (0.02052, 0.03405)$$

Goodness of fit:

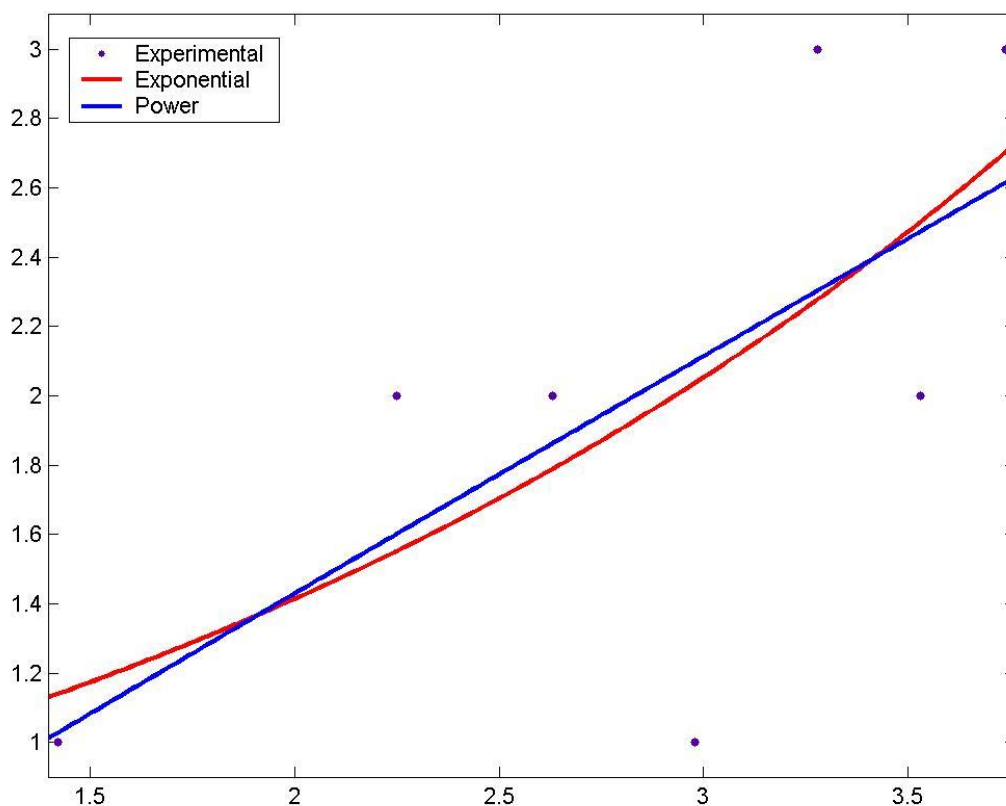
SSE: 2.86e+004

R-square: 0.9802

Adjusted R-square: 0.9762

RMSE: 75.64

MATLAB 5.0 MAT-file, Platform: PCWIN, Created on: Sun Jul 29 12:55:13 2018
Electrod – catod – Cu



$$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.6711 \quad (-0.476, 1.818)$$

$$b = 0.3726 \quad (-0.1576, 0.9028)$$

Goodness of fit:

SSE: 2.2

R-square: 0.45

Adjusted R-square: 0.34

RMSE: 0.6633

$$f(x) = a \cdot x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.7314 \quad (-0.5094, 1.972)$$

$$b = 0.9659 \quad (-0.5078, 2.44)$$

Goodness of fit:

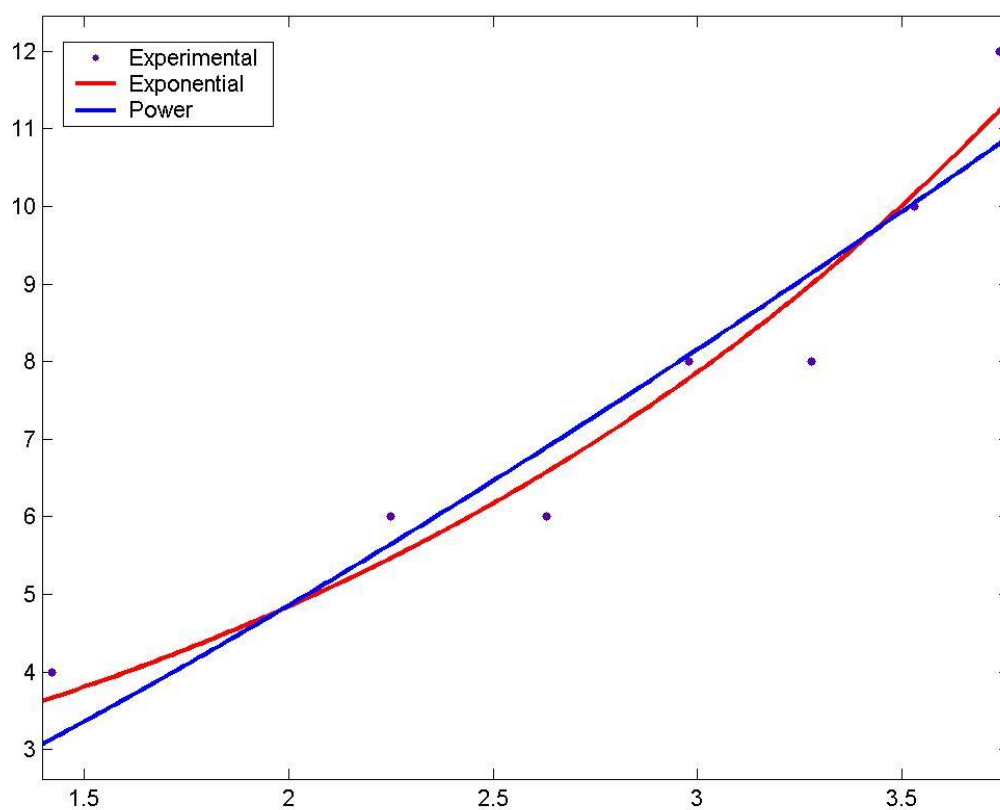
SSE: 2.246

R-square: 0.4385

Adjusted R-square: 0.3262

RMSE: 0.6702

Electrod – catod – Al



$$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 1.839 \quad (0.9157, 2.762)$$

$$b = 0.4842 \quad (0.3314, 0.637)$$

Goodness of fit:

SSE: 2.369

R-square: 0.9454

Adjusted R-square: 0.9345

RMSE: 0.6884

$$f(x) = a \cdot x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 1.999 \quad (0.6057, 3.393)$$

$$b = 1.279 \quad (0.6846, 1.874)$$

Goodness of fit:

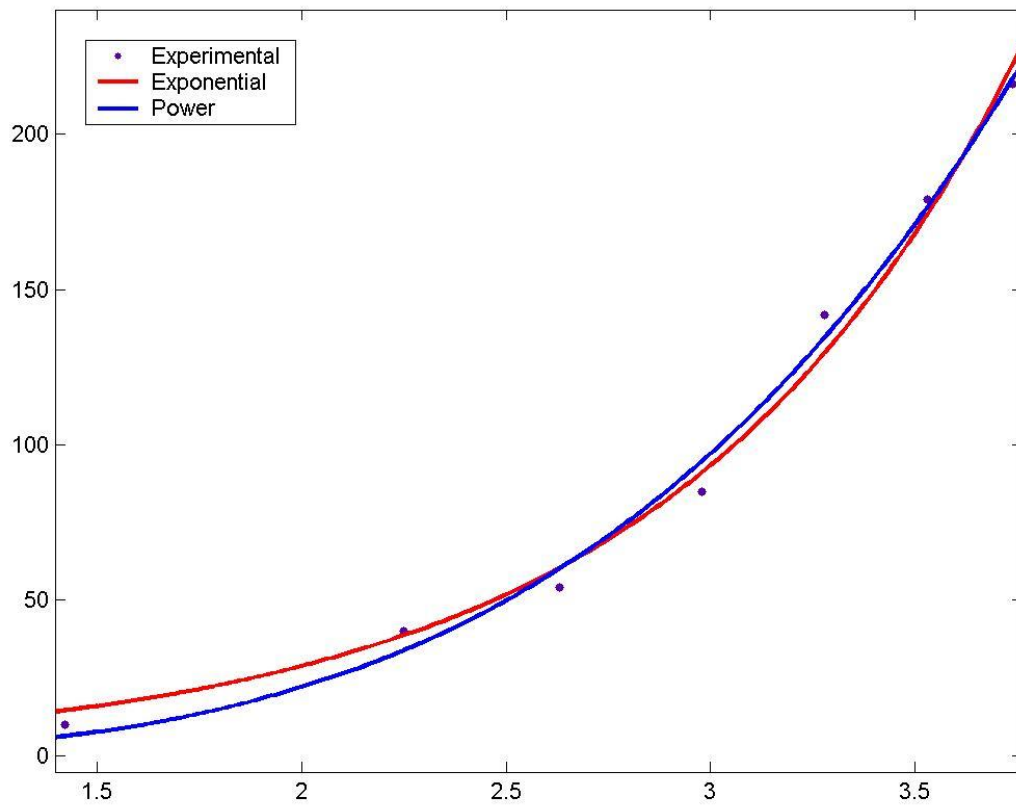
SSE: 4.396

R-square: 0.8988

Adjusted R-square: 0.8785

RMSE: 0.9376

Electrod – catod – Otel inox



$$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 2.743 \quad (0.9234, 4.562)$$

$$b = 1.176 \quad (0.9867, 1.365)$$

Goodness of fit:

SSE: 323.2

R-square: 0.9909

Adjusted R-square: 0.989

RMSE: 8.039

$$f(x) = a \cdot x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 1.74 \quad (0.5353, 2.945)$$

$$b = 3.661 \quad (3.107, 4.215)$$

Goodness of fit:

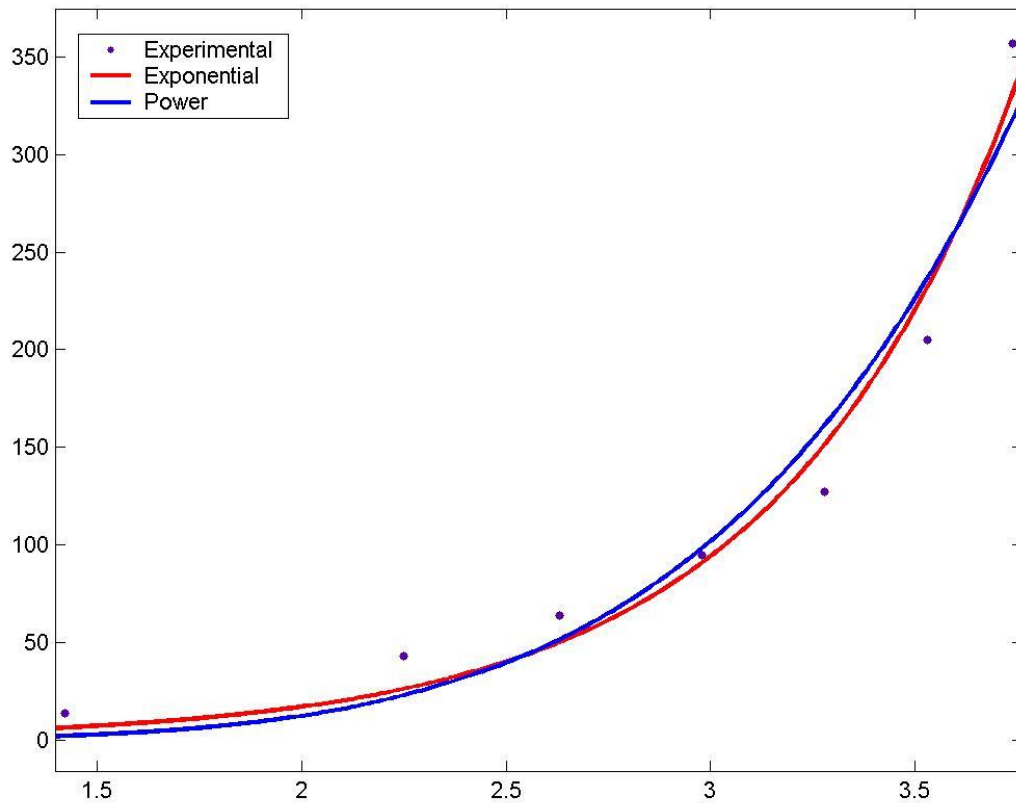
SSE: 247.4

R-square: 0.993

Adjusted R-square: 0.9916

RMSE: 7.035

Electrod – catod – W+10% Re



$$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.568 \quad (-0.5205, 1.656)$$

$$b = 1.703 \quad (1.169, 2.237)$$

Goodness of fit:

SSE: 2519

R-square: 0.9699

Adjusted R-square: 0.9639

RMSE: 22.44

$$f(x) = a \cdot x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.3441 \quad (-0.6598, 1.348)$$

$$b = 5.179 \quad (2.882, 7.476)$$

Goodness of fit:

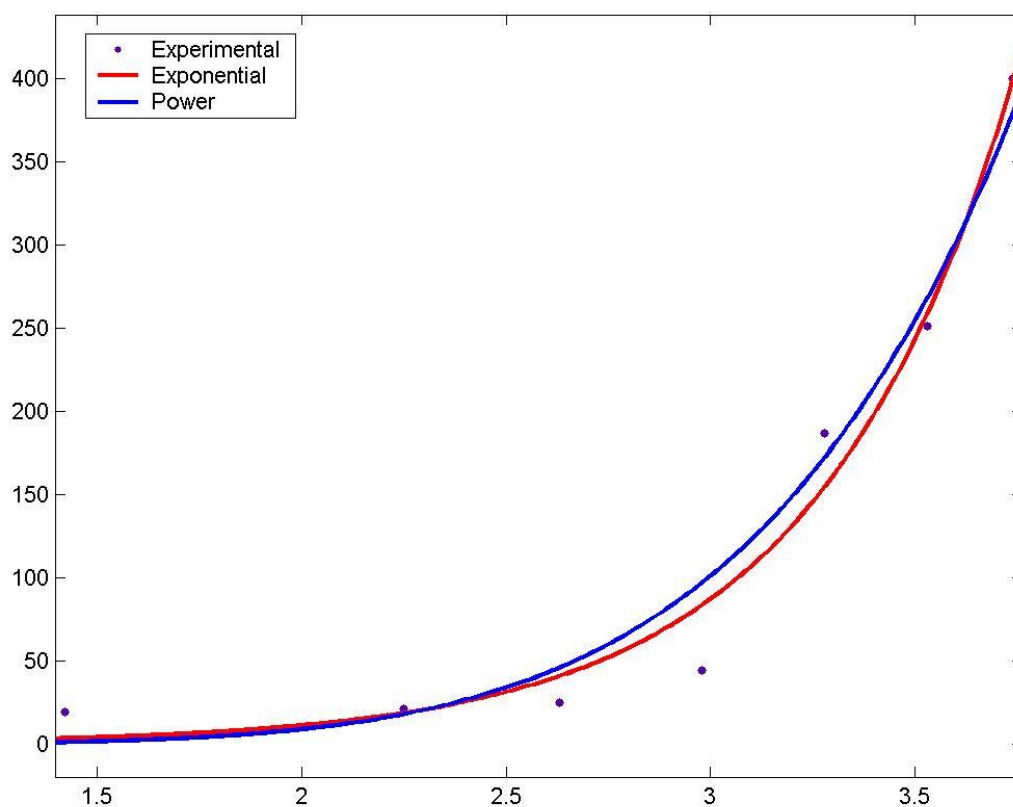
SSE: 4348

R-square: 0.9481

Adjusted R-square: 0.9377

RMSE: 29.49

Electrod – catod – grafit



$$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.1829 \quad (-0.2296, 0.5955)$$

$$b = 2.055 \quad (1.432, 2.678)$$

Goodness of fit:

SSE: 3161

R-square: 0.9763

Adjusted R-square: 0.9715

RMSE: 25.14

$$f(x) = a \cdot x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.1383 \quad (-0.2723, 0.5488)$$

$$b = 6.001 \quad (3.677, 8.326)$$

Goodness of fit:

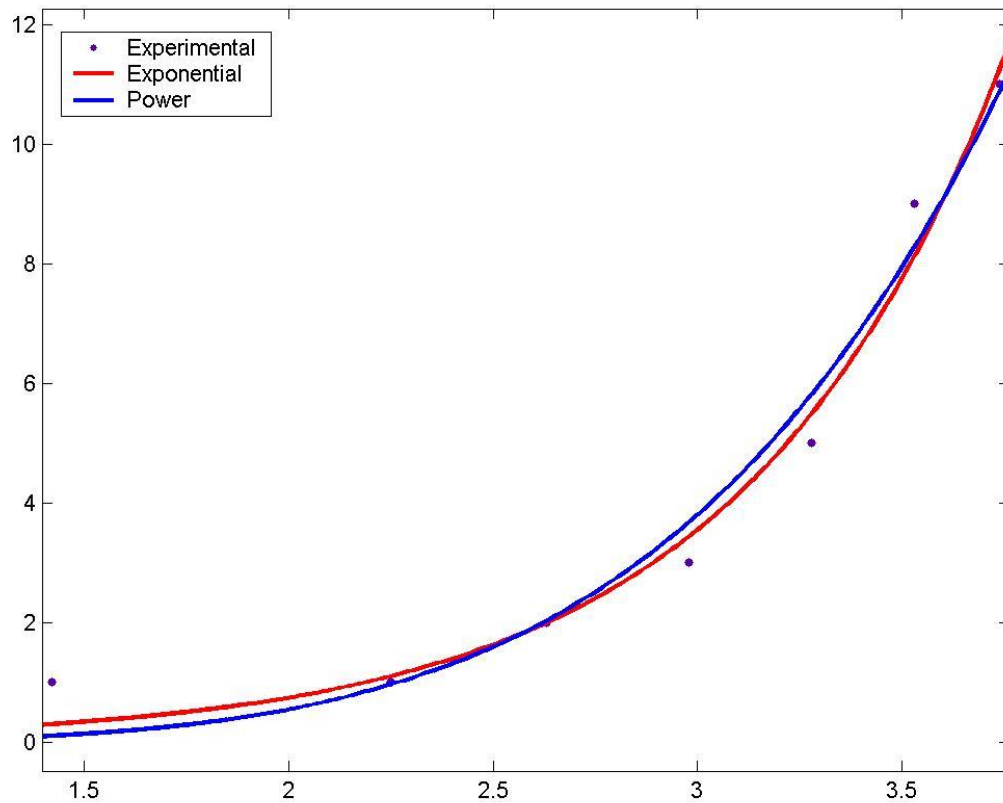
SSE: 4507

R-square: 0.9662

Adjusted R-square: 0.9594

RMSE: 30.02

Electrod – anod – Cu



$$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.03285 \quad (-0.01157, 0.07727)$$

$$b = 1.561 \quad (1.182, 1.94)$$

Goodness of fit:

SSE: 1.787

R-square: 0.9813

Adjusted R-square: 0.9776

RMSE: 0.5978

$$f(x) = a \cdot x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.02 \quad (-0.01721, 0.05721)$$

$$b = 4.776 \quad (3.306, 6.247)$$

Goodness of fit:

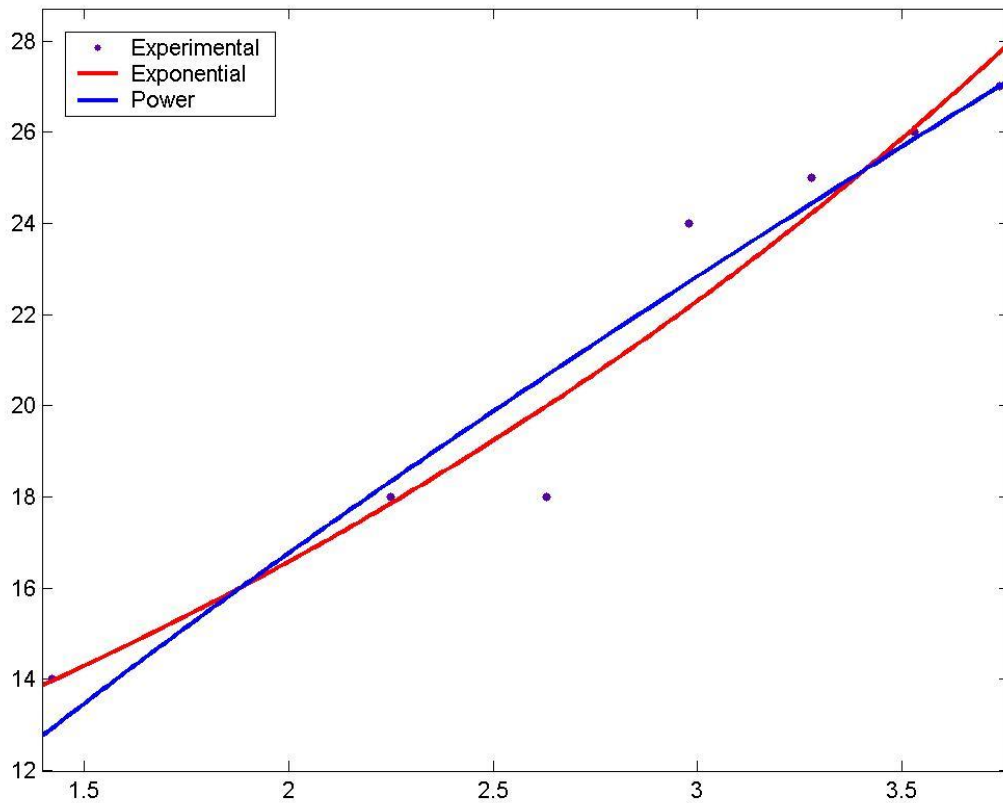
SSE: 2.486

R-square: 0.974

Adjusted R-square: 0.9688

RMSE: 0.7052

Electrod – anod – Al



$$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 9.169 \text{ (6.498, 11.84)}$$

$$b = 0.2962 \text{ (0.2044, 0.3879)}$$

Goodness of fit:

SSE: 8.506

R-square: 0.9431

Adjusted R-square: 0.9317

RMSE: 1.304

$$f(x) = a \cdot x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 9.886 \text{ (6.847, 12.93)}$$

$$b = 0.7618 \text{ (0.4909, 1.033)}$$

Goodness of fit:

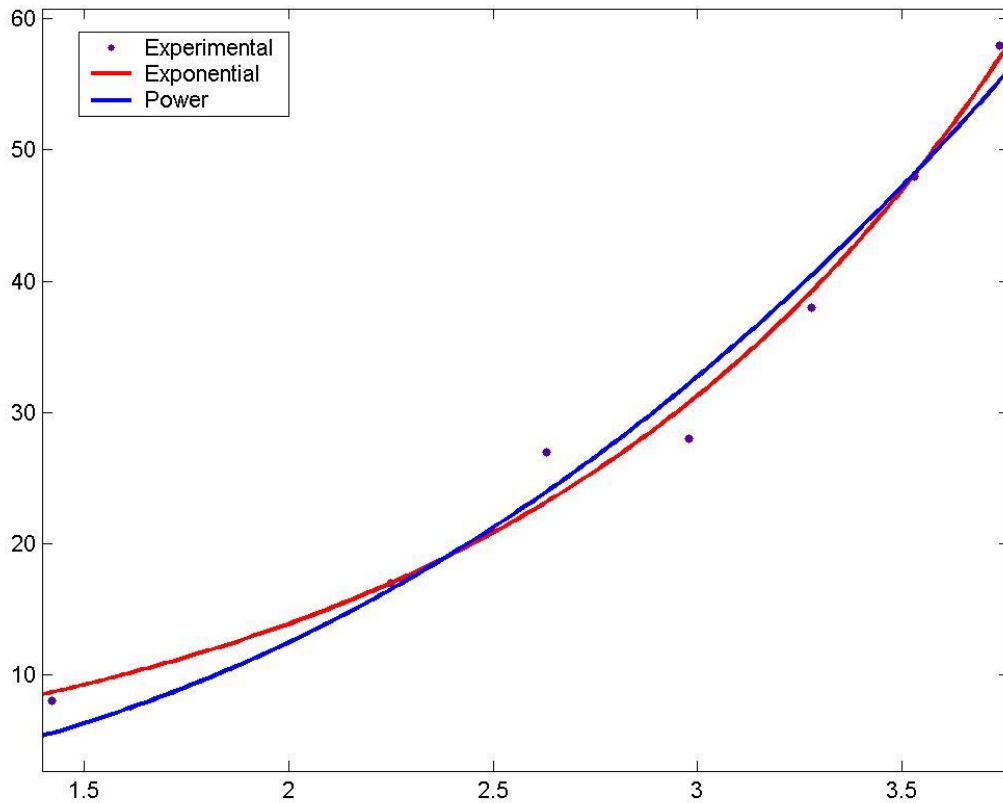
SSE: 10.32

R-square: 0.9309

Adjusted R-square: 0.9171

RMSE: 1.437

Electrod – anod – Oel inox



$$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 2.726 (1.374, 4.077)$$

$$b = 0.8132 (0.6682, 0.9582)$$

Goodness of fit:

SSE: 25.4

R-square: 0.986

Adjusted R-square: 0.9832

RMSE: 2.254

$$f(x) = a \cdot x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 2.39 (0.5586, 4.222)$$

$$b = 2.382 (1.753, 3.01)$$

Goodness of fit:

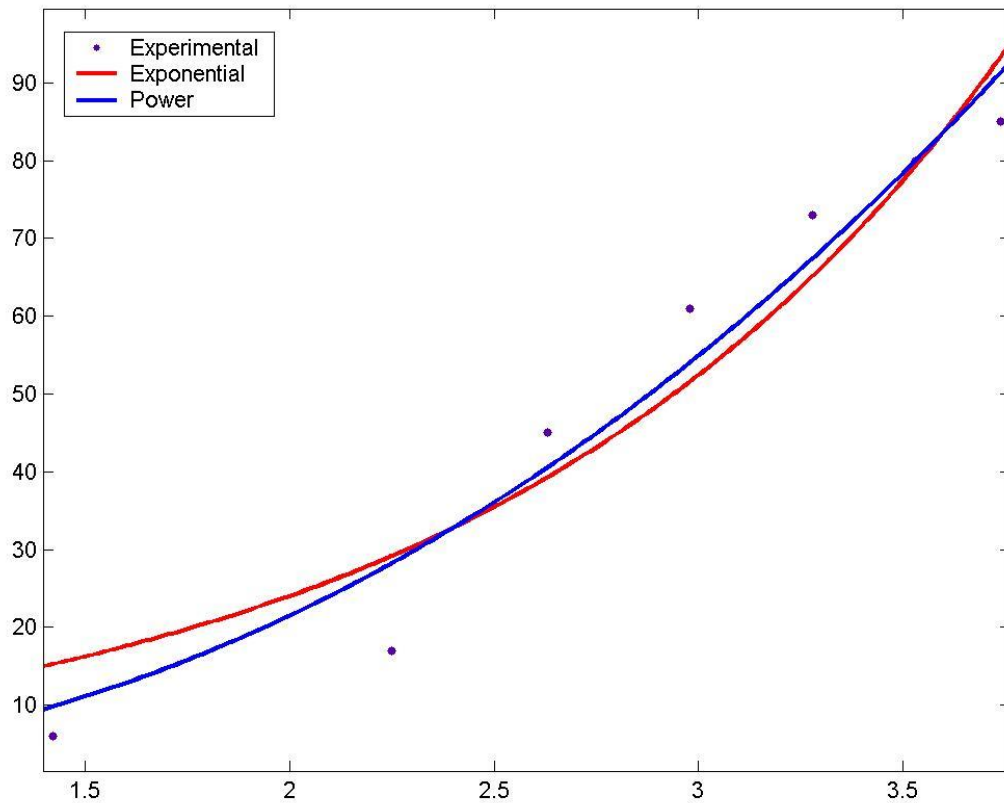
SSE: 46.97

R-square: 0.974

Adjusted R-square: 0.9689

RMSE: 3.065

Electrod – anod – W+10% Re



$$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 5.037 \quad (-1.394, 11.47)$$

$$b = 0.7807 \quad (0.4061, 1.155)$$

Goodness of fit:

SSE: 487.2

R-square: 0.9158

Adjusted R-square: 0.8989

RMSE: 9.871

$$f(x) = a \cdot x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 4.334 \quad (-0.4342, 9.102)$$

$$b = 2.311 \quad (1.407, 3.215)$$

Goodness of fit:

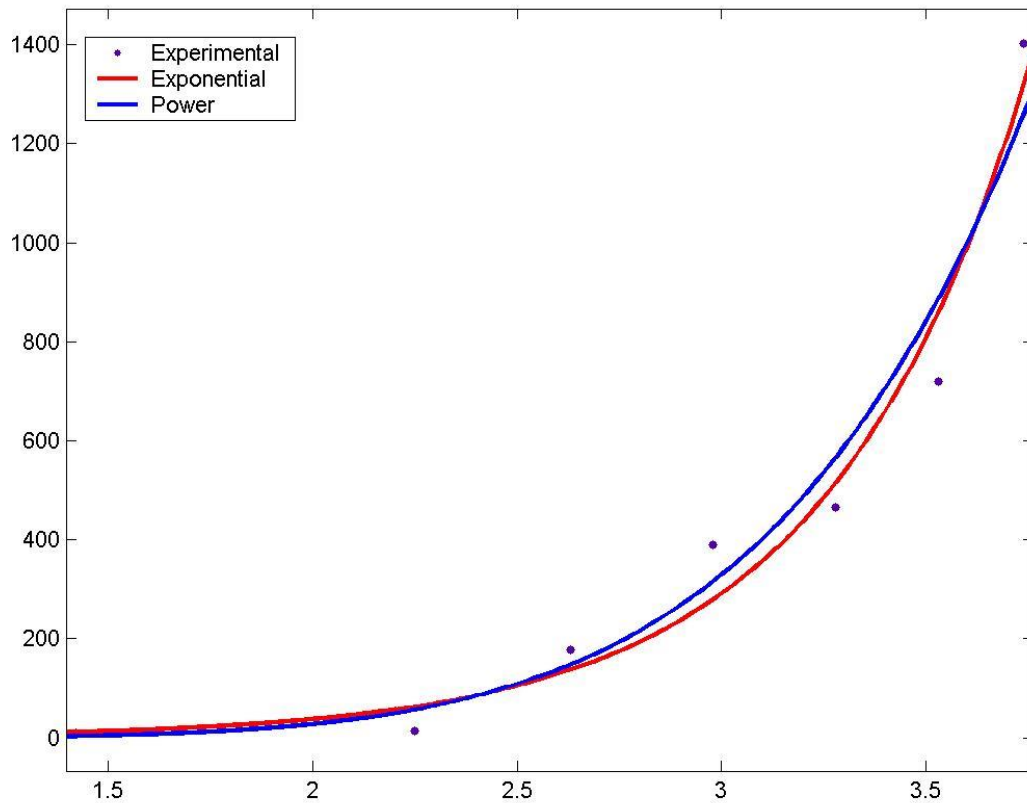
SSE: 280

R-square: 0.9516

Adjusted R-square: 0.9419

RMSE: 7.484

Electrod – anod – grafit



$$f(x) = a \cdot \exp(b \cdot x)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.6397 \quad (-0.9991, 2.279)$$

$$b = 2.04 \quad (1.332, 2.748)$$

Goodness of fit:

SSE: 4.554e+004

R-square: 0.9684

Adjusted R-square: 0.9621

RMSE: 95.44

$$f(x) = a \cdot x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.4077 \quad (-1.018, 1.834)$$

$$b = 6.093 \quad (3.356, 8.829)$$

Goodness of fit:

SSE: 6.677e+004

R-square: 0.9537

Adjusted R-square: 0.9445

RMSE: 115.6