

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI
ȘCOALA DOCTORALĂ „INGINERIE MECANICĂ ȘI CIVILĂ”**

Cu titlul de manuscris
CZU: 621.7.012(043.21)

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

Teză 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:



Pînzaru Natalia

Chișinău, 2020

© Pînzaru Natalia, 2020

CUPRINS

ADNOTARE.....	5
LISTA ABREVIERILOR ȘI SEMNE CONVENȚIONALE UTILIZATE	
ÎN LUCRARE.....	8
INTRODUCERE.....	11
1. STUDIUL BIBLIOGRAFIC PRIVIND PROIECTAREA ELECTROZILOR- SCULE APLICAȚI LA PRELUCRAREA PRIN ELECTROEROZIUNE.....	15
1.1. Principiul prelucrării prin eroziune electric.....	15
1.2. Efectele descărcării electrice în impuls.....	17
1.3. Stabilirea electrodului-sculă (E-S) pentru prelucrarea dimensional.....	20
1.3.1. Stabilirea polarității electrodului-sculă.....	20
1.3.2. Stabilirea parametrilor regimului de lucru.....	21
1.3.3. Dimensionarea electrodului-sculă.....	21
1.4. Materiale și tehnologii de obținere a electrozilor pentru prelucrarea prin electroeroziune.....	25
1.5. Metode de proiectare a electrozilor-sculă pentru prelucrarea dimensional.....	26
1.6. Procedee de prelucrare superficială cu aplicarea DEI.....	29
1.6.1. Durificarea superficial cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls.....	29
1.6.2. Esența procedurii de lucru.....	30
1.6.3. Stabilirea tipului de electrozi pentru prelucrările superficiale.....	32
1.6.4. Parametrii regimului de lucru la durificarea prin descărcări electrice în impuls	33
1.7. Electrozi-sculă utilizați la alierea superficială prin electroeroziune.....	33
1.8. Electrozi-scule aplicați la formarea depunerilor.....	35
1.9. Electroductul-sculă aplicat la formarea depunerilor în regim de subexcitare.....	39
1.10. Concluzii la capitolul 1.....	42
2. STRATEGIA CERCETĂRIILOR EXPERIMENTALE.....	43
2.1. Standul experimental și componentele lui.....	43
2.2. Partea mecanică a standului experimental.....	47
2.3. Instalații și echipamente aplicate la formarea depunerilor.....	48
2.4. Materialul, geometria probelor și schemele tehnologice de prelucrare.....	55
2.5. Modul de prelucrare a suprafețelor.....	57
2.6. Determinarea mărimii masice a eroziunii.....	58
2.7. Aplicarea microscopiei optice la cercetarea suprafețelor.....	58

2.8. Metode de planificare matematică a experimentului.....	61
2.9. Concluzii la capitolul 2.....	68
3. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND COMPORTAREA	
ELECTROZILOR-SCULE ÎN DIFERITE PROCEDEE DE PRELUCRARE.....	68
3.1. Rezultatele preliminare a aplicării DEI în prelucrarea suprafețelor cu diferite destinații.....	68
3.2. Influența mărimii energiei acumulate pe bateria de condensatoare asupra eroziunii electrodului-sculă (regim de subexcitare).....	72
3.3. Concluzii la capitolul 3.....	87
4. CRITERII DE PROIECTARE A ELECTROZILOR-SCULE APLICAȚI	
LA FORMAREA STRATURILOR DE SUPRAFAȚĂ CU DESCARCĂRI	
ELECTRICE ÎN IMPULS.....	89
4.1. Alegerea formei și materialul electrodului pentru formarea depunerilor din pulberi.....	91
4.2. Elaborarea electrodului-sculă la formarea depunerilor din pulberi.....	101
4.3. Tratatamentul termochimic a suprafețelor. Aplicări tehnologice ale tratamentelor termochimice prin descărcări electrice în impuls în diferite medii.....	103
4.4. Proiectarea electrodului-sculă pentru tratarea termică.....	109
4.5. Construcția electrodului-sculă pentru oxidarea suprafețelor complexe cu aplicarea DEI.....	114
4.6. Formarea peliculelor de grafit.....	116
4.7. Elaborarea electrodului-sculă pentru modificarea microgeometriei suprafeței piesei...	121
4.8. Concluzii la capitolul 4.....	123
CONCLUZII GENERALE.....	124
RECOMANDĂRI TEHNOLOGICE.....	125
BIBLIOGRAFIE.....	126
ANEXE.....	139

ADNOTARE

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

Teza este compusă din introducere, patru capitole, concluzii generale și recomandări, bibliografie din 146 titluri, 6 anexe, 125 pagini (până la bibliografie), 69 figuri, 11 tabele. Rezultatele obținute sunt publicate în 44 lucrări științifice.

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

Domeniul de studiu – tehnică. Scopul tezei constă în elaborarea criteriilor de alegere a materialelor, proiectarea și elaborarea construcției și forme geometrice la confecționarea electrozilor-scule în diferite procedee de prelucrare cu aplicarea DEI în condiții normale.

În calitate de **obiect al cercetărilor** au servit electrozii-scule utilizați în diferite procedee de prelucrare cu aplicarea DEI. Pentru realizarea scopului tezei au fost focalizate următoarele **obiective majore**: cercetarea teoretică și experimentală privind procesele erozive de interacțiune a canalului de plasmă al DEI cu suprafețele electrozilor-sculă; analiza rezultatelor cercetărilor experimentale privind eroziunea și transformările în materialul electrozilor-scule în diferite procedee de prelucrare cu aplicarea DEI; alegerea materialului, determinarea forme geometrice, proiectarea și elaborarea construcției electrozilor-sculă pentru procedee de modificare a proprietăților suprafețelor pieselor aplicate în construcția de mașini și aparate.

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, forme geometrice și materialelor pentru confecționarea electrozilor-scule de durabilitate sporită.

Problema științifică importantă soluționată: elaborarea criteriilor de proiectare și fabricare a electrozilor-sculă utilizați la prelucrarea superficială a pieselor cu aplicarea DEI.

Semnificația teoretică este asigurată de: elaborarea bazelor teoretice privind procesele de interacțiune a canalului de plasmă al DEI cu suprafețele electrozilor-sculă; recomandările teoretico-experimentale privind proiectarea construcției, forme geometrice și alegerea materialului electrozilor-sculă cu rezistență sporită la electroeroziune.

Valoarea aplicativă a tezei constă în elaborarea construcției, forme geometrice și alegerea materialului electrozilor-sculă cu rezistență sporită la electroeroziune pentru prelucrarea cu aplicarea DEI.

Implementarea rezultatelor științifice Pe baza rezultatelor lucrării au fost obținute 1 brevete de invenții, o cerere de brevet și un act de implimentare la ÎS „Fabrica de sticlă din Chișinău”.

АННОТАЦИЯ

Автор - Пынзару Наталья. **Тема** - Исследования по концепции, проектированию и разработке «электродов-инструментов» для формирования поверхностных слоев с применением электроимпульсных разрядов.

Работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и рекомендаций, библиографии из 146 названий, 6 приложений, 124 страниц (до библиографии), 70 рисунков, 12 таблиц. Полученные результаты опубликованы в 44 научных работах.

Ключевые слова: электроимпульсные разряды, электрод-инструмент, эрозия.

Область исследования - техника. **Целью** работы является разработка критериев выбора материалов, проектирование и разработка конструкции и геометрической формы при изготовлении электродов-инструментов для различных процессов обработки с применением ЭИР в нормальных условиях.

В качестве **объекта исследования** служили электроды-инструменты, используемые в различных процессах обработки с применением ЭИР. Для достижения цели диссертации были сфокусированы следующие основные **задачи**:

- теоретические и экспериментальные исследования эрозионных процессов взаимодействия канала плазмы ЭИР с поверхностью электрода-инструмента;
- анализ результатов экспериментальных исследований по эрозии и изменению в материале электрода-инструмента в различных технологических процессах с применением ЭИР;
- выбор материала, определение геометрической формы, проектирование и разработка конструкции электрода-инструмента для технологических процессов изменения свойств поверхности деталей, применяемых в машиностроении.

Новизна и научная оригинальность работы заключается в разработке теоретических основ эрозионного взаимодействия канала плазмы ЭИР с поверхностями электрода-инструмента, анализе результатов экспериментальных исследований по эрозии электрода-инструмента в различных процессах обработки с применением ЭИР и разработке предложений по геометрии и материалу для изготовления высокопроизводительных электродов-инструментов.

Решаемая научная проблема: разработка критериев проектирования и изготовления электродов-инструментов, используемых при поверхностной обработке деталей с применением ЭИР.

Теоретическая значимость работы обеспечиваются: разработкой теоретических основ процессов эрозионного взаимодействия канала плазмы ЭИР с поверхностью электрода-инструмента; теоретические и экспериментальные рекомендации, касающиеся проектирования конструкции, геометрической формы и выбора материала электрода-инструмента с повышенной стойкостью к электроэрозионному воздействию.

Прикладная ценность работы состоит в разработке конструкции, геометрической формы и выбора материала электрода-инструмента с повышенной стойкостью к электроэрозионному воздействию для обработки с применением ЭИР.

Внедрение научных результатов. По результатам работы был получен 1 патент на изобретение и подана одна заявка на патент, и исполнительный акт на «Стекольном заводе в Кишиневе».

ANNOTATION

Author – Pinzaru Natalia. **Title** – Research on the concept, design and construction of "tool-electrodes" for the formation of surface layers by applying pulsed electric discharge machining.

The work consists of an introduction, four chapters, general conclusions and recommendations, a bibliography of 146 titles, 6 appendices, 124 pages (before the bibliography), 70 figures, 12 tables. The results are published in 44 scientific papers.

Keywords: pulsed electric discharge machining, tool-electrode, erosion.

Field of study - technical. **The purpose of the work** is the elaboration of criteria for material choosing, design and development of construction and geometric shapes for the manufacture of TE using in different technological processes by applying PEDM at ordinary conditions.

The object of the study was the TE used in various processes using PEDM. To achieve the purpose of the thesis, the following **main objectives** were focused:

- theoretical and experimental investigations of erosion processes of interaction of the PEDM plasma channel with the TE surface;
- analysis of the results of experimental investigations on the erosion and transformations in material of the TE in various technological processes using PEDM;
- choice of the material, determination the geometric shape, design and development of the construction of the TE for different technological processes of modification of surface properties of pieces used in machine and apparatus building.

The novelty and scientific originality of the work lies in the development of the theoretical basis on the erosion of the PEDM plasma channel interaction with the TE surfaces, the analysis of the results of experimental studies on the erosion of the TE in various processes using PEDM and the development of proposals for geometry and material for the manufacture of high-performance.

The important scientific problem: the development of criteria for the design and construction of TE used in the surface piece processing by applying PEDM.

Theoretical importance are provided by: the development of the theoretical basis of the processes of erosional interaction of the PEDM plasma channel with the TE surface; theoretical and experimental recommendations relating to the design of the construction, the geometric shape and the choice of TE material with enhanced resistance to electro-erosion.

Applied value of dissertation consist in development of the construction, the geometric shape and the choice of TE material with enhanced resistance to electro-erosion for processing by applying PEDM.

Implementation of scientific results. According to the results of work, 1 patent was obtained and one patent application was filed and an implementing act at the "Glass Factory in Chisinau".

LISTA ABREVIERILOR ȘI SEMNE CONVENȚIONALE UTILIZATE ÎN LUCRARE

DEI – descărcările electrice în impuls;

ASE – alierea prin scânteii 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;

E-S – electrod-sculă;

E-P – electrod-piesă;

MI – mărimea interstițiului;

SEE – străpungerea prin electroeroziune;

DEE – debitarea prin electroeroziune;

REE – rectificarea prin electroeroziune;

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 a 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), mm;

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/s²;

A – aria suprafeței, m²;

p – presiunea, Pa;

E – modulul lui Young, Pa;

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

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;

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 soluționată pe mai multe căi, însă în calitate de sursă principală a acestei crize poate fi menționată tehnologia de elaborare și prelucrare a materialelor. Aceasta 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, aceștia au introdus în uz un nou termen „descărcare electrică prin scânteie” sau „scânteie 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, „electric discharge machining”, „microspark” etc. Utilizarea de către diferiți autori a diferitor terminologii duc în eroare cercetătorii creând senzația că se vorbește de diferite metode de prelucrare. Din acest motiv pentru început vom determina ce au în vedere aceștia și dacă în fond este o deosebire esențială între acești termeni.

Astfel pentru „scânteia 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 $2 \cdot 10^{-6} \dots 10^{-3} \text{ m}$, o durată a impulsului de curent din interstițiu de $10^{-8} \dots 10^{-4} \text{ s}$, 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 examinate ca sinonime. În lucrarea [6] sunt aduse argumente elocvente în conformitate cu care acestea sunt precăutate ca fază 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. La aplicarea diferenței de potențial create de un 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 10^4 °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 curentului electric și are loc o nouă descărcare electrică ce produce topirea locală și prelevarea de material dintr-un alt punct de pe suprafața piesei (la prelucrarea dimensională) sau al electrodului-sculă (la formarea straturilor de depunere). Frecvența descărcărilor poate atinge până la 400 kHz. 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 și o deosebesc fundamental de o descărcare prin arc electric. Este vorba în primul rând de densitățile de curent de ordinul $10^6 \div 10^8$ A/cm² și apoi de valorile câmpului electric de cca 10^4 V/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 dezvoltării ei, tensiunea pe interstițiu scade totdeauna la o valoare cuprinsă în limitele 15÷25V pentru generatoarele de impulsuri dirijate și 40÷70V pentru generatoare 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, nedorit, conducând la productivități mici și 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 precăutat ca element constructiv și funcțional al pieselor și poate modifica proprietățile de emisie și absorbție a diferitor tipuri de radiație prin schimbarea micro-geometriei ei.

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

Actualitatea temei. Actualitatea temei de investigație și gradul de studiere a acesteia sunt argumentate de următoarele deziderate: dezvoltarea tehnicii contemporane este cauzată de criza energetică și cea a materialelor care a cuprins întreaga omenire. Soluționarea problemelor principale a acestei crize poate fi realizată pe mai multe căi, iar în calitate de soluție principală a acestei crize poate fi menționată tehnologia de elaborare și prelucrare a materialelor. Ultima se poate transforma 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.

Descrierea situației în domeniul de cercetare și identificarea problemelor de cercetare. Teza este consacrată elaborării criteriilor de proiectare și elaborare a electrozilor-scule (E-S) destinați procedeelor de prelucrare a suprafețelor metalice ale aliajelor de fier, cupru, aluminiu, titan și wolfram (formare a depunerilor din materiale compacte și pulberi, peliculelor de oxizi și grafit, modificarea microgeometriei suprafețelor) cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls (DEI) în vederea sporirii performanțelor de exploatare a pieselor executate din aceste materiale.

Scopul tezei constă în elaborarea criteriilor de alegere a materialelor, proiectarea și elaborarea construcției și formei geometrice la confecționarea electrozilor-scule în diferite procedee de prelucrare cu aplicarea DEI în condiții normale.

În calitate de **obiect al cercetărilor** au servit electrozii-scule utilizați în diferite procedee de prelucrare cu aplicarea DEI. Pentru realizarea scopului tezei au fost focalizate următoarele **obiective majore**: cercetarea teoretică și experimentală, privind procesele erozive de interacțiune a canalului de plasmă al DEI cu suprafețele electrozilor-sculă; analiza rezultatelor cercetărilor experimentale, privind eroziunea și transformările în materialul electrozilor-scule în diferite procedee de prelucrare cu aplicarea DEI; alegerea materialului, determinarea formei geometrice, proiectarea și elaborarea construcției electrozilor-sculă pentru procedee de modificare a proprietăților suprafețelor pieselor aplicate în construcția de mașini și aparate.

Metodologia cercetării științifice. În calitate de obiect al cercetărilor au servit electrozi-scule din materiale metalice (aliajele de fier, cupru, aluminiu, wolfram și grafit), care des se utilizează la diferite procedee de prelucrare cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls: alierea prin scânteii electrice, formarea depunerilor din materiale compacte și pulberi metalice, formarea peliculelor de oxizi și de grafit, prelucrarea dimensională prin electroeroziune etc. Instalația experimentală pentru cercetarea uzurii E-S prezintă un generator de impulsuri de

curent de tipul RC cu amorsare paralelă a interstițiului. Pentru cercetarea cantitativă a uzurii E-S a fost utilizată metoda gravimetrică (cântarul analitic), iar pentru cea calitativă (morfologia suprafeței prelucrate și forma electrozilor) s-a folosit microscopia optică și cea electronică. Rezultatele cercetărilor experimentale au fost supuse modelării matematice cu ajutorul programelor Microsoft Excel, MathLab.

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.

Problema științifică importantă soluționată: elaborarea criteriilor de proiectare și fabricare a electrozilor-sculă utilizați la prelucrarea superficială a pieselor cu aplicarea DEI.

Semnificația teoretică este asigurată de: elaborarea bazelor teoretice privind procesele de interacțiune a canalului de plasmă al DEI cu suprafețele electrozilor-sculă; recomandările teoretico-experimentale privind proiectarea construcției, formei geometrice și alegerea materialului electrozilor-sculă cu rezistență sporită la electroeroziune.

Valoarea aplicativă a tezei constă în elaborarea construcției, formei geometrice și alegerea materialului electrozilor-sculă cu rezistență sporită la electroeroziune pentru prelucrarea cu aplicarea DEI.

Rezultatele științifice principale înaintate spre susținere

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). Materialul din care va fi executat electrodul-sculă și reieșind 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. Forma electrodului-sculă îi va permite funcționarea lui astfel, ca suprafața de lucru a acesteia să se relaxeze timp de câteva cicluri de prelucrare. Construcția și dimensiunile electrodului-sculă sunt funcție de dimensiunile suprafeței de prelucrat și regimul energetic de prelucrare.

Implementarea rezultatelor științifice

Pe baza rezultatelor lucrării au fost obținute 1 brevet de invenție, s-a depus o cerere de brevet și s-a mai obținut și un act de implimentare la ÎS „Fabrica de sticlă din Chișinău”.

Aprobarea rezultatelor științifice

Rezultatele științifice ale cercetărilor au fost prezentate la conferințe naționale și internaționale, colocvii științifice și simpozioane: Международная научно-техническая конференция «Машиностроение и техносфера XXI века», Севастополь, Украина; ModTech International Conference, România; The Fourth International Conference on The Characterization and Control of Interfaces for High Quality Advanced Materials. Kurashiki, Japan; The 16th International Conference Inventica; International Scientific Conference Light and Photonics: Science and Technology; International Conference of Nonconventional Technologies; Conferința științifică internațională Relevanța și calitatea formării universitare: Competențe pentru prezent și viitor, Bălți; Fair of Inventions and Practical Ideas „INVENT-INVEST”, România; Colocviul științific „Orientări actuale în cercetarea doctorală”, Ediția a VII, Bălți; International Scientific Symposium „Achievements and Perspectives in Agricultural Engineering and Auto Transport”, Chișinău. Lucrările prezentate la conferințe, simpozioane și expoziții au fost menționate cu 4 diplome, 2 medalii de aur.

Publicațiile la tema tezei. Rezultatele obținute și prezentate în teza de doctorat au fost publicate în 44 lucrări științifice, inclusiv: 3 articole de singur autor, 1 articol în revistă cu factor de impact, 2 articole în reviste internaționale cotate SCOPUS, 4 articole în reviste din străinătate recunoscute, 1 articol în reviste din Registrul Național al revistelor de profil (de categoria B+), 1 articol în reviste aflate în proces de acreditare, 20 articole în culegeri de lucrări ale conferințelor internaționale, 3 articole în culegeri de lucrări ale conferințelor naționale, 3 teze ale comunicărilor la conferințe internaționale (peste hotare), 2 teze ale comunicărilor la conferințe internaționale din țară, 1 brevet de invenție, 1 cerere de brevet de invenție, 2 materiale la saloane de invenții.

Volumul și structura tezei: Lucrarea este compusă din introducere, patru capitole, concluzii generale și recomandări, bibliografie din 146 titluri, 6 anexe, 125 pagini (până la bibliografie), 69 figuri, 11 tabele.

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

1. 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 electrică.

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

Prelevarea de material prezintă, în sens tehnic, mijlocul de separare a unor particule de dimensiuni submilimetrice din materialul de bază al semifabricatului prin fenomene electro-dinamice [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.

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

Transformarea energiei primare (electrice) în energie de efect (termică) se realizează prin intermediul 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 atât prin forma și dimensiunile electrodului, cât și prin cinematica generării suprafețelor [22].

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

Deci, dacă ne referim la prelucrarea dimensională, ea la rândul 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 savantul B. R. Lazarenko (1942) împreună cu cercetătorul B. N. Zolotych. Ei 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:

$$P_m = P_r + P_c \text{ (W)}, \quad (1.1)$$

în care: P_r – este puterea pierdută prin radiație (W);

P_c – puterea pierdută prin conductibilitate termică (W).

Considerînd densitatea electronilor constantă în interiorul canalului de descărcare, atunci puterea medie de descărcare are relația generală [60]:

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

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:

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

în care 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 descrisă 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:

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

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 electronii anodului se poate calcula cu relația [76]:

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

în care: U_A – căderea de tensiune pe anod;

φ – potențialul de ieșire 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÷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.

Dintre acestea, principalele efecte ale descărcărilor electrice sunt:

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

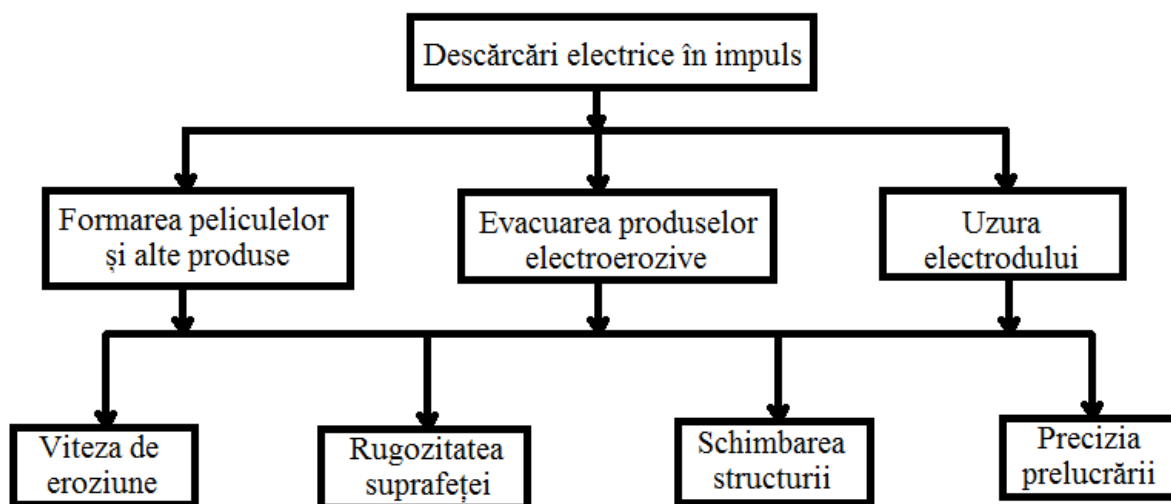


Fig. 1.1. Efectele proceselor fizice din interstițiu

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

- craterul de eroziune la electrodul-anod, numit crater de prelevare;
- craterul de eroziune la electrodul-catod, numit crater de uzare;
- deșeurile tehnologice formate 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 parametrii 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 [140]:

$$P = \rho_M \lambda C (T_t - T_0)^2 \left[\frac{kg^2}{s^5} \right], \quad (1.8)$$

în care: ρ_M – densitatea materialului kg/m^3 ;

λ – conductibilitatea termică $J/kg \cdot K$;

Q – căldura specifică J ;

T_t – temperetura de topire K;

T_0 – temperatura mediului ambiant K.

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 descărcare, mărimea interstițiului.

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

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

Adâncimea craterelor de eroziune este direct influențată de energia descărcărilor electrice și determină, la rândul ei, microgeometria aspirităților de pe suprafața prelucrată (rugozitatea) [141].

1.3. Stabilirea electrodului-sculă (E-S) 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 procedeele 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, odată 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:

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

în care 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 prevăzut 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 [142]. În consecință, figura 1.2 a fost astfel concepută, încât pe baza ei să se determine dimensiunile optime ale E-S, atât din punct de vedere al preciziei prelucrării, cât și a durabilității electrodului-sculă.

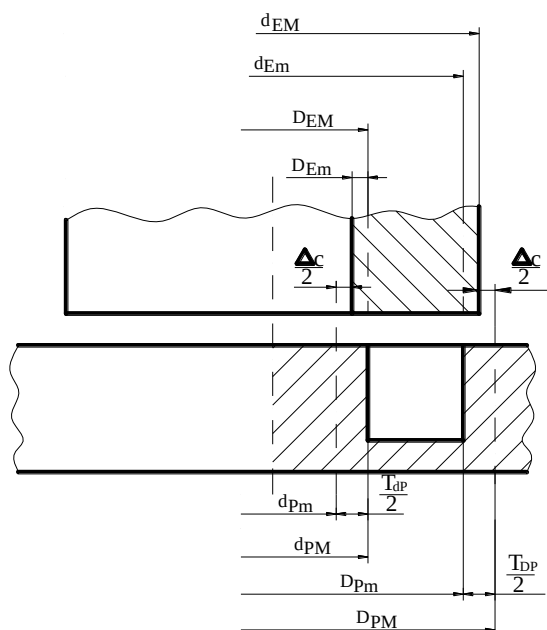


Fig. 1.2. Dependența dimensiunilor electrodului-sculă de cele ale suprafeței prelucrate [142]

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:

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

în care 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, considerând că suprafața prelucrată din figura 1.2 se obține prin finisare, toleranța dimensiunii d_{Ef} a electrodului-sculă se determină cu relația:

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

Considerând 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 următoarele cazuri reprezentative:

- suprafața prelucrată nu străpunge obiectul prelucrării, când lungimea părții active a electrodului-sculă se adoptă în funcție de adâncimea indicată, 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 [142] mărimea reducerii / majorării de dimensiune Δ_c depinde de condițiile prelucrării, în primul rând de felul acesteia (degroșare, finisare sau netezire).

Considerând 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:

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

- la degroșare și finisare:

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

în care: 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:

$$\Delta m = 2 \cdot (I_l + R_{zmax}) [g], \quad (1.18)$$

în care R_{zmax} – este valoarea maximă a rugozității suprafeței prelucrate.

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

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

în care: k este un coeficient, ce ia în considerație condițiile specifice de prelucrare;

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 GOST 3647-80; 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 E-S din orice material, bun conductor de electricitate sau semiconductor și cu o conductivitate termică bună.

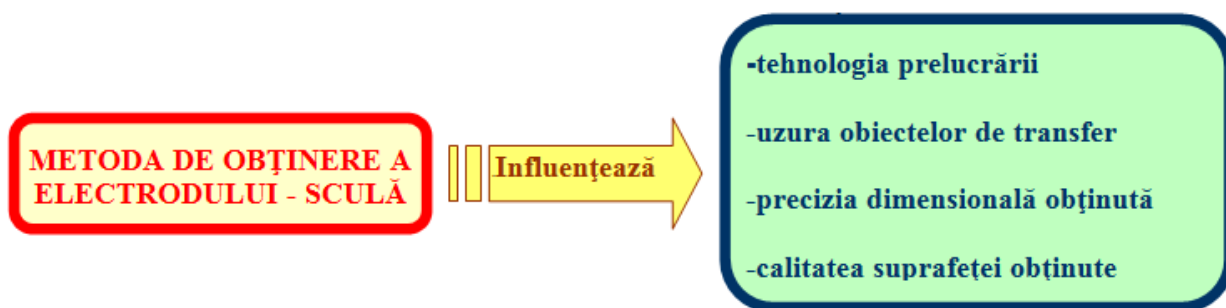


Fig. 1.3. Metoda de obținere a electrodului-sculă [143]

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.

Până 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 [141]. 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).

E-S confecționați din diferite materiale se recomandă a fi utilizați cum urmează: cei din cupru – prelucrări dimensionale de degroșare, alamă – prelucrări de finisare, din aluminiu – la prelucrarea pieselor din oțel, wolfram – la prelucrarea găurilor și formelor și cei confecționați din grafit la prelucrări de degroșare și finisare [142].

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

Utilizarea E-S executați din grafit și cupru prezintă un șir de avantaje: insensibilitatea la șocuri termice, păstrează proprietățile mecanice la temperaturi ridicate, deformările în timpul prelucrării sunt foarte mici, greutatea electrozilor-scule 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.

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

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

Calculul analitic al electrodului-sculă. Profilul, geometria și dimensionarea unei părți de lucru a electrodului-sculă prezintă 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 electrodului-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 ia la prelucrarea suprafețelor exterioare, iar semnul „minus” – pentru obținerea profilurilor interioare.

Suma $(\delta + Z_{\min})$ prezintă creșterea dimensiunilor corecției electrodului-sculă, în care:

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

în care $R_{\max}$ este valoarea maximă a rugozității suprafeței prelucrate;

H – zona de influență termică.

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

$$l = h + \frac{v_l}{100} h \text{ [mm]}, \quad (1.22)$$

în care h este grosimea piesei brute, [mm];

v_l – viteza uzurii liniare a electrodului-sculă, [mm/min].

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

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

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 [22] experimental s-au calculat și determinat δ_T și δ_l ;

– după normala la suprafața prelucrată adâncirii (orificiu) se depune dimensiunile jocului δ_T și δ_l ;

– se construiește linia variației formei capetelor electrodului-sculă, până la suprafața laterală a sectorului de suprafață; orice punct de variație a jocului poate fi calculat cu relația:

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

în care l_i este distanța de la suprafața frontală până la punctul de calculat al profilului adâncitunii;

l_k – lungimea conturului adâncitunii semifabricatului.

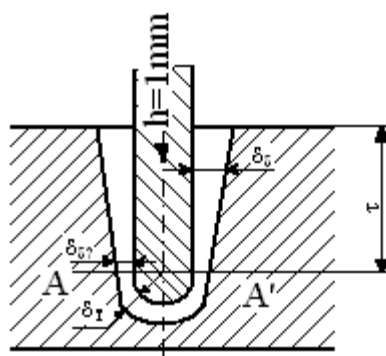


Fig. 1.4. Mărimi ale interstițiului la prelucrarea dimensională pentru cazul obținerii orificiilor:

A – A' – începutul direcției verticale de evacuare a lichidului; δ_{lo} - 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_l - jocul lateral.

Alegerea electrodului-sculă la rectificarea prin electroeroziune (REE). Diametrul discului se alege din calculul necesar aprovizionării vitezei de șlefuire a discului, care se află la limita $v = 40 \div 50 \text{ m/s}$. 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 până la 50 mm.

Alegerea conductorului pentru electrodul-sculă. De la DEE pe lângă alegerea electrodului-sculă și regimul electric de lucru a generatorului necesită determinarea materialului și diametrului, și chiar efortului tensiunii și vitezei de bobinare a firelor electrodului-sculă. În tabelul 26 [22] sunt prezentate informații necesare pentru alegerea parametrilor ce asigură rugozitatea suprafeței prelucrate $R_a \leq 3,5 \mu\text{m}$.

Alegerea electrodului-sculă pentru durificarea materialului prin electroeroziune. Materialul electrodului-sculă se alege, reieșind 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. În procesul prelucrării prin electroeroziune au loc transformările dimensiunilor și forme geometrice a electrodului-sculă cu scăderea preciziei de prelucrare. Uzura ν a electrodului-sculă depinde de proprietățile fizico-mecanice ale materialului electrodului-sculă, de forma lui și de energia descărcărilor electrice W_U , precum și de viteza de pompare a mediului din interstițiu, gradul de poluare a acestuia și presiunea de lucru.

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

$$\nu_r = \left(\frac{V_{ES}}{V_{m.s.}} \right) \times 100\%. \quad (1.24)$$

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

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

în care 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;

$l_{a.p.o.}$ – adâncimea de perforare a găurii.

Uzura electrodului-sculă din cupru crește odată cu mărirea vitezei de pompare a lichidului de lucru, iar cea a electrodului-sculă din grafit-scade.

1.6. Procedee de prelucrare superficială cu aplicarea DEI

1.6.1. Durificarea superficială cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls

Realizarea acoperirilor pe suprafețele active ale matricelor pentru ștanțare sau ale sculelor așchietoare cu depuneri de materiale dure conduce la majorări semnificative ale durabilității lor, cât și la îmbunătățirea calității prelucrării cu ajutorul acestora. 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.

1.6.2. Esența procedurii de prelucrare

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 (E-S) spre electrodul-piesă (E-P) (figura 1.5).

Astfel, sub influența unui câmp electric datorat unui generator de impulsuri comandat se creează posibilitatea apariției descărcărilor sub formă de microcanale de plasmă. În interstițiul de lucru S între E-S – E-P se va produce transferul materialului dur de aport spre suprafața piesei de durificat.

Deplasarea electrodului-sculă față de 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.

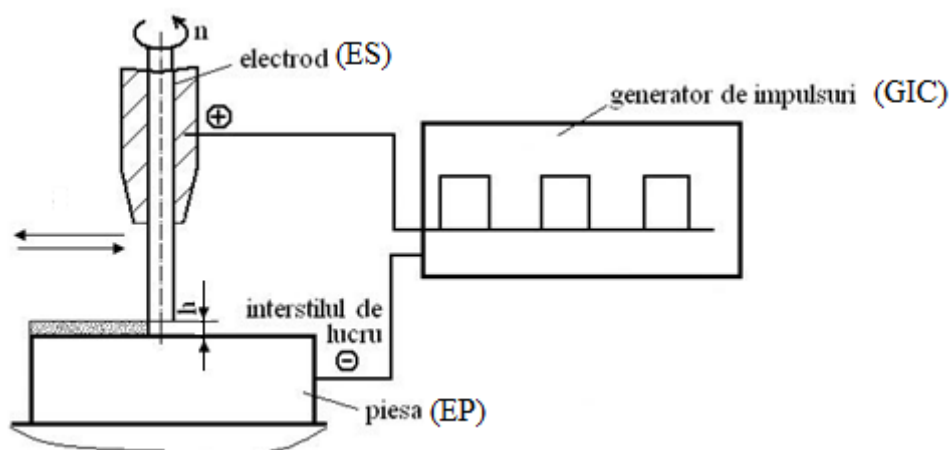


Fig.1.5. Schema principală a procedurii la durificare a suprafețelor cu descărcări electrice în impuls [57]

Caracteristica acestei metode constă în 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 de șmirghel.

Prelucrarea se poate realiza atât cu partea frontală a electrodului cât și cu partea cilindrică. În primul caz axa electrodului se poziționează perpendicular pe suprafața prelucrată, iar în al doilea caz se poziționează paralel cu suprafața de durificat (figura 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 mută 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 neuniformă a acoperirii;
- dependența acoperirii de calificarea și starea operatorului.

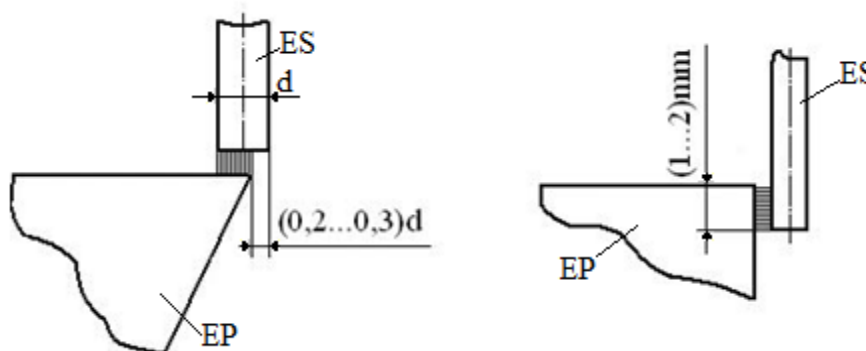


Fig.1.6. Poziționarea electrodului [57]

Aceste neajunsuri sunt înlăturate de mașinile de durificat. Caracteristic în acest caz este că electrodul se rotește cu frecvența de (400-4000) rot/min înbunătățindu-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 matricelor 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 riscul 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 este 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 pentru prelucrările superficiale

Proprietățile și parametrii calitativi ai depunerii depind în mare măsură de compoziția, structura și geometria electrodului folosit. La aplicarea acoperirilor rezistente la uzură în calitate de 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 bare 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. Necâtând 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 conform autorilor [7] se ține cont și de următoarele momente:

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

1.7. Electrozi-scule utilizați la alierea superficială prin electroeroziune

Tipurile de electrozi-sculă utilizați la alierea prin electroeroziune. Pentru dirijarea stabilă a procesului de aliere cu scânteie electrică este necesară contactarea periodică a electrodului cu piesa, iar aceasta se realizează prin utilizarea mecanismelor speciale. La acestea 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 scânteie electrică de la anod la catod, ceea ce contribuie

la îmbunătățirea parametrilor tehnologici ai depunerilor. 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 electrozilor ce oscilează;
- după numărul de coordonate după care oscilează (de la una până 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 scânteie, să cercetăm particularitățile de lucru ale lor la aliere și prescripțiile impuse pentru procesul dat.

Cei mai importanți indici tehnologici ai instalațiilor alierii cu scânteie 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 diminua 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 rămânând neschimbată. Pentru realizarea acestor condiții este necesar un excitator de vibrație de frecvență înaltă [7]. Însă funcționarea instalației la o frecvență sporită, mai ales la o energie mare a impulsurilor, poate conduce la supraîncălzirea electrodului și

înrăutățirea calității stratului aliat, de aceea pentru fiecare regim electric trebuie să-i corespundă o frecvență a vibrațiilor bine determinată [144]. Astfel diapazonul de frecvențe al instalațiilor trebuie să fie între 20 și 1000 Hz și mai mult, dar deoarece reaccordarea 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 până la 1000 Hz este excitatorul de vibrații electromagnetic, de aceea el se utilizează pe larg în instalațiile pentru alierea cu scânteii [144].

În diapazonul 1000-5000 Hz un excitator de vibrații cu perspectivă poate fi cel electrodinamic, în diapazonul ultrasunetelor și cel magneto [144].

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 nu și-au găsit o utilizare largă în practică.

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 [12], 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 de depunere [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 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 (figura 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 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) (figura 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.

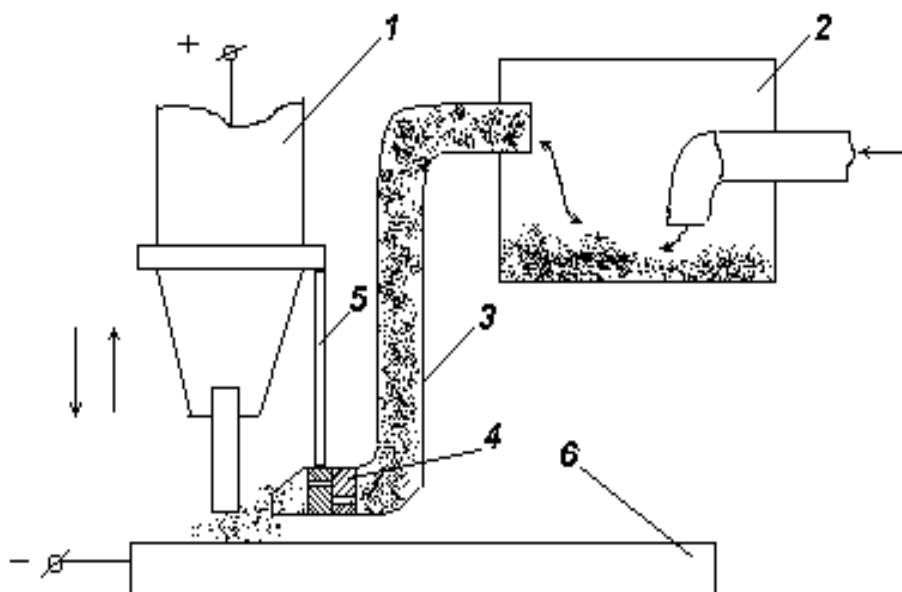


Fig. 1.7. Dispozitiv pentru formarea depunerilor cu rupere de contact din pulberi cu introducerea dozată a acesteea în interstițiu în perioadele de apropiere a electrozilor: vibrator (1); alimentator cu pulbere (2); tub de racordare (3); clapetă (4); pârghie (5); piesă de prelucrat (6) [25, 40]

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

Un caz aparte îl prezintă schema de introducere a pulberii în interstițiu prin partea laterală sau prin partea frontală a electrodului-sculă (figura 1.9) creând 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.

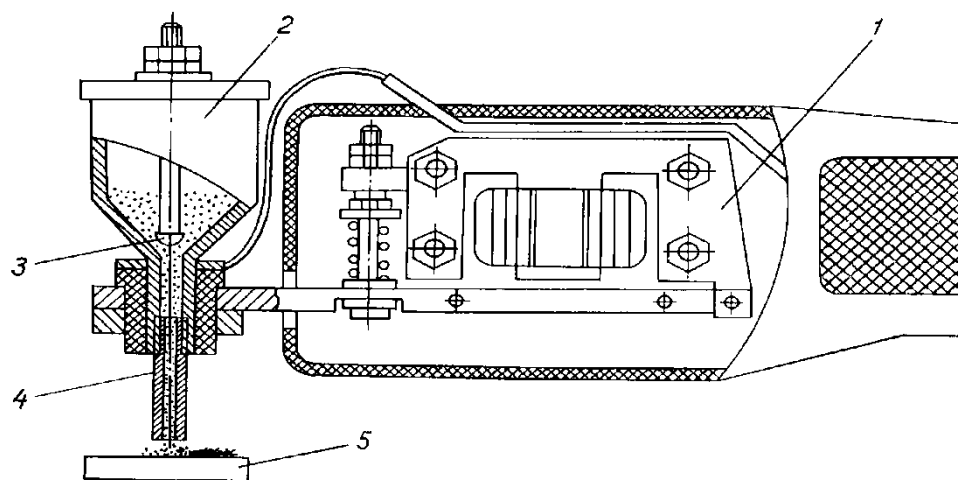


Fig. 1.8. Dispozitiv pentru formarea depunerilor din pulberi cu introducerea dozată a materialului dispers prin electrodul tubular [25]: vibrator (1); alimentator cu pulberi (2); element de dozare (3); electrod (4); piesă de prelucrat (5)

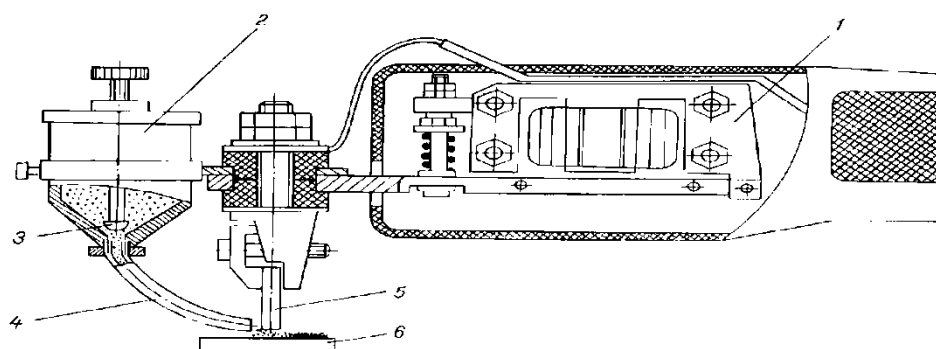


Fig. 1.9. Schema introducerii frontale a materialului dispers [25]: 1) vibrator; 2) alimentator de pulberi; 3) element de dozare; 4) niplu; 5) electrod; 6) piesa de prelucrat

Aceste scheme de introducere a pulberii în interstițiu sunt mai tehnologice și permit aplicarea depunerilor și pe suprafețele pieselor cilindrice (figura 1.10). Ultima schemă de realizare a procedeului 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 jetul 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 lică a materialului acestea formează stratul de depunere.

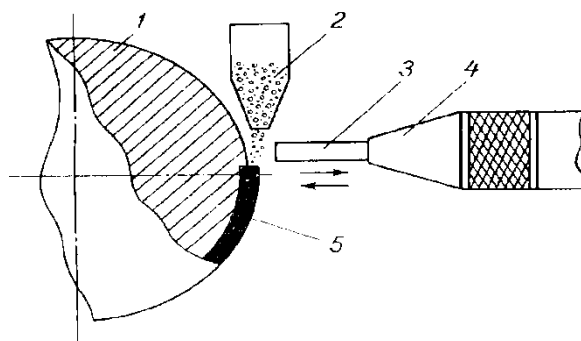


Fig. 1.10. Schema formării depunerii pe suprafețele de rotație a pieselor cilindrice [40]:

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 reieșind 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 acestea.

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 aplicat la formarea depunerilor în regim de subexcitare

Cercetările anterioare au demonstrat că în procesul formării straturilor 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 electric 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 un unghi de 15...20°, față de axa piesei [7].

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 interstițiul $S=0,1...0,5$ mm. În al doilea rând, se constată că operând 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. Realizarea în practică a acestei idei [8, 38, 45-47, 68,] 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:

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

unde: d_z este diametrul zonei de interacțiune a plasmelor cu anodul la o descărcare singulară (m);

f – frecvența descărcărilor (Hz).

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

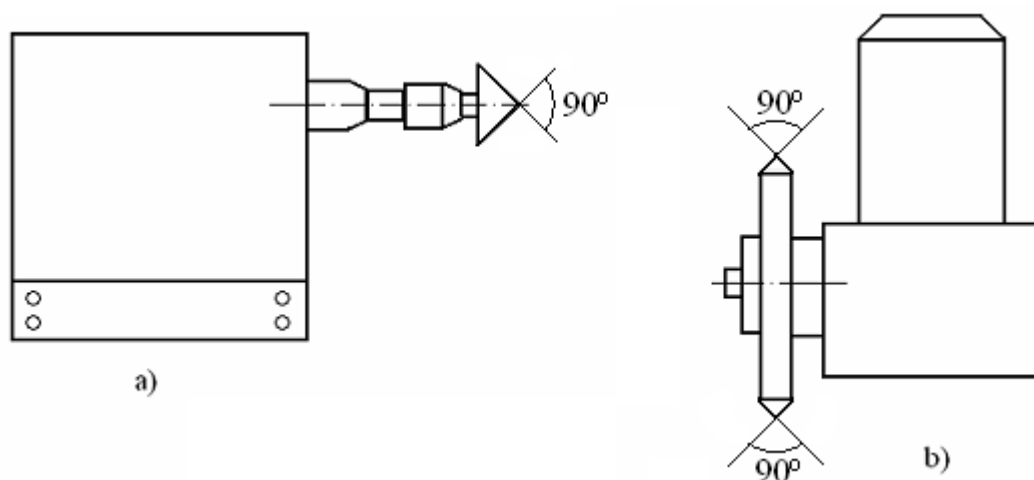


Fig. 1.11. Electrode for powder deposition:

a) electrode (anode) – conical; b) electrode (anode) – disc [31]

Data 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] (figura 1.12). Din figură se constată, că din punct de vedere al eroziunii și al depunerii particulelor, materialele studiate se comportă la fel.

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 pot fi approximate cu relația [48]:

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

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.

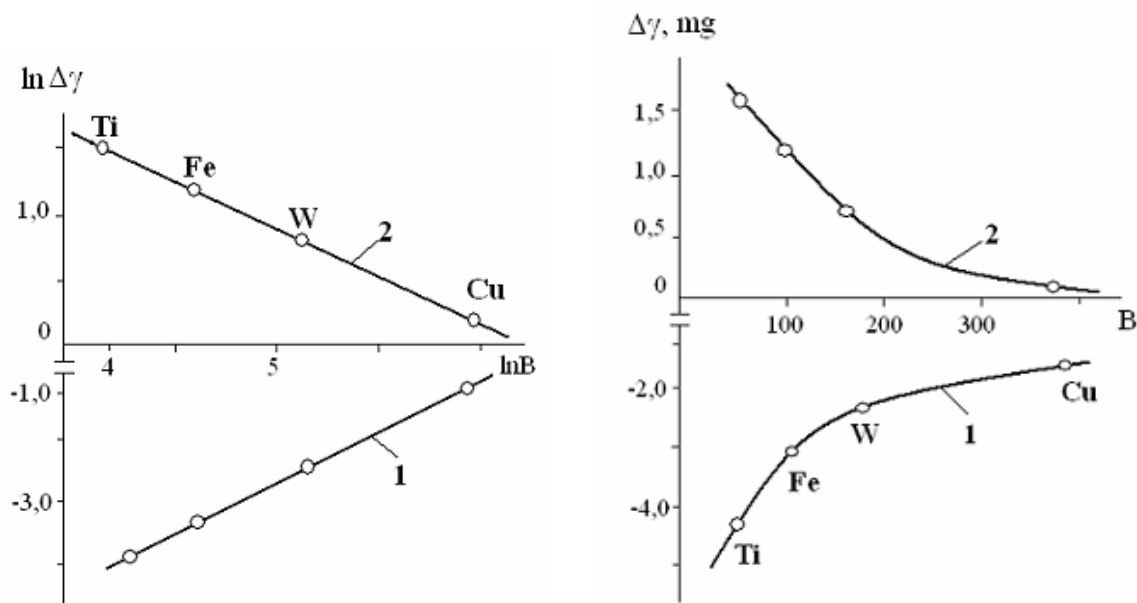


Fig. 1.12. Dependența cantității de pulbere depusă pe electrodul-sculă (anod) –2 și a eroziunii masice a acestuia –1, în funcție de coeficientul de acumulare a căldurii [31]

Din analiza rezultatelor acestor cercetări experimentale [25, 32] 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 [33].

În ultimul timp prelucrările superficiale cu aplicarea DEI și-au găsit un nou domeniu de utilizare, și anume la formarea straturilor de oxizi [34, 35]. La acest tip de prelucrări electrodul-sculă are forma suprafeței capului de lucru – ca una conjugată cu suprafața 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.

Cementarea suprafețelor se execută cu utilizarea electrozilor-scule confecționați din grafit-tehnic [33]. 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 [40].

1.10. Concluzii la capitolul 1:

Analizând literatura de specialitate privind starea lucrurilor în dezvoltarea domeniului de prelucrare a suprafețelor cu aplicarea DEI putem trage 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;

- dacă 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 superficiale în condiții normale).

2. STRATEGIA CERCETĂRILOR EXPERIMENTALE

Din cele menționate în capitolul I, se distinge clar, că prelucrarea dimensională este asigurată de o dezvoltare largă atât prin fundamentare teoretică, cât și prin aplicare în practică, atât prin elaborare de utilaj tehnologic necesar, cât și prin proiectarea și realizarea electrozilor-sculi și a materialelor pentru acestea.

Condițiile de funcționare și mediul de lucru la prelucrarea superficială, diferă de cele la prelucrarea dimensională, din care motiv este necesar a stabili cum se comportă materialele de execuție a E-S în condițiile descărcărilor electrice în impuls în aer la presiune normală, care transformări se produc în ele, cum influențează forma și dimensiunile E-S asupra transformărilor în materiale, care sunt factorii ce influențează mai puternic procesele de prelucrare superficială și care dintre ei sunt mai importanți pentru a proiecta și elabora E-S necesari. Din aceste motive se impune crearea unui stand experimental, care să asigure: formarea impulsurilor de lucru, precizia de reglare a interstițiului, formarea depunerilor din pulberi și materiale compacte, iar pentru măsurarea cantitativă și calitativă a rezultatelor cercetării, se impun determinări practice a energiei descărcărilor, eroziunii electrozilor și materialelor de execuție a acestora. În continuare sunt prezentate metodele de cercetare și echipamentul aplicat la realizarea obiectivelor tezei.

2.1. Standul experimental și componentele lui

Pentru efectuarea cercetărilor privind eroziunea electrică a electrozilor-sculă 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).

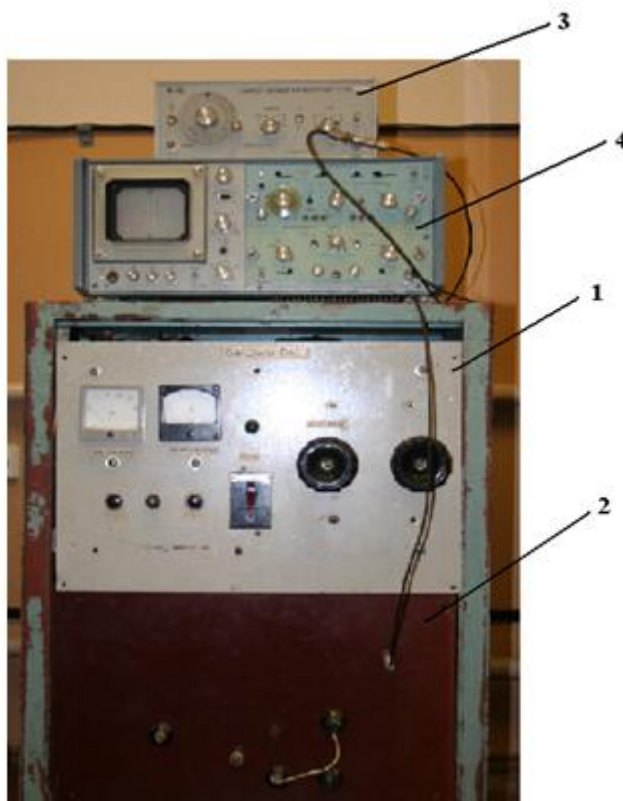


Fig. 2.1. Vederea generală a instalației: (1-generatorul de impulsuri de tipul RC; 2-blocul de amorsare; 3-blocul de comandă; 4-osciloscop) [33]

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 ($\tau = 220\mu s$). 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.

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).

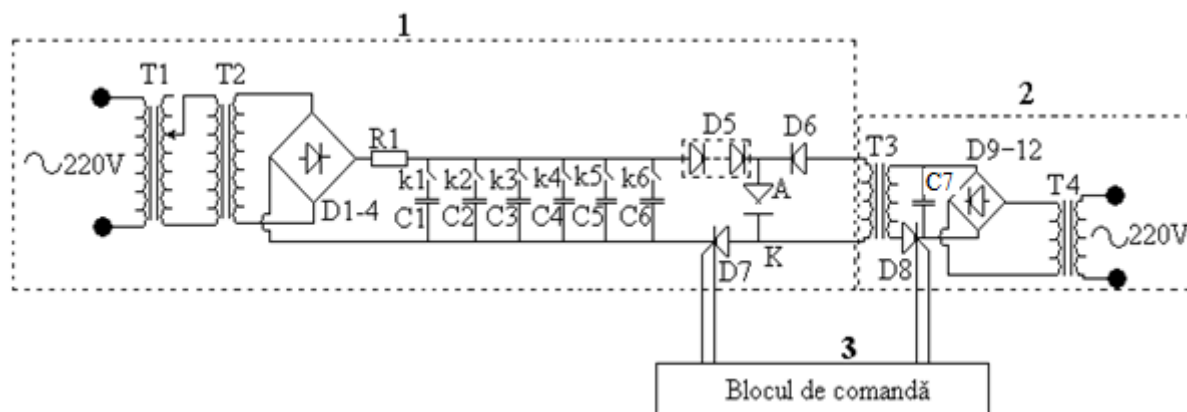


Fig. 2.2. Schema electrică principală a instalației [33]

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 [25, 33]. 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 K156JA7.

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.

Stabilirea și măsurarea parametrilor de intrare. În calitate de parametri de intrare ai procesului tehnologic au fost alese: durata și forma impulsului și energia degajată în interstițiu la o descărcare solitară, mărimea interstițiului și frecvența impulsurilor.

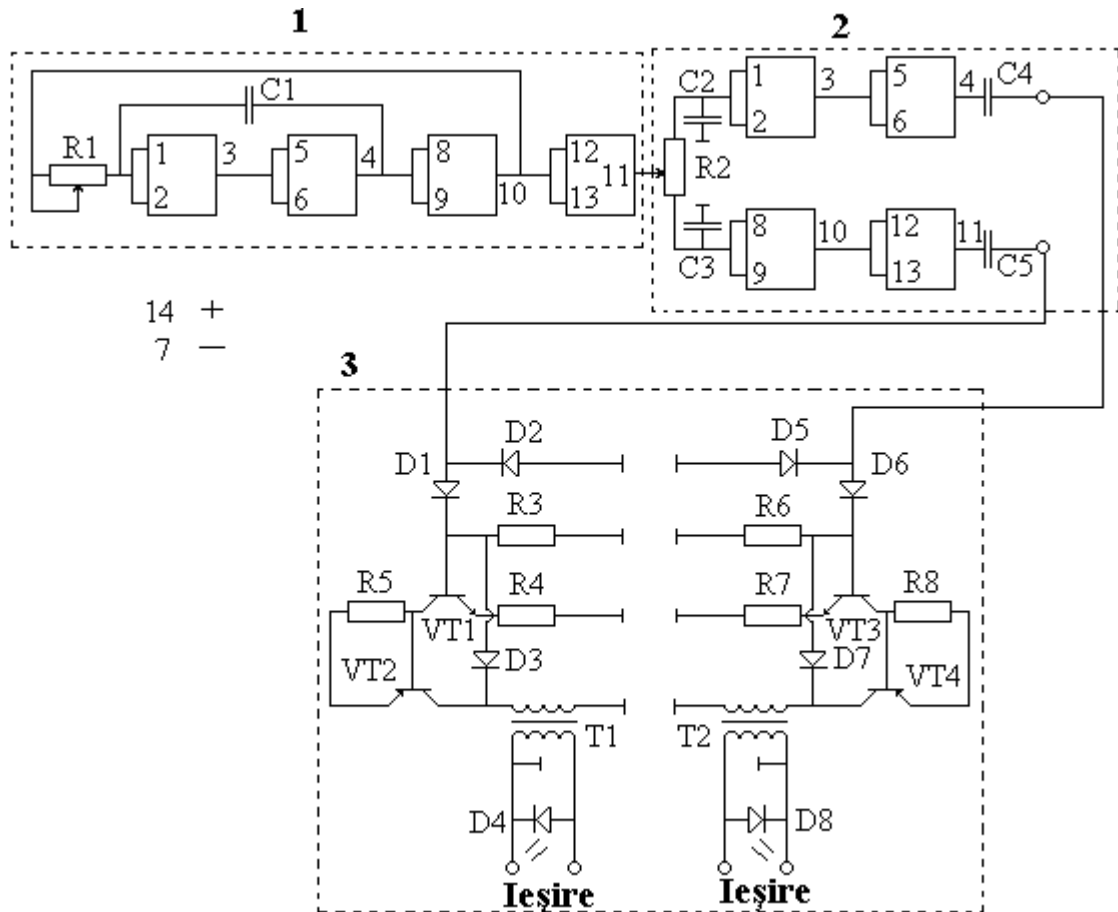


Fig.2.3. Schema electrică a blocului de comandă [33].

Pentru determinarea cantitativă a parametrilor de intrare a fost utilizat oscilograful cu memorie C8-13, care se conectă în schemă printr-un șunt special cu rezistența $R_s = 0,003\Omega$. Schema electrică – bloc de măsurare a caracteristicilor electrodinamice a descărcărilor electrice în impuls este prezentată în fig. 2.4. Conform acestei scheme-bloc, șuntul R_s este conectat în serie cu circuitul de descărcare, iar divizorul de tensiune R_1 , R_2 – paralel cu circuitul de descărcare. Energia degajată în impuls, precum și energia degajată în interstițiu, se determină prin metoda osciloscopării, adică prin metoda integrării [8, 16]:

$$W = \int_0^{\tau} I(t)U_e(t)d(t), \quad (2.1)$$

$$W_s = \int_0^{\tau} I(t)U_s(t)dt. \quad (2.2)$$

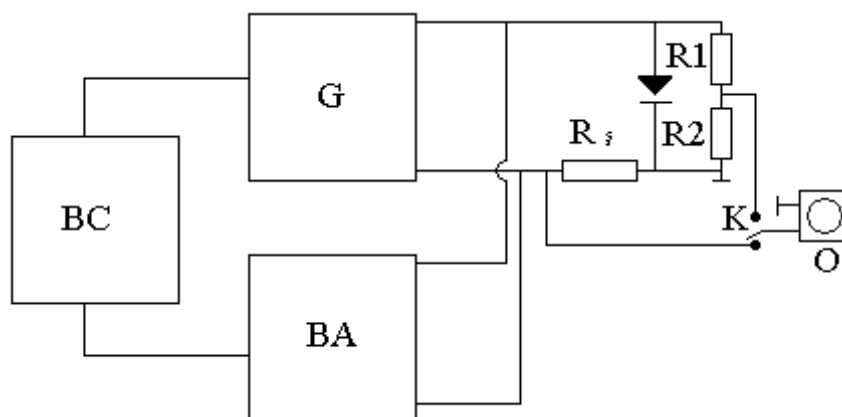


Fig. 2.4. Schema electrică-bloc de măsurare a caracteristicilor electrodinamice ai DEI:

BC- blocul de comandă; G- generator de impulsuri; BA- blocul de amorsare; O- osciloscop; R_s - șuntul; R1-R2- divizor de tensiune; K- comutatorul

Forma impulsurilor ale descărcărilor electrice de bază, în funcție de valoarea capacității condensatoarelor de lucru, este prezentată în fig. 2.5.

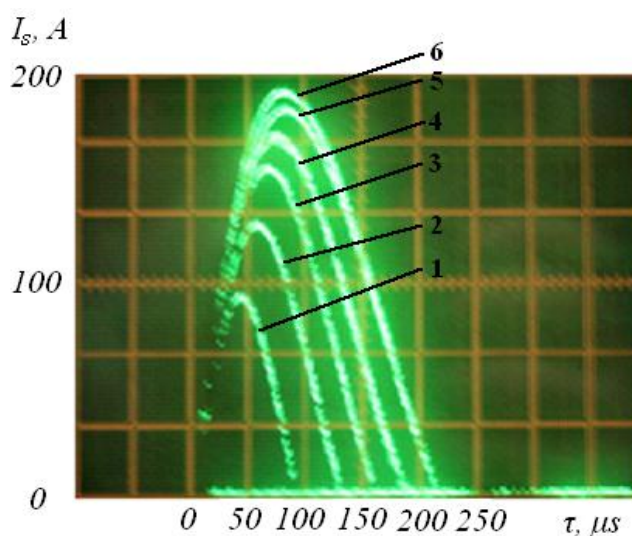


Fig. 2.5. Oscilogramele impulsurilor de bază a descărcărilor electrice pentru diferite valori ale capacității bateriei de condensatoare a generatorului:

1 – $C=100 \mu\text{F}$; 2 – $C=200 \mu\text{F}$; 3 – $C=300 \mu\text{F}$; 4 – $C=400 \mu\text{F}$; 5 – $C=500 \mu\text{F}$; 6 – $C=600 \mu\text{F}$

2.2. Partea mecanică a standului experimental

Pentru variația mărimii interstițiului, în procesul cercetărilor sa utilizat dispozitivul care este reprezentat în figura 2.6. 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 sârmă întinsă orizontal în dispozitive de întindere (1).

Masa de lucru (4) în procesul cercetărilor se deplasa atât longitudinal cât și transversal, cu scopul obținerii meniscurilor unitare pe suprafața anodului. Cu ajutorul mânerului (2) se efectua reglarea brută a interstițiului.

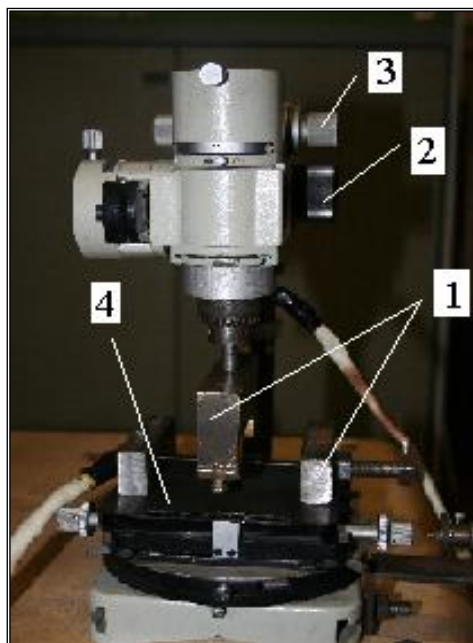


Fig.2.6. Dispozitiv pentru variația interstițiului în baza microscopului [139]: 1- dispozitive de întindere a electrozilor sub formă de sârmă; 2 - mâner de reglare brută a interstițiului; 3- mâner de reglare fină a interstițiului; 4- masa de lucru

Pentru reglarea fină (precisă) a interstițiului se folosește mânerul (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 [139].

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.

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, care permit formarea straturilor de depunere, atât a suprafețelor plane, cât și a celor cu o configurație complexă ale pieselor [34-36]. În scopul lărgirii domeniilor de utilizare au fost elaborate [33] 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 dezvoltă o frecvență a 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 $3 \leq d \leq 200 \mu\text{m}$.

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

Denumirea instalației	Productivitatea (cm/min)	Productivitatea ($\mu\text{g}/\text{cm}$)	Grosimea stratului depus, (mm)	Înălțimea neregularităților, (μm)	Tensiunea de lucru, (V)	Puterea, (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	0,5-2	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	420x490x75	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
ELITRON-12	până la 3		0,01-0,1	40	220	0,22	12	12
ELITRON-14	până la 3		0,01-0,03	25	220	0,33	25	25
ELITRON-22	până la 5		0,01-0,12	16-80	220	0,4	22	22

Descărcările electrice au fost aplicate pentru a obține straturi de depunere pe suprafețele piesei de lucru atunci când sunt impuse proprietăți speciale. În general, astfel de straturi posedă preponderent proprietățile materialului sculei de electrod. Dacă se aplică pulberi pentru formarea de depunere, se asigură posibilitatea de a forma straturi cu proprietăți îmbunătățite. În acest ultim caz, trebuie satisfacă următoarele condiții [8]:

- 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 în impuls.

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

Faza lichidă apare pe suprafața piesei de prelucrat atunci când este îndeplinită următoarea relație [33]:

$$Q = \frac{4W}{\pi d^2 S} \geq Q_m, \quad (2.3)$$

unde: W este energia pulsului unit;

d - diametrul craterului de fază lichidă pe suprafața catod;

S - dimensiunea medie a interstițiului;

Q_m - căldura de topire a materialului piesei de prelucrat, care poate fi determinată cu relația [33]:

$$Q_m = q_m \rho \quad (J), \quad (2.4)$$

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 :

$$W = \eta \frac{CU^2}{2} \quad (J), \quad (2.5)$$

unde η este randamentul echipamentului.

Pentru a studia aspectele fizice și tehnologice ale procesului de depunere prin utilizarea descărcărilor electrice pulsate, a fost utilizat echipamentul modernizat și elaborat de autorii [40], carei prezentat schematic în figura 2.7. Echipamentul experimental include câteva componente

aparținând instalației Razriad-M [25]. Echipamentul permite depunerea straturilor metalice pe piese care au lungimi de până la 250 mm și diametre de până 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 ($U = 1000 \text{ V}$, $C = 100 \text{ }\mu\text{F}$). 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 când 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 pâlnie se alimentează la spațiul de lucru, ca urmare a gravitației. Un dispozitiv de dozare adecvat permite controlul alimentării cu pulbere în spațiul de lucru.

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 diferite proceduri 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 metodele utilizate ar putea fi și alierea prin descărcare electrică în impuls (DEI).

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 electrodului-sculă (figura 2.7). Electrocul este conectat 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.

După cum sa menționat mai sus, există metode 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 2.7).

Principalii factori care pot afecta dimensiunile și calitatea stratului depus sunt mărimea interstițiului dintre electrodul-sculă și piesa de prelucrat, debitul pulberii P , energia Wd livrată în interstițiu, energia specifică Ws disipată de-a lungul distanței de lucru, raza particulelor care trebuie depozitate, frecvența pulsului și timpul specific de acoperire.

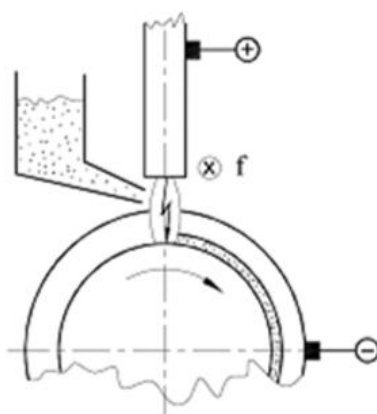


Fig. 2.7. Pulverizarea canalului de plasmă prin descărcări electrice în impuls (DEI) [110]

Dimensiunea interstițiului 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:

$$P = m_p / t \quad (2.6)$$

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

$$W_d = CU^2 / 2 \quad (2.7)$$

unde: C este capacitatea circuitelor de descărcare, în (pF), iar U – tensiunea dintre electrozii (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 scânteia electrică [41], dar în scopuri generale se poate considera că energia este definită de Eq .

În cazul depunerii electrodului-sculă fără contact între electrozi, energia specifică W_s poate fi determinată de raportul dintre energia W livrată în spațiul de lucru și interstițiul de lucru S :

$$W_s = W / S. \quad (2.8)$$

Descărcările electrice între electrodul-sculă și piesa de prelucrat au fost obținute cu ajutorul unui dispozitiv de tip Razread (fabricat în Rusia). Schema electrică a echipamentului este prezentată în figura 2.8. 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

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

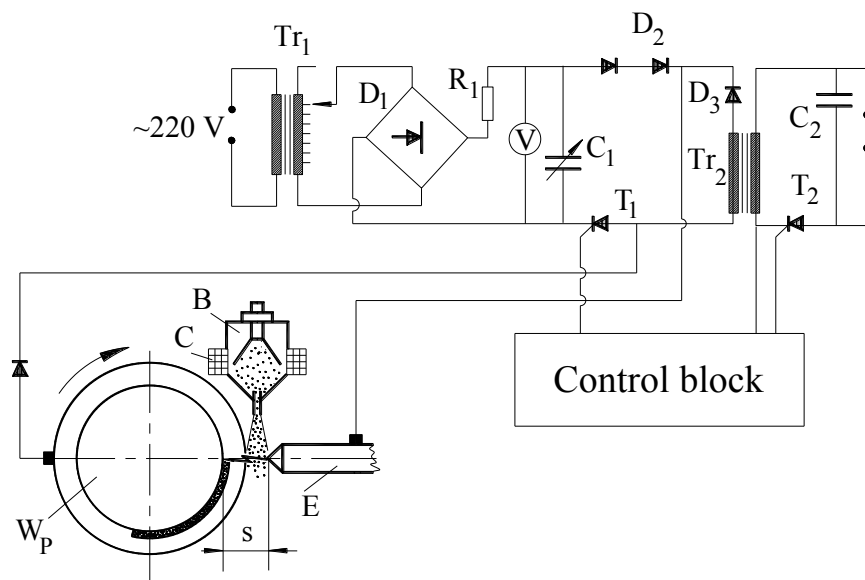


Fig. 2.8. Schema electrică a echipamentului utilizat pentru îmbunătățirea proprietăților stratului de suprafață prin descărcări electrice [41]

Descărcarea 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 . Atât circuitul de alimentare cât 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. Mărimea interstițiului S între electrodul-sculă 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 până la 500 V.

O soluție îmbunătățită [42] a fost utilizată pentru a asigura dozarea și alimentarea pulberii spre descărcarea electrică; pulberea existentă în buncărul B este fluidizată utilizând 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.

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

1. Bronz БрАЖН-10-4-4 GOST 18175-72, conținând cupru ca materialul de bază, 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 la uzură de tip ИТ-19Н-01 ТУ 48-19-383, care conține Ni – bază, 11% Cr, 2,1% W, 2,2% Si, 0,45% C, 3,5% Fe (duritate 28-40 HRC);
3. Oțel cu conținut redus de carbon GOST 1050-74 (0,03% carbon, acest oțel fiind utilizat numai ca material de comparație);
4. Carbura de bor (B_4C GOST 5744-62), caracterizată prin duritate mare (9,3 pe scara Mohs), punct de topire ridicat ($2350^{\circ}C$) 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 GOST 380-71, oțel 45 GOST 1050-74), aliajele titanului (BT8, BT1-0 GOST 19807-74), aliajul aluminiului (Д16 GOST 4784-74) și aliajele cuprului (M0 GOST 859-66), alamă (Л63 GOST 15527-70), bronz (Бр. А5 GOST 18175-72). Conținutul chimic al materialelor [89] este prezentat în tab. 2.4. 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.

Pentru realizarea cercetărilor experimentale în calitate de piese supuse prelucrării, au fost confecționate probe 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 constituia aproximativ 1 cm^2 . Electrodul-sculă, la prelucrarea suprafețelor conjugate plane, reprezintă un cilindru cu diametrul suprafeței de lucru de 15 mm, având o coadă cilindrică pentru fixarea în mandrina instalației experimentale. La oxidarea suprafețelor cilindrice exterioare, electrodul-sculă a fost confecționat sub formă de bară cilindrică cu $\varnothing 6\text{ mm}$ cu capăt semirotund.

Suprafețele active ale probelor supuse prelucrării au fost șlefuite cu hârtie abrazivă de Șmirghel (3-0) și lustruite cu pasta Goya până 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.

Tabelul 2.4. Conținutul chimic al materialelor pentru probe de cercetare [89]

Aliajul	Conținutul chimic
Aliajele fieroase	
Oțel St. 3 GOST 380-71	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 GOST 1050-74	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 (GOST 19807-74)	
BT8	5,8-7,0 % Al; 2,8-3,8 % Mo; ≤0,5 % Zr; 0,2-0,4 % Si; ≤0,30 % Fe; restul (bază) – Ti
BT1-0	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 GOST 4784-74	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 GOST 859-66	Bază – 99,95 % Cu, impurități – ≤0,05 %
Alamă Л63 GOST 15527-70	Bază – 62,0-65,0 % Cu; 34,5-37,5 % Zn; impurități – ≤0,5 %
Bronz Бр. А5 GOST 18175-72	3,5-6 % Al; impurități – ≤0,5 %; restul (bază) – Cu
Grafit electrotehnic ГAK-1 GOST 17022-81	
Aliajele wolframului	
BP-10 GOST 8.585-2001	Bază – 90 % W, 10 % Re

2.5. 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)	Densitatea ($\text{kg/m}^3 \cdot 10^{-3}$)
W + 10% Re	3180	21,02
Cu	1083	8,96
Al	660	2,7
Grafit	3700	2,22
Oțel	1450 - 1520	7,7 ÷ 8,1

Electrozii prelucrați prealabil după metodica descrisă mai sus, se prindeau în elementele de poziționare ale dispozitivului de fixare. Apoi, electrozii se apropiau manual unul de altul, până la contactul acestora, și se selecta mărimea interstițiului.

În fig. 2.9 sunt prezentate scheme de poziționare a electrozilor, utilizați în procesul cercetărilor experimentale și conectarea acestora în circuitul de descărcare al generatorului de impulsuri de curent.

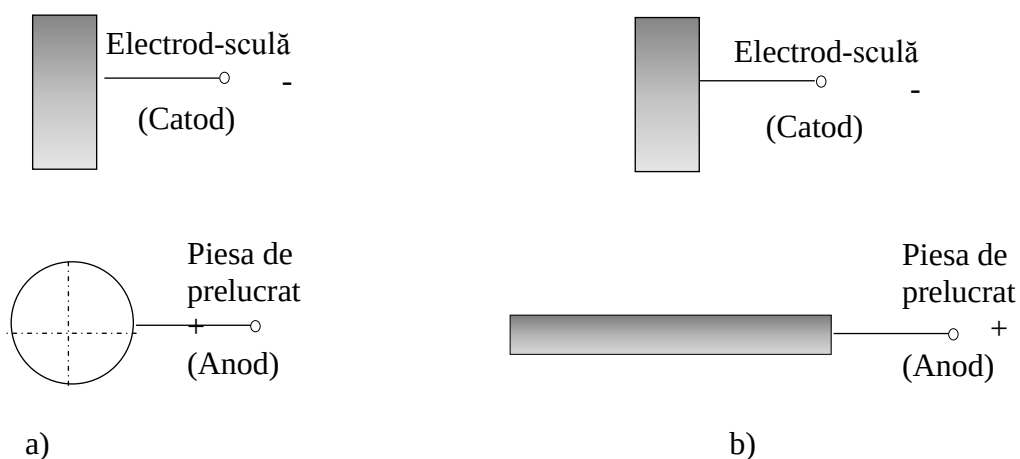


Fig. 2.9. Scheme de poziționare a electrozilor utilizate în procesul cercetărilor experimentale și conectarea acestora în circuitul de descărcare al generatorului de impulsuri de putere:
a) cazul piesei cilindrice; b) cazul piesei plane.

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. 2.9 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 KERN ABJ 120-4NM, cu precizia de măsurare 10^{-4} g (fig. 2.10).



Fig. 2.10. Cântarul analitic KERN ABJ 120-4NM

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 până și după prelucrare cu cântarul analitic KERN ABJ 120-4NM.

2.7. Aplicarea microscopiei optice la cercetarea suprafețelor

În această lucrare pentru analiza morfologiei suprafețelor prelucrate a fost utilizat microscopul optic XIM600 (fig. 2.11) [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 până 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.



Fig. 2.11. Microscopul optic XIM600 [94]

Pe lângă microscopul optic pentru cercetarea microobiectelor a fost utilizat și microscopul electronic Vega TeScan 5130 (fig. 2.12).

Microscopul electronic cu baleiaj folosește fascicul focalizat de electroni pentru a scana zonele mici a probelor solide. Imaginea obiectului este formată secvențial pe puncte și este rezultatul interacțiunii dintre fasciculul de electroni cu suprafața probei. Fiecare punct al probei este secvențial iradiat cu un fascicul de electroni concentrat, care se deplasează de-a lungul suprafeței probei similar cu fascicul de electroni de scanare în sistemele de televiziune.

La interacțiunea electronilor cu probă apar semnale de răspuns de natură diferită (electronii reflectați și secundari, Augerelectronii, raze X, lumina, curentul absorbit, etc), care sunt utilizate pentru construirea imaginii simultane pe ecran. Pentru construirea imaginii nu este folosit sistemul electro-optic. Redimensionarea imaginii se efectuează prin intermediul echipamentelor radiotehnice.

Prin urmare, microscopul electronic cu baleiaj sunt fundamental diferite de microscopul de difracție. În camera de mostre se află masă care oferă deplasarea probei în trei direcții reciproc perpendiculare, ce permite să schimbe înclinația acesteia în raport cu fasciculul de electroni incidente de la 0° la 90° , și rotirea probei în jurul axei optice [16].

Deoarece emisiile de electroni secundari depinde mult de morfologia suprafeței, imaginea este mărită. Pentru unele instrumente, rezoluția este de 1 nm, dar mai des - 4 nm. Coeficientul de mărire poate depăși 500.000.

În această lucrare se analizează rezultatele cercetării morfologiei probelor obținute cu microscopul electronic la detectarea electronilor secundare.

Probele trebuie să fie bine curățate, suprafața lucioasă și rezistentă în condițiile vidului. Fasciculul de scanare nu distruge suprafața probelor.



Fig. 2.12. Vederea generală a microscopului electronic Vega TeScan 5130

Microscopul electronic de baleiaj este echipat cu detector de raze X (EDX). EDX este o procedură standard pentru identificarea și cuantificarea compoziției elementare a zonelor probelor cu dimensiuni de câțiva micrometri cubi. Razele X caracteristice sunt produse atunci când un material este bombardat cu electroni a unui fascicul de electroni, în cazul dat în microscopul electronic de baleiaj (SEM). Detectarea acestor raze X poate fi realizată printr-un spectrometru, care este un dispozitiv pentru studiul corpurilor solide care face distincție între energiile cu raze X.

EDX spectrometrul utilizează analiza picurilor energetice, împreună cu detectorul pulsurilor de ieșire proporționale cu energiile fotonilor radiației X se aplică analizatorul înălțimei pulsurilor. Razele X incidente provoacă ionizarea detectorului și apare încărcarea electrică care este amplificată. Și detectorul și amplificatorul sunt răcite de nitrogen lichid în scopul minimizării distorsiunilor semnalului.

Cercetarea inițială cu EDX, de obicei, cuprinde generarea spectrului de radiație X pe toată aria supusă studierii în SEM. Se construiește imaginea probei în spectrul electronilor

secundari și se alege punctul pentru studierea compoziției chimice. Rezultatul are forma grafică (spectrograma) și de tabel unde pentru fiecare element identificat sunt prezentate valorile fracțiunii masice și atomice. Pe spectrograma axa Y corespunde numărului de raze X trimise și prelucrate de către detector, axa X corespunde valorilor energiei acestor raze. Echipamentul software asociază în mod automat cantitatea de energie a razelor detectate cu elementele chimice și învelișurile electronice care le-au emis.

2.8. 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 „admise” 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:

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

- 2) Abaterea medie pătratică corectată:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} . \quad (2.10)$$

- 3) Abaterea maximală posibilă:

$$\Delta x = 3S . \quad (2.11)$$

- 4) Dispersia:

$$D = S^2 . \quad (2.12)$$

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

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}. \quad (2.13)$$

6) Abaterea medie pătratică a mediei aritmetice:

$$\sigma^* = \frac{S}{\sqrt{n}}. \quad (2.14)$$

7) Limitele intervalului de încredere a valorilor măsurărilor:

$$|x_i - \bar{x}| < t(P; k) \cdot S, \quad (2.15)$$

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:

$$\Delta x = t(P; k) \cdot \sigma^*. \quad (2.16)$$

9) Limitele intervalului de încredere a lotului în întregime:

$$|x_i - \bar{x}| < t(P; k) \cdot \sigma^*. \quad (2.17)$$

10) Valoarea adevărată a mărimii măsurate:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x. \quad (2.18)$$

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 până la dreapta căutată, va fi minimală.

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

$$\sum_{i=1}^n (y_i - B - Ax_i)^2 \rightarrow \min, \quad (2.19)$$

în care n reprezintă numărul de puncte experimentale.

Pentru determinarea minimului 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

(2.20)

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

Rezolvînd sistemul de ecuații, vom obține:

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

(2.21)

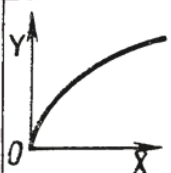
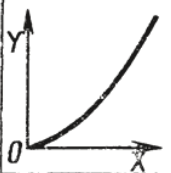
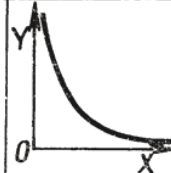
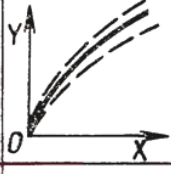
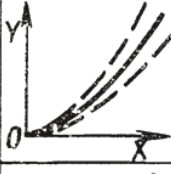
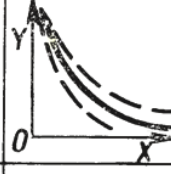
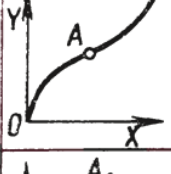
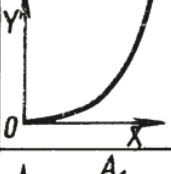
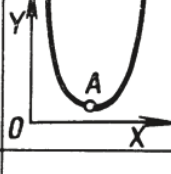
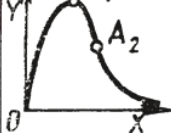
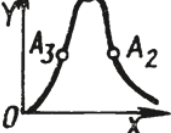
$$B = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n (x_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}.$$

Curbele care au extreme (maximuri sau minimuri) construite după punctele experimentale în majoritatea cazurilor nu pot fi approximate 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 legăturilor 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 rând, de numărul experiențelor efectuate. Cu cât numărul acesta este mai mare cu atât exactitatea este mai înaltă.

Tabelul 2.6. 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		9		$Y = \frac{a}{X^b}$ $c = 0$
2		$Y = aX^b e^{cx}$ $c = -0,05 + 0,05$	6		10		$Y = \frac{a}{X^b e^{cx}}$ $c = 0,1 \div 0,05$
3		$Y = aX^b e^{cx}$	7		11		$Y = \frac{a e^{cx}}{X^b}$
4		$Y = \frac{aX^b}{e^{cx}}$	8			—	—

Pentru calculul parametrilor polinomului se recomandă [106] de-l reprezentat în forma:

$$y = b_0 \cdot p_0(x) + b_1 \cdot p_1(x) + \dots + b_n \cdot p_n(x), \quad (2.22)$$

în care $p_i(x)$ sunt polinoame ortogonale ale lui Cebîșev pe mulțimea punctelor x_k cu ponderea $\omega_k = \omega(x_k) > 0$. Aceasta înseamnă că, pentru orice $i \neq j$ se îndeplinește condiția:

$$\sum_{k=1}^N p_i(x_k) \cdot p_j(x_k) \cdot \omega_k = 0. \quad (2.23)$$

Parametrii ecuației (2.1) sunt calculate cu relații:

$$b_j = \frac{\sum y_k \cdot p_j(x_k) \cdot \omega_k}{\sum p_j^2(x_k) \cdot \omega_k}, j = \overline{0, n},$$

care nu depind de puterea n a polinomului precăutat.

Polinoamele ortogonale lui Cebîșev de puteri inferioare cu coeficientul superior egal cu 1, au forma:

$$\begin{cases} p_0(x) = 1, p_1(x) = x - \bar{x}, \\ p_2(x) = x^2 - \frac{\bar{x}^3 - \bar{x}^2 \bar{x}}{\bar{x}^2 - (\bar{x})^2} + \frac{\bar{x}^3 \bar{x} - (\bar{x}^2)^2}{\bar{x}^2 - (\bar{x})^2}, \end{cases} \quad (2.24)$$

unde valorile medii se determină în modul obișnuit:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_k \cdot \omega_k}{\sum \omega_k}, \bar{x}^2 = \frac{\sum x_k^2 \cdot \omega_k}{\sum \omega_k}, \bar{x}^3 = \frac{\sum x_k^3 \cdot \omega_k}{\sum \omega_k}.$$

Poligoanele ortogonale de puteri superioare cu coeficientul superior egal cu 1 se determină cu ajutorul ecuațiilor recurente:

$$p_{j+1}(x) = (x + \beta_{j+1}) \cdot p_j(x) - \frac{H_j}{H_{j-1}} p_{j-1}(x), j = \overline{1, n}, \quad (2.25)$$

unde:

$$H_j = \sum_{k=1}^N p_j^2(x_k) \cdot \omega_k, \beta_{j+1} = -\frac{1}{H_j} \sum_{k=1}^N x_k \cdot p_j^2(x_k) \cdot \omega_k, j = \overline{0, n-1} \quad (2.26)$$

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 $u = x - \bar{x}$.

Ecuațiile (2.24)-(2.26) obțin forma:

$$p_0(u) = 1, p_1(u) = u \quad (2.24^*)$$

$$p_{j+1}(x) = u \cdot p_j(u) - \frac{H_j}{H_{j-1}} p_{j-1}(u), j = \overline{1, n}, \quad (2.25^*)$$

unde:

$$H_j = \sum_{k=1}^N p_j^2(u_k), j = \overline{0, n-1}. \quad (2.26^*)$$

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. 2.7, 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:

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

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

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):

$$x_0 = -\frac{b}{c} \quad (2.27)$$

și două puncte de curbură:

$$x_{1,2} = -\frac{b \pm \sqrt{b}}{c} \quad (2.28)$$

Consecutivitatea determinării coeficienților:

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

$$\ln y = \ln a + b \ln x + c \cdot x. \quad (2.29)$$

Exprimându-l pe $c = -\frac{b}{x_0}$ din formulă (2.28) și substituind în (2.29), obținem:

$$\ln y = \ln a + b \ln x - \frac{b}{x_0} x, \quad (2.30)$$

$$\ln y = \ln a + b \left(\ln x - \frac{x}{x_0} \right), \quad (2.31)$$

$$Y = A \cdot X + B, \quad (2.32)$$

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].

2.9. Concluzii la capitolul 2

Din cele prezentate în conținutul acestui capitol, privind dotarea tehnică și metodele de cercetare aplicate putem concluda că:

- instalațiile experimentale aplicate cuprind spectrul celor existente în prezent, cât și unele concepute și realizate în acest scop, și asigură tehnologia prelucrării;
- măsurarea energiei DEI direct în interstițiu prin metoda osciloscopării 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.

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

3.1. Rezultatele preliminare 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 [7, 52] 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 [7] 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 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 [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 aplicăți 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 acestea. 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 aceștia au fost stabilite relații de tipul [51, 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 [7, 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:

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

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

Reieșint 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:

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

în care, $Q \geq Q_{\text{top}}$.

Cercetarea uzurii electrodului-sculă, în funcție de durata de procesare a electrozilor de oțel-45 (fig. 3.1), cu diametre diferite au demonstrat 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 s-au îmbunătățit prin conductivitate. Dacă vom analiza eroziunea electrozilor din bronz, 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 a căldurii:

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

în care: c - capacitatea termică specifică;

ρ - densitatea;

λ - conductivitatea termică a materialului.

Vom analiza cum decurg procesele la alierea suprafețelor cu rupere de contact

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 depunere [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.

Să analizăm cum influențează intensitatea curentului mediu asupra eroziunii electrozilor. 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 este egal cu 8,18669, coeficientul A_1 aferent timpului de impuls este egal cu 0,312739 și coeficientul A_2 aferent timpului de pauză este egal cu -0,0169214.

În figura 3.1 este reprezentată dependența productivității prelucrării față de curentul de descărcare, iar în figura 3.2 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.

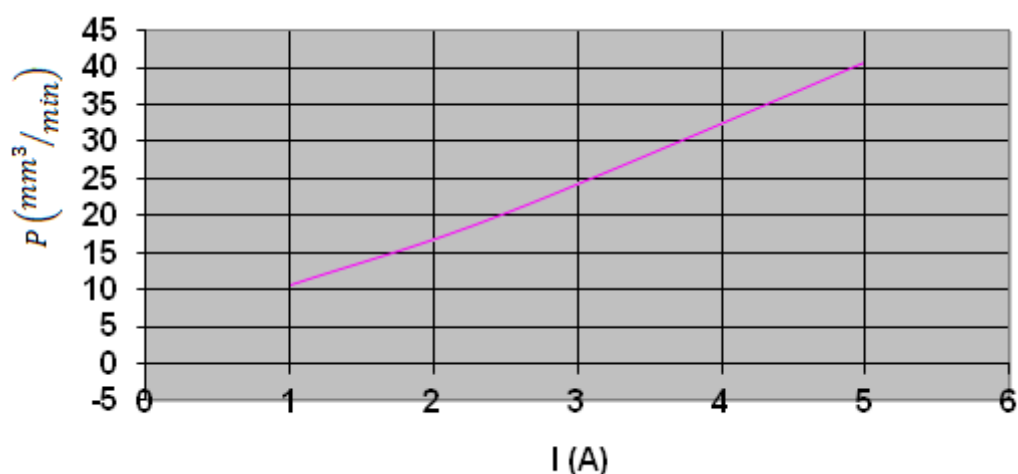


Fig. 3.1. Dependența productivității de depunere a wolframului cu electrod de tip bară cu diametrul 5 mm, pe suprafața probei executate din Oțel-45 pentru:

$$U_c=240V; f=40Hz; t=1min/cm^2$$

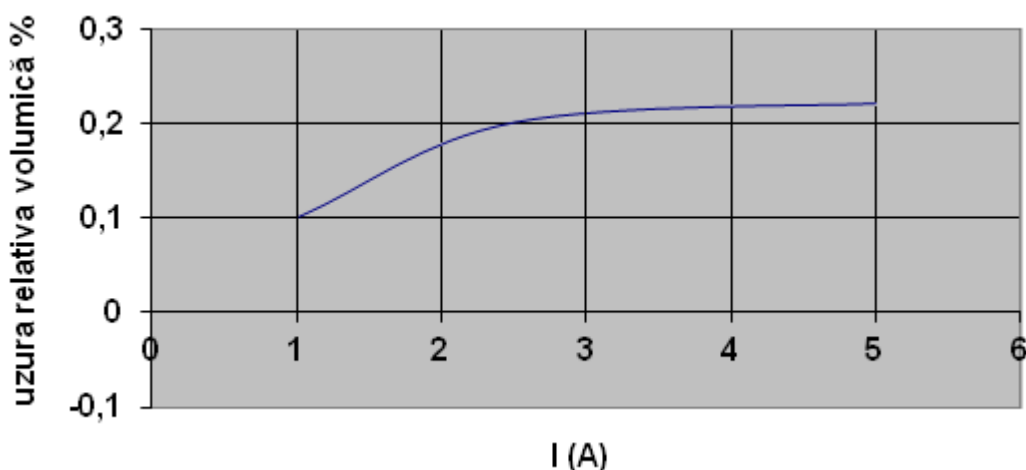


Fig. 3.2. Dependența uzurii volumice a electrodului de tip bară cu diametrul 5 mm, pe suprafața probei executate din Oțel-45 de intensitatea curentului de descărcare pentru:

$$U_c=240V; f=40Hz; t=1min/cm^2$$

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. 3.3. 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.

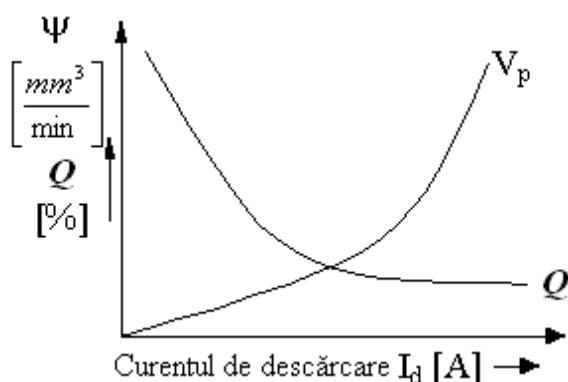


Fig. 3.3. Influența curentului de descărcare (I_d) asupra productivității Ψ procesului de eroziune și asupra uzurii relative Q a sculei [50, 51, 52]

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.

În continuare vom analiza 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 3.4, 3.5, 3.6 și 3.7.

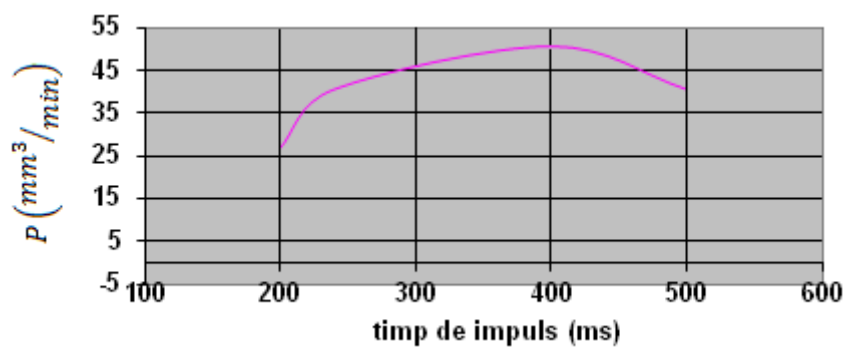


Fig. 3.4. Dependența productivității de prelucrare în raport cu durata impulsului de tip cu
electrod de tip bară cu diametrul 5 mm, pe suprafața probei executate din Oțel-45:

$$U_c=240V; f=40Hz$$

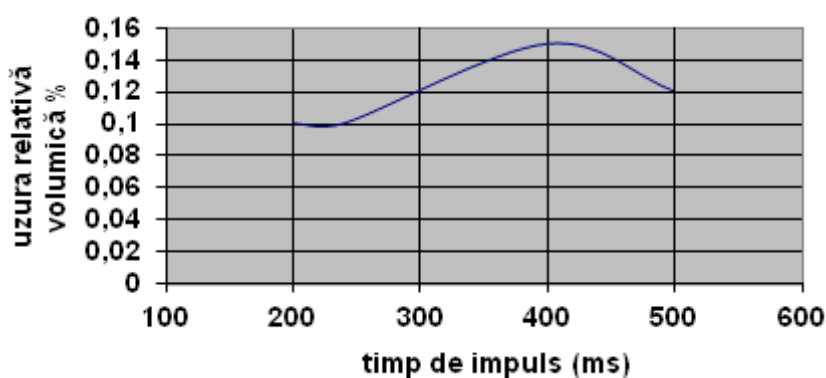


Fig. 3.5. Dependența eroziunii de durata impulsului, cu timpul de pauză constant cu electroul
de tip bară cu diametrul 5 mm, pe suprafața probei executate din Oțel-45:

$$U_c=240V; f=40Hz$$

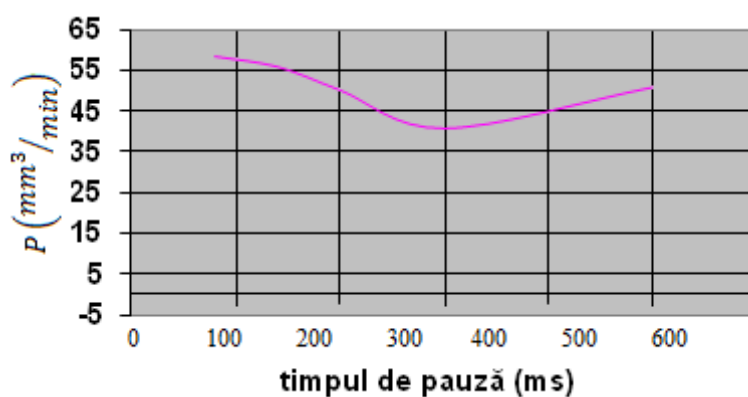


Fig. 3.6. Dependența productivității prelucrării în raport cu timpul de pauză a electrodului de
tip bară cu diametrul 5 mm, pe suprafața probei executate din Oțel-45:

$$U_c=240V; f=40Hz$$

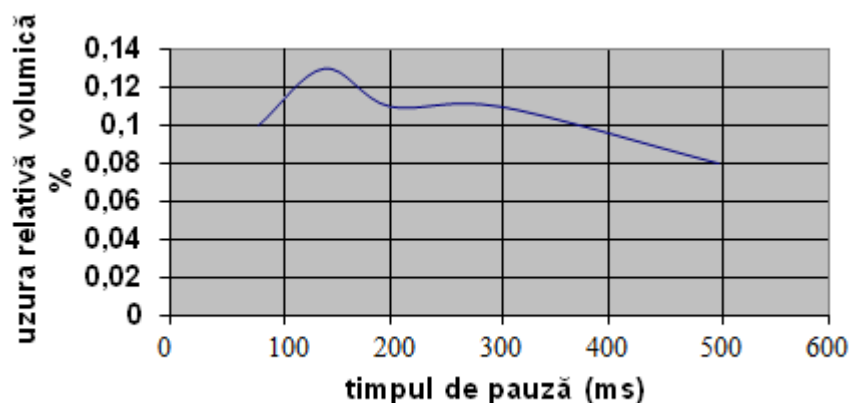


Fig. 3.7. Dependența eroziunii electrodului de tip bară cu diametrul 5 mm, pe suprafața probei executate din Oțel-45 de timpul de pauză (cu timpul de impuls constant):

$$U_c=240V; f=40Hz$$

Un caz separat îl prezintă prelucrarea suprafețelor cu amorsarea DEI cu impuls de tensiune înaltă la un interstițiu constant dintre electrozi. Astfel, 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 ($S < 0,2 \div 0,3mm$) 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 ($10^{-6} - 10^{-4}g$).

În figurile 3.8 și 3.9 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. 3.8) 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.

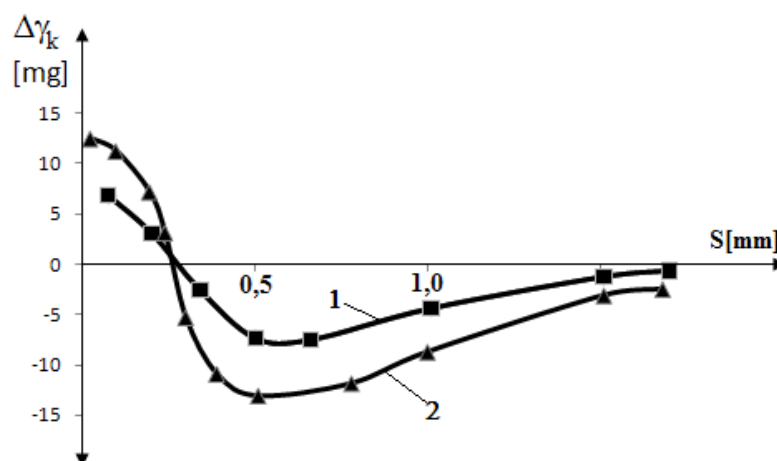


Fig. 3.8. Variația masei catodului din oțel (1) și titan (2) în funcție de mărimea interstițiului;
 $U_c=240V$; $f=40Hz$; timpul specific de prelucrare $1min/cm^2$.

Cu creșterea valorilor interstițiului se micșorează, de asemenea și eroziunea anozilor din cupru și oțel (fig. 3.9). Eroziunea anodului din grafit are un caracter diferit de cel al anozilor din oțel și cupru (fig. 3.9) și asemănător cu cel al catodului metalic (fig. 3.8).

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 lucrarea [60] a fost menționat că odată cu creșterea mărimii interstițiului are loc: redistribuirea energiei între suprafețele electrozilor și canalui de plasmă din el în favoarea ultimului; se evidențiază structura policanalică a plasmei în intersițiu, 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 lucrarea [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.

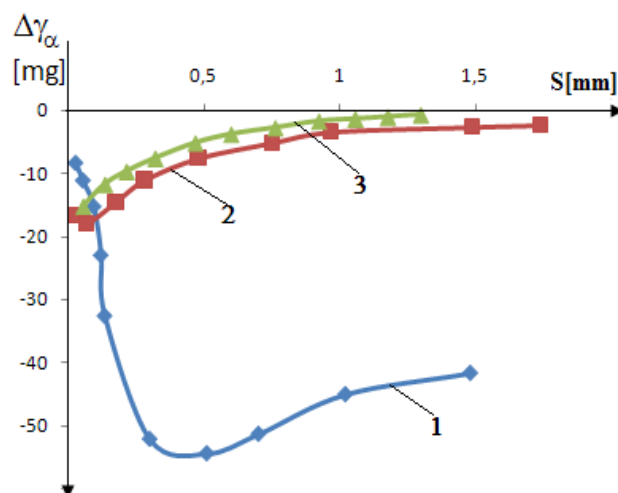


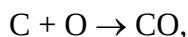
Fig. 3.9. Variația masei erodate anodului din grafit (1), oțel 45 (2) și cupru tehnic pur M0 (3) în funcție de mărimea interstițiului; $U_c=240V$; $f=40Hz$; $t=1min/cm^2$.

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 (pima 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 baterie 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. 3.9) atunci se observă evident că, acesta este total diferit în raport cu eroziunea masică 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 [138]:



Oxidarea intensă poate servi și în calitate de sursă suplimentară de energie, care ar fi și o condiție suplimentară de eroziune pronunțată a electrodului-sculă.

3.2. Influența mărimii energiei acumulate pe bateria 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. Reeșind 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 3.10, 3.11 și 3.12 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 bateria 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 constituenții 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 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.

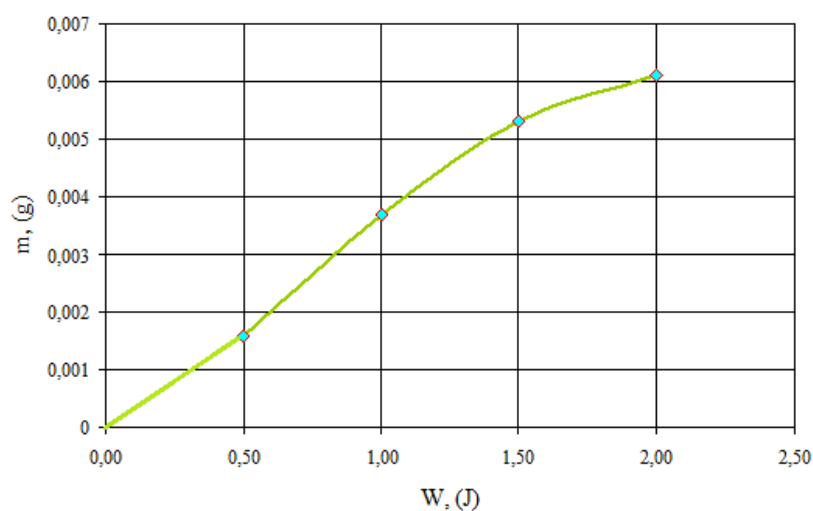


Fig. 3.10. Variația masei probei cu depunere în funcție de energia acumulată pe bateria de condensatoare pentru electrodul-sculă confecționat din Cu: $f=5\text{Hz}$, $C=600\mu\text{F}$, $S=5\text{mm}$ (partea activă a electrodului-sculă are forma unei semisfere)

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.

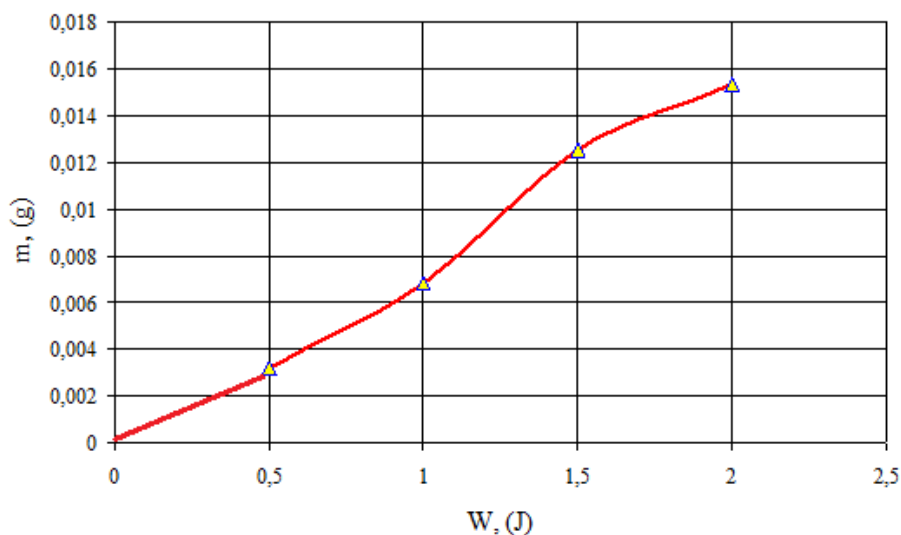


Fig.3.11. Variația masei probei cu depunere în funcție de energia acumulată pe bateria de condensatoare pentru electrodul-sculă confecționat din grafit: $f=5\text{Hz}$, $C=600\mu\text{F}$, $S=5\text{mm}$ (partea activă a electrodului-sculă are forma unei semisfere)

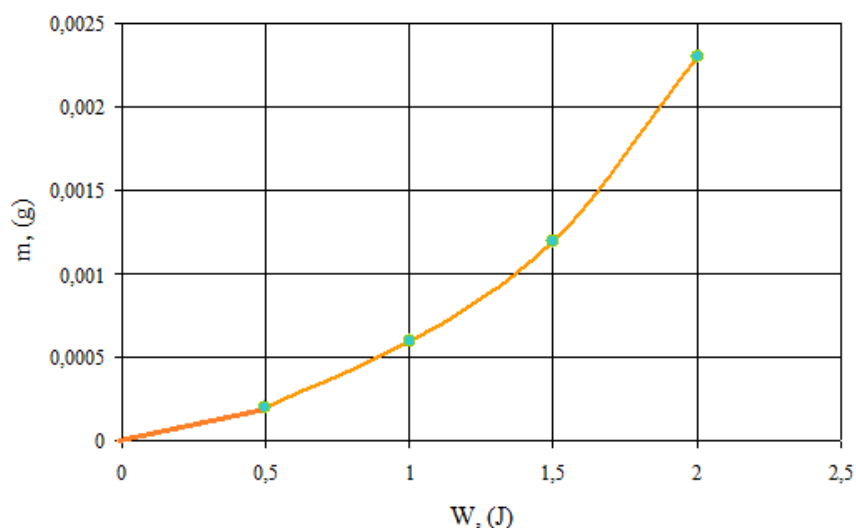


Fig. 3.12. Variația masei probei cu depunere în funcție de energia acumulată pe bateria de condensatoare pentru electrodului-sculă confecționat din grafit: $f=5\text{Hz}$, $C=600\mu\text{F}$, $S=5\text{mm}$ (partea activă a electrodului-sculă are forma unei semisfere)

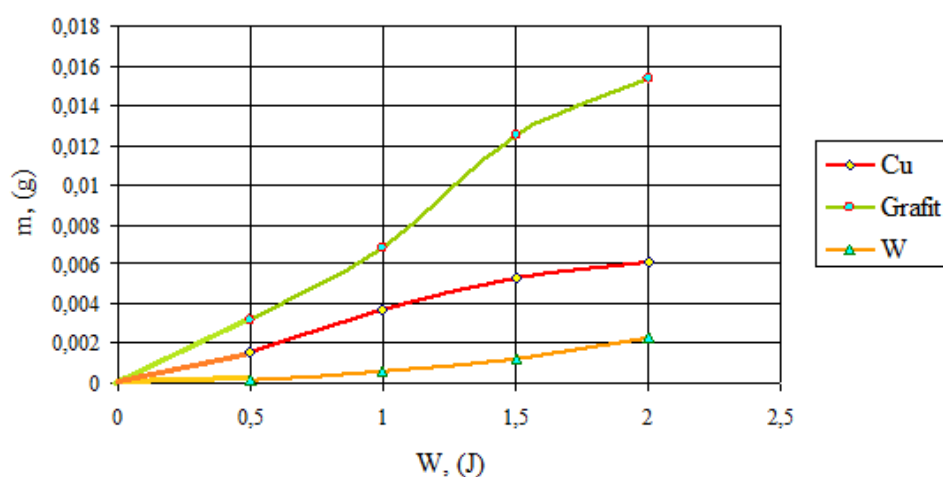


Fig. 3.13. Variația masei probei cu depunere în funcție de energia acumulată pe bateria de condensatoare pentru electrodului-sculă confecționat din cupru, wolfram și grafit: $f=5\text{Hz}$, $C=600\mu\text{F}$, $S=5\text{mm}$ (partea activă a electrozilor-sculă are forma unei semisfere)

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 bateria de condensatoare dependențele sus precăutate le vom prezenta pe un singur grafic fig. 3.13.

După cum a fost menționat mai sus, cercetările au fost supuse nu numai electrozilor-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.

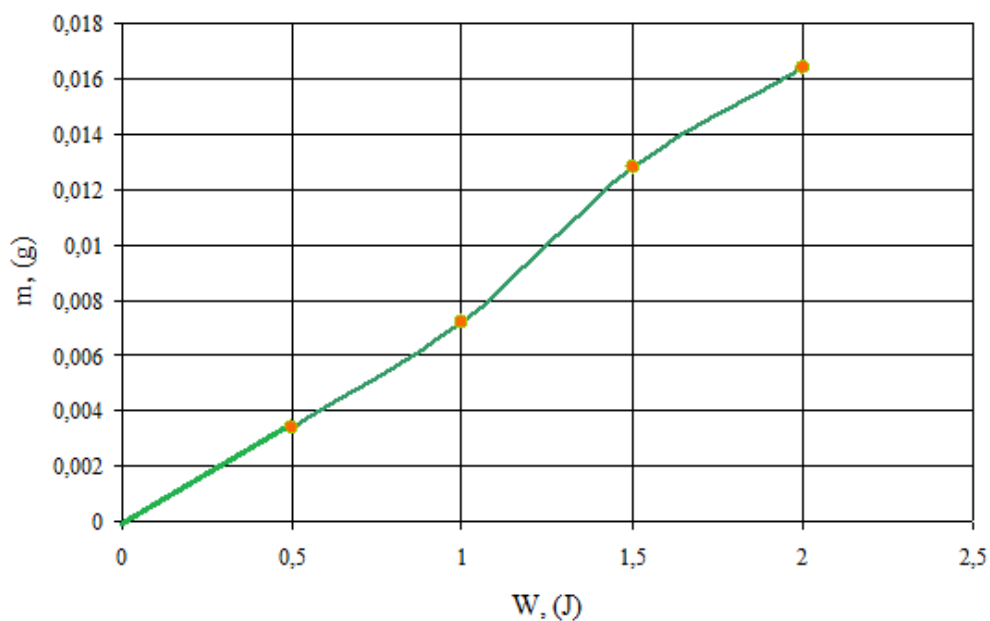


Fig.3.14. Variația masei probei cu depunere în funcție de energia acumulată pe bateria de condensatoare pentru electrodul-sculă confecționat din grafit: $f=5\text{Hz}$, $C=600\mu\text{F}$, $S=5\text{mm}$ (partea activă a electrodului-sculă are forma unui con)

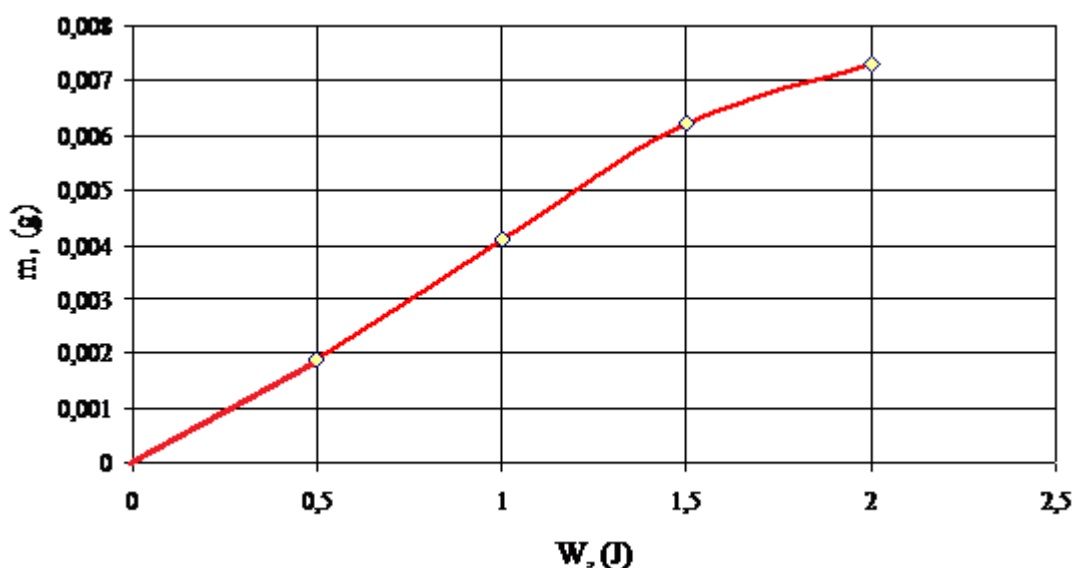


Fig.3.15. Variația masei probei cu depunere în funcție de energia acumulată pe bateria de condensatoare pentru electrodul-sculă confecționat din Cu: $f=5\text{Hz}$, $C=600\mu\text{F}$, $S=5\text{mm}$ (partea activă a electrodului-sculă are forma unui con)

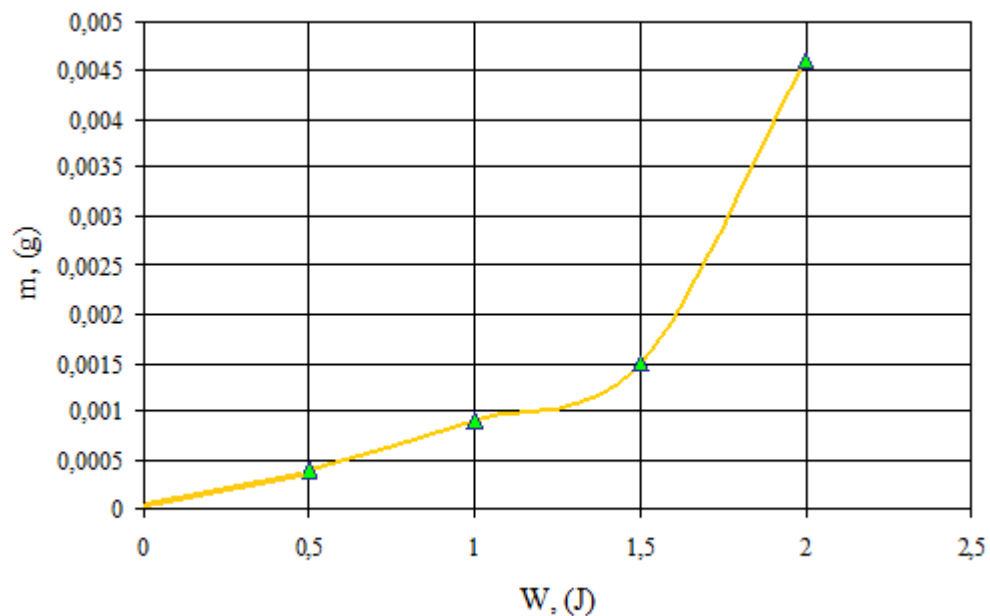


Fig.3.16. Variația masei probei cu depunere în funcție de energia acumulată pe bateria de condensatoare pentru electrodului-sculă confecționat din wolfram: $f=5\text{Hz}$, $C=600\mu\text{F}$, $S=5\text{mm}$ (partea activă a electrodului-sculă are forma unui con)

În figura 3.17 se prezintă variația uzurii electrozilor-sculă pentru toate trei materiale în raport cu variația energiei acumulate pe bateria de condensatoare.

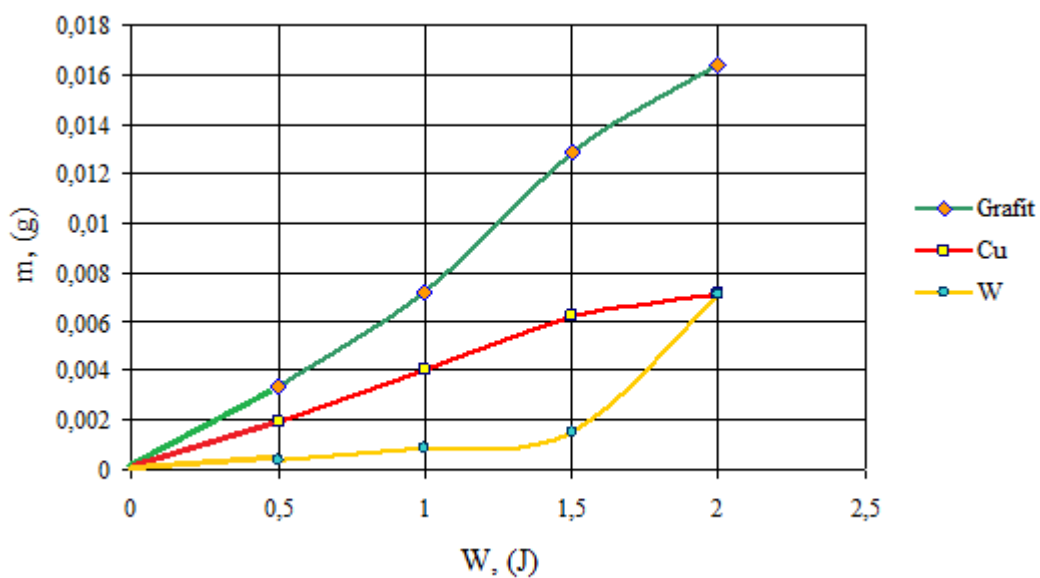


Fig.3.17. Variația masei probei cu depunere în funcție de energia acumulată pe bateria de condensatoare pentru electrodului-sculă confecționat din grafit, Cu, W: $f=5\text{Hz}$, $C=600\mu\text{F}$, $S=5\text{mm}$ (partea activă a electrodului-sculă are forma unui con)

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 aceștea, dar și de geometria suprafețelor active ale acestora.

Eroziunea E-S în funcție de forma geometrică a capătului activ al acestuia

Mai jos în figurile 3.18 se prezintă dependențele eroziunii 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 bateria 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.

La construcția dependenței de eroziune masice a electrodului în funcție de diametrul (fig. 3.18) ar fi mai bine să vorbim despre dependența de eroziune electrică, de masa electrodului deoarece, în ambele cazuri, electrozii (anod și catod) au fost executați din același material (oțel-45 sau bronz) de formă cilindrică, variind diametrul și păstrând lungimile constante.

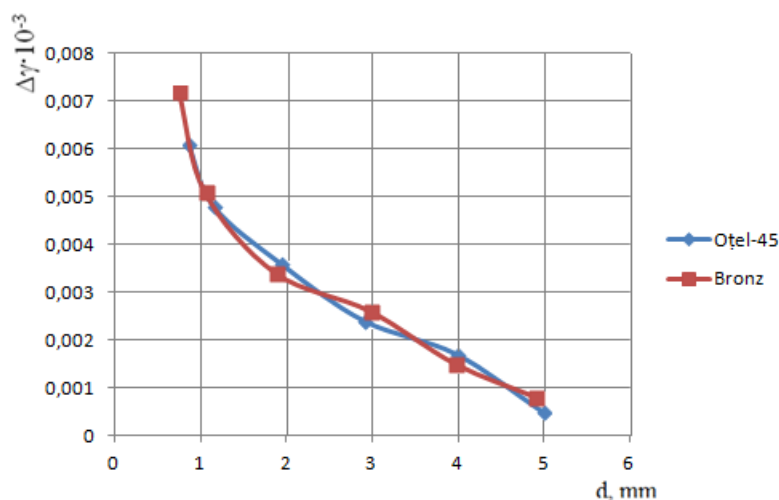


Fig. 3.18. Curbele comparative a eroziunii electrice a electrozilor din oțel 45 și bronz, în funcție de diametrul pentru: frecvența de lucru $f=5\text{Hz}$, $C=600\mu\text{F}$, $S=5\text{mm}$ [108]

a) oțel-45 cu diametrele de 1,93, 2,97, 3,98 și 4,9mm

b) din bronz Br-10-1-0 cu diametrul de 1,87, 2,97, 3,96 și 4,96

Eroziunea E-S în funcție de dimensiunea lui. Din analiza acestor dependențe rezultă, că formarea depunerilor din 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 de utilizat electrozi cu diametre mai mari (de sârmă 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 45 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.

Astfel pentru formarea rapidă a depunerilor se vor aplica electrozi cu diametre mai mari. În continuare vom analiza dependența eroziunii E-S în funcție de materialul de execuție a acestora. 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. 3.19. După cum se observă din fig. 3.19 dependența poartă un caracter exponențial, fiind cea mai pronunțată la wolfram, iar cel mai rezistent la eroziune electrică – oțel inox.

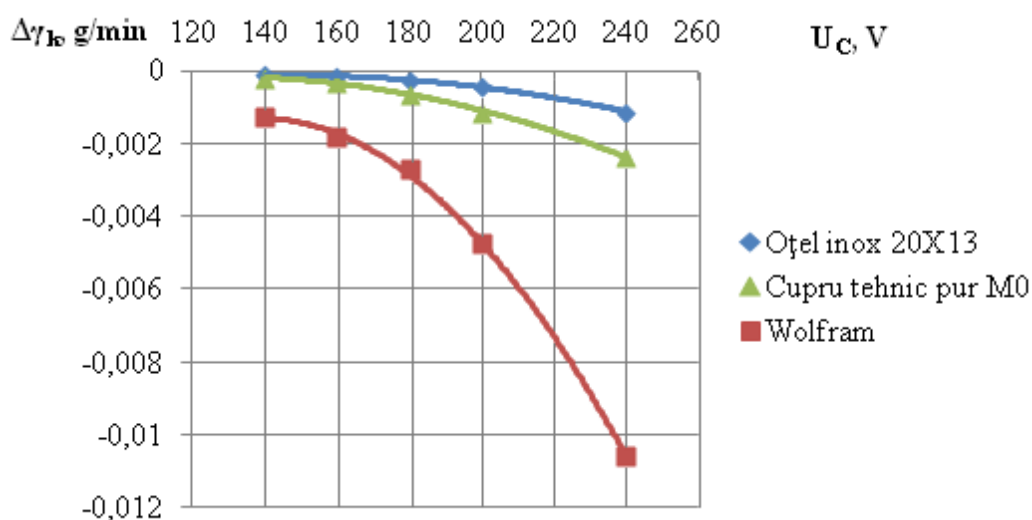


Fig. 3.19. Eroziunea în timp a E-S ca funcție de tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare a generatorului de impulsuri de curent pentru: oțel inox 20X13, cupru tehnic pur M1-0 și wolfram ($f=5\text{Hz}$, $C=600\mu\text{F}$, $S=5\text{mm}$) [108]

Eroziunea mai esențială a catodului din wolfram se datorește oxidării mai intensive a suprafeței lui active, ceea ce duce la prelevarea a unei mase mai mari de material. Pentru evitarea acestui neajuns se propune a utiliza electrozii din wolfram în medii de prelucrări inerte.

Necătând 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.

Pentru a înțelege mai bine starea de lucru vom cerceta dependența eroziunii în funcție de regimul energetic.

Influența regimului energetic de prelucrare asupra eroziunii electrozilor-scule sunt prezentate în fig. 3.20-3.22.

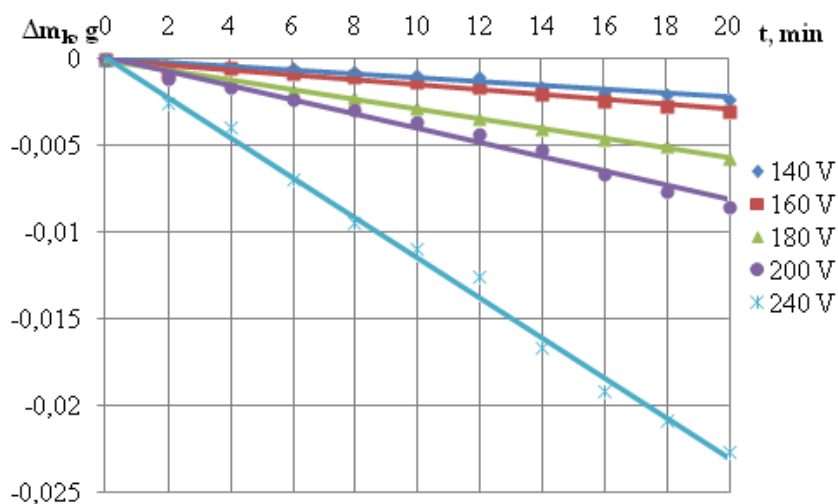


Fig. 3.20. Eroziunea electrodului-sculă-catod din oțel inox 20X13 în funcție de durata de prelucrare pentru diferite tensiuni de încărcare a bateriei de condensatoare a generatorului de impulsuri la: $f=5\text{Hz}$, $C=600\mu\text{F}$, $S=5\text{mm}$ [108]

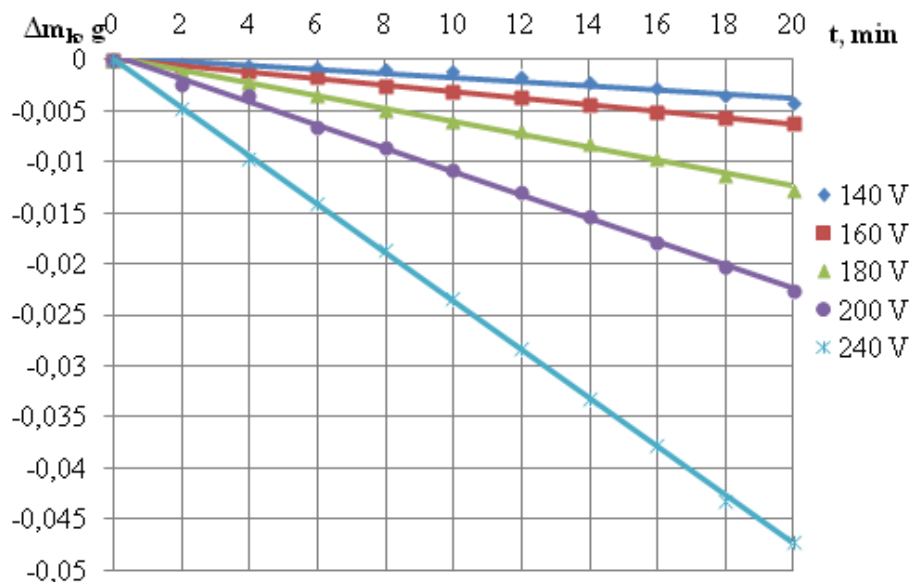


Fig. 3.21. Eroziunea electrodului-sculă-catod din wolfram funcție de regimul energetic de prelucrare (tensiune de încărcare a bateriei de condensatoare a generatorului de impulsuri): $f=5\text{Hz}$, $C=600\mu\text{F}$, $S=5\text{mm}$ [108]

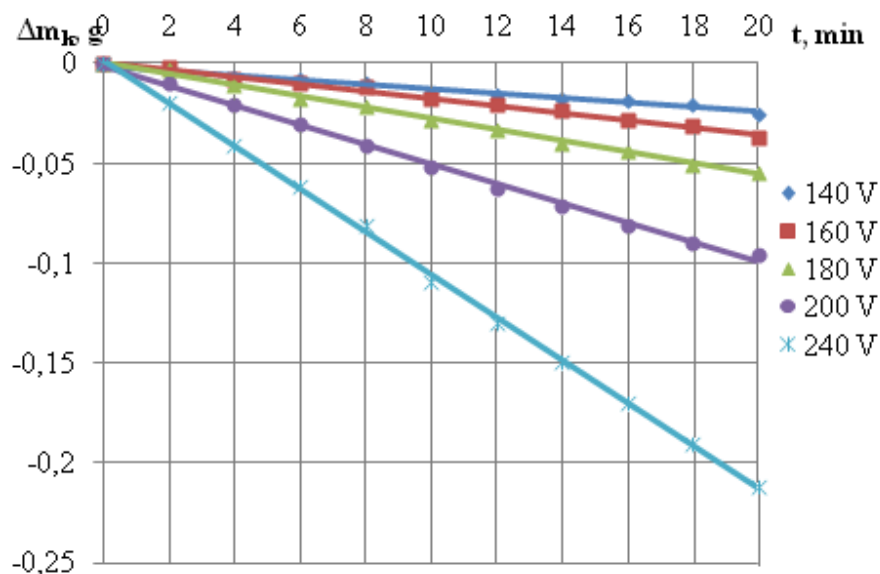


Fig. 3.22. Eroziunea masei electrodului-sculă-catod din cupru tehnic pur M0 funcție de regimul energetic de prelucrare (tensiune de încărcare a bateriei de condensatoare a generatorului de impulsuri): $f=5\text{Hz}$, $C=600\mu\text{F}$, $S=5\text{mm}$ [108]

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 energia care se degajă în interstițiu și pe suprafața electrozilor, ceea ce duce la intensificarea procesului de eroziune electrică.

3.3. Concluzii la capitolul 3

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 între piesă și sculă, iar în cazul formării depunerilor din materiale compacte și în calitate de sursă de material de prelevare și depunere [123];
- uzura electrozilor-scule se datorează următorilor factori și condiții: proprietăților fizico-mecanice și termice ale materialului de execuție; particularităților micro sau macrogeometrice ale suprafețelor sculei și piesei; parametrilor electrici și neelectrici al regimului de prelucrare; proprietăților mediului de lucru și procedului de prelucrare [111];
- 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) [123];

– în cazul, când 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 [111];

– 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) [112];

4. CRITERII DE PROIECTARE A ELECTROZILOR-SCULE APLICAȚII LA FORMAREA STRATURILOR DE SUPRAFAȚĂ CU DESCĂRCĂRI ELECTRICE 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.

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, proeminențe 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 pe 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-anozi 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 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 [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.

Necătând la atuurile acestei metode enumerate mai sus implimentarea 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 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. Alegerea formei 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:

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

în care: c - capacitatea termică;

ρ - densitatea;

λ - conductibilitatea termică corespunzător;

T_{nn}^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 M3 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 electrodului (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 electrodului 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 electrodului, 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 electrodului.

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.

În scopul conformării celor expuse mai sus s-au executat încercări 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 carbura 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

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 (4.5) 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.

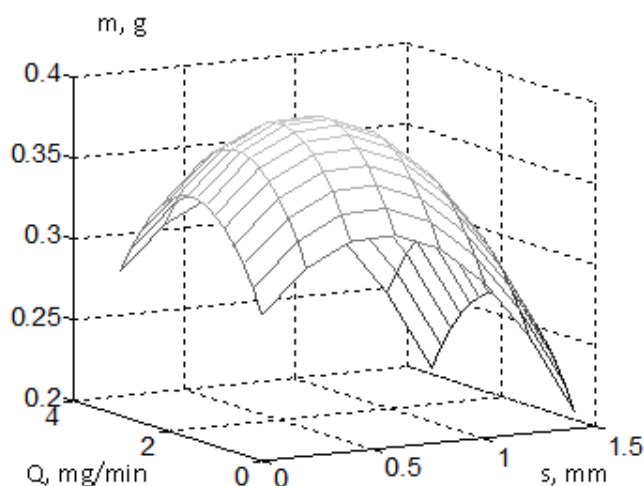


Fig. 4.1. Influența exercitată de dimensiunea interstițiului S și de debitul pulberii P asupra masei stratului depus ($W = 4,3 \text{ J}$, $\delta = 9,25 \text{ J/mm}$) [40]

Studiul fenomenelor fizice care apar în interstițiul de lucru a subliniat rolul important exercitat de energia impulsului 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 4.1.

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.

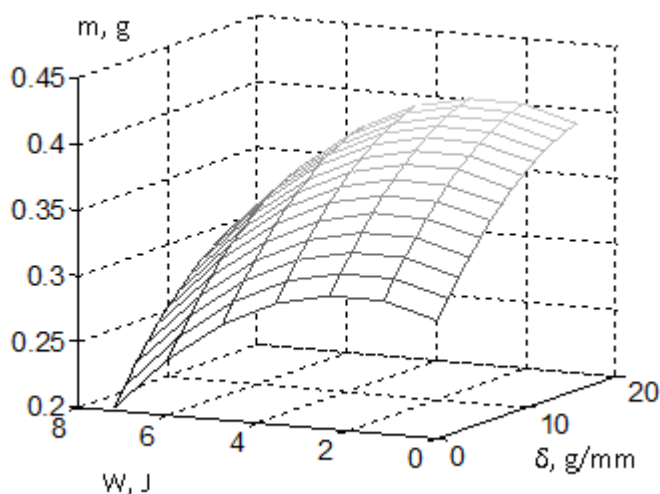


Fig. 4.2. Influența exercitată de energia de descărcare pulsată $W(J)$ și de densitatea energetică δ asupra masei stratului depus ($S = 0,9 \text{ mm}$, $Q = 1,7 \text{ J/mm}$) [40]

S-a evaluat debitul pulberii printr-o calibrare prealabilă a dispozitivului de dozare și alimentare a interstițiului. Energia W degajată în interstițiu a fost măsurată prin osciloscopare pentru a calcula energia specifică W_s . 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 particulelor de pulberi constituia $120...130 \text{ }\mu\text{m}$, viteza de rotație periferică a piesei de testare $0,1...2,3 \text{ m/min}$ și timpul 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:

$$m = 0,041805 + 0,9924184S - 0,5516513S^2 + 0,2548314\delta - 0,046921\delta^2 + 0,2639871W_d - 0,02933949W_d^2 + 0,0345012W_s - 0,0002513869W_s^2 \quad (4.6)$$

2. pentru oțel

$$m = 0,03776562 + 0,9796631S - 0,5211094S^2 + 0,022934\delta - 0,04590233\delta^2 + 0,003846714W_d + 0,004700639W_d^2 + 0,029666W_s - 0,0001197065W_s^2 \quad (4.7)$$

3. pentru nichel

$$m = 0,01154771 + 0,6676656S - 0,3476997S^2 + 0,227277\delta - 0,059651\delta^2 + 0,09708263W_d - 0,005840178W_d^2 + 0,03104264W_s - 0,003670184W_s^2 \quad (4.8)$$

4. pentru carbura de bor

$$m = 0,212089 + 0,1626123S - 0,1154172S^2 + 0,07908089\delta - 0,02642789\delta^2 + 0,01340891W_d + 0,00354948W_d^2 + 0,01221529W_s - 0,003190312W_s^2 \quad (4.9)$$

Din acestea putem stabili că cel mai puternic influențează procesul, factorii în ordine descrescătoare S , P , W_d W_s .

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, $\delta, mg/min$	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 (4.6) - (4.9) sunt prezentate în fig. 4.3-4.6; diagramele evidențiază influența exercitată de factorii considerați de intrare asupra cantității m a materialului depus.

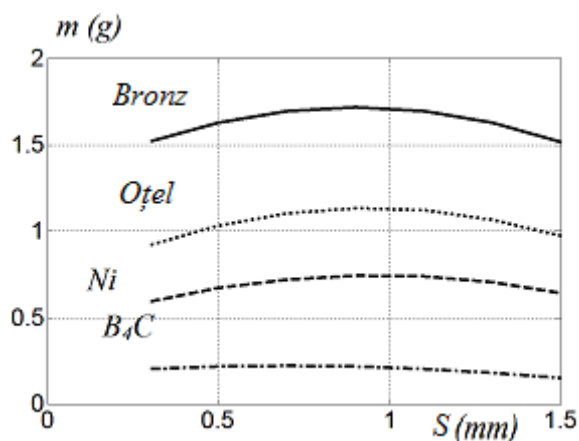


Fig. 4.3. Influența mărimii interstițiului S asupra masei materialului depus m ($\delta = 3,1 \text{ mg/min}$, $W_d = 4,3 \text{ J}$, $W_s = 9,25 \text{ J/mm}$) [41]

Analiza modelelor matematice empirice și a reprezentărilor grafice din fig. 4.3-4.6 indică asupra faptului, că ordinea descrescătoare a capacităților diferitelor materiale evaluate din punct de vedere al cantității depuse de descărcările electrice în condițiile menționate mai sus este următoarea: 1) bronz, 2) oțel, 3) nichel și 4) carbură de bor.

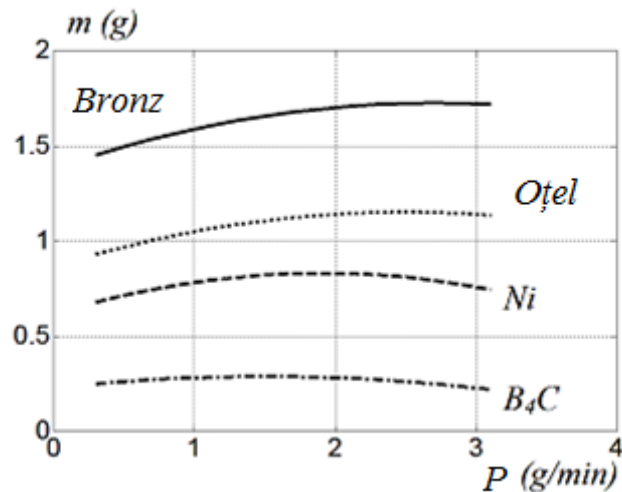


Fig. 4.4. Influența debitului de pulberi din dozator (δ) asupra masei de material depus pe suprafața de prelucrare $m(g)$ pentru: ($S=0,9mm$, $W_d=4,3J$, $W_s=9,25J/mm$, $f=50Hz$) [41]

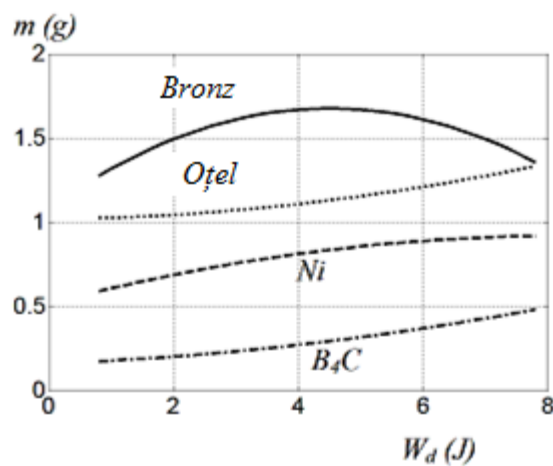


Fig. 4.5. Influența energiei furnizate de generator W_d asupra masei de material depus pe suprafața prelucrată m ($S=0,9mm$, $\delta =1,7mg/min$ și $f=50Hz$) [41]

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 acelorasi 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.

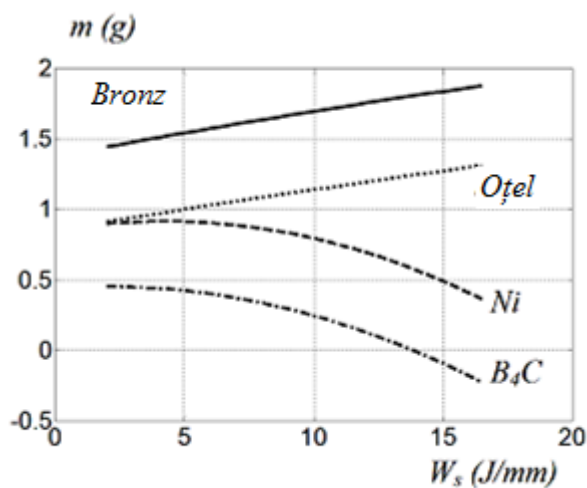


Fig. 4.6. Influența exercitată de energia specifică degajată pe 1mm al interstițiului (W_s) asupra masei materialului depus (m) pe suprafața prelucrată ($S=0,9mm$, $Q=1,7J$, $W_d=4,3J/mm$) [41]

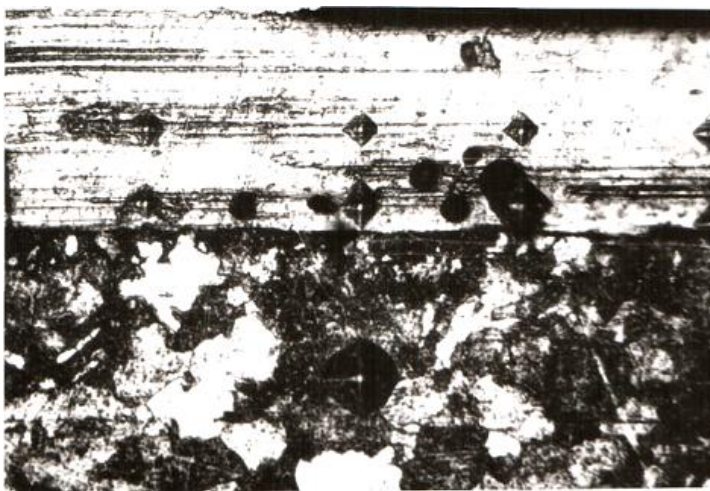


Fig. 4.7. Stratul alb pe oțel 45 după interacțiunea cu plasma descărcării ($S=20\text{ mm}$, $W=5,27\text{ J}$, $f=10\text{ Hz}$) [8]

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.

Vederea secțiunii transversale în cazul stratului de bronz pe o piesă de testare din oțel este prezentată în figura 4.7. După cum era de așteptat, microduritatea stratului depus este diferită în raport cu microduritatea materialului de bază.

În rezultatul modelării matematice a rezultatelor experimentale prezentate în tabelele 4.3-4.4 și Anexele 1, 2, putem constata că cel mai mult se erodează electrozii din grafit, fapt care poate fi aplicat la formarea peliculelor de grafit pe suprafețele metalice când se cere transferul de masă maximal.

În cazul formării peliculelor de oxizi și a prelucrării dimensionale prin electroeroziune, cerința este că durabilitatea, adică viteza de eroziune să fie nominală, de aceea pentru aceste procedee se propune în calitate de material al electrozilor-scule următoarele materiale (în ordinea descrescătoare): Cuprul și aliajele lui, Aluminiul și aliajele lui, Wolframului și aliajele lui și oțelurile inoxidabile

Tabelul 4.3. Dependența eroziunii electrice a electrozilor-scule de energia degajată în interstițiu (electrod-sculă-catod)

Material	Energia descărcării degajată în interstițiu, W_s , J						
	1,42	2,25	2,63	2,98	3,28	3,53	3,74
Oțel inox	10	40	54	85	142	179	216
Cu M3	1	2	2	1	3	2	3
Aluminiu	4	6	6	8	8	10	12
Wolfram +10%Reniu	14	43	64	95	127	205	357
Grafit	19	21	25	44	187	251	400

Cu (vezi anexa fig. A1.1)

$$y = 0,6711 \cdot e^{0,3726 \cdot x}$$

$$y = 0,7314 \cdot x^{0,9659}$$

Al (vezi anexa fig. A1.2)

$$y = 1,839 \cdot e^{0,4842 \cdot x}$$

$$y = 1,999 \cdot x^{1,279}$$

Oțel inox (vezi anexa fig. A1.3)

$$y = 2,743 \cdot e^{1,176 \cdot x}$$

$$y = 1,74 \cdot x^{3,661}$$

Wolfram+10%Re (vezi anexa fig. A1.4)

$$y = 0,568 \cdot e^{1,703 \cdot x}$$

$$y = 0,3441 \cdot x^{5,179}$$

Grafit (vezi anexa fig. A1.5)

$$y = 0,1829 \cdot e^{2,055 \cdot x}$$

$$y = 0,1383 \cdot x^{6,001}$$

Tabelul 4.4. Dependența eroziunii electrice a electrozilor-scule de energia degajată în interstițiu (electrod-sculă-anod)

Material	Energia descărcării degajată în interstițiu, W _s , J						
	1,42	2,25	2,63	2,98	3,28	3,53	3,74
Oțel inox	8	17	27	28	38	48	58
Cu M3	1	1	2	3	5	9	11
Aluminiu	14	18	18	24	25	26	27
Wolfram +10%Reniu	6	17	45	61	73	80	85
Grafit	9	15	177	391	466	719	1403

Cu (vezi anexa fig. A2.1)	$y = 0,0328 \cdot e^{1,561 \cdot x}$	$y = 0,02 \cdot x^{4,776}$
Al (vezi anexa fig. A2.2)	$y = 9,169 \cdot e^{0,2962 \cdot x}$	$y = 9,886 \cdot x^{0,7618}$
Oțel inox (vezi anexa fig. A2.3)	$y = 2,726 \cdot e^{0,8132 \cdot x}$	$y = 2,39 \cdot x^{2,382}$
Wolfram+10%Re (vezi anexa fig. A2.4)	$y = 5,037 \cdot e^{0,7807 \cdot x}$	$y = 4,334 \cdot x^{2,311}$
Grafit (vezi anexa fig. A2.5)	$y = 0,6397 \cdot e^{2,04 \cdot x}$	$y = 0,4077 \cdot x^{6093}$

Coeficientul a (Anexa 1, 2) arată condițiile concrete de prelucrare (cel mai mult influențează materialul, proprietățile electrice ale electrozilor

Coeficientul b (Anexa 1, 2) ne arată influența energiei degajate în interstițiu asupra eroziunii.

4.2. 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.

În cazul formării depunerilor din pulberi se pot întâlni două situații deosebite:

- electrodul-sculă nu participă cu materialul său la formarea depunerii;
- electrodul-sculă este supus prelevării de materie și participă la formarea depunerii.

În cazul când electrodul-sculă are drept funcție introducerea în interstițiu a energiei de efect acesta nu se supune eroziunii motiv din care materialul de execuție se va alege din condiția ca acesta să posede cel mai mare coeficient de acumulare a căldurii:

$$B = \sqrt{c\rho\lambda}, \quad (4.10)$$

în care c – capacitatea termică specifică;

ρ - densitatea specifică a materialului;

λ - conductivitatea termică a metarialului.

În calitate de așa material poate fi recomandat Cu, aliaje CuW sau grafit.

Din considerente practice se recomandă electrodul sub formă de disc, grosimea acestuia se va alege din condiția:

$$l \geq \sqrt{\frac{4W}{s}}. \quad (4.11)$$

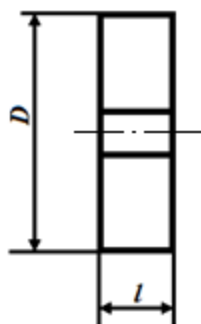


Fig. 4.8. Elecetrod disc

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 $\delta=0,05...2\text{ g/min}$.

Diametrul funcțional al discului se alege din condiția, că fiecare zonă de interacțiune a canalului de plasmă se suprapune parțial cu precedenta sau nu se suprapune.

Reeșind 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:

$$D = dfk / \pi, \quad (4.12)$$

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

f – frecvența descărcărilor electrice în impuls;

k – coeficientul de suprapunere a amprentelor pe suprafața electrodului.

Din ultima relație se observă că diametrul este funcție de frecvența impulsurilor. În instalațiile de prelucrare frecvența impulsurilor se situează în anumite limite ($f=50...300\text{ Hz}$) mărimea frecvenței se alege din pașaportul tehnic al instalației.

În vederea localizării a energiei de efect se recomandă ca suprafața de lucru să fie executată cu teșituri de 45° și limitată de o suprafață semirodă cu raza de până la 5.

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

$$D = 2 \cdot 120 \cdot 1/3,14 = 80mm. \quad (4.13)$$

Materialul din care va fi executat electrodul-sculă reeșind 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.

Reeșind din faptul că, în procesul de prelucrare este necesară răcirea permanentă a electrodului-sculă constructiv acesta va fi executat așa cum este prezentat în Anexa 3 fig. A3.1.

Din Anexa 3 fig. A3.1 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 Anexa 3 fig. A3.1 poziția 10.

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

Dimensionarea acestui arbore se execută în funcție de parametrii funcționali ai instalației de lucru. Din Anexa 3 fig. A3.1 poziția 5 se poate observa că acesta este executat în mai multe trepte din motivul fixării pe el a mai multor componente. 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.

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

Lucrarea [137] este dedicată cercetării proceselor combinate de prelucrare ce constau din două etape: alierea cu crom și titan cu 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 de 2A, tensiunea 50V în decurs de 5 minute.

Analiza microdureității straturilor prelucrate a permis a stabili, că acesta pentru oțel în rezultatul alierii cu titan este mai mare în cazul alierii cu crom prin aceeași metodă (fig.4.9).

Probabil, sporirea microdureității stratului aliat cu aplicarea descărcărilor electrice în mediu gazos de amestecul 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 atât, probabil, la formarea depunerilor de titan în mediul carburant iau naștere carburile de titan, ultimul având o capacitate deosebită de interacțiune cu carbonul și azotul din mediul de lucru.

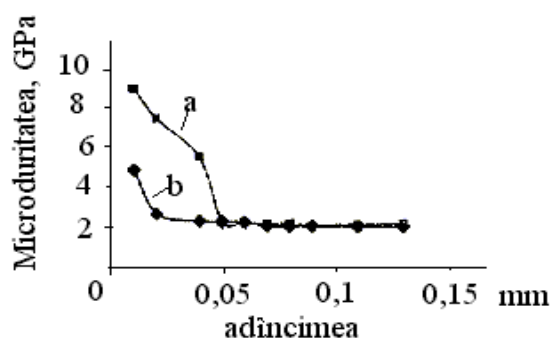


Fig.4.9. Microdurețea oțelului după descărcări electrice în impuls cu nitrurarea preventivă: a – anod titan; b – anod crom, $I=2A$, $U=50V$,

Deoarece titanul este unul din cele mai active elemente carburigene, interacțiunea lui cu azotul și carbonul este mai semnificativă decât cea a cromului. Sub acțiunea descărcărilor 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 conduc la mărirea microdureității stratului superficial aliat. Microdurețea mai mică a stratului superficial aliat cu crom poate fi lămurită de faptul că cromul este mai puțin activ la interacțiune cu atomii de carbon și azot.

După schimbarea consecutivității realizării prelucrării combinate (alierii cu descărcări electrice urmată de nitrurare), cu respectarea acelorași parametri ai procesului, analiza microdureității probelor supuse cercetării a demonstrat că alierii cu electrod din titan o sporește

în zona difuzională până la 10GPa, în comparație cu alierea cu crom o sporește numai până la 8GPa).

Microdurețea înaltă în stratul aliat după aplicarea procedurii combinat de prelucrare poate fi explicată prin faptul, că distribuția materialului de aliere în acest strat posedă o concentrație neomogenă și suficient de mare atât în adâncime, cât și 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. Acest fapt este atestat și de analizele cercetările rentghenografice [139].

Autorii lucrării [59] au realizat cercetări experimentale cu electrozi-sculă executați 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 $\tau= 6, 12, 25, 50, 100, 200, 400, 800 \text{ și } 1600 \mu\text{s}$. În continuare sunt prezentate vederile generale ale suprafețelor pieselor după prelucrarea cu descărcări electrice în impuls, în mediu de apă destilată și cherosin cu electrod-sculă din grafit și cupru fig. 4.10.

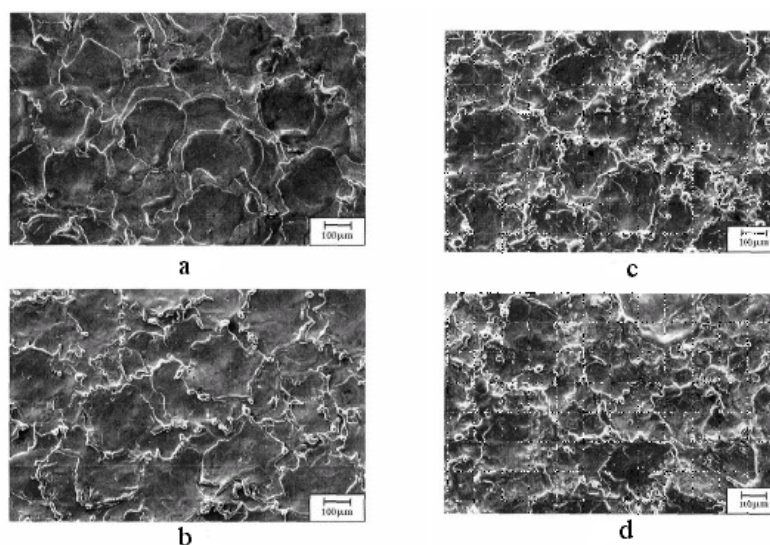


Fig. 4.10. Vederea generală a suprafeței pieselor după prelucrare $I=16\text{A}$, $\tau=25\mu\text{s}$. Dielectric: apă distilată, electrod: a) cupru, b) grafit. Dielectric: cherosin, electrod: c) cupru, d) grafit [59]

Cercetarea micro-șlifurilor acestor piese au demonstrat faptul că pe suprafața piesei apare stratul alb cu duritatea cea mai înaltă (fig. 4.11) urmată de zona influențelor termice și materialul de bază. Măsurarea microdureții piesei după Vickers s-a efectuat cu o greutate de 10g timp de 15s.

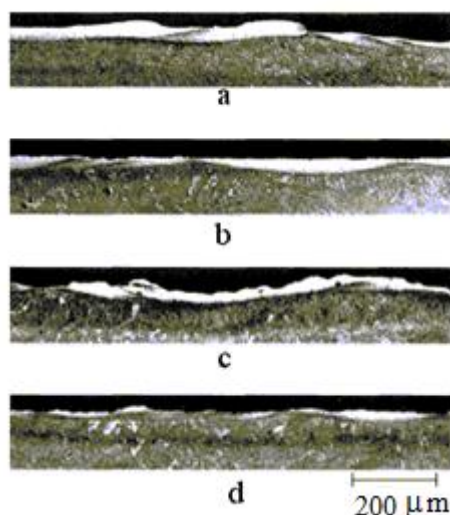


Fig. 4.11. Vederea generală a micro-șlifurilor piesei prelucrate în mediu de apă destilată [136]

- a) I=16A electrod: grafit;
- b) I=16A electrod: cupru;
- c) I=8A electrod: grafit;
- d) I=8A electrod: cupru

Rentghenografia acestor microșlifuri a atestat faptul, că la folosirea în calitate de mediu de prelucrare a cherosinului pe suprafața piesei apare cementita spre deosebire de cazul aplicării în calitate de mediu de prelucrare a apei distilate, fig.4.12.

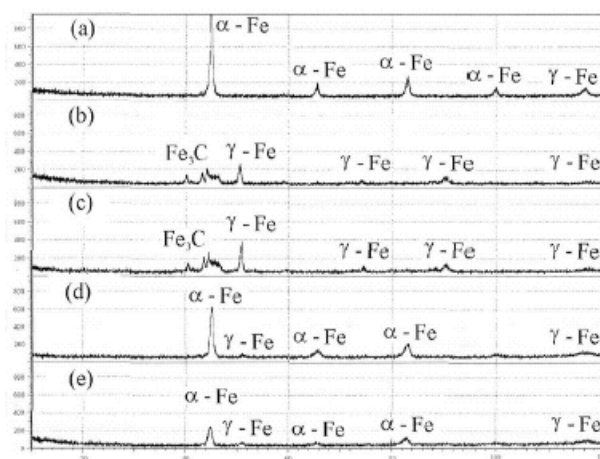


Fig.4.12. Rentghenograma oțelului în stare recoaptă pentru; I=16A, $\tau=400\mu s$ [59]

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

În lucrarea [59] încercările experimentale au fost efectuate în regim de subexcitare, pentru cazul întreținerii descărcării electrice 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 $C=100\mu F$, durata descărcării $80\mu s$, numărul de descărcări $n=90$, frecvența 3 Hz , iar tensiunea pe bateria de condensatoare varia 100V, 150V, 200V, 250V, 300V.

Analizând cele expuse în lucrarea [88] când electrodul-sculă este conectat în calitate de catod putem atesta, că în acest caz se formează depuneri de grafit pe suprafața piesei prelucrate cu descărcări electrice în impuls, care se prezintă sub formă de pelicule subțiri (fig.4.13). Formarea intensă a acestor depuneri după cum este menționat în lucrarea [88], poate fi explicată, prin faptul că materialul electrodului-sculă nu este un metal, iar procesele de eroziune și transfer de masă pentru descărcările electrice în impuls decurg deosebit în raport cu cazul alierii tradiționale.

Analiza micro-șlifurilor au demonstrat faptul, că în cazul, în care electrodul din grafit este catod, pe suprafața piesei se observă și zonele influenței termice. Acestea din urmă provocând schimbări de structură în suprafața piesei, la adâncimi de ordinul μm .

S-a confirmat în mod experimental, că electrodul-sculă din grafit erodează mai semnificativ, când este conectat în circuitul de descărcare în calitate de catod, decât în calitate de anod, fapt atestat și de autorii lucrărilor [25, 139].

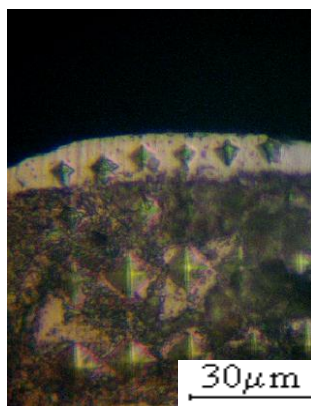


Fig.4.13. Microstructura piesei din oțel 45 după aplicarea descărcărilor electrice în impuls pentru: $C=8\mu F$; $f=8\text{ Hz}$; $V=1\text{ mm/s}$; $S=0,5\text{ mm}$; $W=0,26\text{ J}$, $n=3$ treceri, electrod-sculă catod executat din grafit pirolitic [139]

În lucrarea [88] au fost aplicate descărcări electrice în impuls cu electrod-sculă din grafit, aplicând impulsuri bipolare, în regimul de întreținere a petelor electrodice „reci”. S-a observat,

că în rezultatul acțiunii descărcărilor electrice în impuls asupra oțelului 45 recopt, cu electrod-sculă din grafit, pe suprafața piesei au loc depuneri de grafit atât la utilizarea electrodului-sculă în calitate de anod, cât și în calitate de catod. Studiul morfologiei suprafeței piesei, după interacțiunea cu plasma descărcărilor electrice în impuls, atestă faptul că în cazul utilizării electrodului executat din grafit, în calitate de catod, stratul depus este de grosime mai mare. S-a stabilit, că pentru același număr de treceri, cu cât mărimea energiei degajate în interstițiu e mai mare, cu atât și grosimea stratului depus din grafit este mai mare (fig. 4.14).

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 substratului intermediar. Cercetarea microdurității acestor straturi demonstrează faptul că microduratea stratului alb poate fi de 2-10 ori mai mare ca a materialului de bază, iar grosimea lui variază în limitele 5-10 μm .

S-a stabilit că: indiferent de polaritatea electrodului-sculă pe suprafața piesei s-au depistat nu numai depuneri de grafit dar s-a format și stratul alb de o microduritate înaltă. Din analiza rezultatelor cercetărilor experimentale, putem afirma faptul, că micro-duritatea stratului de suprafață a piesei poate fi sporită de circa 2-10 ori în raport cu cea de materialul de execuție a probei.

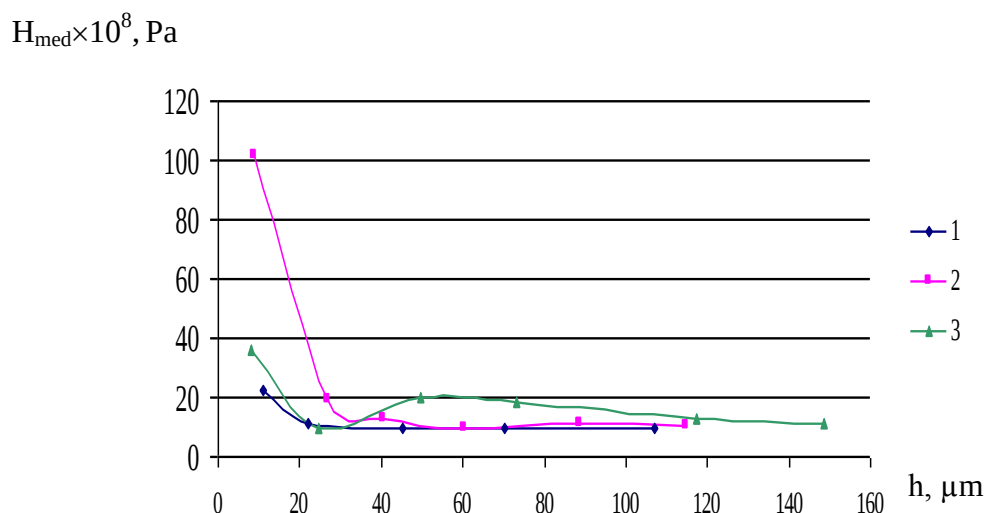


Fig.4.14. Dependența valorii micro-durității de adâncimea stratului superficial a pieselor executate din oțel-45 după interacțiunea descărcărilor electrice în impuls la două treceri pentru: $C=8\mu\text{F}$; $f=8\text{Hz}$; $V=1\text{mm/s}$; $S=0,5\text{mm}$; 1- $W=0,26\text{J}$; 2- $W=0,42\text{J}$; 3- $W=0,58\text{J}$; electrodul-sculă-anod [88]

De asemenea, se confirmă faptul, că la aplicarea descărcărilor electrice în impuls asupra suprafețelor pieselor executate din oțeluri provoacă tratamente termice și termo-chimice, datorită

atât încălzirii locale semnificative instantanee, răcirii bruște, cât și a fenomenelor de difuzie însoțitoare, care influențează considerabil compoziția chimică și proprietățile mecanice a stratului superficial al pieselor.

4.4. Proiectarea electrodului-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 suprafață tratate termic sau chimico-termic a pieselor 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 electrodului-sculă și transferul materialului pe suprafața prelucrată a piesei.

În lucrarea [123] se propune ca materialul de confecționare a electrodului-sculă să fie ales în așa mod ca coeficientul de acumulare a căldurii acestuia:

$$b = \sqrt{C\rho\lambda}, \quad (4.14)$$

să fie cât mai mare. În acest scop mai conveniente sunt așa materiale ca cupru, wolframul și pseudo aliajele lor, iar electrodul-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 unele segmente de disc asamblate. În primul caz se asigură economie de material scump sau dificil de procurat, deasemenea se asigură confecționarea acestuia prin așchiere la producerea de unicate sau prin ștanțare la producerea în serii și de masă. În cazurile când materialul elaborat la uzine este realizat sub formă de fâșii 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:

$$D = \frac{fd}{\pi \cdot n}, \quad (4.15)$$

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 petei de sprijin al canalului de plasmă pe suprafața sculei.

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

$$d \geq \sqrt{\frac{4Wp}{\pi Q_{ms}}}, \quad (4.16)$$

în care $Q_{ms}=q \cdot \rho$ – căldura specifică de topire și densitatea materialului sculei, $W = \int_0^{\tau} I(t)U(t)dt$ - energia degajată în interstițiu în decursul unei descărcări.

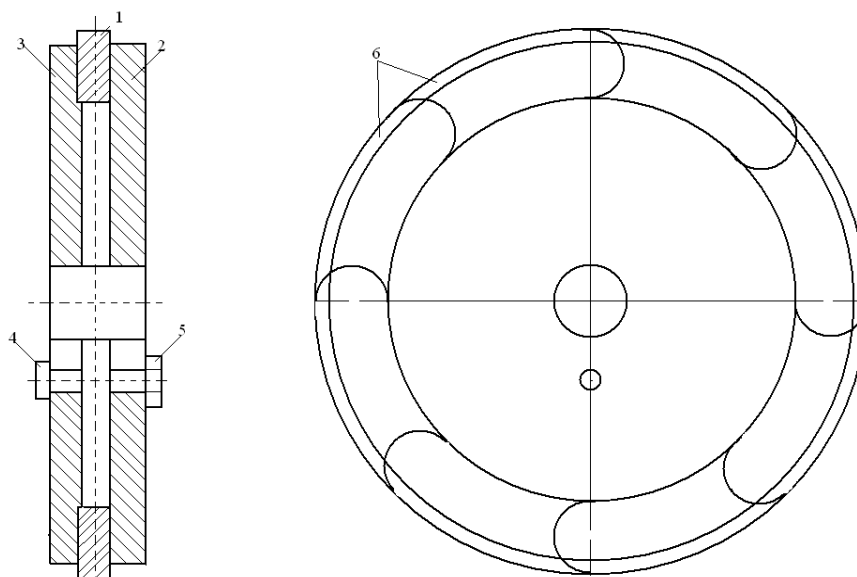


Fig. 4.15. Electroculă proiectată și realizată în ansamblu. Acesta conține inelul 1, flanșele 2 și 3 buloanele de fixare 4, piulițele de fixare 5 și segmente constituente ale discului 6

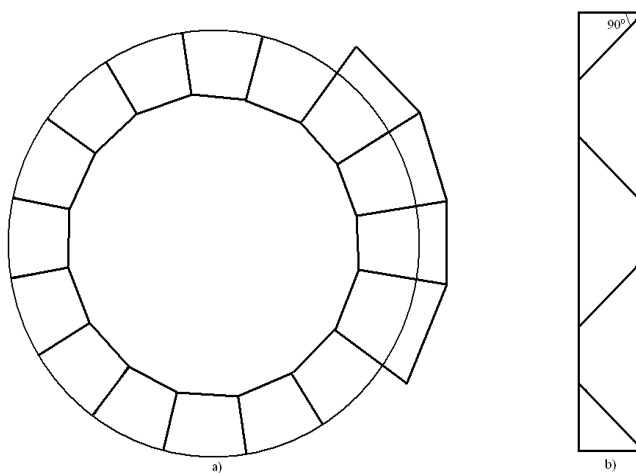


Fig. 4.16. Asamblarea segmentelor executate din fâșie în cadrul unui electrod - sculă

Astfel în lucrarea [123] au fost determinate principiile de proiectare a electrozilor-sculă pentru instalațiile de formare a straturilor de depunere de tipul „Razread” și este descrisă metodica alegerii materialului pentru executarea lui.

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

Studiul 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 funcționarea îndelungată a E-S și prelucrarea de lungă durată a suprafeței piesei în scopul obținerii stratului cu proprietăți prescrise. 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 [123] sunt evidente, deoarece el permite desfășurarea procesului în așa fel, ca fiecare descărcare să înceapă de pe o porțiune nouă de suprafață a E-S ce a avansat în zona de lucru a interstițiului. Pentru satisfacerea acestei prescripții este necesar să se calculeze viteza liniară de rotație a E-S cu relația:

$$V=60d_z \cdot f, \text{ mm/min}, \quad (4.17)$$

în care: d_z – diametrul zonei de interacțiune a plamei 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.

Dintre materialele experimentate, o eficiență mai mare s-a obținut pentru cuprul de puritate tehnică de 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:

$$h_d = d, \quad (4.18)$$

$$h_d \geq \sqrt{\frac{4W}{\pi Q_m}}. \quad (4.19)$$

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:

$$D = \frac{kfd}{n}, \quad (4.20)$$

în care: 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.

Calculul dimensiunilor E-S pentru tratamentul chimico-termic

Pentru cazul aplicării tratamentelor termo-chimice de suprafață se întrunesc două cazuri diferite:

- materialul (elementele chimice) suprafeței prelucrate provin din electrodul-sculă;
- elementele de îmbogățire a suprafeței prelucrate provin din mediul de lucru (gaz sau lichid).

În primul caz electrodul-sculă este supus fenomenului de electroeroziune și calculul dimensional a acesteia se reduce la asigurarea eroziunii la nivel micrometric, adică la nivel de obținere a unor calități mici de material prelevat. În așa situație se execută un calcul separat reeșind din corelația că microcraterelor vor avea diametrul:

$$d = \sqrt{\frac{W}{\pi Q S}}, \quad (4.21)$$

iar aria sumară va prezenta interacțiunea canalului de plasmă cu suprafața electrodului pe parcursul descărcării solitare. O așa situație poate fi realizată numai pentru DEI cu impulsuri de tensiune înaltă (10÷24KV) când tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare de putere este încărcată la valoarea:

$$U_C = U_A + U_K + U_S, \quad (4.22)$$

în care U_A – este căderea de tensiune în stratul anodului;

U_K – căderea de tensiune la catod;

U_S – căderea de tensiune de pe dielectric (aer, argon, azot, etc.).

În cazul tratării chimico-termice sau termice, prelucrarea se execută în regim de catod. La interacțiunea plasmei cu suprafața piesei ia naștere o zonă de interacțiune chimico-termică de culoarea metalului proaspăt decapat. Această zonă este sub formă de pată circulară cu un diametru funcție de mediul de lucru și proprietatea materialului de execuție al piesei pe cale experimentală a fost demonstrat, că mărimea diametrului acestei zone (în lipsa fazei lichide) poate fi exprimată cu relația:

$$d_z = K \cdot e^{0,94\left(\frac{W_S}{S}\right)}, \quad (4.23)$$

sau

$$d_z = K \cdot e^{\left(\frac{W_S}{S}\right)}, \quad (4.24)$$

în care: K – coeficientul de corecție dependent $K=f(c, \rho, \lambda)$ de proprietățile fizice a materialului;

W_s – energia degajată în interstițiu;

S – mărimea interstițiului.

Dat fiind faptul, că căderile de tensiune anodică și catodică diferă coeficientul de putere $\frac{W}{S}$ se modifică cu un coeficient de corecție χ care exprimă $\chi = \frac{U_a}{U_c}$, astfel diametrul zonei de influență termică pe suprafața anodului și catodului se vor calcula în mod diferit. Dacă relația (4.24) a fost dedusă pentru catod (piesa) atunci pentru anod (electrod) aceasta va putea fi scrisă:

$$d_z = K \cdot e^{\left(\frac{U_a \cdot W_s}{U_c \cdot S}\right)} \quad (4.25)$$

Tabelul 4.5. Dependența diametrului zonei de acțiune termică ca funcție de W_s/S în cazul tratării termice a suprafețelor

C, μF	Uc, V	S, mm	W, J	η , %	Ws, J	Ws/S, J/mm	dz, mm
600	80	1	1,92	65	1,25	1,25	1,7
	160	1,5	7,68	43	3,30	2,20	3,4
	240	2	17,28	30,5	5,27	2,64	5,2
	320	2,5	30,72	23,4	7,19	2,88	7,2
	400	3,5	48	22	10,56	3,02	9,8

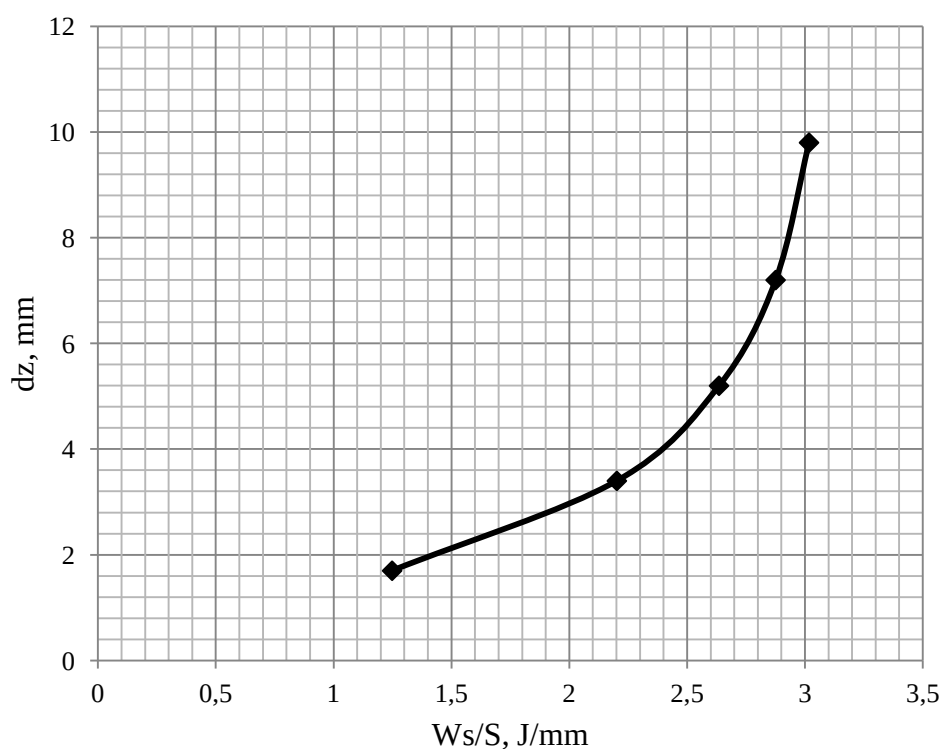


Fig. 4.17. Dependența diametrului zonei de acțiune termică

Formula de aproximare: $d_z = 0,48 \cdot e^{0,94\left(\frac{W_s}{S}\right)} \approx 0,48 \cdot e^{\left(\frac{W_s}{S}\right)}$

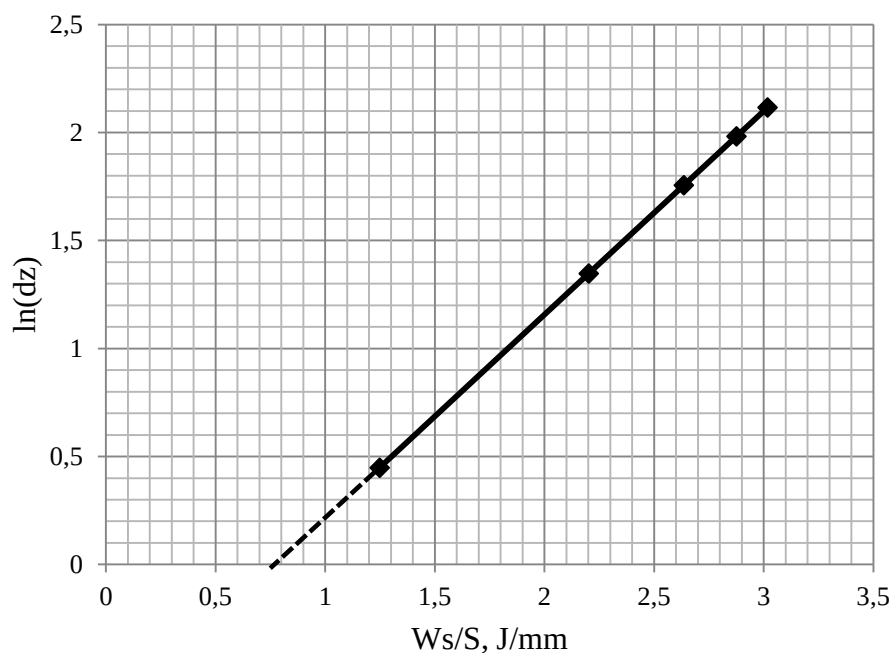


Fig. 4.18. Dependența diametrului zonei de acțiune termică în scara logaritmică

$$\text{Formula de aproximare: } \ln(d_z) = \frac{W_s}{S} - 0,78$$

Diametrul zonei de acțiune termică la tratarea termică a suprafețelor din oțeluri de construcție cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls este funcție exponențială de raportul $\frac{W_s}{S}$.

Tratarea termică a suprafețelor din oțeluri de construcție fără apariția fazei lichide poate fi efectuată pentru raportul $\frac{W_s}{S} > 0,78$.

4.5. 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; el 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 aduc 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.

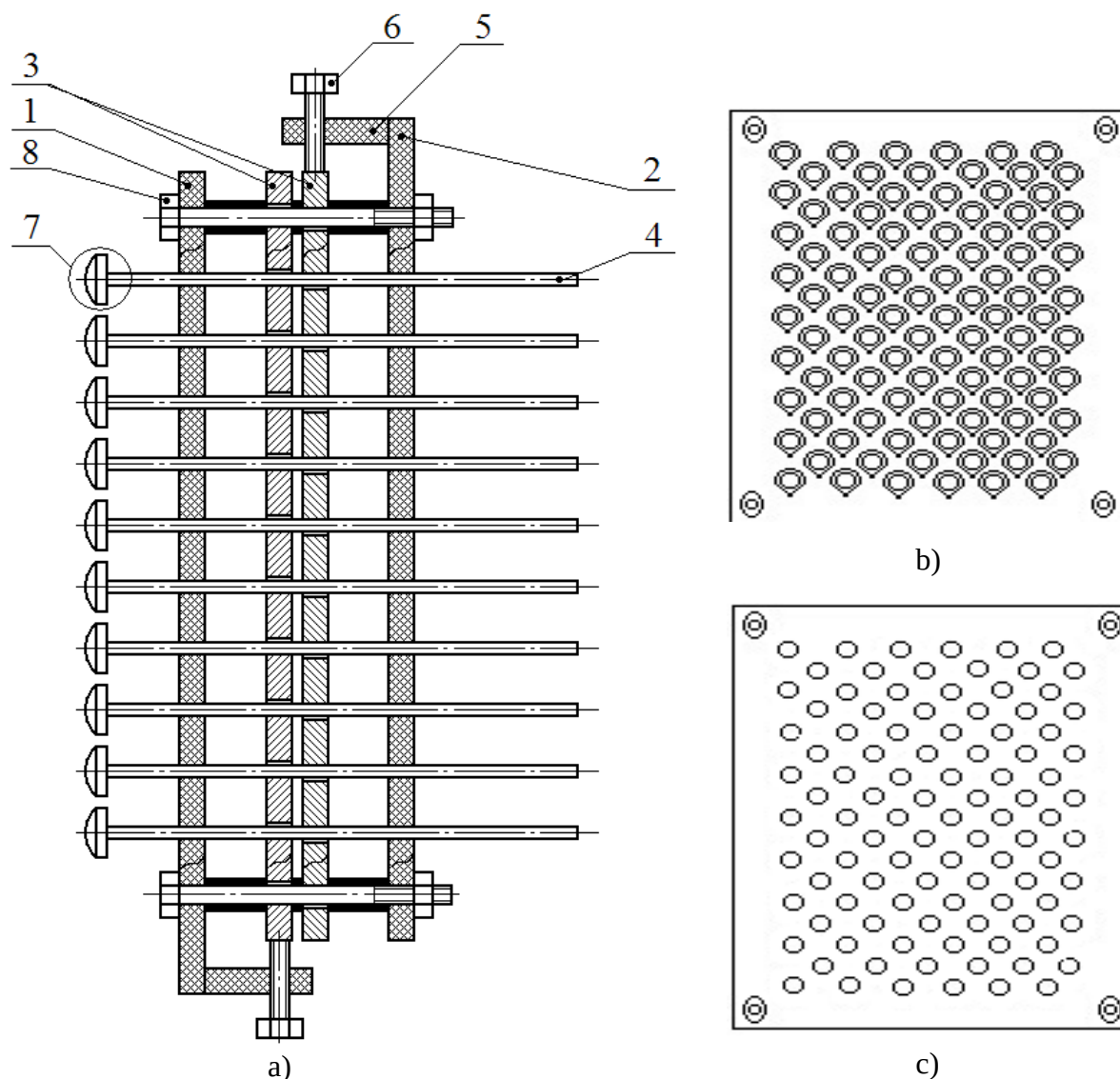


Fig. 4.19. Electrodul-sculă pentru oxidarea suprafețelor complexe cu DEI [83]

Varianta propusă a electrodului este brevetată (Brevet de invenție Nr. 4325 [83]).

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).

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].

4.6. 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 cărora 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 mm^2 . În scopul formării depunerilor de grafit în lipsa topirii și vaporizării suprafeței prelucrate a piesei în calitate de sursă de energie se aplică generatorul de impulsuri de curent.

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 depunerilor nu apar schimbări liniare sau de volum ale materialului supus prelucrării. Pentru a se putea realiza prelucrarea de acest tip cu descărcări electrice în impuls, trebuie satisfăcute următoarele condiții:

- Conductibilitatea electrică înaltă a piesei ce se prelucrează (cu cât conductibilitatea este mai mare cu atât mai mici sunt pierderile de energie electrică);

- înainte de prelucrare scula trebuie supusă prelucrării termice standard;
- scula să nu prezinte neuniformități sau defecte;
- suprafețele supuse prelucrării trebuie să fie degresate. 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 mai sus, 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).

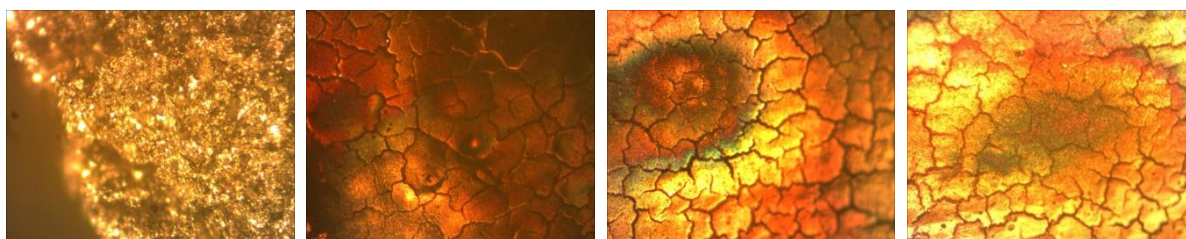
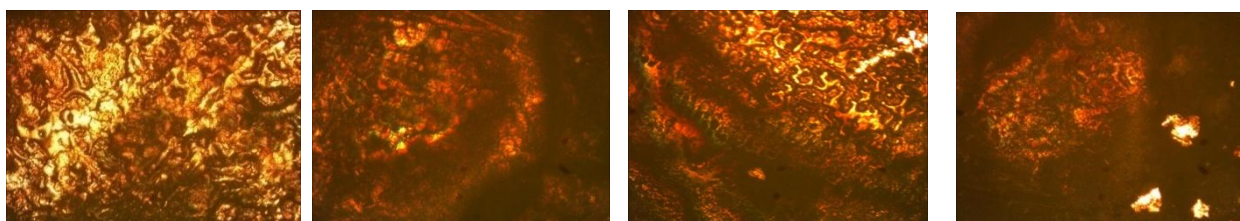


Fig. 4.20. Morfologia structurii piesei după aplicarea descărcărilor electrice în impuls pentru [112]:

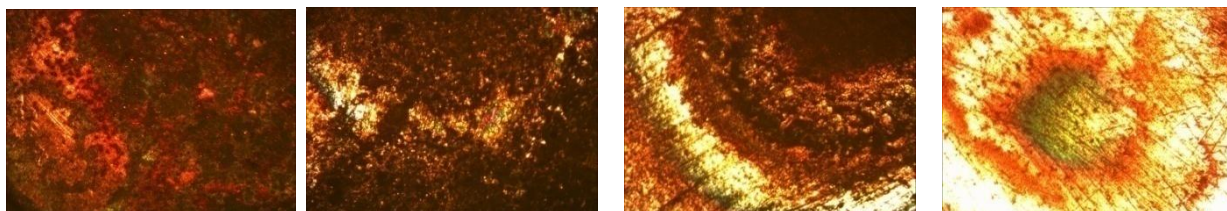
grafit- anod; grafit – catod: $f=5\text{Hz}$; $S=0,55\text{mm}$;

Analiza suprafețelor probelor au demonstrat faptul, că în cazul în care electrodul din grafit este conectat în calitate de catod pe suprafața piesei se observă zonele cum și în cazul descărcărilor electrice când piesa conectată în circuitul de decarcare a generatorului de impulsuri de curent în calitate de anod, adică se formează și 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 lucrarea [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 similar celor menționate mai sus.

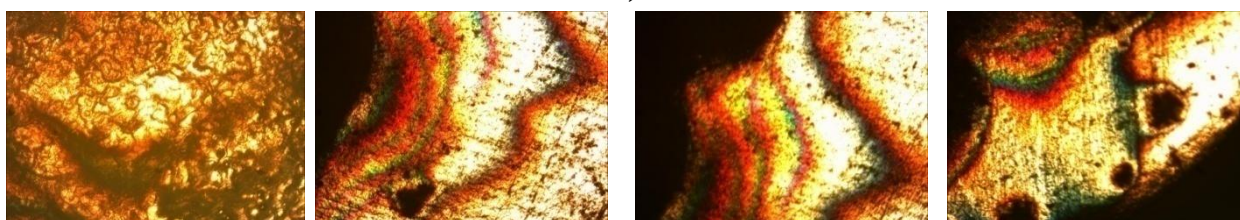


E-S din grafit - catod; poba din cupru - anod

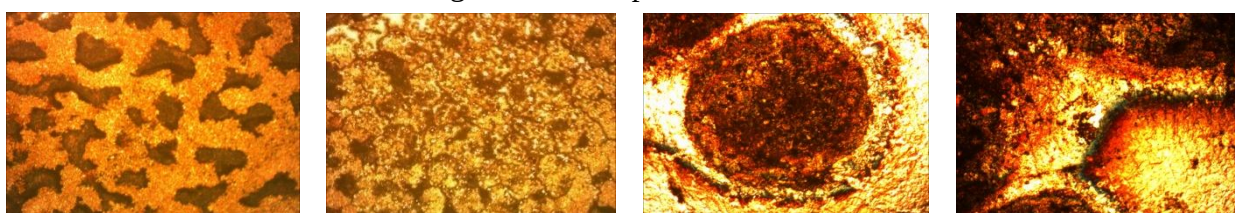


E-S din grafit - anod; poba din cupru - catod

a)

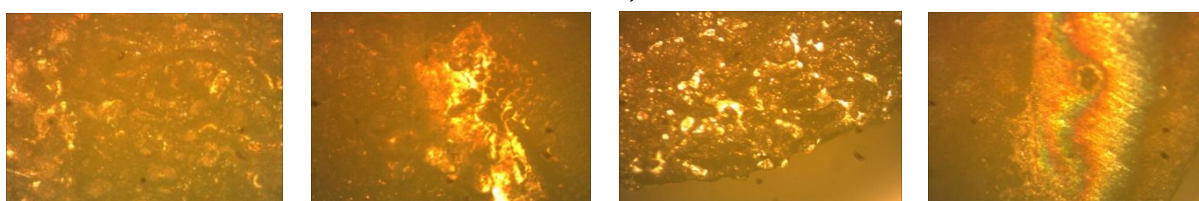


E-S din grafit - catod; poba din alama -anod

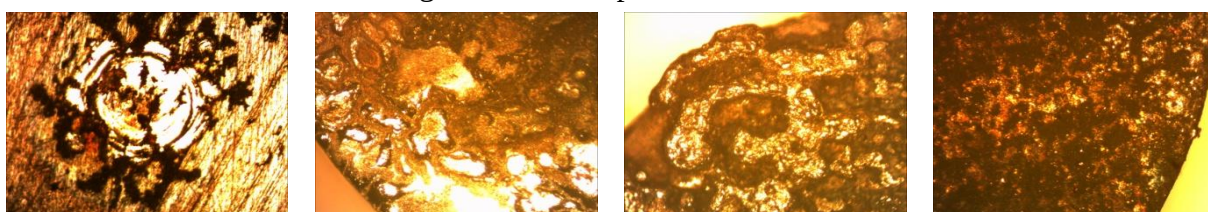


E-S din grafit - anod; poba din alama - catod

b)



E-S din grafit - catod; poba din aluminiu - anod



E-S din grafit - anod; poba din aluminiu - catod.

c)

Fig. 4.21. Morfologia suprafeței piesei după aplicarea descărcărilor electrice în impuls pentru [112]: a) grafit-cupru; b) grafit – aluminiu; c) grafit - alamă:

$f=5\text{Hz}$; $S=0,55\text{mm}$; $t = 30\text{s}$.

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.

La cercetarea SEM a suprafeței electrodului-sculă executat din grafit pirolitic s-a constatat, că pe suprafața acestuia se formează formațiuni micro 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 provocată suplimentar cu particule energetice ca atomii și ionii 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.

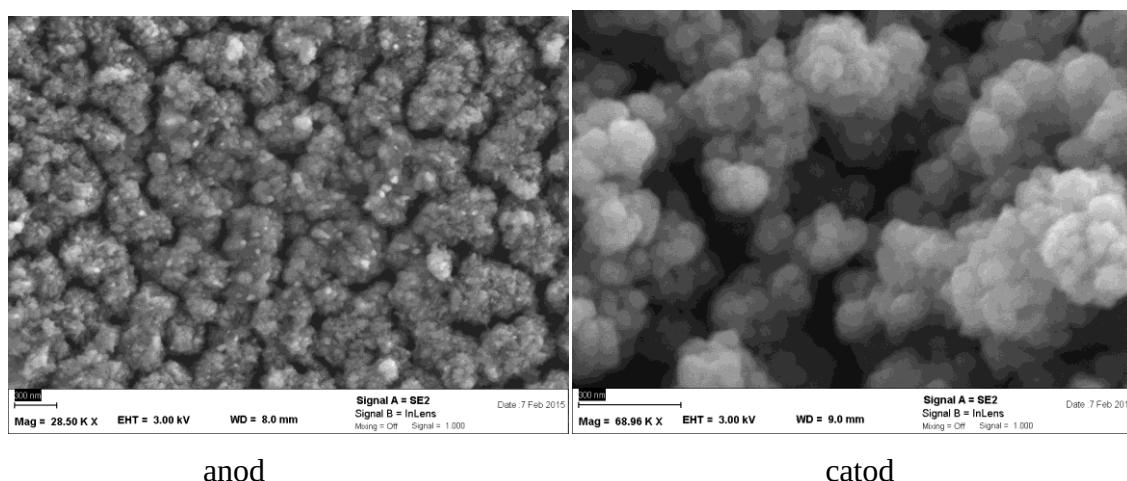


Fig. 4.22. Analiza SEM a suprafeței electrodului-sculă executat din grafit pirolitic [112]

$$f=5\text{Hz}; S=0,55\text{mm}; t = 30\text{s}.$$

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.

Pentru cazul modificării microgeometriei suprafețelor din întregul dispozitiv de prelucrare, în varianta propusă de construcție este important a determina următoarele:

a) alegerea materialului de execuție a electrozilor elementari (bare) acesta va poseda proprietăți de rezistență la eroziune electrică – poate fi executat din Cu pur tehnic, W sau aliajele CuW.

b) determinarea diametrului barelor se execută din condiția:

$$d = \sqrt{\frac{4W}{s}} > Q, \quad (4.26)$$

$$Q = q\rho, \quad (4.27)$$

adică acesta nu se va topi la un alt element de prelucrare.

c) forma capătului de lucru: reeșind din cercetările experimentale executate pe suprafața piesei se formează aspirități cu unghiul de la vârf de 90°, atunci pentru a asigura calității de lucru electrozii elementari vor fi ascuțiți cu capătul de lucru cu unghiul de 90°;

d) în scopul asigurării rezistenței la electroeroziune este necesar a asigura răcirea exicintă a electrozilor, adică până la o mare acțiune de lucru este necesar un timp de pauză în care electrodul revine la temperatura normală:

$$Q = cm\Delta T, \quad (4.28)$$

$$q = -\frac{\lambda dT}{dx} \cdot \Delta A \cdot \Delta \tau, \quad (4.29)$$

$$-\frac{qdx}{\lambda dT\Delta A} = \Delta \tau, \quad (4.30)$$

$$-\frac{grad T}{\Delta A} = \Delta \tau, \quad (4.31)$$

în care $\Delta \tau$ se stabilește în funcție de productivitate sau constructiv.

În cazul în care este necesar a asigura o productivitate impusă de procesul de prelucrare se asigură viteza de avans, ținându-se cont de numărul de aspirități și pasul lor:

$$V_{avans} = \frac{5 \cdot a}{\tau}, \quad (4.32)$$

$$\tau = \frac{5 \cdot a}{V}, \quad (4.33)$$

adică se cunoaște τ - se determină frecvența impulsurilor:

$$f = \frac{1}{\tau}, \quad (4.34)$$

$$V_{rot} = \pi d \cdot f, \quad (4.35)$$

$$V_{rot} = V_{avans}, \quad (4.36)$$

$$\pi d f r = \frac{5a}{\tau}, \quad (4.37)$$

$$\pi d \frac{1}{\tau} = \frac{5a}{\tau}, \quad (4.38)$$

Din relația de mai sus poate fi determinat diametrul corpului de fixare a electrozilor elementari:

$$D = \frac{5a}{\pi}, \quad (4.39)$$

în care a – pasul asprităților pe suprafața de prelucrat.

4.7. 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.

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

În fig. 4.22 sunt prezentate două procedee aplicate la modificarea microgeometriei suprafețelor. Schema prezentată în fig. 4.22, *a* presupune utilizarea unui electrod executat din grafit și ascuțit conic la capătul activ sub un unghi de 88...90°. În acest caz electrodului-sculă i se vor transmite mișcări de avans după toate cele trei direcții ale spațiului: x , y și z .

Utilizarea primului procedeu este irațională din motivul uzării prin eroziune electrică a electrodului-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.

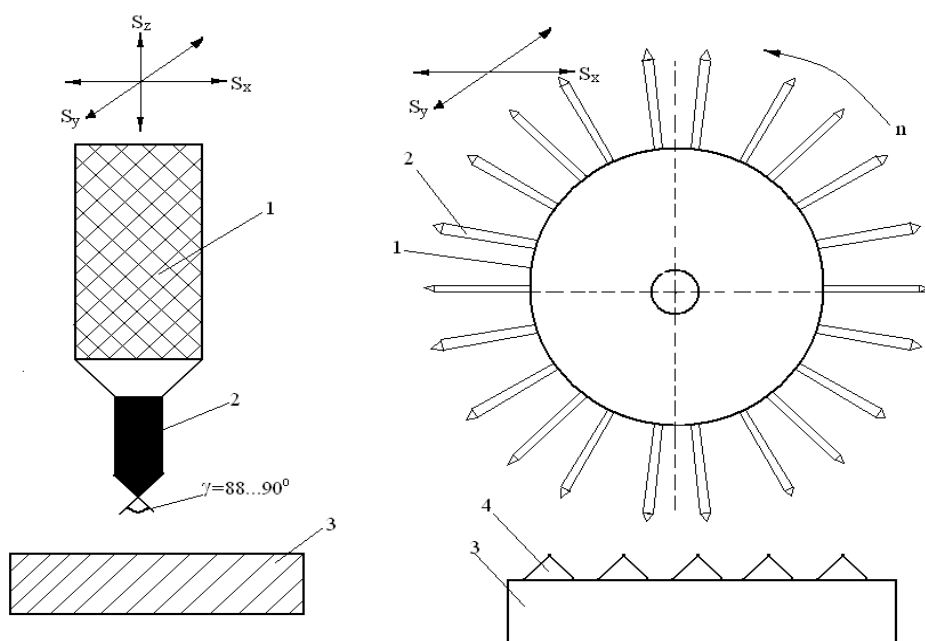


Fig. 4.23 Scheme de prelucrare și E-S pentru modificarea micro geometriei suprafețelor [25]:

- 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)

Analizând 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 $20\mu s$, atunci se poate ușor stabili că, durata de răcire a acestuia în raport cu cea de funcționare este reativ mare, cu atât mai mult că dimensiunile zonei de încălzire nu depășesc limitele de $100\mu m$.

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 Anexa 3 fig. A3.2): 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 elimentar 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.

4.8. Concluzii la capitolul 4

Din cercetările executate în lucrare și cele stabilite din literatura de specialitate putem concluda că:

- pentru proiectarea E-S aplicați la prelucrarea suprafețelor se va ține cont de procedeul de prelucrare: depunere de material, tratarea termică sau modificare de microgeometriei [108];
- forma de execuție a E-S este determinată de geometria și prescripțiile tehnice impuse prin proiectare sau condițiile de funcționare a suprafeței piesei prelucrate [112];
- dimensiunile E-S sunt impuse de regimul de prelucrare (energia descărcării degajate în interstițiu W_s , mărimea interstițiului S , frecvența f și mediul de lucru) [40];
- 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 [117], cum ar fi cuprul de puritate tehnică, wolframul sau aliaje ale acestora.

CONCLUZII GENERALE

Din analiza rezultatelor cercetărilor teoretice și experimentale care prezintă realizarea obiectivelor tezei de doctorat, reiese următoarele concluzii generale privind criteriile de proiectare și realizare a E-S:

- la formarea straturilor de depunere și tratarea termică superficială cu aplicarea DEI este necesară asigurarea menținerii interstițiului constant, ceea ce s-a realizat practic, pe două căi: prin înnoirea permanentă a suprafeței de lucru la deplasarea unei sârme cu depănarea ei pe o rolă și prin realizarea sculei sub formă de disc rotitor cu demararea fiecărei descărcări premergătoare de pe o nouă porțiune de suprafață [117];

- prelucrarea termică (chimico-termică) sau modificarea microgeometriei a suprafețelor metalice cu aplicarea DEI presupune utilizarea unui material pentru confecționarea părții active a E-S cu un coeficient mare de acumulare a căldurii (wolfram și aliajele lui, oțeluri cu conținut scăzut de carbon (până la 0,8 %) și grafit), care va asigura în aceleași condiții un timp mult mai mare de topire ce depășește durata DEI, iar în cazul formării depunerilor – materialul E-S trebuie să corespundă caracteristicilor fizico-termice și cerințelor tehnico-tehnologice necesare sau să asigure compatibilitatea cu materialul pulberii (în cazul formării depunerilor anticorozive – aliajele Ni, Cr, Pd, Zn; în cazul durificării suprafețelor – carburile metalice pe baza de Ti, W, B, grafitul; pentru formarea depunerilor antiuzură – bronzurile, grafitul) [108, 123];

- la tratarea termică sau chimico-termică a suprafețelor metalice cu aplicarea DEI în regim dinamic viteza de deplasare a suprafeței de lucru a E-S va fi mai mică decât viteza de deplasare a petelor electrodice „reci” care în conformitate cu [127] constituie cca. $10...10^2$ cm/s, iar în cazul când prelucrarea se execută în regim static și canalul descărcării migrează atât pe suprafața piesei, cât și pe cea a sculei este necesar de a asigura conjugarea suprafeței E-S cu cea a piesei prelucrate [83];

- răcirea E-S în procesul de prelucrare (de obicei în procesul prelucrării E-S 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) s-a realizat constructiv cu mediu lichid ce circulă prin interiorul corpului sculei, prin execuția unui disc de dimensiuni masive, precum și prin dotarea cu un sistem de insuflare a gazelor răcitoare inerte sau a celor de saturare a suprafeței prelucrate [40];.

Recomandări tehnologice

Analiza rezultatelor cercetărilor teoretice și experimentale obținute în teza de doctorat rezumă la următoarele recomandări:

- 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 sunt 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;
- pentru executarea electrozilor-scule la prelucrarea termică a suprafețelor se recomandă a utiliza materiale cu coeficient mare de acumulare a căldurii.

Propuneri de perspectivă. Cercetarea într-un domeniu nu poate fi finalizată printr-o teză de doctorat. Aceasta este doar o contribuție din care motiv pe viitor se propune:

- cercetarea eroziunii electrice a electrozilor-sculă din materiale și aliajele ce dispun de un coeficient mare de căldură;
- implimentarea rezultatelor obținute în industria alimentară, chimică, construcției de mașini și aparate și micro și nano electronică;
- elaborarea echipamentelor și construcției electrozilor-sculă necesare implimentării proceselor tehnologice cercetate în întreprindere.

BIBLIOGRAFIE

1. Stoian L., Palfavi A., Vintila N., Alexandru M. Tehnologia materialelor. București: Didactică și pedagogică, 1980. 656 p.
2. Topală P. Tehnologia materialelor. Bălți: Universitatea de Stat Alecu Russo, 2001. 188 p.
3. Kiseliov I. 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., Снежко Л., Папанова И. Получение покрытий анодно-искровым электролизом. Л.: Химия, 1991. 128 с.
5. Артамонов Б., Вишницкий А., Волков Ю., Глазков А., Размерная электрическая обработка металлов. Москва: Высшая школа, 1979. 336 с.
6. Носуленко В. О физической природе, об общих отличиях и технологических возможностях электрических разрядов и классификации способов электроразрядной.
7. Гитлевич А., Михайлов В., Парканский Н., Ревуцкий В. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Кишинев: Штиинца, 1985. 196 с.
8. TOPALA P. 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., Pihtili H. The Effect of Cutting Parameters on Wire Crater Sizes in Wire EDM. Springer-Verlag London Limited. Int.: Adv Manuf. Technol (2003) 21: 857-865p.
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: 715-719p.
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 p.
12. Лазаренко Б. Способ нанесения металлических покрытий. /Авт. Изобрет. Авт. свид. 89933 (СССР). Опубл. в Б.И. 12. 1951. 33 с.
13. Лазаренко Б., Лазаренко Н. Электрическая эрозия металлов. Госэнергоиздат 48. Москва: Ленинград, 1944, 58 с.
14. Лазаренко Б., Лазаренко Н. 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. Электроискровой контактный способ упрочнения металлических поверхностей. Госэнергоиздат. Москва: Ленинград, 1951. 54 с.
17. Мицкевич М., Бушик А., Бакуто И., Шилов В., МРОЧЕК Ж. с. 730522 (С.С.С.Р.) Способ электрического нанесения тонкослойных покрытий. Авт. изобрет. Ад. – Оpubл. в БИ № 16 1980.
18. Коваленко В., Верхотуров А., Головкин Л., Подчерняева Ю. Лазерное и электроэрозионное упрочнение материалов. Москва, 1986, 276 с.
19. Попилов Л. 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. Prelucrarea prin electroeroziune şi electrochimic - abrazivă. Vol. 1 şi 2. Bucureşti: Tehnică, 1980. 200p.
22. Nanu A., Nanu D. Prelucrarea dimensională prin eroziune electrică în câmp magnetic. Timişoara: Facla, 1981. 307 p.
23. Некрашевич И., Бакуто И. 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., Топала П., Снегирёв В., Игнатьков Д. Особенности электрической эрозии электродов при импульсных разрядах, протекающих в режиме недонапряжения. ЭОМ. №3, 1988. с.9-12.
25. Topală P., Stoicev P. Tehnologii de prelucrare a materialelor conductibile cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls. Chişinău: TEHNO-INFO, 2008. p.265
26. Nanu A. Tehnologia materialelor. Chişinău: Ştiinţa, 1983. 550p. ISBN 5-376-01543-2.
27. Slătineanu L. Tehnologii neconvenţionale în construcţia de maşini. Chişinău: TEHNICA-INFO, 2000. 252 p.
28. Абрамчук А., Бовкун Г., Михайлов В., Ткаченко Ю. Антифрикционные покрытия на алюминии и его сплавах, сформированные электроискровым легированием их порошковых материалов. Порошковая металлургия 7, 1983. с. 23 – 26.
29. Гитлевич А., Ревуцкий В. Особенности явления и промежуточные пробивные. Тезис докладов. Всесоюзной конференции по импульсным методам обработки материалов, Минск, ФТИАН БССР, 1978. стр. 196-197.

30. Парканский Н. Исследования процесса электроискрового покрытий из порошковых материалов в электрическом поле. Авторев. дис. канд. техн. наук ИРМ. АН УССР, Киев. 1979.
31. Топала П. Особенности явлений на электродах при низковольтных разрядах на промежутках больше пробивных. Тезисы докладов Республиканской конференции молодых учёных. Кишинев: Штиинца, 1986. стр. 252-253.
32. Борисов, И., Борисов А. Плазменные порошковые покрытия. Киев: Техника. 1986.
33. Topala P. Studiul fundamental și aplicativ al efectelor electroerozive în tehnologiile neconvenționale. Teza de doctor habilitat în tehnică. Universitatea Tehnică a Moldovei. CZU 621.0.484.755. Chișinău. 2008.
34. Золотых Б. Электроискровой контактный способ упрочнения металлических поверхностей. Госэнергоиздат, Москва: Ленинград, 1951. 54 с.
35. Коробейник В., Жеребцов В. Электроискровое восстановление рабочей поверхности прокатных валков. Электронная обработка материалов № 6, 1981. стр. 40 – 43.
36. Кжен Иг., Золотов А., Потехин К., Максимов Н. Исследование влияния некоторых факторов на интенсификацию механизированного электроискрового легирования металлических поверхностей. Электронная обработка материалов 4, 1982. стр. 26-28.
37. Бекренев А., Камасев А., Путилин В. Массоперенос в металлах при короткоимпульсном лазерном воздействии. Письма в ЖТФ 19 вып.13, 1992. стр. 14 – 15.
38. Herman R. Tehnologia materialelor. Vol. II. București: Politehnica, 2010. 200 p. ISBN: 978-606-554-091-0.
39. Wang Z., Fang Y., Wu P., Zhao W., Cheng K. Surface modification process by electrical discharge machining with a Ti powder green compact electrode. Journal of Materials Processing Technology, 2002. p. 139–142.
40. 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.
41. 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. pg. 932-938

42. Gitlevich A., Topală P., Kuku I. Device for powder material supply (in Russian). Patent Soviet Union no. 1574385, 1988.
43. Lilian P., Valerie J., Subhash H. Microstructure and microchemistry of silicon particles formed during electrical-discharge machining. *Journal of materials science: Materials in electronics* 14, 2003. pg. 507 – 510.
44. Ставицкий В. Электроискровая прецизионная обработка материалов. Научные основы точных материалов формообразования поверхностей, ЭОМ, №.6, Кишинев, 2001. стр. 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. стр. 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. стр. 266 – 270.
47. Топала П. 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 стр.
48. Парканский Н. 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., Гитлевич А., Ревуцкий В., Абрамчук А. Опубл. в Б.И. №15, 1985.
50. Топала П. Упрочнение металлических поверхностей при электроискровом нанесении порошковых материалов. Повышение надежности и долговечности материалов на основе новых методов термической обработки, Хмельницк, 1988. 91 стр.
51. Бакуто И. О зависимости электроэрозионного эффекта от электрического режима разряда. В кн.: Сб. научных трудов ФТИ АН БССР вып.6, Минск: АН БССР, 1969. стр. 213-222.

52. Гитлевич А., Топала П., Снегирёв В., Игнатков Д. Особенности электрической эрозии электродов при импульсных разрядах, протекающих в режиме недонапряжения. ЭОМ, №3, 1988. стр. 9-12.
53. Topală P. 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 П., Стойчев П. Технологии обработки токопроводящих материалов с применением импульсных разрядов. Кишинев: TEHNICA-INFO, 2008. стр. 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, стр. 168-172. ISBN 966-7907-25-2
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. Bardac D., Rânea C., Paraschiv D. Tehnologii de procesare a suprafețelor. Iași: Junimea, 2005. p. 180;
58. Топала П., Ревуцкий В. Процессы на электродах при низковольтных разрядах на промежутках больше пробивных. Пятое Всесоюзное совещание по электрической обработке металлов, Кишинев, 1985. стр. 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. Gavrilăș I., Martinescu N., Vișan A. Modern technologies in machine-building. Bucharest: Politechnics Institute, 1997.
61. Marinescu N., Sturzu A., Vișan A., Gavrilăș I. Tehnologii moderne în construcția de mașini. București. 1984. 199 p.
62. Лазаренко Н. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Машиностроение 44, Москва, 1976.
63. Лазаренко Б., Лазаренко Н., Лазаренко В. 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., Гитлевич А., Ревуцкий В., Абрамчук А. Опубл. в Б.И. №15, 1985.

65. Некрашевич И., Бакуто И. Механизм эрозии металлов при электрическом импульсном разряде. В кн.: Сб.научных трудов ФТИ АН БССР, вып.6, Минск: АН БССР 1960. стр. 193-215.
66. Бакуто И. О зависимости электроэрозионного эффекта от электрического режима разряда. В кн.: Сб. научных трудов ФТИ АН БССР. стр. 213-222.
67. Антоско В., Гитлевич А., Коваль Н. К вопросу об ограничении толщины упрочненного слоя при электроискровом легировании. Электронная обработка материалов № 4, 1975. стр. 21-22.
68. Гитлевич А., Топала П., Куку И., Иванов В., Снегирев В. О возможности упрочнения металлических поверхностей на установках для электроискрового легирования типа «Разряд».- ЭОМ, №2, 1987. стр. 24 – 26.
69. Перетятку П., Михайлов В., Герцрикен П., Мазанко В. Влияние магнитного поля на структуру и фазовый состав покрытый, полученных при электроэрозионном легировании. Электронная обработка материалов 4, 1995.
70. Леонтьев П., Чекалова Н., Хан М. Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов. Москва: Металлургия, 1986. 144 стр.
71. Balanici A., Topală P., Abramciuc A., Pereteatcu P., Rusnac V., Beşliu V., Cazacu A. Noi tehnologii avansate de prelucrare, recondiţionare şi de tratare a pieselor de construcţii de maşini utilizate în industria alimentară,electrotehnică şi electronică, în vederea creşterii performanţelor industriale. Raport ştiinţific/ Universitatea de Stat “A.Russo”, Bălţi. 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 suprafeţelor metalice prin electroeroziune şi plasmă electrolitică. Raport ştiinţific/Universitatea de Stat „A. Russo“, Bălţi. Num. Înregist. de Stat 0197MD. 001238, 2000. 66 p.
73. Ghitlevici A., Mihailov V., Parkansky N., Revutsky V. Electro-spak alloying of metallic surfices. Chişinău: Ştiinţa, 1985. 180 p.
74. Некрашевич И., Бакуто И. К вопросу о современном состоянии теоретических представлений об электрической эрозии металлов. В.кн.: Электроискровая обработка металлов. Москва: АН СССР, 1963. стр. 24-28.
75. Намитоков К. Электроэрозионные явления. Энергия 456, Москва, 1978.
76. Золотых Б. Н. О физической природе электроискровой обработки металлов. Москва: АН СССР, 1957. стр. 38 – 69.

77. Чяругин Н. Физико-химические явления при электроискровом легировании металлов. Физико-химическая механика материалов 4, 1989. стр. 43-48.
78. Crețu G. Bazele cercetării experimentale. Îndrumar de laborator, Iași (Romania): Universitatea Tehnică "Gh. Asachi", 1992.
79. Șerban V., Răduță A. Știința și ingineria materialelor. Ediție revizuită și adăugită. București: Politehnica, 2010. 526 p. ISBN: 978-606-554-044-6
80. Гитлевич А., Парканский Н., Игнатьков Д. Об ограничений толщины слоев, формируемых в процессе электроискрового легирования. Электронная обработка материалов 3, 1981. стр. 25-29.
81. Бакуто И., Мицкевич М. О факторах, влияющих на образование покрытий при электроискровом способе обработки. Электронная обработка материалов 3, 1977. стр. 17-19.
82. Чяругин Н. 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., Hîrbu A., **Pînzaru N.** / data publicării 2015.01.31, BOPI Nr. 1/2015, p. 18-19. MD 4325 C1 2015.09.30.
84. Буравлев Ж., Рудневски Н., Грикит И. Спектральный анализ металлов и сплавов. Киев: Техника, 1976. 190 стр.
85. ***Электроискровое легирование металлических поверхностей. Библиографический указатель литературы за 1943-1973 г.г., Кишинёв: Штиинца, 1974. 87 стр.
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, 2007. p. 129-132.
87. Gavrilov P., Lesnevski L., Tverishin V., Tyurin V., Chernovski M. 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, p. 77-79.
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, p. 105-111.
89. Cernenco L., Snejco L., Papanova I. Acquisition of surfaces by means of anodesparking electrolysis Himia, 2, 1991. p. 128.
90. Topală P., Ghitlevich A., Kornienko L. Corrosive behavior of titanium with electrosparking surfaces. Protection of metals, Vol. 29, No. 3, 1989. p. 351-356.

91. Alai S. Practical studies in machinery. Manual for teacher training institute students. Moscow: Prosveshchenie. 1979. p. 67-70.
92. Nemoshkalenko V., Topala P., Tomashevskii N., Mazanko V., Nosovskii O. Peculiarities of forming surface layers at spark discharges. Metallophysics, Vol.12, 1990. p.132-133,
93. Коваленко В., Верхотуров А., Головкин Л., Подчерняева И. Лазерное и электроэрозионное упрочнение металлов. Москва: изд-во Наука, 1986. 276 стр.
94. Transmission & Reflection Microscope Operation Manual XJM600. Serial Number (S.N.) 20104108. Broşura microscop. Date of manufacture: 18.04.2010.
95. Румшинский Л. Математическая обработка результатов эксперимента. Главная редакция физико-математической литературы Москва: Наука, 1971. 192 стр.
96. Бендат Д., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. – Москва: Мир, 1989. 540 стр. ISBN 5-03-001071-8.
97. Зайдель А. Н. Элементарные оценки ошибок измерения. Л.: Наука, 1967. 88 стр.
98. Математические методы обработки экспериментальных данных. Расчетные задания. Методические указания к практическим занятиям. / Кункин С. и др. Санкт-Петербург, 2002. 68 стр.
99. Лунев В. Планирование и обработка технологического эксперимента: Учебное пособие. Л.: ЛПИ, 1985. 84 стр.
100. Айвазян С., Енюков И., Мешалкин Л. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. М.: Финансы и статистика, 1983. 471 стр.
101. Востров В., Макутов В., Юргенсон Э. Статистические методы исследования процессов обработки металлов давлением. Учебное пособие. СПб.: Изд-во СП.ГТУ, 1997. 95 стр.
102. Грановский Г. Обработка результатов экспериментальных исследований резания металлов. Москва: Маш. 1982. 112 стр.
103. Адлер Ю., Маркова Е., Грановский Ю. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Ммосква: Наука, 1976. 279 стр.
104. Зингерман А., Каплан Д. Зависимость электрической эрозии анода от расстояния между электродами. ЖТФ, Т. XXVIII, в.2, 1958. стр. 386-393.
105. Самоходский А., Кулявский М. Лабораторные работы по металловедению. Москва: 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, p. 95-102. ISSN 2067-3604. **(Revista cotată SCOPUS).**
108. **Pînzaru N.** Experimental investigations on the durability of tool electrodes 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., Coteaţă 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 **(Revistă cu factor de impact 1,63).**
111. Topala P., **Pînzaru 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. **(Accredited journal CNCSIS B+)**
113. Marin L., Topala P., Stoicev P., Beşliu V., Ojegov A., **Pînzaru N.**, Guzman D., Platon A. Influenţa parametrilor tehnologici – tensiune, cantitate de electricitate – la generarea formaţiunilor spaţiale alcătuite din atomi de carbon de tipul fullerenilor, la aplicarea descărcărilor electrice în impuls. Meridian ingineresc. Nr. 1, 2017. Chişinău: TEHNICA UTM, p. 30-35. ISSN 1683-853X. **(Categorie C).**
114. Topală P., Beşliu V., Rusnac V., Ojegov A., **Pînzaru N.** Modificarea structurală a compoziţiei chimice şi a microgeometriei suprafeţelor pieselor cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls. Fizică şi tehnică: Procese, modele, experimente. Vol. I, 2011. Bălţi: Presa univ. bălţeană, 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, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки. Санкт-Петербург, 2008, часть 2. стр. 118-129.

116. Витязь П., Солцев К. Технологии конструкционных наноструктурных материалов и покрытий. Минск: Беларуская навука, 2011. 283 с. ISBN: 978-985-08-1292-6.
117. Topală P., **Pinzaru 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., **Pinzaru 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. Chișinău: U.T.M. 2009, p. 169-171. ISBN 978-9975-45-115-4.
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.**, Monaico 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, p. 631-634. ISSN 2066-3919.
122. Topala P., **Pinzaru N.**, Stoicev P. Transformations in the surfaces of tool-electrodes during surfaces 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., 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. Topala P., Stoicev P., Ojegov A., **Pînzaru N.**, Monaico 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.
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., **Pînzaru 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. p. 625-626. ISSN 1844-7880.
134. Topala P., Ojegov A., Stoicev P., Beșliu V., Hirbu A., **Pînzaru N.** Tool-electrode for surface thermo-chemical treatment by applying electrical discharges in impulse. The 18th International Conference „Inventica 2014”, Iași: PERFORMANTICA, 2014. p. 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 International Exhibition of Research, Inovation and Tehnological Transfer. Inventica, 2015. p. 324-326. ISSN 1844-7880.
136. Bulent E. Residual stresses and white layer in electriv discharge machining (EDM). Applied Surfaces Science. 253. 2007. p. 9234-9240.
137. Сидоренко С., Ивасенко Е., Мазанко В., Лобачева Г., Миронов К., Храновская Е. Формирование и свойства поверхностного слоя при сочетаний процессов азотирования и электроискрового легирования титанам, хромом железа. 6-th International Conference „Interaction of Radiation With Solids”, Minsc, Belarusi, 2005. стр. 430-432.
138. Topală P., Ojegov A. Formation of oxide thin pellicles by means of electric discharge in pulse. Iași: Buletinul Institutului Politehnic. Tomul LIV (LVIII), 2008. p. 121-128.
139. Beșliu V. Cercetări privind tratarea termică și termochimică a suprafețelor pieselor prin aplicarea descărcărilor electrice în impuls. Teza de doctor. Galați, România. 2008. 150 p.
140. Палатник Л. С. Фазовые превращение при электроискровой обработке металлов и опыт установления критерия наблюдаемых взаимодействий. DAN SSSR, 1953, t.89. Nr.3, стр.455-458.
141. Slătineanu L., Nagîț Gh., Dodun O., Coteață M., Chinessta F., Goncalves-Coelho A., Pamies Teixeira J., San Juan M., Santo L. and Santos F. Non-tradițional Manufacturing processes. Chisinău: Tehnica-INFO, 2004. 300 p.
142. Намилов Е. Справочник по электроэрозионной обработки материалов. Ленинград: Машиностроение, 1989. стр.164.
143. Topala P., Ojegov A., Beșliu V., Stoicev P. Tehnologii moderne și inovații în inginerie. Bălți: Indigou-Color, 2018. 183 p.

144. Сафронов И., Топала П., Горбунов А. Электроэрозионные процессы на электродах и микроструктурно-фазовый состав легированного слоя. Chişinău: TEHNICA-INFO, 2009. 473 p.
145. Beri N., Maheshwari S., Sharma C., Kumar A. Technological advancement in electrical discharge machining with powder metallurgy processed electrodes. Materials and Manufacturing Processes. 2010. <https://doi.org/10.1080/10426914.2010.512647>, p. 1186-1197.
146. Das A., Prakash M. Experimental investigation on surface modification of aluminum by electric discharge coating process using TiC/Cu green compact tool-electrode. An International Journal Machining Science and Technology. Volume 16, 2012
<https://doi.org/10.1080/10910344.2012.731951> p. 601-623.
147. **Pînzaru N.;** Topală P. Cercetări experimentale privind eroziunea electrozilor scule în funcție de regimurile energetice prin aplicarea descărcărilor electrice în impuls. Universitatea Agrară de Stat din Moldova. Lucrări științifice, volumul 51. Chişinău, 2018. ISBN 978-9975-64-300-9. pg. 297-304.
148. Топала П., Душенко В., Гитлевич А. Об условиях образования расплава на поверхности детали – катода при электроискровом легировании на установках типа Разряд. Кишинев: Электронная обработка материалов, № 6, 1990. С. 17-18.

ANEXE

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

Electrod – catod – Cu

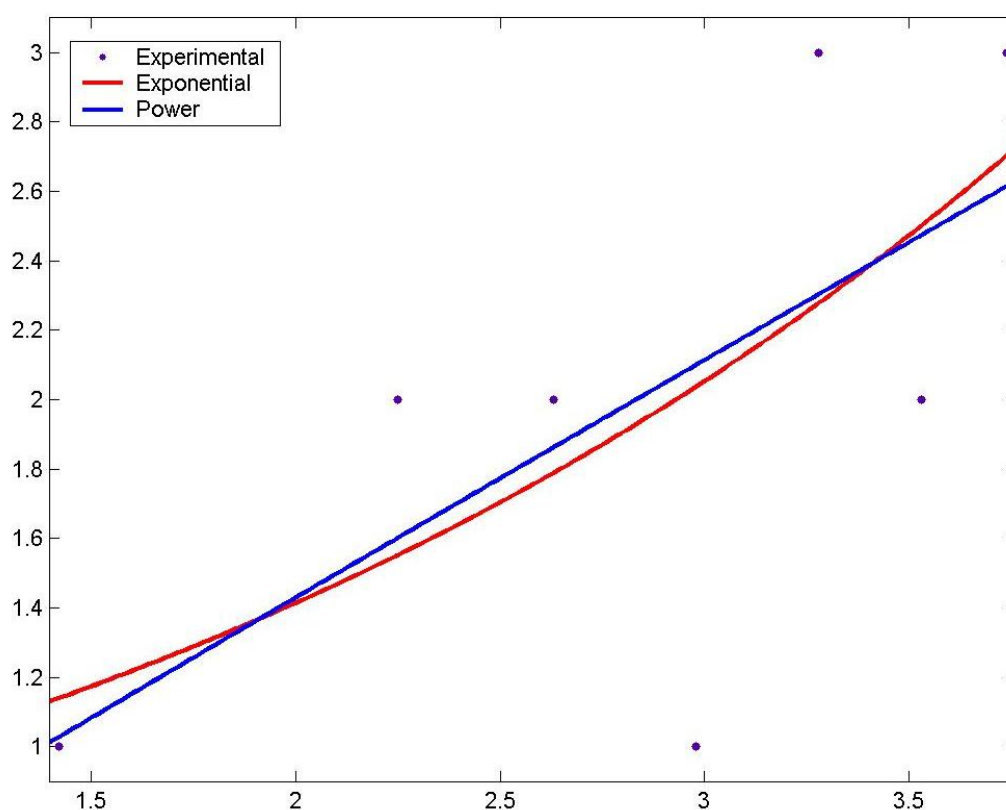


Fig. A1.1. Aproximarea dependenței schimbării masei catodice a electrodului de densitatea de energie W_s/S folosind programul MATLAB 5.0. Materialul electrodului catod - Cu

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

a = 0.6711 (-0.476, 1.818)

b = 0.3726 (-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 (-0.5094, 1.972)

b = 0.9659 (-0.5078, 2.44)

Goodness of fit:

SSE: 2.246

R-square: 0.4385

Adjusted R-square: 0.3262

RMSE: 0.6702

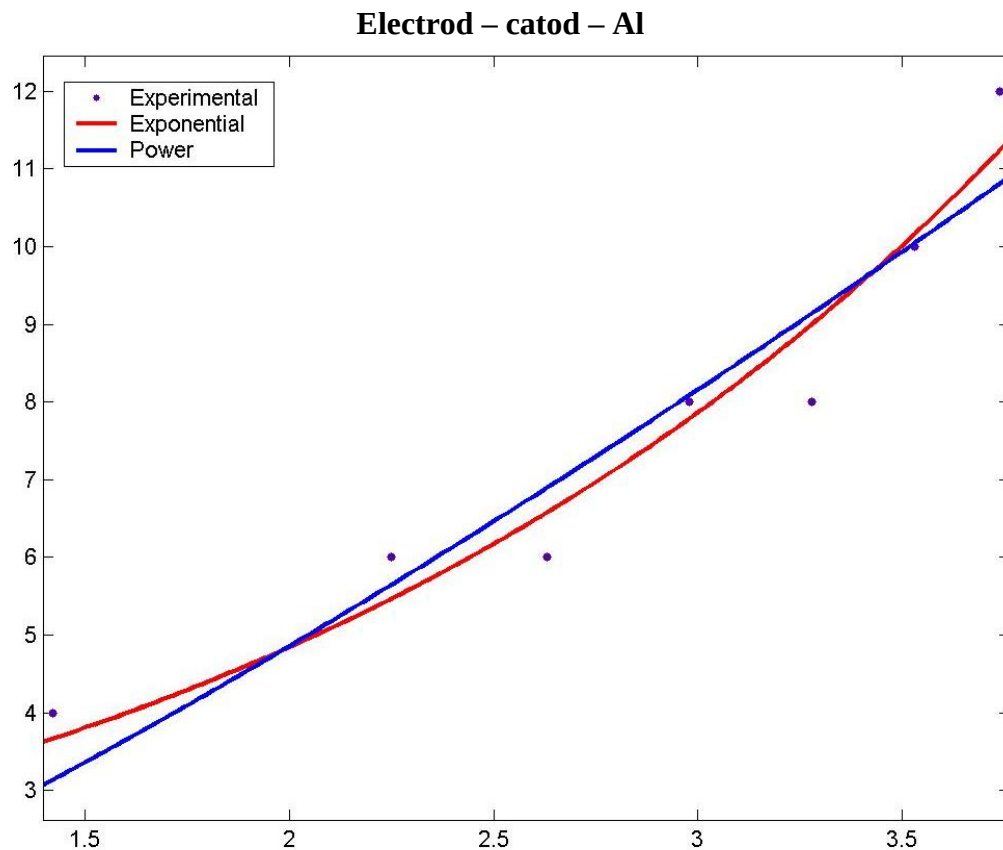


Fig. A1.2. Aproximarea dependenței schimbării masei catodice a electrodului de densitatea de energie W_s/S folosind programul MATLAB 5.0. Materialul electrodului catod - Al

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

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

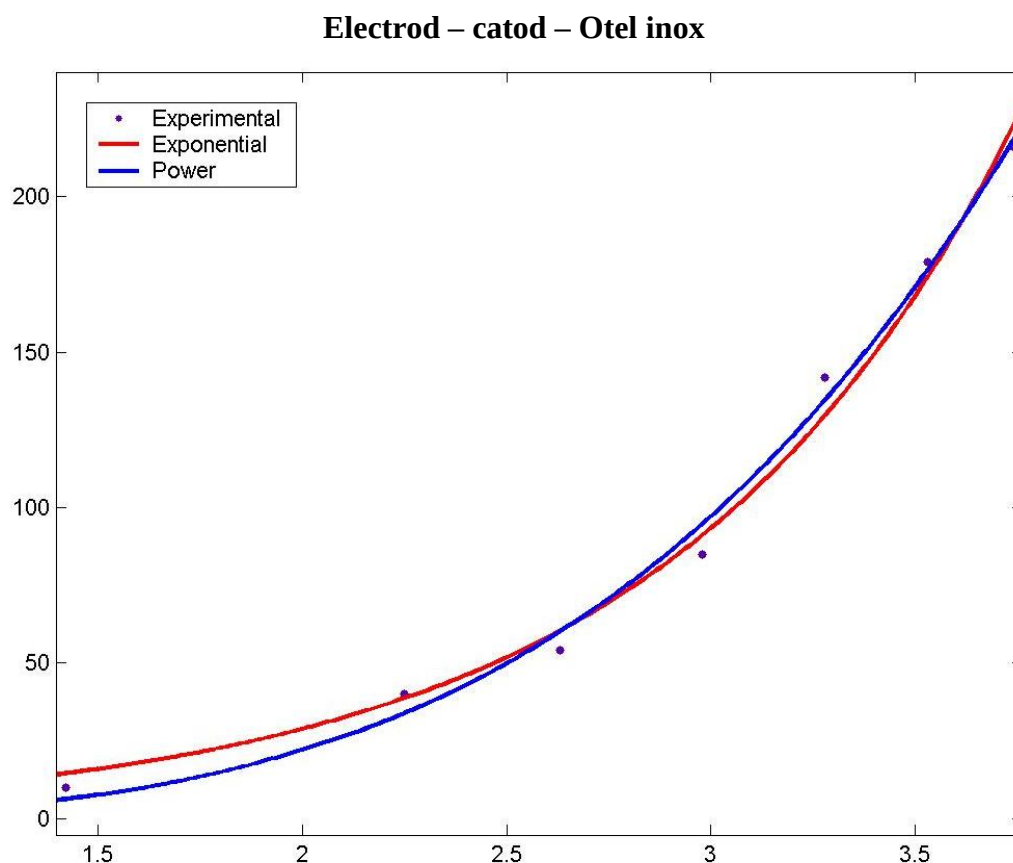


Fig. A1.3. Aproximarea dependenței schimbării masei catodice a electrodului de densitatea de energie W_s/S folosind programul MATLAB 5.0. Materialul electrodului catod – Oțel inox

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

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

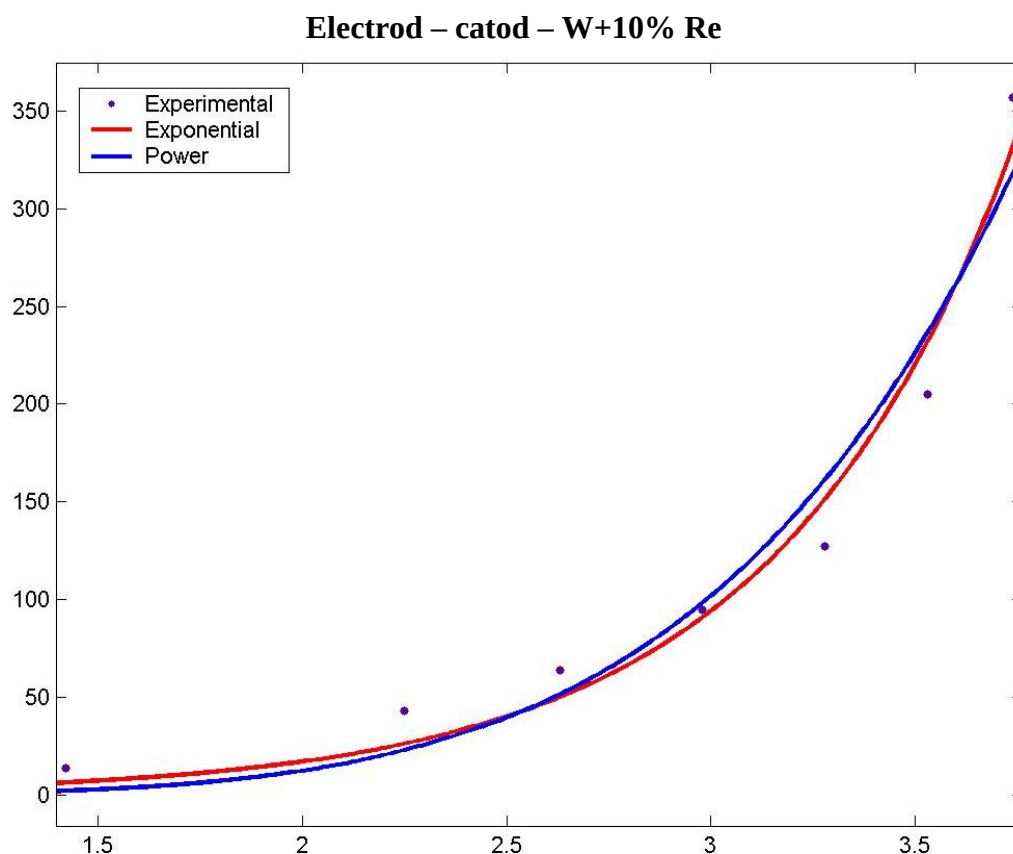


Fig. A1.4. Aproximarea dependenței schimbării masei catodice a electrodului de densitatea de energie W_S/S folosind programul MATLAB 5.0. Materialul electrodului catod – Wolfram+10%Re

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

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

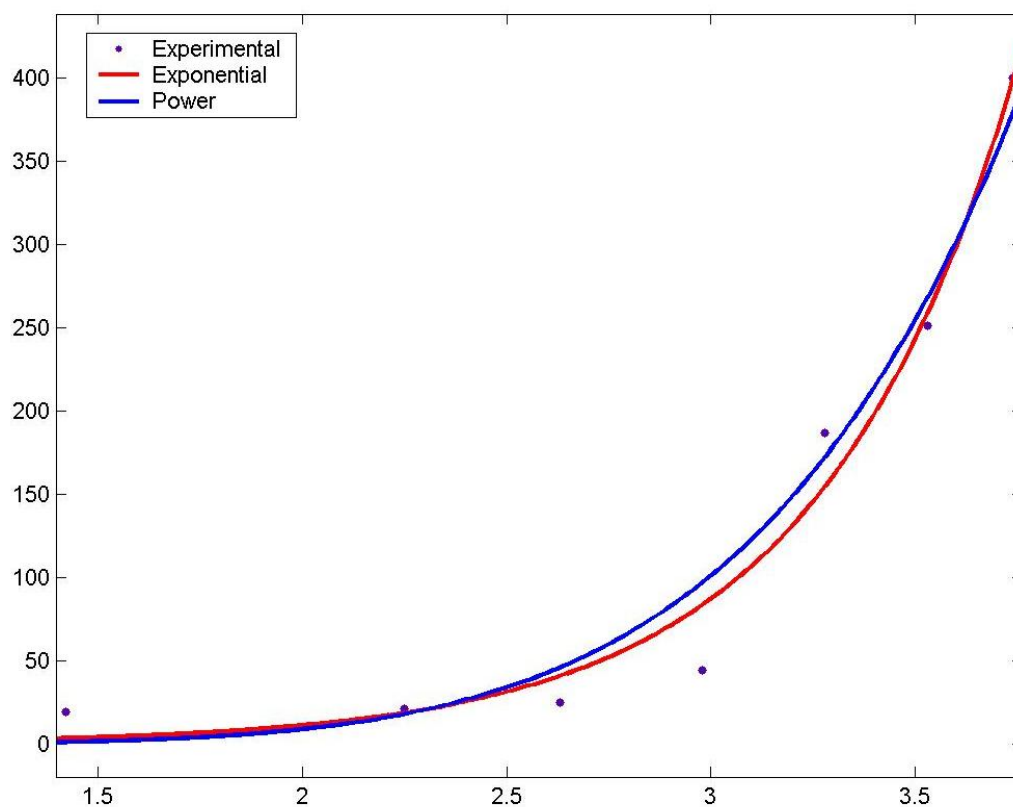


Fig. A1.5. Aproximarea dependenței schimbării masei catodice a electrodului de densitatea de energie W_s/S folosind programul MATLAB 5.0. Materialul electrodului catod - grafit

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

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

Anexa 2. Aproximarea matematica a datelor experimentale privind dependențele tehnologice
Electrod – anod – Cu

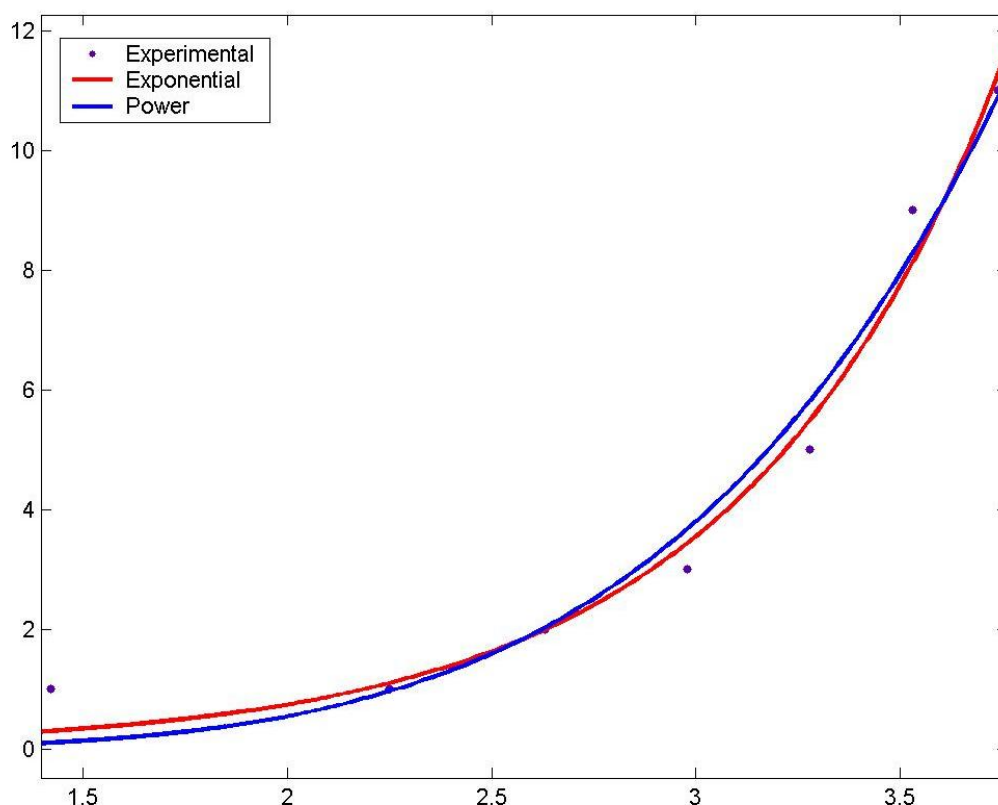


Fig. A2.1. Aproximarea dependenței schimbării masei catodice a electrodului de densitatea de energie W_s/S folosind programul MATLAB 5.0. Materialul electrodului anod – Cu

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

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

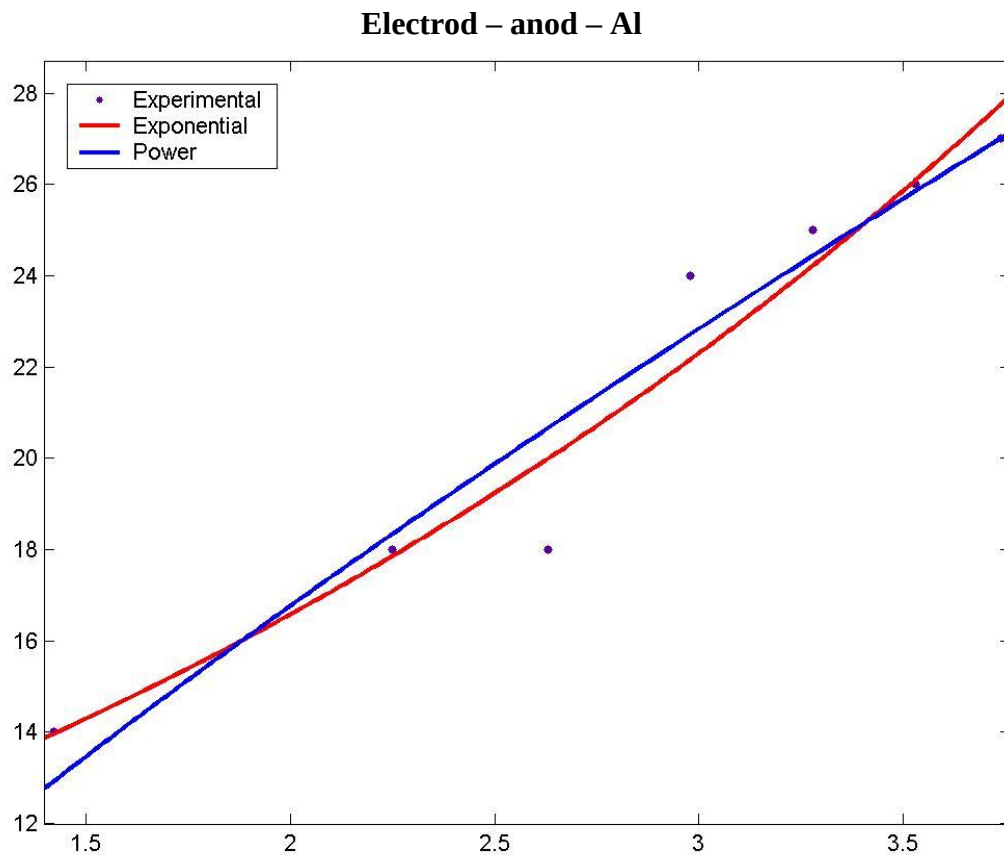


Fig. A2.2. Aproximarea dependenței schimbării masei catodice a electrodului de densitatea de energie W_S/S folosind programul MATLAB 5.0. Materialul electrodului anod - Al

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 9.169 \quad (6.498, 11.84)$$

$$b = 0.2962 \quad (0.2044, 0.3879)$$

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):

$$a = 9.886 \quad (6.847, 12.93)$$

$$b = 0.7618 \quad (0.4909, 1.033)$$

Goodness of fit:

SSE: 10.32

R-square: 0.9309

Adjusted R-square: 0.9171

RMSE: 1.437

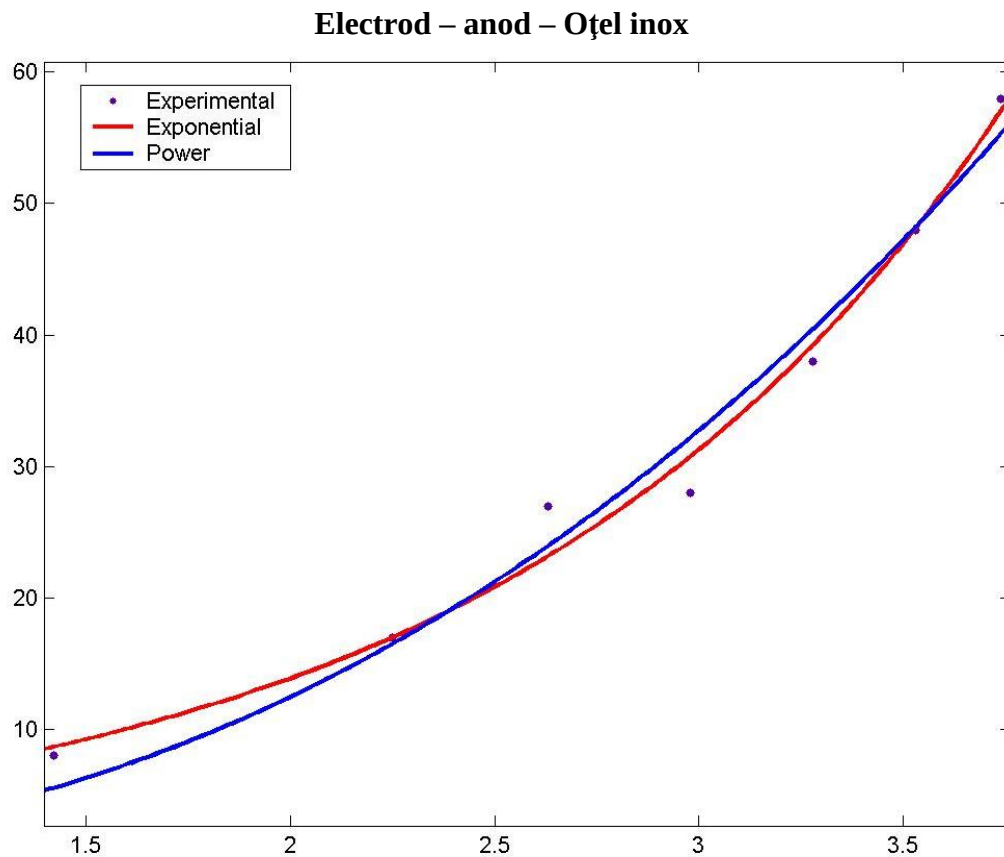


Fig. A2.3. Aproximarea dependenței schimbării masei catodice a electrodului de densitatea de energie W_s/S folosind programul MATLAB 5.0. Materialul electrodului anod – oțel inox

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 2.726 \quad (1.374, 4.077)$$

$$b = 0.8132 \quad (0.6682, 0.9582)$$

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):

$$a = 2.39 \quad (0.5586, 4.222)$$

$$b = 2.382 \quad (1.753, 3.01)$$

Goodness of fit:

SSE: 46.97

R-square: 0.974

Adjusted R-square: 0.9689

RMSE: 3.065

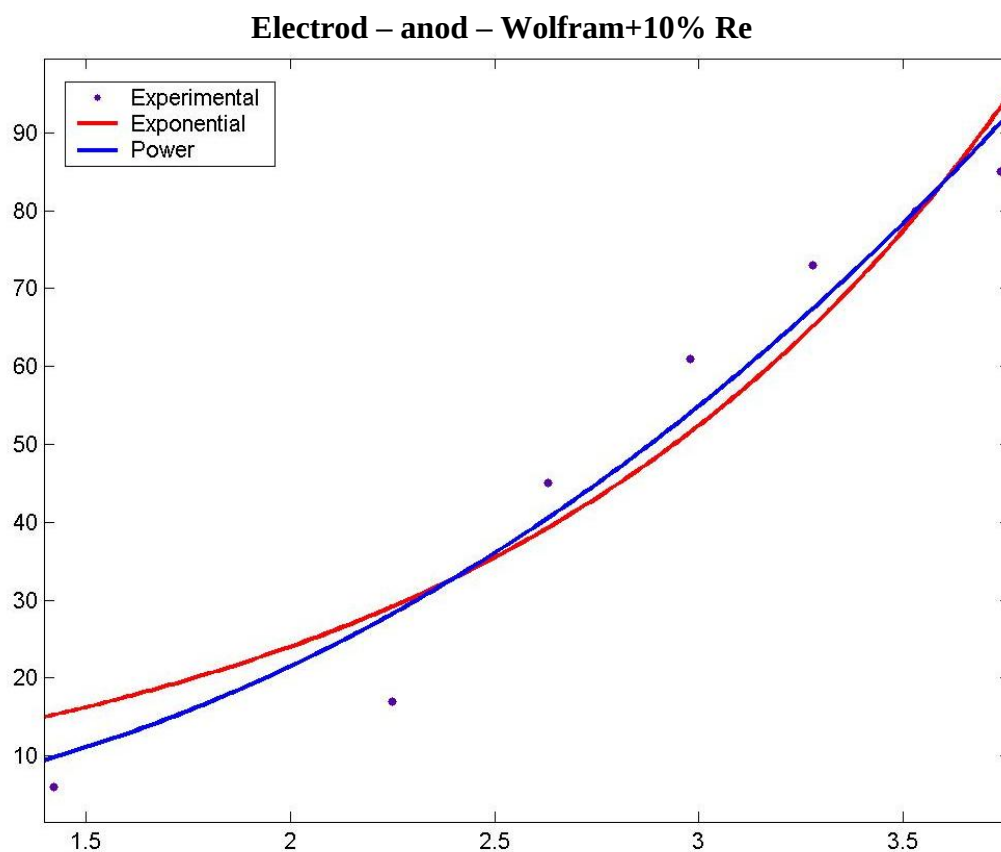


Fig. A2.4. Aproximarea dependenței schimbării masei catodice a electrodului de densitatea de energie W_s/S folosind programul MATLAB 5.0. Materialul electrodului anod – Wolfram+10%Re

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

a = 5.037 (-1.394, 11.47)

b = 0.7807 (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 (-0.4342, 9.102)

b = 2.311 (1.407, 3.215)

Goodness of fit:

SSE: 280

R-square: 0.9516

Adjusted R-square: 0.9419

RMSE: 7.484

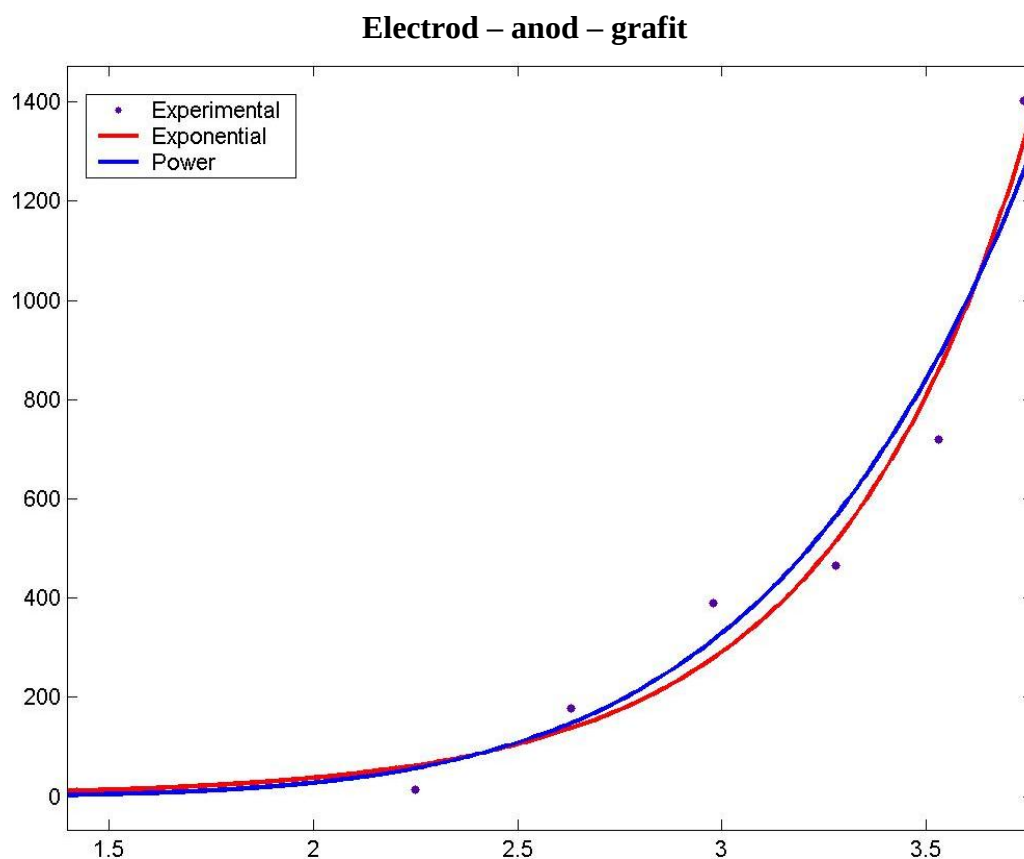


Fig. A2.5. Aproximarea dependenței schimbării masei catodice a electrodului de densitatea de energie W_S/S folosind programul MATLAB 5.0. Materialul electrodului anod - grafit

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

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

Anexa 3. Electrtrozi-sculă (desen de ansamblu)

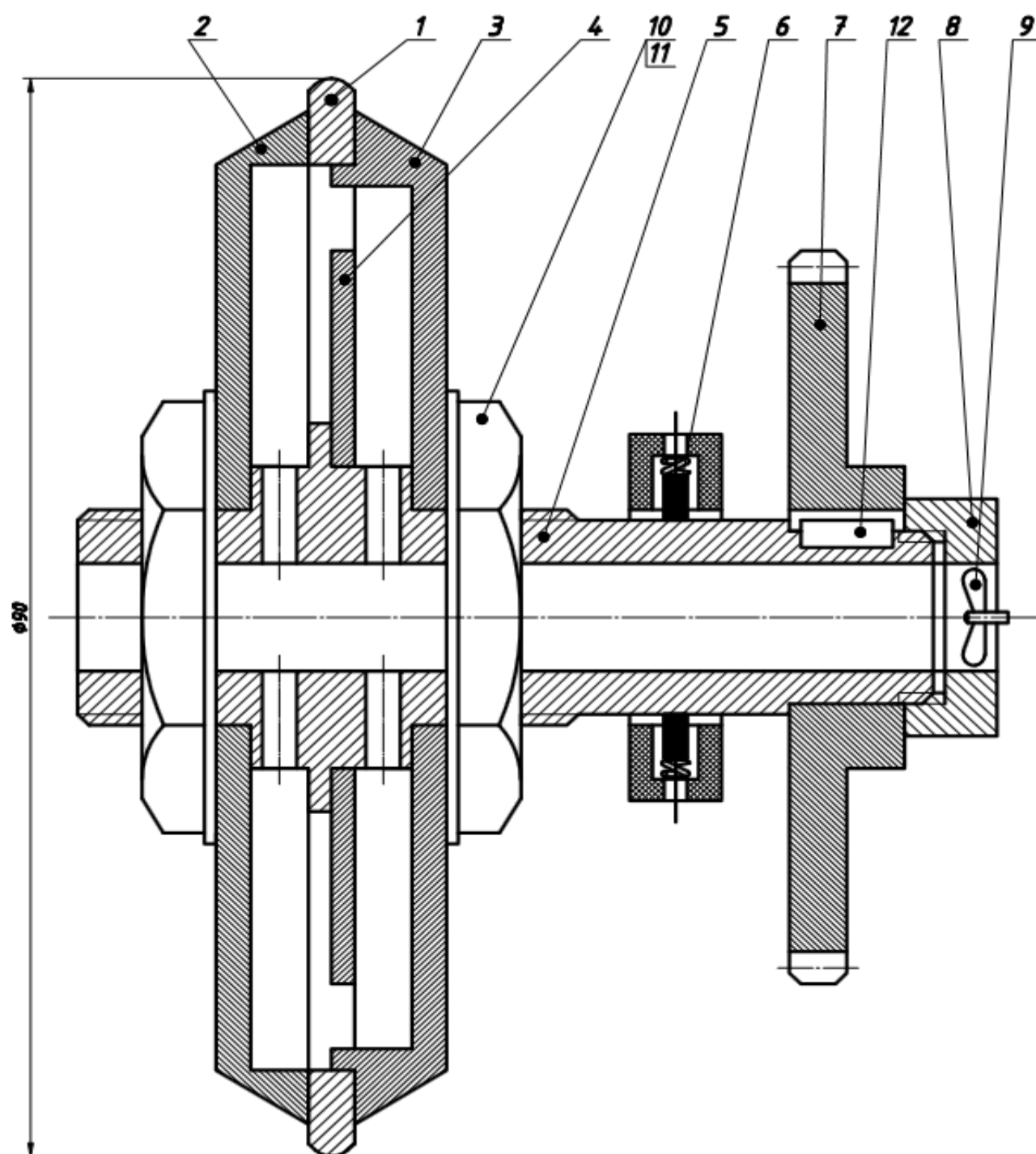


Fig.A3.1. Electroculă în vedere de ansamblu

					UTM.TD-00.00.01.DA							
					Electrod-sculă (desen de asamblare)	Litera			Masa		Scara	
Mod	Coala	Nº document.	Semnăt.	Data						2x1		
Elaborat		Pînzaru N.										
Verificat												
Contr.t.												
					150	Coala			Coli 1			
Contr. n.						UTM, FIMIT, DIMI						
Aprobat												

[illegible]

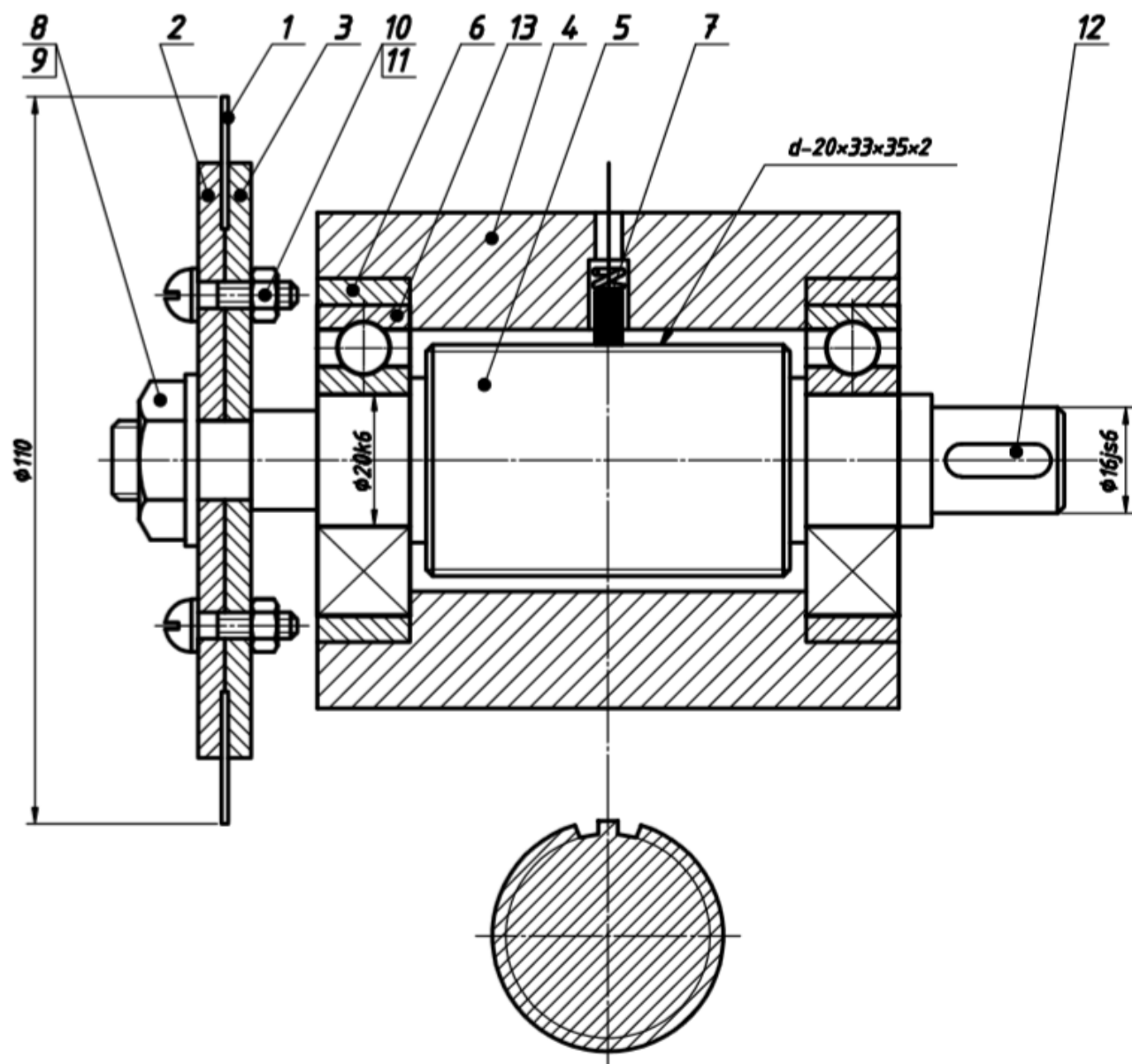


Fig.A3.2. Electroculă în vedere de ansamblu

					UTM.TD-00.00.02.DA							
					Electrod-sculă (desen de asamblare)	Litera			Masa		Scara	
Mod	Coala	Nº document.	Semnăt.	Data						1x1		
Elaborat		Pinzaru N.										
Verificat												
Contr.t.												
					152	Coala			Coli 1			
Contr.n.						UTM, FIMIT, DIMI						
Aprobat												

Format	Zona	Poziția	Notăția	Denumirea	Nr.	Notă	
				Documentație			
A4			UTM.TD-00.00.02.DA	Desen de asamblare	1		
				Piese			
		1	UTM.TD-00.00.02.01	Electrozi elementari	20	Wolfram	
		2	UTM.TD-00.00.02.02	Bucșă de fixare	1	Oț45	
		3	UTM.TD-00.00.02.03	Bucșă de fixare	1	Oț45	
		4	UTM.TD-00.00.02.04	Corp	1	Ebonită	
		5	UTM.TD-00.00.02.05	Arbore	1	Oț45	
		6	UTM.TD-00.00.02.06	Bucșă	2	Oț45	
		7	UTM.TD-00.00.01.07.DA	Conexiune electrică	1		
				<u>Articole standard</u>			
		8		Șaibă 12 GOST 11371-68	1		
		9		Piuliță M12 GOST 5915-70	1		
		10		Șurub M4x12 GOST 17473-84	4		
		11		Piuliță M4 GOST 2524-70	4		
		12		Pană 5x5x16 GOST 23360-78	1		
		13		Rulment 204 GOST 8338-75	2		
					UTM.TD-00.00.02.DA		
Mod	Coala	Nr document	Semnăt	Data			
Elaborat.		Pînzaru N.			Electrod-sculă (desen de asamblare) UTM, FIMIT, DIMI		
Verificat							
Contr. tehn.							
Contr. norm.							
Aprobat							
					Litera	Coala	Coli
					î		1



Fig. A3.1. Diplom de gradul II la Conferința internațională „Машиностроение и техносфера XXI века”



Fig. A3.2. Diploma „The XVIII-th International Exhibition of Research, Innovation and Technological Transfer” Inventica 2014



Fig. A3.3. Diploma „The XIX-th International Exhibition of Research, Innovation and Technological Transfer” Inventica 2015



Fig. A3.4. Diplomă „Fair of Inventions and Practical Ideas” Invent-Invest 2016



Fig. A3.6. Diploma „Salonul Internațional de Inventică PRO INVENT” 2015



Fig. A4.1. Brevet de invenție

Anexa 5. Certificate de participare



Fig. A5.1. Certificat de participare la Colocviul științific „Orientări actuale în cercetarea doctorală” 2017



Fig. A5.2. Certificat de participare la Conferința științifică internațională „Relevanța și Calitatea Formării Universitare: Competențe pentru Prezent și Viitor” 2015

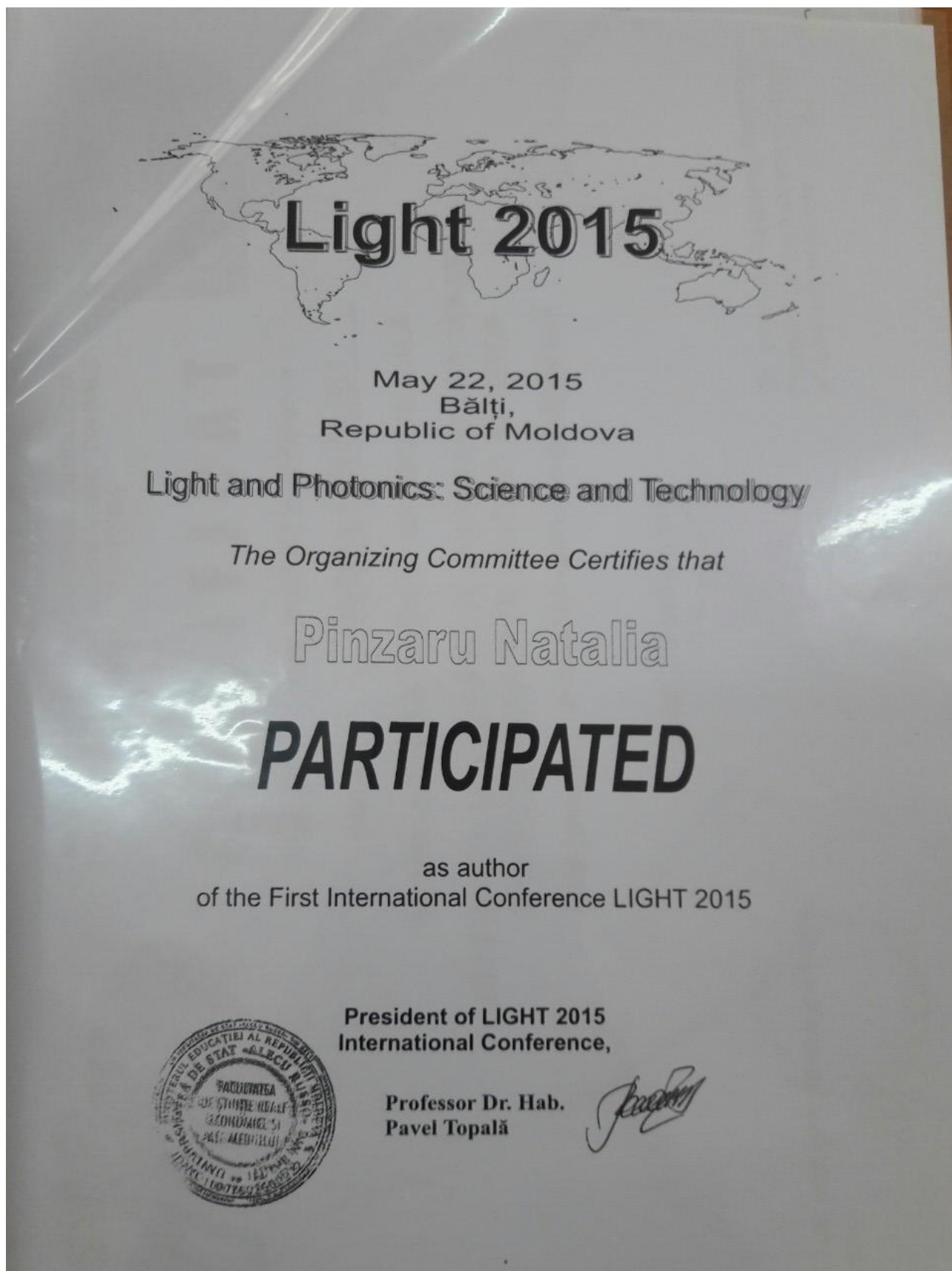


Fig. A5.3. Certificat de participare la Conferința internațională „Light and Photonics: Science and Technology” 2015



Fig. A5.4. Certificat de participare Simpozionul internațional „Achievements and Perspectives in Agricultural Engineering and Auto Transport” 2018

Anexa 6. Act de implementare

Aprob

Directorul Î.S. «Fabrica de Sticlă din Chișinău»

I. Cîrstea



Aprob

Prorectorul pentru activitatea științifică și
relații internaționale al USARB

conf. univ., dr. V. Prițcan



Act de implementare

Noi, subsemnații reprezentanți ai USARB, Președintele Consiliului Științific, dr. hab., prof. univ. P. Topală, doctoranzii N. Pinzaru, L. Marin, D. Guzman și doctorandul UTM Cosovschi P. pe de o parte și reprezentanții Î.S. «Fabrica de Sticlă din Chișinău», director de producere Brînzilă G. și director tehnic Baburin A., prin prezentul act confirmă, că propunerile făcute în baza cercetărilor experimentale comune pozitive a procedurii de formare a depunerilor de grafit pe suprafețele active ale formelor de turnare a sticlei în scopul sporirii proprietăților anti-aderență și anti-uzură, sunt acceptate spre implementare în producere la Î.S. «Fabrica de Sticlă din Chișinău». La fel, spre implementare este acceptată tehnologia și metodologia de formare a depunerilor de grafit cu aplicarea electrozilor-scule special elaborați.

Directorul de producere

G. Brînzilă

Directorul tehnic

A. Baburin

Președintele Consiliului Științific,

dr. hab., prof. univ. P. Topală

Doctoranzii

N. Pinzaru

L. Marin

D. Guzman

P. Cosovschi

DECLARAȚIA PRIVIND ASUMAREA RĂSPUNDERII

Subsemnata Pînzaru Natalia, declar pe răspundere personală că materialele prezentate în teza de doctorat sunt rezultatul propriilor cercetări și realizări științifice. Conștientizez că, în caz contrar, urmează să suport consecințele în conformitate cu legislația în vigoare.

Pînzaru Natalia

Semnătura

Data