

**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**

Autoreferatul tezei de doctor în tehnică

**Chișinău, 2020**

**Teza a fost elaborată la Universitatea Tehnică a Moldovei  
Școala doctorală „Inginerie Mecanică și Civilă”**

**Conducători științifici:**

**TOPALĂ Pavel**, dr. hab., prof. univ., Universitatea de Stat „Alec Russo” din Bălți  
**STOICEV Petru**, dr. hab., prof. univ., Universitatea Tehnică a Moldovei

**Referenți oficiali:**

**Ionescu Nicolae** dr.ing., prof. univ., Universitatea Politehnică din București, Romania;  
**Nagîț Gheorghe** dr.ing., prof. univ., Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, Romania

**Componența Consiliului Științific Specializat** (conform Hotărârii CNAA nr. 1 din 06 decembrie 2019):

**Dulgheru Valeriu** președinte, dr. hab., prof. univ., Universitatea Tehnică a Moldovei;  
**Bodnariuc Ion** secretar, dr. conf. univ., Universitatea Tehnică a Moldovei;  
**Bostan Ion** acad., dr. hab., prof. univ., Universitatea Tehnică a Moldovei;  
**Marian Grigore** dr. hab., prof. univ., Universitatea Agrară de Stat a Moldovei;  
**Muscă Gavril** dr. ing., prof. univ., Universitatea Tehnică „Gh. Asachi” din Iași Romania;  
**Dodun Oana** dr. ing., prof. univ. Universitatea Tehnică „Gh. Asachi” din Iași Romania;

Susținerea va avea loc la **06 martie 2020, ora 14<sup>00</sup>** în ședința Consiliului Științific Specializat **D 242.05-131** din cadrul Universității Tehnice a Moldovei, **blocul de studii nr. 6, aula 415**, str. Studenților nr. 9, Chișinău, MD-2045, Republica Moldova

Teza de doctor și autoreferatul pot fi consultate la biblioteca Universității Tehnice a Moldovei, precum și pe site-ul CNAA ([www.cnaa.md](http://www.cnaa.md))

Autoreferatul a fost expediat la „\_\_\_\_\_” 2020

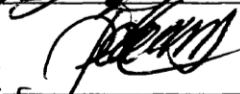
**Secretar științific**

al Consiliului Științific Specializat, dr. în tehn.

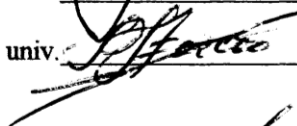
  
Bodnariuc Ion

**Conducători științifici:**

dr. hab. în tehn., prof. univ.

  
Topală Pavel

dr. hab. în tehn., prof. univ.

  
Stoicev Petru

**Autor**

  
Pinzaru Natalia

© Pinzaru Natalia, 2020

## Repere conceptuale ale cercetării

**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 procedeele 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 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.

**Metodologia cercetării științifice.** În calitate de obiect al cercetărilor au servit electrozii-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: aliere prin scânteie electrică, 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, 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, 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.

## Conținutul tezei

**Introducerea** conține aspecte ce țin de actualitatea și importanța temei de cercetare, alegerea obiectului cercetării, formularea scopului și obiectivelor tezei de doctorat.

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.

Astfel petru „scânteia electrică” [45], „micro-electro discharge” [46] 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  $2 \cdot 10^{-6}$  până la  $10^{-3}$  m, au o durată a impulsului de curent din interstițiu de  $10^{-8} \dots 10^{-4}$  s, căderea sumară de tensiune pe electrozi constituie cca 20V, iar între electrozi se formează un nor de plasmă și toate acestea decurg în medii dielectrice.

**Capitolul I** sintetizează stadiul actual al cercetărilor teoretice și experimentale privind proiectarea electrozilor-scule aplicați la prelucrarea prin electroeroziune, se prezintă o stare a lucrurilor privind conceperea, proiectarea și elaborarea electrozilor-scule aplicați la prelucrarea materialelor cu descărcări electrice în impuls. Se stabilește ca pentru cazul prelucrărilor dimensionale sunt structurate bune criterii de proiectare și elaborare a acestora, pe când pentru noile procedee de prelucrare cu formarea și modificarea proprietăților, aceste criterii poartă un caracter mai mult aleatoriu și nu sistematizat. 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. 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 [5]. Descărcările electrice se amorsează succesiv și se localizează selectiv în diferite zone ale spațiului dintre elctrod și semifabricat, numit interstițiu, în funcție de realizarea locală a condițiilor de formare a descărcării. 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 [23]. 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).

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 [5].

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.

E-S confecționați din diferite materiale se recomandă a fi utilizați cum urmează: cei din cupru – prelucrării dimensionale de degroșare, alamă – prelucrării 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 [12].

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.

**În capitolul II** se prezintă metodica cercetării experimentale și echipamentului aplicat. În acesta se descrie amănunțit modul de alegere a materialelor, parametrii tehnico-tehnologici măsurați, modul de măsurare, modul de stocare și prezentare a rezultatelor măsurătorilor, sunt determinați factorii de intrare și ieșire pentru fiecare dintre procedeele de prelucrare, se prezintă

metodele de cercetare contemporane de cercetare utilizate în lucrare (SEM, EDX, XPS), precum și metodele de modelare a proceselor de cercetare, etc.

Pentru efectuarea cercetărilor privind eroziunea electrică a electrozilor-sculă sub acțiunea descărcărilor electrice în impuls, a fost proiectată și elaborată o instalație experimentală, schema electrică a căreia este prezentată în figura 1. 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 [9].

Pentru variația mărimii interstițiului, în procesul cercetărilor sa utilizat dispozitivul care este reprezentat în figura 2. 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.

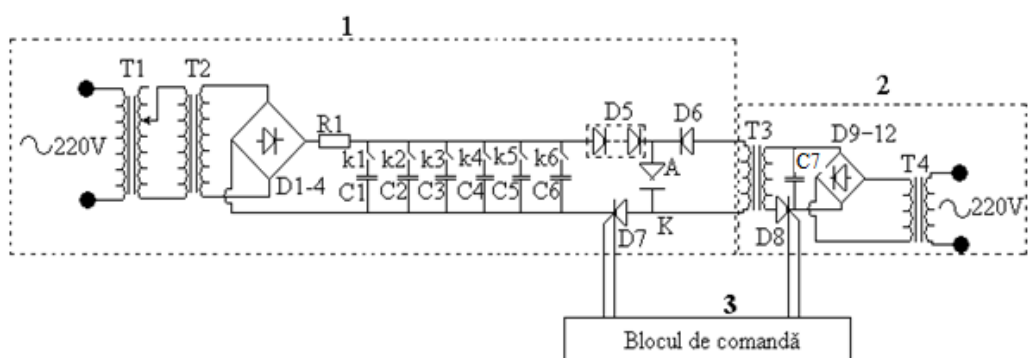


Fig. 1. Schema electrică principală a instalației [9]

1 – generator de impulsuri de putere; 2 – blocul de amorsare; 3 – blocul de amorsare

Pentru reglarea fină (precisă) a interstițiului se folosește mânerul (3). Măsurarea interstițiului se efectua cu ajutorul unui comparator cu cadran cu precizia de 0,01 mm. După stabilirea interstițiului, mărimea lui se controla permanent cu ajutorul microscopului de măsurat MPB-2 [48].

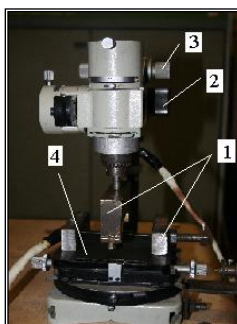


Fig.2. Dispozitiv pentru variația interstițiului în baza microscopului [48]: 1- dispozitive de întindere a electrozilor sub formă de sârmă; 2 - mâner de reglare brută a interstițiului; 3- mâner de reglare fină a interstițiului; 4- masa de lucru

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 [48].

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.

**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 (JI63 GOST 15527-70), bronz (Бр. А5 GOST 18175-72) [10].

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.

**Modul de prelucrare a suprafețelor.** Pentru realizarea cercetărilor se elaborau probe de formă cilindrică sau plană din aliaje ale WRe, cupru, aluminiu, grafit și oțel.

Scheme de poziționare a electrozilor, utilizați în procesul cercetărilor experimentale și conectarea acestora în circuitul de descărcare al generatorului de impulsuri de curent sunt prezentate în fig. 3.

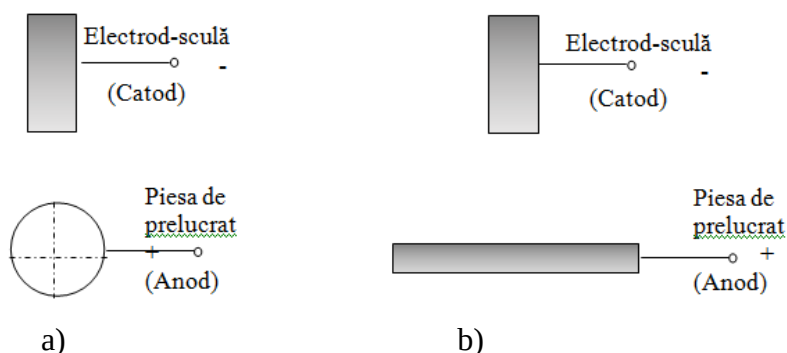


Fig. 3. Scheme de poziționare a electrozilor utilizate în procesul cercetărilor experimentale și conectarea acestora în circuitul de descărcare al generatorului de impulsuri de putere: a) cazul piesei cilindrice; b) cazul piesei plane.

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. 3).

**Determinarea mărimii masice a eroziunii.** 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.

**Aplicarea microscopiei optice și electronice la cercetarea suprafețelor.** În această lucrare pentru analiza morfologiei suprafețelor prelucrate a fost utilizat microscopul optic XIM600 [11] 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  $0,15\mu\text{m}$ .

Pe lângă microscopul optic pentru cercetarea morfologiei probelor și a electrozilor-scule a fost utilizat și microscopul electronic Vega TeScan 5130.

**Metode de planificare matematică a experimentului. 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.

Coeficienții ecuațiilor dependențelor tehnologice au fost determinați cu ajutorul programelor Microsoft Office Excell 2010 și MatLab ver. 6.5 [13, 14].

**Capitolul III** este unul experimental și descrie condițiile de străpungere a interstițiului și de formare a canalului de plasmă, procesele fizico-chimice ce se produc în interstițiu și în suprafețele electrozilor, interacțiunea plasmei DEI cu suprafețele electrozilor, comportarea E-S la formarea depunerilor cu rupere de contact, formarea depunerilor din grafit, modificarea microgeometriei suprafețelor și procesul de oxidare a suprafețelor metalice cu aplicarea DEI în regim de subexcitare, cât și la formarea peliculelor de grafit. Se cercetează și analizează comportamentul electrozilor-scule în funcție de parametrii energetici, mărimea interstițiului și parametrii temporari de prelucrare.

Metoda prelucrărilor prin electroeroziune s-a bifurcat în două direcții distincte cum ar fi prelucrarea dimensională [15] și formarea straturilor de suprafață cu: formarea depunerilor din materiale compacte [16], pulberi [21, 16] sau modificarea compoziției chimice a acestora prin difuzia elementelor din mediul de lucru [15]. 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 [16-20] 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.

Mărimile indicate sunt diferite, iar redistribuirea lor are loc atât în funcție de materialul de execuție al piesei-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 aer în condiții normale pentru electrozii 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.

**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 fabricare a electrozilor, cât și condițiile de funcționare a acestora.

În figurile 4 și 5 sunt prezentate variațiile maselor catodilor executați din oțel și titan și, respectiv, a anozilor 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 catodilor (fig. 4) 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 mai puternică a catodului, iar pentru  $S > 1,2 \div 1,5$  mm, uzura catodului este mai puțin evidențiată, deoarece la interstii mai mari energia acumulată pe baterea de condensatoare a generatorului de impulsuri se degajă preponderent în interstițiu și mai puțin pe suprafața electrodului [17].



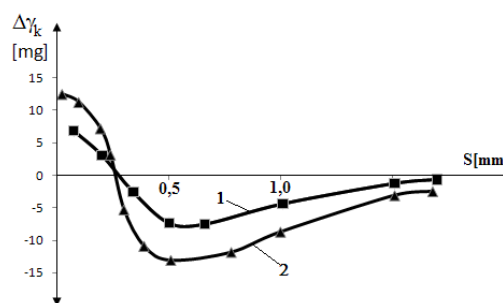


Fig. 4. Variația masei catodului din oțel (1) și titan (2) în funcție de mărimea interstițiului;  $U_c=240V$ ;  $f=40Hz$ ; timpul specific de prelucrare  $-1min/cm^2$ .

Cu creșterea valorilor interstițiului se micșorează, de asemenea și eroziunea anozilor din cupru și oțel (fig. 5). Eroziunea anodului din grafit are un caracter diferit de cel al anozilor din oțel și cupru (fig. 5) și asemănător cu cel al catodului metalic (fig. 4).

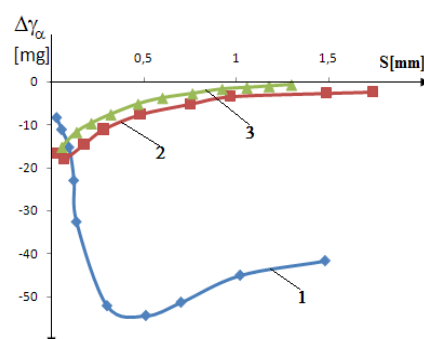


Fig. 5. Variația masei erodate a anodului din grafit (1), oțel 45 (2) și cupru tehnic pur M0 (3) în funcție de mărimea interstițiului;  $U_c=240V$ ;  $f=40Hz$ ;  $t=1min/cm^2$ .

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.

În continuare s-a cercetat 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. După cum se poate observa din aceste dependențe, uzura electrozilor-sculă se mărește în toate cazurile odată cu creșterea energiei acumulate pe bateria de condensatoare.

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.

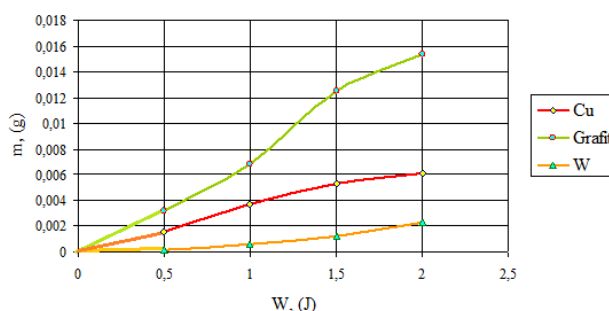


Fig. 6. Variația masei probei cu depunere în funcție de energia acumulată pe bateria de condensatoare pentru electrodul-sculă confecționat din cupru, wolfram și grafit:  $f=5Hz$ ,  $C=600\mu F$ ,  $S=5mm$  (partea activă a electrozilor-sculă are forma unei semisfere)

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 sunt prezentate pe un singur grafic fig. 6, dat fiind faptul că cercetările s-au executat în aceleași condiții.

După cum a fost menționat mai sus, cercetările au fost supuse nu numai electrozilor-scule cu suprafața activă ascuțită până la semisferă dar și electrozilor-scule 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.

În figura 7 se prezintă variația uzurii electrozilor-sculă pentru toate trei materiale în raport cu variația energiei acumulate pe bateria de condensatoare.

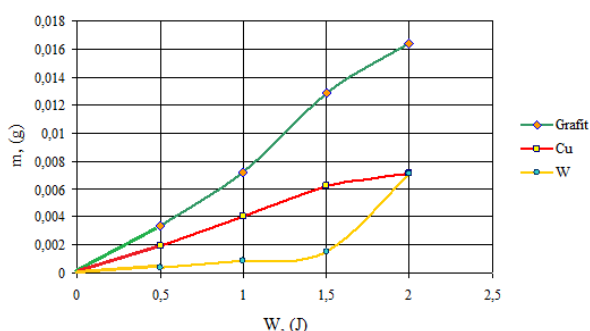


Fig.7. Variația masei probei cu depunere în funcție de energia acumulată pe bateria de condensatoare pentru electrozii-sculă confecționați din grafit, Cu și W:  $f=5\text{Hz}$ ,  $C=600\mu\text{F}$ ,  $S=5\text{mm}$  (partea activă a electrodului-sculă are forma unui con)

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.** La construcția dependenței de eroziune masice a electrodului în funcție de diametrul (fig. 8) 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.

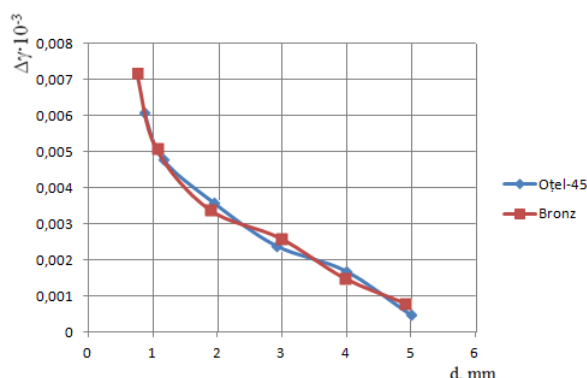


Fig. 8. Curbele comparative a eroziunii electrice a electrozilor din oțel 45 și bronz, în funcție de diametrul pentru: frecvența de lucru  $f=5\text{Hz}$ ,  $C=600\mu\text{F}$ ,  $S=5\text{mm}$  [41]

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 materialul 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 pentru a asigura eficiența energetică și cantitatea maximă de material prelevat, iar formarea depunerilor din pulberi fără participarea materialului electrodului este mai bine de utilizat electrozi cu diametre mai mari (de sârmă sau tije) pentru a asigura o răcire mai eficientă prin conductibilitate termică și pentru a minimiza eroziunea E-S și a asigura compoziția depunerii formate în acest caz ar fi mai corect să vorbim despre secțiunile transversale mari [22]. 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.

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. 9. După cum se observă din fig. 9 dependența poartă un caracter exponențial, fiind cea mai pronunțată la wolfram, iar cel mai rezistent la eroziune electrică – oțel inox, din motivul că este mai inert la interacțiune cu oxigenul din aer.

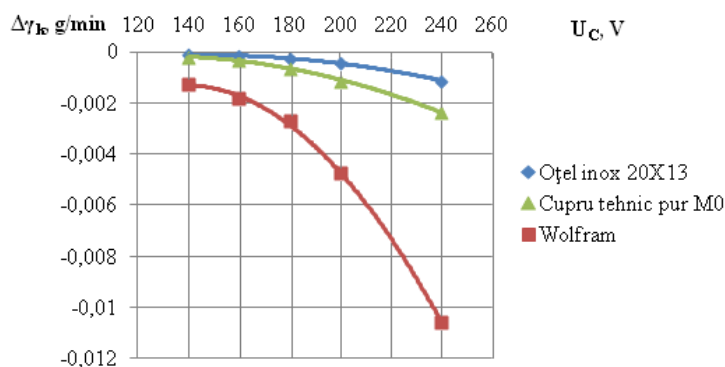


Fig. 9. Eroziunea în timp a E-S ca funcție de tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare a generatorului de impulsuri de curent pentru: oțel inox 20X13, cupru tehnic pur M0 și wolfram ( $f=5\text{Hz}$ ,  $C=600\mu\text{F}$ ,  $S=5\text{mm}$ ) [41]

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.

Necâtând 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. 10 și 11.

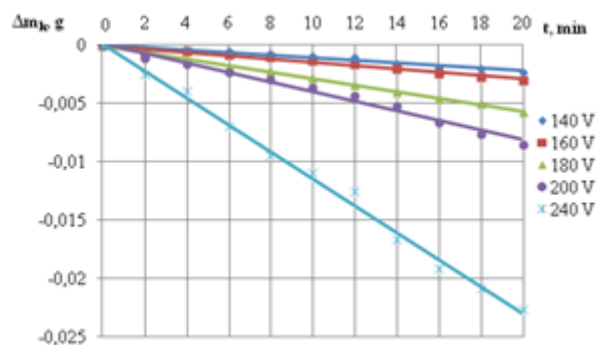


Fig. 10. Eroziunea electrodului-sculă-catod din oțel inox 20X13 în funcție de durata de prelucrare pentru diferite tensiuni de încărcare a bateriei de condensatoare a generatorului de impulsuri la:  $f=5\text{Hz}$ ,  $C=600\mu\text{F}$ ,  $S=5\text{mm}$  [41]

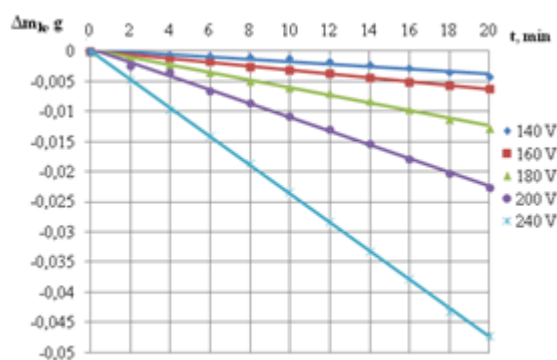


Fig. 11. Eroziunea electrodului-sculă-catod din wolfram funcție de regimul energetic de prelucrare (tensiune de încărcare a bateriei de condensatoare a generatorului de impulsuri):  $f=5\text{Hz}$ ,  $C=600\mu\text{F}$ ,  $S=5\text{mm}$  [41]

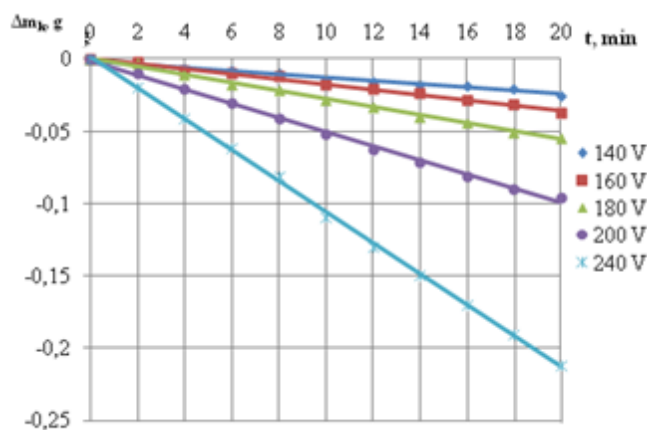


Fig. 12. Eroziunea masei electrodului-sculă-catod din cupru tehnic pur M0 funcție de regimul energetic de prelucrare (tensiune de încărcare a bateriei de condensatoare a generatorului de impulsuri):  $f=5\text{Hz}$ ,  $C=600\mu\text{F}$ ,  $S=5\text{mm}$  [41]

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.

**Capitolul IV** este dedicat elucidării și argumentării modului de alegere a materialului constructiv, calculului dimensiunilor, alegerii formei și modului de realizare a ES pentru fiecare dintre procedeele de prelucrare superficială enunțate mai sus.

Una din metodele contemporane de prelucrare a materialelor, este cea a electroeroziunii [23]. Ea permite realizarea pieselor de forme complicate și dimensiuni mici prin prelevare de material de pe suprafața semifabricatului [23, 24], sau formarea straturilor de depunere cu aplicarea electrozilor executați din materiale compacte [16, 21, 22, 25] sau prin introducerea în interstițiu a pulberilor [21, 26] sau amestecurilor de pulberi [27]. 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 [23, 24]; 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 [28]; nu necesită pregătiri speciale ale suprafețelor înainte de prelucrare [26]; asigură precizie înaltă de prelucrare a suprafețelor și rugozitate joasă [29], 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 [30, 31].

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 s-a ramificat așa după 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 reducerea 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 care 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 [32-35]. 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 [35, 36]:

- 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 îi 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 depuneri cu aplicarea DEI este foarte simplă, iar utilajul necesar e de dimensiuni mici, ușor transportabil. 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.

**Alegerea formei și materialului electrodului pentru formarea depunerilor din pulberi.** Pentru confecționarea electrodului este necesar de ales un material mai rezistent la eroziune, deoarece uzura 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 [37]. Stabilitatea la eroziune a materialelor se determină de proprietățile termofizice ale lor:

$$\gamma = c\rho\lambda T_{nn}^2, \quad (1)$$

în care:  $c$  - capacitatea termică (F);

$\rho$  - densitatea ( $\frac{kg}{m^3}$ );

$\lambda$  - conductibilitatea termică corespunzător ( $\frac{J}{kg \cdot K}$ );

$T_{nn}^2$  - temperatura de topire (K).

Conform acestor indici mai bine s-ar potrivi Cu, W și grafitul, iar dintre compoziții cel mai bine s-ar comporta 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. 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.

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:

$$v = fd, \text{ (m/s)} \quad (2)$$

în care:  $f$  – frecvența succesiunii impulsurilor de lucru (Hz);

$d$  – diametrul zonei de interacțiune a canalului de plasmă cu suprafața electrodului (mm).

Frecvența impulsurilor de lucru se stabilește la generator, iar  $d$  – diametrul zonei de interacțiune a descărcării unitare pe anod, se calculează cu relația [49]:

$$d = \sqrt{\frac{4W}{QS}} \text{ (mm)}. \quad (3)$$

sau se determină experimental.

**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 diferite:

- a) materialul electrodului-sculă nu participă la formarea depunerii;
- b) electrodul-sculă este supus prelevării de material 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 [9, 32]:

$$B = \sqrt{c\rho\lambda}, \quad (4)$$

în care  $c$  – capacitatea termică specifică (F);

$\rho$  - densitatea specifică a materialului  $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$ ;

$\lambda$  - conductivitatea termică a metarialului  $\left(\frac{J}{kg \cdot K}\right)$ .

În calitate de așa material poate fi recomandat Cu, aliaje CuW sau grafit. Primele două asigură o rezistență mare la eroziune datorită coeficientului mare de acumulare a căldurii, iar grafitul este eficient și ușor prelucrabil. 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.

**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 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.

**Construcția electrodului-sculă pentru oxidarea suprafețelor complexe cu aplicarea DEI.** În fig. 13, *a* este prezentat desenul de ansamblu a electrodului-sculă, specificul constructiv al unei plăci conductoare fig. 13, *b* și al unei plăci de fixare fig. 13, *c*.

Electrodul-sculă propus în invenție [38] conține: plăcile conductoare – 1 și 2; două plăci de fixare 3; electrozii elementari – 4; tijele 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 în felul următor: 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 de prelucrare a piesei; apoi prin intermediul plăcilor de fixare 3 se fixează simultan toți electrozii elementari 4 – poziție în care se copie suprafața de prelucrare 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 și ulterior se cuplează generatorul de impulsuri de curent.

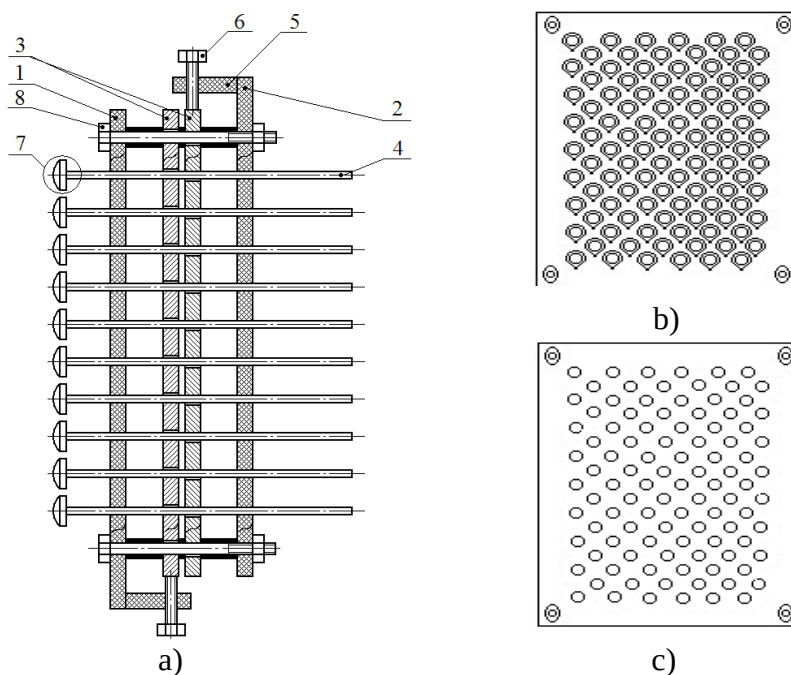


Fig. 13. Electroculul-sculă pentru oxidarea suprafețelor complexe cu DEI [38]

Varianța propusă a electroculului este brevetată [38].

Pe perioada de prelucrare fiecare dintre electrozii elementari prelucurează o anumită porțiune din aria suprafeței piesei, iar piesa conectată în calitate de catod la generatorul de impulsuri de curent și electroculul-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 sau prezența gazelor inerte ca de exemplu argon) sau chimico-termică a acestuia (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 electrocului-sculă pe mașina-unealtă [38].

**Elaborarea electrocului-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 [39]. Este cunoscut faptul, că proprietățile suprafețelor se pot diviza în: mecanice, fizice, chimice, tehnologice, etc, iar reacția de răspuns a acestuia cu mediul înconjurător adesea este determinată de aria suprafeței active a piesei. 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 [39], 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. 14 sunt prezentate două procedee aplicate la modificarea microgeometriei suprafețelor. Schema prezentată în fig. 14, a presupune utilizarea unui electrod executat din grafit și ascuțit conic la capătul activ sub un unghi de  $88...90^\circ$ . În acest caz electrodului-sculă i se vor transmite mișcări de avans după toate cele trei direcții ale spațiului: x, y și z.

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.

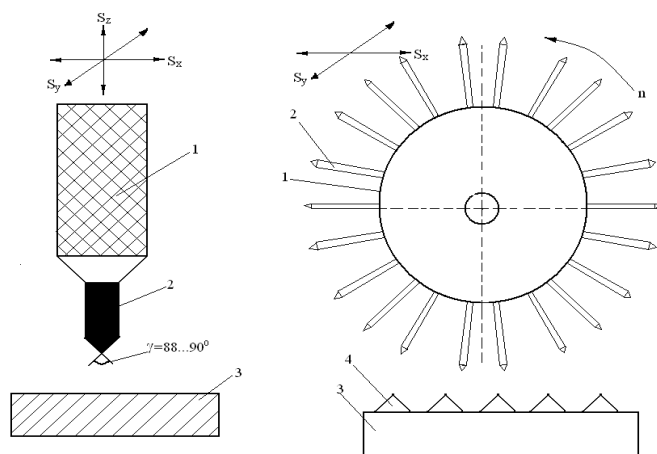


Fig. 14. Scheme de prelucrare și E-S pentru modificarea micro geometriei suprafețelor [39]: a) prelucrarea suprafeței plane (3) cu electrod-bară (2) fixat în mandrină, și deplasat după cele trei direcții ale spațiului x, y și z; b) prelucrarea suprafeței plane cu aplicarea electrodului-sculă rotitor (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 realtiv mare, cu atât mai mult că dimensiunile zonei de încălzire nu depășesc limitele de  $100\mu m$ .

## 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 [40];

- 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) [41, 42];

- 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 [43] 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 [38];

- 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 [18, 44];.

## 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, ce posedă rezistență înaltă la electroeroziune.

**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 fabricați din din materiale și aliajele noi ce vor apărea în continuare sau celor executați din materioale compozite și dispun de un coeficient mare de acumulare a căldurii;
- 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 întreprinderi.

## 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. Kiseliiov 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. 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.
6. 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.
7. Slătineanu L. Tehnologii neconvenționale în construcția de mașini. Chișinău: TEHNICA-INFO, 2000. 252 p.
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. 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.
10. Cernenco L., Snejco L., Papanova I. Acquisition of surfaces by means of anodesparking electrolysis Himia, 2, 1991. p. 128.
11. Transmission & Reflection Microscope Operation Manual XJM600. Serial Number (S.N.) 20104108. Broșura microscop. Date of manufacture: 18.04.2010.
12. Намилов Е. Справочник по электроэрозионной обработки материалов. Ленинград: Машиностроение, 1989. стр.164.
13. Самоходский А., Кулявский М. Лабораторные работы по металловедению. Москва: Машиностроение, 1971.
14. ГОСТ 9350-76. Изменение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. Ввод 01.01.1977.
15. 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.
16. Гитлевич А., Топала П., Снегирёв В., Игнатьков Д. Особенности электрической эрозии электродов при импульсных разрядах, протекающих в режиме недонапряжения. ЭОМ, №3, 1988. стр. 9-12.
17. 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.
18. **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. Chișinău, 2018. ISBN 978-9975-64-300-9. pg. 297-304.
19. 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
20. Topala P., **Pînzaru 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.
  21. Гитлевич А., Михайлов В., Парканский Н., Ревуцкий В. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Кишинев: Штиинца, 1985. 196 с.
  22. **Pînzaru N.** Experimental investigations on the durability of toolectrodes at the surface processing by pulsed electrical discharge. International Journal of Modern Manufacturing Technologies. Vol. IX, No. 2, 2017, p. 59-64. ISSN 2067–3604, 2017. (**Revista cotată SCOPUS**).
  23. Nanu A., Nanu D. Prelucrarea dimensională prin eroziune electrică în câmp magnetic. Timișoara: Facla, 1981. 307 p.
  24. Лазаренко Б., Лазаренко Н. Электрическая эрозия металлов. Госэнергоиздат 48. Москва: Ленинград, 1944, 58 с.
  25. 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.
  26. Парканский Н. Исследования процесса электроискрового нанесения покрытий из порошковых материалов в электрическом поле. Дисс. канд. техн. наук, Киев: Институт проблем материаловедения АН УССР.
  27. 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.
  28. Мицкевич М., Бушик А., Бакуто И., Шилов В., МРОЧЕК Ж. с. 730522 (С.С.С.Р.) Способ электрического нанесения тонкослойных покрытий. Авт. изобрет. Ад. – Опубл. в БИ № 16 1980.
  29. 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.
  30. Topală P., Slătineanu L., Dodun O., Coteață M. and **Pînzaru N.** Electrospark Deposition by Using Powder Materials. Materials and Manufacturing Processes. 25: 932–938, 2010 Copyright © Taylor & Francis Group, LLC ISSN: 1042-6914 print/1532-2475 online DOI: 10.1080/10426910903447238. p. 932-938 (**Revistă cu factor de impact 1,63**).
  31. 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.
  32. 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.
  33. Cernenco L., Snejco L., Papanova I. Acquisition of surfaces by means of anodesparking electrolysis Himia, 2, 1991. p. 128.
  34. Topală P., Ghitlevich A., Kornienko L. Corrosive behavior of titanium with electrosparking surfaces. Protection of metals, Vol. 29, No. 3, 1989. p. 351-356.
  35. Alai S. Practical studies in machinery. Manual for teacher training institute students. Moscow: Prosveshenie. 1979. p. 67-70.
  36. 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,
  37. Золотых Б. Н. О физической природе электроискровой обработки металлов. Москва: АН СССР, 1957. стр. 38 – 69.

38. 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.
39. Topală P., Stoicev P. Tehnologii de prelucrare a materialelor conductibile cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls. Chișinău: TEHNO-INFO, 2008. p.265
40. Topală P., **Pînzaru N.** Criteria for projecting tool-electrodes applied in the formation of surface layers with electric discharges in pulse. Buletinul Institutului Politehnic din Iași. Universitatea Tehnică „Gh. Asachi” din Iași. Tomul LIV (LVIII), fasc. 2, 2008. Secția Construcții de mașini. 12<sup>th</sup> International Conference-TMCR-2008. Iași, România, May 29-31, 2008. ISSN 1011-2855. pg.
41. **Pînzaru N.** Experimental investigations on the durability of toolectrodes at the surface processing by pulsed electrical discharge. International Journal of Modern Manufacturing Technologies. Vol. IX, No. 2, 2017, p. 59-64. ISSN 2067–3604, 2017. (**Revista cotată SCOPUS**).
42. **Пынзару Н.** Электроэрозионные эффекты на поверхности электрода-инструмента, используемого для формирования поверхностных слоев деталей. Машиностроение и техносфера XXI века, Донецк, 2011.
43. 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.
44. 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.
45. Tosun N., Cogun C., Pihili H. The Effect of Cutting Parameters on Wire Crater Sizes in Wire EDM. Springer-Verlag London Limited. Int.: Adv Manuf. Technol (2003) 21: 857-865p.
46. 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.
47. 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.
48. 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.
49. Топала П., Душенко В., Гитлевич А. Об условиях образования расплава на поверхности детали – катода при электроискровом легировании на установках типа Разряд. Кишинев: Электроная обработка материалов, № 6, 1990. С. 17-18.

## ADNOTARE

**Pînzaru Natalia, „Cercetări privind conceperea, proiectarea și elaborarea „electrozilor-scule” pentru formarea straturilor de suprafață cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls”, teză de doctor, Chișinău, 2019.**

**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 utilizate la prelucrarea dimensională prin electroeroziune.

**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, 125 страниц (до библиографии), 69 рисунков, 11 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 для размерной электроэрозионной обработки.

**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, 125 pages (before the bibliography), 69 figures, 11 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 TE for dimensional PEDM processing.

**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".

**PÎNZARU NATALIA**

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

Autoreferatul tezei de doctor în tehnică

