

UNIVERSITATEA DE STAT DIN MOLDOVA

INSTITUTUL DE FIZICĂ APLICATĂ

Cu titlu de manuscris

C.Z.U: 621.7:62-408(043)

KAZAK NATALIA

**MODIFICAREA SUPRAFEȚELOR METALICE PRIN
SINTETIZAREA CU SCÂNTEI ELECTRICE A CARBURILOR,
UTILIZÂND ELECTROZI DIN GRAFIT ȘI METALE
TRANZITORII**

**251.03 - TEHNOLOGII ELECTROFIZICE ȘI INGINERIA
SUPRAFEȚELOR**

Rezumatul tezei de doctor în științe ingineresti

CHIȘINĂU, 2023

Teza a fost elaborată în cadrul Laboratorului Metode electrofizice și electrochimice de prelucrare a materialelor “Boris Lazarenco” al Institutului de Fizică Aplicată, Universitatea de Stat din Moldova.

Conducător științific:

MIHAILOV Valentin - doctor în științe tehnice, conferențiar cercetător, Institutul de Fizică Aplicată, Universitatea de Stat din Moldova

Referenți oficiali:

SHIKIMAKA Olga - doctor în științe fizico-matematice, conferențiar cercetător, Institutul de Fizică Aplicată, Universitatea de Stat din Moldova

BACIU Constantin - doctor ing., prof., Universitatea „Gheorghe Asachi”, Iași, România

Membrii ai Consiliului științific specializat:

STOICEV Petru - doctor habilitat în științe ingineresti, profesor universitar, emerit, Universitatea Tehnică a Moldovei, *președinte al CȘS*

CROITORU Dumitr - doctor în științe tehnice, Institutul de Fizică Aplicată, Universitatea de Stat din Moldova, *secretar științific al CȘS*

DICUSAR Alexandru - doctor habilitat în științe chimice, profesor universitar, m.c. al AȘM a R.M., Institutul de Fizică Aplicată, Universitatea de Stat din Moldova, *membru al CȘS*

CEREMPEI Valerian - doctor habilitat în științe tehnice, conferențiar universitar, Universitatea Tehnică a Moldovei, *membru al CȘS*

PERETEATCU Pavel - doctor în științe tehnice, conferențiar cercetător, Universitatea de Stat „Alec Russo” din Bălți, *membru al CȘS*

TOPALĂ Pavel - doctor habilitat în științe tehnice, profesor universitar, Universitatea de Stat „Alec Russo” din Bălți, *membru al CȘS*

Susținerea va avea loc la data de 29 iunie 2023, ora 15⁰⁰, în ședința Consiliului Științific Specializat D-251.03-22-38 din cadrul Institutului de Fizică Aplicată, str. Academiei 5, MD – 2028, Chișinău, RM, biroul 230.

Teza de doctor și rezumatul pot fi consultate la Biblioteca Centrală “A. Lupan” (str. Academiei 5a, MD – 2028, Chișinău, RM), și pe pagina web a ANACEC (www.cnaa.md/anacec.md).

Rezumatul a fost expediat la **29.05.2023**

Secretar științific



CROITORU Dumitru
dr. șt. teh.

Conducător științific



MIHAILOV Valentin
dr. șt. teh.

Autor



KAZAK Natalia

CUPRINS

REPERELE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII	4
CONȚINUTUL TEZEI	7
CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI	24
BIBLIOGRAFIE	26
LISTA PUBLICAȚIILOR LA TEMA TEZEI DE DOCTOR	28
ADNOTĂRI	31
SUMMARY	32
АННОТАЦИЯ	33

REPERELE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII

Actualitatea și importanța temei de cercetare

La ora actuală tehnologiile de durificare și recondiționare a suprafețelor de lucru ale organelor de mașini și a sculelor bazate pe procesul alierii prin scânteii electrice (ASE) utilizează în calitate de elemente de aliere electrozi standardizați pe bază de carburi metalice ale unor metale tranzitorii din grupele IV–VI ale tabelului periodic.

Astfel de electrozi se confecționează prin sinterizare, iar în Republica Moldova se importau din țările care dispun de astfel de industrii. Însă, actualmente, în rezultatul crizei din perioada anilor 90 activitatea întreprinderilor respective a fost suspendată, afectând în același timp și utilizatorii tehnologiei de durificare prin scânteii electrice din R. Moldova, la care s-au epuizat rezervele de electrozi.

În legătură cu aceasta, în fața cercetătorilor din domeniul alierii prin scânteii electrice a apărut problema identificării unei alternative a acestor electrozi standardizați.

Analizând rezultatele prealabile privind folosirea electrozilor din grafit, ca sursă de carbon, pentru modificarea suprafețelor metalice, s-a stabilit că, în condițiile dezvoltării în zona acțiunii plasmii descărcărilor în impuls a temperaturilor înalte de cca 10^4 °C și a presiunilor de mii de atmosfere, transferul polar al materialului anodului (grafitului) are loc în stare ionizată. În aceste condiții, interacțiunea carbonului cu materialul suportului (catodului) este deosebit de intensă, ceea ce determină formarea diferitor compuși și soluții solide. Analiza cu raze X a confirmat formarea în straturile superficiale ale probelor din titan și fier supuse ASE cu electrozi din grafit a carburilor de titan (TiC) și fier (Fe₃C) [1].

Luând în considerare aceste rezultate importante precum și faptul că carbonul, titanul, tantalul și wolframul sunt constituenți ale electrozilor standardizați, este ușor de înțeles că, utilizând în calitate de anod grafitul, ca sursă de carbon, titanul, tantalul și wolframul cu afinitate înaltă față de carbon, putem afirma că la ASE succesivă cu aceste materiale există o mare probabilitate de obținere a fazelor cu conținut de carburi metalice de tip „MeC” [2, 3].

Investigațiile sistematice ale legăturilor de sintetizare a fazelor cu conținut de carbon la prelucrarea succesivă cu electrozi din grafit, titan, tantal și wolfram au permis să se stabilească parametrii energetici și tehnologici optimi ai alierii prin scânteii electrice [4, 5], la care are loc sintetizarea acoperirilor cu conținut de carburi. Mai mult ca atât, a fost stabilită o particularitate importantă a alierii succesive cu electrozi din grafit, titan, tantal și wolfram, și anume că, în condiții egale, transferul materialului anodului pe suprafața catodului într-o unitate de timp este mai mare decât în cazul alierii cu electrozi compacți standardizați de tip BK și TK [6]. Acest fenomen se explică prin rezistența la eroziune deosebit de mare a electrozilor standardizați compuși din două carburi (TiC+WC) în comparație cu rezistența eroziunii electrozilor din grafit,

titan, tantal sau wolfram. Astfel, în timpul unui act unitar al descărcării în impuls la ASE cu electrozi din titan, sau wolfram – pe suprafața catodului se transferă o cantitate de material mai mare de 2,5÷3,0 ori decât în cazul utilizării electrozilor standardizați. În rezultatul manifestării acestui efect are loc creșterea productivității formării acoperirilor și grosimii acestora, iar în final, durata de funcționare.

Aceste investigații au fost efectuate în premieră și ele au demonstrat posibilitatea înlocuirii electrozilor standardizați scumpi și deficitari cu electrozi din grafit, titan, tantal și wolfram, care sunt accesibili și cu mult mai ieftini. Testările tribologice și a rezistenței la coroziune ale straturilor astfel durificate au demonstrat creșterea acestor caracteristici [7].

Prezenta lucrare a fost executată în conformitate cu planul complex de cercetări științifice al Institutului de Fizică Aplicată în cadrul proiectelor instituționale și bilaterale Moldova – Belarus.

Scopul lucrării:

Modificarea suprafețelor metalice prin alierea succesivă cu scânteii electrice utilizând electrozi din grafit și unele metale tranzitorii (Ti, Ta, W), precum și pulberii acestora, în vederea obținerii carburilor de tip „MeC” și a fazelor nanostructurate cu proprietăți fizico-mecanice avansate.

Obiectivele lucrării

- Efectuarea studiului privind stadiul actual al cercetărilor în domeniul modificării suprafețelor metalice, utilizând metoda alierii prin scânteii electrice.
- Elaborarea concepției de sintetizare a carburilor de tip „MeC” la prelucrarea succesivă a suprafețelor metalice cu electrozi compacți din grafit, titan, wolfram, tantal, și pulberi ale acestora – constituenți ai electrozilor standardizați WC-TiC-Co și WC-TiC-TaC-Co.
- Investigații privind cinetica transferului de masă al anodului (electrodului de prelucrare) și formarea stratului superficial durificat în funcție de parametrii energetici ai procesului – valori ale energiei descărcării în impuls și a curentului mediu – și tehnologici: durata prelucrării și forma mișcării electrozilor de prelucrare (vibrații, rotații, vibrații + rotații).
- Optimizarea procesului alierii prin scânteii electrice și elaborarea recomandărilor tehnologice privind sintetizarea carburilor și a fazelor nanostructurate în straturile superficiale ale organelor de mașini la prelucrarea succesivă cu electrozi din grafit, titan, tantal, wolfram și cu pulberii acestora.

Ipoteza de cercetare

Se presupune că la interacțiunea plasmăi descărcărilor în impuls de tensiune joasă cu metalele tranzitorii din grupele IV–VI ale sistemului periodic Ti, W, Ta și grafitul pot fi sintetizate în straturile superficiale ale metalelor – carburi de tip „MeC” cu proprietăți fizico-mecanice înalte.

Sinteza metodologiei de cercetare și justificarea metodelor de cercetare

Pentru soluționarea problemelor abordate în prezenta lucrare, au fost elaborate și confecționate o serie de machete experimentale cu posibilități de variere a parametrilor energetici (energia descărcării, frecvența trecerii impulsurilor electrice, curentul mediu) într-un diapazon larg de valori ale acestora.

Pentru creșterea eficienței procesului de depunere a acoperirilor și, implicit, a grosimii straturilor depuse, au fost diversificate procedeele de aliere cu electrozi compacți, astfel încât, în afară de utilizarea mișcării tradiționale cu vibrații a electrodului de prelucrare s-a folosit mișcarea rotativă în plan perpendicular pe suprafața suportului (catodului), fiind construite dispozitive speciale pentru dozarea pulberii introduse în interstițiu dintre anod și catod, ceea ce a contribuit la alierea cu amestecuri de pulberi și depunerea straturilor cu compoziție complexă.

Analiza cineticii transferului de masă al materialului anodului pe suprafața catodului și valoarea adaosului catodului în timp s-au efectuat cu balanțe analitice (ESJ 210-4A) cu precizia 10^{-4} g.

Analiza transformărilor fazo-structurale s-a efectuat cu ajutorul microscopului optic și al celui cu scanare electronică, cu difractometre moderne, ceea ce a permis obținerea informației veridice despre componența fazelor formate în rezultatul interacțiunii plamei descărcărilor în impuls cu materialele de aliere și al suportului.

Studiul proprietăților fizico-mecanice – a microdurității, rezistenței la uzură, precum și a rezistenței la coroziune a straturilor formate – s-a efectuat cu cele mai moderne aparate și instalații. Astfel, microduratea straturilor depuse s-a efectuat cu microdurimetrul pe baza șlifurilor transversale. Rezistența la uzură fără și în prezența lubrifianțului s-a măsurat cu ajutorul aparatelor standardizate și verificate metrologic. Similar s-au efectuat și testările tribologice ale acoperirilor obținute.

Noutatea științifică a rezultatelor obținute

Efectuarea în premieră a investigațiilor științifice sistematice în vederea stabilirii legităților de bază ale procesului sintetizării carburilor de tip „MeC”, utilizând alierea prin scânteii electrice cu electrozi din grafit, titan, tantal și wolfram. Originalitatea prezentei lucrări constă în îmbinarea într-un proces tehnologic unic a alierii prin scânteii electrice cu electrozi compacți și introducerea în interstițiul dintre anod și catod a materialelor pulverulente, precum și utilizarea mișcării complexe a electrozilor de prelucrare: rotații+vibrații+oscilații, cât și utilizarea electrozilor din sârmă din metale plastice (Al, Ti), ce se rotesc în plan perpendicular pe suprafața de prelucrare, fapt ce a contribuit la creșterea substanțială a grosimii straturilor formate, a eficacității procesului de sintetizare a carburilor și a calității acestora.

CONȚINUTUL TEZEI

În **introducere** este fundamentată actualitatea problemei sintetizării carburilor metalice prin elaborarea unei variante noi a procesului alierii prin scânteii electrice, în care modificarea suprafețelor metalice se efectuează în rezultatul prelucrării succesive cu electrozi din grafit, titan, tantal și wolfram, precum și cu pulberii acestora introduși în interstițiu dintre anod și catod. Sunt formulate scopul și sarcinile cercetării, este evidențiată noutatea științifică și valoarea practică a rezultatelor obținute.

În **primul capitol** sunt analizate diferite metode electrofizice și electrochimice tradiționale și neconvenționale de modificare a suprafețelor metalice, evidențiindu-se metoda alierii prin scânteii electrice (ASE), ca metodă simplă de realizat cu utilaje și echipamente de asemenea simple, accesibile pentru un cerc larg de utilizatori. Sunt analizate aspectele fizice și tehnologice ale procesului ASE, pe baza lucrărilor fundamentale unice ale cercetătorilor notorii B. Lazarenko, B. Zolotîh, L. Palatnik, I. Moghilevski, K. Namitokov, care au contribuit la dezvoltarea acestui proces revoluționar de-a lungul anilor. Sunt evidențiate perspectivele elaborării și aplicării metodei ASE, este efectuată descrierea modelelor mai răspândite ale ASE ce țin de formarea stratului superficial durificat. Sunt analizate de asemenea diferite concepții privind formarea stratului modificat și proprietățile acestuia. În partea finală a capitolului este fundamentată concepția complexă de studiere sistematică a procesului de aliere succesivă cu electrozi compacți din grafit, titan, wolfram și pulberii acestora.

În **capitolul 2** este prezentată descrierea metodelor și metodologiilor de cercetare ale straturilor sintetizate, utilajelor, aparatelor și proprietăților fizico-chimice ale materialelor utilizate. Caracteristicile metodologice ale lucrării includ o abordare integrată, constând în studiul creșterii eficienței procesului de sintetizare a carburilor metalice în straturile superficiale ale metalelor supuse ASE, atât prin elaborarea generatoarelor de impulsuri electrice (concepție nouă) cu reglarea parametrilor într-un diapazon larg, cât și diversificarea procedeeleor de interacțiune a elementelor de aliere cu plasma descărcărilor în impuls. Acestea din urmă țin de utilizarea atât a electrozilor compacți, cât și a pulberilor acestora.

În calitate de electrozi compacți de prelucrare au fost selectați grafitul, titanul, tantalul, wolframul și pulberii din aceste materiale, care sunt și constituente ale electrozilor standardizați de tip BK și TK.

Sunt prezentate caracteristicile instalațiilor industriale și ale machetelor experimentale utilizate pentru investigațiile științifice. Sunt prezentate, de asemenea, dispozitivele pentru utilizarea procedeeleor noi de prelucrare: schemele de introducere în interstițiul dintre anod și catod a pulberilor materialelor de aliere selectate și dispozitivul de prelucrare cu electrozi în formă de sârmă, ce se rotesc în plan perpendicular pe suprafața de prelucrare.

Pentru investigațiile fazei structurale a straturilor sintetizate s-au utilizat o serie de metode moderne precum difracția cu raze X (XRD), microscopia cu scanare electronică și microscopia optică. Investigațiile s-au efectuat pe baza șlifurilor confecționate din probele cu acoperiri sintetizate din care se obțineau suprafețe-oglină care ulterior, pentru identificarea microstructurii, erau supuse acțiunii cu reactivi speciale. Structurile și fazele s-au studiat minuțios și cu microscopul metalografic NEOFOT-30 la rezoluții între $200 \div 500$.

Analiza morfologică a suprafețelor durificate a fost studiată cu ajutorul microscopului cu scanare electronică MIRA3 TESCAN. Aceasta din urmă ne-a permis să identificăm faze nanostructurate și amorfe, ce atribuie suprafețelor modificate performanțe înalte, prin urmare și o resursă de funcționare mai mare.

Investigarea proprietăților fizico-mecanice, în special ale durității, rezistenței la uzură și coroziune, s-au efectuat utilizând instalații și echipamente standardizate și verificate metrologic. Valorile microdurității straturilor sintetizate s-au efectuat cu două tipuri de microdurimetre: PMT-3 și HWMMT-X7 (Elveția) la sarcini de 50 și 100 g.

Testările tribologice (rezistența la uzură) ale acoperirilor formate (TiC, WC, compozițiile TiAlC, TiSiC, TiAlN și grafitul) s-au efectuat pe substraturi din oțeluri C45 (SR EN 10083-2:1995), X18H10T (GOST 4986-70), 40X13 (GOST 40X13), aliaje de titan BT6 și BT14 (GOST 19807(1991) la instalații cu mișcare: 1) rectilinie-alternativă cu viteză medie de alunecare 0,0675 m/s și 2) cu rotații în regimuri cu / și fără lubrifiant.

La mașina cu mișcare rectilinie-alternativă în calitate de lubrifiant s-a folosit uleiul de vaselină, iar în calitate de contracorp s-au folosit probe paralelepiped din oțel călit C45 (HRC58). Contactul între contracorp și suprafața de frecare s-a efectuat pe o suprafață de 9 mm², astfel încât să se asigure o poziție a contracorpului perpendiculară către această suprafață. Încercările s-au efectuat la sarcini normale de 50 N și viteza de alunecare de 0,06 m/s.

Investigarea procesului coroziunii acoperirilor obținute la alierea prin electroziune s-a efectuat folosind potențiostatul-galvanostatul MultiAutolab M 204 (Metrohm AG Elveția). În calitate de mediu s-a folosit soluția de 3% de NaCl în apă distilată. Studiul rezistenței la coroziune s-a efectuat pe probe din oțel inoxidabil 40X13 și aliaj de titan BT6 cu acoperiri obținute la ASE succesivă cu Ti+grafit, W+grafit, Ti+Al+grafit, Ti+AlN, Ti+SiC.

În **capitolul 3** sunt prezentate rezultatele investigațiilor sistematice ale procesului alierii succesive cu electrozi din grafit, titan, tantal și wolfram în vederea stabilirii factorilor de bază ce influențează procesul de transfer al masei de material al anodului pe suprafața catodului și formare a stratului modificat (durificat). S-a stabilit că unul din factorii de bază ai procesului este energia descărcării electrice în impuls.

Cantitatea de material prelevat al anodului al anodului în rezultatul descărcărilor electrice este proporțională cu valoarea energiei descărcării $\gamma \sim E_d$.

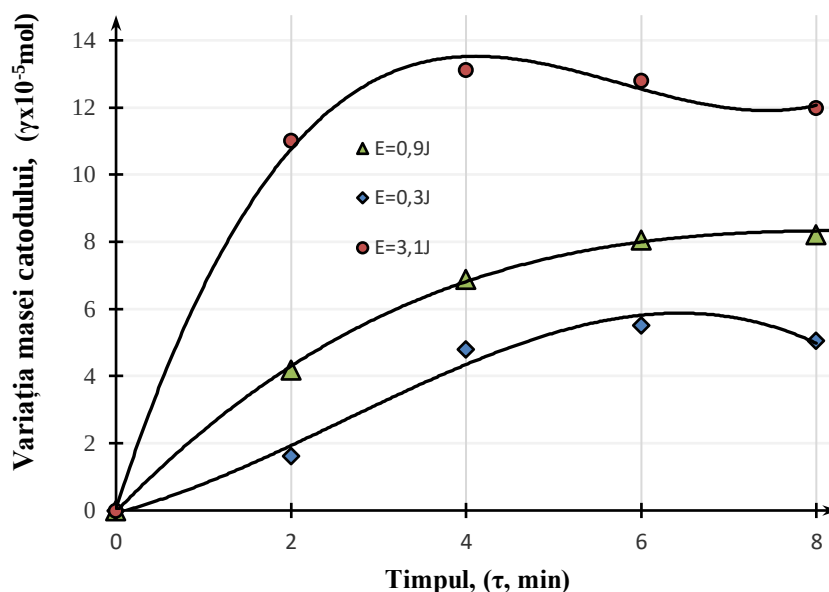


Fig. 1. Variația masei catodului funcție de durata procesului de aliere aliere prin scânteii electrice cu diferite valori ale energiei descărcării în impuls, $E_d = (0,3; 0,9; 3,0)$ J

Procesul ASE s-a efectuat în mai multe variante (succesiuni), reieșind din numărul de elemente ce se conțin în aliajele standardizate. De exemplu, în aliajul standard T15K6 (79%WC+15%TiC+6%Co) se conține carbon, W, Ti și Co. În acest caz, prelucrarea s-a efectuat în toate succesiunile posibile: Ti+grafit+W, Ti+W+grafit, W+grafit+Ti, grafit+W+Ti, grafit+Ti+W.

Experimentele s-au efectuat la regimuri cu valori ale energiei descărcării $E_d = (0,3; 0,9; 3,0)$ J. În figura 1 este prezentată cinetica transferului de masă al anodului din titan pe suprafața catodului din oțel C45 în timp, în funcție de valoarea energiei descărcării în impuls.

Din figura 1 se vede clar că, odată cu creșterea energiei descărcării, se mărește și cantitatea de material erodat al anodului din titan transferat pe suprafața catodului.

În cazul utilizării catodului din titan tehnic BT1, care se deosebește substanțial de oțelul C45 după caracteristicile termofizice, caracterul curbelor adaosului catodului în timp, în funcție de valoarea energiei descărcării electrice, de asemenea, diferă. Însă, în același timp, tendința creșterii adaosului catodului în funcție de valoarea energiei descărcării se menține. Tot aici, în scopul eficientizării procesului formării acoperirilor pe catod, s-a studiat și cinetica formării acoperirii pe catod la introducerea în interstițiu a materialelor pulverulente identice cu materialele din componența anodului conform schemelor prezentate în figura 2.

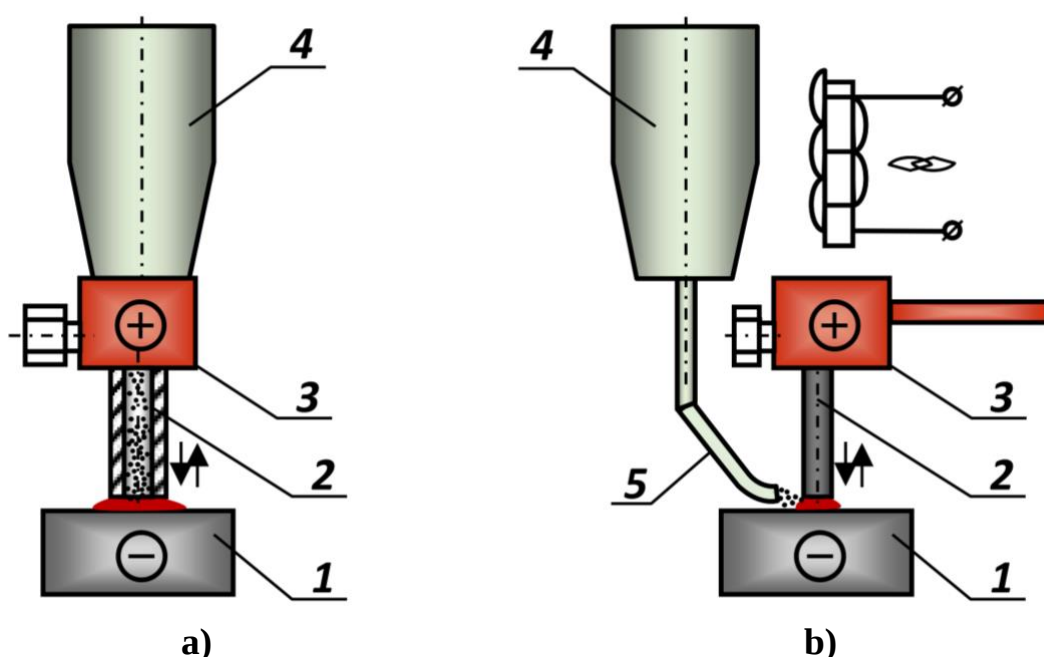


Fig. 2. Procedee de aliere prin utilizarea pulberii

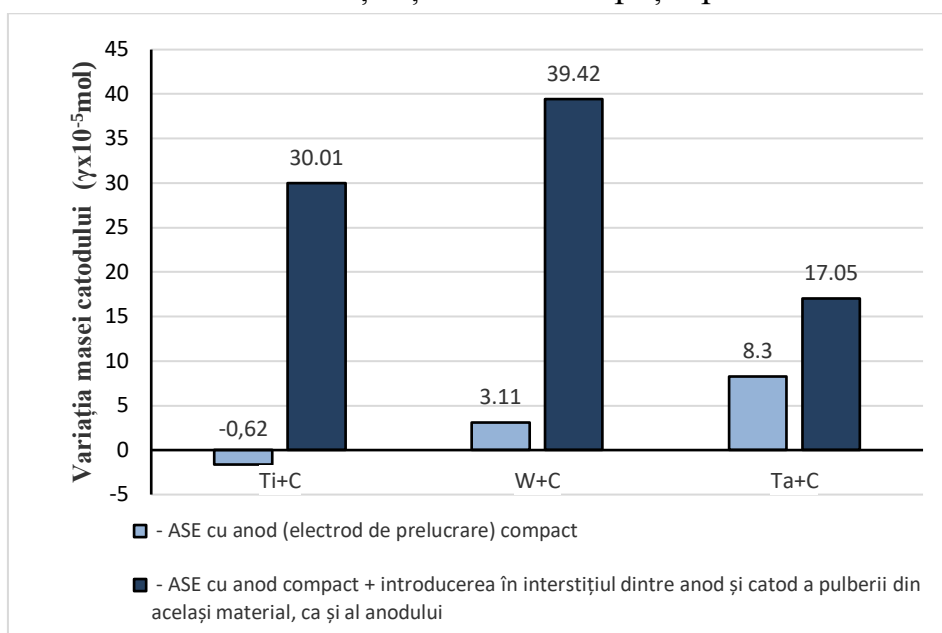
1 – piesa de prelucrat (catod); 2 – electrod (anod); 3 – aplicator; 4 – buncăr; 5 – tub de ghidare a pulberii; a) pulberea se introduce în interstițiu prin electrod tubular; b) pulberea se introduce din partea laterală a electrodului de prelucrare

Utilizarea acestor scheme inovative de prelucrare a sporit substanțial procesul formării acoperirilor pe catod. Studiul influenței valorii energiei impulsurilor electrice, frecvenței trecerii acestora și al duratei de prelucrare ne-a permis să stabilim că condiții mai favorabile pentru a obține în straturile superficiale o cantitate maximă de carburi la alierea cu electrozi compacți se creează la regimuri cu următorii parametri: energia descărcării ($1,0 \div 3,0$) J, frecvența ($100 \div 200$) Hz, iar valoarea curentului de lucru ($1,5 \div 3,0$) A.

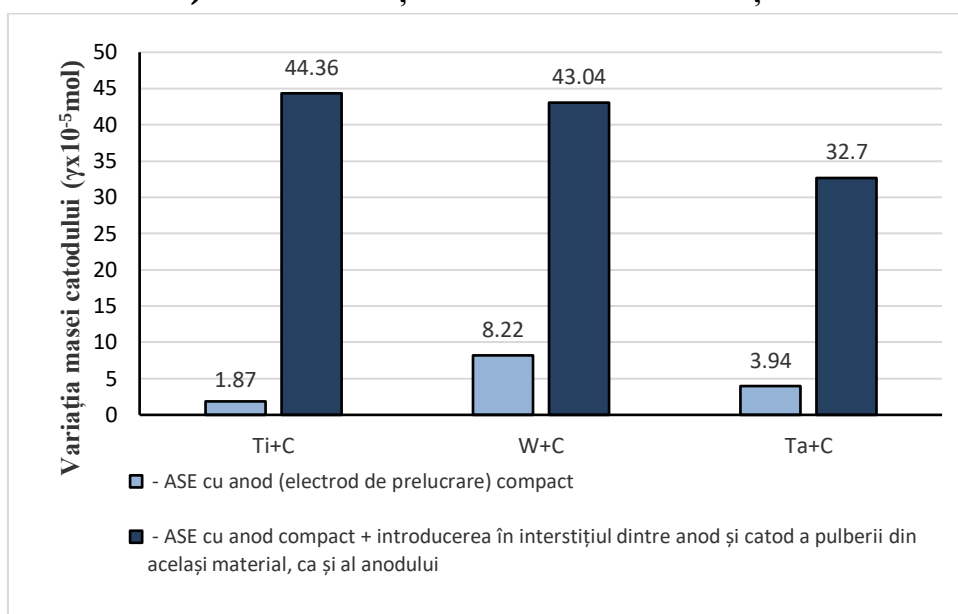
Comparând procedeele cu electrod compact și cel cu electrod compact și introducerea în interstițiu a pulberilor, putem să concluzionăm următoarele: la regimuri energetice identice ale procesului ASE și introducerea în interstițiu a pulberii se formează acoperiri cu mult mai uniforme și mai groase decât la utilizarea numai a electrodului compact. Histogramele din (figurile 3 și 4) demonstrează aceasta pentru diferite valori ale energiei descărcărilor electrice în impuls și diferite materiale ale catodului.

Este evident că, în cazul introducerii pulberii în interstițiul dintre anod și catod, mecanismul formării stratului pe catod diferă de cel ce are loc la ASE cu electrod compact. Acest efect poate fi explicat, pornind de la poziția particulei din câmpul electric de mare intensitate dintre doi electrozi. Se știe că la apariția particulei între doi electrozi ce se află sub potențial, inițierea descărcării are loc la distanțe mai mari decât cele de străpungere. În acest caz, are loc redistribuirea temperaturii în sistemul anod – interstițiu – catod: cantitatea de căldură degajată pe electrozi se micșorează, iar în

interstițiu – se mărește. Ca urmare, o mare parte a energiei termice degajată în rezultatul descărcării se va elimina în interstițiu și cu atât mai puțin pe electrozi.



a) catod din oțel carbon de construcții C45

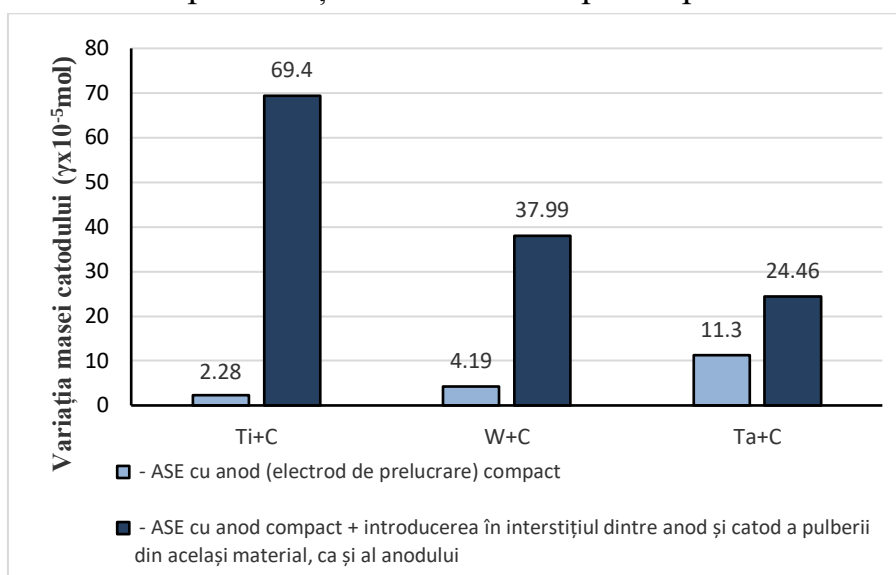


b) catod din titan de puritate tehnică BT1

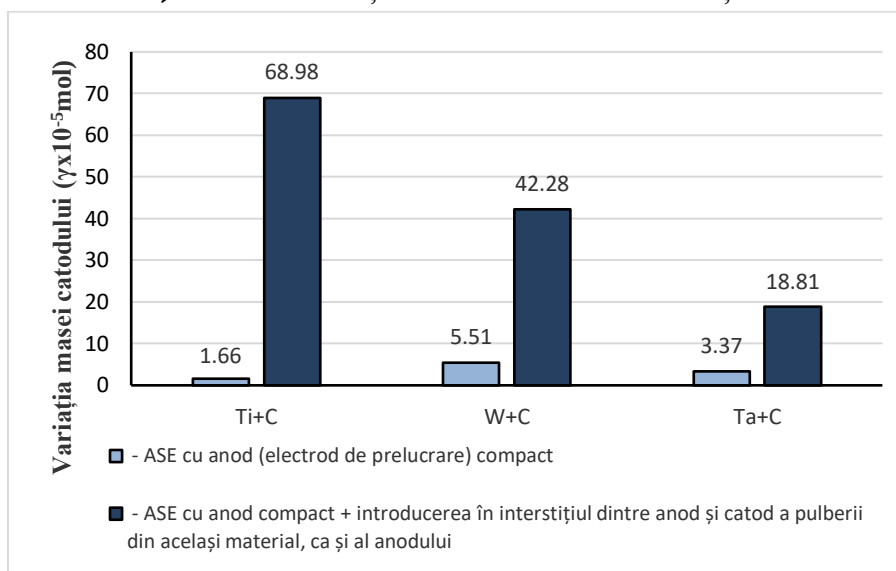
Fig. 3. Intensitatea formării acoperirii pe catod în funcție de procedeul de prelucrare, $E_d=0,3$ J

Particulele pulberii, nimerind în canalul plasmei descărcării, se topesc și sub acțiunea forțelor electrice se transferă pe catod, interacționează cu acesta, formând stratul durificat. În urma transferului materialului topit, se mișcă electrodul anod, care, ajungând la suprafața catodului, tasează materialul înmuiat. În acest moment, prin contactul anodului cu materialul transferat, trece curentul de scurtcircuit. Drept rezultat, prin contactul dintre electrod și porțiunea de material depusă se va degaja o cantitate

suplimentară de căldură, care contribuie la intensificarea interacțiunii materialului transferat cu materialul suportului și la formarea acoperirii pe acesta.



a) catod din oțel carbon de construcții C45



b) catod din titan de puritate tehnică BT1

Fig. 4. Intensitatea formării acoperirii pe catod în funcție de procedeul de prelucrare, $E_d=0,9$ J

Astfel de parametri tehnologici ai procesului, cum ar fi dimensiunile geometrice și forma mișcării electrozilor de prelucrare în raport cu suprafața de prelucrare, precum și introducerea în interstițiul dintre anod și catod a pulberilor creează premise pentru extinderea metodei ASE.

În scopul sporirii productivității procesului de sintetizare a acoperirilor, dar și a grosimii acestora, care, cu certitudine, va putea asigura și o resursă mai mare a acoperirilor, a fost propusă încă o variantă (un procedeu tehnologic) al ASE, și anume: s-au utilizat aplicatoare rotative, cu electrozi de sârmă, cu grosimi între (1,5 ÷ 2,0) mm, ce se roteau într-un plan perpendicular pe suprafața de prelucrare (figura 5).

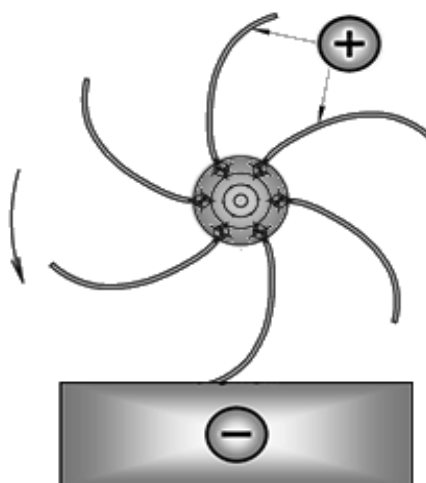


Fig. 5. Aplicator cu electrozi din sârmă

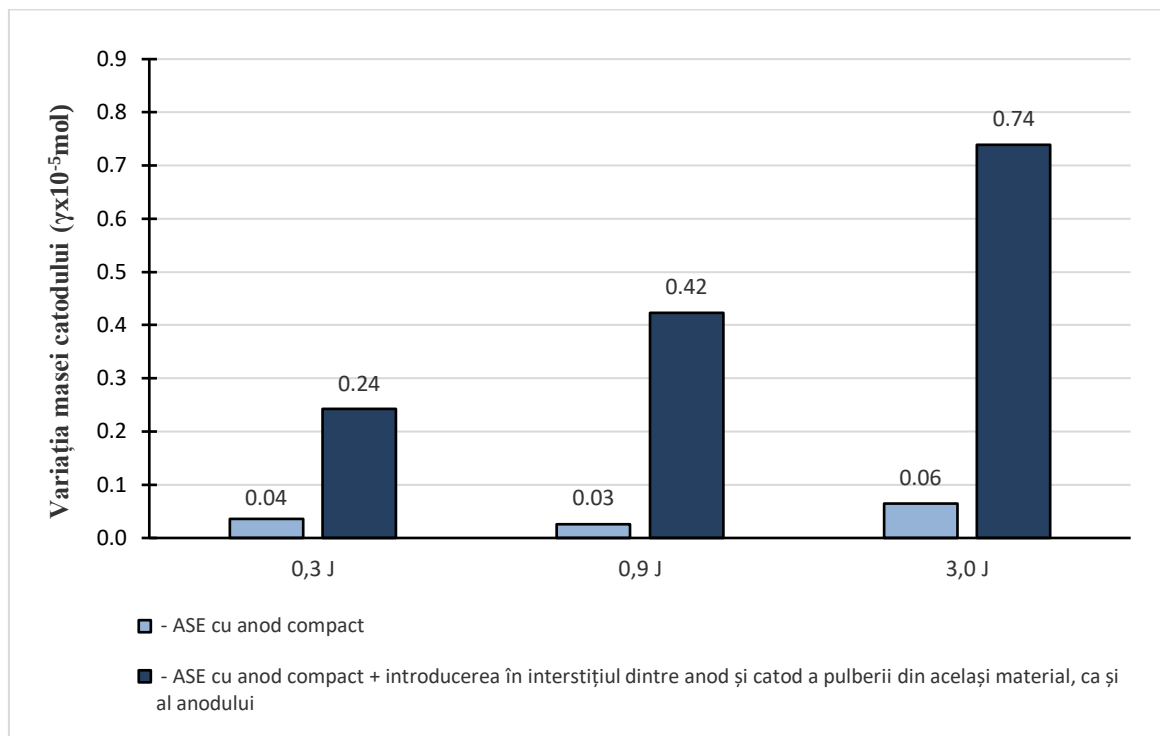
Aplicatorul rotativ reprezintă o „morișcă” (figura 5), a cărei electrozi de sârmă se rotesc în plan perpendicular pe suprafața de prelucrare. Mișcându-se tangențial către această suprafață, în momentul amorsării descărcării, are loc aruncarea materialului erodat de pe vârful anodului, în formă de sârmă pe suprafața de prelucrare. Într-o scurtă perioadă de timp, „electrodul – anod” vine în contact cu suprafața catodului, netezind topitura de metal depusă. În același timp, prin contactul electrodului de prelucrare cu suprafața catodului trece un curent de scurtcircuit care, suplimentar, încălzește porțiunea de metal depusă, ceea ce contribuie la încălzirea suplimentară a topiturii și, respectiv, la intensificarea procesului micrometalurgic dintre materialele anodului și catodului.

Următorul electrod efectuează aceeași operație și ca rezultat al acțiunii multiple, se formează acoperirea, care în raport cu cea formată la prelucrarea cu electrodul compact cu vibrații, sau cu introducerea pulberii în interstițiu, poate fi cu mult mai groasă și cu o continuitate mai mare. La prelucrarea ulterioară cu electrodul din grafit, ca rezultat al interacțiunii cu materialele acoperirii formate și cu plasma descărcării în impuls, formează faze cu conținut de carburi, depistate pe probele din oțel ca urmare a analizei cu raze X în radiația $K\alpha$ de cobalt, iar pe probe din titan – în radiația $K\alpha$ de cupru.

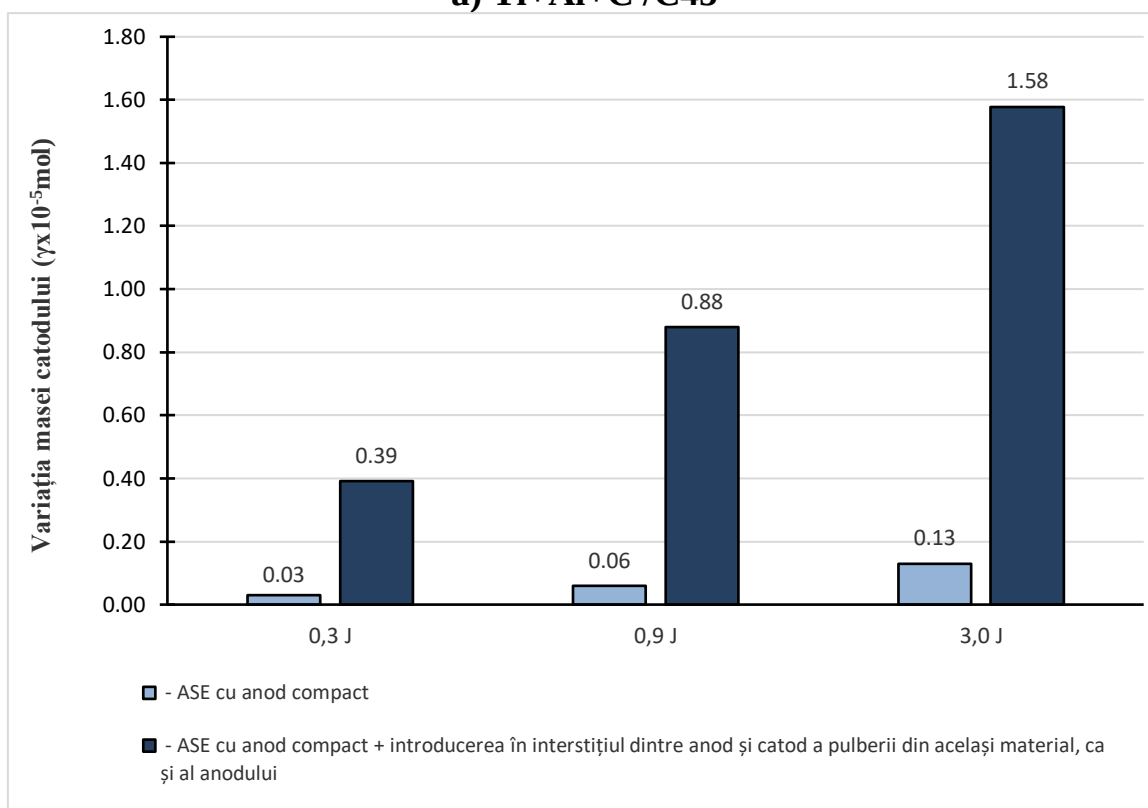
O serie de investigații s-au efectuat în vederea sintetizării compușilor ternari, a așa – numitelor MAX-faze, ce prezintă în sine o familie de compuși stratiformi cu o stoichiometrie formală $M_{n+1}AX_n$ ($n=1,2,3,\dots$), unde $M - d$ – metal tranzitoriu; $A - p$ – element (de exemplu, Si, Gt, Al, S, Sn și a.); X – carbon sau azot [8, 9].

Carburile și nitrurile ternare stratiforme ale elementelor d și p (MAX-fazele) manifestă o îmbinare unică a proprietăților caracteristice atât pentru metale, cât și pentru ceramică. Astfel de materiale posedă o densitate mică, valori înalte ale termo- și electroconductivității, rezistență, modul ale elasticității scăzut, rezistență înaltă la coroziune în medii lichide agresive, rezistență la temperaturi înalte și la șocuri

mecanice, și sunt supuse ușor prelucrării mecanice, posedă temperaturi de topire înalte și sunt stabile la temperaturi până la 1000 °C și mai mult.



a) Ti+Al+C /C45



b) Ti+Al+C /BT1

Fig. 6. Raportul dintre intensitățile formării acoperirilor pe catod din oțel C45 (a) și pe aliaj de titan BT1 (b), în funcție de procedeele tehnologice aplicate și diferite valori ale energiei descărcării

În multitudinea de MAX-faze, sintetizate la moment, un interes deosebit din punct de vedere al nivelului proprietăților îl prezintă MAX-fazele pe bază de titan – Ti_2AlC , Ti_2AlN , Ti_3AlC_2 , Ti_3SiC_2 . Sintetizarea acestor compuși prin metoda presării izostatice la temperaturi, cocsificare în plasma descărcării electrice și prin metoda sintetizării prin autoaprindere sunt legate de utilizarea utilajului complex cu consum excesiv de energie. În acest aspect, sintetizarea și utilizarea a astfel de compuși prin metoda ASE care, în raport cu metodele tradiționale termice, este deosebit de simplă în realizare, dar și consumator mic de energie și materiale, ceea ce prezintă un interes deosebit. Sintetizarea MAX-fazelor prin metoda ASE nemijlocit pe suprafețele de lucru ale organelor de mașini ar avea avantajul creșterii performanțelor acestora.

Pentru obținerea MAX-fazelor prin ASE pe oțel de construcție C45 și aliaj de titan BT6 s-au utilizat trei procedee tehnologice. În primul rând, s-au folosit electrozi compacți din aceleași materiale (elemente) ce intră în componența MAX-fazelor. De exemplu, pentru obținerea MAX-fazei din elementele Ti, Al, și C, proba se prelucra succesiv cu Ti, Al și, în final, cu grafit la diferite regimuri energetice și durate de prelucrare a unei unități de suprafață, astfel încât să fie asigurate condițiile optime de obținere a compușilor ternari.

În a doua variantă de prelucrare, în calitate de elemente de aliere s-au utilizat pulberi din aceleași materiale (grafit, Ti, Al, TiN, SiC), care erau introduse în interstițiul dintre anod și catod în procesul ASE. În acest caz, a apărut necesitatea asigurării componenței stoichiometrice a amestecului de pulberi. După cum se vede din histogramele (figura 6), introducerea în interstițiul dintre anod și catod a materialelor pulverulente, la toate valorile energiei descărcării, contribuie la creșterea adaosului catodului, indiferent de natura materialului acestuia.

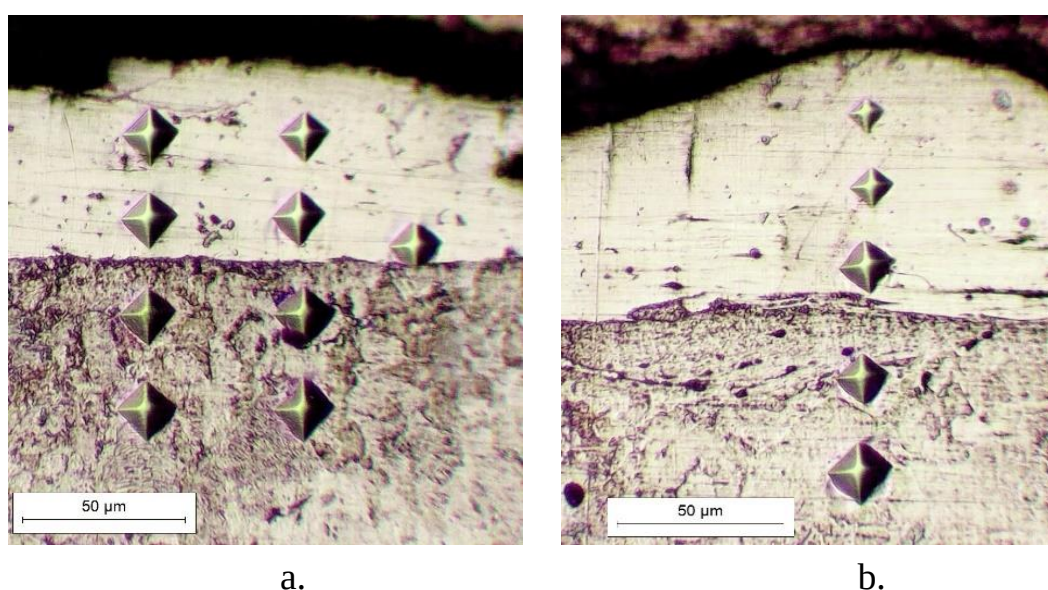


Fig. 7. Microstructura probelor din oțel C45 cu straturi din compuși ternari: TiAlN (a) și TiSiC (b)

Aceasta se vede și pe secțiunile transversale ale probelor astfel acoperite. În figura 7 sunt prezentate secțiunile transversale ale probelor din oțel C45 prelucrate succesiv cu electrozi din Ti, apoi cu pulberi din AlN și SiC.

De menționat că valoarea energiei descărcării în impuls joacă un rol decisiv în obținerea calității (continuității, uniformității) acoperirilor depuse prin ASE. Pe cale experimentală s-a demonstrat, că în cazul ASE cu electrozi compacți la valori mai mici de 1,0 J ale energiei descărcării, se obțin acoperiri de mai înaltă calitate cu continuitate și uniformitate maximă. Însă, la valori ale energiei mai mari decât 1,0 J, calitatea acoperirilor formate scade semnificativ în rezultatul apariției multor defecte (fisuri, pori etc.).

Totodată la ASE cu introducerea în interstițiu a pulberii din grafit, titan și wolfram s-a stabilit, că pentru obținerea straturilor de calitate cu conținut de faze cu carburi, similare celor, ce se obțin la ASE cu electrozi compacți standardizați, energia descărcării urmează a fi mărită de 1,3÷1,5 ori. Adică, dacă la ASE cu electrozi compacți din grafit, titan și wolfram straturi de calitate au fost obținute la valoarea energiei descărcării de 1,0 J, apoi la introducerea pulberii în interstițiu valoarea energiei urmează a fi mărită până la (1,3÷1,5) J. Prelucrarea la regimuri optimizate a permis obținerea acoperirilor omogene, a căror duritate a crescut de la 3,5 la 4,5 ori, în comparație cu duritatea suportului.

La utilizarea în calitate de elemente de aliere a pulberilor, s-a stabilit că un rol important privind calitatea stratului depus îl joacă granulația pulberii. Pe cale experimentală, s-a demonstrat că o curgere uniformă a pulberii are loc în cazul particulelor sferice cu diametrul între 70 și 200μm.

Compozițiile Ti+Al+C, Ti+AlN și Ti+SiC au fost selectate în calitate de elemente de aliere cu scopul obținerii MAX-fazelor care posedă proprietăți unice.

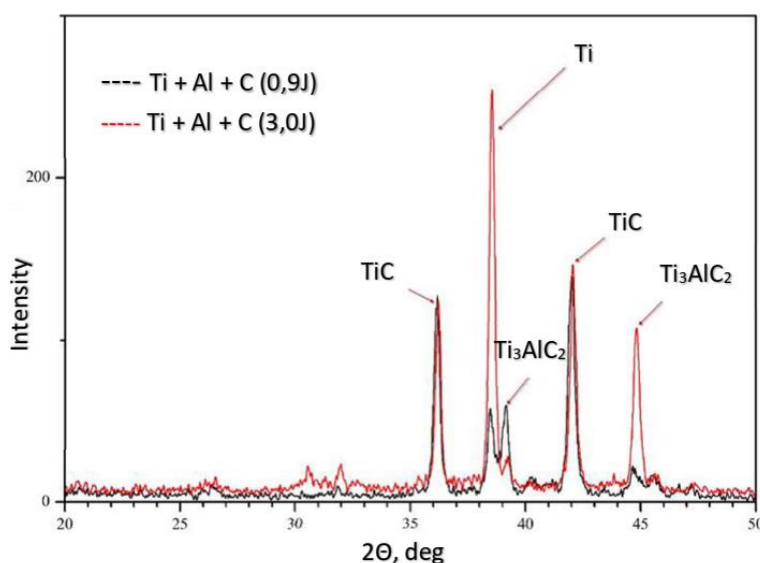
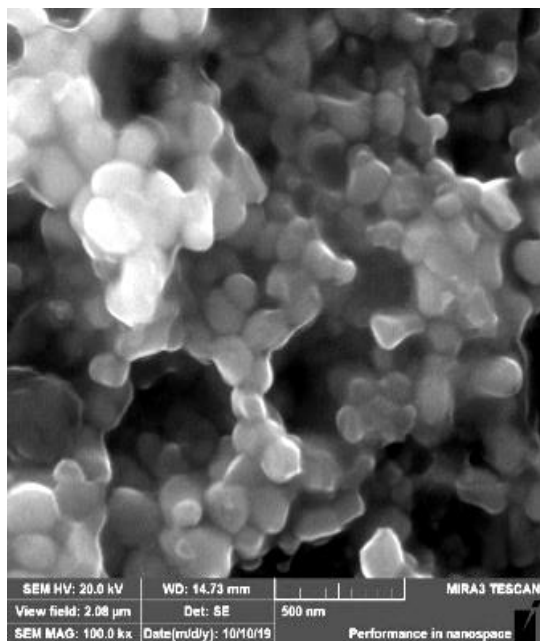


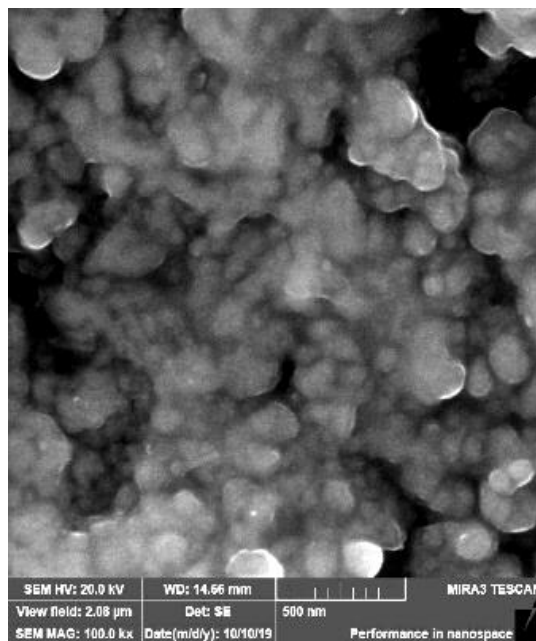
Fig. 8. Difractograma acoperii pe oțel Cr18Ni10Ti obținută la prelucrarea succesivă cu electrozi din titan, aluminiu și grafit [10]

Rezultatele analizei cu raze X au demonstrat că MAX-fazele se formează în acoperiri la regimurile cu energia descărcării în impuls de la 0,9 până la 3,0 J. Difractograma din figura 8 confirmă formarea MAX-fazei Ti_3AlC_2 .

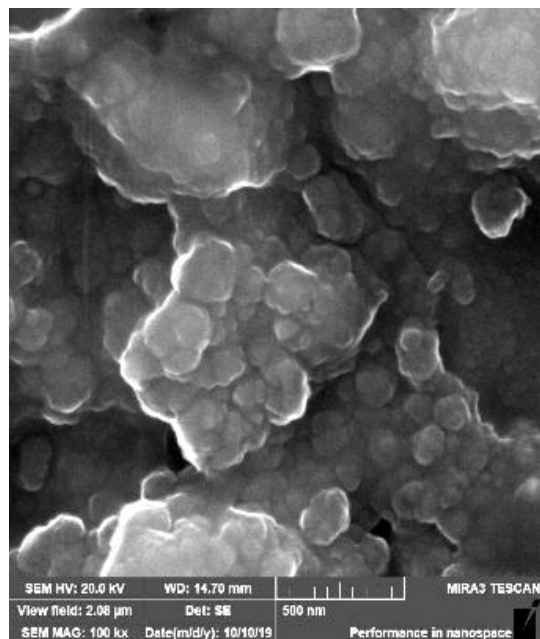
Aplicând microscopia cu scanare electronică, s-a investigat morfologia suprafețelor obținute la sintetizarea straturilor ce conțin carburi, ca urmare stabilindu-se apariția formațiunilor cristaline (tabelul 1).



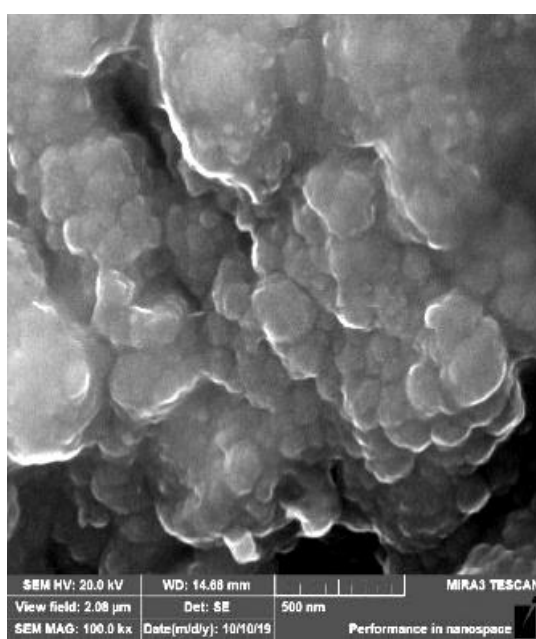
Ti+Al+C ($E_d = 0,9$ J)



Ti+Al+C ($E_d = 3,0$ J)



Ti+SiC ($E_d = 0,9$ J)



Ti+SiC ($E_d = 3,0$ J)

Fig. 9. Morfologia acoperirilor obținute prin ASE [11]

Tabelul 1. Dimensiunile formațiunilor cristaline formate la ASE

Dimensiunea medie a cristalitelor	BT 6	Ti + Al + C $E_d = 0,9 \text{ J}$	Ti + Al + C $E_d = 3,0 \text{ J}$	Ti + SiC $E_d = 0,9 \text{ J}$	Ti + SiC $E_d = 3,0 \text{ J}$
$L, \text{ \AA}$	61	58,5	58	50,8	60,5

Conform datelor obținute (tabelul 1), formațiunile cristaline în materialele investigate se află în limita $(50 \div 61) \text{ \AA}$, ceea ce ne permite să presupunem formarea nanoparticulelor și nanofazelor în acoperirile formate la ASE. S-a stabilit că componența chimică a acoperirilor și regimurile de formare a acestora are o influență substanțială asupra dimensiunilor geometrice ale fazelor cristaline obținute în acoperirile ASE. În urma proceselor accelerate în zona acțiunii descărcărilor în impuls, este probabilă formarea fazei amorfe în structura acoperirii. Studiul morfologiei acoperirilor, ASE prin metoda scanării electronice, de asemenea, a demonstrat că, la anumite regimuri cu valoarea energiei descărcării de $(0,9 \div 3,0) \text{ J}$, indiferent de componența chimică a acoperiri, au fost depistate faze nanodispersate (figura 9).

Se presupune că modificările structurii și ale morfologiei structurii pot influența asupra caracteristicilor fizico-mecanice a acoperirii în general.

În **capitolul 4** sunt prezentate rezultatele investigațiilor proprietăților de bază ale acoperirilor formate (rezistența la uzură și coroziune) pe unele oțeluri de construcții mai frecvent utilizate: C45, 40X13, Cr18Ni10Ti. S-au studiat caracteristicile tribologice (rezistența la uzură) ale oțelului C45 supus alierii prin scânteii electrice cu compuși ternari (TiAlC, TiAlN și TiSiC). Compușii respectivi au fost selectați, ținându-se cont de faptul că ei formează MAX-faze cu proprietăți fizico-chimice înalte, iar electrozii din molibden au fost selectați în calitate de material model, care posedă proprietăți înalte antifricționale și se utilizează pentru depunerea acoperirilor pe suprafețele de lucru ale pieselor motoarelor cu ardere internă.

Testările tribologice ale probelor din oțel C45 cu dimensiuni de $5 \times 8 \times 6 \text{ mm}$ acoperite cu materialele indicate mai sus au fost efectuate pe un tribometru automat cu piston, echipat cu un dispozitiv special conceput pentru înregistrarea forței de frecare. În calitate de contracorp a fost utilizat oțelul de scule OSC8 ($HV = 7800 \div 8000 \text{ MPa}$) cu dimensiuni de $2 \times 40 \times 90 \text{ mm}$, a cărui suprafață a fost rectificată în prealabil și lustruită [2].

Testarea a fost efectuată la o sarcină specifică de 2 MPa în condiții de frecare uscată. Întregul parcurs de testare a fost împărțit în 4 perioade: primele 30 de minute (2250 de cicluri – distanță de alunecare de 135 m); a doua – 45 de minute (3375 de cicluri – distanță de alunecare de $202,5 \text{ m}$); a treia – 75 de minute (5625 de cicluri – distanță de alunecare de $337,5 \text{ m}$), iar în a patra perioadă – 75 de minute. Contracorpul

a efectuat mișcări alternative cu o amplitudine de 30 mm. Viteza medie de mișcare a contracorpului în timpul testării a fost de 0,075 m/s, sau 75 de cicluri pe minut.

Măsurările uzurii probelor prismatice au fost efectuate prin metoda gravimetrică, folosind balanța analitică ADV-200M. Eroarea la măsurarea masei probei a constituit 0,05 mg. Forța de frecare (F), ce rezultă din deplasarea reciprocă a suprafețelor de contact, a fost înregistrată cu ajutorul dinamometrului. Deformarea elementului elastic al dinamometrului a fost transformată într-un semnal electric, folosind un amplificator de tensiune standard, care a fost conectat la calculator printr-un dispozitiv special. După fiecare minut de testare, forța de frecare a fost înregistrată de 3000 de ori în 3 secunde. Cu ajutorul unui program special, valorile forței de frecare au fost transformate în valori ale coeficienților de frecare. Valorile măsurate ale coeficienților de frecare au fost supuse procesării statistice, iar valoarea medie a F a fost determinată după fiecare minut de testare.

În tabelul 2 este prezentată intensitatea uzurii (I_h) acoperirilor în perioadele 1–4 de încercare și intensitatea medie a uzurii ($I_{h\text{ aver}}$) după o perioadă de încercare de 225 minute (sau după o distanță de alunecare de 1012,5 m).

Din analiza tabelului 2 se poate observa că cea mai mică intensitate de uzură de 0,0031 $\mu\text{m/m}$ a manifestat-o acoperirea Ti+AlN în a doua perioadă de încercare, iar cea mai intensă uzură a fost stabilită la oțelul neacoperit C45 (0,178 $\mu\text{m/m}$) în prima perioadă de încercare. Acoperirea de Mo a manifestat cea mai mică uzură în prima, a treia și a patra perioadă – 0,0143, 0,0039 și, respectiv, 0,0089 $\mu\text{m/m}$.

Tabelul 2. Intensitatea uzurii acoperirilor pentru fiecare perioadă de testare și intensitatea medie de uzură I_h pentru toate perioadele tribologice studiate [2]

Nr. de ord.	Material de acoperire	Intensitatea uzurii I_h acoperirii pentru fiecare perioadă de încercare ($\mu\text{m/m}$)				Intensitatea medie de uzură $I_{h\text{ medie}}$ ($\mu\text{m/m}$)
		<i>În prima perioadă</i>	<i>În a doua perioadă</i>	<i>În a treia perioadă</i>	<i>În a patra perioadă</i>	
1.	C45 (neacoperit)	0.129	0.1780	0.1410	0.1240	0.1480
2.	Mo	0.0143	0.0060	0.0039	0.0089	0.00749
3.	Ti + Al + C	0.0147	0.0570	0.0110	0.1110	0.0380
4.	Ti + AlN	0.0330	0.0031	0.01267	0.0283	0.0228
5.	Ti + SiC	0.0168	0.0064	0.0080	0.0100	0.0100

În figura 10 este prezentat graficul uzurii acoperirilor după fiecare perioadă de testare și după patru perioade de testare (225 minute), în care contracorpul a efectuat 16875 de cicluri și a parcurs distanța de alunecare de 1012,5 m. De menționat că acestea sunt rezultatele obținute imediat după cântărirea probelor. S-a constatat că toate acoperirile reduc uzura probelor de oțel de la 8,2 până la 32,8 ori (după patru perioade de testare tribologică). Din figura 10 se poate observa că acoperirea Ti+SiC a manifestat cea mai mare rezistență la uzură, în raport cu celelalte acoperiri depuse. Fenomenul poate fi explicat doar prin faptul, că în procesul ASE cu compoziția Ti+SiC

probabilitatea de formare a unei din varietăți a MAX-fazei pe bază de titan și carbura de siliciu (SiC) care posedă o duritate mai înaltă în comparație cu celelalte MAX-faze analizate în prezenta lucrare. Însă există și probabilitatea, ca în procesul ASE, în condițiile acțiunii temperaturii și presiunii înalte, în rezultatul multiplilor transformări de fază, să apară carbura SiC în stare liberă. Aceasta din urmă are o duritate deosebit de înaltă și din această cauză posedă o rezistență la uzură mai înaltă.

Testări tribologice s-au efectuat și pentru oțelurile inoxidabile Cr18Ni10Ti și 40X13 supuse ASE succesive cu W+grafit, Ti+grafit, Mo + grafit, Ti+Al+grafit, precum și cu compușii TiAlC, TiAlN și TiSiC în diversă ordine a prelucrării, în vederea stabilirii variantei optime, ce ar determina sintetizarea cantității maxime de MAX-faze în straturile durificate.

În urma cercetărilor s-a stabilit că toate probele durificate cu acești compuși au manifestat o rezistență înaltă la uzură în comparație cu oțelul neacoperit. La analiza cu raze X a probelor astfel acoperite, în straturile superficiale durificate s-au detectat carburi de molibden, titan și wolfram, fapt care, probabil, a contribuit la creșterea rezistenței la uzură a acestora. Încercările de durată au demonstrat că rezistența la uzură a acestor acoperiri crește de la 1,7 până la 69 de ori.

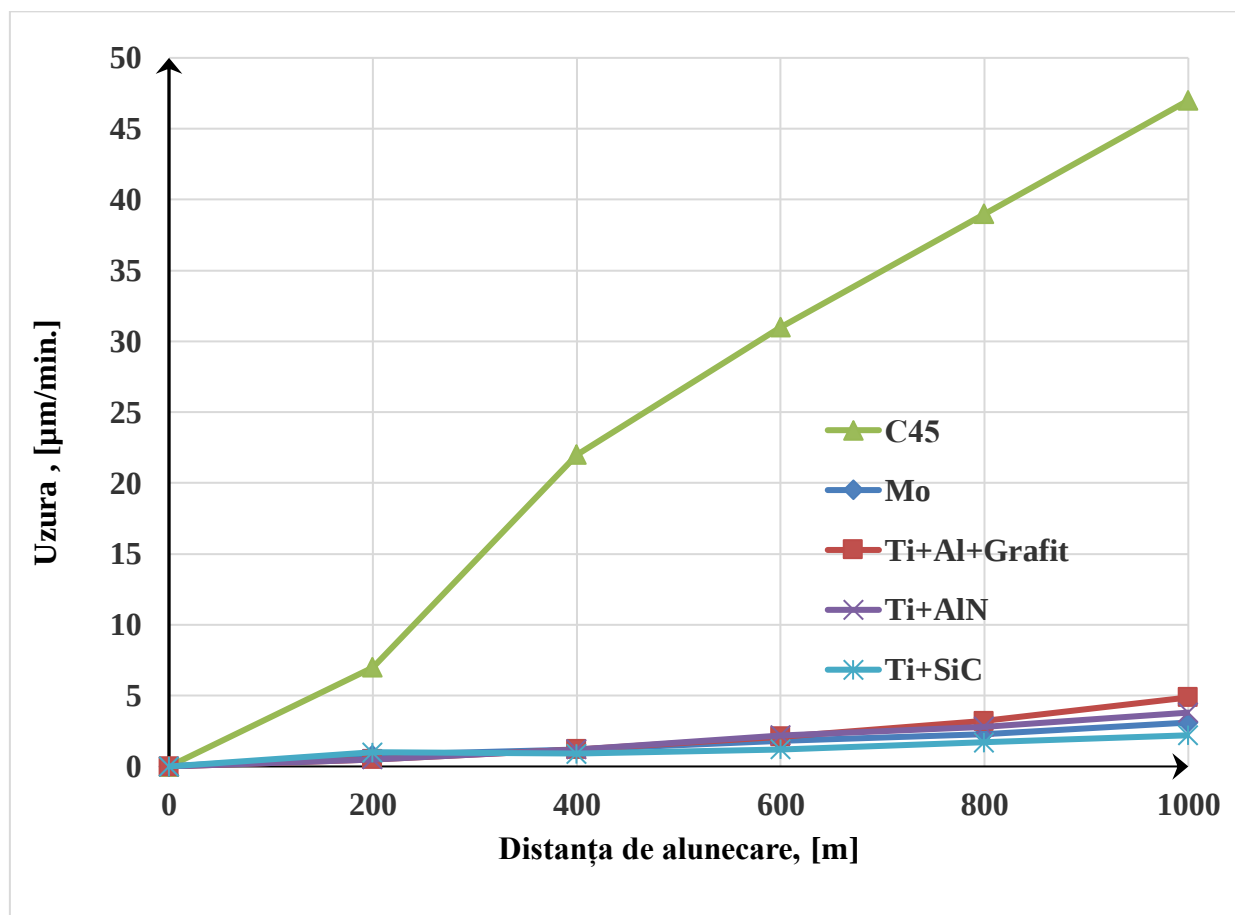
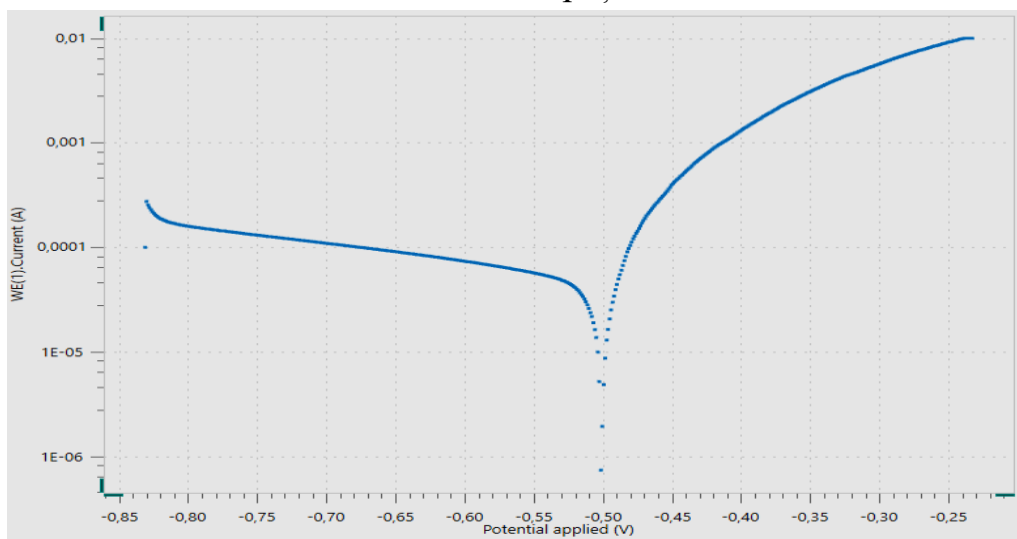


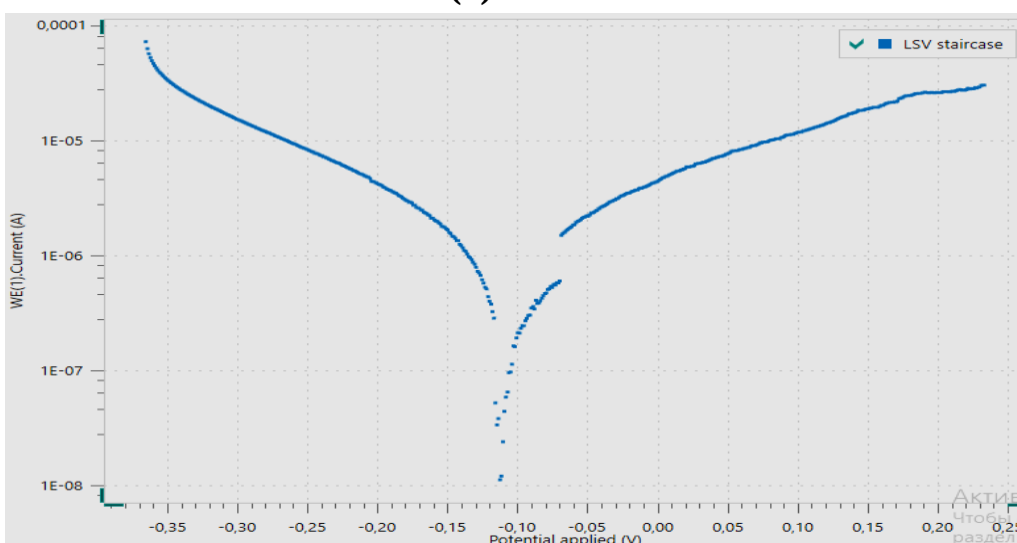
Fig. 10. Uzura masică acoperirilor la sfârșitul perioadei de testare tribologică cu o sarcină specifică de $\rho = 2$ MPa

Tot în capitolul 4 sunt prezentate rezultatele testării rezistenței la coroziune a oțelului inoxidabil 40X13 cu aceleași acoperiri Ti+grafit, W+grafit și compuși ternari Ti+Al+grafit, Ti+SiC, Ti+AlN. Acoperirile s-au depus, utilizând atât electrozi compacți, cât și pulberi ale acestora, cu granulația între 80 și 120 μm . În calitate de agent reactiv a fost utilizată soluția de 3% de NaCl în apă distilată. În urma testărilor au fost obținute curbele tipice de polarizare pentru probele studiate (figura 11). În baza studiului efectuat s-a stabilit că o rezistență maximă la coroziune în raport cu celelalte acoperiri formate au manifestat-o acoperirile obținute la alierea succesivă cu electrozi din Ti+grafit și W+grafit (figura 12). De menționat că pe aceste suprafețe, chiar și după acțiunea mediului coroziv, morfologia a rămas intactă, ceea ce ne confirmă o dată în plus că straturile superficiale formate la ASE cu W+grafit și Ti+grafit sunt rezistente la coroziune.

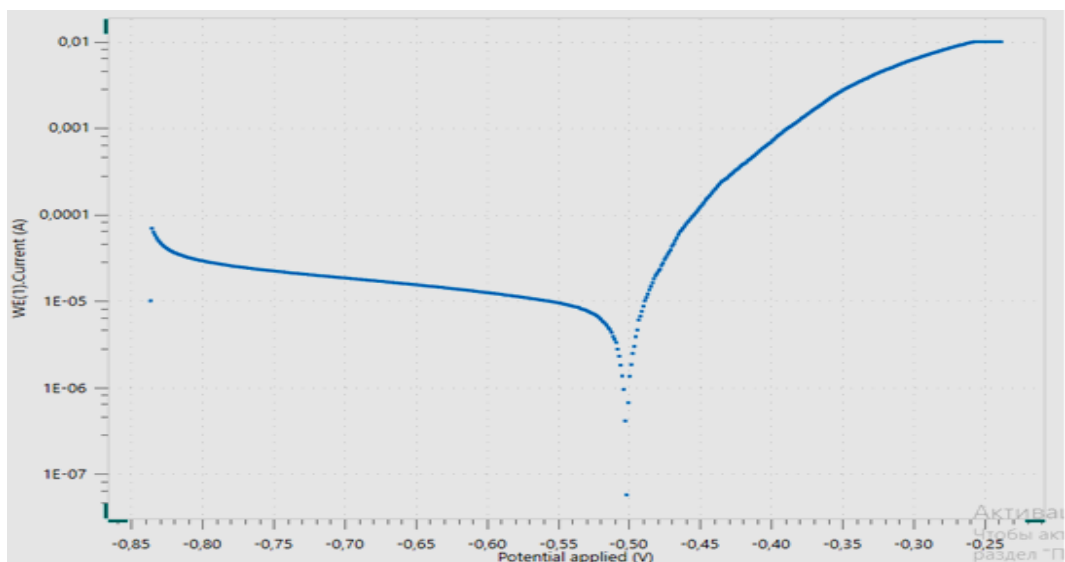
Creșterea rezistenței la coroziune a compuşilor formați din electrozi ce au în componență titan și carbon, precum wolfram și carbon poate fi explicată și prin faptul că aceștia formează straturi mai dense cu mai puține defecte.



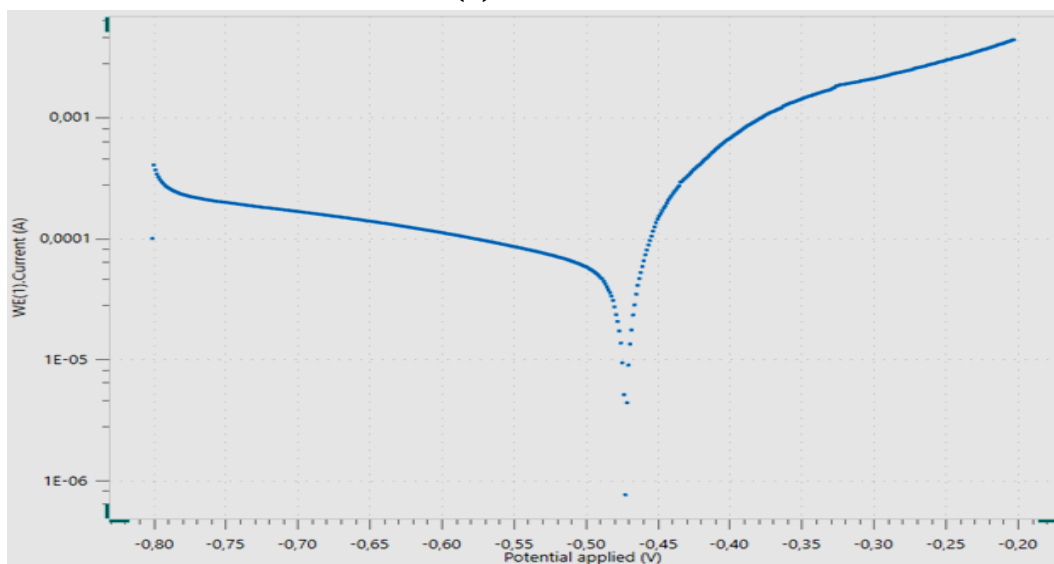
(a) Ti+Al+C



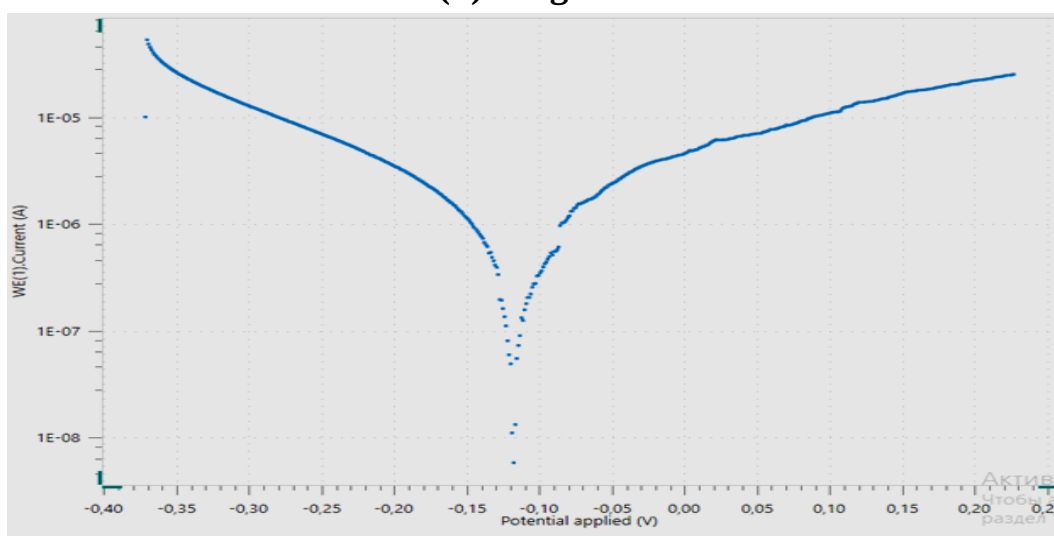
(b) Ti+SiC



(c) Ti+AlN



(d) Ti+grafit



(e) W+grafit

Fig. 11. Curbele de polarizare a acoperirilor formate la prelucrarea prin electroeroziune [11, 12]

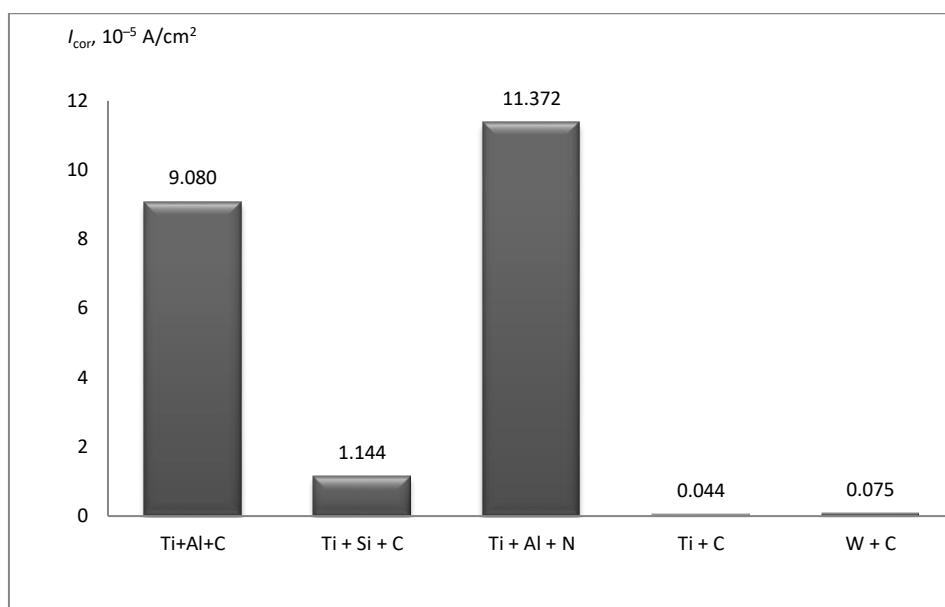


Fig. 12. Valoarea curentului de coroziune pentru diferite acoperiri

De menționat o particularitate aparține în procesul formării acoperirilor la ASE succesivă cu grafit și unul din metalele tranzitorii ale sistemului periodic. În pofida faptului că procesul are un caracter discontinuu, adică straturile se formează prin transferarea pe suport (catod) a porțiunilor mici de materiale, ceea ce nu permite obținerea straturilor cu continuitate de 100%, cu toate acestea valoarea rezistenței la coroziune a oțelului 40X13 supus alierii cu Ti+grafit și W+grafit s-a dovedit a fi destul de înaltă în raport cu oțelul neacoperit.

Deoarece transferul particulelor de grafit continuă și după finalizarea descărcării la suprafața catodului, în special la începutul procesului de prelucrare, se formează un strat de particule mici de grafit, care se înglobează în topitura în curs de răcire și umple adânciturile din acoperirea formată. Astfel, ca rezultat al acestei prelucrări se formează un strat dens, nepenetrabil pentru lichidul agresiv.

Acoperirile ternare Ti+Al+C, Ti+SiC și Ti+AlN au fost mai puțin rezistente în mediul agresiv, în comparație cu acoperirile binare Ti+C și W+C. Aceasta poate fi explicat prin faptul, că la prelucrarea cu trei componente se formează cu totul o altă structură și morfologie a acoperirii și efectul de formare a stratului-barieră se manifestă mai slab, sau lipsește totalmente.

Studiul caracteristicilor fizico-mecanice, după testările anticorozive au demonstrat că valoarea microdureității pentru acoperirile Ti+C și W+C practic nu se schimbă, ceea ce confirmă că acestea nu au fost supuse dizolvării electrochimice. Însă pentru acoperirile Ti+Al+C, Ti+SiC și Ti+AlN se observă o diminuare a microdureității cu (16÷19)%, în raport cu valorile inițiale, de până la testare.

CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI

1. În premieră s-au efectuat investigațiile științifice sistematice ale procesului alierii prin scânteii electrice prin prelucrarea succesivă cu electrozi din Ti, Ta, W și grafit (ca sursă de carbon) și pulberii acestora în vederea sintetizării fazelor cu conținut de carburi, ce atribuie straturilor superficiale ale metalelor înalte proprietăți fizico-mecanice [6, 13, 14, 15].

2. S-a stabilit că factorii de bază ce influențează substanțial asupra procesului sintetizării carburilor în straturile superficiale ale metalelor supuse alierii prin scânteii electrice, precum și a grosimii și calității acestora sunt: a) valoarea energiei descărcării electrice în impuls; b) parametrii constructiv-tehnologici – forma mișcării electrozilor compacti de prelucrare (vibrații, rotații, mișcare complexă: vibrații+rotații+oscilații) în raport cu suprafața de prelucrare; c) starea de agregare a materialelor de aliere – compactă sau pulverulentă [16-19].

3. S-a optimizat parametrii energetici ai procesului de aliere prin scânteii electrice: valoarea energiei de descărcare în impulsuri ($1,3 \div 3,0$) J, intensitatea medie a curentului – ($1,5 \div 2,0$) A, frecvența trecerii impulsurilor în limita 100-200 Hz, valorile optimizate asigură calitatea înaltă a acoperirilor [14, 17, 18].

4. S-a obținut sporirea productivității formării acoperirilor concomitent cu creșterea grosimii și calității acestora prin: a) îmbinarea într-un proces tehnologic unic a alierii prin scânteii electrice cu electrozi compacti și introducerea în interstițiul dintre anod și catod a materialelor pulverulente; b) utilizarea electrozilor din sârmă cu diametrul de cca 1,5-2,0 mm ce se rotesc în plan perpendicular pe suprafața de prelucrare, fapt ce a dus la creșterea duratei de funcționare a acoperirilor astfel formate [14, 20].

5. S-a efectuat sintetizarea compușilor ternari (MAX-fazelor) de tip Ti_2AlC , Ti_2AlN și Ti_3SiC_2 la alierea complexă cu electrozi compacti și pulberi metalice, ce atribuie suprafețelor metalice înalte performanțe de exploatare: rezistență la uzură și coroziune.

6. Pe baza Investigațiilor cu ajutorul razelor X și a microscopiei cu scanare electronică s-a demonstrat caracterul amorfo-cristalin al acoperirilor formate, ceea ce confirmă performanța proprietăților fizico-mecanice ale acestora [21, 22].

7. Încercările privind rezistența la uzură și coroziune a acoperirilor sintetizate au demonstrat o creștere substanțială a acestora în raport cu aceleași caracteristici ale metalelor și aliajelor neacoperite: rezistența la uzură a acoperirilor depuse a crescut de la 1,7 până la 60 ori, iar rezistența la coroziune a crescut cu o ordine la oțelul 40X13 supus alierii cu compozițiile Ti+C și W+C [2].

RECOMANDĂRI

Sintetizarea acoperirilor cu conținut de carburi faze nanostructurate și amorse, precum și a MAX-fazelor care, în exclusivitate la testările tribologice și anticorozive, au demonstrat rezistență înaltă la uzură și coroziune au creat perspective de utilizare a acestora pentru durificarea suprafețelor active ale diferitor organe de mașini, mecanisme și utilaje.

La îmbinarea într-un proces tehnologic unic a alierii prin scânteii electrice cu electrozi compacți și introducerea în interstițiul dintre anod și catod a materialelor pulverulente au fost obținute acoperiri semnificativ mai groase, decât în procesul tradițional de ASE, fapt ce deschide noi perspective pentru recondiționarea pieselor uzate. În aspect teoretic, pentru dezvoltarea acestei noi variante al procesului, este nevoie de elaborarea unui model fizic, care ar permite înțelegerea mecanismului de transfer al materialelor de aliere pe catod-piesă, în cazul introducerii în interstițiu a pulberii, care, după cum au demonstrat rezultatele experimentale, nu se supune criteriului Palatnik – Zolotîh, conform căruia nu poate fi depusă acoperirea pe catod, dacă temperatura de topire a acestuia este mai mică, decât temperatura de topire a anodului. Rezultatele experimentale au demonstrat cu prisosință contrariul, că indiferent de valoarea temperaturii de topire a catodului, la introducerea pulberii în interstițiu dintre electrozi înotdeauna are loc formarea acoperirii pe acesta.

PROPUNERI DE PERSPECTIVĂ

Experiența acumulată în cadrul realizării prezentei teze ne-a consolidat convingerea că există posibilități de creștere a eficienței procesului ASE atât prin perfectarea utilajului tehnologic, cât și prin modificarea principiului de amorsare a descărcării electrice în impuls. Asta prevede, în primul rând, utilizarea în calitate de materiale de aliere a pulberilor, iar în al doilea rând, amorsarea descărcărilor electrice la distanțe cu mult mai mari, decât cele de străpungere a interstițiului, utilizând inițierea descărcării cu surse de tensiune înaltă și curenți mici. Aplicarea acestui principiu de prelucrare are avantajul utilizării în calitate de materiale de aliere nu numai a metalelor, dar și a nemetalelor (materialelor dielectrice), ceea ce deschide de asemenea perspective de obținere a acoperirilor cu înalte proprietăți fizico-mecanice și de exploatare.

În perioada următoare va continua elaborarea variantelor noi ale procesului și modernizarea utilajului de realizare a acestuia pe deoparte, iar pe de alta, extinderea gamei de materiale utilizate în calitate de elemente de aliere, ceea ce va permite obținerea acoperirilor multicomponente cu diverse destinații funcționale. Mai mult ca atât, se prevede dezvoltarea procesului alierii prin scânteii electrice utilizând în calitate de materiale de aliere pulberi metalice, în locul electrozilor compacți, astfel existând considerabil domeniile de aplicare ale procesului alierii prin scânteii electrice.

BIBLIOGRAFIE

- [1] МИХАЙЛОВ, В. В.; ГИТЛЕВИЧ, А. Е.; БАЧУ, К. *Особенности электроискрового легирования титана графитом*. Материалы международной научно-технической конференции. Комсомольск-на-Амуре, 2009.
- [2] KUKAREKO, V.; AGAFII, V.; MIHAILOV, V.; GRIGORCHIC, A.; KAZAK, N. Evaluation of Tribological Properties of Hard Coatings Obtained on Steel C45 by Electro-Dspark Alloying. *Key Engineering Materials*. 2019, 813, 381—386. ISSN 1662-9795. Doi 10.4028/www.scientific.net/ KEM.813.381.
- [3] MIKHAILOV, V. V.; KAZAK, N. N.; AGAFII, V. I.; YANAKEVICH, A. I. Synthesis of Carbide Phases in Surface Metal Layers Under Electrospark Alloying with Graphite and Transition Metals in Groups IV–VI. *Powder Metall Met C*. 2019, 58(5-6), 307—311. ISSN 1068-1302. Doi 10.1007/s11106-019-00079-8 (IF: 0,381).
- [4] МИХАЙЛОВ В. В., КАЗАК Н. Н., АГАФИЙ В. И., ЯНАКЕВИЧ А. И. Синтез карбидных фаз в поверхностных слоях металлов при электроискровом легировании графитом и переходными металлами IV-VI групп. //Порошковая металлургия//, 2019, №5/6. С.75-81.
- [5] KROITORU, D. M.; SILKIN, S.A.; KAZAK, N. N.; IVASHKU, S. KH.; PETRENKO, V. I.; POSHTARU, G. I.; YURCHENKO, V. I.; YURCHENKO, E. V. Physico-Mechanical and Tribological Properties of Carbon-Containing Surface Nanocomposites Produced by Electrospark Alloying. *Surf Eng Appl Elect*. 2021, **57(6)**, 617—626. Doi: 10.3103/S1068375521060077.
- [6] KAZAK, N. Sintetizarea carburilor metalice în straturile superficiale ale metalelor la alierea prin scânteii electrice cu electrozi din grafit. În: *Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: Viziuni ale tinerilor cercetători. Materialele Conferinței Științifice a Doctoranzilor. Ediția a V-a. Volumul II. UnAȘM, 2016, Chișinău, Moldova*, p. 42-46. ISBN: 978-9975-933-84-1.
- [7] AUCHYNNIKAU, E.; KAZAK, N.; MIKHAILOV, V.; IVASHCU, S.; SHKURPELO, A. Tribotechnical characteristics of nanostructured coatings formed by electrospark alloying method. În: *Proceedings BALTRIB'2019*. The 10th International Conference BALTRIB'2019, 14–17 November 2019, Kaunas, Lithuania, p. 193-197.
- [8] СМЕТКИН А.А., МАЙОРОВА Ю.К. *Свойства материалов на основе МАХ-фаз*. Вестник ПНИПУ, Машиностроение, материаловедение, 2015 г., Т17, №4.
- [9] УКАНСКИС МИНДАУГАС, ПАДГУРСКАС ЮОЗАС, САБАЛЮС АРВИДАС, МИХАЙЛОВ ВАЛЕНТИН, КАЗАК НАТАЛЬЯ, ЖУНДА АУДРЮС Трение и износ электроискровых покрытий из молибдена, бронзы и комбинированного (Ti + Al + C) состава по стали 45 в среде смазки. *Трение и износ*. 2021. Т. 42, № 1. с. 89-97. DOI: 10.21122/2220-9506-2021-42-1-89-97.
- [10] МИХАЙЛОВ, В. В.; ОВЧИННИКОВ, Е. В.; ЭЙСЫМОНТ, Е. И.; КАЗАК, Н. Н.; ПИНЧУК, Т. И.; ХОВАТОВ, П. А. Физико-механические характеристики нанокompозитных покрытий, формируемых методом электроискрового легирования. *Вестник Гродзенскагадзяржаўнага ўніверсітэтаімя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка*. 2019, 9(2), 45-53. ISSN 1810-0198.
- [11] КАЗАК, Н. Н.; МИХАЙЛОВ, В. В.; ЧЕКАН, Н. М.; ОВЧИННИКОВ, Е. В.; ЭЙСЫМОНТ, Е. И.; КОВШ, А. А. Коррозионная стойкость и прочностные характеристики наноструктурированных покрытий, полученных методом электроискрового легирования. În: *Актуальные проблемы прочности. Материалы международной научной конференции (Витебск, 25–29 мая 2020 года)*, p. 320—322. ISBN: 978-985-6967-44-6.
- [12] ОВЧИННИКОВ, Е. В., МИХАЙЛОВ, В. В., ЧЕКАН, Н. М. Структурные особенности нанокompозитных покрытий, получаемых методом электроискрового легирования. *Горная механика и машиностроение*, №1 2020, УДК 621.793.16-022.532 (476) с.93-100.
- [13] KAZAK, N., MIHAILOV, V., PERETEATCU, P., CRACAN, C. Tehnologie de durificare a suprafețelor metalice prin sintetizarea în plasma descărcărilor electrice a compușilor cu înalte proprietăți fizico-mecanice și de exploatare. În: *Perspectivile și Problemele Integrării în Spațiul European al Cercetării și Educației. Volumul VII, Partea 2. Cahul: USC, 2020*. Conferința

științifică internațională „Perspectivele și Problemele Integrării în Spațiul European al Cercetării și Educației”, ed. a VIII-a, 05 iunie 2020, Cahul, Republica Moldova, p. 309-314. ISBN: 978-9975-88-060-2.

[14] V. AGAFII, V. MIHAILOV, N. KAZAK, G. VOLODINA, C. CRACAN “Increase of wear resistance of Cr₁₈Ni₁₀Ti stainless steel by method of electric-spark alloying with electrodes of refractory metals and graphite” The 9th International Conference BALTRIB'2017 16-17 November 2017, Aleksandras Stulginskis University, Kaunas district, Lithuania, p. 53-56. ISBN: 978-609-449-127-6. Doi 10.15544/baltrib.2017.11

[15] KAZAK, N., MIHAILOV, V., IANACHEVICI, A., AGAFII, V. Surface modification of structural steels and titanium alloys by synthesizing carbide phases with electro-spark alloying electrodes of transition metals IV - VI groups and graphite. În: *8th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics MSCMP-2016, September 12-16, 2016. Chișinău, Moldova Republic*. ABSTRACTS, p. 340. ISBN: 978-9975-71-819-6

[16] MIKHAILOV V.V., OVCHINNIKOV E.V., EISYMONT E.I., KAZAK N.N., PINCHUK T.I., KHOVATOV P.A. (Moldova-Belarus). Physical and mechanical characteristics of nanocomposite coatings formed by electrospark alloying. ”*Vernik Hrodzenskaha Dziarhaunaha Universiteta Imia Ianki Kupaly. Seryia 6. Tekhnika*” vol. 9, no.2, 2019, ISSN 2223-5396, p. 45-53.

[17] AUCHYNNIKAU, E.; KAZAK, N.; MIKHAILOV, V.; IVASHCU, S.; SHKURPELO, A. Tribotechnical characteristics of nanostructured coatings formed by electrospark alloying method. În: *Proceedings BALTRIB'2019*. The 10th International Conference BALTRIB'2019, 14–17 November 2019, Kaunas, Lithuania, p. 193-197.

[18] KAZAK, N. Contribuții privind modificarea suprafețelor oțelului Inox și al aliajului de titan OT4 la alierea prin scânteii electrice cu electrozi din grafit și metale tranzitorii din grupele IV-VI a sistemului periodic. În: *Tendențe contemporane ale dezvoltării științei: Viziuni ale tinerilor cercetători. Materialele Conferinței, Vol. I, Chișinău, 2017*. Conferința Științifică a Doctoranzilor (cu participare internațională). Ediția a VI-a. 15 iunie 2017, Chișinău, Republica Moldova, p. 73-78. ISBN: 978-9975-108-16-4.

[19] MIKHAILOV, V.V., AGAFII, V.I., KAZAK, N.N. Tribological characteristics of multicomponent coatings synthesized on steel 45 in the process of electrospark alloying with a mixture of powders. În: *Abstracts MSCMP 2018*. 9th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics, September 25-28, 2018, Chisinau, Moldova, p. 248. ISBN: 978-9975-142-35-9.

[20] AUCHYNNIKAU, Y., PINCHHUC, T., EISYMONT, Y., MIHAILOV, V. KAZAK, N. BAGANOVICH, L. Morphological and structural features of electrospark coatings În: *7th International Scientific Conference Material Science “Nonequilibrium phase transformations” September 06, 2021. Varna, Bulgaria*. pp. 67-69. ISSN: 2535-0218.

[21] ОВЧИННИКОВ, Е.В., ЧЕКАН, Н.М., ХАСИЕВИЧ, В.М., ВЕРЕМЕЙЧИК, А.И., МИХАЙЛОВ, В.В., КАЗАК, Н.Н. Структура электроискровых композиционных покрытий на металлической матрице. *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2021, **1(124)**, 49—53. Doi 10.36773/1818-1212-2021-124-1-49-53.

[22] КАЗАК, Н.Н.; МИХАЙЛОВ, В.В.; ЧЕКАН, Н.М.; ОВЧИННИКОВ, Е.В.; ЭЙСЫМОНТ, Е.И.; КОВШ, А.А. Коррозионная стойкость и прочностные характеристики наноструктурированных покрытий, полученных методом электроискрового легирования. În: *Актуальные проблемы прочности. Материалы международной научной конференции (Витебск, 25–29 мая 2020 года)*, p. 320—322. ISBN: 978-985-6967-44-6.

LISTA PUBLICAȚIILOR AUTORULUI LA TEMA TEZEI

1. Articole în reviste științifice

1. KATINAS, E., JANKAUSKAS, V., **KAZAK, N.**, MICHAILOV, V. Improving Abrasive Wear Resistance for Steel Hardox 400 by Electro-Spark Deposition. *J Frict Wear*. 2019, 40(1), p. 100—106. ISSN 1068-3666. Doi 10.3103/S1068366619010070 (IF: 0,489).
2. MIKHAILOV, V.V., **KAZAK, N.N.**, AGAFII, V.I., YANAKEVICH, A.I. Synthesis of Carbide Phases in Surface Metal Layers Under Electrospark Alloying with Graphite and Transition Metals in Groups IV–VI. *Powder Metall Met C*. 2019, 58(5-6), p.307-311. ISSN 1068-1302. Doi 10.1007/s11106-019-00079-8 (IF: 0,381).
3. RUKANSKIS, M.; PADGURSKAS, J.; SABALIUS, A.; MICHAILOV, V.; **KAZAK, N.**; ZUNDA, A. Friction and Wear of Electrospark Coatings Made of Molybdenum, Bronze, and Combined (Ti + Al + C) Composition on Steel 45 in a Lubricant Medium. *J Frict Wear*. 2021, 42(1), 56—62. Doi: 10.3103/S1068366621010086 (IF: 0,606).
4. AGAFII, V., MIHAILOV, V., IANACHEVICI, A., **KAZAK, N.** Improvement of the reability of the friction pairs by electrospark alloying. *Buletin AGIR*. 2015, XX(3), p.43-46. ISSN 1224-7928.
5. AGAFII, V.I., PADGURSKAS, J., MIHAILOV, V.V., ANDRIUSIS, A., KREIVAITIS, R., **KAZAK, N.** The wear resistance of electrospark coatings on steel c45 when operating with counterbodies of different steels. *Agricultural Engineering, Research Papers*, 2015, Vol. 47, p.1-5, ISSN 1392-1134/ eISSN 2345-0371.
6. KUKAREKO, V.; AGAFII, V.; MIHAILOV, V.; GRIGORCHIC, A.; **KAZAK, N.** Evaluation of Tribological Properties of Hard Coatings Obtained on Steel C45 by Electro-Dspark Alloying. *Key Engineering Materials*. 2019, p.813, pp.381-386. ISSN 1662-9795. Doi 10.4028/www.scientific.net/KEM.813.381.
7. MIKHAILOV V. V., OVCHINNIKOV E. V., EISYMONT E. I., **KAZAK N. N.**, PINCHUK T.I., KHOVATOV P.A. (Moldova-Belarus). Physical and mechanical characteristics of nanocomposite coatings formed by electrospark alloying. "Vesnik Hrodzyenskaya Dziarhaunaha Universiteta Imea Ianki Kupaly. Seria 6. Tekhnika" vol. 9, no.2, 2019, ISSN 2223-5396, p. 45-53.
8. МИХАЙЛОВ, В. В.; ОВЧИННИКОВ, Е. В.; ЭЙСЫМОНТ, Е. И.; **КАЗАК, Н. Н.**; ПИНЧУК, Т. И.; ХОВАТОВ, П. А. Физико-механические характеристики нанокompозитных покрытий, формируемых методом электроискрового легирования. *Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка*. 2019, **9(2)**, 45-53. ISSN 1810-0198.
9. **КАЗАК, Н. Н.**; ОВЧИННИКОВ, Е. В.; МИХАЙЛОВ, В. В.; ЧЕКАН, Н. М. Электрохимическое поведение композиционных покрытий, получаемые методом электроискрового легирования. *Горная механика и машиностроение*. **2020(2)**, 1—7. ISSN 1728-3841.
10. УКАНСКИС МИНДАУГАС, ПАДГУРСКАС ЮОЗАС, САБАЛЮС АРВИДАС, МИХАЙЛОВ ВАЛЕНТИН, **КАЗАК НАТАЛЬЯ**, ЖУНДА АУДРИОС Трение и износ электроискровых покрытий из молибдена, бронзы и комбинированного (Ti + Al + C) состава по стали 45 в среде смазки. *Трение и износ*. 2021. Т. 42, № 1. с. 89-97. DOI: 10.21122/2220-9506-2021-42-1-89-97.
11. KROITORU, D. M.; SILKIN, S. A.; **KAZAK, N. N.**; IVASHKU, S. Kh.; PETRENKO, V. I.; POSHTARU, G. I.; YURCHENKO, V. I.; YURCHENKO, E. V. Physico-Mechanical and Tribological Properties of Carbon-Containing Surface Nanocomposites Produced by Electrospark Alloying. *Surf Eng Appl Elect*. 2021, **57(6)**, 617—626. Doi: 10.3103/S1068375521060077.
12. **KAZAK, N.** Sintetizarea prin electroeroziune a carburilor pe suprafețele metalice. *Akademios*. 2019, 2(53), pp.31-34. ISSN 1857-0461. Doi: 10.5281/zenodo.3364304.
13. КРОЙТОРУ, Д.М.; СИЛКИН, С.А.; **КАЗАК, Н.Н.**; ИВАШКУ, С.Х.; ПЕТРЕНКО, В.И.; ПОШТАРУ, Г.И.; ЮРЧЕНКО, В.И.; ЮРЧЕНКО, Е.В. Физико-механические и трибологические свойства углеродсодержащих поверхностных нанокompозитов, полученных электроискровым легированием. *Электронная обработка материалов*. 2020, **56(6)**, 12-23. ISSN 0013-5739. Doi: 10.5281/zenodo.4299860.

2. Articole în culegeri științifice

14. V. AGAFII, V. MIHAILOV, N. KAZAK, G. VOLODINA, C. CRACAN “Increase of wear resistance of Cr₁₈Ni₁₀Ti stainless steel by method of electric-spark alloying with electrodes of refractory metals and graphite” The 9th International Conference BALTRIB'2017 16-17 November 2017, Aleksandras Stulginskis University, Kaunas district, Lithuania, p. 53-56. ISBN: 978-609-449-127-6. Doi 10.15544/baltrib 2017.11.

15. AUCHYNNIKAU, E.; KAZAK, N.; MIKHAILOV, V.; IVASHCU, S.; SHKURPELO, A. Tribotechnical characteristics of nanostructured coatings formed by electrospark alloying method. În: *Proceedings BALTRIB'2019*. The 10th International Conference BALTRIB'2019, 14–17 November 2019, Kaunas, Lithuania, p. 193-197.

16. KUKAREKO, V.; AGAFII, V., MIHAILOV, V., KAZAK, N. Evaluation of Tribological Properties of Hard Coatings Obtained on Steel C45 by Electro-Spark Alloying. În: *The 33th International Conference on Surface Modification Technologies*, 26-28.06.2019, Naples, Italia, p. 381-386

17. КАЗАК, Н. Н.; МИХАЙЛОВ, В. В.; ЧЕКАН, Н. М.; ОБЧИННИКОВ, Е. В.; ЭЙСЫМОНТ, Е. И.; КОВШ, А. А. Коррозионная стойкость и прочностные характеристики наноструктурированных покрытий, полученных методом электроискрового легирования. În: *Актуальные проблемы прочности. Материалы международной научной конференции (Витебск, 25–29 мая 2020 года)*, p. 320–322. ISBN: 978-985-6967-44-6.

18. ОБЧИННИКОВ, Е. В.; ЧЕКАН, Н. М.; ХВИСЕВИЧ, В. М.; ВЕРЕМЕЙЧИК, А. И.; МИХАЙЛОВ, В. В.; КАЗАК, Н. Н. Структура электроискровых нанокomпозиционных покрытий на металлической матрице. *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2021, 1 (124), 49–53. Doi [10.36773/1818-1212-2021-124-1-49-53](https://doi.org/10.36773/1818-1212-2021-124-1-49-53).

19. AUCHYNNIKAU, Y., PINCHHUC, T., EISYMONT, Y., MIHAILOV, V. KAZAK, N. BAGANOVICH, L. Morphological and structural features of electrosparks coatings În: *7th International Scientific Conference Material Science “Nonequilibrium phase transformations” September 06, 2021. Varna, Bulgaria*. pp. 67–69. ISSN: 2535-0218.

20. KAZAK, N. Sintetizarea carburilor metalice în straturile superficiale ale metalelor la alierea prin scânteii electrice cu electrozi din grafit. În: *Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: Viziuni ale tinerilor cercetători. Materialele Conferinței Științifice a Doctoranzilor. Ediția a V-a. Volumul II. UnAȘM, 2016, Chișinău, Moldova*, p. 42–46. ISBN: 978-9975-933-84-1.

21. KAZAK, N. Contribuții privind modificarea suprafețelor oțelului inox și al aliajului de titan OT4 la alierea prin scânteii electrice cu electrozi din grafit și metale tranzitorii din grupele IV-VI a sistemului periodic. În: *Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: Viziuni ale tinerilor cercetători. Materialele Conferinței, Vol. I, Chișinău, 2017. Conferința Științifică a Doctoranzilor (cu participare internațională). Ediția a VI-a. 15 iunie 2017, Chișinău, Republica Moldova*, p. 73–78. ISBN: 978-9975-108-16-4.

22. KAZAK, N., MIHAILOV, V., PERETEATCU, P., CRACAN, C. Tehnologie de durificare a suprafețelor metalice prin sintetizarea în plasma descărcărilor electrice a compușilor cu înalte proprietăți fizico-mecanice și de exploatare. În: *Perspectivile și Problemele Integrării în Spațiul European al Cercetării și Educației. Volumul VII, Partea 2. Cahul: USC, 2020. Conferința științifică internațională „Perspectivile și Problemele Integrării în Spațiul European al Cercetării și Educației”, ed. a VIII-a, 5 iunie 2020, Cahul, Republica Moldova*, p. 309–314. ISBN: 978-9975-88-060-2.

3. Teze în culegeri științifice

23. AGAFII, V. I., PADGURSKAS, J., MIHAILOV, V. V., ANDRIUSIS, A., KREIVAITIS, R.; KAZAK, N. Improvement of wear resistance of OT4 titanium alloy by electrospark alloying. În: *8th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics MSCMP-2016, September 12–16, 2016. Chișinău, Moldova Republic. ABSTRACTS*, p. 320. ISBN: 978-9975-71-819-6.

24. AGAFII, V. I., PADGURSKAS, J., MIHAILOV, V. V.; ANDRIUSIS, A., KREIVAITIS, R., KAZAK, N. Influence of sliding distance and load on wear of electrospark coatings. În: *8th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics MSCMP-2016, September 12-16, 2016. Chișinău, Moldova Republic. ABSTRACTS*. p. 322. ISBN: 978-9975-71-819-6.

25. **KAZAK, N.**, MIHAILOV, V., IANACHEVICI, A., AGAFII, V. Surface modification of structural steels and titanium alloys by synthesizing carbide phases with electro-spark alloying electrodes of transition metals IV–VI groups and graphite. În: *8th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics MSCMP-2016, September 12-16, 2016. Chişinău, Moldova Republic. ABSTRACTS*, p. 340. ISBN: 978-9975-71-819-6
26. MIHAILOV, V., ŞCURPELO, A., **KAZAK, N.**, IANACHEVICI, A. Structural changes in the surface layers' titanium, electro-spark alloying electrodes made of graphite. În: *8th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics MSCMP-2016, September 12–16, 2016. Chişinău, Moldova Republic. ABSTRACTS*, p. 344. ISBN: 978-9975-71-819-6.
27. MIKHAILOV, V. V., AGAFII, V. I., **KAZAK, N. N.** Tribological characteristics of multicomponent coatings synthesized on steel 45 in the process of electrosark alloying with a mixture of powders. În: *Abstracts MSCMP 2018. 9th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics, September 25-28, 2018, Chisinau, Moldova*, p. 248. ISBN: 978-9975-142-35-9.
28. MIKHAILOV, V. V., SHKURPELO, A. I., **KAZAK, N. N.**, POGRELYUK, I. N., TRUSH, V. S., LUKYANENKO, A. G. Modification of the surface of titanium during complex treatment with nitriding, oxidation and electroerosion alloying. În: *Abstracts MSCMP 2018. 9th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics, September 25-28, 2018, Chisinau, Moldova*, p. 267. ISBN: 978-9975-142-35-9.
29. AUCHYNNIKAU, Y., PINCHHUC, T., EISYMONT, Y., MIHAILOV, V. **KAZAK, N.** BAGANOVICH, L. Morphological and structural features of electrospark coatings În: *7th International Scientific Conference Material Science “Nonequilibrium phase transformations” September 06, 2021. Varna, Bulgaria*. pp. 67-69. ISSN: 2535-0218.

ADNOTARE
KAZAK NATALIA

„Modificarea suprafețelor metalice prin sintetizarea cu scânteii electrice a carburilor, utilizând electrozi din grafit și metale tranzitorii”

Teză de doctor în științe ingineresti, la specialitatea 251.03 - Tehnologii electrofizice și ingineria suprafețelor, Chișinău, 2023

Structura tezei: Teza este realizată în limba română și conține: introducere, 4 capitole, concluzii generale și recomandări, 121 titluri bibliografice, 138 pagini de text de bază, 61 figuri și 23 tabele. Rezultatele prezentate în teză au fost publicate în 29 lucrări științifice.

Cuvinte-cheie: Modificarea suprafețelor metalice, alierea prin scânteii electrice, electrozi, grafit, titan, tantal, wolfram, materiale pulverulente nanostructuri, faze amorfizate, rezistența la uzură și coroziune.

Scopul lucrării: Modificarea suprafețelor metalice prin alierea succesivă cu scânteii electrice, utilizând electrozi din grafit, titan, tantal și wolfram și pulberi ale acestora în vederea obținerii în straturile formate a carburilor de tip „MeC”, a fazelor nanostructurate și amorfe cu înalte proprietăți fizico-mecanice.

Obiectivele cercetării: Prezenta teză de doctorat își propune elaborarea unei noi variante a procesului alierii prin scânteii electrice, care constă în prelucrarea cu mai mulți electrozi într-o anumită succesiune ce asigură o performanță înaltă a acoperirilor.

Noutatea și originalitatea științifică a lucrării: Efectuarea în premieră a investigațiilor științifice sistematice în vederea stabilirii legităților de bază ale procesului sintetizării carburilor de tip „MeC”, utilizând alierea prin scânteii electrice cu electrozi din grafit, titan, tantal și wolfram; îmbinarea într-un proces unic a alierii prin scânteii electrice cu electrozi compacți și introducerea în interstițiul dintre anod și catod a materialelor pulverulente. Originalitatea prezentei lucrări constă în utilizarea electrozilor rotativi în plan perpendicular pe suprafața de prelucrare, ceea ce contribuie la creșterea substanțială a grosimii straturilor formate, sporirea eficacității procesului de sintetizare a carburilor și a calității acestora.

Rezultatele obținute, care contribuie la soluționarea unei probleme științifice importante, constau în elaborarea unui proces tehnologic nou de modificare a suprafețelor metalice prin sintetizarea carburilor metalice de tip „MeC” și a fazelor nanostructurate la alierea succesivă prin scânteii electrice cu electrozi din grafit, titan, tantal, wolfram și pulberi ale acestora, ce a permis creșterea performanțelor acoperirilor formate.

Problema științifică importantă soluționată ține de stabilirea legităților sintetizării fazelor cu conținut de carburi de tip „MeC” la alierea succesivă prin scânteii electrice cu electrozi din grafit, titan, tantal, wolfram și pulberi ale acestora introduși în interstițiul dintre electrozi. Influența parametrilor energetici: valoarea energiei descărcării în impuls și a celor tehnologici: forma mișcării electrozilor de prelucrare (rotații, vibrații și rotații+vibrații) în raport cu suprafața supusă prelucrării asupra eficienței formării straturilor cu conținut de carburi cu caracteristici fizico-mecanice înalte.

Semnificația teoretică și valoarea aplicativă a rezultatelor obținute în cadrul prezentei teze constă în creșterea bazei de cunoștințe noi în domeniul modificării suprafețelor metalice prin sintetizarea compușilor metalici cu diverse destinații funcționale în procesul alierii prin scânteii electrice.

Implementarea rezultatelor științifice: Rezultatele științifice obținute în cadrul prezentei teze au fost valorificate în cadrul mai multor proiecte internaționale, inclusiv proiectul EU H2020 MSCA-RISE-SMARTELECTRODES-778357, precum și implementarea tehnologiei de durificare a sculelor și echipamentelor la „БЕЛКАРД”, Belarus (act din 03.12.2021).

Rezultatele prezentate în teza de față au fost publicate în 29 lucrări științifice, 3 dintre care cu impact-factor, și 3 lucrări de un singur autor. Cercetările efectuate au fost apreciate prin acordarea premiului a trei academii: Academia Națională a Ucrainei, Academia Națională a Republicii Belarus și Academia de Științe a Republicii Moldova.

SUMMARY
KAZAK NATALIA

„Modification of metal surfaces by synthesizing carbides with electrico sparks, using graphite electrodes and transient metals”

PhD thesis in technical sciences, specialty 251.03-“Electrophysical technologies and surface engineering”, Chisinau, 2023

Structure of the thesis: The thesis is written in Romanian and consists of an introduction, 4 chapters, general conclusions and recommendations, 121 references, 138 pages, 61 figures, and 23 tables. The obtained results are published in 29 papers and abstracts of scientific conferences.

Keywords: Modification of metal surfaces, electrospark alloying, electrodes, graphite, titanium, tantalum, tungsten, nanostructures, amorphization, wear, corrosion.

Scope of work: Modification of metallic surfaces by successive alloying with electric sparks using titanium, tantalum and tungsten graphite electrodes in order to obtain in the formed layers of “MeC” type carbides, nanostructured and amorphous phases with high physical-mechanical properties.

Novelty and scientific originality: For the first time, the systematic investigations were carried out in order to establish the fundamentals of the mechanism of the “MeC” type carbides synthesis using electrospark alloying with electrodes of graphite, titanium, tantalum and tungsten. The originality of this paper is the use of rotating electrodes perpendicular to the surface to be processed, which has contributed to a substantial increase in the efficiency of the carbide synthesis process and the quality of the layers formed.

Obtained results that contribute to solution of important scientific problem: They consist in the development of a new technological process of modification of metallic surfaces by synthesizing “MeC” type metal carbides and nanostructured phases via the successive alloying them by electrode with graphite, titanium, tantalum, and tungsten and their powders, which will increase the performance of the formed coatings.

Theoretic value: The important scientific problem has been solved primarily by establishing the dependence of the mass transfer intensity of the anode material (electrode to be processed) on the cathode surface (part) and the formation of the hardened layer with carbon content, of the energetic parameters of the electric spark alloying process: the amplitude of the discharge current and again, secondly, the technological parameters of the process: the shape of the movement of the processing electrode (vibrations or rotations). The establishment of these regularities has contributed to the optimization of the formation process of “MeC” type carbides and nanostructured layers with high physical-mechanical and operating properties.

The theoretical significance and the applicative value of the results obtained in this doctoral thesis consists in increasing the new knowledge base in the field of metal surfaces modification by synthesizing different metal compounds with various functional destinations in the process of electric spark alloying.

Implementation of scientific results: The results obtained during research for this thesis have been implemented in several international projects, including project EU H2020 MSCA-RISE-SMARTELECTRODES-778357; as well as the implementation of tool and equipment hardening technology at "БЕЛКАРД", Belarus (act of 03.12.2021).

The results presented in the current thesis have been published in 29 scientific papers, 3 of which with an impact factor. The research carried out was promoted by awarding the prize of three Academies: the National Academy of Ukraine, the National Academy of the Republic of Belarus and the Academy of the Republic of Moldova.

АННОТАЦИЯ
КАЗАК НАТАЛЬЯ

„Модификация металлических поверхностей путем синтеза карбидов с помощью электрических искр, с использованием графитовых электродов и переходных металлов”.

Кандидат технических наук по специальности **251.03 - Электрофизические технологии и инженерия поверхностей**, Кишинев, 2023 год.

Идентификационные данные: Диссертация написана на румынском языке и состоит из введения, 4 глав, общих выводов и рекомендаций, 121 ссылок, 138 страниц текста, 61 рисунка и 23 таблиц. Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в 29 научных статьях.

Ключевые слова: Модификация металлических поверхностей, электроискровое легирование, электроды, графит, титан, тантал, вольфрам, порошковые материалы, наноструктуры, аморфные фазы, износ- и коррозионная стойкость.

Цель работы: Модификация металлических поверхностей путем последовательного электроискрового легирования электродами из графита, титана, тантала, вольфрама, и их порошков, позволяющих получить в сформированных покрытиях карбидов типа «MeC» а также наноструктурированные и аморфные фазы с высокими физико-механическими свойствами.

Задачи исследований: Диссертация направлена на разработку нового способа электроискрового легирования, заключающегося в обработке несколькими электродами в определенной последовательности, что обеспечивает улучшенные характеристики покрытий.

Научная новизна и оригинальность: Впервые проведены систематические научные исследования с целью установления основных закономерностей процесса синтеза карбидов типа «MeC» при электроискровом легировании электродами из графита, Ti, Ta, W. Оригинальность работы состоит в уникальном сочетании в процессе электроискрового легирования компактных электродов с введением порошков этих же материалов в межэлектродный промежуток, а также использование вращающихся электродов в плоскости перпендикулярной обрабатываемой поверхности, что способствовало существенному повышению толщины сформированных слоев и эффективности процесса синтеза карбидов.

Полученные результаты, способствующие решению важной научной проблемы, заключаются в установлении закономерностей синтеза карбидных фаз типа MeC при последовательном электроискровом легировании электродами из графита, ттала, вольфрама и их порошков, введенных в межэлектродный зазор. Влияние энергетических параметров: величины энергии электрических импульсов и технологических: формы движения обрабатывающих электродов (вибрации, вращение, вибрации+вращение) по отношению к обрабатываемой поверхности на эффективность формирования слоев, содержащих карбидные фазы с высокими физико-механическими характеристиками

Теоретическая значимость и прикладная ценность результатов, заключается в применении новых подходов в области модификации металлических поверхностей за счет синтеза соединений с различным функциональным назначением в процессе электроискрового легирования.

Внедрение научных результатов: научные результаты, полученные в данной диссертации, были использованы в нескольких международных проектах, включая **EU H2020 MSCA-RISE-SMARTELECTRODES-778357**; а также внедрение технологии упрочнения инструмента и оборудования на «ВЕЛКАРД», Беларусь (акт от 03.12.2021).

Результаты, представленные в данной диссертации, опубликованы в 29 научных статьях, 3 из которых имеют импакт-фактор. Проведенные исследования были отмечены наградой трех академий: Национальной академии Украины, Национальной академии Р. Беларусь и Академии Р. Молдова. .

UNIVERSITATEA DE STAT DIN MOLDOVA

INSTITUTUL DE FIZICĂ APLICATĂ

KAZAK NATALIA

**MODIFICAREA SUPRAFEȚELOR METALICE PRIN
SINTETIZAREA CU SCÂNTEI ELECTRICE A CARBURILOR,
UTILIZÂND ELECTROZI DIN GRAFIT ȘI METALE
TRANZITORII**

**251.03-TEHNOLOGII ELECTROFIZICE ȘI INGINERIA
SUPRAFEȚELOR**

Rezumatul tezei de doctor în științe ingineresti

Aprobat spre tipar: 23.05.2023
Hârtie offset. Tipar digital
Colii de tipar.: 2.00

Formatul hârtiei A4
Tiraj 40 ex.
Comanda nr.68

Tipografia "PRINT CARO" SRL
str. Astronom N. Donici 14, Chișinău, MD 2049
tel 069124696