

MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII AL REPUBLICII MOLDOVA
UNIVERSITATEA DE STAT „ALECU RUSSO” DIN BĂLȚI

Cu titlul de manuscris
C.Z.U.: 621.7/.9(043.3)

GUZGAN DORIN

**CERCETĂRI PRIVIND SPORIREA CAPACITĂȚII DE EMISIE
TERMOELECTRONICĂ A SUPRAFETELOR METALICE PRIN
METODA ELECTROEROZIUNII**

Specialitatea: 242.05 Tehnologii, procedee și utilaje de prelucrare

Teza de doctor în științe inginerești

Conducător științific:



TOPALĂ Pavel,
dr. hab., prof. univ.

Autor:



GUZGAN Dorin

BĂLȚI, 2023

© Guzgan Dorin, 2023

CUPRINS:

ADNOTARE.....	6
АННОТАЦИЯ.....	7
ANNOTATION.....	8
LISTA TABELELOR.....	9
LISTA FIGURILOR.....	10
LISTA ABREVIERILOR.....	15
INTRODUCERE.....	17
1. STUDIUL BIBLIOGRAFIC AL REALIZĂRILOR TEHNICO-ȘTIINȚIFICE ÎN DOMENIUL PROBLEMEI DE CERCETARE.....	25
1.1. Stadiul actual al cercetării procesului de electroeroziune.....	25
1.1.1. Etapele de dezvoltarea a tehnicii prelucrării metalelor prin electroeroziune.....	26
1.1.2. Modelul fizic al procesului electroeroziunii: condiții normale, în mediu de aer.....	27
1.1.3. Procese ce se produc în suprafețele electrozilor în condițiile DEI.....	32
1.1.4. Unele rezultate, privind modificarea microgeometriei suprafețelor metalice.....	33
1.1.5. Bilanțul termic al DEI.....	38
1.2. Stadiul actual al procesului de emisie termoelectronică.....	41
1.2.1. Tipurile de emisii electronice.....	41
1.2.2. Emisia termoelectronică.....	43
1.2.3. Termoemițători: fizica procesului, clasificări și domeniile de aplicare.....	48
1.3. Concluzii la capitolul I.....	52
2. METODICA CERCETĂRILOR EXPERIMENTALE.....	54
2.1. Strategia cercetărilor experimentale, privind modificarea microgeometriei suprafețelor metalice active ale termocatozilor cercetați.....	55
2.1.1. Termocatozi utilizați în cadrul experimentului.....	56
2.1.2. Generatoare de impulsuri destinate prelucrării prin descărcări electrice.....	57
2.1.3. Metodica măsurării parametrilor energetici a impulsurilor de curent.....	61
2.1.4. Dispozitive de fixare a electrozilor și de stabilire a mărimii interstițiului dintre ei.....	62
2.1.5. Materiale de execuție a electrozilor.....	63
2.1.6. Metodica modificării microgeometriei suprafețelor metalice în medii inerte.....	65
2.1.7. Aplicarea electrodului-sculă pentru prelucrarea suprafețelor plane și/sau complexe.....	66
2.1.8. Succesiunea de realizare a procedurilor privind modificarea microgeometriei suprafețelor metalice cu aplicarea DEI.....	68

2.2. Metodica cercetărilor experimentale, privind emisia termoelectronică.....	69
2.2.1. Metodica ceretărilor experimentale, privind emisia termoelectronică realizate la USARB.....	69
2.2.2. Metodica cercetărilor experimentale, privind emisia termoelectronică realizate la IFIN-HH.....	71
2.2.3. Succesiunea de realizare a modului de măsurare a intensității curentului electric de emisie termoelectronică.....	75
2.3. Instalații utilizate pentru studiul și analiza suprafețelor prelucrate.....	77
2.4. Determinarea ariei suprafeței meniscurilor, obținute cu aplicarea DEI.....	78
2.5. Concluzii la capitolul II.....	80
3. CERCETĂRI EXPERIMENTALE, PRIVIND MODIFICAREA MICROGEOMETRIEI SUPRAFETELOR ACTIVE ALE ELECTROZILOR.....	81
3.1. Stabilirea condițiilor de poziționare a electrozilor.....	81
3.2. Încercări experimentale, privind extragerea meniscurilor conice de pe suprafețele materialelor conductoare.....	82
3.3. Influența energiei degajate în interstițiu asupra geometriei meniscurilor extrase de pe suprafețele pieselor metalice.....	83
3.4. Influența duratei impulsului de curent asupra înălțimii meniscurilor.....	87
3.5. Analiza SEM a suprafețelor prelucrate.....	91
3.6. Rezultate, privind analiza morfologiei și compoziției chimice a suprafețelor prelucrate.....	97
3.7. Rezultate științifice obținute, cu aplicarea DEI.....	100
3.7.1. Obținerea unei multitudini de asperități conice pe suprafețele electrozilor metalici....	100
3.7.2. Prezența oxizilor pe suprafețele asperităților conice și dezoxidarea acestora.....	102
3.7.3. Rezultate experimentale, privind modificarea formei electrozilor.....	105
3.7.4. Rezultate, privind realizarea microsudurii firelor cilindrice din wolfram.....	109
3.7.5. Rezultate teoretico-experimentale, privind determinarea mărimii undelor mecanice transversale și influența acestora asupra geometriei asperităților conice.....	110
3.8. Stabilirea relațiilor matematice ale influenței parametrilor tehnologici asupra înălțimii și a diametrelor bazelor asperităților conice.....	112
3.9. Completări ale modelului fizic al EE cu acțiunea DEI.....	114
3.10. Concluzii la capitolul III.....	115
4. STABILIREA CARACTERISTICILOR DE EMISIE TERMOELECTRONICĂ ALE CATOZILOR ELABORAȚI.....	116

4.1. Rezultate, privind stabilirea factorilor ce determină amplificarea ariei suprafeței active ale catodilor, a intensității câmpului electric și a densității de curent.....	116
4.2. Încercări experimentale, privind stabilirea caracteristicilor de emisie termoelectronică de către suprafețele prelucrate în cazul formării pe suprafețele active a unor straturi de oxizi și în cazul lipsei acestora, în condiții expres.....	122
4.3. Măsurători, privind emisia termoelectronică în condiții de exploatare reală.....	127
4.3.1. Determinarea mărimii variației suprafeței active ale catodilor.....	128
4.3.2. Rezultatele măsurătorilor pentru rezistența electrică, determinarea rezistivității materialului termocatodului și a funcțiilor I(U), P(U) și a T(P).....	130
4.3.3. Rezultate, privind determinarea intensității curentului electric de saturație ale termocatozilor în condiții de exploatare reală.....	132
4.4. Recomandări tehnologice de obținere a catodilor destinați emisie termoelectronice.....	136
4.5. Concluzii la capitolul IV.....	137
CONCLUZII ȘI RECOMANDĂRI.....	138
Concluzii finale.....	138
Recomandări.....	139
Direcții ulterioare de cercetare.....	139
Recomandări tehnologice.....	140
BIBLIOGRAFIE.....	141
ANEXE.....	159
Anexa 1. Imagine SEM în care se atestă mărimea unghiului de la vârf a asperității conice.....	159
Anexa 2. Alte instalații electrice utilizate în cadrul realizării cercetărilor experimentale.....	160
Anexa 3. Dispozitive anexe ale standului experimental.....	160
Anexa 4. Parametrii microscopului electronic Vega TeScan 5130.....	163
Anexa 5. Imagini SEM cu referire la extragerea multiplă a asperităților conice.....	164
Anexa 6. Imagini realizate cu microscopia optică cu referire la microsudare.....	166
Anexa 7. Dependente grafice în coordonate logaritmice.....	167
Anexa 8. Acte de implementare a rezultatelor științifice.....	170
Anexa 9. Dovezi prin care se certifică participarea la simpozioane și conferințe.....	173
DECLARAȚIA PRIVIND ASUMAREA RĂSPUNDERII.....	176
CURRICULUM VITAE AL CANDIDATULUI.....	177

ADNOTARE

Guzgan Dorin, „Cercetări privind sporirea capacității de emisie termoelectronică a suprafețelor metalice prin metoda electroeroziunii”.

Teză de doctor în științe inginerești, Bălți, 2023

- **Structura tezei:** introducere, patru capitole, concluzii generale și recomandări, bibliografie din 166 de titluri, 9 anexe, 149 de pagini de text de bază (până la Bibliografie), 81 de figuri, 19 tabele, rezultatele obținute sunt publicate în 62 de lucrări științifice;
- **Cuvinte-cheie:** eroziune, impuls, interstițiu, microgeometrie, electrod, catod, vacuum, emisie;
- **Scopul lucrării** constă în stabilirea legităților și factorilor tehnologici de realizare a geometriei prescrise a suprafețelor metalice în vederea sporirii eficienței de termoemisie a catozilor în baza modelului fizic actualizat al fenomenului electroeroziunii.
- **Obiectivele cercetării:** analiza literaturii de specialitate, privind problema cercetării; stabilirea parametrilor tehnologici de extragere a asperităților sub forma de con Taylor din suprafețele probelor metalice și sistematizarea rezultatelor obținute; cercetarea experimentală a emisiei termoelectronice în lipsa și prezența asperităților de tip con Taylor pe suprafețele termocatozilor; propunerea soluțiilor de îmbunătățire a proprietăților funcționale ale catozilor utilizați în electronică.
- **Noutatea și originalitatea științifică:** sporirea eficienței de emisie electronică a termocatozilor simpli executați din wolfram de puritate tehnică sau aliajele wolframului cu reniu (10 și respectiv 20%) pe baza modificării microgeometriei suprafețelor;
- **Rezultatele obținute care contribuie la soluționarea unei probleme științifice importante:** Perfecționarea tabloului fizic al fenomenelor ce se produc în cadrul descărcărilor electrice și influența acestora asupra transformărilor fizice și de compoziție din suprafețele electrozilor și determinarea coeficientului de multiplicare a emisiei termoelectronice de către suprafețele catozilor, în baza fenomenologiei fizice și transformărilor structurale provocate de DEI.
- **Semnificația teoretică** este asigurată de stabilirea legităților de formare a asperităților sub acțiunea DEI; dezvoltarea teoriei, privind modificarea microgeometriei suprafețele și a multiplicării emisiei termoelectronice a catozilor cercetați;
- **Valoarea aplicativă** constă în identificarea parametrilor de bază privind extragerea meniscurilor conice pe suprafețele metalice cu aplicarea DEI (energiei și duratei impulsului de descărcare, mărimii interstițiului și proprietăților materialului de execuție a piesei supuse prelucrării);
- **Implementarea rezultatelor științifice:** au fost realizate lucrări de laborator la ciclul II, în cadrul Catedrei de științe fizice și inginerești, USARB.

АННОТАЦИЯ

Гузган Дорин, "Исследования по увеличению способности термоэлектронной эмиссии металлических поверхностей методом электроэрозионной обработки",

Докторская диссертация инженерных наук, Бельцы, 2023 г.

- **Структура диссертации:** введение, четыре главы, общие выводы и рекомендации, библиография из 166 наименований, 9 приложений, 149 страница основного текста (до библиографии), 81 рисунок, 19 таблиц, полученные результаты опубликованы в 62 научных работах;

- **Ключевые слова:** эрозия, импульс, межэлектродный промежуток, микрогеометрия, электрод, катод, вакуум, эмиссия;

- **Цель работы** – установление закономерностей и технологических параметров получения заданной геометрии металлических поверхностей с целью повышения термоэмиссионной эффективности катодов на основе обновленной физической модели электрической эрозии.

- **Задачи исследования:** анализ литературы по специальности относительно проблемы исследования; установление технологических параметров получения неровностей в виде конуса Тейлора на поверхности металлических образцов и систематизация полученных результатов; экспериментальное исследование термоэлектронной эмиссии при отсутствии и в наличии конусов Тейлора на поверхности термокатодов; предложение решений по улучшению функциональных свойств катодов, используемых в электронике.

- **Научная новизна и оригинальность:** повышение эффективности электронной эмиссии термокатодов из вольфрама и его сплавов с рением (10 и 20% соответственно) на основе изменения микрогеометрии поверхности;

- **Полученные результаты, способствующие решению основной научной задачи:** Совершенствование физической модели явлений, происходящих при электрических разрядах и их влияния на физические превращения и изменения состава поверхности электродов; определение коэффициента усиления термоэлектронной эмиссии поверхности катода согласно физической модели и структурных превращений, вызванных ЭИР.

- **Теоретическая значимость** обеспечивается установлением закономерностей образования неровностей под действием ЭИР; развитие теории изменения микрогеометрии поверхности и увеличения электронной эмиссии катодов;

- **Прикладное значение** состоит в определении основных параметров получения конических менисков на металлической поверхности с применением ЭИР (энергии и длительности импульса разряда, размера межэлектродного промежутка и свойств материала обрабатываемой детали);

- **Внедрение научных результатов:** проведены лабораторные работы для студентов магистерского цикла кафедры физико-технических наук в составе Бельцкого Государственного Университета им. Алеку Руссо.

ANNOTATION

Guzgan Dorin, "Research on increasing the capacity of thermal electron emission of metal surfaces by electroerosive method". PhD thesis in Engineering Sciences, Balti, 2023

- **Structure of the thesis:** introduction, four chapters, general conclusions and recommendations, bibliography of 166 titles, 9 appendices, 149 pages of main text (before bibliography), 81 figures, 19 tables, results are published in 62 scientific papers;
- **Key words:** erosion, impulse, gap, microgeometry, electrode, cathode, vacuum, emission;
- **The purpose of the paper** is to establish regularities and technological parameters for obtaining a given geometry of metal surfaces in order to increase the thermo-emission efficiency of cathodes based on an updated physical model of electroerosion.
- **Research objectives:** analysis of specialty literature regarding the research problem; establishing technological parameters for obtaining Taylor cone shaped irregularities on the surface of metal samples and systematizing the obtained results; experimental study of thermoelectronic emission in the absence and in the presence of Taylor cones on the surface of thermoemission cathodes; proposal of solutions to improve the functional properties of cathodes used in electronics.
- **Scientific novelty and originality:** increasing the efficiency of electron emission of thermo-cathodes made of tungsten and its alloys with rhenium (10 and 20% respectively) based on changing the surface microgeometry;
- **The obtained results, contributing to the solution of the main scientific problem:** Perfecting the physical model of the phenomena occurring during electrical discharges and their influence on physical transformations and changes in the composition of the electrode surface; determining the amplification factor of the thermoelectronic emission of the cathode surface according to the physical model and structural transformations caused by PEDM.
- **The theoretical significance** is provided by the establishment of patterns of formation of irregularities under the action of PEDM; development of the theory of changing the surface microgeometry and increasing the electron emission of cathodes;
- **The applied value** consists in determining the main parameters for obtaining conical menisciuses on metal surfaces by applying PEDM (the energy and the duration of the discharge pulse, the size of the gap and the properties of the workpiece material);
- **Implementation of scientific results:** laboratory work was carried out for students of the master's cycle at the Department of Technical and Physical Sciences from the Alecu Russo Balti State University.

LISTA TABELELOR

Tabelul 1.1. Datele experimentale a randamentului procesului de electroeroziune în dependență de mărimea interstițiului sau energia degajată pe acesta.....	34
Tabelul 1.2. Lucrul de ieșire și constantele lui Richardson.....	43
Tabelul 2.1. Proprietățile materialelor utilizate în procesul cercetărilor experimentale.....	56
Tabelul 2.2. Echipamente de cercetare din cadrul laboratoarelor universității „Christian-Albrecht University of Kiel”, Germania.....	78
Tabelul 3.1. Diametrul bazei meniscului și înălțimea lui ca funcție de energia degajată în interstițiu și durata impulsului de descărcare pentru aliajul W+10%Re.....	87
Tabelul 3.2. Diametrul bazei meniscului și înălțimea lui ca funcție de energia degajată în interstițiu și durata impulsului de descărcare pentru W.....	87
Tabelul 3.3. Înălțimea meniscurilor extrase de pe suprafața anodului confecționat din W ca funcție de capacitatea bateriei de condensatoare, tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare, durata impulsului de descărcare și energia degajată în interstițiu.....	89
Tabelul 3.4. Înălțimea meniscurilor extrase de pe suprafața anodului confecționat din W ca funcție de durata impulsului de descărcare.....	92
Tabelul 3.5. Conținutul chimic în centrul meniscului conic (punctul 26 din fig. 3.18).....	103
Tabelul 3.6. Conținutul chimic la baza meniscului conic (punctul 27 din fig. 3.18).....	104
Tabelul 3.7. Conținutul chimic a materialului catodului din Wolfram în zona craterului.....	104
Tabelul 3.8. Conținutul chimic al materialului piesei (punctul 29 din fig. 3.18).....	105
Tabelul 3.9. Conținutul chimic a probei din oțel (în vârful asperității, zona 15 din fig. 3.23).....	109
Tabelul 3.10. Conținutul chimic a probei din oțel (baza asperității, zona 16 din fig. 3.23).....	110
Tabelul 3.11. Conținutul chimic a probei din oțel (zona 17 din fig. 3.23).....	110
Tabelul 3.12. Determinarea mărimii lungimii de unde transversale în baza diametrelor superioare ale neregularităților obținute pe suprafețele plane din oțel 45 cu aplicarea DEI.....	117
Tabelul 4.1. Variația mărimii suprafeței active pentru termocatozi executați din W.....	137
Tabelul 4.2. Variația mărimii suprafeței active pentru termocatozi executați din aliajul wolframului cu reniu (10%).....	137
Tabelul 4.3. Variația mărimii suprafeței active pentru termocatozi executați din aliajul wolframului cu reniu (20%).....	137
Tabelul A4.1. Principalii parametri ai microscopului electronic Vega TeScan 5130.....	163

LISTA FIGURILOR

Fig. 1.1. Fazele procesului electroeroziunii în condiții normale.....	29
Fig. 1.2. Vederea generală a secțiunii unui crater cu menisc format necomplet.....	31
Fig. 1.3. Tipuri de cratere obținute la prelucrarea dimensională prin electroeroziune.....	31
Fig. 1.4. Vederea generală a unui asperități extrase de pe suprafața metalului.....	36
Fig. 1.5. Modelul de distribuție a temperaturii în piesa de lucru în procesul DEI.....	41
Fig. 1.6. Schema electrică clasică pentru cercetarea fenomenului de emisie termoelectronică.....	44
Fig. 1.7. Instalație pentru prelucrarea cu fascicul de electroni.....	51
Fig. 1.8. Catozi utilizați în microscopie electronice moderne.....	52
Fig. 1.9. Catozi de tipul Spindt.....	53
Fig. 2.1. Vedere generală a unui termocatod real utilizat în microscopie electronice.....	57
Fig. 2.2. Reprezentarea grafică a catodului de probă.....	57
Fig. 2.3. Vederea generală a generatorului de impulsuri.....	58
Fig. 2.4. Schema electrică principială a instalației.....	58
Fig. 2.5. Schema electrică a blocului de comandă.....	59
Fig. 2.6. Schema electrică a generatorului proiectat, destinat pentru prelucrarea suprafețelor metalice și semiconductoare plane.....	60
Fig. 2.7. Schema electrică-bloc de măsurare a caracteristicilor electrodinamice a DEI.....	61
Fig. 2.8. Dispozitiv pentru variația interstițiului realizat în baza unui microscop.....	62
Fig. 2.9. Poziționarea electrozilor sub formă de fir.....	62
Fig. 2.10. Proba de Wolfram cu diametrul de 1,2 mm în momentul DEI.....	63
Fig. 2.11. Schema de poziționare a electrozilor sub formă de bare cilindrice subțiri și conectarea acestora în circuitul de descărcare.....	63
Fig. 2.12. Scheme de poziționare a electrozilor utilizați în procesul cercetărilor experimentale și conectarea acestora în circuitul de descărcare al generatorului de impulsuri de putere.....	64
Fig. 2.13. Vedere generală a camerei ermetice.....	65
Fig. 2.14. Vederea generală a instalației „BYII-5”.....	66
Fig. 2.15. Electrocul-sculă pentru prelucrarea suprafețelor plane/complexe.....	67
Fig. 2.16. Schema electrică principială pentru determinarea caracteristicilor volt–amperice.....	70
Fig. 2.17. Standului experimental asamblat în cadrul USARB.....	70
Fig. 2.18. Vedere generală a camerei de lucru de forma unui „cupol”.....	71
Fig. 2.19. Dispozitivul de fixare a electrozilor, destinați cercetării emisie termoelectronică.....	72
Fig. 2.20. Panoului de comandă al instalației de vacuum.....	73

Fig. 2.21. Standul experimental asamblat în cadrul IFIN-HH.....	74
Fig. 2.22. Fereastra pentru vizualizarea optică.....	75
Fig. 2.23. Vedere generală a microscopului optic XIM600, USARB.....	77
Fig. 2.24. Microscopul electronic Vega TeScan 5130, UTM.....	77
Fig. 2.25. Aplicația Solid Works.....	79
Fig. 2.26. Asperitate conică modelată în Solid Works.....	79
Fig. 3.1. Vedere generală a conului Taylor extras prin metoda DEI.....	81
Fig. 3.2. Sensul forțelor care acționează asupra metalului lichid.....	81
Fig. 3.3. Dependența înălțimii meniscurilor de energia degajată în interstițiu.....	84
Fig. 3.4. Dependența diametrelor bazei meniscurilor de energia degajată în interstițiu.....	85
Fig. 3.5. Dependența înălțimii meniscurilor în funcție de energia degajată în interstițiu.....	87
Fig. 3.6. Dependența înălțimii meniscurilor ca funcție de durata impulsului de descărcare.....	88
Fig. 3.7. Electrosculă cilindric, cu capătul ascuțit, conectat în calitate de anod.....	90
Fig. 3.8. Electrosculă cilindric, cu capătul plan, conectat în calitate de catod.....	90
Fig. 3.9. Imagini SEM ale asperităților conice, obținute la diferite energii degajate în interstițiu.....	92
Fig. 3.10. Morfologia suprafețelor probelor participante în procesul de prelucrare.....	92
Fig. 3.11. Vederea generală a suprafeței piesei plane în urma prelucrării prin metoda descărcărilor electrice în impuls, obținută prin microscopie optică.....	93
Fig. 3.12. Vederea generală a suprafeței piesei plane în urma prelucrării prin metoda descărcărilor electrice în impuls, obținută prin microscopie electronică.....	94
Fig. 3.13. Vedere generală a fisurilor formate la baza asperității conice.....	94
Fig. 3.14. Con Taylor extras de pe suprafețe cilindrice.....	94
Fig. 3.15. Tabloul de extragere multiplă a asperităților conice la DE solitare.....	95
Fig. 3.16. Suprafața laterală a asperității.....	96
Fig. 3.17. Caracterul pulsator al descărcării electrice solitare.....	96
Fig. 3.18. Analiza EDX realizată în patru zone diverse ale electrosculei-piesă.....	97
Fig. 3.19. Analiza EDX a unui menisc extras din catodul de Wolfram.....	98
Fig. 3.20. Analiza EDX a zonei cercetate pentru catodul de Wolfram.....	99
Fig. 3.21. Vederea generală a meniscurilor extrase de pe suprafețele probelor cilindrice.....	101
Fig. 3.22. Prezența oxizilor pe suprafețele asperităților conice și în jurul craterului.....	102
Fig. 3.23. Analiza EDX a probei din oțel 45: vârf, crater și lateral (zona 15, 16 și 17).....	103
Fig. 3.24. Diagrama EDX pentru zona 15 reprezentat în fig. 3.23.....	104

Fig. 3.25. Suprafețele electrozilor-scule care au fost supuse procesului DEI, conectați în circuitul de descărcare în calitate de a) anod; b) catod (cilindre regulate).....	107
Fig. 3.26. Suprafețele electrozilor-scule care au fost supuse procesului DEI, conectați în circuitul de descărcare în calitate de a) anod; b) catod	107
Fig. 3.27. Morfologia suprafeței exterioare a bazei cilindrului prezentat în fig. 3.26 (b).....	108
Fig. 3.28. Microsudarea firelor din W+20%Re cu diametre de 0,4 mm.....	109
Fig. 3.29. Microsudarea a trei fire din W+20%Re cu diametre de 0,4 mm.....	109
Fig. 3.30. Asperități sub forma unui „trunchi de con” obținute pe suprafețe plane din oțel 45 cu aplicarea DEI.....	111
Fig. 3.31. Imagini SEM ale asperităților conice obținute, cu aplicarea DEI, pe suprafețe cilindrice din aliajul wolframului cu reniu (10%).....	112
Fig. 4.1. Configurarea formelor neomogenităților pe catod destinate determinării coeficientului de amplificare a densității de curent β_i	118
Fig. 4.2. Părțile componente ale asperității conice.....	119
Fig. 4.3. Imagine SEM a suprafeței laterale ale vârfului asperității conice cu rază la vârf.....	119
Fig. 4.4. „Ondulații” de dimensiuni micro și nanometrice prezente pe suprafața laterală a asperităților conice.....	120
Fig. 4.5. Imagini ale suprafeței laterale la baza asperităților de tip con Taylor obținute cu ajutorul microscopului optic de înaltă rezoluție.....	121
Fig. 4.6. Imagine SEM a suprafeței laterale ale bazei asperității conice.....	121
Fig. 4.7. Morfologia suprafeței asperităților de tip con Taylor.....	122
Fig. 4.8. Caracteristicile volt-amperice obținute în condiții expres, ale catozilor simpli în comparație cu cei care au fost prelucrați cu aplicarea DEI în mediu aer și care nu au fost supuși procedurii de dezoxidare a suprafețelor active.....	123
Fig. 4.9. Caracteristica volt-amperică de emisie obținute în condiții expres, în care diferența de potențial dintre catozi rămâne o mărime constantă.....	125
Fig. 4.10. Caracteristica volt-amperică de termoemisie pentru diverse diferențe de potențial dintre catod și anod.....	126
Fig. 4.11. Caracteristica volt-amperică (a) și dependența puterii disipate pe catod (b) în funcție de tensiunea aplicată de la sursă de alimentare pentru catozii cu diametre de 0,2 mm și respectiv 0,25 mm, executați din aliajul wolframului cu 10%Re.....	130
Fig. 4.12. Dependența temperaturii catodului în funcție de puterea disipată pe el de la sursa de curent.....	131

Fig. 4.13. Dependența intensității curentului de emisie termoelectronică funcție de puterea sursei de alimentare a termocatodului.....	133
Fig. 4.14. Dependența intensității curentului de emisie termoelectronică față de tensiunea de alimentare a sursei de curent pentru catodul cu diametrul de 0,2 mm grosime.....	134
Fig. 4.15. Dependența intensității curentului de emisie termoelectronică față de tensiunea de alimentare a sursei de curent pentru catodul cu diametrul de 0,25 mm grosime.....	135
Fig. A1.1. Vedere generală a unui con Taylor cu unghiul de la vârf de 90°	159
Fig. A1.2. Determinarea razei de la vârf a asperităților conice reale.....	159
Fig. A2.1. Osciloscopul HM1507 (analog digital scope, HAMEG instruments).....	160
Fig. A3.1. Vedere generală a camerei de lucru.....	160
Fig. A3.2. Vedere generală a cilindrului cu trei ieșiri.....	161
Fig. A3.3. Măsurător de vacuum.....	161
Fig. A3.4. Sursa de tensiune înaltă reglabilă în limita a 0–3000 V.....	161
Fig. A3.5. Sursa de curent.....	172
Fig. A3.6. Multimetru digital: FLUKE 289.....	172
Fig. A3.7. Măsurători termici.....	172
Fig. A5.1. Imagine SEM a asperităților conice observate în cadrul fig. 3.21 (d).....	164
Fig. A5.2. Imagine SEM a multitudinilor de asperități de tipul conurilor Taylor extrase de pe suprafețele catodilor din aliajul wolframului cu reniu, conectați în circuitul de descărcare în calitate de anod.....	165
Fig. A6.1. Vedere generală a probelor microsudate cu aplicarea DEI.....	166
Fig. A7.1. Dependența înălțimii asperităților ca funcție de energia degajată în interstițiu în valori logaritmice; electrodul-piesă executat din fire de wolfram cu diametrul de 0,2 mm.....	167
Fig. A7.2. Dependența diametrului bazei asperităților ca funcție de energia degajată în interstițiu în valori logaritmice; electrodul-piesă executat din fire de wolfram cu diametrul de 0,2 mm.....	167
Fig. A7.3. Dependența înălțimii asperităților ca funcție de energia degajată în interstițiu în valori logaritmice; electrodul-piesă executat din fire din aliajul wolframului cu reniu.....	167
Fig. A7.4. Dependența diametrului bazei asperităților ca funcție de energia degajată în interstițiu în valori logaritmice; electrodul-piesă executat din fire din aliajul wolframului cu reniu.....	168
Fig. A7.5. Dependența înălțimii asperităților ca funcție de durata impulsului de descărcare în valori logaritmice; electrodul-piesă executat din fire de wolfram cu diametrul de 0,2 mm.....	168
Fig. A7.6. Dependența diametrului bazei asperităților ca funcție de durata impulsului de descărcare în valori logaritmice; electrodul-piesă executat din fire de wolfram cu diametrul de 0,2 mm.....	168

Fig. A7.7. Dependența înălțimii asperităților ca funcție de mărimea interstițiului în valori logaritmice; electrodul-piesă executat din fire de wolfram cu diametrul de 0,2 mm.....	169
Fig. A7.8. Dependența diametrului bazei asperităților ca funcție de mărimea interstițiului în valori logaritmice; electrodul-piesă executat din fire de wolfram cu diametrul de 0,2 mm.....	169
Fig. A.8.1. Act de implementare a rezultatelor științifice în procesul de instruire a studenților de la ciclul II, specialitatea Tehnologii de instruire și producere, USARB.....	171
Fig. A.8.2. Act de implementare obținut în cadrul proiectului instituțional de cercetare „Tehnologii de formare a peliculelor de grafit cu proprietăți anti-aderență și anti-uzură prin metoda electroeroziunii”, la Î.S. „Fabrica de Sticlă din Chișinău”.....	172
Fig. A.9.1. Participarea în cadrul saloanelor de invenții, inovații și transfer tehnologic INVENTICA și obținerea medaliilor de aur.....	173
Fig. A.9.2. Medaliei de bronz în cadrul INFOINVENT 2015.....	173
Fig. A.9.3. Medaliei de aur în cadrul INFOINVENT 2015.....	174
Fig. A.9.4. Participarea cu comunicare în cadrul conferinței ȘD organizată de Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași.....	174
Fig. A.9.5. Participarea la seminarul tematic: „Proprietatea intelectuală în Republica Moldova. Dreptul de autor”.....	175
Fig. A.9.6. Certificat de participarea la conferința științifică internațională: „Tradiție și inovare în cercetare științifică”, Ediția a XII-a, USARB.....	175

LISTA ABREVIERILOR

- DEI – Descărcări electrice în impuls;
- DE – Descărcare electrică;
- ЭИР – Электрические импульсные разряды;
- PEDM – Pulsed electric discharge machining;
- EE – Eroziune electrică sau electroeroziune;
- EBM – Electron Beam Machining;
- USARB – Universitatea de Stat „Alec Russo” din Bălți;
- UTM – Universitatea Tehnică a Moldovei;
- CNSTM – Centrul National de Studiu și Testare a Materialelor;
- IFIN-HH – Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizică și Inginerie Nucleară Horia Hulubei;
- LȘMNT – Laboratorul științific de micro- și nanotehnologii;
- CȘFI – Catedra de științe fizice și ingineresti;
- FȘREM – Facultatea Științe Reale, Economice și ale Mediului;
- ВУП – Вакуумный универсальный пост;
- SEM – Scanning electron microscope;
- EDX – Energy-dispersive X-ray;
- XPS – X-ray photoelectron spectroscopy;
- AFM – Atomic force microscopy;
- S – Interstițiul dintre electrozi;
- W_s – Energia degajată în interstițiu;
- W_e – Energia degajată pe electrozi;
- $W_{c,p}$ – Energia degajată în canalul de plasmă;
- W_C – Energia acumulată în bateriile de condensatoare;
- U_c – Tensiunea de încărcare a bateriilor de condensatoare;
- U_s – Diferența de potențial între electrozi;
- U_a – Tensiunea anodică;
- V_c – Volumul craterului;
- V_{mt} – Volumul metalului topit;
- dc – Diametrul craterului;
- hc – Adâncimea maximală a craterului;
- C – Capacitatea bateriilor de condensatoare;

η – Randamentul;
 λ – Lungimea de undă;
 $Q_{d.e.}$ – Cantitatea de căldură degajată de descărcarea electrică;
 Le – Lucrul de ieșire al electronului din metal;
 j_s – Densitatea curentului de emisie;
 P_E – Puterea de emisie;
 T – Temperatura catodului exprimată în grade Kelvin;
 k – Constanta lui Boltzman;
 ΔA – Aria suprafeței active;
 σ – Constanta lui Stefan-Boltzmann;
 ΔA – Variația suprafeței active;
 I_e – Intensitatea curentului electric de emisie;
 I_s – Intensitatea curentului electric de saturație;
 W – Wolfram;
 Re – Reniu;
 WC – Carbură de wolfram;
 TiC – Carbură de titan;
 TaC – Carbură de tantal;
 r_{tm} – Rotații pe minut;
 $I(U)$ – Caracteristica volt-amperică în funcție de tensiunea aplicată de la sursă de alimentare;
 $P(U)$ – Dependența puterii disipate pe catod în funcție de tensiunea aplicată de la sursă de alimentare;
 $T(P)$ – Dependența temperaturii catodului în funcție de puterea disipată pe el de la sursa de curent.

INTRODUCERE

În titlul tezei de doctor „Cercetări privind sporirea capacității de emisie termoelectronică a suprafețelor metalice prin metoda electroeroziunii” principalele cuvinte cheie sunt *emisia termoelectronică* și *electroeroziunea*. Primul cuvânt cheie ne conduce la alegerea corectă a materialului necesar pentru elaborarea termocatozilor destinați emisie termoelectronice, care sunt utilizați în diverse domenii precum: construcții mașini și aparate, prelucrările dimensionale cu utilizarea fasciculului de electroni (Electron Beam Machining – EBM) [1 – 7], în diverse cercetări experimentale cu aplicarea microscopelor electronice cu scanare (Scanning electron microscope – SEM), a spectroscopiei cu raze X (radiație generată de frânarea electronilor de emisie) cu dispersie energetică (Energy-dispersive X-ray spectroscopy – EDX) [8 – 11] și în imagistica medicală cu raze X produse în tuburi Roentgen [12]. În practică se utilizează 2 tipuri de termoelectrozi, denumiți: simpli și compuși. Termocatozii simpli se caracterizează prin eficiență scăzută, dar stabilitate de funcționare ridicată, ceea ce prezintă un parametru important mai ales pentru cazul realizării cercetărilor experimentale în scopul obținerii unor rezultate cât mai exacte. Pe de altă parte, termocatozii compuși se caracterizează prin eficiență ridicată, dar cu o stabilitate de funcționare redusă. Drept soluție tehnică, în calitate de material de bază utilizat la producerea ambelor tipuri de termocatozi este utilizat pe larg wolframul (W) sau aliajele lui [13], deoarece rezistă la temperaturi ridicate. Temperatura de topire a wolframului constituie 3387 °C [14] și posedă o stabilitate înaltă în timpul funcționării în calitate termocatotod utilizat pentru obținerea emisie termoelectronice. Conform parametrului termic wolframul se situează pe locul al doilea, după carbon (grafit sau diamant).

Cel de al doilea cuvânt cheie „electroeroziune” (EE), întâlnit în literatura de specialitate și ca „eroziunea electrică” ne vorbește despre aplicarea unei tehnologii de prelucrare neconvențională [2 – 6, 15 – 18, 132], folosită în special pentru prelucrarea materialelor dure și foarte dure sau a celor care nu pot fi prelucrate prin metode convenționale. Wolframul și aliajele lui se supun greu prelucrărilor mecanice, deoarece posedă o rezistență mecanică sporită (rezistența se menține chiar și la temperaturi mai mari de 770 °C, rezistența la rupere a unui fir de wolfram poate ajunge până la 400 daN/mm²) și o duritate mare (duritate după Brinell 2570 MPa, duritatea după Vickers 3,43 GPa) [14]. O condiție esențială impusă materialelor care pot fi prelucrate prin metoda electroeroziunii este aceea de a poseda conductivitate electrică. Wolframul și aliajele lui întrunesc aceste condiții, adică sunt materiale ce fac parte din clasa conductoarelor electrice, care practic nu pot fi prelucrate prin metode convenționale. Din aceste considerente, s-a propus a realiza cercetări experimentale, privind sporirea capacității de emisie termoelectronică a suprafețelor

metalice cu aplicarea metodei de prelucrare prin eroziune electrică. Wolframul posedă o rezistență sporită la eroziune electrică și din acest motiv se utilizează intens și la fabricarea electrozilor-scule aplicați la prelucrările dimensionale prin electroeroziune [19, 20, 26 – 29, 45, 93, 132, 134].

În tehnologiile moderne de prelucrare a materialelor [64, 127, 128, 134, 147, 148, 150, 165], un loc tot mai important, îl ocupă electro-tehnologiile, fiind unele din cele mai eficiente, atât din punct de vedere al realizărilor și posibilităților aplicative ale acestora, cât și din punct de vedere tehnico-economic [2, 4 – 7, 15 – 18]. Conform dicționarelor enciclopedice, electro-tehnologia este o ramură a tehnologiei care studiază metodele de transformare a energiei electrice în energie termică sau/și chimică, aplicate direct asupra obiectului supus prelucrării [63, 132]. În marea arie a electro-tehnologiilor, un loc aparte îi revine celei de prelucrare a materialelor cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls (DEI) [7, 19 – 24, 44 – 48]. La acest tip de descărcări electrice, energia acumulată pe o baterie de condensatoare este transformată în energie termică, luminoasă, mecanică ș.a., care este aplicată la încălzirea, topirea, vaporizarea, sau chiar ruperea mecanică a materialelor [7, 23 – 25]. Procedeele de prelucrare a materialelor la care energia electrică transformată în plasmă provoacă una din acțiunile menționate mai sus asupra materialelor, sau câteva din ele simultan au fost întrunite sub denumirea de prelucrări prin electroeroziune [7, 127, 154]. Prelucrările prin electroeroziune sau bifurcat în două direcții principale: 1) prelucrările dimensionale [18, 26 – 29, 45, 134], care au ca scop principal prelevarea unei părți de material de pe suprafața semifabricatului în scopul modificării formei și dimensiunilor acestuia pentru obținere produsului în condițiile tehnice impuse și 2) formarea stratului de depunere [30 – 42], care are ca scop principal transferul materialului prelevat de pe suprafața unuia dintre electrozi pe suprafața celuilalt pentru ai modifica proprietățile și compoziția stratului de suprafață a piesei prelucrate. 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 carburii de wolfram, carburii de titan, carburii de tantal, semiconductori, etc.), asigurând prelucrarea suprafețelor cu caracter complex (găuri, orificii, cavități, proeminente etc.) și nu în ultimul rând, dar de o importanță majoră, asigurând posibilitatea de automatizare totală a procesului de prelucrare. 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 s-a ramificat 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 [18, 23, 33, 40];

- 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 de adaos din pulberi în principal și electrozilor-scule în secundar, sau în cazuri aparte materialul sculei practic nu influențează compoziția și proprietățile depunerii [18, 23, 28, 114, 162];

- modificarea compoziției și proprietăților stratului de suprafață a piesei în lipsa modificării dimensiunilor piesei, sau însoțită de micșorarea rugozității suprafeței prelucrate, care, de fapt este o direcție relativ nouă și în literatura de specialitate, se regăsește ca o nouă constatare științifică a unui procedeu nou de aplicare în practică a DEI [38, 42, 49, 57, 81, 102, 114, 124].

După cum se vede, descărcările electrice în impuls și-au găsit o aplicabilitate tehnologică vastă în domeniul prelucrărilor dimensionale: depunere din materiale compacte și pulberi, prelucrarea termică și chimico-termică a suprafețelor [63], rectificarea suprafețelor, curățarea suprafețelor de impurități, etc., cât și în lipsa modificării esențiale ale dimensiunilor pieselor prelucrate cu obținerea: straturilor micro și nanometrice de oxizi și hidro-oxizi, a straturilor carbonice, iar mai nou, la etapa actuală vine să completeze domeniul de cercetare, privind modificarea microgeometriei suprafețelor prin aplicarea procesului de electroeroziune. Pentru toate cazurile aplicative a acestei metode de prelucrare se presupune, că rugozitatea suprafeței prelucrate este în mod direct funcție de mărimea craterelor cu fază lichidă ce iau naștere pe suprafața prelucrată [7, 26, 39, 24, 28]. Fenomenele proceselor ce decurg în interstițiu și la suprafețele electrozilor încă nu sunt suficient studiate, iar cunoașterea acestora poate asigura noi aplicații tehnologice a acestei surse concentrate de energie.

Din analiza rezultatelor cercetărilor experimentale executate de mai mulți autori [7, 15, 16, 24, 28, 31, 35], cât și celor proprii [34, 68, 74, 79] s-a constatat, că la prelucrarea suprafețelor metalice cu aplicarea DEI are loc prelevarea de material însoțită de formarea craterelor de forma calotei sferice [7, 28]. Modificarea microgeometriei suprafețelor metalice prelucrate este cauzată de acțiunea petelor electronice „reci” (fără semne evidente de topire) și „calde” (care provoacă apariția fazei lichide abundente) [7, 20]. S-a observat, că craterele se formează în zone ale suprafeței electrodului (efectul este mai vizibil pe suprafețele electrodului conectat în calitate de anod), cu intensitatea sporită a câmpului electric [7, 15, 24]. Craterele, odată create, impun formarea de noi cratere datorită creșterii însemnate a intensității câmpului electric la marginea celor existente [7, 15]. Mecanismul de formare a craterelor rămâne în continuare unul prea puțin elucidat.

Așa dar, de către autorii lucrărilor [7, 15, 16, 43, 144] au fost înregistrate trei tipuri de cratere, toate având forma calotei sferice: prima cu profil neted, a doua cu profil rugos și cel de-al treilea, având în mijloc o asperitate conică. În prezenta teză de doctor, unul din obiectivele l-a

constituit, studierea și cercetarea condițiilor de apariție al celui de-al treilea tip de crater, în mijlocul cărui se formează asperitatea conică, și anume, cum se modifică microgeometria suprafeței active [24, 32, 34, 36, 79] ale catodilor metalici și cum influențează această modificare, procesul de emisie termoelectronică ale acestora [84, 86, 98, 99]. Asperitățile de formă conică au fost observate nu doar în centrul craterelor, dar și la periferiile lor [7, 15, 24, 90]. În lucrările [53, 146] aceste asperități conice au fost numite ectoni și se subliniază, că ele sunt surse importante de ioni și electroni, care ar putea influența benefic fenomenul emisiei electronice.

În opinia autorilor [7, 36, 53, 59, 80, 88] formarea asperităților conice în centrul craterelor se datorește perturbării suprafeței metalului lichid sub acțiunea efectului cumulativ ce are loc în interstițiu, în timpul DEI (acțiunea câmpurilor electrice de intensitate înaltă, forței de tensiune superficială a metalului topit și a forței de greutate, într-o anumită măsură etc.). Mai detaliat, condițiile de formare a conurilor pot fi analizate în baza lucrărilor [24, 34, 51 – 59]. Obținerea craterelor și formarea asperităților conice pe suprafețele electrozilor metalici cu aplicarea DEI, confirmă, că acest proces poate fi utilizat în scopul modificării microgeometriei și compoziției chimice a suprafețelor materialelor conductoare. Procesul de modificare a microgeometriei suprafețelor pieselor metalice constă în faptul, că în urma descărcărilor electrice în impuls, în anumite condiții, are loc formarea (extragerea) pe suprafața acestor piese a unor asperități conice numite în literatura de specialitate și conuri Taylor, cu mărimea unghiului de la vârf egal cu 90° (vezi în Anexa 1, fig. A1.1), dar care uneori poate să varieze cu $\pm 1 - 2^\circ$ de la valoarea măririi unghiului de 90° , conform rezultatelor obținute de către autorii [24, 58, 72].

Efectul de sporire a ariei suprafeței active a piesei prelucrate prin DEI, în condiții stabilite, contribuie la modificarea caracterului de interacțiune a acesteia cu mediul înconjurător și cu alte suprafețe active cu care este adusă în contact. Sporirea ariei active a suprafețelor influențează în mod direct capacitatea acestora de a emite electroni și ioni [84 – 89, 97] și în același timp de absorbție a diferitor tipuri de radiație [119, 120], plus, aceste asperități conice funcționează și în calitate de concentratori de câmp electric, facilitând efectul de emisie electronică.

În lucrare sunt recăutate condițiile de extragere a asperităților sub formă de conuri Taylor din suprafețe metalice sub acțiunea descărcărilor electrice în impuls. Se confirmă, că din motivul prezenței câmpurilor electrice puternice (mai mari de 10^8 V/m) generate de prezența petelor „anodice” și „catodice”, („calde” și „rece”), cât și a celor de tensiune superficială pe suprafața metalului lichid, se dezvoltă perturbații și se propagă unde capilare [7, 28, 43] care conduc la formarea asperităților conice.

Principalele avantaje ale wolframului (W) sau ale aliajelor lui, din motivul căruia și este ales în calitate de material de producere a termocatozilor, este gradul înalt de stabilitate al emisiei

termoelectronice și rezistența de funcționare la temperaturi ridicate. Aplicarea termocatozilor cu caracteristici de emisie îmbunătățite în instalații tipice conduce la sporirea performanței de lucru ale acestora, astfel are loc reducerea consumului energetic necesar obținerii unei valori anumite ale intensității curentului electric de termoemisie sau, în caz particular, reducerea de materie primă pentru elaborarea termocatodului, prin confecționarea unor catozi mai compacți, dar care să nu intimideze performanțele de lucru ale instalațiilor în care funcționează.

Așa dar, problema care este rezolvată în cadrul acestei teze de doctor constă în modificarea dirijată a microgeometriei suprafețelor metalice, în vederea sporirii eficienței de funcționare a termocatozilor simpli.

Actualitatea și importanța temei abordate, încadrarea temei în preocupările internaționale, naționale, zonale, ale colectivului de cercetare și în context inter- și transdisciplinar, prezentarea rezultatelor cercetărilor anterioare referitoare la tema aleasă.

În ultimul timp, criza energetică și cea a materialelor, a afectat întreaga omenire. Parțial această problemă este soluționată prin utilizarea din ce în ce mai mult a energiei ecologice pure, stocate prin utilizarea energiei eoliene, solare, geotermale și hidraulice, dar și economisirea acesteia prin aplicarea de echipamente cu randament sporit și consum redus de energie în toate domeniile producerii, cercetării și vieții cotidiene, aplicarea tehnologiilor ce asigură o bună economisire de materiale și desigur, reciclarea deșeurilor. Dezvoltarea în continuare a tehnicii și tehnologiilor contemporane contribuie și la micșorarea deficitului de materie primă pentru domeniile tehnicii electronice, deoarece cerințele și necesitățile acesteia cresc mereu, iar posibilitățile tehnico-tehnologice sunt limitate [64 – 67]. Prin sporirea ariei suprafețelor active ale pieselor de lucru, în caz particular a termocatozilor unor instalații așa cum sunt: tuburile electronice, microscopul electronic, instalații de prelucrare a materialelor cu aplicarea fascicolului de electroni ș.a. se poate obține o sporire a intensității curentului electric de emisie în procesul de funcționare ale acestora, utilizând catozi cu aceeași masă, sau chiar cu o masă mai mică, în aceleași condiții de funcționare. Sporirea ariei suprafețelor active poate fi realizată suficient de accesibil aplicând procesul de electroeroziune și anume prin aplicarea DEI. De exemplu: extragerea doar unui menisc de tip „con Taylor” de pe suprafața termocatodului conduce la sporirea ariei active a acestuia [32, 36, 51 – 53, 86], în plus, prezența asperităților conice modifică comportamentul termocatodului prin conferirea calității de amplificator și concentrator de câmp, ceea ce facilitează extragerea electronilor din cadrul catozilor metalici supuși emisiei electronice. Conform rezultatelor primite în mod practic, intensitatea curentului electric de saturație în cazul emisiei termoelectronice, obținută prin încercarea termocatozilor (fir cilindric din wolfram sau aliajele acestuia, în formă de U), care au fost prelucrați suplimentar cu aplicarea DEI, cu scopul modificării microgeometriei suprafeței

active și anume: extragerea asperităților conice din suprafața termocatodului, provoacă sporirea intensității curentului de emisie termoelectronică, comparativ cu intensitatea curentului electric de saturație obținută prin încercarea termocatozilor, care nu au fost supuși modificării microgeometriei suprafeței active cu aplicarea DEI.

Cercetările experimentale, realizate în prezenta cuprind cele ce urmează și au fost susținute prin asistența mai multor centre științifice:

- modificarea microgeometriei suprafețelor probelor metalice s-au realizat în totalitate în Laboratorul științific de micro- și nanotehnologii (LȘMNT), din cadrul Catedrei științe fizice și inginerești (CSFI), Facultatea Științe Reale, Economice și ale Mediului (FȘREM), Universitatea de Stat „Alec Russo” din Bălți (USARB);
- analiza SEM și EDX a suprafețelor metalice ale termocatozilor cercetați s-a realizat în: 1) Laboratoarele de cercetare ale Universității: Christian-Albrecht University, orașul Kiel, Germania și 2) Centrul National de Studiu și Testare a Materialelor (CNSTM), din cadrul Universității Tehnice a Moldovei (UTM), bl. 3, bir. 324, or. Chișinău, Republica Moldova;
- emisia termoelectronică a catozilor cercetați s-a realizat în cadrul: 1) Laboratoarelor USARB și 2) în Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizică și Inginerie Nucleară Horia Hulubei (IFIN-HH) din București-Măgurele, România.

Tema de cercetare este racordată la Programul National de Cercetare – Dezvoltare, prioritatea: „Competivitate economică și tehnologii inovative”, direcția strategică: „Materiale, tehnologii și produse inovative” și la tendințele științei mondiale, deoarece cercetările realizate prezintă noi proprietăți funcționale ale materialelor analizate.

Scopul lucrării constă în stabilirea legităților și factorilor tehnologici de realizare a geometriei prescrise a suprafețelor metalice în vederea sporirii eficienței de termoemisie a catozilor în baza modelului fizic actualizat al fenomenului electroeroziunii.

Obiectivele cercetării:

- analiza literaturii de specialitate, privind problema cercetării;
- stabilirea parametrilor tehnologici de extragere a asperităților sub forma de con Taylor din suprafețele probelor metalice și sistematizarea rezultatelor obținute;
- cercetarea experimentală a emisie termoelectronică în lipsa și prezența asperităților de tip con Taylor pe suprafețele termocatozilor;
- propunerea soluțiilor de îmbunătățire a proprietăților funcționale ale catozilor utilizați în electronică.

În calitate de **obiect al cercetărilor** au servit probe executate din wolfram și aliajele acestuia cu reniu (wolfram + reniu, cu concentrația de 10 sau 20%), atât pentru stabilirea condițiilor

de extragere a asperităților de tip con Taylor, cât și influența acestora asupra capacității de emisie termoelectronică, prelucrați prin metoda electroeroziunii. În cadrul cercetărilor au fost studiate și unele materiale auxiliare: inox, aluminiu, cupru, grafit și siliciu, cu scopul extinderii rezultatelor aplicative ale prelucrării prin DEI [105 – 107]. Instalația experimentală pentru cercetarea și realizarea modificării microgeometriei suprafețelor metalice (conductoare) prin metoda electroeroziunii prezintă un generator de impulsuri de curent electric de tipul RC (la care circuitul de reacție este alcătuit din rezistoare și condensatoare) cu amorsare paralelă a interstițiului.

Ipoteza de cercetare: formarea pe suprafețe metalice a asperităților de tip con Taylor se produce sub acțiunea câmpurilor electrice și de temperatură generate de petele electrodeice, iar prezența acestora pe suprafețele active ale pieselor contribuie la sporirea ariei active și, respectiv la îmbunătățirea performanței de funcționare ale termocadodului.

Sinteza metodologiei de cercetare și justificarea metodelor de cercetare alese.

În vederea realizării cercetării propriu zise au fost alese justificat și aplicate următoarele metode de cercetare:

- instalația de laborator de tipul „Razread” pentru cercetarea fenomenelor de extragere a asperităților conice;
- osciloscopare, pentru determinarea duratei și energiei descărcărilor electrice în impuls;
- microscopie optică expres, pentru studierea suprafețelor după interacțiunea cu plasma DEI;
- microscopie electronică (SEM), pentru măsurători de precizie a formei și dimensiunilor asperităților;
- analize EDX, pentru determinarea compoziției chimice;
- analize XPS, pentru determinarea fazelor obținute în suprafețele prelucrate;
- încercări de emisie termoelectronică directă a catodilor prelucrați în vacuum;
- modelări matematice a fenomenelor și proceselor;
- stabilirea legăturilor de obținere a asperităților și influenței lor asupra emisie termoelectronice.

Sumarul capitolelor tezei, cu axarea pe investigațiile efectuate și necesitatea acestora pentru atingerea scopului și a obiectivelor cercetării (fără a descrie rezultatele obținute):

- **Capitolul 1** al prezentei teze este intitulat „Studiul bibliografic al realizărilor tehnico-științifice în domeniul problemei de cercetare” și conține rezultatele analizei literaturii de specialitate al procesului electroeroziunii, etapele de dezvoltare al acestui proces, precum și studiul bibliografic, privind emisia termoelectronică.

- În **capitolul 2** este descrisă „Metodica cercetărilor experimentale”, privind modificarea microgeometriei suprafețelor metalice prin aplicarea descărcărilor electrice în impuls, în condiții

normale de mediu și temperatură și tendința de realizare a modificării microgeometriei suprafețelor metalice în condiții speciale de mediu, adică cu utilizarea gazelor inerte (argon) sau cu vacuumare a camerei de lucru. În acest capitol se regăsește metodologia realizării emisiei termoelectronice a termocatozilor elaborați. Conform metodicii realizării, aplicarea DEI în mediu aer presupune și modificarea compoziției chimice cu formarea: peliculelor de oxizi [38, 42, 85, 91, 114], pelicule de depunere [7, 24, 77] sau chiar formarea de noi compuși chimici pe suprafețele prelucrate [90]. Tot în acest capitol se regăsesc descrieri ale utilajelor de cercetare și ale aplicației ce permite, în anumite limite, modelarea asperităților conice studiate.

- **Capitolul 3** denumit: „Cercetări experimentale, privind modificarea microgeometriei suprafețelor active ale electrozilor” și conține rezultatele cercetărilor teoretico-experimentale, privind modificarea microgeometriei suprafețelor metalice, relații matematice, privind formarea asperităților conice în care figurează așa parametri ca energia degajată în interstițiu, durata impulsului de descărcare și mărimea interstițiului și sunt prezentate completări ale tabloului fizic al procesului DEI, privind comportarea petelor electrodice reci pe suprafețe fierbinți.

- **Capitolul 4:** „Stabilirea caracteristicilor de emisie termoelectronică ale catozilor elaborați” conține rezultatele cercetărilor experimentale, privind emisia termoelectronică a termocatozilor realizați. Sunt prezente caracteristicile volt-amperice ale emisiei termoelectronice și interpretarea rezultatelor obținute.

La finele acestor 4 capitole se regăsesc și concluzii referitor la cercetarea realizată.

- În **Concluzii și recomandări** sunt prezentate concluziile finale ale tezei și unele recomandări tehnologice, propuse de către autorul prezentei lucrării.

Limitele cercetărilor efectuate (lipsa accesului la unele instrumente și facilități, particularitățile condițiilor de cercetare etc.).

- Încercarea de exploatare a termocatozilor elaborați, în condiții industriale.

1. STUDIUL BIBLIOGRAFIC AL REALIZĂRILOR TEHNICO-ȘTIINȚIFICE ÎN DOMENIUL PROBLEMEI DE CERCETARE

După cum s-a menționat în introducere în lume se utilizează două tipuri de termoelectrozi: simpli și compuși, ce se caracterizează prin eficiența sporită, ori gradul înalt de stabilitate al emisiei electronice. Din punct de vedere al producerii, termocatozii simpli, se realizează mai ușor, iar cei compuși necesită un proces tehnologic mult mai complex. Reieșind din scopul lucrării, dar și din posibilitățile tehnice reale ale laboratorului în care s-au realizat cercetările experimentale, s-a decis a încerca de a îmbunătăți caracteristicile de emisie termoelectronică, anume a termocatozilor simpli, prin aplicarea procedurii de modificare a microgeometriei suprafețelor metalice a acestora. Prelucrarea wolframului și a aliajelor lui este suficient de complicată și în unele cazuri devine imposibilă, dacă încercăm să aplicăm tehnologiile clasice, de aceea, cu scopul prelucrării acestor materiale s-a apelat la aplicarea tehnologiilor neconvenționale, și anume aplicarea procesului de electroeroziune.

1.1. Stadiul actual al cercetării procesului de electroeroziune

Procesul de eroziune se bazează pe efectul eroziv al DEI care se obțin cu ajutorul generatoarelor de impulsuri electrice. Electroeroziunea este un procedeu de prelucrare în care materia primă este supusă acțiunii descărcări electrice unitare. Prelucrarea prin metoda electroeroziunii este destinată materialelor conductoare de curentul electric, totuși potrivit autorilor lucrărilor [85, 102, 106, 121, 138], prin această metodă pot fi prelucrate și materiale semiconductoare. Piesele sau semifabricatele sunt conectate la una din bornele sursei de alimentare, formând electrodul-piesă, iar cealaltă bornă a sursei de alimentare este conectată la sculă, fiind numită electrodul-sculă, conform literaturii de specialitate studiate [20, 27 – 29, 41, 44, 48, 73, 93, 100, 111, 123]. Între electrozi se creează un câmp electric puternic, când intensitatea câmpului electric atinge o anumită valoare ($\approx 10^8$ V/m), dielectricul este străpuns și are loc declanșarea unei DE însoțită de scânteii. DE sunt localizate în spațiul numit interstițiu activ delimitat de electrodul-sculă și suprafața piesei de prelucrat. Nu trebuie de confundat cu efectul arcului electric, care se produce pe suprafețe relativ mari și cu durate mari de timp cu efectul descărcărilor prin scânteii electrice, care se produce pe suprafețe relativ mici, de durate foarte scurte de timp, dar în care se generează o energie relativ mare. Această metodă de prelucrare a demonstrat viabilitatea și simplitatea de executare și un domeniu de aplicare foarte divers. Chiar dacă metoda electroeroziunii a fost descoperită cu mai multe decenii în urmă, în 1943, de către soții Boris și Natalia Lazarenco [154], până în prezent această metodă de prelucrare face parte din metodele cele

mai progresive, care pe parcurs a găsit și încă mai găsește o vastă aplicabilitate în diferite domenii ale industriei.

1.1.1. Etapele de dezvoltarea a tehnicii prelucrării metalelor prin electroeroziune

Pe măsura dezvoltării tehnicii, dispozitivelor și aparatelor, esențial se dezvoltă și domeniul de aplicare a procesului de electroeroziune cu sporirea eficacității de aplicare a acestei metode în industria constructoare de mașini. În urma studiului bibliografic am evidențiat cinci etape importante de dezvoltare a electroeroziunii. Pe parcursul ***primei etape*** a fost experimental demonstrat, că posibilitățile tehnologice ale procesului de electroeroziune depășesc posibilitățile de prelucrare a metalelor prin așchiere, care pe larg se aplică în industria constructoare de mașini. Aceasta a fost demonstrat chiar în primii ani după descoperirea fenomenului de electroeroziune. ***A doua etapă*** de dezvoltare a tehnicii de prelucrare a materialelor prin electroeroziune constă în apariția în lume, a mașinilor-unelte destinate pentru prelucrarea metalelor prin scânteii electrice. ***A treia etapă*** este caracterizată de dezvoltarea intensivă a procesului de electroeroziune cu precizia înaltă. B.R. Lazareno și N.I. Lazareno în primii ani după descoperirea acestui fenomen subliniau, că numai în descărcarea prin scânteii electrice este posibilă concentrarea energiei electrice în timp și spațiu [154]. Cercetările care s-au început în anii cinzeci, ai secolului XX, au demonstrat, că este posibil, dar și necesar de a aplica această metodă de prelucrare, din 2 motive de bază: a) posibilitatea prelucrării metalelor foarte dure (în principal ale carburilor metalice, ș.a.) și b) posibilitatea realizării prelucrărilor dimensionale de o geometrie complicată (găuri și adâncituri foarte subțiri, de orice formă, etc.). Aceste cercetări au adus în final la formarea direcțiilor noi în industria constructoare de mașini și în genere în industria de prelucrare a metalelor. În rezultatul cercetărilor, privind prelucrarea metalelor prin electroeroziune, de-a lungul anilor s-au stabilit următoarele:

- pentru efectuarea prelucrării dimensionale cu precizie înaltă [18, 26 – 29] este necesar de obținut impulsuri de o durată foarte scurtă și frecvență de urmărire înaltă (care asigură practic îndepărtarea neîntreruptă a întregului volum de material, în mare măsură datorită vaporizării locale) [113];

- este necesar de a studia și de a stabili legăturile de bază ale procesului de electroeroziune sub acțiunea acestor tipuri de descărcări;

- se impune de a examina metode noi de prelucrare prin scânteii electrice pentru piesele care necesită o precizie înaltă.

Esența acestor metode constă în micșorarea maxim posibil a zonei de interacțiune între electrozi cu scopul localizării efectului electroeroziunii, îmbunătățirea condițiilor de evacuare a

metalului prelevat din interstițiu și sporirea preciziei de prelucrare. Începând cu anii șaizeci ai secolului 20, în industria electronică au început să se dezvolte generatoare tiratronice de impulsuri (bipolare), ce dezvoltau o putere specifică înaltă, a devenit posibil utilizarea mai variată a mediilor dielectrice (utilizarea în calitate de dielectric chiar și apă obișnuită, fără filtrarea și deionizarea ei), fără pericol ca în zona de lucru vor apărea procese chimice nedorite, care vor conduce la scăderea preciziei de prelucrare. În afară de aceasta, aceste generatoare au permis mărirea esențială a productivității procesului și îmbunătățirea condițiilor de lucru. În generatorul de impulsuri tiratronic a fost păstrată ideea concentrării energiei electrice în condensatoare, iar pentru transmiterea ei la electrozi se folosește transformatorul de impulsuri, care evită legătura galvanică a sursei de alimentare cu electrozi. Acest transformator forma impulsuri bipolare puternice cu amplitudinea mare și durată în timp mică. În calitate de comutator în aceste generatoare se utilizează tiratronul.

Etapă a patra în dezvoltarea procesului de electroeroziune s-a început din momentul aplicării în practică a mașinilor cu dirijare numerică. Au fost elaborate posturi de prelucrare a pieselor prin metoda electroeroziunii. În țările înalt dezvoltate precum Japonia, din anii 2000, anual se executau peste 6 mii de mașini-unelte destinate pentru prelucrarea prin electroeroziune. În acea perioadă peste 30% a pieței mondiale a mașinilor (instalațiilor) de tipul „***Prelucrare prin descărcare electrică*** (care în literatura internațională de specialitate purtau denumirea de Pulsed Electric Discharge Machining)” le elaborau firma Sodik care ocupa primul loc în lume după volumul de producere și vânzare a echipamentului instalațiilor de descărcare electrică în impuls, iar circa 25% îi revenea firmei MITSUBISHI (DiAx). Posibilitățile procesului de electroeroziune la confecționarea pieselor de precizie înaltă nu sunt folosite la maxim. Creșterea de mai departe a productivității procesului de electroeroziune, la păstrarea s-au îmbunătățirea calității suprafeței prelucrate, poate fi asigurată prin confecționarea generatoarelor de impulsuri mai performante [155] și sisteme de dirijare dotate cu senzori de precizie sporită, ceea ce constituie cea de ***a cincea etapă*** de dezvoltare a tehnicii prelucrării metalelor prin electroeroziune.

1.1.2. Modelul fizic al procesului electroeroziunii: condiții normale, în mediu de aer

Prelucrarea prin DE este un proces controlat de îndepărtare/modificare a materialului conductor supus prelucrării (electrodului-piesă) prin intermediul eroziunii electrice. În acest proces se aplică plasma electrică ca instrumentul de prelucrare pentru a eroda sau a influența straturile de suprafață ale semifabricatului de prelucrat [135, 136], pentru a produce o piesă finită la forma proiectată [126]. Procesul de îndepărtare/modificare a unei cantități mici de metal se realizează prin aplicarea unei DE pulsatorii de curent electric de înaltă frecvență prin intermediul

electrodului-sculă asupra semifabricatului supus prelucrării [113, 116]. Fenomenul fizic ce stă la baza acestei metode tehnologice de prelucrare este eroziunea electrică [3]. Clasicii acestei tehnologii [154] au elaborat un tablou fizic interpretativ al acestui fenomen pentru condițiile descărcărilor electrice în impuls în mediu dielectric lichid. Acest tablou este exprimat astfel: în faza incipientă între electrozi are loc formarea canalului de conductibilitate prin efectul „strimer”, ca rezultat se formează canalul de conductibilitate pe care se degajă energia acumulată pe bateria de condensatoare, canalul se dilată foarte repede. În jurul acestui canal se formează o bulă de gaz, volumul căreia crește, fiind cauzată o depresiune locală, din care motiv materialul topit de pe suprafețele electrozilor este expulzat în interstițiu. Aici nu este exclusă și acțiunea forțelor electrodinamice. Dacă fenomenul electroeroziunii se dezvoltă după acest tablou, productivitatea ar fi o funcție directă cu frecvența și energia impulsurilor, însă aceasta nu se atestă [7]. Acest fenomen se confirmă și în cazul alierii suprafețelor care se produc în condiții atmosferice normale – cu atât mai mult, că în acest caz formarea unei depresiuni evidente practic este exclusă. O analiza a rezultatelor obținute de diferiți cercetători [7, 15 – 21, 24, 28] indică faptul, că acestea nu pot fi interpretate din punctul de vedere al tabloului clasic. Astfel, într-un șir de lucrări s-a demonstrat, că pe suprafața metalului topit în câmp electric se dezvoltă unde capilare [7, 28, 43, 70] care provoacă apariția unui menisc conic [24, 58, 71, 72, 88] de pe suprafața căruia se rup particule, ori se vaporizează metalul sub formă de ioni. În prezent se cunosc o serie de lucrări dedicate eroziunii electrice [7, 15, 24, 99], în care se presupune, că are loc acest mecanism. Indiferent de mediul de lucru (lichid sau gazos), în care se produc DE, predominante în procesul de electroeroziune sunt undele capilare pe suprafața metalului lichid aflat în câmp electric puternic, iar rezultatul cercetărilor teoretice este confirmat experimental pentru un șir de metale.

Reieșind din cele expuse mai sus și analizând modelul fizic al procesului electroeroziunii, propus de cercetătorul Pavel Topală, DHC, dr. hab., prof. univ., voi reaminti fazele procesului de eroziune electrică a acestui fenomen integral și complex. În faza întâia (fig. 1.1, a) are loc străpungerea interstițiului prin micșorarea rezistenței electrice a acestuia, cu formarea canalului sau a canalelor de conductibilitate. Acesta face legătura dintre electrozi cuplându-se cu ei prin intermediul petelor electrodice „reci” – faza de amorsare. Petele „reci” încălzesc și pregătesc suprafața pentru descărcarea de forță, datorită faptului, că au drept suport microneregularitățile suprafeței supuse prelucrării. Dilatarea canalului de conductibilitate este însoțită de unda de șoc și cea de lumină. În faza a doua (fig. 1.1, b) i-au naștere petele electrodice „calde” care topesc materialul electrozilor în dependență de cantitatea de energie ce o posedă formând baia de metal lichid. În faza a treia, sub acțiunea câmpului electric suprafața metalului lichid este perturbată [55, 56], pe ea i-au naștere unde capilare cu formarea meniscurilor sub formă de conuri Taylor (fig.

1.1, c). În faza a patra (fig. 1.1, d) prin intermediul asperităților formate, sub acțiunea câmpului electric, sunt extrase particule care servesc în calitate de emițătoare de ioni și/sau electroni ori din care se rup picături. În cazul când sunt mai multe canale simultan, datorită faptului, că în ele circulă curenți paraleli, ele se pot contopi prin atragerea curenților paraleli de același sens, și respectiv se contopesc și meniscurile, care în unele cazuri pot scurtcircuita interstițiul prin punțile formate.

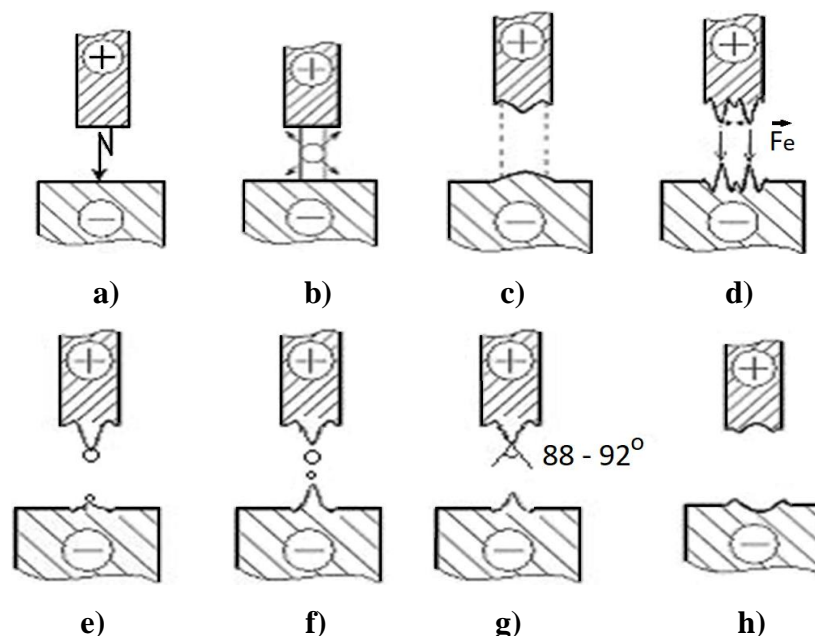


Fig. 1.1. Fazele procesului electroeroziunii în condiții normale [7]

În ultima fază (fig. 1.1, h), când energia acumulată pe condensator se epuizează, intensitatea câmpului electric devine nulă. Sub acțiunea forțelor de greutate și de tensiune superficială, lichidul se scurge rapid, fiind evacuat din inerție pe marginile craterului format, unde și se cristalizează. S-a observat, că practic toate craterele obținute la eroziunea electrică au o formă ideală a calotei sferice. Aceasta are loc datorită faptului, că la descărcarea electrică (prelucrarea dimensională), energia degajată pe suprafață depinde de vectorul intensității câmpului electric și deci baia de metal lichid copie raza vectorială a câmpului electric [7]. În afară de cratere, pe suprafețele pieselor pot apărea și meniscuri în forma unor conuri Taylor. Formarea acestora se datorește instabilității aperiodice care apare în câmp electric de intensitate înaltă [15].

Modelul prezentat în fig. 1.1, este completat cu următoarele faze (fig. 1.1 e, f și g) [7]:

- perturbarea suprafeței metalului lichid cu formarea meniscului de formă semirotundă;
- în cazul intensităților mari a curenților de descărcare în interstițiu i-au naștere simultan două și mai multe canale, iar din suprafețele electrozilor se extrag respectiv mai multe meniscuri;
- sub acțiunea câmpului electric, datorită distribuției superficiale a sarcinii electrice, are loc formarea picăturilor prin scurgerea lichidului electrizat în direcția de acțiune a câmpului electric;

- în cazul când forțele de tensiune superficială sunt depășite după valoare de cele electrodinamice are loc ruperea picăturilor de pe suprafața meniscului cu transferul pe suprafața electrodului opus sau expulzarea din interstițiul. Aceste procese expuse mai sus se produc simultan pe suprafețele ambelor electrozi și, că după ruperea particulelor are loc mișcarea în sensuri opuse a două fluxuri de particule cele de dimensiuni mai mari provin de la anod, iar cele mai mici, de la catod. Anume prin aceasta poate fi explicat procesul de amestecare a materialelor electrozilor cu formarea de noi aliaje la formarea straturilor de depunere;

- în procesul formării și ruperii picăturii, meniscul semisferic se transformă în unul conic cu unghiul de la vârf cuprins în limitele de $88..92^{\circ}$ (adică unghiul de alunecare a lichidului constituie cca 45° , acesta fiind un unghi optim). Conurile Taylor pot servi și în calitate de emiteri de ioni care permit a elucida procesul de electroeroziune în stare de vapori;

- când DE ea sfârșit, pot avea loc două cazuri: dacă materialul extras sub formă de menisc dovedește să se cristalizeze până la scurgerea în direcția inversă, atunci acesta își păstrează forma și dimensiunile; în cazul în care materialul nu s-a cristalizat, atunci alunecă pe suprafața semisferică a craterului, este expulzat și se cristalizează sub formă de undă concentrică pe marginile acesteia.

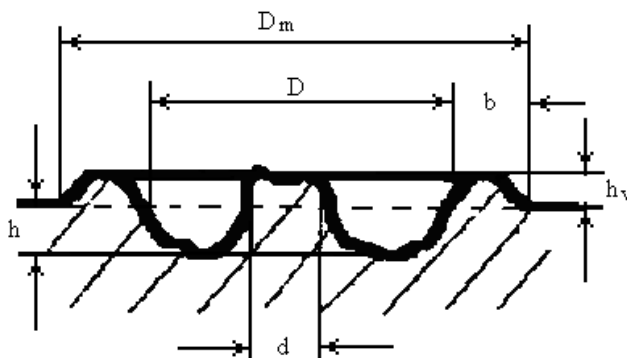


Fig. 1.2. Vederea generală a secțiunii unui crater cu menisc format incomplet [24]: materialul – oțel 12X18H10T; $W_o = 250 \mu\text{J}$, $U_o = 100 \text{ V}$, D_m – diametrul sectorului atacat de DEI, D – diametrul craterului, h – adâncimea craterului, b și h_v – lățimea și înălțimea valului format în jurul craterului

În lucrarea [16, 24] a fost studiată geometria craterelor obținute pe suprafețele diferitor materiale în dependență de energia impulsului de descărcare și mărimea interstițiului dintre electrozi. A fost menționat, că într-adevăr în centrul craterelor și anume pentru oțeluri apar meniscuri care nu sunt formate complet (vezi Fig. 1.2) [24].

Formarea incompletă a meniscurilor se explică prin faptul, că în interstițiul se degajă o cantitate de energie destul de mică sau din motiv, că este mult mai mare. Așadar, unul din

obiectivele de cercetare în cadrul tezei, îl constituia determinarea intervalului optim de energie degajată în interstițiu, la care extragerea asperităților conice are loc cel mai probabil.

De către autorii lucrării [9] în procesul cercetărilor experimentale au fost înregistrate trei tipuri de craterare (fig. 1.3) toate având forma calotei sferice: prima cu profil neted; a doua cu profil rugos și cel deal treilea având în mijloc un menisc [80]. Meniscurile au fost înregistrate atât în cazul prelucrărilor dimensionale, cât și în condițiile aplicării DEI la formarea depunerilor.

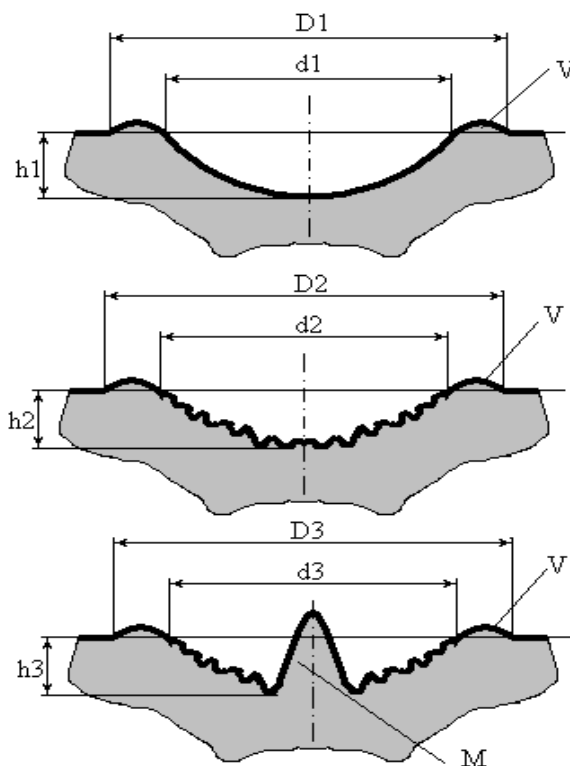


Fig. 1.3. Tipuri de craterare obținute la prelucrarea dimensională prin electroeroziune [24]:

D_1, D_2, D_3 – diametrele suprafeței atacate de DEI; d_1, d_2, d_3 – diametrul craterului;

h_1, h_2, h_3 – adâncimea acestor craterare; M – menisc; V – val

Important este a menționa, că adesea în procesele de aliere a suprafețelor cu rupere de contact, la o serie de materiale se atestă microsudarea componentelor piesei-sculă, care se datorește contopirii meniscurilor extrase din anod și din catod. Recent au fost publicate un șir de lucrări [20, 53, 54, 59, 64, 111 – 113, 118], în care se demonstrează, că apariția meniscurilor în centrul craterelor se datorește unui nou tablou fizic al procesului electroeroziunii care este prezentat în capitolul 3 al prezentei teze de doctor și anume nu doar al perturbării suprafeței metalului lichid sub acțiunea câmpurilor electrice de intensitate înaltă, care are cea mai mare influență și a forțelor de tensiune superficială ce acționează asupra metalului topit, dar și al influenței petelor catodice reci ce i-au naștere pe suprafață fierbinte a metalului lichid care se solidifică.

1.1.3. Procese ce se produc pe suprafețele electrozilor în condițiile DEI

Cercetările, privind interacțiunea canalului de plasmă al descărcărilor electrice în impuls cu suprafețele electrozilor au demonstrat, că de fapt pentru fenomenul electroeroziunii sunt caracteristice două tipuri de efecte: **tipul I** – apariția pe suprafețele electrozilor a petelor electrodice „reci” care iau naștere pe asperitățile și oxizii de pe ele, și provoacă atât curățarea suprafețelor de impurități, cât și interacționează termic cu acestea, provocând schimbări structurale în straturile superficiale de grosimi mici (de ordinul micrometrelor); **tipul II** – pe suprafețele electrozilor după petele „reci” iau naștere cele „calde” care provoacă topirea esențială a acesteia, însoțită de fenomene de vaporizare și prelevare a materialului electrozilor sub formă de picături.

Analizând rezultatele obținute de către autorii [7, 24, 28] s-a stabilit, că pentru a obține pe suprafețele pieselor o interacțiune de tipul I cu canalul de plasmă, este necesar a se satisface următoarea condiție:

$$Q_{W_e} < \frac{4W_S}{\pi \cdot d_{cp}^2 \cdot S} \quad (1.1)$$

$$Q_{W_e} = q \cdot \rho \quad (1.2)$$

în care: Q_{W_s} – densitatea de energie a canalului de plasmă (J/m^3), q și ρ sunt respectiv căldura specifică de topire (J/kg) și densitatea materialului piesei (kg/m^3); W_S – energia degajată în interstițiu (J), d_{cp} – diametrul canalului de plasmă (m) și S – mărimea interstițiului (m).

După cum se poate observa din relația (1.1), în cazul când se cunoaște regimul energetic de prelucrare, mărimea interstițiului și proprietățile termo-fizice ale materialului piesei poate fi determinat diametrul canalului de plasmă, care coincide practic după dimensiuni cu cel a amprentei acestuia pe suprafața prelucrată. Interacțiunea canalului de plasmă cu suprafața electrozilor-piesă nu totdeauna poartă un caracter pur termic, ci adesea suprafața piesei este îmbogățită cu elementele ce se conțin în mediul înconjurător și cu acelea din conținutul materialului anodului-sculă [126].

Adâncimea de pătrundere a acestor elemente în stratul superficial al piesei este funcție atât de energia impulsului, cât și de mărimea interstițiului și poate fi exprimată cu relația (1.3):

$$h = \frac{kW_S}{AS} \quad (1.3)$$

în care: k – o constantă ce este funcție de proprietățile termo-fizice ale materialului prelucrat; $W_S = \int_0^\tau U(t)I(t)dt$, reprezintă energia degajată în interstițiu în decursul unei descărcări (J); U și I sunt corespunzător tensiunea pe interstițiu (V) și intensitatea curentului electric în el (A); τ – durata impulsului (s); A – aria suprafeței atacate la o descărcare (m^2); S – mărimea interstițiului (m).

A fost demonstrat faptul, că procesele de eroziune, însoțite de topirea și vaporizarea explozivă a materialului electrozilor, pentru marea majoritate a metalelor și aliajelor studiate, durează circa 10^{-6} s. Rezultă, că pentru a obține efectele scontate este necesar a asigura impulsuri

de descărcare de durată relativ mică. Efectele ce au loc pe suprafețele electrozilor sunt funcție de modul de includere a piesei în circuitul de descărcare (în calitate de anod sau de catod). Aceste deziderate au fost studiate în [7, 25] și s-a stabilit, că pentru impulsuri de durată scurtă acestea sunt „catodice”, iar de durată mare acestea sunt „anodice”, deci în cazul tratamentelor termice superficiale piesa se va include în circuit în calitate de catod [7, 28, 43], iar în cazul necesității extragerii meniscurilor conice piesa în circuitul de descărcare se va conecta în calitate de anod.

1.1.4. Unele rezultate, privind modificarea microgeometriei suprafețelor metalice

În cazul proceselor de prelucrare prin electroeroziune indiferent de procedeul aplicat, fie prelucrare dimensională sau formarea straturilor de depunere are loc topirea și prelevarea materialului de pe suprafața electrozilor cu formarea pe suprafețele acestora a unor cratere de forma unei calote sferice, cu suprafață netedă sau cu prezența asperităților conice. La aplicarea descărcărilor electrice în impuls în regim de subexcitate la care mărimea interstițiului variază între 0,03 – 2,5 mm, mărimea energiei utilizate și respectiv distribuția ei între coloana de plasmă a DEI și suprafețele electrozilor joacă un rol important în efecte termice și erozive ce au loc pe suprafețele acestora. Deoarece aceste efecte depind de regimul de prelucrare, analiza degajării energiei și distribuția ei între coloana de plasmă [149] și suprafețele electrozilor este foarte importantă. Din cele expuse și analizate în unele lucrări [7, 24] putem afirma, că la aplicarea DEI se atestă două tipuri de efecte: cele care provoacă topirea, depunerea și vaporizarea metalului, apariția petelor electrodice „calde” și cele care provoacă tratarea termică și termochimică a suprafețelor, prin apariția petelor electrodice „reci”. Conform metodicii [7, 24, 136, 137] energia acumulată pe bateria de condensatoare este diferită de cea degajată în interstițiu, datorită faptului, că energia de pe bateria de condensatoare se consumă atât pe conturul de descărcare, cât și pentru realizarea efectelor ce au loc în interstițiu. Dacă discutăm despre procesele de prelucrare în care valoarea interstițiului se modifică de la 0,01 – 2 mm, atunci se schimbă nu numai cantitatea de energie degajată pe interstițiu, dar și randamentul procesului de prelucrare (η), care poate fi determinat după relația (1.4):

$$\eta = \frac{W_s}{W_c} \times 100\% \quad (1.4)$$

în care: W_s – energia degajată în interstițiu (J); W_c – energia înmagazinată în bateriile de condensatoare (J).

Conform rezultatelor experimentale obținute de autorii [7, 24] se observă, că randamentului procesului de prelucrare depinde în cea mare măsură de mărimea interstițiului și de energia degajată în acesta. Acest fapt se datorește în primul rând creșterii sau micșorării mărimii rezistenței

active a canalului de plasmă. În același timp se stabilește o redistribuire evidentă a energiei sumar degajate în interstițiu W_s , între electrozi W_e și în canalul de plasmă $W_{c.p}$. Încercând să determinăm eficiența instalației din cadrul LȘMNT s-a adeverit că este de aproximativ 40 – 45 %. Cu alte cuvinte din energia totală consumată pentru încărcarea bateriilor de condensatoare, doar 0,4 – 0,45 se degajă în interstițiu. După cum se observă, conform datelor experimentale reprezentate în tabelul 1.1, în toate cazurile, cu creșterea mărimii interstițiului, randamentul crește liniar.

Tabelul 1.1. Datele experimentale a randamentului (η) procesului de electroeroziune în dependență de mărimea interstițiului (S) sau energia (W_s) degajată pe acesta [24]

S , (mm)	U_c , (V)	U_s , (V)	W_c , (J)	W_s , (J)	η , %
0,15	160	21,0	7,68	3,04	39,5
	240	20,05	17,28	4,3	24,8
	320	20,55	30,72	4,8	15,6
	400	20,8	48,0	6,82	14,2
0,35	160	26,0	7,68	3,17	41,2
	240	25,2	17,28	4,5	26,0
	320	25,8	30,72	5,3	17,2
	400	26,1	48,0	7,2	15,0
1,0	160	30,5	7,68	3,4	44,2
	240	31,1	17,28	4,9	28,3
	324	30,0	30,72	5,5	17,9
	400	30,0	48,0	7,7	16,0
1,5	160	37,9	7,68	3,58	46,6
	240	38,2	17,28	5,3	30,6
	320	38,0	30,72	5,7	18,5
	400	38,5	48,0	7,01	14,6
2,0	160	49,5	7,68	3,9	50,7
	240	50,0	17,28	5,27	30,5
	320	51,3	30,72	7,9	25,7
	400	50,0	48,0	7,95	16,5

Valorile maxime ale randamentului se obțin pentru alimentarea bateriilor de condensatoare cu tensiuni egale cu $U_c = 160$ V, de aceea vom concluda, că la aceste energii ale bateriilor de condensatoare și respectiv, a energiei degajate în interstițiu, procesul decurge cel mai eficient din punct de vedere al consumului de energie [129]. Putem menționa, că cu creșterea gradientului de energie acumulate pe bateria de condensatoare și gradientului de energie degajate pe interstițiu, randamentul procesului scade pentru toate mărimile interstițiului. Reiese, că poate fi ales un regim optim, pentru care randamentul procesului va fi maximal, ceea ce joacă un rol important în prelucrarea tuturor materialelor prin metoda electroeroziunii, cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls. Analiza minuțioasă a datelor prezentate în tabelul 1.1 ne indică faptul, că variația mărimii interstițiului și energiei descărcării electrice solitare, vor influența și

caracterul interacțiunii plasmei cu suprafața electrozilor (cu sau fără formarea fazei lichide) [24]. Aceste schimbări ale caracterului de interacțiune se datorează trecerii descărcării de la structura monocanal la aceea de multicanal și existenței simultane ori separate a petelor electrodice „reci” și „calde”, pentru un interval al mărimii interstițiului (S) cuprins în intervalul: 0,03...0,5 mm.

De către autorul acestei lucrări și de către autorii lucrărilor [7, 24] a fost studiată influența duratei impulsului (τ) asupra calității suprafeței prelucrate. S-a stabilit, că dacă durata impulsului ($\tau < 10 \mu s$) atunci aproximativ 90% de metal se înlătură de pe suprafața piesei sub formă de vapori și restul în formă de metal topit. În cazul când durata impulsului constituie ($\tau > 100 \mu s$), în formă de vapori se înlătură aproximativ 10%. Luând în considerație acest fapt, pentru valori mari a lui S și curenți medii I_m , pe suprafața piesei în procesul prelucrării pot fi obținute picături de lichid cu dimensiuni mari.

În afară de aceasta rugozitatea suprafeței prelucrate depinde nu numai de valoarea medie a curentului electric și de durata impulsului, dar și de polaritatea conectării electrozilor. Suprafețele, prelucrate prin metoda electroeroziunii la polaritatea directă și indirectă, esențial se deosebesc, ce se explică prin faptul, că procesele care au loc pe suprafețele anodului și catodului decurg în moduri diferite. La polaritatea directă, fragmentele elementare a suprafeței formate au dimensiuni mai mari, în comparare cu cele care se obțin la polaritatea inversă. Dacă se presupune, că craterul, care se formează pe suprafața piesei în procesul descărcării are forma unei calote sferice, atunci pentru cazul dat, volumul craterului este determinat cu relația (1.5) [24]:

$$V_c = 0,4 h_c d_c^2 \quad (1.5)$$

în care: V_c – volumul craterului (μm^3); h_c – este adâncimea craterului (μm); d_c – este diametrul craterului (μm).

În același timp:

$$R_z \approx \frac{h_c}{3} \quad (1.6)$$

în care: R_z – exprimă rugozitatea suprafeței (μm).

Vom considera, că volumul craterului V_c , care se formează pe suprafața piesei prelucrate este aproximativ egal cu volumul metalului topit $V_{m.t}$ și prelevat de pe aceasta.

$$V_c \approx V_{m.t} \quad (1.7)$$

în care: $V_{m.t}$ – volumul metalului topit și prelevat de pe electrozi (μm^3).

În procesul cercetărilor au fost înregistrate trei tipuri de cratere toate având forma calotei sferice: prima cu profil neted; a doua cu profil rugos și cel deal treilea având în mijloc o asperitate. Asperitatea se extrage din crater și are forma unui con Taylor, conform [24, 68 – 72]. Apariția asperităților în centrul craterelor se datorește perturbării suprafeței metalului lichid în procesul

prelucrării. S-a observat, că așa tipuri de cratere pot fi obținute nu numai pe suprafețe sferice dar și pe suprafețe plane și cilindrice. Pentru cazul dat, putem concluda, că metalul lichid din crater nu dovedește să se înlătore din acesta și se extrage sub formă de asperitate sub acțiunea câmpului electric.

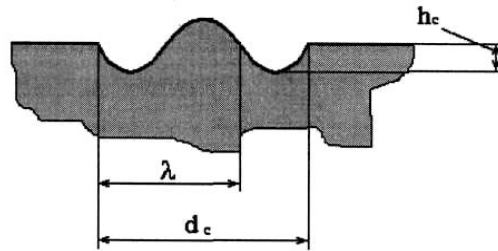


Fig. 1.4. Vederea generală a unei asperități extrase de pe suprafața metalului [24]:

λ – lungimea de undă; d_c – diametrul craterului; h_c – adâncimea craterului

Conform schemei prezentate în fig. 1.4, se poate exprima aproximativ diametrul craterului (d_c), ca funcție de lungimea de undă (λ) a suprafeței perturbate [24]:

$$d_c \approx \frac{3}{2} \lambda \quad (1.8)$$

în care: d_c – diametrul craterului (μm); λ – lungimea de undă a suprafeței perturbate (μm).

Ecuția (1.8) este valabilă pentru cazul suprafețelor plane. Analizând ecuațiile (1.5) și (1.6) și executând transformările necesare, vom exprima diametrul craterului cu relația (1.9):

$$d_c = \sqrt{\frac{V_c}{1,2R_z}} \quad (1.9)$$

în care: d_c – diametrul craterului (μm); V_c – volumul craterului (μm^3); R_z – exprimă rugozitatea suprafeței (μm).

Dacă vom egala ecuațiile (1.8) și (1.9), vom obține:

$$\frac{3}{2} \lambda = \sqrt{\frac{V_c}{1,2R_z}} \quad (1.10)$$

Din relația (1.10) rezultă, că [24]:

$$R_z = 0,37 \frac{V_c}{\lambda^2} \quad (1.11)$$

Ținând cont de relațiile (1.7), ecuația (1.11) poate fi scrisă sub forma:

$$R_z = 0,37 \frac{V_{m,t}}{\lambda^2} \quad (1.12)$$

în care: R_z – rugozitatea suprafeței (μm); $V_{m,t}$ – volumul (μm^3); λ – lungimea de undă a suprafeței perturbate (μm).

După cum se vede din relația (1.12), rugozitatea suprafeței plane după o singură descărcare depinde în mare măsură de volumul metalului topit din crater. Este cunoscut, că sursa oscilatorie

de unde posedă energie. În procesul propagării undei, fiecare particulă a mediului la care ajunge unda, devine sursă secundară de unde care efectuează oscilații și are o anumită energie. În un anumit volum (V_a) al mediului în care se propagă unda, cu amplitudinea A și frecvența ciclică ω , există o cantitate de energia, valoarea medie \overline{W} a cărei poate fi exprimată cu relația (1.13):

$$\overline{W} = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \quad (1.13)$$

în care: \overline{W} – energie medie (J); m – masa metalului topit (kg); ω – frecvența ciclică (rad/s); A – amplitudinea undei (m).

În cazul nostru, amplitudinea undei (A) poate fi legată cu înălțimea meniscului în felul următor [24]:

$$A \approx \frac{h_m}{2} \quad (1.14)$$

în care: A – amplitudinea undei (m); h_m – înălțimea meniscului (m).

Reiese, că relația (1.13) poate fi scrisă sub forma [24]:

$$\overline{W} = \frac{1}{8} m \omega^2 h_m^2 \quad (1.15)$$

în care: \overline{W} – energie medie (J); m – masa metalului topit (kg); ω – frecvența ciclică (rad/s); A – amplitudinea undei (m).

Pentru excitarea undelor capilare este necesară perturbarea suprafeței metalului lichid. Pentru a demonstra, că acest efect este posibil în condiții de prelucrări prin electroeroziune vom aminti relația perturbării suprafeței metalului lichid:

$$\omega^2 = \frac{k}{\rho} (g\rho - 4\pi\sigma^2 k + \alpha k^2) \quad (1.16)$$

în care: ω – frecvența ciclică (rad/s); k – numărul de undă ($k = 2\pi/\lambda$); λ – lungimea de undă (m); ρ – densitatea metalului (kg/m^3); g – accelerația căderii libere (m/s^2); σ – densitatea superficială a sarcinii (C/m^2); α – coeficientul de tensiune superficială (N/m).

Introducând ecuația (1.16) în (1.15) și vom obține:

$$\overline{W} = \frac{k}{8\rho} (g\rho - 4\pi\sigma^2 k + \alpha k^2) \cdot m h_m^2 \quad (1.17)$$

în care: m – masa porțiunii înserate de metal (kg); h_m – înălțimea meniscului (m).

Relația (1.17) poate fi scrisă și sub forma:

$$\overline{W} = \frac{k}{8\rho} (g\rho - 4\pi\sigma^2 k + \alpha k^2) \cdot \rho V h_m^2 \quad (1.18)$$

în care: ρ – densitatea metalului (kg/m^3); V – volumul (m^3).

Relația (1.18) reprezintă energia necesară perturbării suprafeței sau energia minimă de undă. Efectul DEI, la anod este mai puternic. De aceea, pentru a extrage asperități conice din electrodul-piesă, acesta trebuie să fie conectat în circuitul electric, în calitate de anod, iar

electrodul-sculă, în calitate de catod [7, 15, 24, 28, 29, 34 – 36, 57 – 59]. Fenomenul de formare a asperităților conice a fost observate atât pe suprafața craterului catodului, cât și pe cea a anodului executat din diverse materiale [24, 79 – 90, 139, 140]. Se poate afirma, că asperitățile conice se pot obține practic pe toate tipurile de materiale ce conduc curentul electric și pentru o multitudine de materiale conductoare aceste formațiuni au fost obținute și în mod experimental. Observarea acestor formațiuni pe suprafețele electrozilor executați din materiale greu fuzibile este mai ușoară din motiv, că cantitatea acestora este mică, iar procesul de înghețare este mai favorabil.

În lucrarea [24] sunt examinați factorii de degajare a căldurii, generate de DEI. Se prezintă distribuția temperaturii în piesa de lucru demonstrând, că acestea îi revine un rol esențial în procesele de prelucrare dimensională, formare a straturilor de depunere și de modificare a microgeometriei suprafețelor pieselor metalice.

1.1.5. Bilanțul termic al DEI

Este cunoscut, că în procesul DEI, pe suprafețele anodului și catodului se degajă o anumită cantitate de căldură, care conduce la încălzirea și topirea anumitei cantități de material de pe acestea [7, 24, 166]. În afară de aceasta, în procesul prelucrării cu aplicarea DEI, (fie prelucrarea dimensională, formarea straturilor de depunere sau modificarea microgeometriei suprafețelor), se observă o transformare structurală a materialului electrozilor, datorată temperaturii înalte în zona de lucru. În timpul procesului eroziv temperaturile ridicate ale descărcărilor electrice provoacă și modificări structurale ale stratului de suprafață. Căldura generată de descărcarea electrică în impuls $Q_{d.e}$ se compune din trei factori principali [24, 166] și anume:

$$Q_{d.e} = Q_a + Q_k + Q_c \quad (1.19)$$

în care: $Q_{d.e}$ – căldura generată de DEI (J); Q_a – căldura transmisă anodului (J); Q_k – căldura transmisă catodului (J); Q_c – căldura degajată în canalul de descărcare (J).

Căldura transmisă anodului se compune la rândul ei dintr-o sumă de călduri parțiale:

$$Q_a = Q_{a1} + Q_{a2} + Q_{a3} + Q_{a4} \quad (1.20)$$

în care: Q_{a1} – căldura transmisă anodului prin cedarea energiei cinetice a particulelor incidente (J); Q_{a2} – căldura obținută de anod prin efectul Joule-Lenz (J); Q_{a3} – căldura obținută prin agitația termică a particulelor la suprafața anodului (J); Q_{a4} – căldura transmisă de particule neutre din canalul de plasmă, încălzite în coloană și antrenate spre anod (J).

Este cunoscut faptul [26], că Q_{a2} nu depășește 10% din Q_a , iar Q_{a3} și Q_{a4} sunt neglijabile, în raport cu Q_{a1} . Din acest motiv relația (1.20) se poate simplifica:

$$Q_a = Q_{a1} + Q_{a2} \quad (1.21)$$

În mod similar, putem scrie:

$$Q_k = Q_{k1} + Q_{k2} \quad (1.22)$$

în care: Q_{k1} – căldura transmisă catodului prin cedarea energiei cinetice a particulelor incidente (J); Q_{k2} – căldura obținută de catod prin efectul Joule-Lenz (J).

Conform sursei bibliografice [26] studiile macroscopice asupra repartiției căldurii în interstițiu se ajunge la următorul bilanț termic [166]:

$$Q_{d.e} = Q_{a1} + Q_{a2} + Q_{k1} + Q_{k2} + Q_c + Q_i \quad (1.23)$$

în care: Q_c – căldura transmisă prin canalul de descărcare mediului în care are loc prelucrarea (J); Q_i – căldura pierdută în sistem (J).

După cum afirmă autorul lucrării [24], în realitate apar schimburi de căldură între elementele sistemului, așa încât bilanțul termic trebuie reconsiderat. Astfel, căldura consumată pentru prelevarea de material se distribuie celor doi electrozi prin răcirea particulelor erodate în mediul dielectric. Căldura obținută prin efectul Joule-Lenz se transmite aproape în întregime masei electrozilor. În acest fel:

$$Q_{a1} = Q_{alk} + Q_{ala} + Q_{alc} \quad (1.24)$$

în care: Q_{alk} – schimbul de căldură între anod și catod prin intermediul particulelor incidente pe acestea (J); Q_{ala} – căldura ce se disipă în anod și elementele de fixare ale acestuia (J); Q_{alc} – schimbul de căldură între anod și canalul de descărcare (J);

$$Q_{k1} = Q_{k1k} + Q_{k1a} + Q_{k1c} \quad (1.25)$$

în care: Q_{k1k} – căldura ce se disipă în catod și elementele de fixare ale acestuia (J); Q_{k1a} – schimbul de căldură între catod și anod prin intermediul particulelor incidente pe acestea (J); Q_{k1c} – schimbul de căldură între catod și canalul de descărcare (J).

Căldura degajată în canalul descărcării electrice (Q_c), se transmite mediului de lucru:

$$Q_c = Q_{m.l} \quad (1.26)$$

în care: Q_c – căldura degajată în canalul DE (J); $Q_{m.l}$ – căldura transmisă mediului de lucru (J).

În final, autorul lucrării [24] a obținut următorul bilanț termic:

$$Q_{d.e} - Q_i = (Q_{a2} + Q_{ala} + Q_{k1a}) + (Q_{k2} + Q_{k1k} + Q_{alk}) + (Q_c + Q_{alc} + Q_{k1c}) \quad (1.27)$$

Studiind literatura de specialitate și analizând efectele ce au loc în descărcările electrice în impuls consider, că nici relația (1.27) nu este completă, deoarece în ea nu se ea în calcul generarea/absorbția cantității de căldură datorită reacțiilor chimice ce au loc în mediu.

Toate reacțiile chimice cunoscute se clasifică după cum urmează:

- reacții de combinare, în care doi sau mai mulți reactanți se unesc pentru a forma un singur produs de reacție;
- reacții de descompunere, dintr-o substanță compusă (reactant) se formează doi sau mai mulți produși de reacție;

- reacții de substituție, atomul unui element înlocuiește atomii unui alt element într-o substanță compusă;
- reacții de schimb, două substanțe compuse își schimbă între ele unele elemente, transformându-se în alte substanțe compuse.

Se cunosc următoarele reacții chimice ce au loc în cadrul procesului DEI: oxidare, hidro-oxidare [57, 104], disociere și recombinație, degajare de ozon, iar ținând cont de acestea, în final obținem următorul bilanț termic:

$$Q_{d.e.} - Q_i = (Q_{a2} + Q_{a1a} + Q_{k1a}) + (Q_{k2} + Q_{k1k} + Q_{a1k}) + (Q_{cc} + Q_{a1c} + Q_{k1c}) \pm Q_{r.c.} \quad (1.28)$$

în care: $Q_{r.c}$ – este cantitatea de căldură cauzată de reacțiile chimice ce au loc în cadrul DEI (J).

Semnul „±” în fața termenului $Q_{r.c}$ apare din cauza, că reacțiile chimice ce au loc în cadrul DEI, pot decurge cu absorbție de căldură, în acest caz, în ecuația (1.28), în fața termenului $Q_{r.c}$ se va scrie „semnul minus”, iar, dacă reacțiile chimice vor decurge cu degajare de căldură, atunci se va indica „semnul plus”.

În prezent este cunoscut, că procesul de distribuție a temperaturii în suprafețele electrozilor depinde de următorii factori: energia degajată în interstițiu, distanța la care se află petele electrodice „calde” față de suprafețele electrozilor, capacitatea termică specifică (c) a materialului din care sunt confecționați electrozi, densitatea (ρ) a materialului electrozilor și pierderii de energie care au loc în procesul descărcărilor electrice în impuls. Temperatura suprafeței prelucrate pentru punctul care se găsește în zona canalului de descărcare poate fi determinată cu relația (1.29) [24, 166]:

$$T = T_0 + \frac{\theta \eta W_s}{(c \rho h_{p.e.}^3)} \quad (1.29)$$

în care: T_0 – temperatura inițială a electrodului (K); θ – parametru de temperatură, care ia în considerație conductibilitatea termică a electrodului (α , $Wm^{-2}K^{-1}$) și timpul de acțiune a sursei de căldură (τ , s); η – randamentul utilizării energiei impulsului de descărcare (coeficientul η depinde de mediul în care are loc prelucrarea, conductibilitatea termică a electrodului, densitatea materialului electrodului și poziționarea electrozilor unul față de altul și pentru prelucrarea dimensională valoarea acestui coeficient se găsește în limitele $\eta \approx 0,19...0,24$); W_s – energia degajată în interstițiu (J); c – capacitatea termică specifică ($Wm^{-1}K^{-1}$); ρ – densitatea materialului electrodului (kg/m^3); $h_{p.e.}$ – distanța până la sursă de căldură (m).

În calitate de sursă de căldură, în acest caz, vom considera „pata electrodică” care generează temperaturi comparabile cu cea a suprafeței soarelui (de ordinul 10^4 K) [24]:

$$\theta = \frac{e^{-1/4} F_0}{8\pi F_0 \sqrt{\pi F_0}} \quad (1.30)$$

în care: $F_0 = \frac{\alpha\tau}{R^2}$ – criteriul lui Fourier ($\frac{W \cdot s}{m^4 \cdot K}$).

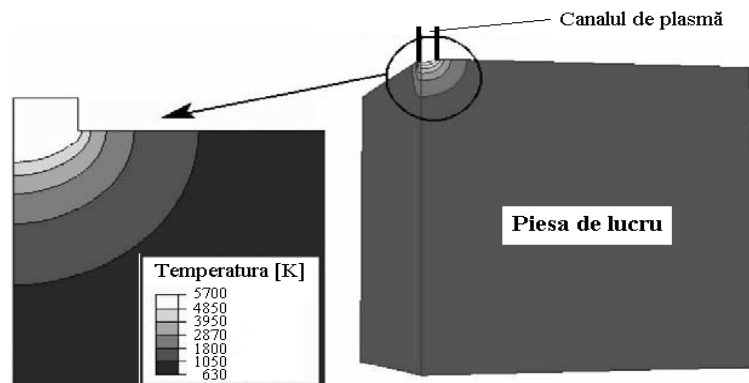


Fig. 1.5. Modelul de distribuție a temperaturii în piesa de lucru în procesul DEI [24]:

$$W_c = 0,54 \text{ J}, \tau = 0,008 \text{ s}$$

În fig. 1.5, este prezentat modelul de distribuție a temperaturii în piesa de lucru sub formă de izoterme pentru cazul când, pata electrodică (sursă punctiformă de căldură) se găsește la distanța $h_{p,e}$ (distanța până la sursă de căldură) față de suprafața acesteia. Din acest model se observă, că frontul de temperaturi se distribuie în electrodul-piesă după o emisferă, prin aceasta se poate explica fenomenul de obținere a craterelor pe suprafețele electrozilor sub formă de calotă sferică.

1.2. Stadiul actual al procesului de emisie termoelectronică

Fenomenul fizic de emisie termoelectronică a fost descoperit în anul 1881 de către cunoscutul inventator Thomas Alva Edison (1847 – 1931). Acest fenomen și-a găsit o utilitate vastă în construcția de aparate și se aplică pe larg în construcția și principiul de funcționare a tuburilor electronice, a instalațiilor industriale de prelucrare a materialelor cu fascicul de electroni [1 – 7, 53, 58, 59], în microscopie electronică cu scanare [8 – 11] și în imagistica medicală cu razele X (produse în tuburi Roentgen) [12].

1.2.1. Tipurile de emisii electronice

Electronii de conducție din metal, efectuând o mișcare termică haotică, pot ieși și în afara lui. Din această cauză în apropierea suprafeței metalului există un nor de electroni care permanent face schimb de electroni cu metalul, așa, că electronii din metal și norul de electroni format în apropierea metalului se află între ei în echilibru dinamic. Concentrația electronilor în nor e considerabilă în punctele situate la câteva distanțe interatomice de la suprafața metalului. Pe suprafața metalului există un exces de sarcini pozitive ale ionilor. Aceste sarcini și norul de electroni formează un strat subțire bipolar câmpul electric al căruia împiedică ieșirea altor electroni

din metal. Totuși, pentru a crea posibilitatea ca alți electroni să părăsească piesa metalică, este necesar ca electronii liberi din interiorul piesei să obțină o energie suplimentară.

Lucrul minim, efectuat de electronul de conducție pentru a ieși din metal în condiții de vacuum, se numește lucru de ieșire L_e . Lucrul de ieșire se efectuează pe contul micșorării energiei cinetice a electronului. El include lucrul efectuat împotriva forțelor câmpului stratului bipolar, precum și împotriva „forțelor de oglindire”, adică împotriva forțelor de atracție a sarcinii pozitive de pe suprafața metalului, indusă de electronul care a ieșit (această sarcină ecranează în interiorul metalului câmpul electric al electronului care a părăsit metalul). Lucrul de ieșire depinde de natura chimică a metalului și de starea suprafeței lui. Impurificarea suprafeței, pelicula de oxid și alte schimbări ale stării suprafeței influențează considerabil asupra mărimii lucrului de ieșire. Pentru metalele pure lucrul de ieșire e de ordinul a câțiva electron-volți [3].

Electronii de conducție se pot deplasa relativ liber în interiorul metalelor, dar nu pot ieși în mediul înconjurător. Pentru ca electronii să poată părăsi metal, este necesar să li se comunice o energie minimă E_{ex} , denumită energie de extracție sau lucru mecanic de extracție. Această energie poate fi obținută în diferite moduri: prin acțiunea cu radiații electromagnetice; prin bombardarea metalelor cu electroni rapizi sau cu alte particule; prin aplicarea energiei termice asupra rețelei cristaline; prin acțiunea unui câmp electric exterior, etc.

Fenomenul de producere a electronilor liberi de către corpurile solide sau lichide se numește emisie electronică, iar corpurile care emit electroni se numesc emitori [3]. În dependență de mecanismul de comunicare a energiei necesare electronilor pentru efectuarea lucrului de ieșire pot fi deosebite următoarele feluri de emisie electronică:

- a) emisie termoelectronică – emisiunea electronilor de către corpurile încălzite;
- b) emisie fotoelectronică sau efect fotoelectric extern – emisiunea electronilor sub acțiunea radiației electromagnetice;
- c) emisie electronică – emisiunea electronilor secundari în urma bombardării emiterului cu electroni primari [130];
- d) emisie ion-electron – emisiunea electronilor în urma bombardării emiterului cu ioni;
- e) emisie autoelectronică – emisiunea electronilor de către conductorii în stare solidă sau lichidă sub acțiunea câmpului electric exterior destul de puternic în vecinătatea suprafeței lor. Emisia autoelectronică e un exemplu a fenomenului cuanto-mecanic, numit efectul tunel [3, 158].
- f) emisie atomică – plasma descărcărilor electrice poate interacționa cu suprafețele solide pe care le acoperă provocând, pe lângă emisia de electroni și emisia de atomi de pe acestea.

În continuare vom examina tipul de emisie electronice pe baza măririi energiei termice a rețelei cristaline ale emițătoarelor.

1.2.2. Emisia termoelectronică

Emisia termoelectronică prezintă un fenomen, esența căruia constă în aceea, că, dacă încălzim o bucată de metal până la o anumită temperatură, atunci acesta începe a emite electroni, astfel devenind o sursă de sarcini libere [61]. Energia termică absorbită de metalul supus încălzirii se transformă în energie de mișcare a particulelor elementare din care este alcătuit (mișcarea oscilatorie a ionilor rețelei cristaline și intensificarea mișcării mecanice a electronilor ce constituie gazul electronic din metal). Electronii liberi din interiorul unui material metalic acumulând o energie cinetică considerabilă, pot părăsi definitiv metalul astfel devenind liberi. Electronii liberi obținuți în urma încălzirii materialelor metalice sunt numiți și termoelectroni [3]. Materialul din care este confecționat electrodul-catod trebuie să posede așa proprietăți termo-fizice, în cât, lucrul de ieșire al termoelectronilor să fie minim. Numărul de termoelectroni emiși de către catod depinde de gradul de încălzire a metalului de execuție a catodului. La început s-a presupus teoretic, apoi s-a confirmat experimental, că densitatea curentului de emisie termoelectronică poate fi exprimată cu relația Richardson-Dushman [60]:

$$j_s = A'T^2 e^{-\frac{L_e}{kT}} \quad (1.31)$$

în care: j_s – densitatea curentului de emisie (A/m^2), L_e – lucrul de extracție a electronilor liberi (J), k – constanta Boltzmann ($1.3806488 \cdot 10^{-23} J/K$), T – temperatura măsurată după scara absolută (K), e – sarcină elementară a electronilor ($1,6 \cdot 10^{-19} C$), A' – constanta lui Richardson, și poate fi determinată cu relația $A' = 4\pi me k^2 / h^3$, în care: m – masa electronului (kg), h – constanta lui Planck ($6,625 \cdot 10^{-34} J \cdot s$).

În tab. 1.2 sunt prezentate valorile constante lui Richardson pentru unele materiale care de obicei se folosesc în construcția de catodi.

Tabelul 1.2. Lucrul de ieșire și constantele lui Richardson [60]

Material	L_e, eV	$A' \cdot b, Acm^{-2}K^{-2}$
Nichel	4,61	30
Tantal	4.12	60
Wolfram (Tungsten)	4.54	60
Reniu	4,85	100
Ba pe W	1,56	1,5
Cs pe W	1,36	3.2
Th pe W	2.63	3.0
Thoria	2,54	3,0

În practică, coeficientul A' poate fi corectat, prin înmulțirea cu un factor de corecție (b). Valoarea lui A' variază aproximativ de la 32 la $160 Acm^{-2}K^{-2}$ pentru metalele pure (policristaline) și într-un interval mult mai mare pentru suprafețele oxidate și compozite [60]. În emisiile catodice,

în CPO (Charged Particle Optics Software), A este tratat ca o constantă empirică (o constanta de proporționalitate, valoarea căreia este funcție de proprietățile materialului de execuție a catodului și condițiile tehnice de funcționare a dispozitivului) [125]. De fapt, j_s poate fi introdus direct, iar coeficientul b este factorul de corecție ce depinde de natura materialul utilizat. Pentru cazul când se realizează un calcul teoretic se ea valoarea coeficientului $A' \sim 120,2 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$, iar coeficientul b , este egal cu unu ($b = 1$).

Fenomenul de emisie termoelectronică poate fi cercetat utilizând o instalație relativ simplă, schema electrică de principiu este prezentată în fig. 1.6 [3]. Într-un tub de sticlă M se află doi electrozi – catodul C și anodul A . Pentru a evita oxidarea catodului și ciocnirile electronilor emiși de catod cu moleculele de aer în tub se realizează vacuumarea acestuia (presiunea recomandată: $10^{-3} \div 10^{-8} \text{ mm Hg}$) [141]. Catodul metalic se încălzește datorită fenomenului Joule-Lentz, adică are rezistență electrică și prin el trece curent electric de o anumită intensitate, produs de o baterie (sau o sursă externă) de filament B_f . Curentul electric în circuitul filamentului se reglează cu ajutorul rezistorului variabil R_f .

Cu ajutorul schemei potențiometrice, constituită din bateria anodică B_a și potențiometrul R , între catod și anod se aplică tensiunea anodică (diferența de potențial) U_a care se măsoară cu ajutorul voltmetrului V_a . Comutatorul P servește pentru a schimba semnul tensiunii anodice U_a . Prin tubul M trece curent electric, compus din electronii emiși de catodul incandescent care sub acțiunea câmpului electric capătă mișcare ordonată. Acești electroni se numesc termoelectroni, iar curentul format de ei – curent termoelectronic de emisie I_e .

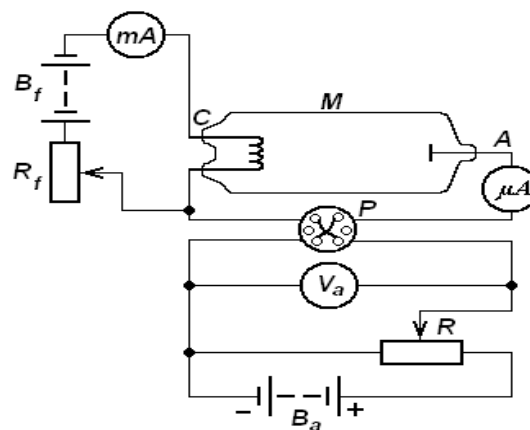


Fig. 1.6. Schema electrică clasică pentru cercetarea fenomenului de emisie termoelectronică [3]

Intensitatea acestui curent de emisie se măsoară cu ajutorul microampermetrului, notat în fig. 1.6, cu simbolul μA . Pentru valori mici ale tensiunii anodice intensitatea curentului I_e se mărește la început lent odată cu mărirea tensiunii anodice, U_a . Aceasta se explică prin

faptul, că la tensiuni anodice mici, nu toți electronii emiși de catod ajung la anod, deoarece sunt respinși de norul de electroni (sarcina spațială negativă), situat în spațiul dintre anod și catod. Cu mărirea tensiunii U_a are loc dispersarea norului de electroni și intensitatea curentului I_e se mărește. Pentru condiția când $U_a = U_s$, intensitatea curentului nu mai crește, deoarece toți electronii emiși de către catod ajung la anod. Valoarea maximă posibilă a intensității curentului I_s pentru temperatura dată a catodului, se numește curent de saturație.

Pe de altă parte, densitatea curentului de emisie se calculează conform relației (1.32):

$$j_s = \frac{I_e}{\Delta S'} \quad (1.32)$$

în care: j_s – densitatea curentului de emisie (A/m^2); I_e – intensitatea curentului de emisie (A); $\Delta S'$ – aria specifică a suprafeței (m^2).

Autorii I. Langmuir, S. Boguslavski ș. a., au prezentat în mod teoretic, că pentru $I_e < I_s$, când sarcina spațială negativă exercită o influență considerabilă asupra curentului termoelectronic, dependența I_e de $U_a \geq 0$ și are forma [160]:

$$I_e = B U_a^{3/2} \quad (1.33)$$

în care: I_e – intensitatea curentului de emisie (A); B – coeficient de proporționalitate ($A/V^{3/2}$), care depinde numai de forma, dimensiunile și poziția reciprocă a electrozilor și nu depinde de temperatura catodului, sau de materialul din care este confecționat; U_a - tensiunii anodice (V).

Coeficientul B , determinat conform [160] este egal cu $0,000587 A/V^{3/2}$, pentru următorul exemplu: lungimea anodului egală cu 40 mm; diametrul exterior al catodului egal cu 2 mm; diametrul interior al anodului egal cu 4 mm; suprafața activă a catodului egală cu 5 cm^2 ; suprafața activă a anodului egală cu 10 cm^2 ; capacitatea electrică a circuitului egală cu 1,5 pF; intensitatea curentului de saturație egală cu 200 mA ce corespunde densității de curent egală cu 40 mA/cm^2 (caracteristica diodei cu vacuum). Această valoare este aproximativ egală pentru valorile maxime obținute pentru regimuri continue și este practic de 1000 de ori mai mică decât densitatea maximă posibilă pentru regimuri de lucru în impuls a acestui catod. Reieșind din cele menționate, relația (1.33), poate fi scrisă sub următoarea formă [160]:

$$I_e = 0,000587 \frac{A}{V^{3/2}} \cdot U_a^{3/2} \quad (1.34)$$

Legea (1.33) se mai numește „legea trei doimi” sau „formula lui Langmuir”. Această legitate a fost obținută prin admiterea, că viteza inițială a termoelectronilor, ieșiți din catod, e nulă [3]. În realitate însă există o anumită distribuție a termoelectronilor după vitezele lor inițiale. De aceea pentru $U_a = 0$ sau chiar pentru valori mici negative ale tensiunii U_a există un curent termoelectronic mic. Astfel, legea trei doimi micșorează nițel valorile intensității curentului I_e

pentru tensiuni pozitive mici U_a . Dimpotrivă, pentru valorile tensiunii U_a apropiate de U_s formula (1.33) mărește intensitățile curentului I_e , deoarece la demonstrarea ei s-a admis, că emisivitatea catodului e nelimitată. În realitate însă orice catod în dependență de dimensiunile lui, de temperatura T și de lucrul de ieșire A a electronului, emite în fiecare secundă un număr finit de termoelectroni n_{sec} . În conformitate cu [53, 59] intensitatea curentului termoelectronic I_e va crește odată cu mărirea diferenței de potențial U_a aplicată între anod și catod, datorită măririi intensității câmpului electric între cei doi electrozi, favorizându-se emisia prin câmp electric, numai până la o anumită valoare – numită intensitatea curentului de saturație I_s care poate fi determinată cu relația (1.35):

$$I_s = \frac{q_e}{t} \quad (1.35)$$

în care: I_s – intensitatea curentului termoelectronic de saturație (A) q_e – este sarcina electrică a electronilor emiși de termocatod (C); t – timpul (s).

Din literatura de specialitate [3, 53, 59] este cunoscut faptul, că puterea de emisie este direct proporțională cu aria suprafeței active de emisie (adică $P_E \sim \Delta A$) și poate fi exprimată cu relația lui Boltzman:

$$P_E = k\sigma T^4 \cdot \Delta A \quad (1.36)$$

în care: P_E – puterea de emisie (W); k – constanta lui Boltzman ($1.3806488 \cdot 10^{-23}$ J/K); σ – constanta lui Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8}$ $Jm^{-2}s^{-1}K^{-4}$); T – temperatura catodului (K); ΔA – aria suprafeței active (m).

Potrivit relației (1.35) și a rezultatelor măsurătorilor experimentale se demonstrează, că mărimile q_e și respectiv I_s cresc, odată cu mărirea temperaturii catodului. Deoarece $L_e \gg kT$, de exemplu, pentru catodul de wolfram $L_e = 4,54$ eV și la temperatura $T = 2000$ K, raportul $L_e/(kT) = 26.3$, atunci în relația (1.31), pentru dependența mărimii j_s de temperatura T rolul principal îi revine factorului exponențial $[-L_e/(kT)]$. Așa dar, la mărirea temperaturii catodului de la 2000 până la 2500 K factorul T^2 se mărește de 1,56 ori, iar factorul exponențial $[-L_e/(kT)]$ se mărește de 193 de ori. Pentru a micșora temperatura de lucru a catodului și în același timp pentru a obține valori destul de mari pentru mărirea I_s se folosesc catozi termoelectronici cu lucrul de ieșire mic (de exemplu, catozi cu oxizi care constau dintr-un suport din metale greu fuzibile, acoperite cu un strat de oxizi de metale alcalino-pământoase (BaO și SrO sau BaO, SrO și CaO) grosimea căruia e de câteva zeci de mii de straturi atomice).

Teoria clasică a gazului electronic nu reușește să explice caracteristicile emisiei termoelectronice [3]. Conform acestei teorii, la 0 K, toți electronii liberi au energie cinetică nulă, iar la o temperatură (T), o energie medie [3]:

$$\bar{E}_c = \frac{3}{2} kT \quad (1.37)$$

în care: E_c – energie cinetică medie (J); k – constanta lui Boltzman (J/K); T – temperatura (K).

Vor fi extrași electronii liberi care posedă o energie cinetică mai mare, sau cel puțin egală cu lucrul mecanic de ieșire (L_e) [3]:

$$\frac{3}{2} kT \geq L_e \quad (1.38)$$

Din relația (1.38), exprimăm temperatura [3]:

$$T \geq \frac{2}{3} \frac{L_e}{k} \quad (1.39)$$

în care: T – temperatura (K); L_e – lucrul de ieșire (J); k – constanta lui Boltzman (J/K);

Întroducând în relația (1.39) valorile uzuale pentru L_e se obține temperaturi de circa 15000 K. Experimental se constată, că emisia termoelectronică se produce la temperaturi mult mai mici, cuprinse în intervalul de aproximativ 1000 – 3000 K. Teoria cuantică a gazului electronic explica de ce emisia termoelectronică apare la temperaturi de ordinul miilor de grade Kelvin, electronii plasându-se câte doi pe nivelele energetice, posibil au chiar și la 0 K o energie diferită de zero. Astfel la temperatura T , o parte din electroni au o energie mult mai mare, decât energia medie a agitației termice ($\frac{3}{2} kT$) dată de teoria clasică. Energia termică necesară extracției este din această cauză mul mai mică și, deci se produce emisia termoelectronică – că la o temperatură mai mică, decât cea presupusă de către autorii teoriei clasice [3].

Dacă temperatura unui metal crește, numărul mic, dar finit de electroni cu energia mai mare decât bariera de potențial va crește. Când un astfel de electron se apropie de bariera de potențial, în conformitate cu teoria clasică, el va escalada bariera de potențial devenind un electron emis. Densitatea de curent datorat emisiei termoelectronice poate fi calculată transformând funcția de distribuție Fermi-Dirac într-o funcție de distribuție după viteze și calculând numărul total de particule cu energia necesară escaladării barierei, având viteza normală la suprafață. Pentru energii apropiate sau mai mari decât bariera de potențial, distribuția Fermi-Dirac poate fi bine aproximată cu o distribuție Maxwell-Boltzmann, rezultând ecuația Richardson-Dushman (vezi relația 1.31).

Combinând parametrul *temperatură ridicată* cu *un câmp electric intens* se produce o alianță a emisiei termoelectronice cu emisia de câmp [61], emisie care poate avea un rol important în unele prelucrări prin utilizarea descărcărilor electrice.

La temperatura camerei (300 K) emisia termoelectronică este neglijabilă și, pentru eliberarea unui electron din metal numai sub acțiunea unui câmp electric exterior, ar fi necesar ca intensitatea acestuia să fie de ordinul $10^{10} - 10^{11}$ V/m. Experimental s-a constatat, că emisia electronică la temperatura mediului ambiant, numită și *emisie la rece*, poate avea loc și pentru

intensități ale unui câmp exterior de ordinul $10^7 - 10^9$ V/m. Acest lucru poate fi explicat numai prin modificarea formei barierei de potențial în prezența câmpului electric exterior și, în consecință, a existenței posibilității ca unii electroni să o străpungă prin efect tunel. Pentru petele electrodice, intensitatea câmpului în genere este de ordinul $10^6 - 10^8$ V/m, adică cu un ordin mai mic. Din (1.32) rezultă, că I_e – curentul de emisie, este direct proporțional cu aria suprafeței active, din care motiv și s-a impus modificarea microgeometriei suprafeței catozilor metalici cercetați la termoemisie. De aici rezultă o metodă nouă de amplificare a intensității curentului de emisie termoelectronică. Prin urmare modificarea microgeometriei suprafeței catodului ar putea influența caracteristicile de ieșire la funcționarea tunurilor electronice. Astfel cercetările realizate au drept scop sporirea ariei suprafeței active a termocatodului și verificarea ipotezei științifice în conformitatea cu relația (1.36), când am presupus, că vom obține o emisie termoelectronică mai bună, păstrând neschimbați, pe cât e posibil, parametrii: temperatură, diferența de potențial dintre electrozi și gradul de vacuumare a camerei de lucru [141].

1.2.3. Termoemițători: fizica procesului, clasificări și domeniile de aplicare

Efectul termic este produs de un fascicol concentrat de electroni accelerați de un câmp electrostatic de înaltă tensiune [96], care la impactul cu piesa metalică cedează energia lor cinetică și generează un important efect termic. În punctul de impact se dezvoltă temperaturi ce depășesc 10000 °C și produc vaporizarea locală a metalului de bază. Datorită presiunii vaporilor produși se formează un tub capilar a cărui frontieră de suprafață este delimitată de un înveliș subțire de material topit care traversează toată grosimea metalului de bază. Prin mișcarea de avans a piesei sau prin devierea electromagnetică a fascicolului de electroni se realizează deplasarea băii de sudură care prin cristalizare și coalescență formează legătura metalică dintre cele două piese sudate în general fără material adaos. Adâncimea de pătrundere a electronilor în material este redusă, de cca. $20 - 150$ μm, însă prin vaporizarea locală a materialului se creează un efect de tunel prin care fascicolul de electroni pătrunde tot mai adânc în material până la străpungerea acestuia [156].

Formarea fascicolului de electroni începe cu procesul de emisie termoelectronică de către un filament de wolfram incandescent, încălzit de un curent de $3 - 10$ A și la o tensiune de cca. $5 - 12$ V. Accelerarea electronilor se realizează cu ajutorul anodului (cilindru Wehnelt) conectat la polul pozitiv al unei surse de curent continuu de înaltă tensiune ($30 - 200$ KV) [156].

$$v_e = \sqrt{\frac{2e}{m_e} \cdot U_e} \quad (1.40)$$

în care: v_e – viteza electronilor emiși (m/s); e – sarcina electronului (C); U_e – tensiunea electrică (V); m_e – masa electronului (kg).

Electronii sunt accelerați la viteze ce ating 60 – 70% din viteza luminii, iar controlul fluxului de electroni se realizează cu ajutorul unui potențial negativ aplicat pe un catod secundar care acționează ca și o valvă de reglaj. Termoemițătorul este un catod (fir, spirale, panglici) denumit și catod termoelectronic care emite electroni, atunci când este încălzit (respectându-se condiția de vacuumare a camerei în care sunt folosiți). Prin metoda de încălzire, aceștia se clasifică în catozi: **cu încălzire directă** și **cu încălzire indirectă**. Catozii termoelectronici metalici care sunt încălziți direct, sunt mai eficienți, de aceea poartă denumirea de **catozi termoelectronici eficienți**, respectiv aceștia sunt mai răspândiți, decât catozii cu încălzire indirectă. Termocatozii se mai clasifică și în dependență de materialul din care sunt executați. Distingem **catozi simpli**, adică catozi din metal pur sau aliaje pure, **catozi complecși**, care de obicei sunt catozi simpli, dar acoperiți cu un strat subțire de impurități (pelicule de activare) sau semiconductori, care asigură emisii intense la temperaturi relativ scăzute. Catozii termoelectronici metalici, de obicei executați din wolfram (tungsten) și aliajele lui au o temperatură de funcționare de până la 2700 K, o emisivitate scăzută, dar pot funcționa la tensiuni anodice ridicate (până la sute de kV). Acestea sunt utilizate în tuburile cu raze X și în lămpile electrice puternice. Acești catozi încă mai sunt utilizați în dispozitiv electronice, în instalații științifice de laborator și tehnologice, aplicate în industrie. Cerințele de bază a unui catod sunt: să fie durabil; să asigure o emisie stabilă; să consume cât mai puțină energie pentru încălzire; suprafața catodului trebuie să fie rezistentă la distrugeri prin efectul de bombardament ionic ce are loc în camera unde se află acesta; să nu necesite un grad înalt de vacuumare a camerei în care funcționează. În cazul când catodul se află în condiții de vacuumare înaltă, există ioni pozitivi ce se mișcă accelerat (cu viteze mari) spre catod. Cu cât tensiunea anodică este mai mare, cu atât ionii lovesc catodul cu mai multă forță. Economia utilizării catodului se caracterizează prin eficiența sa, iar principalul factor economic se referă la intensitatea curentului de emisie care poate fi obținută prin consumul unui Watt de energie, consumat pentru încălzire catodului. În catozii moderni destinați pentru funcționarea continuă, eficiența poate atinge valori de la unități la sute de miliamperi pe watt.

Temperatura de funcționare a termocatozilor simpli este de obicei cuprinsă în limitele de la 700 până la 2300 °C, iar durabilitatea acestora este determinată de perioada până ce randamentul lor scade cu 10%. Durata de viață a termocatozilor este cuprinsă între sute și zeci de mii de ore. Pe măsură ce temperatura de funcționare se mărește, eficiența crește și, prin urmare, sporește intensitatea curentului de emisie, dar mărirea temperaturii de funcționare conduce la reducerea durabilității. Catozii simpli, de obicei sunt fabricați exclusiv din wolfram, iar în unele cazuri, destul de rar, din tantal și sunt încălziți direct. Temperatura de lucru a catozilor de wolfram este de 2100 – 2300 °C, ceea ce corespunde strălucirii până la galben deschis sau alb. Durabilitatea acestor

catozi este determinată de atenuarea emisiilor datorită scăderii grosimii catodului datorită pulverizării materialului din care este compus.

Avantajul unui catod simplu, din wolfram este gradul înalt de stabilitate a emisiei sale. După o supraîncărcare temporară, aceasta nu scade. Rezistența catodului din wolfram la bombardamentul ionic îl face deosebit de potrivit pentru lămpile de mare putere care funcționează la tensiuni anodice ridicate. Catozii executați din wolfram sunt utilizați și în lămpi electrometrice speciale, în care stabilitatea emisiilor este foarte importantă. Principalul dezavantaj al unui catod din wolfram este eficiența sa scăzută (miliamperi pe watt). Din cauza temperaturii ridicate la care acesta funcționează, se emite intens căldură și radiație luminoasă, în care și se pierde aproape toată energia cheltuită încălzirii termocatodului din wolfram. Catozii complecși au o temperatură de funcționare relativ scăzută, de 700 °C, în care miezul este confecționat din wolfram sau nichel și care este acoperit cu un strat subțire monatomic de toriu, fie un film activ de bariu sau un semiconductor: oxizi de bariu, stronțiu sau calciu. Durabilitatea ajunge la mii și zeci de mii de ore. Spre sfârșitul perioadei de funcționare, randamentul acestora scade datorită micșorării (evaporării) cantității de impurități de activare. Unii catozi complecși (pe bază de semiconductori) oferă emisii ultra-ridicate, într-un mod pulsant, adică pentru intervale scurte de timp (câteva microsecunde) separate prin pauze semnificativ mai lungi. În acest caz, curentul de emisie de la un centimetru pătrat al suprafeței catodului poate ajunge la valori de zeci de amperi.

Avantajul principal al catozilor complecși este eficiența lor, care atinge 100 – 200 mA/W. Principalul dezavantaj al catozilor complecși este stabilitatea redusă a emisiilor. Randamentul acestora scade prin supraîncălzirea temporară, ceea ce se explică prin evaporarea sporită a substanțelor de activare la temperaturi ridicate. În plus, catozii complecși sunt distruși relativ mai repede și prin efectul bombardării ionilor [97], deci este important să se mențină un grad ridicat de vacuumare în camera acestora. Fascicolul de electroni a găsit numeroase aplicații în procesele tehnologice industriale. Operațiile de bază la prelucrarea metalelor cu fascicol de electroni sunt [156]: sudarea prin fascicol de electroni; topirea prin fascicol de electroni; călirea prin fascicol de electroni; doparea semiconductoarelor prin fascicol de electroni; uscarea vopselelor în fascicol de electroni. Sudarea cu fascicul de electroni este incredibil de diversă. Prin această metodă este posibil sudarea a două piese de exemplu: oțel cu grosimea de 0,1 mm și oțel cu grosimea de 300 mm într-o singură trecere [1]. Sudarea cu fascicul de electroni permite, de asemenea, îmbinarea metalelor diferite, adică a celor cu puncte de topire diferite și conductivități termice. Unele combinații care nu pot fi sudate prin alte procese sunt astfel ușor sudate cu fascicul de electroni. Lamele bimetalice de ferăstrău obținute prin sudarea cu fascicul de electroni sunt considerabil mai flexibile și, prin urmare, mai puțin predispuse la rupere, iar sinecosturile acestor materiale sunt

reduse. Ansamblurile de transmisie sunt fabricate frecvent prin sudarea cu fascicul de electroni. Componentele aerospațiale din aliajele de titan sunt fabricate prin sudarea cu fascicul de electroni. Echipamentele de sudura cu fascicul de electroni sunt disponibile cu puteri de peste 100 kW, iar în practică, în cele mai pretențioase condiții sunt necesare puteri de sudare de sute de wați până la zeci de kW [1]. În fig. 1.7 este prezentat vederea secționată a instalației care prelucrează (sudează) piesa cu ajutorul fasciculului de electroni. O altă aplicație se referă la utilizarea tuburilor electronice. Actual funcțiile tradiționale ale tuburilor electronice au fost preluate de dispozitivele semiconductoare, totuși aceste tuburi se mai folosesc și astăzi în aplicații care necesită un zgomot propriu cât mai redus, de ex. în domeniul frecvențelor ultraînalte sau pentru realizarea înregistrări audio de înaltă calitate.

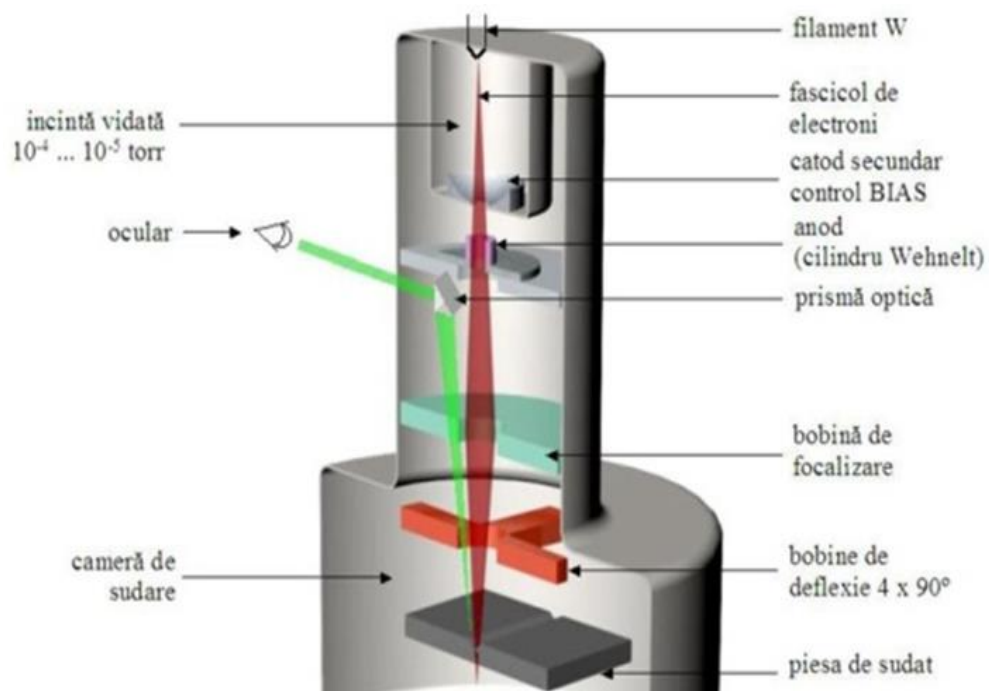


Fig. 1.7. Instalație pentru prelucrarea cu fascicul de electroni [156]

Catozii de wolfram sunt utilizați până în prezent în microscopie electronică (SEM). În fig. 1.8 este reprezentată construcția unui termocator utilizat în microscopie electronică modernă. Se observă, că forma termocatodului are o construcție specială, dar cert este, că inventatorii care au propus anume așa formă (vârful termocatodului este cât se poate de ascuțit). Scopul urmărit pare a fi anume facilitarea emisiei electronice a acestor tipuri de termocatozi. Termocatozii elaborați înainte de aceștia, aveau o construcție similară, dar totuși diferită, deoarece în construcția acestora lipsea acest element poziționat vertical. Se observă, că pe elementul sudat vertical și care posedă în vârf o asperitate conică, mai posedă un strat de ZrO_2 , care contribuie la emiterea termoelectronilor. Aceste tipuri de catozi sunt și acum produse și comercializate [164].

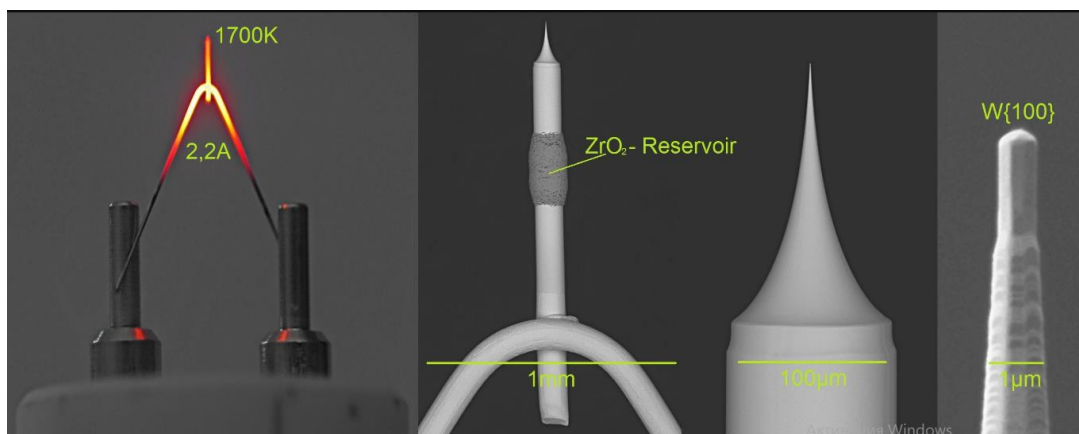


Fig. 1.8. Catozi utilizați în microscopie electronice moderne [164]

Un alt tip de catozi în care se regăsesc anume formele conice ale catozilor utilizați pentru emiterea electronilor sunt catozii de tipul Spindt (fig. 1.9). Această tehnologie a fost dezvoltată în anii 70 ai secolului XX și se utilizează în practică până în prezent.

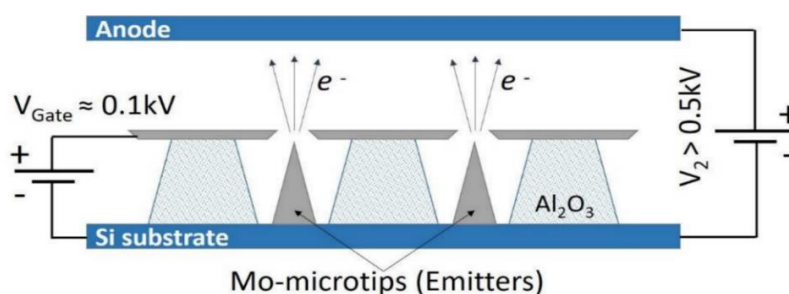


Fig. 1.9. Catozi de tipul Spindt [151]

Analizând termocatozii comercializați până în ziua de azi [151, 164], se observă în construcția acestora, prezența asperităților conice, de aceea o contribuție teoretico-experimentală, cât de modestă în această direcție, este binevenită.

1.3. Concluzii la capitolul I

În rezultatul analizei stării de lucruri, privind metodele de prelucrare prin electroeroziune, dezvoltarea fundamentelor teoretice ale acestora și aplicarea lor în diverse domenii ale tehnicii și tehnologiei contemporane putem concluda următoarele:

- metoda de prelucrare a materialelor prin efectul EE s-a dezvoltat mult și în afara prelucrărilor dimensionale și a formării depunerilor din materiale compacte și pulberi, au fost dezvoltate procedee de formare a peliculelor de oxizi, hidro-oxizi și nitrați pe suprafețele metalice;
- în baza dezvoltării undelor capilare pe suprafața metalului lichid, sub acțiunea plasmei în general și al DEI în particular, a fost propus un model în dezvoltare a fenomenului EE;

- în baza modelului fizic al fenomenului EE a fost demonstrată posibilitatea extragerii din suprafețe metalice a asperităților conice de tip Taylor, însă nu au fost stabilite legăturile și factorii tehnologici de realizare a geometriei prescrise;
- în calitate de material de execuție al termocatozilor se utilizează pe larg wolframul sau aliajele acestuia, iar metoda EE permite prelucrare dimensională a pieselor executate din aceste materiale [101];
- în construcția și funcționarea catodilor de termoemisie se aplică diferite forme constructive, însă nu este studiată și analizată funcționalitatea catodilor cu asperități conice formate prin aplicarea DEI.

2. METODICA CERCETĂRILOR EXPERIMENTALE

Din relația (1.31) se observă, că densitatea curentului de emisie termoelectronică este funcție exponențială de temperatura absolută a termocatodului. Pentru a spori intensitatea curentului de emisie termoelectronică se aplică la creșterea temperaturii catodului, însă această cale este limitată de proprietățile fizico-mecanice ale materialului de execuție a catodului, deoarece la o anumită temperatură limită specifică materialului de execuție a catodului, acesta se înmoaie, se deformează sau chiar se topește, din cauză, că își pierde proprietățile mecanice și ca rezultat are loc distrugerea lui. Se constată, că densitatea curentului de emisie termoelectronică nu poate fi mărită la infinit prin mărirea temperaturii termocatodului, deoarece acesta este limitat din punct de vedere fizico-mecanic. Pe de altă parte se impune, ca în calitate de materiale utilizate pentru construcția emițătorilor, să fie utilizate metale pure sau aliaje care posedă o temperatură înaltă de topire, cu scopul sporirii funcționalității acestora. Alegerea materialelor pentru realizarea cercetărilor experimentale, privind modificarea microgeometriei suprafețelor metalice și elaborarea termocatozilor destinați emisiei termoelectronice, s-a bazat pe motive întemeiate cum ar fi: de a utiliza anume așa materiale care tradițional se folosesc la confecționarea termocatozilor și care au capacitatea de a rezista la temperaturi ridicate. Așa dar, conform studiului bibliografic realizat, în calitate de materiale pentru realizarea cercetărilor experimentale au fost alese wolframul și aliajele lui cu reniu.

O altă metodă de a spori intensitatea curentului de emisie este cea de a spori diferența de potențial aplicată între catodul și anodul tunului de electroni. În acest caz, catodul servește în calitate de emițător, iar anodul în calitate de receptor de electroni. Creșterea valorii vectorului intensității câmpului electric, are drept scop orientarea electronilor spre anod. În condiții limită chiar și la temperaturi normale acesta poate provoca „smulgerea din catod” a electronilor liberi și a impune particulelor emise să se miște spre anod. Totuși, din punct de vedere economic, nu este rentabil să aplicăm în practică emisia electronică în condiții limită, din motiv, că randamentul va fi relativ mic.

Un alt parametru, în scopul sporirii eficacității de emisie electronică, este de a asigura în camera de lucru un grad înalt de vacuumare. Acesta este necesar în scopul evitării ciocnirii electronilor liberi, extrași din catod, cu moleculele sau atomi de gaz, care diminuează numărul de electronilor direcționați spre anod, și ca rezultat se micșorează valoarea intensității curentului de emisie electronică. Totuși, gradul de vacuumare a camerei de lucru nu poate fi mărit la infinit, deoarece crește exponențial și costurile de producere. Conform relației 1.36, puterea de emisie este direct proporțională cu aria suprafeței active de emisie (adică $P_E \sim \Delta A$). Sporind suprafața

activă destinată emisiei electronice se va mări și puterea de emisie electronică a elementelor utilizate în acest scop. Exista o serie de lucrări [7, 24, 34, 35, 51, 52, 58, 59], în care, prin metoda DEI, pe suprafața catozilor destinați emisiei termoelectronice se creează o microgeometrie prescrisă în condiții optimale, în funcție de proprietățile materialului conductor. Astfel, în urma analizei literaturii de specialitate și a propriilor cercetări [7, 19, 24, 26, 35, 38, 51, 53, 56, 58, 143, 153], am stabilit, că modificările microgeometriei și respectiv a ariei suprafeței active prin extragerea și solidificarea unor asperități conice, după cum a fost menționat mai sus, numite și meniscuri Taylor, devine posibilă prin aplicarea tehnologiei DEI.

Așa dar, cercetările experimentale, privind:

- modificarea microgeometriei suprafețelor probelor metalice s-au realizat în totalitate în „Laboratorul științific de micro- și nano-tehnologii”, din cadrul Catedrei științe fizice și inginerești, Facultatea Științe Reale, Economice și ale Mediului, Universitatea de Stat „Alec Russo” din Bălți;

- analiza SEM și EDX a suprafețelor metalice ale termocatozilor cercetați s-a realizat în: 1) Laboratoarele de cercetare ale „Christian-Albrecht University of Kiel”, Germania și 2) Centrul Național de Studiu și Testare a Materialelor, din cadrul Universității Tehnice a Moldovei (bl. 3, bir. 324, or. Chișinău, Republica Moldova);

- emisia termoelectronică a catozilor cercetați s-a realizat în cadrul: 1) Laboratoarelor Universității Bălțene și 2) în cadrul Institutului Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizică și Inginerie Nucleară Horia Hulubei din București-Măgurele, România.

În continuare este prezentată metodica cercetărilor experimentale, privind modificarea microgeometriei suprafețelor termocatozilor metalice și a procesului de emisie termoelectronică ale lor, precum și metodologia cercetării suprafețelor metalice active ale pieselor studiate.

2.1. Strategia cercetărilor experimentale, privind modificarea microgeometriei suprafețelor metalice active ale termocatozilor cercetați

Cercetările experimentale, privind mărirea ariei active prin formarea meniscurilor conice, s-au efectuat în mediu aer (condiții normale) și în mediu de gaze inerte (argon), la temperatura camerei, la descărcări solitare și cu descărcări multiple [147, 163]. În calitate de material pentru executarea elementului de lucru a termocatozilor destinați emisiei termoelectronice [53, 59, 165], se utilizau fire executate din wolfram sau aliajele lui, de ex.: W (90%) cu Re (10%) sau W (80%) cu Re (20%).

Pentru a elabora un termocatot, se execută următoarele etape:

- alegerea firului din wolfram sau aliajele lui;

- tăierea firelor metalice din wolfram sau aliajele lui de lungimi necesare (≈ 2 cm);
- alegerea firului conductor (oțel inoxidabil, cupru);
- tăierea firelor metalice conductoare (în calitate de fișe) de lungimi necesară;
- pregătirea discurilor din materiale izolatoare și termorezistente, care sunt realizate din materiale ceramice sau sticlă, ce posedă o rezistență electrică mare, adică se califică ca izolatoare, rezistente la depresiuni și temperaturi mari;
- introducerea barelor metalice conductoare în orificiile discului izolator;
- obținerea prin presare a suprafeței plane a capetelor firelor cilindrice (oțel inoxidabil, cupru), pe o lungime de aproximativ 2 – 3 mm, spațiu necesar sudării prin rezistență electrică a capetelor firului catodului;
- obținerea profilului firului din wolfram sau aliajele lui, în conformitate cu desenul prezentat în fig. 2.2, a;
- realizarea procedurii de sudarea în puncte a firului din wolfram, sau aliajele lui în zona suprafeței plane a firelor conductoare (vezi fig. 2.1).

O parte din termocatozii elaborați vor fi supuși procedurii DEI, cu scopul modificării microgeometriei suprafeței metalice și anume prin extragerea asperităților conice (vezi fig. 2.2, b).

2.1.1. Termocatozi utilizați în cadrul experimentului

În scopul realizării cercetărilor experimentale se elaborau probe (termocatozi) de formă cilindrică sau plană din wolfram sau aliajul wolframului cu reniu de 10% și aliajul wolframului cu reniu de 20%, al căror proprietăți sunt prezentate în tabelul 2.1.

Tabelul 2.1. Proprietățile materialelor utilizate în procesul cercetărilor experimentale

Nr. de ord.	Denumirea materialului	Temperatura de topire, °C	Duritatea, HB	Densitatea, $\text{kg/m}^3 \cdot 10^{-3}$	Capacitatea termică specifică, $\text{cal}/(\text{g} \cdot \text{grad})$	Coeficientul σ^* , 10^{-3} N/m
1	W	3395 – 3410	300	19,35	0,043	2220 – 2500
2	W + Re (10%)	3100	210	20,90	0,0326	2220 – 2500
3	W + Re (20%)	3050	200	21,02	0,032	2220 – 2500
4	Oțel 45	1450 – 1520	179 – 207	7,7 – 7,9	0,11	1759 – 2000
5	NiCr	1400	140 – 150	8,2 – 8,5	0,44	1735 – 1924

* σ – coeficientul de tensiune superficiala la temperatura de topire.

Wolframul este un metal maleabil, ductil (din 100 g de wolfram se poate obține un fir cu lungimea de 40 km) și în stare pură extrem de rezistent (rezistența la rupere a unui fir de wolfram poate ajunge până la 400 daN/mm², rezistență ce se menține chiar și la temperaturi mai mari de 770 °C), posedă proprietăți fizice specifice metalelor, precum: luciu caracteristic, bun conductor de căldură și de electricitate [14]. Laboratorul de micro- și nano-tehnologii, a fost dotat cu un

microscop electronic din partea UTM. Pentru partea experimentală, a fost analizată/preluată forma termocatodului utilizat în cadrul instalației donate din partea UTM. În fig. 2.1 este prezentat vederea unui termocatod real, utilizat în microscopia electronică. În baza acestui model și al altor exemple de termocatozi întâlniți în cadrul studiului bibliografic [164] și reeșind din posibilitățile reale de elaborare, s-a propus forma pentru catozi reprezentată grafic în fig. 2.2.

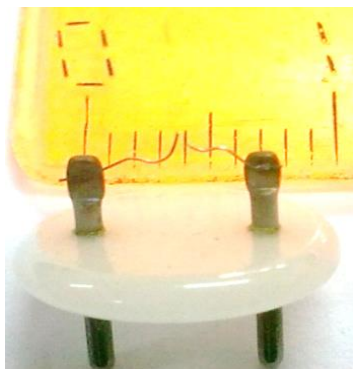


Fig. 2.1. Vedere generală a unui termocatod real utilizat în microscopie electronică

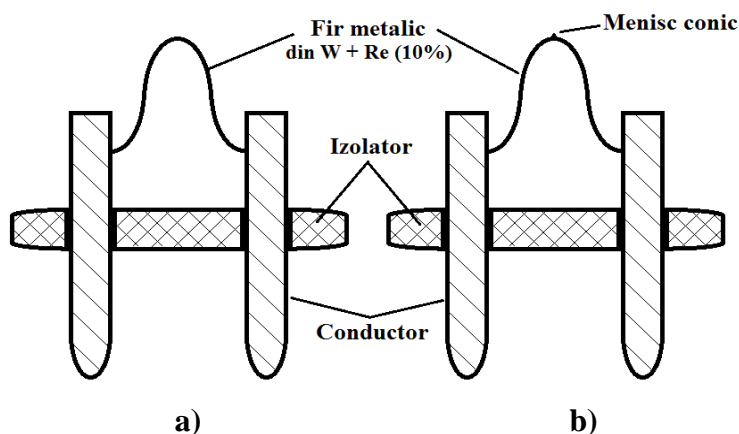


Fig. 2.2. Reprezentarea grafică a catodului de probă: a) catod simplu; b) catod prelucrat suplimentar prin metoda DEI

În cadrul cercetărilor experimentale s-au elaborat un șir de catozi care schematic sunt prezentați în fig. 2.2. Acești catozi erau confecționați din fire ai aliajului wolframului cu reniu (10%), de grosimea de 0,2 și respectiv 0,25 mm. Jumate din electrozii elaborați se supuneau încercării la termoemisie, iar cealaltă parte erau supuși unei prelucrări suplimentare. Prin metoda DEI din vârful catodului erau extrași meniscuri conice (vezi partea superioară a fig. 2.2 b), numiți și conuri Taylor. Lungimea firului metalic utilizat pentru toți termocatozii, indiferent de grosime constituia 2 cm.

2.1.2. Generatoare de impulsuri destinate prelucrării prin descărcări electrice

Pentru efectuarea cercetărilor, privind modificarea microgeometriei suprafețelor pieselor prin dezvoltarea undelor capilare pe suprafața metalului lichid [7, 144] în condițiile descărcării electrice în impuls a fost utilizată o instalație compusă din: un generator de impulsuri de curent, blocul de dirijare, blocul de amorsare (vezi generatorul prezentat în fig. 2.3). Blocul de comandă permite reglarea fină a frecvenței de descărcare în limitele $1...10^5$ Hz. Schema electrică a instalației este prezentată în fig. 2.4. Pe 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 și impulsurilor de putere.



Fig. 2.3. Vederea generală a generatorului de impulsuri: generatorul de impulsuri de tipul RC; blocul de amorsare; blocul de comandă și un autotransformator

Generatorul de impulsuri este alcătuit din următoarele elemente: autotransformatorul (T1); transformatorul de putere (T2); redresor (D 1 – 4); rezistența de balast (R1); bateriile de condensatoare (C1 – C6); întrerupătoarele (k1 – k6); blocul de diozi (D5); dioda (D6); tiristor (D7). Blocul de amorsare conține următoarele elemente: transformatorul (T4); redresor (D 9 – 12); capacitatea (C7); tiristor (D8); transformatorul de tensiune înaltă (T3). Principiul de funcționare a generatorului se bazează pe acumularea unei cantități mari de energie electrică pe bateria de condensatoare și descărcarea ei într-un impuls de durată scurtă ($\tau = 200 \mu s$). De la o sursă de curent continuu care este formată din autotransformator (T1), transformatorul de putere (T2) și redresor (D 1 – 4) sunt alimentate prin impedanța de încărcare (R1) capacități (C1, C2, C3, C4, C5, C6) în dependență de poziția întrerupătoarelor (k 1 – 6). Autotransformatorul (T1) permite reglarea fină a tensiunii de lucru și alimentează generatorul de impulsuri.

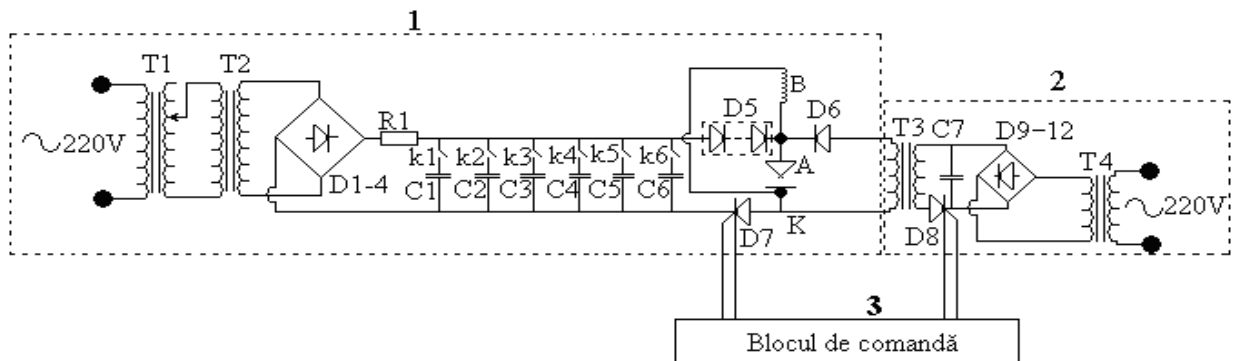


Fig. 2.4. Schema electrică principală a instalației: 1) generator de impulsuri de putere; 2) blocul de amorsare [7, 24]

Blocul de diozi (D5) este destinat pentru protejarea generatorului de pătrunderea tensiunii înalte în acesta. Rezistența (R1) are funcția de limitare a curentului de încărcare, ceea ce împiedică transformarea descărcării electrice în impuls în descărcarea prin arc electric. În procesul funcționării instalației are loc încărcarea simultană a bateriei de condensatoare (C1 – C6) și (C7). Blocul de comandă emite un semnal care provoacă deschiderea tiristorului (D8). Datorită acestui fapt capacitatea (C7) se descarcă prin bobina primară a transformatorului de tensiune înaltă (T3) și prin ea începe să circule curentul electric. Acest curent electric provoacă apariția tensiunii înalte (de străpungere) la bornele bobinei secundare, care se unesc respectiv cu anodul și catodul instalației de cercetare. Datorită tensiunii înalte are loc străpungerea interstițiului și formarea canalului de conductibilitate. În același moment blocul de comandă emite un alt semnal care provoacă deschiderea tiristorului (D7) și descărcarea bateriei de condensatoare (C1 – C6) cu formarea impulsului de bază. După aceasta, procesul se repetă din nou. Defazajul dintre momentele de deschidere a tiristorului (D7) și tiristorului (D8) este mic și poate fi reglat în limitele largi, datorită blocului de comandă. Schema electrică modificată a blocului de comandă este prezentată în fig. 2.5.

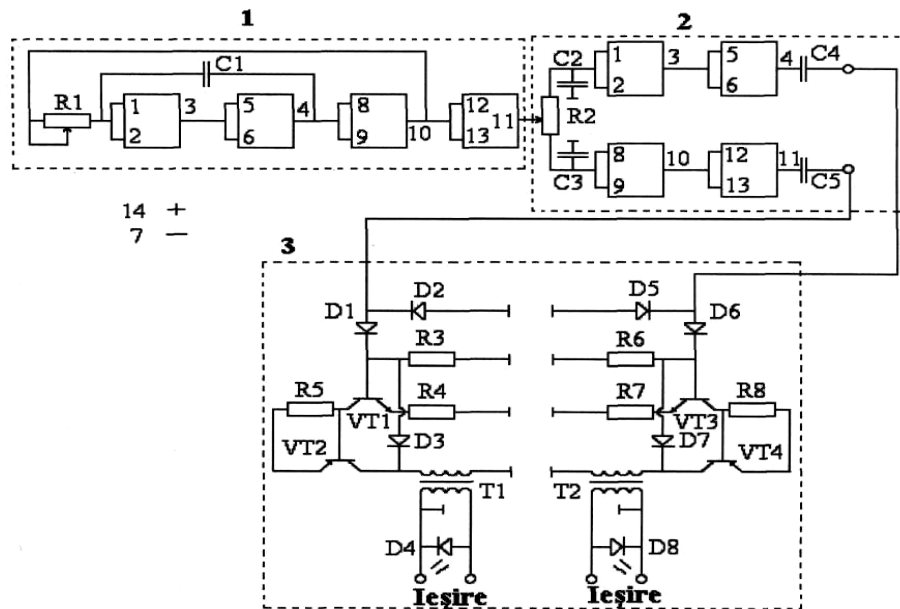


Fig. 2.5. Schema electrică a blocului de comandă [7, 24]

Blocul de comandă constă din următoarele părți componente: generatorul de impulsuri de putere mică (1); blocul de reținere a impulsurilor (2); blocul de formare a impulsurilor de putere (3). Generatorul generează impulsuri de durată scurtă, frecvența cărora se stabilește cu ajutorul rezistorului R1. Acest generator este elaborat în baza elementului logic K156JIA7. Blocul de reținere a impulsurilor (2) permite de a efectua defazajul între două impulsuri identice. Deplasarea

impulsurilor unul față de altul se efectuează cu ajutorul rezistorului R2. Blocul de formare a impulsurilor de putere (3) reprezintă un amplificator de putere. Trecând prin acest bloc impulsurile generate de generator și defazate unul față de altul se amplifică [24].

În fig. 2.6 se prezintă schema electrică a acestui generator. După cum se observă, generatorul elaborat este alcătuit din trei etaje: etajul de amorsare primară 1, etajul de focusare a descărcării de bază 2 și etajul de amorsare secundară 3. În cazul modificării microgeometriei suprafețelor conductibile, este utilizat numai etajul de amorsare și cel de focusare al descărcării de bază, iar în calitate de electrod de focusare servește piesa de prelucrat. În acest caz, etajul de amorsare este destinat pentru străpungerea interstițiului și formarea canalului de conductibilitate între electrod-sculă și electrod de focusare (piesa de prelucrat). În același moment datorită prezenței întrerupătorului K2 se pune în funcțiune etajul de focusare a descărcării de bază ceea ce duce nemijlocit la formarea canalului de plasmă între electrod-sculă și piesa de prelucrat.

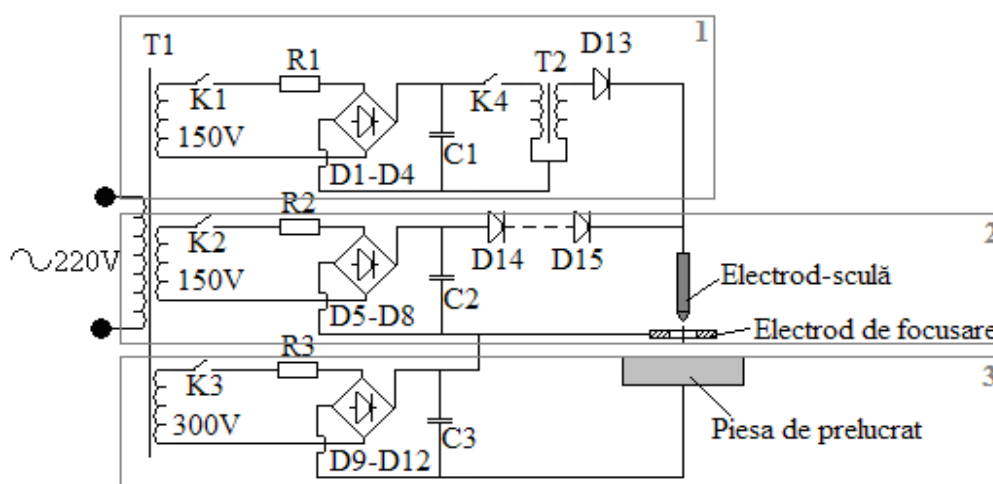


Fig. 2.6. Schema electrică a generatorului proiectat, destinat pentru prelucrarea suprafețelor metalice și semiconductoare plane

În procesul formării peliculelor subțiri, atât pe suprafețele metalice cât și pe suprafețele semiconductoare, se pun în funcțiune toate trei etaje. În acest caz în calitate de electrod de focusare, servește o plăcuță de grafit. Etajul de amorsare și cel de focusare al descărcării de bază au aceeași funcție ca și în cazul precedent. În procesul descărcării de putere ce apare între electrodul-sculă și electrodul de focusare are loc vaporizarea materialului electrodului-sculă datorită temperaturii sporite în interstițiu. La conectarea întrerupătorului K3, datorită apariției tensiunii de ordinul 300V între electrod de focusare și corespunzător piesa de prelucrat, are loc accelerarea vaporilor materialului electrodului-sculă și doparea suprafeței piesei de prelucrat cu acestea.

Utilajul tehnologic elaborat, schema electrică a căruia este prezentată în fig. 2.6, a fost utilizat pentru realizarea încercărilor experimentale, privind modificarea microgeometriei

suprafețelor plane, metalice și/sau semiconductoare și formarea, după necesitate, pe aceste suprafețe a peliculelor subțiri de oxizi și hidroxizi [85, 102, 106, 110, 121, 138].

2.1.3. Metodica măsurării parametrilor energetici a impulsurilor de curent

Schema electrică-bloc de măsurare a caracteristicilor electrodinamice ale descărcărilor electrice în impuls este prezentată în fig. 2.7. Cum se vede din această figură, șuntul coaxial este conectat în serie în circuitul de descărcare, iar divizorul de tensiune în paralel cu circuitul de descărcare.

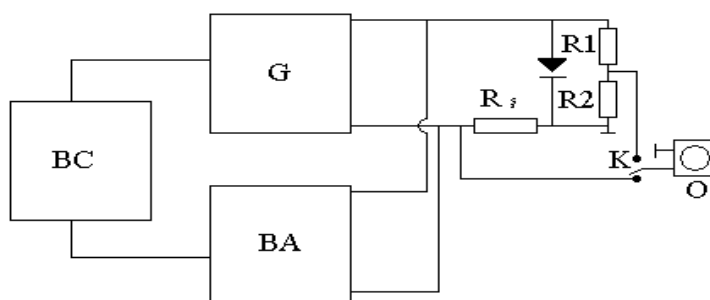


Fig. 2.7. Schema electrică-bloc de măsurare a caracteristicilor electrodinamice a DEI [24]:
BC – blocul de comandă; G – generator de impulsuri; BA – blocul de amorsare;
O – osciloscop; R_s – șuntul; R1 și R2 – divizor de tensiune; K – comutatorul

Energia degajată în impuls, precum și energia degajată în interstițiu, se determina prin metoda osciloscopării (vezi Anexa 2, Fig. A2.1), altfel spus prin metoda integrării. Relația de calcul a energiei acumulate pe bateriile de condensatoare este:

$$W_c = \frac{CU^2}{2} \quad (2.1)$$

în care: W_c – acumulate pe bateriile de condensatoare (J); C – capacitatea bateriile de condensatoare (F); U – diferența de potențial între bornele condensatoarelor (V).

Energia degajată în interstițiu se determină prin integrare, cu relația (2.2), [7]:

$$W_s = \int_0^\tau I(\tau)U_s(\tau)dt \quad (2.2)$$

în care: W_s – energia degajată în interstițiu (J); I – intensitatea curentului electric ce a parcurs interstițiu (A); U – diferența de potențial între electrozi (V); t – durata timpului (s); τ – durata de timp al DEI (s).

Pentru comparare, valorile energiei degajate în interstițiu constituia valori cuprinse în intervalul de la câteva sutimi, respectiv zecimi sau chiar unități de jouli, tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare a generatorului de impulsuri poate varia în limitele a $0 - 240$ V, iar capacitatea bateriei de condensatoare a generatorului de impulsuri de curent se stabilea în limitele

a $100 - 600 \mu F$ (cu pasul de $100 \mu F$). Pentru prelucrarea pieselor confecționați din aliajul wolframului cu 10%Re (fir cilindric cu diametrul de $0,2 - 0,25$ mm), este suficientă o energie degajată în interstițiu, $W_s \approx 0,18$ J ($U = 60$ V, $C = 100 \mu F$), în cazul când diametrul electrodului-șculă este un fir de wolfram cu diametrul de $0,2$ mm și valoarea interstițiului este de $0,2$ mm [111, 112].

2.1.4. Dispozitive de fixare a electrozilor și de stabilire a mărimii interstițiului dintre ei

Pentru variația mărimii interstițiului, în procesul cercetărilor se utiliza dispozitivul care este reprezentat în fig. 2.8. Dispozitivul dat a fost confecționat în baza unui microscop cu scopul stabilirii precise a mărimii interstițiului: poziționarea electrozilor și stabilire a mărimii interstițiului cu precizie micrometrică conform metodicii descrise de către autorii lucrărilor [7, 15, 24]. Acest dispozitiv permite fixarea electrozilor sub formă de bare de formă diversă. În fig. 2.8 sunt indicate: 1 – dispozitive de întindere a electrozilor sub formă de fir; 2 – mâner de reglare brută a interstițiului; 3 – mâner de reglare fină a interstițiului; 4 – masa de lucru.

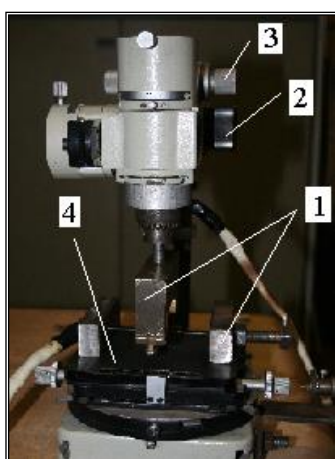


Fig. 2.8. Dispozitiv pentru variația interstițiului realizat în baza unui microscop biologic [24]

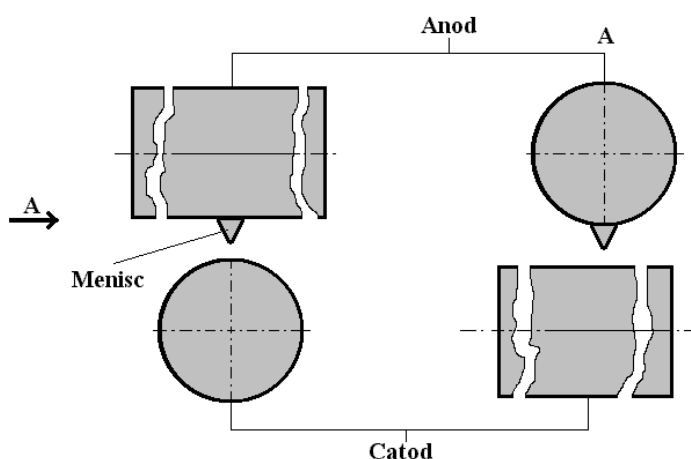


Fig. 2.9. Poziționarea electrozilor sub formă de fir [24]

Masa de lucru, în procesul cercetărilor se deplasa cât longitudinal atât și transversal, cu scopul obținerii meniscurilor unitare pe suprafața anodului. Cu ajutorul mânerului (2) se efectua reglarea brută a interstițiului. 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, iar înainte de fiecare descărcare electrică în impuls se verifica ca mărimea interstițiului să corespundă valorii optime necesare extragerii meniscurilor conice. În cazul sistemului de electrozi în formă de fir, pe suprafața anodului se obținea un număr necesar de meniscuri (conuri Taylor)

datorită deplasării acestora unul față de altul. În fig. 2.9 este prezentată schematic poziționarea electrozilor și conectarea acestora în circuitul de descărcare al generatorului de impulsuri de curent ale dispozitivului experimental destinat modificării microgeometriei suprafețelor termocatozilor prezentați în fig. 2.2. Au fost realizate încercări de a construi un dispozitiv, care în timpul prelucrărilor să regleze în mod automat mărimea interstițiului de prelucrare [75, 76, 115], totuși, acest dispozitiv nu a fost aplicat pentru modificarea microgeometriei suprafețelor metalice, fiind folosit doar pentru prelucrările dimensionale prin metoda electroeroziunii.

2.1.5. Materiale de execuție a electrozilor

În general, majoritatea probelor cilindrice erau confecționate din wolfram de puritate tehnică sau aliajele lui cu reniu. Au fost cercetate și probe plane, dar mai multă atenție au obținut piesele sub formă de fir cilindric. Diametrele acestor fire variau în limite de la 0,2 la 1,2 mm. În procesul DEI, interstițiu se manifestă ca o sursă de lumină și în fig. 2.10 se vede bine acest fenomen.



Fig. 2.10. Proba din Wolfram cu diametrul de 1,2 mm în momentul DEI

Cercetările experimentale au demonstrat, că cel mai efektiv proces de extragere a meniscurilor este acela în care, în calitate de electrod-sculă se utilizează un fir conductor subțire executat din wolfram sau din aliajele acestui cu diametre de 0,2 mm, sau executați din grafit pirolitic, în formă de cilindru cu diametru de până la 0,5 mm, ascuțit la vârf sub unghi de 30 grade [78, 106].

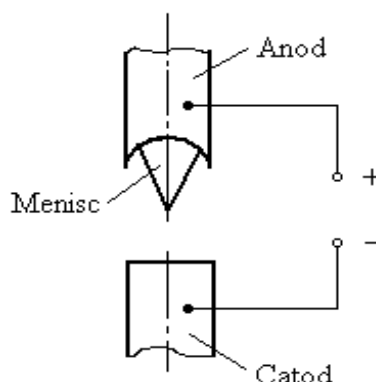


Fig. 2.11. Schema de poziționare a electrozilor sub formă de bare cilindrice subțiri și conectarea acestora în circuitul de descărcare [24]

Pentru determinarea influenței câmpului magnetic asupra geometriei meniscurilor (conurilor Taylor) [68], se utiliza sistemul de electrozi, analogic sistemului prezentat în fig. 2.11, dar care se aflau în interiorul unei bobine [117]. Mai întâi se stabilea mărimea necesară a interstițiului, apoi se amplasa bobina, în așa fel, ca suprafețele de lucru împreună cu interstițiu stabilit prealabil să se găsească în interiorul acesteia. Cu alte cuvinte, sistemul de electrozi va fi poziționat în câmp magnetic omogen. După fiecare fixare a electrozilor și stabilirea mărimii interstițiului, se selecta regimul de prelucrare și se conecta standul experimental. În lucrarea [68] este descris mai detaliat această procedură.

Pentru cercetările experimentale, privind extragerea și solidificarea asperităților sub formă de conuri Taylor pe suprafața cilindrică cu aplicarea DEI [143] a fost utilizată perechea de electrozi: electrodul-piesa și electrodul-sculă confecționați din același material (fir din wolfram) de formă bară cilindrică.

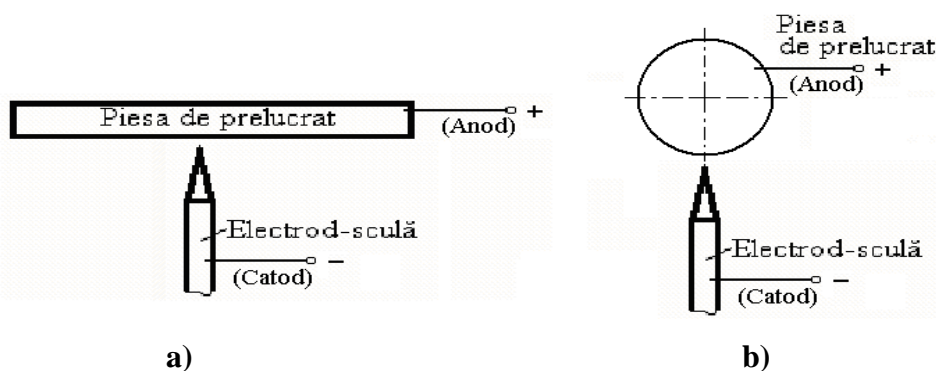


Fig. 2.12. Scheme de poziționare a electrozilor utilizați în procesul cercetărilor experimentale și conectarea acestora în circuitul de descărcare al generatorului de impulsuri de putere: a) cazul piesei plane; b) cazul piesei cilindrice

Execuția probei și electrodului-sculă din același material (W–W, W+Re–W+Re) era impusă de două condiții: excluderea modificării compoziției chimice și de fază a suprafeței probei cu un material de altă natură pe contul fenomenelor de prelevare și transfer de material și asigurarea rezistenței la eroziune a electrodului-sculă [95, 123, 165]. Electrozii se prindeau în elementele de poziționare ale dispozitivului de fixare, apoi electrozii se apropiau manual unul de altul, până la contactul acestora, și ulterior era selectată mărimea interstițiului. În fig. 2.12 sunt prezentate scheme de poziționare a electrozilor utilizate în procesul cercetărilor experimentale și conectarea acestora în circuitul de descărcare al generatorului de impulsuri. Pentru siguranță, în procesul măsurărilor electrozii au fost legați la un indicator de curent și aduși în contact în stare de scurtcircuit. Măsurarea începe din momentul întreruperii circuitului, adică din poziția „zero” a indicatorului de curent.

2.1.6. Metodica modificării microgeometriei suprafețelor metalice în medii inerte

În timpul efectuării experiențelor de obținere a meniscurilor conice pe suprafețele active care se petreceau în condiții normale se întâlnea fenomene de oxidare [57, 104]. Se cunoaște, că oxizii sporesc rezistența electrică a straturilor de suprafață [91].

Cu scopul modificării microgeometriei suprafețelor metalice și minimalizarea influenței componentelor chimice ale mediului aer s-a elaborat o cameră ermetică specială (vezi fig. 2.13), în care se introducea dispozitivul experimental reprezentat în fig. 2.8. Pentru a evacua aerului din camera ermetică se utiliza postul universal de vacuumare, modelul 5: Вакуумный универсальный пост „ВУП-5” (vezi fig. 2.14, a). Inițial se obținea o depresiune mică cu ajutorul pompei de prevacuum (vezi fig. 2.14, b) și cu ajutorul acestei pompe se obținea o depresiune de aproximativ $10^{-1} - 10^{-2}$ mbari. Deja când era conectat blocul de vacuum înalt, presiunea gazelor remanenți în camera de lucru constituiau $10^{-3} - 10^{-4}$ mbari.

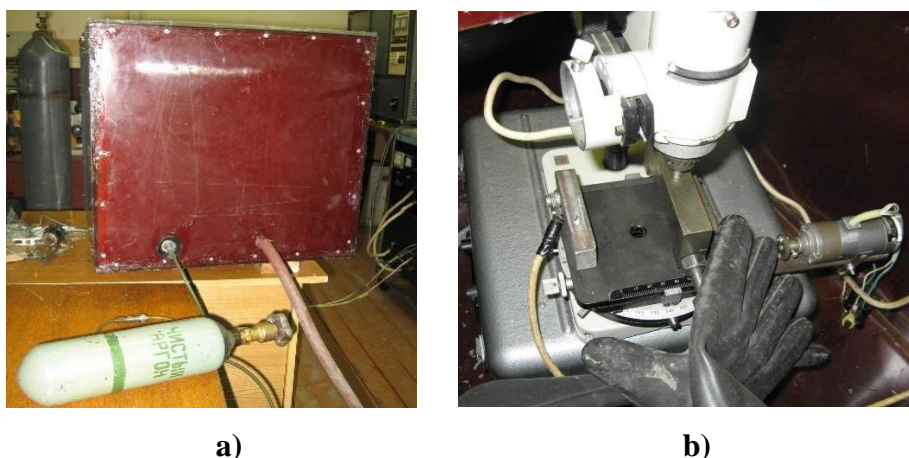


Fig. 2.13. Vedere generală a camerei ermetice: exterior (a) și interior (b)

În aceste condiții se obțineau termocatozi asupra cărora, în timpul DEI nu influența prezenta mediului. Din interes de cercetare, camera de lucru se umplea cu diferite gaze, în special cu argon și se realiza modificarea microgeometriei suprafețelor metalice ale termocatozilor în mediu argon (vezi în fig. 2.13 a, imaginea balonului cu argon) [53, 122, 147]. Metoda de a modifica microgeometriei suprafețelor metalice ale termocatozilor în medii inerte sau de vacuum sunt anevoioase și costisitoare, de aceea s-a decis efectuarea acestui procedeu în mediu aer, dar cu dezoxidarea ulterioară a zonei supuse DEI [142]. Procedeu de dezoxidare a acestor suprafețe presupunea supunerea termocatozilor unor DEI suplimentare de înaltă tensiune, dar de putere mică (doar a descărcărilor de amorsare), utilizând în calitate de material de execuție al electrodului-sculă grafitul pirolitic. Ulterior a apărut ideea de a utiliza/aplica în calitate de material de execuție al electrodului-sculă grafitul pirolitic nu doar pentru executarea dezoxidării locale, dar și în cadrul

DEI de bază (de putere), pentru a minimaliza fenomenului de oxidare în timpul prelucrării termocatozilor [57, 94, 125].

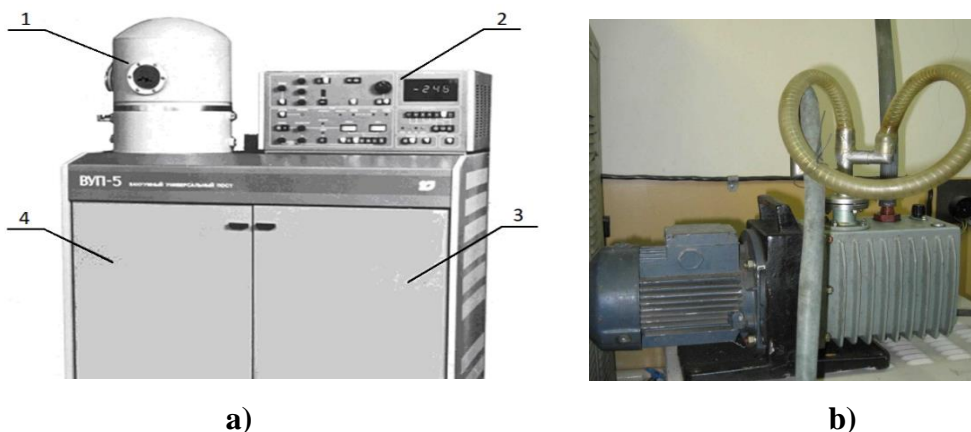


Fig. 2.14. Vederea generală a instalației „BYII-5”: a) 1 – cameră; 2 – panou de dirijare; 3 – bloc de alimentare; 4 – bloc de vacuumare; b) pompa de pre-vacuumare

Așadar, inițial materialul de execuție a electrodului-sculă și a electrodului-piesă constituia wolfram sau aliajele lui. Din cauza formării unui strat nedorit, relativ gros, de oxizi pe suprafața electrodului-piesă s-a încercat omiterea mediului de aer și prelucrarea termocatozilor în mediu vacuum sau argon. Din cauza costului ridicat, s-a încercat procedee de dezoxidare locală a suprafeței supuse DEI prin utilizarea electrozilor executați din grafit pirolitic în calitate de material de execuție al electrodului-sculă [106, 142]. Apoi, în genere, s-a renunțat la materialul de execuție wolfram sau aliajele lui pentru electrodul-sculă. Într-un final, s-a păstrat condițiile inițiale ale mediului aer, la temperatura camerei, utilizând în calitate de material de execuție al electrodul-piesă (termocatozi) wolframul, sau aliajele lui, iar pentru electrodul-sculă, în calitate de material de execuție, se utiliza grafitul pirolitic, ceea ce a permis obținerea modificării microgeometriei suprafețelor active ale termocatozilor prin aplicarea DEI în mediu aer cu formarea unui strat neînsemnat de oxizi, după cum au arătat cercetările EDX ulterioare, realizate pe suprafețele catozilor prelucrați în acest mod.

2.1.7. Aplicarea electrodului-sculă pentru prelucrarea suprafețelor plane și/sau complexe

În cadrul cercetărilor experimentale, privind modificarea microgeometriei suprafețelor metalice plane sau complexe a fost aplicat electrodul-sculă destinat pentru prelucrarea suprafețelor complexe cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls realizat de către autorii lucrărilor [48]. Vederea generală a desenului de ansamblu a electrodului-sculă se prezintă în fig. 2.15 a. În figurile 2.15, b și c, se prezintă specificul constructiv al unei plăci conductoare și a unei plăci de fixare.

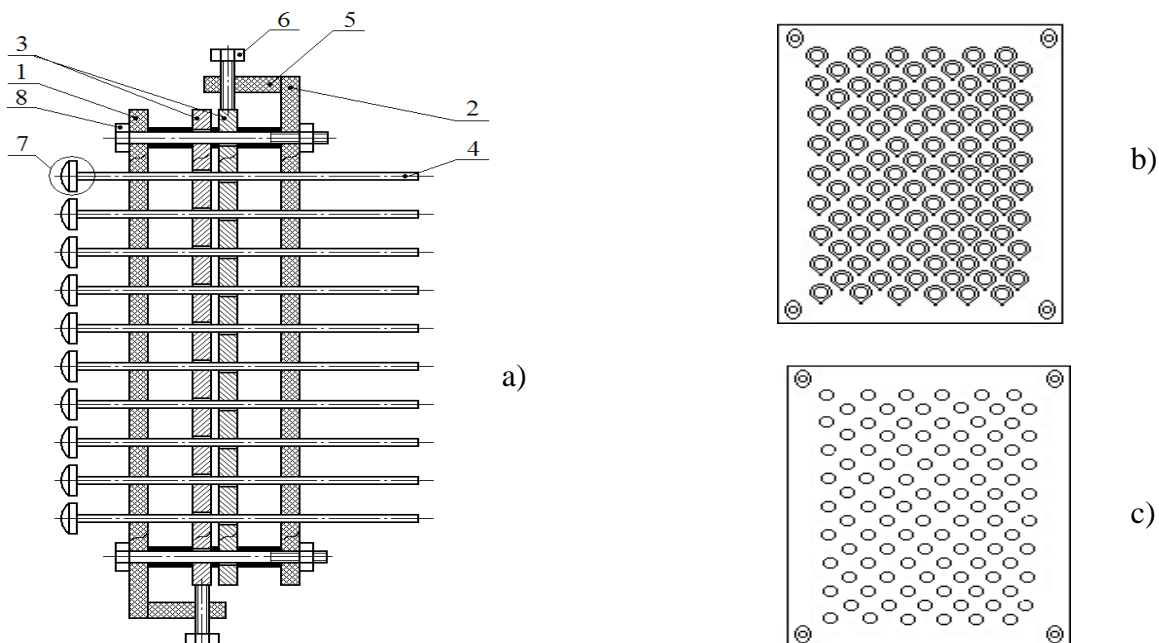


Fig. 2.15. Electrode-ul-sculă pentru prelucrarea suprafețelor plane/complexe [48]:
1 și 2 – plăcile conductoare; 3 – două plăci de fixare; 4 – electrozii elementari; 5 – tije de
reazem; 6 – buloane de deplasare și fixare a plăcilor de fixare; 7 – capetele semirotunde de
lucru a electrozilor elementari; 8 – elemente de asamblare

Electrodul-sculă propus funcționează după cum urmează: pe masa de lucru al mașinii-unelte se fixează piesa de prelucrat cu suprafața de prelucrare orientată spre dispozitivul de fixare a electrodului sculă; electrodul-sculă este fixat în dispozitivul de prindere și fixare al mașinii-unelte; acestea se apropie una în raport cu alta la interstițiu de aproximativ 2 mm; se deșurubează buloanele plăcilor de fixare 3 după care manual fiecare dintre electrozii elementari 4 se aduce în contact cu suprafața necesară de prelucrat a piesei; apoi prin intermediul plăcilor de fixare 3 se fixează simultan toți electrozii elementari 4 – poziție în care se copie suprafața piesei care urmează a fi prelucrată, după acesta se stabilește interstițiul de prelucrare necesar prin îndepărtarea electrodului-sculă de la suprafața de prelucrare a piesei.

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 [48, 93]. După ce s-a fixat electrodul-sculă în raport cu electrodul piesă, se cuplează apoi generatorul de impulsuri de curent și pe perioada de prelucrare fiecare dintre electrozii elementari prelucrează o anumită porțiune din aria suprafeței piesei. Piesa este conectată în calitate de anod la generatorul de impulsuri de curent, iar electrodul-sculă este conectat în funcție de catod, aceasta este conexiunea impusă când se cere a modifica microgeometria suprafețelor metalice.

Dispozitivul prezentat în fig. 2.15, poate fi aplicat, când este necesar de a modifica microgeometria pieselor plane din diverse materiale și în acest caz, se asigură o prelucrare omogenă, de o precizie înaltă și se minimizează la maximum timpul de prelucrare. La prelucrarea firelor metalice nu este comod utilizarea acestui multielectrod, în schimb, când apare necesitatea modificării microgeometriei suprafețelor plane sau complexe a unor piese care funcționează în calitate de radiatoare [119] ori din contra, trebuie să absoarbă mai multă energie (crearea modelului de corp negru absolut) [120], acesta dispozitiv este binevenit.

2.1.8. Succesiunea de realizare a procedurilor privind modificarea microgeometriei suprafețelor metalice cu aplicarea DEI

În timpul realizării experimentului referitor la modificarea microgeometriei suprafețelor metalice cu aplicarea DEI (exersate în mod practic, în cadrul LȘMNT al USARB) se recomandă a realiza următoarele elemente ale procesului tehnologic:

- descărcarea completă a energiei acumulate pe bateria de acumulare a instalației experimentale până la $W = 0 \text{ J}$;
- fixarea electrodului-piesă în dispozitivul de fixare a probelor destinați modificării microgeometriei suprafețelor metalice cu aplicarea DEI;
- fixarea electrodului-sculă în dispozitivul portelectrod;
- stabilirea interstițiului necesar realizării modificării microgeometriei suprafețelor metalice, prin extragerea unui/unor meniscuri conice de tip Taylor, cu aplicarea DEI;
- conectarea instalației electrice, stabilirea parametrilor energetici;
- stabilirea duratei impulsului DE;
- realizarea DEI de bază;
- descărcarea completă a energiei acumulate pe bateria de acumulare a instalației experimentale până la $W=0 \text{ J}$;
- extragerea electrodului-piesă din dispozitivul de fixare.

Această procedură se repeta de câte ori este necesară și este valabilă pentru modificarea microgeometriei suprafețelor metalice cu aplicarea DEI în mediu aer, în condiții normale, cu utilizarea electrodului-sculă din wolfram sau aliajele wolframului. Dacă se dorește a realiza dezoxidarea suprafeței prelucrate în aceste condiții se recomandă efectuarea unor operații suplimentare după realizarea descărcării complete a energiei acumulate pe bateria de acumulare a instalației experimentale până la $W=0 \text{ J}$, până la extragerea electrodului-piesă din dispozitivul de fixare și anume:

- stabilirea interstițiului necesar realizării dezoxidării suprafețelor cu aplicarea DEI de tensiune înaltă, prin străpungerea stratului de oxid creat pe suprafața meniscului conic de tip Taylor, în timpul realizării DEI de bază;
- stabilirea parametrilor energetici și a duratei impulsului DE;
- realizarea DEI suplimentare;
- descărcarea completă a energiei acumulate pe bateria de acumuloare a instalației experimentale până la $W=0$ J;
- extragerea electrodului-piesă din dispozitivul de fixare.

Această procedură la fel se repetă ori de câte ori este necesară.

2.2. Metodica cercetărilor experimentale, privind emisia termoelectronică

Cercetări experimentale, privind emisia termoelectronică s-au realizat în 2 centre: 1) Laboratorul științific de micro- și nano-tehnologii, din cadrul Catedrei științe fizice și ingineresti, Facultatea Științe Reale, Economice și ale Mediului, Universitatea de Stat „Alec Russo” din Bălți și 2) Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizică și Inginerie Nucleară Horia Hulubei din București-Măgurele, România.

2.2.1. Metodica cercetărilor experimentale, privind emisia termoelectronică realizate la USARB

Pentru determinarea influenței creșterii ariei suprafeței active a catodului asupra emisie termoelectronice în condiții expres, în cadrul Laboratorului științific de micro- și nano-tehnologii, se folosea termocatozi neprelucrați, fără modificarea microgeometriei prin aplicarea DEI și termoelectrozi prelucrați, cu suprafața modificată prin aplicarea DEI, cu formarea meniscurilor conice. În scopul determinării curentului electric de emisie termoelectronice în condiții expres, a fost folosită instalație specială de tipul „BYII-5”, prezentată în (fig. 2.14 a). Mai jos, în fig. 2.16, este prezentată schema electrică principială cu ajutorul căreia se determinau caracteristicile volt-amperice în timpul cercetărilor experimentale. Este cunoscut faptul, că pentru a crea condiții favorabile de obținere a curentului electric într-un tub electronic, este necesar de a aplica între electrozii acestuia un câmp electric puternic. Pentru aceasta în procesul cercetărilor a fost folosită o sursă de tensiune reglabilă (STR) care este prezentată în fig. 2.16 (nr. 3). Această sursă (STR) permite reglarea tensiunii în limitele 0 – 1050 V. Bornele termocatodului se conectau la bornele sursei de curent continuu (SCC1), reprezentat schematic în fig. 2.16. Borna minus a sursei de curent continuu (SCC1) se unea cu borna minus a sursei de tensiune reglabilă (STR) cu scopul stabilirii unui câmp electric necesar între termocatod (C) și anodul (A) din camera de lucru (CL).

Diferența de potențial la bornele termocatodului și intensitatea curentului electric ce trecea prin el se măsurau cu voltmetru V1 și respectiv cu ampermetru A1. Diferența de potențial dintre anod și catod se măsură cu voltmetru V2, iar intensitatea curentului de termoemisie se determina cu microampermetru.

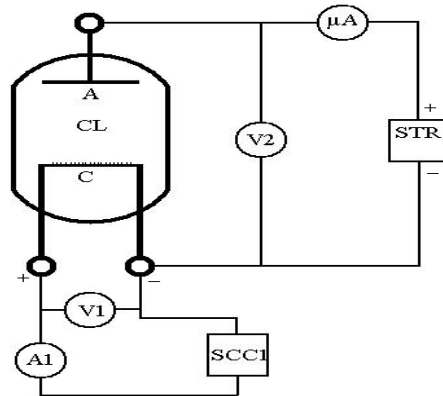


Fig. 2.16. Schema electrică principală pentru determinarea caracteristicilor volt-amperice: CL–camera de lucru; V1 – voltmetru; A1 – ampermetru; SCC1 – sursa de curent continuu; V2 – voltmetru; μA – microampermetru; STR – sursa de tensiune reglabilă (0 – 1050 V); A – anod din inox; C – termocatod cilindric liniar

Instalația experimentală reprezentată în fig. 2.17 a fost asamblată în cadrul Laboratorului științific de micro- și nano-tehnologii și permitea vizualizarea și înregistrarea datelor experimentale, privind emisia termoelectronică a catozilor studiați în scopul construirii dependențelor „volt-amperice” și determinarea valorii intensității curentului de saturație.



Fig. 2.17. Standului experimental asamblat în cadrul USARB: 1. Pompă de vacuum; 2. Micro-ampermetru; 3. Sursă de tensiune înaltă; 4. Camera de lucru; 5. Redresor; 6. Multimetru digital

În fig. 2.17 (vezi elementul indicat cu cifra 4) este reprezentată o cameră de forma unui cilindru de sticlă, iar în fig. 2.18 este reprezentată o cameră separată de forma unui cupolă de sticlă. În cadrul cercetărilor experimentale, pe parcursul anilor s-au întâlnit diferite probleme și neclarități de ordin tehnic (obținerea vacuumului înalt) și din domeniul măsurătorilor (măsurarea precisă a temperaturii) în scopul obținerii rezultatelor preconizate, adică obținerii rezultatelor presupuse în mod teoretic. În cadrul cercetărilor experimentale s-a utilizat și alte camere de lucru (vezi fig. 2.18). În fig. 2.14 a (vezi elementul indicat cu cifra 1) este reprezentată camera de lucru din cadrul instalației „BYII-5”, în formă de un cupolă metalică, dotat cu câteva ferestre mici circulare pentru vizualizarea interiorului acesteia.



Fig. 2.18. Vedere generală a camerei de lucru de forma unui „cupolă”

Analizând rezultatele obținute în urma efectuării experiențelor și continuând studiarea literaturii de specialitate, privind procesele de emisie a termocatozilor s-au propus și implementat un șir de modificări cu scopul perfecționării strategiei realizării experimentului.

2.2.2. Metodica cercetărilor experimentale, privind emisia termoelectronică realizate la IFIN-HH

În luna decembrie, anul 2016, datorită susținerii primite din partea profesorului Florin NEGOITA, dr., cărui îi sunt foarte recunoscător și a participării mele în calitate de cercetător științific stagiar în cadrul proiectelor de cercetare: „Cercetări tehnologice privind formarea suprafețelor cu proprietăți superioare de termoemisie electronică cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls”, cifrul 11.817.05.30A, și „Tehnologii de formare a peliculelor de grafit cu proprietăți antiaderență și antiuzură prin metoda electroeroziunii”, cifrul 15.817.02.41A, direcția strategică 18.02: „Materiale, tehnologii și produse inovative”, sub conducerea conducătorului actualei teze, prof. univ., dr. hab. Pavel TOPALĂ, a și fost posibilă delegarea mea la Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizică și Inginerie Nucleară Horia Hulubei (IFIN-HH) din București-Măgurele, România, cu scopul realizării cercetărilor experimentale de înaltă calitate. În acest centru am realizat măsurările de bază, privind emisia termoelectronică a catodilor

executați/cercetați, deoarece IFIN-HH posedă o dotare tehnico-materială bogată, iar standul experimental necesar realizării cercetării, privind emisia termoelectronică a fost asamblat cu ușurință, astfel fiind posibil a realiza experimentele planificate. Asamblarea standului experimental s-a realizat în baza schemei prezentate în fig. 2.16.



Fig. 2.19. Dispozitivul de fixare a electrozilor, destinați cercetării emisie termoelectronică

Mai întâi s-a ales instalația de vacuumare, modelul „adixen”, apoi s-a ales camera de lucru (vezi Anexa 3, Fig. A3.1) care poate fi unită la instalația de vacuumare și care posedă suficient spațiu și intrări, pentru a permite instalarea dispozitive necesare: o intrare din partea laterală era destinată introducerii / extragerii dispozitivul de fixare a electrozilor (termocatodul și a anodul) destinați cercetării emisie termoelectronică (vezi fig. 2.19), prin intermediul canalului din partea de jos se realiza legătura cu instalația de vacuumare, o altă intrare se utiliza în calitate de fereastră pentru vizualizarea optică (vezi fig. 2.22), a patra intrare a fost dublată prin intermediul unui cilindru cu trei ieșiri (vezi Anexa 3, Fig. A3.2). Prin intermediul acestui cilindru era conectat o joă de vacuum (vezi Anexa 3, Fig. A3.3), care fiind conectată la instalația destinată obținerii vacuumului, afișa pe panoul de comandă valoarea reală a gradului de vacuumare a camerei de lucru (vezi fig. 2.20) și mai era unit și firul de tensiune înaltă (borna pozitivă) care se conecta la anod. În fig. 2.19 este reprezentat dispozitivul de fixare a elementelor participante în cadrul procesului de cercetare al fenomenului de emisie: în stânga vezi dispozitivul pe care se fixa termocatodul, la mijloc este reprezentat anodul din inox, în dreapta capacul din aluminiu cu orificiu de care se prindea bara pe care se fixau electrozii prin intermediul unor cilindre izolatoare. Borna negativă (masa) era comună ambilor electrozi și conectată la întreaga instalație. În imaginea din fig. 2.20, se observă firele dezgolite din cupru care erau utilizate pentru realizarea contactului electric al bornei negative dintre termocatod și instalația propriu-zisă, iar firele acoperite cu izolator de culoare portocaliu închis erau destinate realizării contactului electric cu borna pozitivă ale electrozilor și borna pozitivă ale surselor de curent și tensiune utilizate în cadrul experimentului.



Fig. 2.20. Panoul de comandă al instalației de vacuum

În imaginea prezentată în fig. 2.19, se observă, că anodul este conectat doar la borna pozitivă, conform schemei electrice prezentate în fig. 2.16. În timpul trecerii curentului electric prin termocatod, acesta se încălzește, datorită efectului Joule-Lentz. Cu mărirea valorii intensității curentului electric ce trece prin termocatod are loc și mărirea temperaturii lui. La o anumită temperatură a termocatodului de aproximativ 400 – 450 °C, acesta începe să lumineze. Acest efect se poate vizualiza prin cadrul ferestrei pentru vizualizare optică (vezi fig. 2.22). În partea de sus al panoului instalației de vacuumare, reprezentat în fig. 2.20 sunt reprezentate date cu privire la turația turbinei pompei de vacuum înalt care pompează gazul din camera de lucru al instalației de vacuum, atingând viteze de peste 27 mii rpm (rotații pe minut), vezi în fig. 2.20, valoarea de 27083 de rpm. În partea de jos a panoului de comandă al instalației de vacuumare sunt vizualizate datele cu referire la gradul de vacuumare al camerei de lucru, măsurate prin intermediul jojei de vacuum și care atinge valori de până la 10^{-7} mbar, vezi în fig. 2.25, valoarea de $1,8 \cdot 10^{-6}$ mbar. Pentru a crea un câmp electric între electrodul-anod și termocatodul destinat emiterii de electroni în interiorul camerei de lucru și cu scopul orientării electronilor emiși spre electrodul-anod s-a ales o sursă de tensiune înaltă care permite obținerea unei diferențe de potențial între electrozi de până la 3000 de volți (vezi dispozitivul prezentat în fig. A3.4). Pentru alimentarea termocatodului s-a utilizat sursa de curent, care permite obținerea prin aceștia a intensității curentului electric de până la 10 A (vezi fig. A3.5). Pentru a obține rezultate credibile, privind stabilitatea emisiei electronice a catozilor cercetați, se utiliza bornele sursei de curent care alimentau catodul cu o valoare stabilă a intensității a curentului electric de 5 A.

Cu scopul măsurării valorii intensității curentului de emisie termoelectronică s-a folosit un multimetru digital, modelul FLUKE 289, de precizie sporită (vezi Anexa 3, Fig. A3.6). Acest multimetru permitea înregistrarea valorii intensității curentului de emisie termoelectronică între electrozi de la valori mai mici chiar de $1 \mu\text{A}$ până la valori de 400 de mA, cu o precizie maximă posibilă. Măsurarea cu precizie înaltă pe așa un diapazon larg al intensității curentului electric era posibilă, deoarece acest multimetru (de o construcție complexă) utiliza mai multe poziții intermediare de măsurare pentru anumite intervale mai înguste ale intensității curentului electric.

După ce s-a asamblat componentele necesare ale standului experimental s-au realizat primele încercări, ținându-se cont și de unele prescripții speciale referitor la durata și regimul de funcționare ale unor dispozitive utilizate.

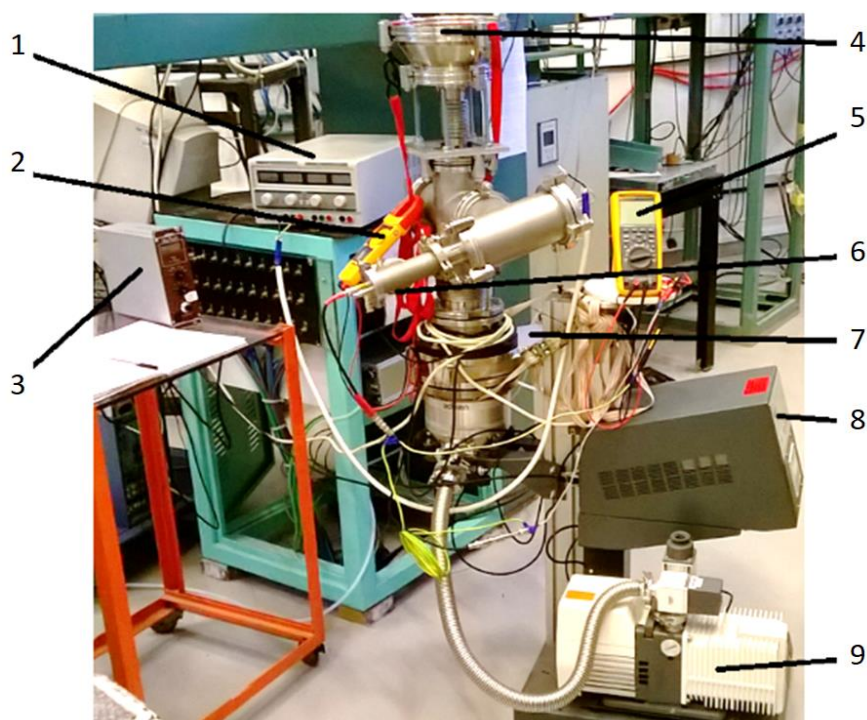


Fig. 2.21. Standul experimental asamblat în cadrul IFIN-HH [159]

Vederea generală a standului experimental asamblat în cadrul IFIN-HH este reprezentat în fig. 2.21. În această figură, elementele numerotate de la 1 la 9 se descifrează, după cum urmează: 1. Sursa de curent de alimentare a termocatodului; 2. Multimetru (model „FLUKE 902”) utilizat în calitate de măsurător termic ce determină temperatura termocatodului prin intermediul termocuplului amplasat în apropierea termocatodului; 3. Sursa de tensiune înaltă conectată cu borna „-” la termocatod și cu borna „+” la anod (reglabilă în limita a 0–3000 V); 4. Fereastra pentru vizualizare optică; 5. Multimetru (model „FLUKE 289”) utilizat pentru determinarea cu precizie înaltă a valorii intensității curentului electric de emisie termoelectronică; 6. Măsurător de vacuum (model „adixen ACC, 2009”); 7. Pompă turbomoleculară, parte componentă a instalației de

vacuumare, utilizată pentru obținerea unui grad înalt de vacuumare; 8. Blocul de dirijare al instalației de vacuumare; 9. Pompa preliminară de vacuum. Acest stand experimental a permis de a înregistra date mai precise, în condițiile date, referitor la valoarea intensității curentului electric de saturație în procesul emisiei termoelectronice. Prin intermediul ferestrei destinată vizualizării optice (vezi fig. 2.22) se observa starea reală a termocatodului supus cercetărilor experimentale. Cu scopul măsurării temperaturii a elementelor aflate în camera de lucru, se utiliza 2 dispozitive: 1) multimetru „FLUKE 902” (vezi fig. A3.7, a); și 2) o cameră optică destinată măsurării temperaturii (thermovision), marca „FLIR” (vezi fig. A3.7, b). Ambele dispozitive sunt digitale și permit a vizualiza valorile termice pe care ne interesează în regim continuu.

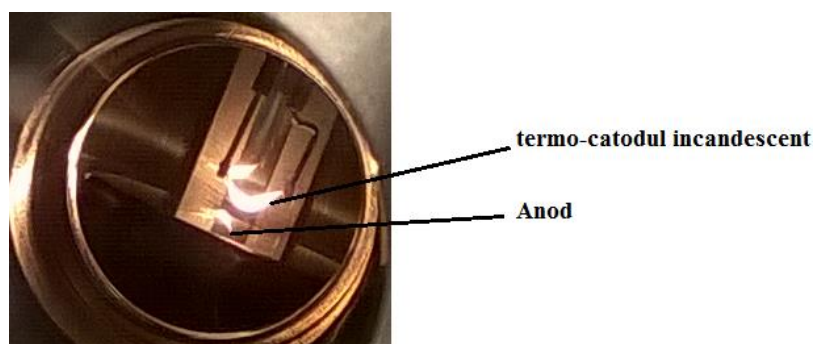


Fig. 2.22. Fereastra pentru vizualizarea optică [157]

Standul experimental prezentat în fig. 2.21 era asamblat conform aceeași schemă electrică de principiu prezentată în fig. 2.16. Distanța dintre termocatod și anod se păstra constantă și avea valoarea de 4 mm. Valoarea interstițiului de 4 mm, dintre anod și termocatod, s-a păstrat egală pentru toate experiențele în care se cerceta fenomenul de termoemisie, și în cadrul centrului IFIN-HH, și în timpul încercărilor în condiții expres realizate la Bălți.

2.2.3. Succesiunea de realizare a modului de măsurare a intensității curentului electric de emisie termoelectronică

Pentru a măsura experimental intensității curentului electric de emisia termoelectronică a termocatozilor, se recomandă a realiza următoarele elemente ale procesului tehnologic:

- fixarea termocatodului în dispozitivul de prindere a electrozilor destinați cercetării fenomenului de emisiei termoelectronice;
- fixarea anodului în dispozitivul de prindere a electrozilor destinați cercetării fenomenului de emisiei termoelectronice; (se recomandă de a se stabili valoarea $S = 4$ mm);
- conectarea sursei de tensiune electrică continuă, borna - se unește la o bornă a termocatodului, iar borna plus se unește la anod (vezi circuitului electric reprezentat în fig. 2.16);

- conectarea sursei de curent cu scopul alimentării termocatodului, borna minus a sursei de curent se unește la aceeași bornă a termocatodului la care a fost conectată borna minus a sursei de tensiune, iar borna plus se unește la cealaltă bornă;
- fixarea termocuplului cât mai aproape posibil de zona centrală a termocatodului (cu scopul obținerii datelor veridice despre temperatura acestuia); conectarea termocuplului la multimetru „mamă” cu scopul vizualizării datelor cu referire la temperatura măsurată;
- introducerea dispozitivului de fixare al electrozilor în camera de lucru;
- montarea ermetica a părților demontabile prin aplicarea (înșurubarea) elementelor fixatoare;
- conectarea instalației de vacuumare; conectarea pompei preliminare de vacuum; atingerea valorii gradului de vacuum de minim 10^{-2} mbar; conectarea pompei turbomoleculare utilizată pentru obținerea unui grad înalt de vacuumare; atingerea valorii gradului de vacuum de minim $10^{-5} - 10^{-6}$ mbar (ceea ce corespunde aproximativ valorii de 27 de mii de tpm ai pompei turbomoleculare);
- stabilirea diferenței de potențial dintre emițător (termocatod) și anodul (≥ 1000 V);
- modificarea valorii tensiunii electrice (de la 0 la 10 V) a sursei de curent cu scopul modificării intensității curentului electric ce trece prin termocatod;
- înregistrarea valorilor temperaturii indicate de multimetrul conectat la termocuplu; înregistrarea valorilor intensității curentului electric de emisie termoelectronică indicate de multimetru conectat în serie între termocatod și anod până la atingerea valorii intensității curentului electric de emisie termoelectronică de saturație;
- verificarea în timp a gradului de stabilitate a emisiei termoelectronice a termocatozilor cercetați, confecționați din wolfram sau aliajele acestuia.

După ce s-a finisat partea experimentală cu privire la cercetarea proprietăților de emisie a termocatozilor, se recomandă:

- deconectarea sursei de curent; deconectarea sursei de tensiune;
- deconectarea pompei turbomoleculare de vacuum înalt; așteptarea până la oprirea completă a turbinei pompei turbomoleculare de vacuum înalt; deconectarea pompei preliminare de vacuum, echilibrarea presiunii din camera de lucru și mediul exterior;
- demontarea (deșurubarea) elementelor de fixare;
- extragerea dispozitivului de fixare a electrozilor destinați cercetării emisiei termoelectronice;
- extragerea termocatodului supus cercetării.

Pentru realizarea cercetărilor experimentale pentru următorul termocatod, aceste operații se repetă, respectând ordinea, ori de câte ori este necesară.

2.3. Instalații utilizate pentru studiul și analiza suprafețelor prelucrate

În scopul studierii morfologiei suprafețelor și compoziției chimice ai termocatozilor elaborați a fost aplicate metodele microscopiei electronice cu scanare (SEM) și a spectroscopie cu raze X cu dispersie energetică (EDX). În timpul cercetărilor experimentale s-au utilizat mai multe microscopie. În cadrul laboratorului științific de micro- și nano-tehnologii s-a utilizat microscopul optic (vezi fig. 2.23) pentru realizarea cercetărilor preliminare a microobiectelor obținute prin DEI.



Fig. 2.23. Vedere generală a microscopului optic XIM600, USARB

Ulterior, doar probele selectate au fost cercetate mai minuțios utilizându-se microscopul electronic Vega TeScan 5130 (parametrii principali ai microscopului electronic Vega TeScan 5130 sunt prezentați în Anexa 4) [161], din cadrul Centrului Național de Studiu și Testare a Materialelor, UTM (vezi fig. 2.24).



Fig. 2.24. Microscopul electronic Vega TeScan 5130, UTM

Pentru a obține rezultate și mai precise, au fost implicate echipamente performante de cercetare, privind analiza materialelor din cadrul laboratoarelor centrelor de cercetate ale

Universității „Christian-Albrecht University of Kiel”, din Germania, în perioada 01.02.2013 – 28.02.2013, acestea fiind prezentate în tab. 2.2.

Tabelul 2.2. Echipamente de cercetare din cadrul laboratoarelor universității „Christian-Albrecht University of Kiel”, Germania

Nr.	Denumirea echipamentului	Caracteristici principale
1.	AFM – Atomic force microscopy	Surface morphology: scan range max. 100 μm x 100 μm ; samples max. 15 x 15 mm; operating mod: contact - without contact - Friction
2.	SEM – Scanning electron microscopy (Zeiss Ultra plus)	Morphology of surfaces: < 40 kV, Resolution 2 nm,
3.	EDS – X-ray microanalysis (Zeiss Ultra plus)	Chemical microanalysis of solid materials: for elements with atomic number > 3; Energy dispersive X-ray analysis EDAX DX-4 with UTW-Si (Li) detector, high spatial resolution, beam diameter > 2 nm
4.	XPS – Photoelectron spectroscopy	Chemical analysis of surfaces: Non-monochromatized Mg-Al-anode sample analysis: diameter 5 mm - max. 14 mm; Sensitivity to <1%; Depth profiles of <20 nm
5.	Profilometer	Surface profiles: Sample: diameter max. 216 mm; Height max. 63.5 cm; Scan range: 50 μm x 200 mm; Height 2.5 - 262 nm

Aplicarea acestor dispozitive performante de cercetare (vezi caracteristicile prezentate în tab. 2.2), au permis de a obține rezultate veridice cu privire la cercetările realizate cu privire la morfologia suprafețelor pieselor modificate microgeometric și analiza chimică ale acestora.

2.4. Determinarea ariei suprafeței meniscurilor, obținute cu aplicarea DEI

După cum a fost menționat în cap. 1, intensitatea curentului de emisie este direct proporțională cu aria suprafeței catodului. În conformitate cu măsurările experimentale a fost formată o bază de date compuse din măsurători ale mai multor asperități conice și anume ale diametrului bazei, înălțimi meniscului, diametrul craterului, unghiul de la vârf, lungimi de undă transversale și longitudinale a undelor capilare, care fiind introduse în aplicația „Solid Works” (vezi imaginea din fig. 2.25), au permis a estima aria suprafeței metalice prelucrate, din care au fost extrași meniscuri conice. Rezultatele obținute cu aplicația Solid Works se utilizau în scopul determinării variația ariei suprafeței totale a catodului prelucrat prin aplicarea DEI în raport cu aceleași porțiuni de arie, dar care nu au fost prelucrate și în scopul determinării raportului ariei suprafeței active de emisie a catodului prelucrat în raport cu aceleași porțiuni de arie, pentru catodii netezi. În cazul prelucrării suprafețelor cu DEI din suprafețele prelucrate se extrag meniscuri conice numite și conuri Taylor. Determinarea ariei suprafeței acestor meniscuri în mod obișnuit este dificilă din care cauză s-a recurs la modelarea acestora și determinarea funcțiilor care descriu

generatoarea acestor suprafețe. Această generatoare prezintă combinația a trei tipuri de linii: curbă semicircumferință, sinusoidă și porțiuni rectilinii. Astfel aplicând calculul la calculator a suprafeței meniscului de formă geometrică complicată poate fi rezolvată această problemă.

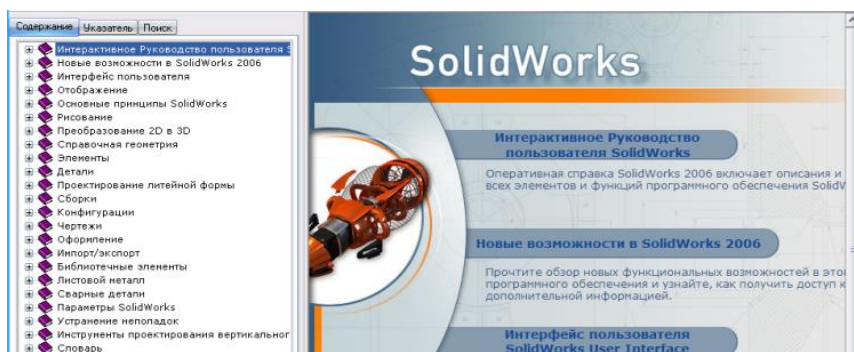


Fig. 2.25. Aplicația Solid Works

Măsurările și estimările realizate au demonstrat, că în cazul formării meniscurilor pe suprafețele pieselor, aria suprafeței active ale pieselor poate fi sporită considerabil, ceea ce este important pentru suprafețelor pieselor destinate emisiei electronice [145, 153]. Calculele au permis a stabili, că aria porțiunii de suprafață activă neprelucrată este de aproximativ 1,5 – 8 ori mai mică, decât cea prelucrată (cea cu menisc), când se considera, că meniscurile au suprafețele plane (vezi fig. 2.26), ce în realitate nu este așa, în realitate, generatoarea asperităților conice este complicată și se determină mult mai greu.

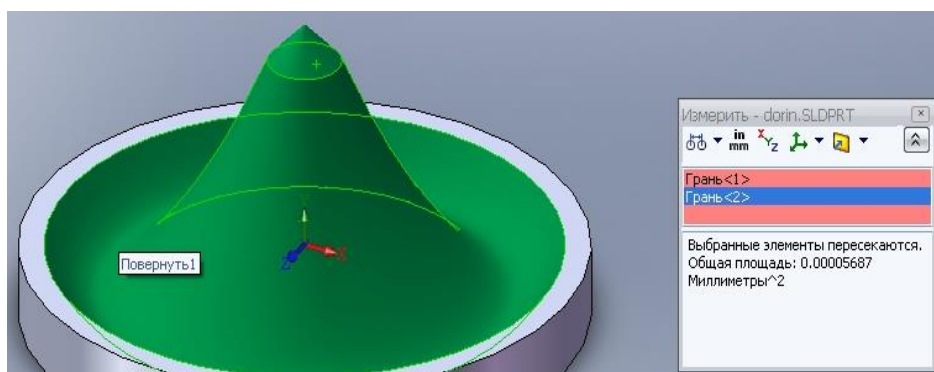


Fig. 2.26. Asperitate conică modelată în Solid Works

Cu ajutorul aplicației „Solid Works” este cât de cât ușor a modela meniscuri conice care sunt compuși din părți idealizate. Dacă ne punem ca scop să modelăm un menisc de formă geometrică reală, pe suprafața laterală a căruia sunt prezente undulații sinusoidale și diverse „ondulații” de dimensiuni micro și nanometrice prezente pe suprafața laterală a asperităților conice și dacă ne concentrăm mai mult atenția și includem prezența asperităților de ordin nanometric prezente pe grăunții noi formați la suprafața asperităților, atunci această sarcină devine mult prea

dificilă nu doar pentru aplicația „Solid Works”, dar și pentru alte aplicații, deoarece microgeometria obținută în urma aplicării DEI este una prea complexă.

2.5. Concluzii la capitolul II

Reieșind din obiectivele tezei și metodele de cercetare aplicate putem concluda, că:

- instalația experimentală, utilizată pentru modificarea microgeometriei suprafețelor pieselor metalice, permite reglarea parametrilor energetici, temporari și de natură liniară la scară impusă;

- măsurarea parametrilor energetici și temporali ai descărcărilor solitare direct pe interstițiu conduce la elaborarea unor noi procedee de prelucrare și va asigura proiectarea corectă a echipamentelor tehnologice;

- aplicarea instalațiilor contemporane de măsurare a intensității curentului de termoemisie asigură veridicitatea rezultatelor obținute și sporește șansa de aplicare a acestora în practică;

- metodele de analiză și cercetare a morfologiei și de compoziție a suprafețelor prelucrate asigură obținerea informației necesare fundamentării științifice a rezultatelor obținute.

3. CERCETĂRI EXPERIMENTALE, PRIVIND MODIFICAREA MICROGEOMETRIEI SUPRAFETELOR ACTIVE ALE ELECTROZILOR

Conform metodicii descrise în [6 – 7] au fost extrase de pe suprafețele metalice asperități sub formă de con Taylor (fig. 3.1) de pe suprafețele cilindrice a probelor. Piesa era conectată în circuitul de descărcare în calitate de anod, iar electrodul-sculă în calitate de catod. Parametrii energetici ai descărcării electrice în impuls: $W_s = 0,86$ J (energia degajată în interstițiu), $S = 0,3$ mm (mărimea interstițiului), $n = 1$ (numărul de DEI pentru o unitate de suprafață). Ca rezultat din suprafața probei a fost extrasă o asperitate conică prezentată în fig. 3.1.

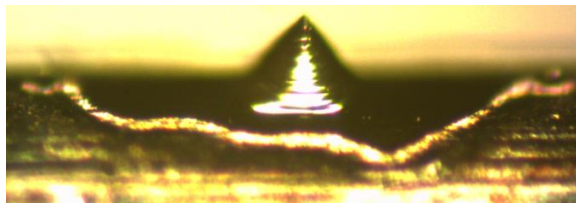


Fig. 3.1. Vedere generală a conului Taylor extras prin metoda DEI (înălțimea ≈ 60 μm și diametrul bazei acestui menisc este de ordinul a 80 μm)

3.1. Stabilirea condițiilor de poziționare a electrozilor

Efectuând mai multe încercări, s-a observat, că în urma DEI, la anumite regimuri energetice pe suprafețele electrodului-sculă și a electrodului-piesă se pot obține asperități conice, extrase de pe suprafețele metalice. După cum s-a menționat în capitolul I și s-a confirmat experimental, efectul descărcării electrice în impuls este mai pronunțat pe suprafața electrodului conectat în calitate de anod.

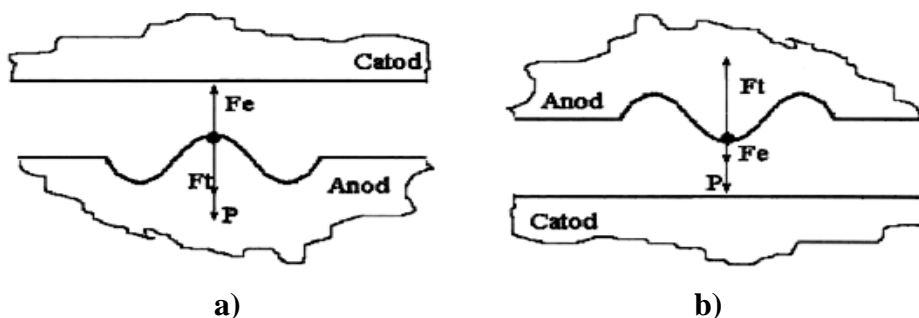


Fig. 3.2. Sensul forțelor care acționează asupra metalului lichid

S-a observat, că mai des înălțimea meniscurilor extrași este mai mare, atunci când anodul se află poziționat cu suprafața de prelucrare în jos, fixat de sus (vezi Fig. 3.2, b). Putem explica acest fenomen, dacă vom preciza direcțiile de acțiune a forțelor care acționează asupra metalului lichid și anume, acțiunea forței de greutate P , a forței din partea câmpului electric, F_e , care este orientată de la anod spre catod și a tensiunii superficiale, F_t , care este orientată în direcția opusă

F_e . Pentru cazul când anodul este poziționat în partea de jos (vezi Fig. 3.2, a), asupra metalului lichid acționează aceleași forțe, dar orientate în sens opus, iar forța de greutate nu își modifică sensul de acțiune, fiind orientată tot spre centrul pământului. De aici rezultă, că în cazul când anodul se află poziționat în partea de sus, forța de greutate P și forța câmpului electric F_e sunt orientate în același sens, iar rezultanta acestor trei forțe este puțin mai mare în sensul extragerii asperităților conice. Astfel, putem menționa, că asupra metalului topit acționează efectul cumulativ, care este compus cel puțin din trei tipuri de forțe: de greutate, electrodinamice și de tensiune superficială și mai este influențată de acțiunea presiunii atmosferice, care acționează asupra acestuia. Analizând sensurile de acțiune ale acestor trei forțe, în procesul de prelucrare, în scopul amplificării procesului de extragere a asperităților este mai avantajos a poziționa anodul conform variantei „b” din fig. 3.2, deoarece rezultanta acestor forțe este orientată în direcția extragerii meniscurilor și respectiv acestea se obțin pot obține puțin mai înalți și mai ascuțiți.

3.2. Încercări experimentale, privind extragerea meniscurilor conice de pe suprafețele materialelor conductoare

În lucrările [7, 15, 24, 25] a fost stabilit, că pentru a obține suprafețe cu asperități sub formă de conuri Taylor este necesară apariția fazei lichide pe suprafața prelucrată, extragerea asperității solidificarea ultrarapidă a materialului în formă de asperitate. Cercetările experimentale demonstrează, că pentru realizarea tehnologiei de modificare a microgeometriei suprafețelor cu extragerea asperităților sub formă de conuri Taylor este necesară satisfacerea următoarelor condiții:

- Asigurarea topirii locale a piesei este determinată de relația (3.1) [7]:

$$Q = \frac{4W_s}{\pi \cdot d_c^2 \cdot S} \geq Q_{top} \quad (3.1)$$

în care: Q – cantitatea de căldură degajată în canalul de plasmă în timpul DEI (J); W_s – energia degajată în canalul de plasmă (J); d_c – diametrul mediu al craterului cu fază lichidă pe suprafața catodului (m); S – mărimea interstițiului între electrozi (m); Q_{top} – cantitatea de căldură necesară topirii materialului piesei (J). Cantitatea de căldură necesară topirii materialului piesei, Q_{top} , depinde de densitatea volumetrică de topire a materialului piesei, care ia în considerație căldura specifică de topire, q_{top} , exprimată în J/kg și densitatea materialului piesei, ρ , exprimată în kg/m³.

- În interstițiu se va crea un câmp electric (direcția de acțiune a câmpului electric va coincide cu direcția acțiunii forței de greutate) cu intensitatea de cca 10^8 V/m [7]:

$$E_{cr} = \sqrt[4]{64\pi^2 \rho g \gamma \cdot 3 \cdot 10^4} \quad (3.2)$$

în care: E_{cr} – intensitatea critică a câmpului electric (V/m); ρ – densitatea metalului (kg/m^3); g – accelerația căderii libere (m/s^2); γ – tensiunea superficială a materialului în stare lichidă (N/m).

La aplicarea DEI, mărimea energiei utilizate și respectiv distribuția ei în coloana de plasmă a descărcării electrice și suprafețele electrozilor [149], joacă un rol important în manifestarea prin efecte termice și erozive ce au loc pe suprafețele acestora [36, 62]. În urma cercetărilor experimentale s-a constatat, că asupra procesului de modificare a microgeometriei suprafețelor pieselor metalice influențează esențial așa parametrii cum sunt: compoziția materialul electrozilor, energia, mărimea interstițiului dintre electrozi și durata impulsului de descărcare. În așa mod au fost determinate unele condiții energetice de extragere a meniscurilor conice în rezultatul prelucrării cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls. Efectuând mai multe încercări s-a observat, că dimensiunile electrodului-sculă joacă un rol important în cazul extragerii asperităților conice și anume, când se utilizează electrodul-sculă în formă de fir cilindric de dimensiuni reduse (0,2 mm în diametru), atunci mult mai ușor se obțin aceste asperități. Prezența câmpului magnetic exterior practic nu influențează formarea asperităților conice [68]. Mărimea interstițiului dintre electrozi definește în mod direct, condițiile de formare a asperităților conice extrase pe suprafețe metalice. Experimental s-a demonstrat, că extragerea asperităților conice prescrise poate avea loc, cel mai probabil la mărimi cuprinse de până la 0,35 mm, intervalul optim fiind de 0,15 – 0,3 mm.

Din motiv, că înălțimea asperităților pot atinge valori maxime de până la 0,15 mm prin aplicarea descărcărilor electrice în impuls, nu se recomandă stabilirea interstițiului mai mic de 0,2 mm, cu scopul evitării microsudurii și scurtcircuitarea circuitului electric. Totuși, dacă se încearcă a obține asperități conice la interstiții mai mari de 0,5 mm, atunci este necesar a aplica o energie mai mare. De exemplu, la interstițiul de 1 mm, s-au obținut asperități conice numai dacă, blocul de alimentare încărca bateria de condensatoare cu o tensiune electrică ce constituia 220 – 240 V, iar capacitatea acestor baterii de condensatoare era setată la valoarea de 100 sau 200 de μF . Analizând asperitățile obținute în aceste condiții, se poate afirma, că acestea nu erau cu mult mai mari decât asperitățile obținute la energii mai mici.

3.3. Influența energiei degajate în interstițiu asupra geometriei meniscurilor extrase de pe suprafețele pieselor metalice

În procesul cercetărilor experimentale a fost analizată influența energiei degajate în interstițiu asupra formării meniscurilor pe suprafața anodului când acesta în circuitul de descărcare se afla în poziția de sus. Piesele au fost executate din aliajul wolfram de puritate tehnică și din aliajele acestuia, ca de exemplu W + 10% Re și W + 20% Re. Pentru a varia energiei degajată în interstițiu se modifica capacitatea bateriilor de condensatoare în trepte începând cu valoarea

minimă de 100 μF până la cea maximă de 600 μF . Experimentele au fost repetate de mai multe ori, cu scopul asigurării unor rezultate mai precise. S-a observat, că pentru aliajul W + 10% Re, cu creșterea energiei pe bateria de condensatoare de la 0,072 J până la 0,432 J, înălțimea meniscurilor variază de la 51 μm până la 123 μm , iar pentru piese executate din W de o puritate tehnică, înălțimea acestora variază de la 29 μm până la 71 μm . Prin metoda osciloscopării au fost determinate valorile curentului în impuls și durata impulsului pentru toate valorile capacităților bateriilor de condensatoare (tab. 3.1 și tab. 3.2).

Tabelul 3.1. Diametrul bazei meniscului și înălțimea lui ca funcție de energia degajată în interstițiu și durata impulsului de descărcare pentru aliajul W + 10% Re

Nr.	S, mm	C, μF	U_c , V	I_m , A	W_s , J	τ , μs	h_m , μm	$d_{b.m.}$, μm
1.	0,25	100	60	94	0,072	100	51	83
2.		200	60	125	0,144	125	72	89
3.		300	60	151	0,216	160	86	110
4.		400	60	163	0,288	180	97	139
5.		500	60	172	0,36	200	109	170
6.		600	60	177	0,432	220	123	195

Tabelul 3.2. Diametrul bazei meniscului și înălțimea lui ca funcție de energia degajată în interstițiu și durata impulsului de descărcare pentru W

Nr.	S, mm	C, μF	U_c , V	I_m , A	W_s , J	τ , μs	h_m , μm	$d_{b.m.}$, μm
1.	0,2	100	60	100	0,072	100	29	55
2.		200	60	144	0,144	125	34	83
3.		300	60	168	0,216	160	41	110
4.		400	60	180	0,288	180	55	134
5.		500	60	186	0,36	200	64	161
6.		600	60	204	0,432	220	71	179

În figurile 3.3 și 3.4 sunt prezentate dependențele înălțimii meniscurilor și dependențele diametrelor bazelor meniscurilor în raport cu energia degajată în interstițiu, în procesul DEI.

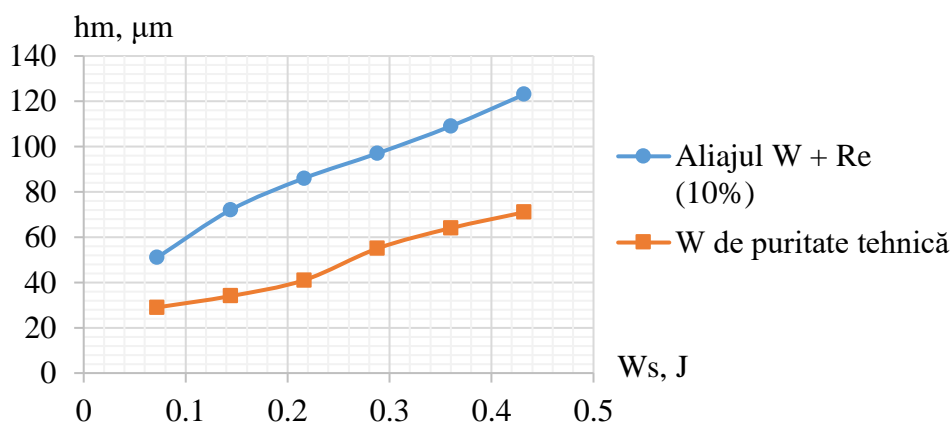


Fig. 3.3. Dependenta înălțimii meniscurilor de energia degajată în interstițiu

După cum se vede din grafice prezentate mai jos, înălțimea meniscurilor și diametrul bazei acestora depinde în mare măsură de energia degajată în interstițiu.

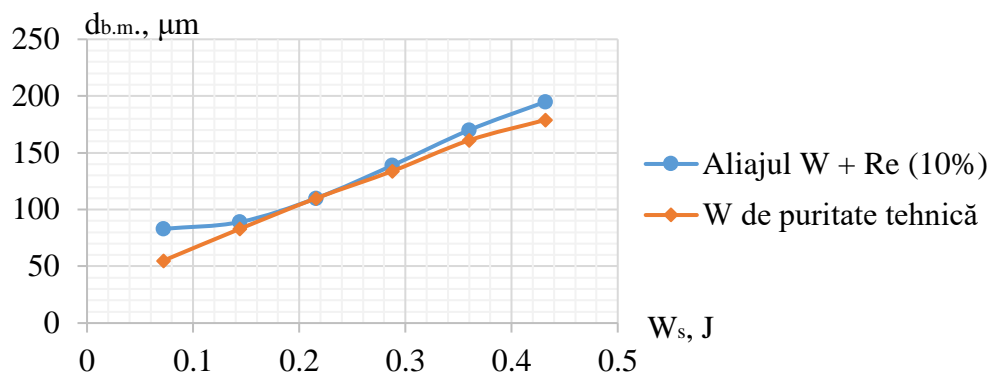


Fig. 3.4. Dependența diametrelor bazei meniscurilor de energia degajată în interstițiu

Energia degajată în interstițiu este un parametru important, în ce privește extragerea prescrisă a meniscurilor pe suprafețele metalice. Din graficul prezentat în fig. 3.4 se observă, că pentru valorile energiei de 0,216 J, diametrele bazei meniscurilor sunt practic identice pentru ambele materiale, iar în restul cazurilor diferă. Cu alte cuvinte, la energiile date pe suprafețele acestor două materiale pot fi obținute meniscuri cu diametrele bazelor identice, dar cu înălțime diferită. Obținerea pe suprafața aliajului $W+10\%Re$ meniscurilor cu înălțime mai mare în comparație cu înălțimea acestora pe suprafața wolframului de puritate tehnică se explică prin „*efectul reniu*”. Metalele, așa cum sunt, W și Mo au temperatura de topire mare, sunt fragile și în unele cazuri se limitează aplicabilitatea acestora. Alierea acestor metale cu Re duce la creșterea plasticității, rezistenței la uzură, micșorarea temperaturii de trecere în stare fragilă etc. În rezultatul cercetărilor experimentale s-a confirmat, că unghiul de la vârf pentru majoritatea meniscurilor se află în limitele $88^{\circ} - 92^{\circ}$. În afară de aceasta în unele cazuri, pe vârfurile meniscurilor se observă prezența a unei picături sferice de metal în stare solidă. Aceasta ne vorbește despre faptul, că picătura dată, de dimensiuni nanometrice, nu a fost prelevată la timp și s-a cristalizat în momentul extragerii, anume în vârful meniscului. Nu în toate cazurile, se obțin meniscuri ascuțite la vârf. Acest fenomen se explică prin aceea, că în procesul descărcării electrice în impuls a avut loc contopirea acestuia cu meniscul extras de pe suprafața celui alt electrod, adică a catodului. Atât parametrii geometrici ale meniscurilor (conurilor Taylor), cât și valorile parametrilor electrodinamici (valorile curentului în impuls, durata impulsului, tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare, valorile căderii tensiunii pe interstițiu) sunt prezentate în tabelul 3.3. Diferența de potențial între electrozi (U_s) constituia 21 V. Este necesar de menționat, că în procesul determinării influenței energiei degajate în interstițiu asupra geometriei meniscurilor (conurilor Taylor) se modifica capacitatea bateriilor de condensatoare și tensiunea de încărcare ale acestora.

Tabelul 3.3. Înălțimea meniscurilor extrase de pe suprafața anodului confecționat din W ca funcție de capacitatea bateriei de condensatoare, tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare, durata impulsului de descărcare și energia degajată în interstițiu

Nr.	Eșantionul	U_c, V	C, F	I_m, A	$\tau, \mu s$	W_s, J	$h_m, \mu m$	$d_m, \mu m$
1	I	60	100	100	100	0.072	29	50
2			200	147	125	0.144	34	61
3			300	165	160	0.216	41	77
4			400	180	180	0.288	55	98
5			500	187	200	0.36	64	112
6			600	200	220	0.432	71	114
7	II	100	100	280	100	0.2	55	82
8			200	417	125	0.4	72	125
9			300	450	160	0.6	84	157
10			400	500	180	0.8	99	164
11			500	535	200	1	112	176
12			600	585	220	1.2	128	166
13	III	120	100	596	100	0.288	69	97
14			200	618	125	0.576	88	121
15			300	648	160	0.864	94	159
16			400	669	180	1.152	129	141
17			500	714	200	1.44	132	155
18			600	734	220	1.728	123	147
19	IV	160	100	761	100	0.45	71	135
20			200	793	125	0.9	106	148
21			300	817	160	1.35	128	149
22			400	834	180	1.8	149	178
23			500	885	200	2.25	142	193
24			600	935	220	2.7	114	171
25	V	200	100	768	100	0.8	100	155
26			200	935	125	1.6	129	191
26			300	1100	160	2.4	139	194
28			400	1235	180	3.2	104	135
29			500	1268	200	4	91	180
30			600	1335	220	4.8	69	138

La rândul său variația capacității provoca schimbarea curentului maxim în circuitul de descărcare, respectiv energiei și a duratei impulsului de descărcare. În procesul descărcărilor electrice în impuls, prelevarea materialului are loc de pe suprafața vârfurilor conurilor Taylor sub formă de particule separate, sau sub formă de particule elementare datorită câmpului electric, dar nu doar sub acțiunea depresiunii formate în bula de gaz.

Pentru a compara rezultatele experimentale cu cele teoretice au fost construite dependențele înălțimii meniscurilor ca funcție de energia degajată în interstițiu. În fig. 3.5 sunt prezentate dependențele înălțimii meniscurilor în funcție de energia acumulată pe bateria de

condensatoare (durata impulsului de descărcare) pentru diferite valori ale tensiunii de încărcare a bateriei de condensatoare, respectiv, pentru diverse valori ale energiei degajate în interstițiu.

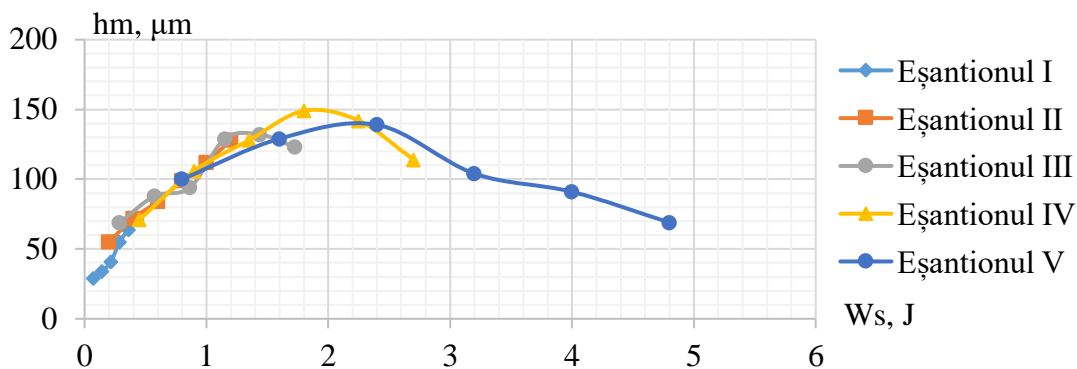


Fig. 3.5. Dependența înălțimii meniscurilor în funcție de energia degajată în interstițiu

Pentru eșantionului I (parametrii energetici ai celor IV eșantioane pot fi vizualizați în tab. 3.3), odată cu mărirea energiei, înălțimea meniscurilor crește practic liniar. Un fenomen asemănător are loc și pentru eșantionului II. Pentru energii mai mari (eșantionul III, IV și V), cu creșterea energiei, înălțimea conurilor Taylor crește până la o anumită valoare după ce începe să scadă considerabil (fig. 3.5). Aceasta lucru se explică prin faptul, că electrozilor în cazul dat li se transmite o mai mare parte de energie, datorită cărui fapt are loc prelevarea anumitei cantități de material de pe suprafața metalului perturbat până la formarea completă a meniscurilor, iar volumul inițial al metalului topit aflat în stare de perturbare se micșorează. Analizând curbele prezentate în fig. 3.5, vom conclud, că asperitățile conice obținute în urma aplicării DEI sporesc în dimensiuni, dacă mărim energia degajată în interstițiu de la 0,072 J până la 1,8 – 2,5 J aproximativ. Dacă continuăm să mărim cantitatea de energie degajată în interstițiu (mai mult decât 2,5 J), atunci înălțimea asperităților nu se mărește, sau rămâne aceeași, dar se micșorează considerabil, deoarece la energii mai mari, se manifestă deja alte efecte ale procesului de EE.

3.4. Influența duratei impulsului de curent asupra înălțimii meniscurilor

Un rol nu mai puțin important îl joacă durata impulsului, dacă durata impulsului constituie $\tau < 10 \mu s$, atunci practic 90% de metal se evaporă sub formă de vapori, iar cu creșterea duratei impulsului, cantitatea de metal înlăturată sub formă de vapori se micșorează. Deci, pentru cazurile analizate mai sus, prelevarea materialului are loc nu numai sub formă de vapori, dar și în formă lichidă. În procesul cercetărilor experimentale s-a observat, că durata impulsului de descărcare influențează considerabil înălțimea meniscurilor. S-a stabilit, că pentru valori constante ale duratei impulsului de descărcare înălțimea meniscurilor (conurilor Taylor) crește cu mărirea energiei degajate în interstițiu. Dacă menținem energia constantă și modificăm durata impulsului de

descărcare, practic obținem același tablou, adică înălțimea meniscurilor formate pe suprafața anodului crește în funcție de durata impulsului (vezi fig. 3.6). Acest fenomen poate fi explicat prin inertitatea proceselor, cauzat de proprietățile materialului electrozilor și durata acțiunii forțelor câmpurilor electrice.

În tabelul 3.4 sunt prezentați parametrii geometrici și anume înălțimea meniscurilor extrase ca funcție de durata impulsului de descărcare pentru diferite valori ale energiei degajate în interstițiu. Este necesar de menționat, că durata impulsului de descărcare influențează nu numai înălțimea meniscurilor, ci și dimensiunile diametrelor bazelor acestora. Cu alte cuvinte se poate afirma, că creșterea duratei impulsului de descărcare duce la creșterea diametrelor bazelor meniscurilor. În cazul, când durata impulsului de descărcare este o valoare constantă, iar energia acumulată pe bateria de condensatoare variază în creștere, se observă același fenomen (fig. 3.6).

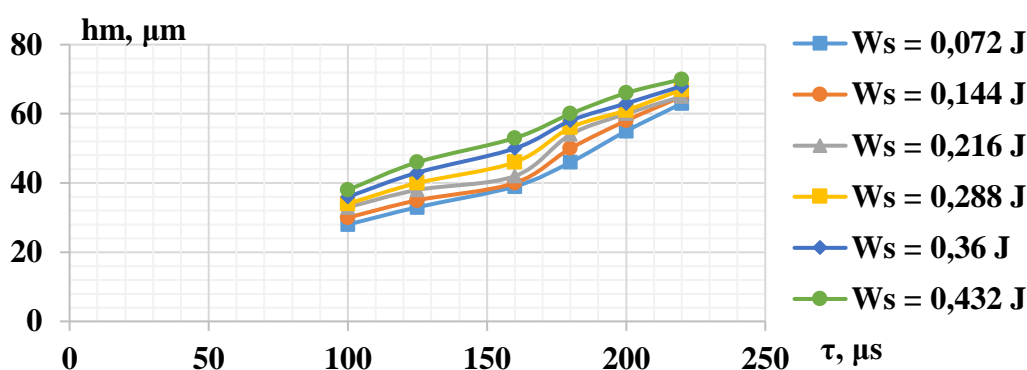


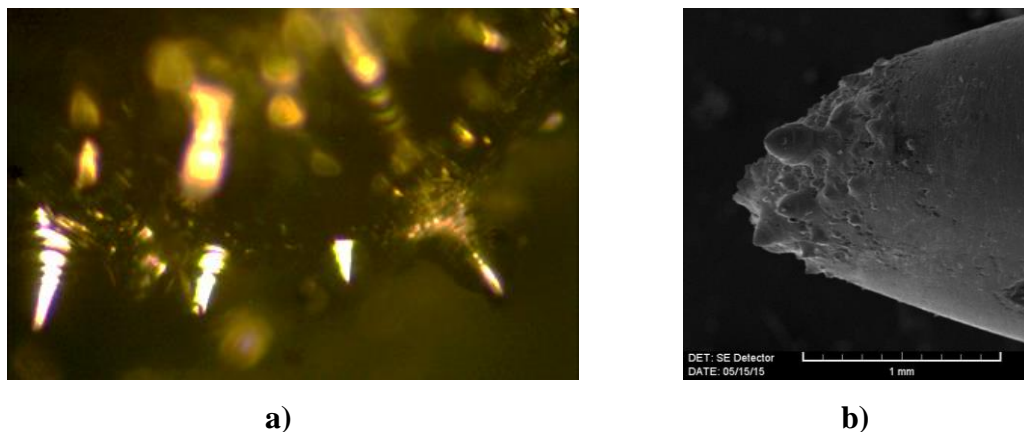
Fig. 3.6. Dependența înălțimii meniscurilor ca funcție de durata impulsului de descărcare (pentru $S = 0,2 \text{ mm}$)

După cum se vede din graficele prezentate în figurile 3.4, 3.5 și 3.6, energia și durata impulsului sunt parametrii importanți, ce influențează formarea meniscurilor pe suprafețele metalelor. Rezultatele obținute pot fi explicate prin faptul, că petele electrodice prin care canalul de conductivitate al DEI contactează cu suprafața prelucrată se află la o anumită înălțime față de aceasta, pe de o parte, iar mărimea intensității curentului electric de descărcare este funcție de proprietățile materialului prelucrat. Creșterea diametrului bazelor meniscurilor pentru cazurile când durata impulsurilor de descărcare se menține constantă, iar energia acumulată pe bateria de condensator crește, se explică prin aceea, că mărirea energiei duce la dilatarea canalului de descărcare și corespunzător, la mărirea diametrelor petelor electrodice, care la rândul lor formează legătura între canalul de plasmă și suprafața anodului [7, 152]. Apariția meniscurilor, orientarea lor, precum și dimensiunile acestora, pentru cazul unei descărcări solitare, indică direct asupra faptului, că ele nu pot apărea din motivul depresiunii din canalul de plasmă, și sunt cauzate de acțiunea câmpului electric în lungul razei vectoriale de la pata electrodică spre suprafața prelucrată.

Tabelul 3.4. Înălțimea meniscurilor extrase de pe suprafața anodului confecționat din W ca funcție de durata impulsului de descărcare (la interstițiu constant, $S = 0,2 \text{ mm}$)

Nr.	Eșantionul	$W_s, \text{ J}$	$\tau, \mu\text{s}$	$h, \mu\text{m}$	$d, \mu\text{m}$
1	I	0,072	100	28	54
2			125	33	82
3			160	39	106
4			180	46	119
5			200	55	134
6			220	63	160
7	II	0,144	100	30	56
8			125	35	84
9			160	40	109
10			180	50	129
11			200	58	140
12			220	65	162
13	III	0,216	100	33	82
14			125	38	103
15			160	42	112
16			180	54	133
17			200	60	152
18			220	65	163
19	IV	0,288	100	34	84
20			125	40	109
21			160	46	119
22			180	56	135
23			200	61	151
24			220	67	168
25	V	0,36	100	36	86
26			125	43	114
27			160	50	130
28			180	58	144
29			200	63	157
30			220	68	170
31	VI	0,432	100	38	104
32			125	46	120
33			160	53	134
34			180	60	155
35			200	66	169
36			220	70	178

În cadrul cercetărilor experimentale s-a observat, că numărul și dimensiunile asperităților conice depind și de neregularitățile prezente pe suprafețele ambilor electrozi, forma și dimensiunile acestora. Acest fapt este dovedit de următoarea experiență: în calitate de electrod-sculă, în două cazuri s-a utilizat același material de bază al electrozilor-scule, primul sub formă de cilindru obișnuit (capăt plan) și al doilea, același cilindru, dar care a fost supus ascuțirii, cu unghiul de la vârful de 30° . Electrozii-scule au fost conectați în circuitul de descărcare în calitate de anod (chiar, dacă de obicei aceștia erau conectați în calitate de catod) la același regim energetic.



**Fig. 3.7. Electrocul-sculă cilindric, cu capătul ascuțit, conectat în calitate de anod:
a) imagine obținută la microscopul optic; b) imagine SEM**

Materialul de execuție al electrozilor-scule în acest caz era: W + Re 20 %; tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare constituia $U_C = 240 \text{ V}$, capacitatea era setată la valoarea de $C = 600 \text{ } \mu\text{F}$, mărimea interstițiului inițială era reglată la $S = 0,3 \text{ mm}$, $\varnothing_{\text{sculei}} = \varnothing_{\text{probei}} = 4 \text{ mm}$. Numărul de descărcări electrice în impuls a fost setat la $n = 10$.

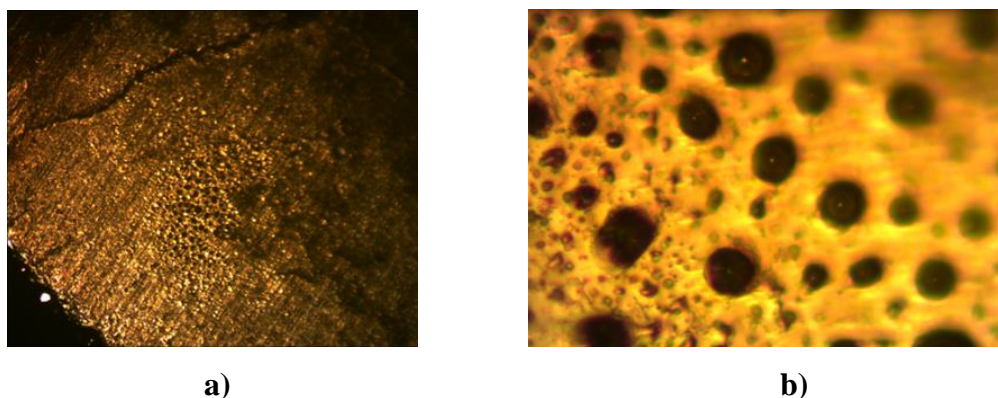


Fig. 3.8. Electrocul-sculă cilindric, cu capătul plan, conectat în calitate de catod: a) mărirea optică 10 x; b) mărirea optică 40 x [19]

În rezultat, pe electrocul-sculă cu capătul ascuțit (vezi fig. 3.7) s-a format o multitudine de asperități conice de dimensiuni mari, acoperind practic tot vârful ascuțit al electroculului conectat în calitate de anod, iar pe electrocul cu capătul plan, conectat în calitate de catod, apar crateresemisferice cu asperități mult mai mici, plasate în centrul acestora (vezi fig. 3.8). Cert este faptul, că nu s-a depistat nici o asperitate de dimensiuni comparabile cu asperitățile obținute pe suprafețele electrozilor ascuțiți la vârf. De aici se poate formula concluzia, că asperități conice se obțin pe ambele suprafețe ale electrozilor (și pe suprafața anodului și pe cea a catodului), dar pe suprafața anodului, asperitățile extrase sunt de dimensiuni cu mult mai mari. Un alt fenomen, care s-a

observat în cadrul realizării experimentelor este legat de rugozitatea suprafețelor pieselor și a oxizilor formați în timp pe suprafețele acestora. Dacă suprafețele plane sunt inițial lustruite, atunci pe aceste probe se obțin asperități mai mici sau în genere asperitățile conice nu se formează. S-a demonstrat, că piesele nu trebuie șlefuite și curățate suplimentar. Stratul de oxizi prezent pe suprafața pieselor facilitează extragerea asperităților conice. Observarea în cauză denotă faptul și confirmă, că nu este necesar a realiza careva operații suplimentare de curățare a suprafețelor probelor înainte de prelucrarea prin aplicarea DEI, iar cu cât mai puține operații suplimentare celor de bază, cu atât mai bine.

Așa dar, asperități conice se pot obține prin aplicarea DEI pe toate suprafețele conductoare de electricitate, indiferent de polaritatea electrozilor, totuși cum a mai fost menționat efectul este mai vădit pe suprafețele anodului. Dacă ne referim la suprafețe, cert este, că pe suprafețele plane, este mai anevoios de a extrage asperități conice decât pe suprafețe cilindrice. Aceasta se datorește în mare măsură distribuției câmpului electric între electrozii-scule. În cadrul experiențelor de a obține asperități conice pe probele plane este important de a menține densitatea curentului și aria minimală a catodului. În urma mai multor încercări, la diverse valori a energiei degajate în interstițiu, extragerea asperităților a avut cel mai mare succes, dacă se utilizau electrozi-scule de tipul firelor cilindrice cu diametrul de 0,2 mm. Asperități conice au fost formate și cu utilizarea altor tipuri de electrozi, dar randamentul cel mai înalt se obținea anume pentru firele cilindrice cu diametrul de 0,2 mm. La cercetarea suprafețelor prelucrate cu utilizarea microscopelor optice se identifică mai greu caracteristicile asperităților conice, dar la cercetarea acestor suprafețe prin microscopie electronică, se observă clar toate conurile și cele cu diametre obișnuite și cele cu diametre mai mici de 40 μm . Valoarea optimă a mărimii interstițiului și pentru electrozii confecționați din wolfram de puritate tehnică constituie 0,2 mm, iar pentru aliajele wolframului cu reniu (10 și 20 %) este de 0,25 mm.

3.5. Analiza SEM a suprafețelor prelucrate

O informație mai exactă despre dimensiunile și morfologia asperităților de tip con Taylor poate fi obținută prin efectuarea analizei SEM. În majoritatea cazurilor dimensiunile asperităților de tip con Taylor depind de parametrii energetici.

În fig. 3.9 este reprezentată morfologia suprafețelor electrozilor care au participat în procesul de prelucrare: materialul W+Re 10%; capacitatea bateriei de condensatoare $C = 200 \mu\text{F}$, mărimea interstițiului $S = 0,2 \text{ mm}$, diametrele electrozilor $\varnothing_{\text{sculei}} = \varnothing_{\text{probei}} = 0,2 \text{ mm}$.

Parametrii energetici definesc posibilitatea extragerii asperităților conice. Practic a fost stabilit, că dacă instalația utilizată în cadrul cercetărilor experimentale este alimentată cu tensiuni

mai mici decât 50 V, pentru capacitatea bateriei de condensatoare egală cu $C = 200 \mu\text{F}$, nu se mai obțin asperități conice pe suprafețele probelor, nici pe catod, nici pe anod. Reiese, că energia degajată în interstițiu, nu este suficientă pentru extragerea asperităților conice. La aceste energii pe suprafețele electrozilor se atestă mici craterare și straturi de oxizi. La fel s-a observat, că influența mărimii capacității bateriei de condensatoare în acest sens nu este atât de semnificativă, conurile se obțin practic la fel de reușit la valori ai capacităților de $C = 200 \mu\text{F}$ cum și la valori de $C = 600 \mu\text{F}$ [24]. Atât dimensiunile geometrice ale asperităților conice, cât și mărimea unghiului de la vârf influențează ariile active ale electrozilor.

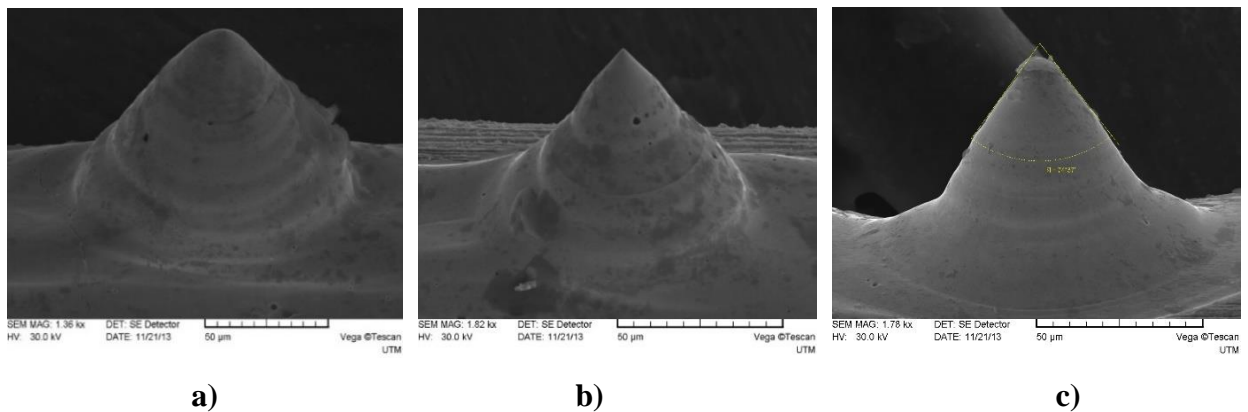


Fig. 3.9. Imagini SEM ale asperităților conice, obținute la diferite energii degajate în interstițiu [59]: a) $W_s = 0,86 \text{ J}$; b) $W_s = 0,66 \text{ J}$; c) $W_s = 0,34 \text{ J}$

La prelucrarea probelor cilindrice conectate în circuitul electric în calitate de anod cu electrozi-scule cu diametre de 2 ori mai mare, adică cu diametre de 0,4 mm, atunci pe suprafața prelucrată deja nu se mai obțin la aceiași parametri energetici și ai interstițiului, asperități conice, dar numai ondulații la suprafața pieselor (vezi fig. 3.10 a și b).

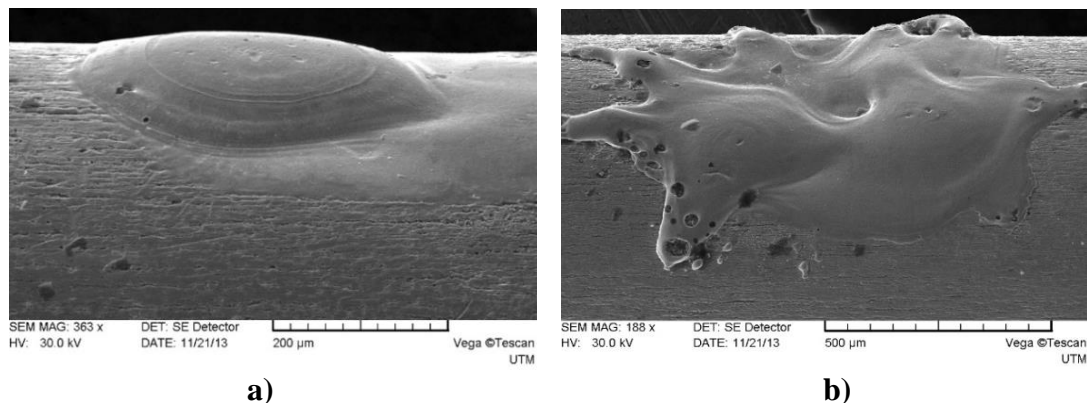


Fig. 3.10. Morfologia suprafețelor probelor participante în procesul de prelucrare [19]: $W + \text{Re } 10\%$; electrodul-piesă conectat în calitate de anod; a) $W_s = 0,49 \text{ J}$; b) $W_s = 0,86 \text{ J}$; $S = 0,3 \text{ mm}$; $\varnothing_{\text{sculei}} = \varnothing_{\text{probei}} = 0,4 \text{ mm}$

Putem afirma, că în acest caz, energia impulsului se distribuie pe o suprafață mai mare [62], iar câmpul electric se distribuie diferit. Deoarece volumul metalului topit în acest caz este de cca 4 ori mai, forțele de greutate și tensiune superficială depășesc forțele electrodinamice, astfel se împiedică formarea conurilor. În acest caz, indiferent de poziționarea în spațiu a electrozilor, practic se obține același rezultat. De aici poate fi obținută concluzia, că componenta forței de greutate nu este așa de esențială, anume în formarea asperităților conice, ci doar influențează puțin înălțimea acestora.

Dacă vorbim de valoarea amplitudinii a intensității curentului electric, atunci aceasta poate fi obținută de valori maxime pentru capacități mici, datorită micșorării importante a duratei impulsului, adică curentul va fi mai mare când capacitatea bateriei de condensatoare, C va fi mai mic. Practic a fost observat, că la micșorarea diametrului catodului (electrod-sculei), nemodificând ceilalți parametri, am obținut asperitățile conice. Acest fapt ne dovedește importanța de a menține densitatea curentului la anumite valori pentru extragerea cu succes a asperităților conice [24].

Experimental a fost demonstrat, că important este, ca cel puțin unul dintre electrozi să fie de dimensiuni mici, dar totuși mai efectiv este, dacă catodul (electrodul-sculă) posedă o arie a suprafeței active mai mică. Aceasta facilitează la sporirii intensității câmpului electric și al celui termic la suprafața anodului. Astfel, se propune a aplica electrozi-scule cu diametre de 0,2 mm, conectați în circuitul de descărcare în calitate de catod și mărimea interstițiului cuprins în intervalul de 0,15 – 0,35 mm pentru a spori probabilitatea extragerii meniscurilor conice la maxim. În acest caz aria suprafeței active este de $\pi \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$, sau aproximativ egal cu $3,14 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$. Din figura 3.9 se observă, că asperități conice se obțin și pe probe plane, dacă aplicăm un electrod-sculă cu diametrul de 0,2 mm. În aceleași condiții, aplicând catodi cu diametre de $d = 0,4 \text{ mm}$ și mai mare, probabilitatea extragerii asperităților conice se micșorează. În fig. 3.11 sunt reprezentate două urme a descărcărilor electrice în impuls, care au avut loc pe suprafețe plane. Piesa este confecționată din oțel inoxidabil, de grosimea 4 mm. Din cauză, că se poate obține asperități conice așa de aproape una de alta, rezultă, că suprafața activă poate fi sporită considerabil.



Fig. 3.11. Vederea generală a suprafeței piesei plane în urma prelucrării prin metoda descărcărilor electrice în impuls, obținută prin microscopie optică [82]

În fig. 3.12, este reprezentat aceeași piesă, dar obținută prin microscopie electronică. Vizual se observă, că microscopia electronică este mult mai detaliată, se observă complexitatea suprafeței prelucrate. Lateral și la baza meniscurilor conice se observă ondulații, la centru, în vârful asperității se observă raza de curbură, iar în jurul asperității se observă zona influențată de petele electrodice reci și calde. Această zonă are o geometrie complicată, cu aspect neuniform.

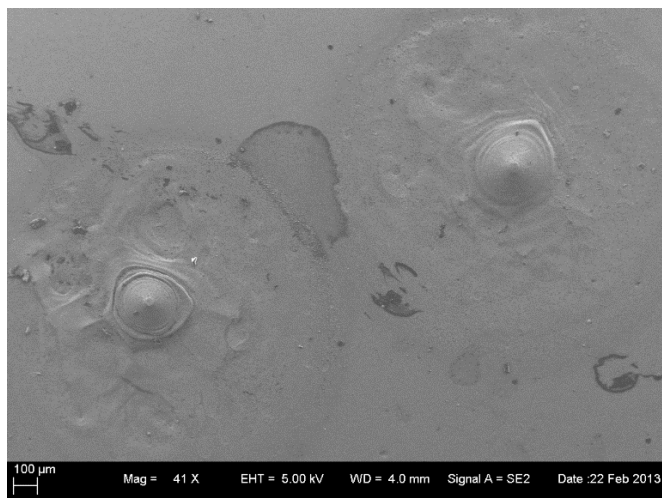


Fig. 3.12. Vederea generală a suprafeței piesei plane în urma prelucrării prin metoda descărcărilor electrice în impuls, obținută prin microscopie electronică

În fig. 3.13 este reprezentat o asperitate conică obținută pe suprafața plană a piesei din W+10%Re cu grosimea de 4 mm, conectată în circuitul de descărcare la fel în calitate de anod. Regimul energetic al generatorului constituia: tensiunea de alimentare a bateriei de condensatoare $U = 50$ V, valoarea capacității bateriilor de condensatoare $C = 200$ μ F, interstițiul $S = 0,25$ mm. În această imagine se observă la baza asperității conice, prezența unor fisuri. Aceste fisuri au apărut în urma cristalizării aliajului topit. Din motiv, că metalul topit se solidifică rapid, deoarece masa piesei este mare și în urma conductibilității termice, energia termică se distribuie în zonele înconjurătoare, temperatura în zona prelucrată scade rapid.

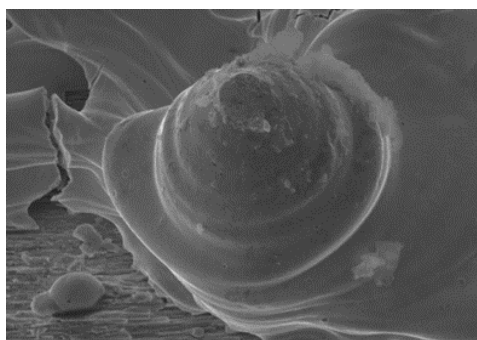


Fig. 3.13. Vedere generală a fisurilor formate la baza asperității conice [59]

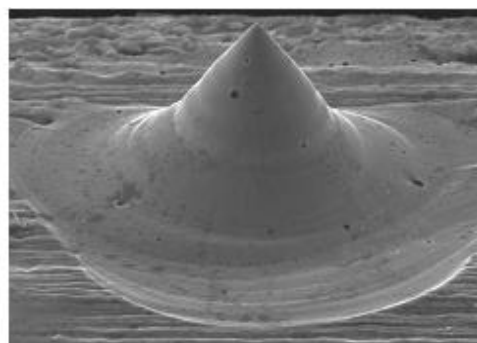


Fig. 3.14. Con Taylor extras de pe suprafețe cilindrice

În fig. 3.14 este prezentată vederea generală a asperității (conurilor Taylor) extrase de pe suprafețele cilindrice a firelor executate din wolfram în urma descărcărilor electrice în impuls ($U_c = 60$ V, $C = 200$ μ F, $S = 0,3$ mm, diametrul firului $d = 0,25$ mm). Din motiv, că firul are dimensiuni reduse, comparativ cu piesele plane, temperatura în zona prelucrată se micșorează mai lent. Se vede clar, că zona din apropierea asperității conice nu prezintă fisuri. Tot în fig. 3.14 se mai observă, că asperitatea conică este destul de ascuțită, adică la vârf nu se observă porțiunea lipsă, precum se arată în fig. 3.13, unde o porțiune a vârfului asperității lipsește.

Analiza SEM a permis a observa, că cu mărirea de mai departe a tensiunii de încărcare a bateriilor de condensatoare până la valori de $U_c = 80$ V, cu alte cuvinte, măbind energia degajată în interstițiu, la o singură descărcare electrică în impuls, se observă un tablou de extragere multiplă a asperităților conice (vezi fig. 3.15 și Anexa 5). Acest fenomen ne indică despre existența a mai multor canale simultan de descărcare, prin care curg curenți paraleli de aceeași direcție. Totuși, asperitatea de bază prezentată în fig. 3.15, în comparație cu asperitatea conică prezentată în fig. 3.14 se deosebesc după formă, cea din fig. 3.14, fiind mai ascuțită. Asperitățile conice extrase prin aplicarea metodei DEI pot servi în calitate de concentratoare a câmpurilor termice și electrice în zonele active ale catodilor.

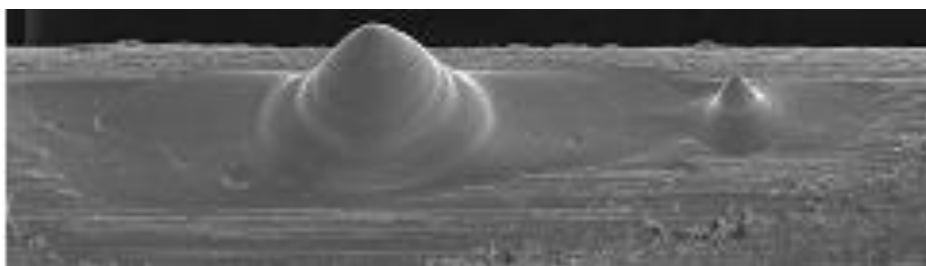


Fig. 3.15. Tabloul de extragere multiplă a asperităților conice la descărcări electrice solitare: electrodul-piesă prezintă un fir cilindric executat din wolfram; $W_s = 0,288$ J; $S = 0,3$ mm; $d_p = 0,25$ mm; $d_s = 0,2$ mm

În baza cercetărilor anterioare [7, 24, 88, 144] și celor prezentate în cadrul acestei teze, s-a confirmat încă odată, că mecanismul eroziunii electrice este rezultat al dezvoltării undelor capilare pe suprafața metalului lichid sub acțiunea câmpurilor electrice puternice generate de petele electronice „reci” și „calde”. Aplicarea aparatajului contemporan de cercetare (SEM) a permis a stabili, că suprafața laterală a asperităților formate este una complicată și prezintă ondulații de ordin micro- și nanometric (vezi fig. 3.16). Aceste ondulații probabil sunt cauzate de variația curentului în descărcarea electrică. În lucrările publicate de autorii [90, 92], a fost afirmat, că DEI este una multicanalică, unele canale de descărcare „mor”, iar altele „se nasc”, din care cauză curentul descărcării electrice solitare poartă un caracter pulsatoriu.

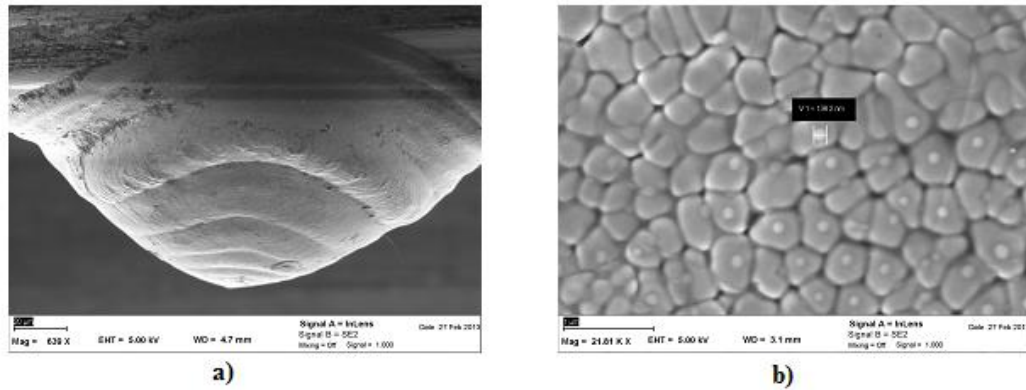


Fig. 3.16. Suprafața laterală a asperității: a) prezența undelor concentrice; b) prezența blocurilor de mozaic pe suprafața laterală a asperității conice [72]

Aceste ondulații, posibil sunt cauzate de variația curentului în descărcarea electrică. Anterior a fost deja demonstrat, că DEI este una multicanală. Unele canale de descărcare „mor”, iar altele se „nasc”, din care cauză curentul DE solitare poartă un caracter pulsatoriu. Această ipoteză este confirmată experimental de către autorii lucrării [21, 36]. Din cele prezentate în fig. 3.17 se observă, că în decursul unei descărcări solitare are loc variații atât a impulsului de tensiune, cât și a impulsului de curent. Variația intensității curentului electric într-un singur impuls este multiplă, fapt prin care se poate explica formarea a mai multor canale și respectiv extragerea a mai multor asperități conice în decursul acestuia.

Analiza SEM de mai departe a suprafeței laterale a conurilor de tip Taylor a demonstrat, că în procesul de solidificare și constituire a grăunților de material solid, pe suprafața acestora se cristalizează suplimentar și asperități de dimensiuni nanometrice. Structura și analiza de fază a materialului acestora necesită studii suplimentare. Este necesar de menționat, că extragerea asperităților sub formă de meniscuri conice (conurilor Taylor) se efectua la o descărcare solitară, dar și la descărcări multiple. Cu creșterea numărului de descărcări electrice, se observă inițial extragerea meniscurilor conice cu oxidarea intensivă a suprafețelor acestora în continuare.

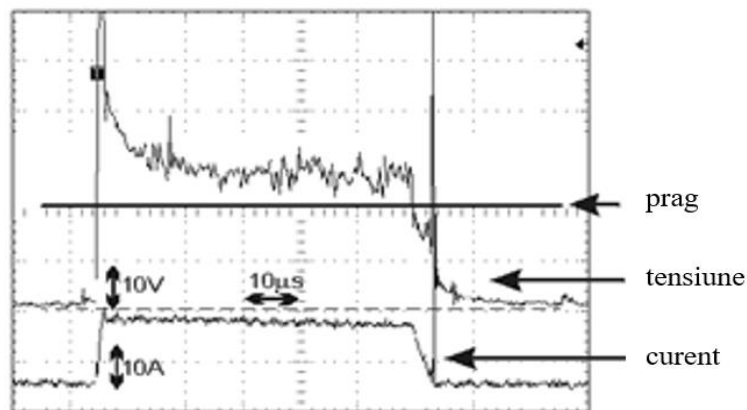


Fig. 3.17. Caracterul pulsator al descărcării electrice solitare [72]

Apariția meniscurilor, orientarea lor, precum și dimensiunile acestora pentru cazul unei descărcări solitare, indică direct asupra faptului, că ele nu pot apărea din motivul depresiunii din canalul de plasmă, ci sunt cauzate de acțiunea câmpului electric în lungul razei vectoriale de la pata electrodică spre suprafața prelucrată a piesei.

3.6. Rezultate, privind analiza morfologiei și compoziției chimice a suprafețelor prelucrate

Analiza morfologiei și a compoziției chimice a suprafeței piesei cilindrice, reprezentate în fig. 3.18, a fost efectuată la Universitatea „CAU” din Kiel, Germania.

În funcție de mediul de lucru din interstițiu pe suprafața asperităților pot fi sintetizate faze ce conțin oxigen, azot, hidrogen și carbon, care la rândul lor modifică proprietățile funcționale a catozilor aplicați la emisie termoelectronică (vezi fig. 3.18) [145, 153].

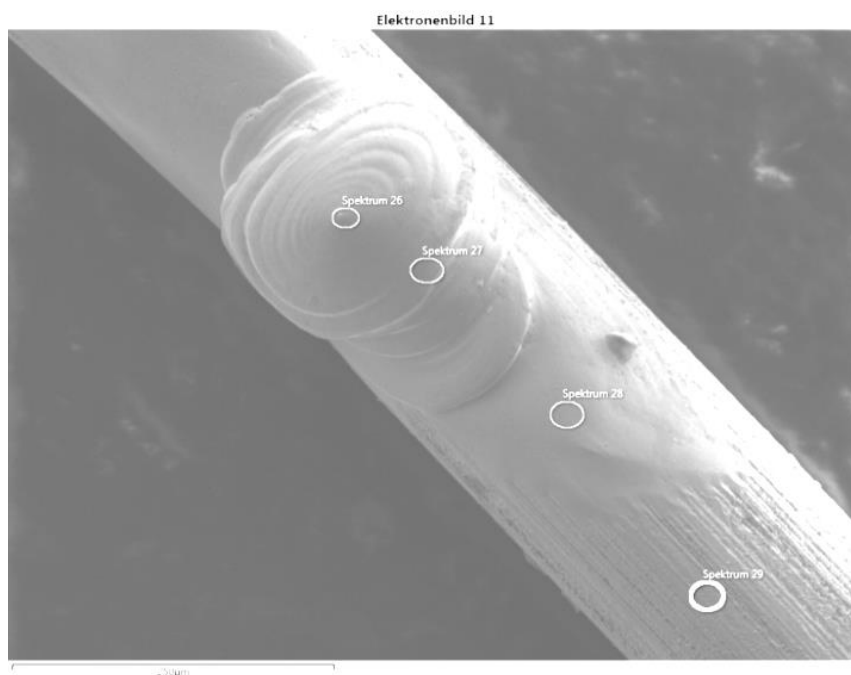


Fig. 3.18. Analiza EDX realizată în patru zone diverse ale electrodului-piesă

Rezultatele analizei EDX prezentate grafic și tabelar ne permit a discuta cu referire la conținutul chimic a materialului electrodului-piesă, conectat în circuitul de descărcare în calitate de catod, în diferite zone. Astfel, s-a ales 4 puncte care au fost supuse analizei EDX, cu scopul determinării compoziției chimice în: vârful asperității conice, la baza asperității, în zona din apropierea asperității și într-o zonă, care nu a fost influențată de efectele DEI. Rezultatele obținute ne vor permite să înțelegem ce schimbări au avut loc în materialul de bază al electrodului-sculă în urma descărcărilor electrice în impuls și anume să cunoaștem ce compoziție chimică este în materialul din care este format proba și deja însuși meniscul conic.

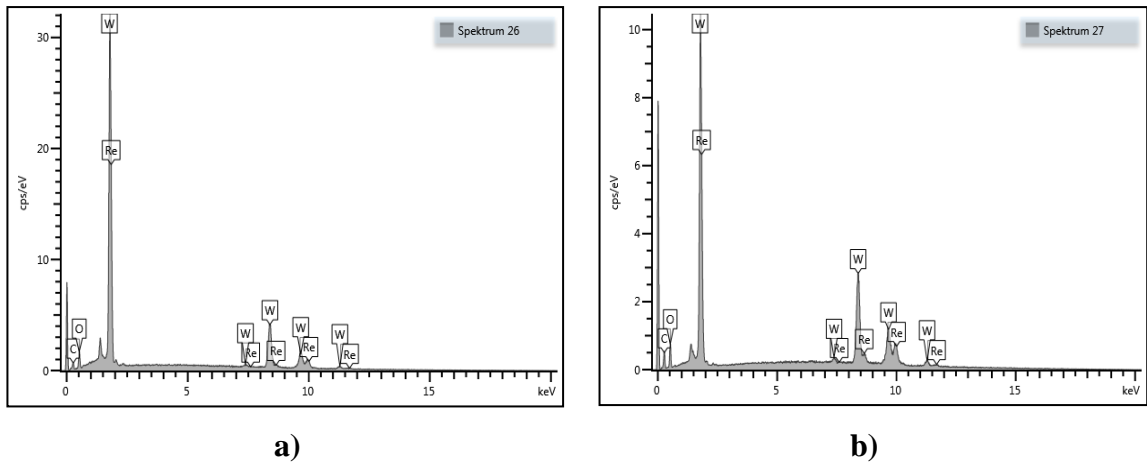


Fig. 3.19. Analiza EDX a unui menisc extras din catodul de Wolfram: a) în vârful meniscului; b) la baza meniscului

În fig. 3.19 sunt reprezentate diagramele compoziției chimice, obținute prin analiza EDX pe următoarele suprafețe: a) în vârful asperității conice (vezi în fig. 3.18, punctul 26); b) la baza acestuia (vezi în fig. 3.18, punctul 27).

Tabelul 3.5. Conținutul chimic în centrul meniscului conic (punctul 26 din fig. 3.18)

Elemente depistate	Tip de linie	Concentrația aparentă	k-raport	Masa, %	Masa, % (Sigma)	Nume implicit
O	Seria K	21.73	0.07313	9.33	0.32	SiO2
W	Seria M	278.51	2.78511	85.07	0.57	W
Re	Seria M	16.00	0.15995	5.59	0.53	Re
În total:				100.00		

Tabelul 3.6. Conținutul chimic la baza meniscului conic (punctul 27 din fig. 3.18)

Elemente depistate	Tip de linie	Concentrația aparentă	k-raport	Masa, %	Masa, % (Sigma)	Nume implicit
O	Seria K	9.95	0.03347	12.12	0.38	SiO2
W	Seria M	87.02	0.87023	78.02	0.62	W
Re	Seria M	9.72	0.09724	9.85	0.59	Re
În total:				100.00		

În fig. 3.20 sunt reprezentate diagramele compoziției chimice, obținute prin analiza EDX pe suprafețele din apropierea asperității conice: a) în zona din apropierea asperității (vezi în fig. 3.18, punctul 28); b) zonă neinfluențată de acțiunea DEI (vezi în fig. 3.18, punctul 29). Tabelele 3.5 și 3.6 sunt prezentate cu scop ca să elucideze valorile din cadrul fig. 3.19, a și b, în caz similar și tabelele 3.5 și 3.6 sunt prezentate cu scop ca să elucideze valorile din cadrul fig. 3.20, a și b, deoarece, conform acestor diagrame nu se observă clar aceste date.

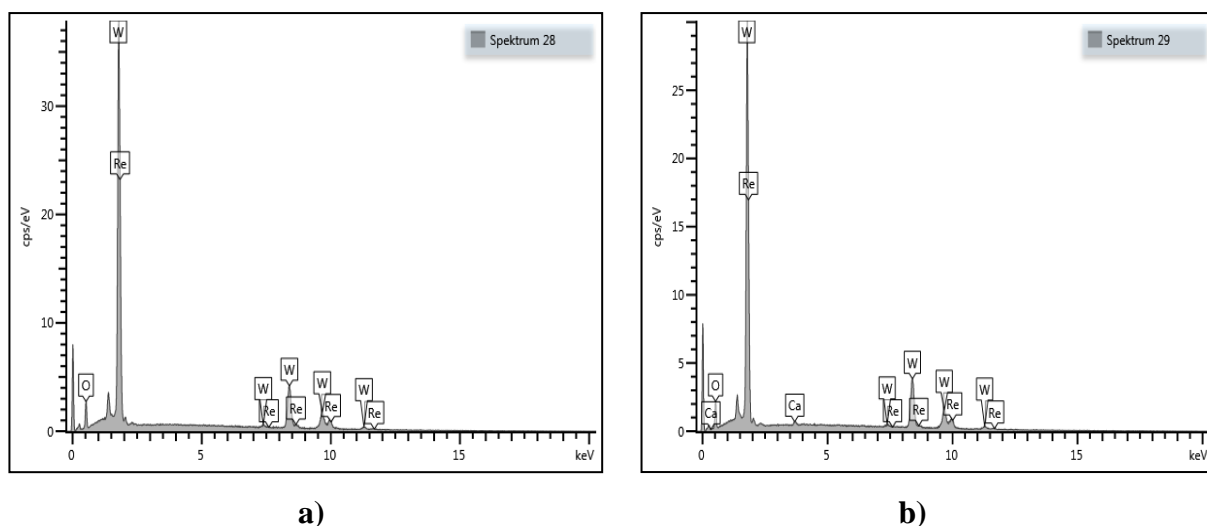


Fig. 3.20. Analiza EDX a zonei cercetate pentru catodul de Wolfram: a) în apropierea craterului; b) un punct arbitrar pe suprafața catodului

Tabelul 3.7. Conținutul chimic a materialului catodului din Wolfram în zona craterului (punctul 28 din fig. 3.18)

Elemente depistate	Tip de linie	Concentrația aparentă	k-raport	Masa, %	Masa, % (Sigma)	Nume implicit
O	Seria K	34.68	0.11670	11.66	0.33	SiO2
W	Seria M	325.68	3.25685	80.09	0.54	W
Re	Seria M	29.56	0.29555	8.24	0.51	Re
În total:				100.00		

Tabelul 3.8. Conținutul chimic al materialului piesei (punctul 29 din fig. 3.18)

Elemente depistate	Tip de linie	Concentrația aparentă	k-raport	Masa, %	Masa, % (Sigma)	Nume implicit
O	Seria K	28.05	0.09440	12.41	0.35	SiO2
Ca	Seria K	1.78	0.01590	0.59	0.08	Wollastonite
W	Seria M	259.02	2.59018	83.94	0.57	W
Re	Seria M	8.26	0.08262	3.06	0.53	Re
În total:				100.00		

Din datele prezentate în tabelele 3.5 – 3.8 și fig. 3.19 (a, b) și 3.20 (a, b), putem constata, că cea mai mare cantitate de oxigen se dizolvă în materialul piesei la baza meniscului și la marginea craterului, loc în care se întrunesc condițiile favorabile pentru aceasta (acțiunea plasmei pe întreaga durată a impulsului, temperatura la periferia canalului de plasmă este mai joasă, procesele de difuziune decurg în starea lichidă a materialului piesei), pe când la vârful asperității conice cantitatea de oxigen dizolvată este mai mică (în acesta au loc procese de vaporizare intensivă, iar solidificarea metalului topit are loc cu viteze de ordinul 10^6 m/s).

3.7. Rezultate științifice obținute, cu aplicarea DEI

În afară de obținerea asperităților conice pe suprafețele metalice ale electrozilor, în cadrul actualei teze, au fost realizate încercări, privind obținerea unui număr mai mare de asperități conice, rezultate, privind dezoxidarea suprafeței meniscurilor, modificarea formei electrozilor-scule și rezultate, privind realizarea microsudurii firelor cilindrice din wolfram de puritate tehnică și aliajul acestuia cu reniu (10 și 20 %). În continuare aceste rezultate vor fi prezentate mai detaliat.

3.7.1. Obținerea unei multitudini de asperități conice pe suprafețele electrozilor metalici

În cadrul fig. 3.21 sunt prezentate rezultatele cercetărilor experimentale, privind obținerea suprafețelor cu microgeometrie prescrisă, în care se observă rezultate, privind extragerea asperităților conice la descărcări electrice solitare, sau multiple.

Este necesar de menționat, că utilizarea generatorului prezentat în fig. 2.3, permite obținerea pe suprafețele metalice, în deosebi ale firelor cilindrice nu numai a unui singur menisc (fig. 3.21 a), dar și a mai multor meniscuri conice (fig. 3.21 b, c, d). Numărul, dimensiunile și forma acestora în mare măsură depinde de parametrii energetici de descărcare, mărimea interstițiului dintre electrozi și poziționarea acestora. În fig. 3.21 a, asperitatea conică s-a format în urma stabilirii următorilor parametri ai generatorului de impulsuri: energia degajată în interstițiu $W_s = 0,144$ J (tensiunea electrică de încărcare a bateriilor de condensatoare egală cu $U = 60$ V, capacitatea bateriei de condensatoare fixată la valoarea $C = 200$ μ F), interstițiul $S = 0,3$ mm, diametrul electrodului-piesă $d_p = 0,25$ mm, diametrul electrodului-sculă $d_s = 0,2$ mm, numărul de descărcări electrice în impuls egal cu $n = 1$. Asperitățile conice extrase, care par a fi gemeni, prezentate în fig. 3.21 b, s-au format în urma stabilirii următorilor parametri: energia degajată în interstițiu $W_s = 0,144$ J (tensiunea electrică de încărcare a bateriilor de condensatoare egală cu $U = 60$ V, capacitatea bateriei de condensatoare fixată la valoarea $C = 200$ μ F), interstițiul $S = 0,2$ mm, diametrul electrodului-piesă $d_p = 0,25$ mm, diametrul electrodului-sculă $d_s = 0,2$ mm, numărul de descărcări electrice în impuls egal cu $n = 1$).

În fig. 3.21 c, asperitățile conice s-au format în urma stabilirii aceluiași regim ca în cazul precedent (vezi datele pentru fig. 3.21 b), doar, că mărimea interstițiului constituia: $S = 0,25$ mm. Aici se observă, că asperitățile conice sunt diferite, în partea stângă se plasează o asperitate conică care este de câteva ori mai mică, decât vecinul ei ce se află în partea dreaptă a acestei imagini (vezi fig. 3.21, c). Un tablou frumos, ai asperităților conice se poate observa în cadrul fig. 3.21, d (vezi imaginea SEM a acestei zone în Anexa 5, fig. A5.1). Aici se observă ușor, prezența a cel puțin 4 asperități te tipul conurilor Taylor, în mijloc două asperități de dimensiuni mijlocii, iar lateral două asperități de dimensiuni reduse. Acest tablou s-a obținut pentru: energia degajată în interstițiu W_s

= 0,256 J (tensiunea electrică de încărcare a bateriilor de condensatoare egală cu $U = 80$ V, capacitatea bateriei de condensatoare fixată la valoarea $C = 200$ μ F), interstițiul $S = 0,3$ mm, diametrul electrodului-piesă $d_p = 0,25$ mm, diametrul electrodului-sculă $d_s = 0,2$ mm, numărul de descărcări electrice în impuls egal cu $n = 1$). Așa dar, la valori ale interstițiului cuprins între 0,2 – 0,25 mm, probabilitatea obținerii mai multor asperități conice la descărcări solitare sporește.

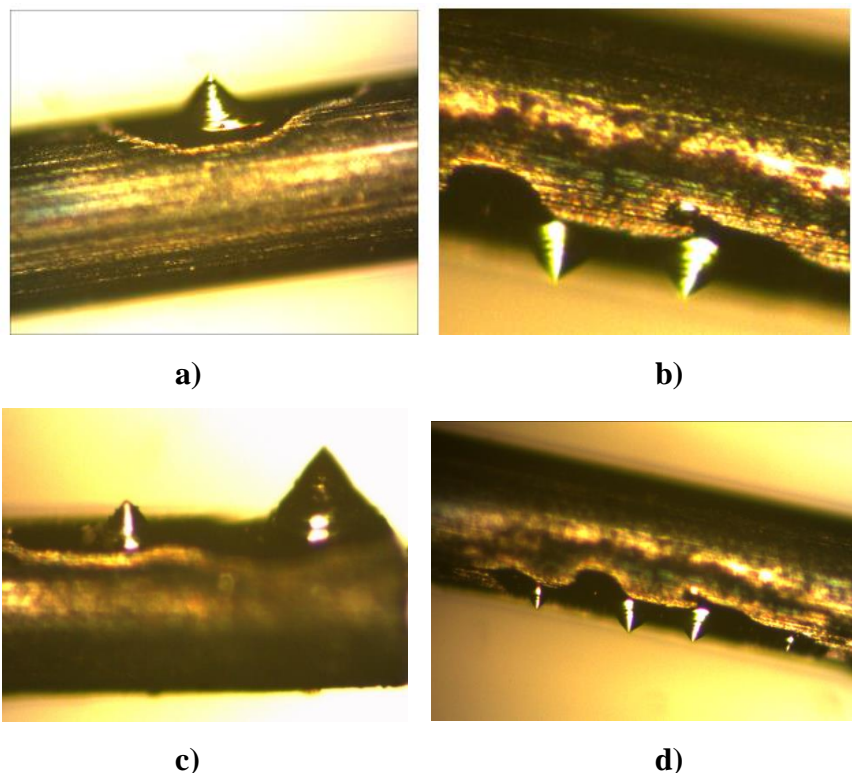


Fig. 3.21. Vederea generală a meniscurilor extrase de pe suprafețele probelor cilindrice:

a) o asperitate; b și c) două asperități; d) patru asperități

Fenomenul obținerii la descărcări electrice solitare a mai multor asperități conice se datorează efectelor termice ce au loc în suprafețele electrozilor în urma distribuției energiei degajate în interstițiu, și respectiv, distribuției ei în coloana de plasmă ce ia naștere între electrodul-sculă și electrodul-piesă supus prelucrării și desigur a constituirii mai multor canale ai curenților electrice de descărcare [62]. Acest efect se poate datora și faptului, că unele canale de conductivitate (canale de plasma) mor datorită efectelor termice de creștere a rezistenței active a conducătorilor pe măsura încălzirii lor. Posibilitatea extragerii a mai multor meniscuri conice de diferite dimensiuni la o singură descărcare, contribuie la sporirea productivității procesului (vezi fig. A5.2.). Desigur, că este posibil a obține mai multe asperități conice și la realizarea DEI repetate ($n \geq 2$) pentru aceeași zonă de prelucrare, dar în acest caz nu se asigură modificarea prescrisă a microgeometriei suprafeței active.

3.7.2. Prezența oxizilor pe suprafețele asperităților conice și dezoxidarea acestora

Pe suprafața laterală a meniscurilor conice s-a observat, în urma microscopiei optice prezența oxizilor. Din literatura de specialitate [35, 91] se cunoaște, că prezența oxizilor inhibă proprietățile de absorbție și emisie a radiației, deoarece se mărește rezistența electrică de la suprafață. În cadrul fig. 3.22 a, se observă diversitatea de culori de pe suprafața asperității conice și în ambele imagini ale acestei figuri (fig. 3.22, a și b), se observă zona influențată termic care depășește cu mult dimensiunile craterului format în urma DEI. Acest tablou nu se obține la așa distanțe mari pe suprafețele plane, deoarece căldura degajată în timpul DEI se absoarbe în tot volumul, pe când la firele subțiri (0,2 – 0,25 mm în diametru) o zonă mai mare este influențată de petele electrodeice.

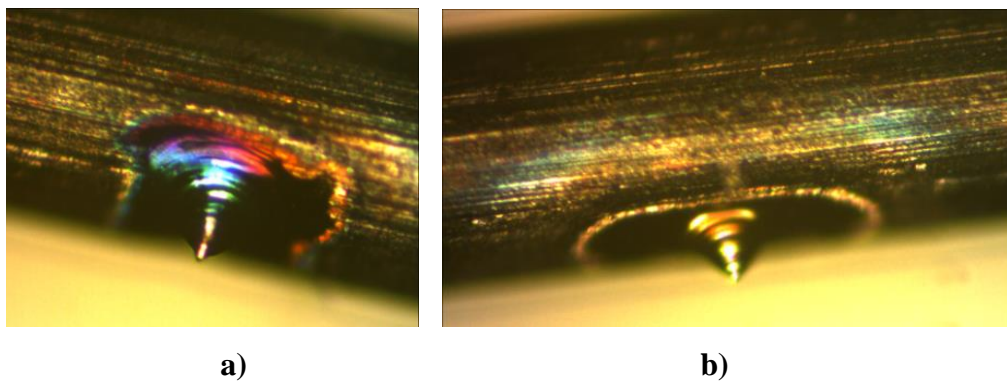


Fig. 3.22. Prezența oxizilor pe suprafețele asperităților conice și în jurul craterului: $W_s = 0,36 \text{ J}$ ($U_c = 60 \text{ V}$, $C = 200 \mu\text{F}$), $S = 0,25 \text{ mm}$, proba – anod, $d_s = d_p = 0,25 \text{ mm}$

Compoziția chimică ale peliculelor de oxizi obținute pe suprafața laterală a asperităților conice, depinde de materialul de execuție al electrodului-sculă și al electrodului-piesă și de compoziția mediului în care are loc prelucrarea propriu zisă. Grosimea peliculei formate este de dimensiuni micro și nanometrice conform rezultatelor autorilor [35, 91, 110].

În timpul primei descărcări (descărcare solitară, de putere) se obține modificarea microgeometriei prin extragerea meniscurilor conice și în continuare aceste zone erau supuse repetat prelucrării cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls, dar deja de energii mult mai mici, regimuri în care nu se atestă formarea fazei lichide pe suprafața prelucrată. Examinarea EDX a confirmat, că în zona de vârf a conului Taylor, extras de pe suprafețe pieselor din wolfram și aliajele acestuia, fiind prelucrat cu electrozi-scule la fel executați din wolfram sau aliajele acestuia, fără a realiza procedeul de dezoxidare, prezintă o fracțiune a masei oxigenului care atinge valori de 9.81 %, iar cea atomică cu valoarea de 39.15%. Acest fenomen practic se atestă și pentru piese executate din alte materiale cum ar fi: oțeluri, aluminiu, bronz, cupru, titan etc. [91]. Dezoxidarea suprafeței asperităților conice se realiza prin aplicarea celui de al doilea tip de descărcări care este

diferită față de descărcările de putere, deoarece pentru acestea au fost stabilite alte regimuri și anume: la același interstițiu se acționa doar cu descărcări electrice de amorsare a interstițiului, în număr de minim 10 descărcări. Descărcările electrice de amorsare se realizau toate pe suprafața laterală și în vârful conului datorită faptului, că asperitatea conică prezintă un concentrator de câmpuri electrice și termice și are drept scop străpungerea stratului de oxizi (vezi fig. 3.22, b). Dezoxidarea locală a suprafeței asperității conice, se realizează pentru a micșora rezistența suprafeței de până la valorile rezistenței probelor neprelucrate prin aplicarea DEI.

Asperitatea conică prezentată în fig. 3.23 a fost supusă procedurii de dezoxidare locală a suprafeței ei. În tabelul 3.9, în urma analizei EDX, nu se observă prezența oxigenului, dar au fost și meniscuri care în urma procedurii de dezoxidare mai prezentau mici cantități de oxigen.

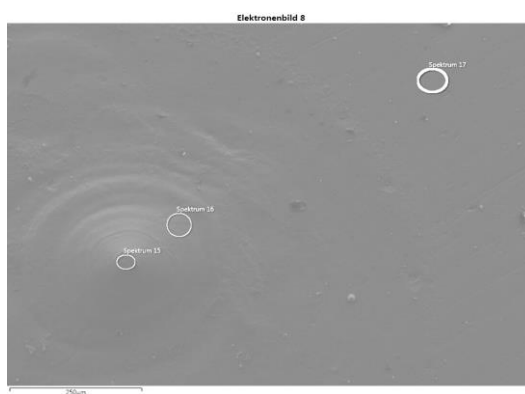


Fig. 3.23. Analiza EDX a probei din oțel 45: vârful, crater și lateral (zona 15, 16 și 17)

Tabelul 3.9. Conținutul chimic a probei din oțel (în vârful asperității, zona 15 din fig. 3.23)

Elemente depistate	Tip de linie	Concentrația aparentă	k-raport	Masa, %	Masa, % (Sigma)	Nume implicit	Standard implicit
Fe	Seria K	287.49	2.87485	100.00	0.00	Fe	Da
În total:				100.00			

Astfel, se atestă realizarea cu succes a dezoxidării vârfului asperității conice extrase pe suprafața piesei din oțel 45. Conținutul chimic prezentat în tabelul 3.10 și tabelul 3.11 ne arată, că elementele de bază ce se regăsesc în proba executată din oțel 45 sunt: ferul, carbonul, care sunt elementele de bază, siliciu care este prezent în oțeluri și se clasifică ca impuritate la nivel de compoziție chimică. Prezența oxigenului se datorește prezenței stratului de oxid pe suprafața oțelului generat de descărcarea electrică de bază sau chiar de fenomenul oxidării oțelurilor păstrate în mediu aer. Suplimentar acestor elemente chimice de bază care sunt prezente în componența oțelului 45 în mod firesc, se mai depistează și așa elemente cum ar fi fluorul, F sau sarea anorganică (compusă din cationi de calciu și anioni de fluorură) CaF_2 . Acest element posibil constituie o impuritate de suprafață, chiar dacă, concentrația acesteia este destul de mare.

Rezultatele spectroscopiei în aceste puncte indică cum și în ce cantitate se distribuie oxigenul legat pe suprafața conurilor Taylor obținute. Dacă analizăm rezultatele obținute și pentru alte probe, putem constata faptul, că cantitatea oxigenului legat a scăzut aproximativ de 2 – 3 ori, dacă realizăm procedeul de dezoxidare. Este important și, că cantitatea oxigenului scade mai mult în zona de vîrf a asperităților conice. Acest rezultat se explică astfel: canalul de plasmă format la descărcarea în impuls se localizează pe vîrfurile conului, canalul izolează suprafața activă de la mediul înconjurător, evaporă oxizii de pe suprafața conului fără topirea metalului, ceea ce împiedică oxidarea repetată.

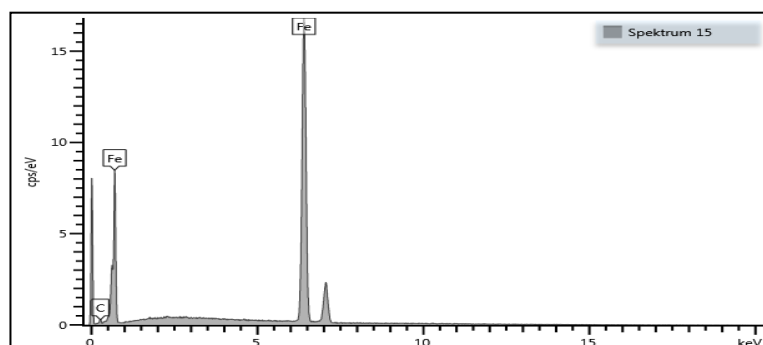


Fig. 3.24. Diagrama EDX pentru zona 15 reprezentat în fig. 3.23

Tabelul 3.10. Conținutul chimic a probei din oțel (baza asperității, zona 16 din fig. 3.23)

Elemente depistate	Tip de linie	Concentrația aparentă	k-raport	Masa, %	Masa, % (Sigma)	Nume implicit	Standard implicit
C	Seria K	1.68	0.01682	2.61	0.32	C Vit	Da
O	Seria K	23.38	0.07867	4.86	0.17	SiO ₂	Da
Si	Seria K	0.48	0.00381	0.23	0.05	SiO ₂	Da
Fe	Seria K	296.06	2.96063	92.29	0.35	Fe	Da
În total:				100.00			

Tabelul 3.11. Conținutul chimic a probei din oțel (zona 17 din fig. 3.23)

Elemente depistate	Tip de linie	Concentrația aparentă	k-raport	Masa, %	Masa, % (Sigma)	Nume implicit	Standard implicit
C	Seria K	3.14	0.03142	4.98	0.32	C Vit	Da
O	Seria K	8.09	0.02724	1.84	0.14	SiO ₂	Da
F	Seria K	11.27	0.02214	1.17	0.22	CaF ₂	Da
Si	Seria K	0.56	0.00444	0.28	0.05	SiO ₂	Da
Fe	Seria K	286.30	2.86295	91.73	0.40	Fe	Da
În total:				100.00			

Este important a menționa, că microbiectele, care sunt supuse procedeului de dezoxidare, în majoritatea cazurilor nu suferă deformări și nu se distrug, adică, prelucrarea suplimentară este una destul de fină. Procesul poate fi dirijat și se obține un diferit grad de dezoxidare a suprafeței. Din cauză, că procesul de prelucrare reprezintă descărcări electrice în impuls în condițiile normale

în aer el poate fi ușor aplicat în diferite scopuri tehnologice și cele legate de cercetare, este comod, flexibil și econom în comparație cu alte metode utilizate, în prezent [7, 93]. În cadrul cercetărilor experimentale, au fost realizate încercări, privind modificarea microgeometria suprafețelor pieselor executate din wolfram și aliajele acestuia, cu aplicarea DEI [101], dar prin utilizarea electrozilor-scule executați din grafit pirolitic, în formă de cilindri de diametri egali cu $d_s = 0,5$ mm sau 0,7 mm, ascuțiți la vârf sub unghi de 30 grade. Analiza EDX a demonstrat rezultate asemănătoare cu cele obținute în urma realizării procedurii de dezoxidare a suprafețelor. Astfel, dacă utilizăm electrozi-scule executați din grafit, dispăre necesitatea realizării dezoxidării suprafețelor, deoarece, suprafețele prelucrate în acest caz, nu prezintă așa concentrație mare a oxigenului în metal. Utilizarea electrozilor-scule din grafit pirolitic, de dimensiuni mici simplifică procesul, dar, pe de altă parte, rezistența mecanică a acestor electrozi-scule lasă de dorit. S-au întâmplat cazuri când electrozii-scule se defectau chiar în momentul prinderii acestora în dispozitivul de prinderea sau uneori se rupeau, în timpul manevrărilor. Din aceste considerente, aplicarea în industrie a electrozilor cilindrici executați din grafit, care au diametre sub un mm, nu se recomandă.

3.7.3. Rezultate experimentale, privind modificarea formei electrozilor

În mod experimental s-a stabilit, că eficacitatea formării asperităților conice pe suprafețele metalice este mai semnificativă când piesa se conecta în circuitul de descărcare a generatorului de impulsuri de curent în calitate de anod. Acest fenomen se datorează faptului, că la descărcările electrice de scurtă durată, degajarea energiei descărcării electrice în impuls se distribuie între canalul de plasmă propriu zis și suprafețele electrozilor și poate fi descrisă cu relația (3.3) [53]:

$$W = W_a + W_c + W_s \text{ sau } W = (-U_a + U_c + U_s) \int_0^t i(t) dt \quad (3.3)$$

în care: W – energia degajată (J); W_a – energia degajată la suprafața anodului (J); W_c – energia degajată la suprafața catodului (J); W_s – energia degajată în canalul de plasmă (J); U_a , U_c și U_s reprezintă tensiunile electrice la anod, catod și pe interstițiu (V), iar $\int_0^t i(t) dt$ prezintă curentul ce a parcurs interstițiul pe durata DEI.

Dacă vorbim despre energia degajată la suprafețele electrozilor, atunci ea diferă chiar și pentru cazul când aceștia sunt executați din același material. După cum a fost menționat, în mod experimental s-a stabilit, că pe suprafața anodului se degajă o cantitate de energie mai mare de cât pe suprafața catodului din motiv, că efectul modificării morfologiei suprafeței anodului prin aplicarea DEI este mai evident.

Mărimea integrală a intensității curentului electric dintre electrozi, determinată prin metoda osciloscopării nu este una prea precisă din motiv, că ea este constituită din două componente: cea electronică i_e (de la catod spre anod) și ionică i_i (de la anod spre catod). Dacă vom ține cont de aceste componente și direcțiile contrare de circulație a curenților cauzati de aceste particule, atunci vom putea deduce mult mai real mărimea intensității curentului electric și cantitatea de energie degajată în fiecare zonă de fiecare dintre componente:

$$\int_0^t i(t)dt = i_e - i_i \quad (3.4)$$

în care: i – intensității curentului electric (A); t – timpul (s); i_e – intensitatea electronilor în mișcarea lor de la catod la anod (A); i_i – intensitatea ionilor în mișcarea lor de la anod la catod (A).

Astfel, în lucrarea [131] se menționează, că estimativ curentul ionic constituie cca 10%, iar cel electronic circa 90% din curentul integral ce parcurge interstițiul. Energia pe care o primește ionul de la câmpul electric, în deosebire de electron, o transmite aerului din mediu înconjurător. Rezultă, că energia pe care o transmite curentul electronic pe anod într-o unitate de timp, fără a lua în considerare lucrul de ieșire la anod va fi aproximativ [53]:

$$W_e \sim 0,9 \cdot U \cdot J \quad (3.5)$$

în care: W_e – energia curentului electronic (J); U – este căderea de tensiune pe interstițiu (V); J – densitatea curentului electric (J/V).

În același timp energia dezvoltată de curentul ionic la catod se va determina conform relației (3.6) [53]:

$$W_i \sim 0,1 \cdot U \cdot J \cdot l_e / d \quad (3.6)$$

în care: W_i – energia curentul ionic la catod (J); l_e – parcursul liber al electronului pentru pierderea impulsului (m); d – mărimea interstițiului (m).

Energia absorbită de gaz poate fi determinată în corelare cu relația (3.7) [53]:

$$W_0 \sim 0,1 \cdot U \cdot J \cdot (1 - l_e / d) \quad (3.7)$$

în care: W_0 – energia absorbită de gaz (J).

Analizând relațiile (3.5) – (3.7) se observă, că cea mai mare din energia degajată în interstițiu se transmite anodului, și nu gazului sau cu atât mai mult catodului, adică așa o descărcare cu adevărat se poate interpreta ca un scurt arc electric, după cum au determinat autorii lucrării [131, 163]. Astfel, pentru aceiași valoare a intensității curentului electric ce străpunge interstițiul, în condițiile unei descărcări electrice solitare, căderea de tensiune la anod (ca valoare absolută) este de 2 – 3 ori mai mare, în raport cu cea de la suprafața catodului [133]. În fig. 3.25 se observă, că geometria electrozilor la vârf diferă mult. Electroful sculă, care a funcționat în calitate de catod practic nu s-a modificat prea mult, forma rămânând în continuare una cilindrică. Pe de altă parte,

dacă vizualizăm electrodul care a funcționat în calitate de anod, atunci se observă clar, că geometria acestuia a suferit modificări mari (vezi fig. 3.25 a), iar vârful din forma cilindrică s-a transformat în una de „buzdugan”. Se observă clar și formarea asperităților conice pe vârful modificat al anodului.

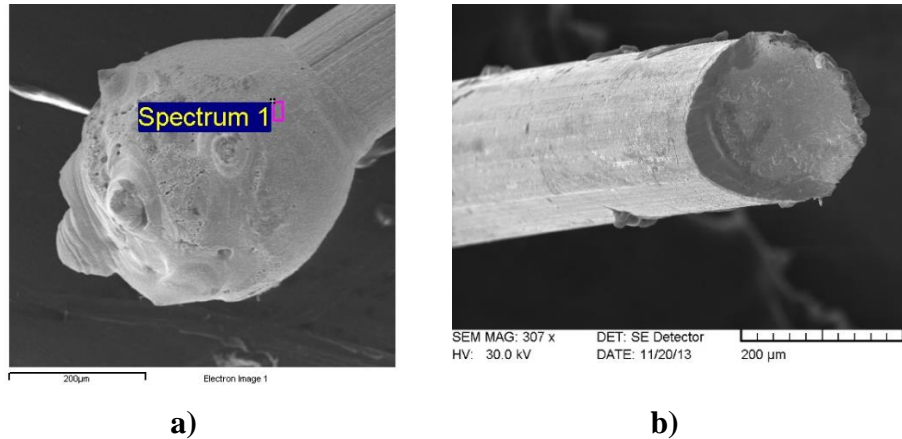


Fig. 3.25. Suprafețele electrozilor-scule, care au fost supuse procesului DEI, conectați în circuitul de descărcare în calitate de a) anod; b) catod; regimul energetic [59]: $W_c = 0,36 \text{ J}$ ($C = 200 \mu\text{F}$), $\varnothing_{sculei} = \varnothing_{probei} = 0,2 \text{ mm}$, materialul W+Re 10%; $S = 0,2 \text{ mm}$, $n > 10$

Așa electrod, reconectat în calitate de catod și fiind în continuare utilizat pentru realizarea DEI, poate da cu totul alte rezultate, deoarece câmpul electric dintre electrozi va fi redistribuit, iar prezența asperităților conice pot genera un număr și mai mare de canale electrice de descărcare. În fig. 3.26 se observă practic același fenomen în pofida faptului, că diametrele inițiale ale probelor din care s-au obținut electrozii constituia $\varnothing_{sculei} = 1,2 \text{ mm}$.

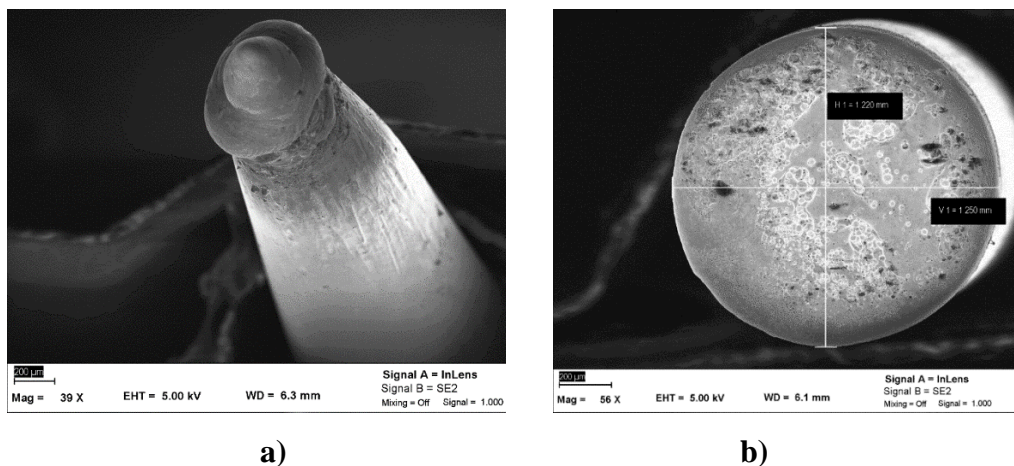


Fig. 3.26. Suprafețele electrozilor-scule, care au fost supuse procesului DEI, conectați în circuitul de descărcare în calitate de a) anod (con ascuțit sub unghi de 30°); b) catod (cilindru regulat cu $\varnothing = 1,2 \text{ mm}$); regimul energetic în ambele cazuri [20]: $W_c = 0,76 \text{ J}$ ($C = 600 \mu\text{F}$), materialul W+Re 20%; $S = 0,3 \text{ mm}$, $n > 10$

Anodul (vezi fig. 3.26 a) inițial a fost supus ascuțirii sub un unghi de 25 – 30 grade, iar apoi încadrat în procesul de lucru. Și în acest caz se observă o modificare a vârfului electrodului, din forma conică s-a format un „brâu” la o depărtare nu prea mare de vârf, pe când electrodul conectat în calitate de catod nu și-a modificat esențial forma. Morfologia suprafeței exterioare ale cilindrilor prezentat în fig. 3.26 b, și anume baza acestuia a suferit și ea careva schimbări, dar de un ordin mult mai fin, mai precis despre ce este vorba se recomandă să analizați imaginile prezentate în fig. 3.27.

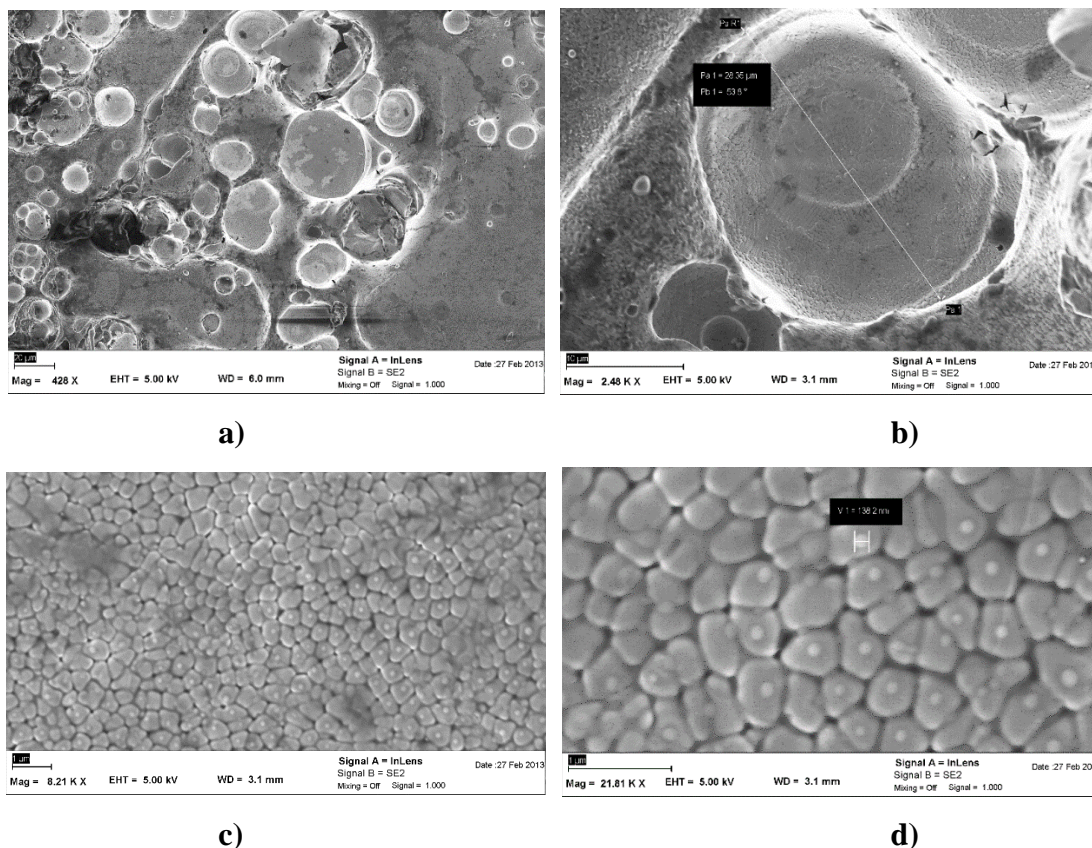


Fig. 3.27. Morfologia suprafeței exterioare a bazei cilindrilor prezentat în fig. 3.26 (b)

Imaginile SEM prezentate în fig. 3.27 a și b, ne arată destul de clar, cât e de complexă microgeometria suprafețelor. În imaginile 3.27 c și d, se observă chiar forma grăunților metalici care au fost descoperiți în urma supunerii electrodului la efectul DEI. Pe suprafețele neprelucrate prin DEI, așa imagine nu se observă.

Experimental, analizând filmulețele video realizate pentru diverse mărimi ale interstițiului s-a observat, că la mărimea interstițiului dintre electrozi de 1 cm se observă practic un singur canal de descărcare, la 0,5 cm în jur de 2 – 3 canale simultane, iar cu micșorarea distanței dintre electrozi numărul de canale crește, iar enumerarea lor devine practic imposibilă prin aplicarea camerelor video obișnuite, care au fost utilizate.

Fenomenul descărcării prin mai multe canale simultan (respectiv formarea a mai multor pete electrodice), conduce la formarea a mai multor asperități. Numărul canalelor elementare de descărcare și respectiv numărul asperităților conice extrase este invers proporțional cu mărimea interstițiului și direct proporțional cu energia degajată în el la o descărcare solitară. Astfel se poate de afirmat, că:

$$n_c = f(1/S) \text{ sau } n_c = f(W) \quad (3.8)$$

în care n_c – numărul de canale, S – mărimea interstițiului (mm), iar W – energia degajată (J).

În calitate de dovadă, servesc imaginile prezentate în fig. 3.21 b, c și d, în care se observă extragerea mai multor asperități conice la descărcări electrice în impuls solitare.

3.7.4. Rezultate, privind realizarea microsudurii firelor cilindrice din wolfram

La mărimi ale interstițiului mai mici de 0,15 mm se poate obține microsudarea electrozilor și scurtcircuitarea circuitului electric. În cadrul actualii teze de doctorat obținerea microsudurii a constituit nu o eroare experimentală, dar un obiectiv, deoarece, după cum se vede în imaginile din fig. 3.28, locul sudurii prezintă o secțiune transversală mai redusă, cu alte cuvinte, dacă în zona sudurii, diametrul este mai mic rezultă, că rezistența electrică în această zonă va fi mai mare, comparativ cu rezistența celorlalte porțiuni.

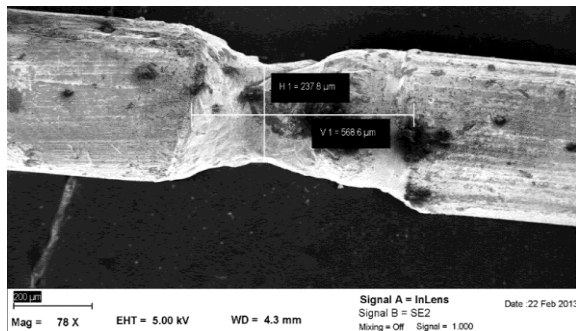


Fig. 3.28. Microsudarea firelor din W+20%Re cu diametre de 0,4 mm

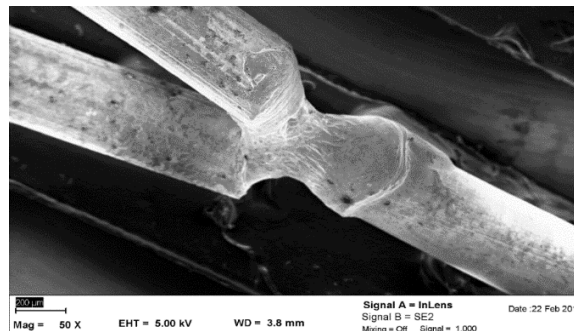


Fig. 3.29. Microsudarea a trei fire din W+20%Re cu diametre de 0,4 mm

Explicarea procesului de formare a joncțiunii dintre cei doi electrozi, care erau fixații rigid și se aflau în stare statică în procesul descărcărilor electrice aplicate, poate fi explicat prin faptul, că la repetarea descărcărilor electrice, din ambii electrozi se extrăgeau în continuare asperități cu diametre mai mici, până ce acestea sau contopit și au scurtcircuitat interstițiul (vezi Anexa 6). În fig. 3.29 se arată, că prin metoda DEI pot fi sudate mai multe fire, iar practic, așa construcții pot genera noi aplicații sau posibilități de exploatare. Astfel, dacă așa fire vor fi supus trecerii curentului electric, atunci zona microsudurii se va încălzi mai puternic, din motiv, că aici rezistența

electrică este mai mare. Dacă, din zona sudurii se v-a extrage o asperitate conică, iar firele laterale vor fi fixate în dispozitivul de fixare a termocatodului, atunci se poate construi un tip nou de termocatod.

3.7.5. Rezultate teoretico-experimentale, privind determinarea mărimii undelor mecanice transversale și influența acestora asupra geometriei asperităților conice

Experimental s-a observat, că o mulțime de asperități conice, care sunt extrase de pe suprafețele metalice, în urma solidificării nu mai prezintă conuri, dar așa numiții „trunchiuri de con”. La aplicarea DEI, în suprafața și volumul metalului topit sub acțiunea câmpului electric, se dezvoltă unde mecanice: transversale și longitudinale. Aceste unde sunt unde mecanice de suprafață, care sunt provocate de scintilația curentului, fenomen vizibil pe oscilograme (vezi fig. 3.17). A fost înaintată ipoteză, că „tăierea” asperității se datorește prezenței undelor transversale, iar forma laterală văluroasă a suprafeței conurilor solidificate este cauzată de prezența undelor longitudinale. Așa dar, în fig. 3.30 sunt reprezentate mai multe asperități cu forma unui trunchi de con, obținute pe suprafețele plane a electrozilor-piese realizați din materialul oțel 45. După cum s-a observat, diametre superioare ale trunchiurilor de con nu sunt în toate cazuri de mărimi diferite, mai rar, dar se întâlnesc și diametre egale. Analizând toate imagine SEM ai meniscurilor obținute pe suprafețele din oțel 45 și măsurând diametrele superioare a trunchiurilor de con formate la aceleași regimuri energetice s-a observat, că aceste diametre sunt toate mărimi multiple ai valorii de 0,4 μm (vezi datele din tab. 3.12).

Tabelul 3.12. Determinarea mărimii lungimii de unde transversale în baza diametrelor superioare ale neregularităților obținute pe suprafețele plane din oțel 45 cu aplicarea DEI

Nr.	Diametrul superior al trunchiului de con, μm	Cea mai mare mărime discretă, μm	Numărul întreg de unde transversale
1	36	0.4	90
2	40	0.4	100
3	42.8	0.4	107
4	32	0.4	80
5	34.8	0.4	87
6	42.8	0.4	107
7	36	0.4	90
8	38.8	0.4	97

În cazul probelor executate din wolfram sau aliajul wolframului și reniu (10 sau 20 %) practic nu se observă prezența trunchiurilor de con, majoritatea asperităților obținându-se cu vârful ascuțit. Totuși, în multitudinea de imagini SEM realizate s-au găsit doar două imagini în care

asperitatea conică nu prezintă un vârf ascuțit. Dezvoltarea undelor transversale, în cazul atingerii unei valori critice, provoacă ruperea de pe asperități a unei picături, iar viteza mare de răcire face ca vârful conic să capete forma unui „trunchi de con” (vezi imaginile din fig. 3.30).

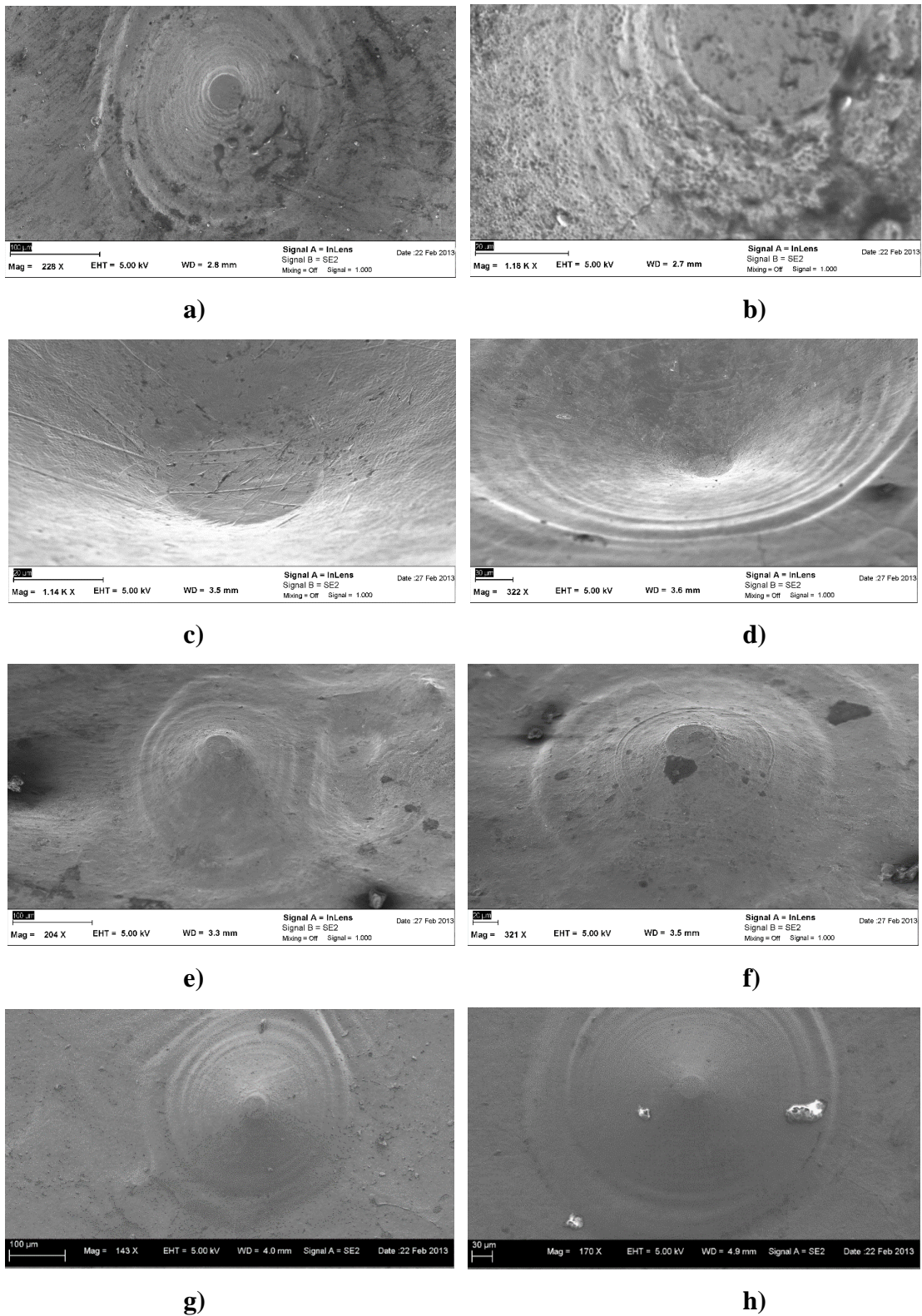


Fig. 3.30. Asperități sub forma unui „trunchi de con” obținute pe suprafețe plane din oțel 45, cu aplicarea DEI

S-a presupus, că aceste mărimi ale diametrelor măsurate corespund unui număr întreg de lungimi de undă sau de semiundă ale undele transversale, cu alte cuvinte, s-a afirmat, că diametrul superior al trunchiului de con prezintă un număr întreg de mărimi discrete ale acestor lungimi.

$$d_{t.c.} = n_{l.u.} \cdot \lambda \quad (3.9)$$

în care: $d_{t.c.}$ – diametrul trunchiului de con (μm); λ – lungimi de undă ale undele transversale (μm).

În fig. 3.31 se observă practic același fenomen care este prezentat în imaginile din cadrul fig. 3.30. Din motiv, că pentru aceste 2 asperități nu am găsit imagini SEM realizate de deasupra asperităților, reiese, că nu este posibil de a determina cu precizie diametrele superioare formate. Așa dar, pentru determinarea lungimii de undă transversală pentru asperitățile conice obținute pe suprafețe cilindrice din wolfram sau aliajele acestuia, este necesar a realiza cercetări experimentale suplimentare.

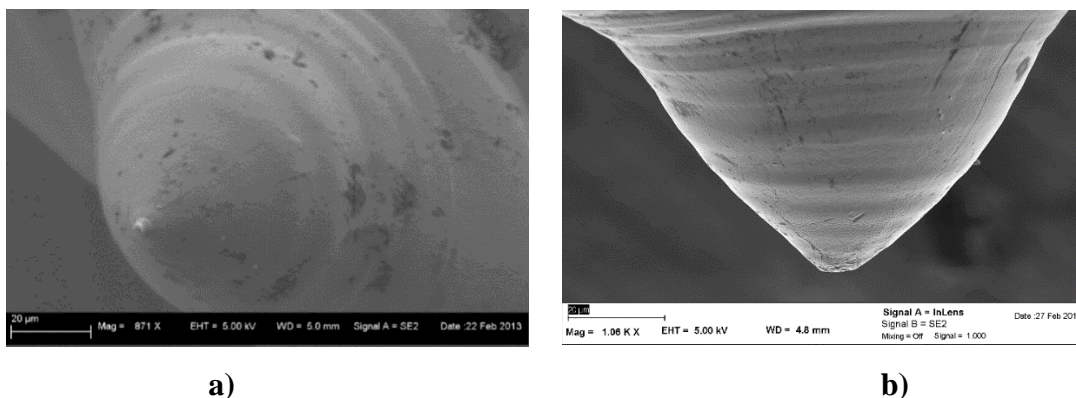


Fig. 3.31. Imagini SEM ale asperităților conice obținute, cu aplicarea DEI, pe suprafețe cilindrice din aliajul wolframului cu reniu (10%)

Nu putem afirma cu exactitate, că valoarea de $0,4 \mu\text{m}$ este mărimea lungimii undei transversale $\lambda_{t med}$, deoarece, mărimi discrete și mai mici mai sunt, ca de exemplu: $0,2$; $0,1$ ș.a. Dacă, conul este tăiat la lungimi egale cu un număr întreg de semilungimi de undă, nu de un număr întreg de unde, atunci valoarea lungimii de undă transversală poate atinge valori egale cu $0,8 \mu\text{m}$. Se impune a determina valoarea acestei mărimi și prin alte metode, apoi să confirmăm sau să infirmăm această ipoteză.

3.8. Stabilirea relațiilor matematice ale influenței parametrilor tehnologici asupra înălțimii și a diametrelor bazelor asperităților conice

Tehnologia contemporana este digitalizată, iar pentru proiectarea și dirijarea proceselor tehnologice este mult mai comod, ca interdependența diferitor parametri ai procesului să fie exprimată în relații matematice, din care motiv sau construit dependențele importante în

coordonate logaritmice și sau stabilit valorile coeficienților de putere. Pentru obținerea relațiilor matematice, privind formarea asperităților conice, s-a luat în considerație durata impulsului de descărcare, care varia de la 100 la 220 μs, mărimea interstițiului cuprinsă în intervalul de la 0,1 la 0,4 mm și energia degajată în interstițiu care varia în limite a 0,072 până la 4,8 J. Au fost măsurate înălțimile și diametrele asperităților conice obținute pe suprafețele pieselor metalice confecționate din W sau din aliajele wolframului cu reniu (10 și 20%). S-a aplicat metoda celor mai mici pătrate, iar datele experimentale au fost exprimate în coordonate logaritmice [50], astfel s-au obținut următoarele diagrame (vezi Anexa 7, Fig. A7.1 – A7.8).

Analizând date experimentale cu referire la obținerea asperităților conice și ecuațiile obținute în baza diagramelor prezentate în fig. A7.1 – A7.8, din cadrul anexei nr. 7, pentru valorile medii ale intervalelor optime de prelucrare, pentru înălțimea asperităților conice, h_m și diametrele bazelor acestora, d_m , s-au obținut următoarele relații matematice empirice:

- pentru piese confecționate din fire de diametre egale cu 0,2 și 0,25 mm din wolfram de puritate tehnică:

$$h_m = 0,77 \cdot W_s^{0,56} \cdot \tau^{0,88} \cdot S^{-0,34} \quad (3.10)$$

$$d_m = 2,08 \cdot W_s^{0,46} \cdot \tau^{0,85} \cdot S^{-0,34} \quad (3.11)$$

- pentru piese confecționate din fire de diametre egale cu 0,2 și 0,25 mm din aliajul wolframului cu reniu (10%):

$$h_m = 0,66 \cdot W_s^{0,51} \cdot \tau^{0,88} \cdot S^{-0,34} \quad (3.12)$$

$$d_m = 1,32 \cdot W_s^{0,35} \cdot \tau^{0,85} \cdot S^{-0,34} \quad (3.13)$$

în care: h_m – înălțimea asperităților conice (μm); d_m - diametrele bazelor asperităților conice (μm); W_s – energia degajată în interstițiu (J); τ – durata impulsului de descărcare (μs); S – mărimea interstițiului (mm).

Relațiile (3.12) și (3.13) sunt valabile și pentru piese confecționate din fire din aliajul wolframului cu reniu (20%), de diametre egale cu 0,2 și 0,25 mm. Pentru a extrage asperități conice din suprafețele materialelor metalice mai plastice, este necesar a micșora energia degajată în interstițiu.

Din ultimele doua sisteme de relații, putem stabili, că mărimea interstițiului, S și durata impulsului influențează practic în același mod asupra înălțimii, h_m și asupra diametrului, d_m indiferent de compoziția materialului de execuție al pieselor. Dacă ne referim la energia degajată în interstițiu și la coeficientul de proporționalitate din aceste relații, vom constata, că ele sunt mult mai mari pentru piesele executate din Wolfram, decât pentru aliajele wolframului cu reniu, fapt ce poate fi explicat prin temperatura mai înaltă de topire a acestuia în raport cu aliajul wolfram-reniu.

Realizând un calcul simplu am obținut, că suprafața totală a termocatodului cu lungimea de 20 mm, constituie $12,56 \text{ mm}^2$, dacă sunt executate din fire cu diametrul de 0,2 mm și $15,7 \text{ mm}^2$, dacă sunt executate din fire cu diametrul de 0,25 mm. În acest caz, sporirea ariei suprafeței active a termocatodului prin aplicarea descărcărilor electrice în impuls, comparativ cu suprafața inițială a acestuia este cu doar 0,01 – 0,02 mm^2 . Respectiv, modificarea microgeometriei suprafeței metalice a termocatodului, cu aplicarea DEI, este nesemnificativă în comparație cu suprafața totală a acestuia.

3.9. Completări ale modelului fizic al EE cu acțiunea DEI

Dacă e să revenim la modelul fizic prezentat în capitolul 1 (paragraful 1.1.2), atunci acesta ar putea fi completat cu următoarele: canalele de conductivitatea „se nasc” și „mor” și ele la rândul lor pot provoca extragerea mai multor asperități într-o descărcare solitară; în anumite condiții în asperități, datorită scintilațiilor curentului în descărcare „se nasc” unde capilare transversale care provoacă ruperea picăturilor din vârful asperității; ionii proveniți din gazul plasmogen bombardează suprafețele electrozilor provocând efecte erozive sau formarea în straturile acestora a compușilor chimici de tip oxizi, hidro-oxizi și nitruri (în condiții de aer), carburi (în mediu de acetilenă, propan, butan sau mediu lichid de motorină, gaz lampant, ulei etc.); la finalul descărcării solitare odată cu micșorarea intensității curentului, au loc procese de divizare a petelor electrodice, până la cele reci, care provoacă extragerea nanoasperităților din suprafața grăunțelor noi formați pe suprafața prin solidificarea craterului; în cazul repetării descărcărilor solitare, asperitățile extrase din suprafețe cresc în înălțime și se micșorează în diametru până la contopire.

Dacă ținem cont de cele atestate experimental (vezi fig. 3.25 și fig. 3.27) și de rezultatele obținute de către autorii lucrărilor [19, 53, 59, 69, 103], în care se menționează, că pe suprafața grăunțelor de cristalizare a fazei lichide rezultate după interacțiunea plasmei DEI cu suprafața metalului se atesta asperități de dimensiuni nanometrice. Cred, că în acest caz am fi îndreptățiți să susținem ipoteza, că DEI „se naște” pe pete electrodice „reci” – care sunt suportul pentru canalele de conductivitate elementare, care se atrag conform legii lui Lorentz și se contopesc dând naștere petelor electrodice „calde”, acestea provoacă topirea, perturbarea, extragerea asperităților conice, ruperea de particule, etc., dar la final descărcarea se finalizează prin scindarea petelor electrodice „calde”, din motivul epuizării energiei în canalul de conductibilitate, transformându-se viceversa, în pete electrodice „reci”, care la rândul lor interacționează cu suprafața încă fierbinte a periferiei suprafeței prelucrate pe care provoacă extragerea asperităților de dimensiuni nanometrice (vezi fig. 3.16, b și 3.27, d).

3.10. Concluzii la capitolul III

În rezultatul cercetărilor experimentale, privind modificarea microgeometriei suprafețelor pieselor de tip termocatod cu aplicarea DEI, putem concluda următoarele:

- în procesul de perturbare a suprafețelor metalului lichid acționează forțe cumulative compuse cel puțin din: forța de greutate, tensiunea superficială, forțe electrodinamice și componenta presiunii atmosferice;

- formarea asperităților conice se observă atât pe suprafața anodului cât și pe suprafața catodului, dar acestea se deosebesc după dimensiuni, cele de pe anod, fiind mai mari, din care motiv pentru a modifica morfologia suprafeței se alege conexiunea piesei în calitate de anod;

- parametrii de bază ce influențează geometria meniscurilor în procesul modificării microgeometriei suprafețelor pieselor metalice sunt energia, durata impulsului de descărcare, mărimea interstițiului și proprietățile materialului de execuție a electrozilor-probe;

- datorită scintilațiilor curentului în descărcare se nasc unde capilare transversale, care provoacă ruperea picăturilor din vârful asperității;

- ionii proveniți din gazul plasmogen bombardează suprafețele electrozilor provocând efecte erozive sau formarea în straturile acestora a compușilor chimici de tip oxizi, hidro-oxizi și nitruri;

- la finalul descărcării solitare, odată cu micșorarea intensității curentului, au loc procese de divizare a petelor electrodice, până la cele reci, care provoacă extragerea nanoasperităților din suprafața grăunților noi formați pe suprafață, prin solidificarea craterului;

- în cazul repetării descărcărilor electrice solitare, asperitățile extrase din suprafețe cresc în înălțime și se micșorează în diametru până la contopire.

4. STABILIREA CARACTERISTICILOR DE EMISIE TERMOELECTRONICĂ ALE CATOZILOR ELABORAȚI

În scopul construirii caracteristicilor volt-amperice de emisie se pregăteau mai multe perechi de catozi egali după dimensiuni și forma, similari celor aplicați în instalațiile industriale. Pentru comparare, au fost pregătiți loturi de catozi, care erau compuși din 2 părți: 1) suportul firului din wolfram și/sau aliajele acestuia, realizați din fire cilindrice confecționate din oțel inoxidabil cu diametrul de un mm, izolați între ele (vezi partea de jos a fig. 2.2) și 2) fire cilindrice din wolfram sau aliajele acestuia cu diametre de 0,2 mm sau 0,25 mm, care erau sudate în puncte, cu aplicarea metodei sudării electrice prin rezistență electrică, de suportul firului, astfel fiind realizați tehnologic asemănător cu cei industriali. Primul lot conținea fire obișnuite, iar al doilea lot îl constituiau catozii executați la fel, doar, că erau supuși suplimentar prelucrării prin DEI, cu extragerea asperității conice de pe suprafețele exterioare ale acestora (vezi fig. 2.2 b). Ulterior catozii elaborați erau introduși pe rând în camera de lucru (vezi fig. 2.17 (4), fig. 2.18 și fig. 2.22) ale instalațiilor, conectați (conform schemei electrice prezentate în fig. 2.16) și apoi încercați la emisie. Metoda expres de măsurare a intensității curentului de emisie termoelectronică, realizată în cadrul laboratoarelor USARB, vine să ateste, dacă modificând morfologia suprafeței active a catodului se produc careva schimbări în funcționarea lui. În cazul în care, se atestă modificări funcționale, pentru a stabili anumite legături ale fenomenului, sunt necesare măsurători mult mai exacte și condiții impuse. Astfel o serie de măsurători a curentului de emisie termoelectronică au fost realizate în centrul de cercetare IFIN-HH, București-Măgurele, România, cu ajutorul standului experimental prezentat în fig. 2.21.

4.1. Rezultate, privind stabilirea factorilor care determină amplificarea ariei suprafeței active ale catozilor, a intensității câmpului electric și a densității de curent

După cum a fost menționat în paragraful 1.2.2, intensitatea curentului de emisie este direct proporțional cu aria suprafeței active, din care motiv și s-a impus modificarea suprafeței termocatozilor (vezi relația 1.32). Din relația lui Boltzman (vezi relația 1.36) rezultă, că puterea de emisie este direct proporțională cu aria suprafeței active de emisie (adică $PE \sim \Delta S$). Cu alte cuvinte, dacă vom asigura sporirea ariei active de n ori, vom contribui la sporirea puterii de emisie de n ori (vezi relația 1.36). Pe cale teoretică, conform relației (1.31), a fost demonstrat, că densitatea curentului de saturație a catodului satisface formula lui Richardson-Dechmen [60].

Microrelieful suprafeței active a catodului se modifică semnificativ odată cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls. Fluxurile de particule energetice (ioni și electroni, precum și

atomi ai mediului plasmagen) precum și petele electrodice (anodice și catodice, „calde” și „reci”) conduc la fenomenele de eroziune a electrozilor [95, 135], care pot provoca formarea de cratere, a micro neregularităților de formă conică (numite în literatura de specialitate și meniscuri conice) și la prelevarea micro picăturilor de metal de pe suprafață prelucrată după cum a fost prezentat în capitolul III al prezentei teze. Micro neregularitățile suprafeței modifică configurația și intensitatea câmpurilor electrice, în cazul când aceste suprafețe sunt parte componenta a unor dispozitive electrice sau electronice.

Pentru a caracteriza cantitativ suprafața activă a catodului de către [146] se preia conceptul de coeficient de amplificare a câmpului electric, care este notat cu β_E . Acesta prezintă raportul dintre valoarea reală a câmpului electric creat din partea extremității superioare a asperităților conice (meniscurilor) și a valorii macroscopice medii a câmpului electric pentru un catod de suprafață plană. Dacă valorile $\beta_E \gg 1$, atunci se poate folosi relația (4.1) [146]:

$$\beta_E \approx h/r \quad (4.1)$$

în care: β_E – coeficient de amplificare a câmpului electric; h – înălțimea meniscului (μm); r – rază de la vârful conului real (μm).

Din măsurătorile SEM a razei de la vârful, a asperităților conice obținute pe suprafețele firelor din wolfram de puritate tehnică sau aliajele acestuia cu reniu (10 – 20%), s-a determinat (vezi anexa A1, Fig. A1.2), că această mărime variază în intervalul de 6 – 9 μm . În acest caz, coeficientul β_E , poate lua valori cuprinse în limitele 5 – 11.

Una dintre metodele de determinare a factorului de amplificare β_E este de a măsura și determina cu aplicarea vacuumului a dependenței intensității curentului de auto emisie ca funcție de intensitatea câmpului electric. Intensitatea curentului electric de la vârful este descris de ecuația Fowler-Nordheim [146]:

$$i = A \frac{\beta_E^2 E^2 S_{em}}{\varphi} \exp\left(-B \frac{\varphi^{3/2}}{\beta_E E}\right) \quad (4.2)$$

în care: i – intensitatea curentului electric de la vârful (A); E – valoarea medie a câmpului electric (V/m); S_{em} – aria activă de emisie (m^2), φ – lucrul de ieșire (eV); A și B sunt constantele din formula Fowler-Nordheim ($A = 1.54 \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{V}^{-2}$ și $B = 6.83 \times 10^7 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{eV}^{-3/2}$).

Din această relație rezultă, că graficul $\log(i/E^2) = f(1/E)$ trebuie să fie o linie dreaptă. În acest caz, cunoscând valoarea lucrului de ieșire φ , din panta acestei drepte, se poate estima valoarea coeficientului β_E , iar din segmentul de dreaptă proiectat pe axa y , se poate estima valoarea suprafeței active de emisie (S_{em}). Un interes deosebit îl prezintă cercetările teoretice-experimentale, care permit estimarea directă a parametrilor asperităților (proeminențelor). În lucrarea [146], a fost efectuată căutarea centrelor de emisie, folosind un anod luminescent care

strălucea în punctele în care lovesc electronii. În majoritatea cazurilor, în centrele de emisie au fost depistate asperități conice. Aplicând microscopia electronică, au fost examinate și măsurate profilele acestor asperități. Factorul de amplificare a câmpului, conform estimărilor autorilor [56, 146], poate atinge valori de 100 sau chiar și mai mult. Asperitățile similare au fost depistate pe suprafețele electrozilor executați din așa materiale cum: Cu, Ni, W, Al, Ta și oțel inoxidabil. Centrele de emisie erau obținute prin metoda DEI, după care erau supuse examinării cu un micro analizator cu raze X [146], fiind înregistrat spectrul de energie al electrozilor emiși. Centrele depistate la granițele grăunților rețelei cristaline au avut un spectru de electroni cu un maxim deplasat către energii joase, ceea ce este tipic pentru emițătorii semiconductori [102, 146]. Analiza spectrelor de difracție cu raze X a demonstrat prezența unei regiuni submicroscopice la limita grăunților, care conține linii ale impurităților de Al și Fe, care intra în componenta materialului de execuție a catodului sub formă de oxizi. După bombardamentul cu electroni, liniile de impurități au dispărut, ceea ce a condus și la dispariția centrului de emisie [146].

Din analiza de mai sus rezultă, că câștigul β_E poate varia într-un interval larg (de la 10 la 10^3). Mulți cercetători consideră însă, că valorile de ordinul a 10^3 sunt prea mari, dar se observă clar, că pentru vârfuri conice, astfel de valori pentru β_E sunt destul de reale. Dacă suprafața catodului este cuprinsă de plasmă [65], în prezența unui câmp electric, atunci are loc efectul creșterii densității de curent asupra micro-proeminențelor (micro-neregularităților) catodului.

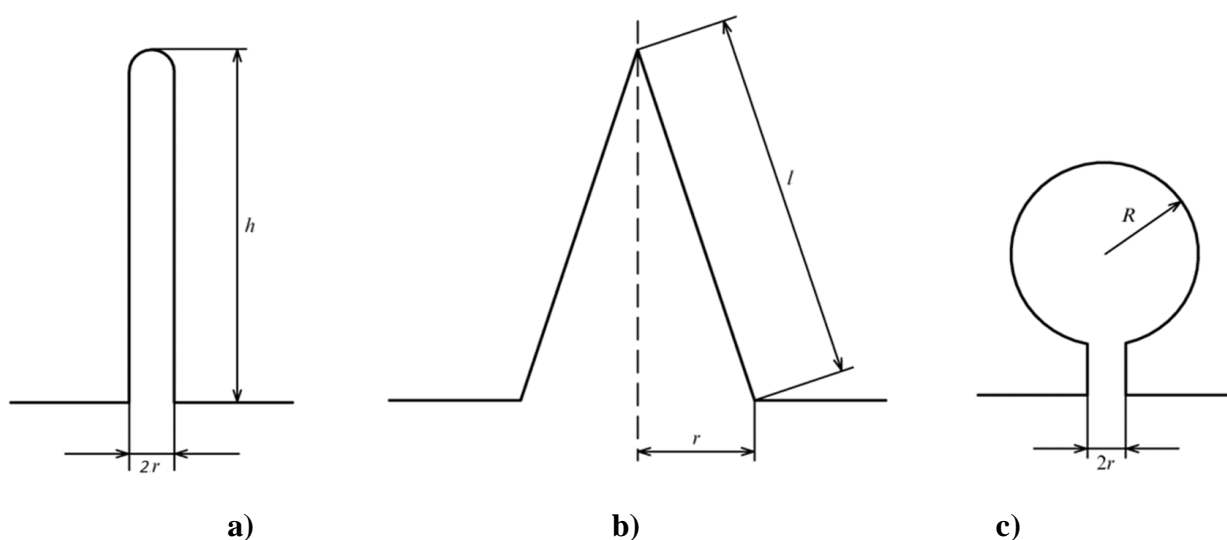


Fig. 4.1. Configurarea formelor neomogenităților pe catod destinate determinării coeficientului de amplificare a densității de curent β_i : a) un cilindru; b) con; c) sferă [146]

La construirea catozilor, de obicei se ea în considerare trei configurații ale suprafețe active: un cilindru, un con și o sferă (vezi fig. 4.1). Dacă o astfel de micro-proeminență este cuprinsă de plasmă, atunci pe suprafața acestuia va curge un curent ionic i_i [146]:

$$i_i = j_i S \quad (4.3)$$

în care: i_i – intensitatea curent ionic (A); j_i – densitatea curentului ionic (A/m^2); S – aria suprafeței (m^2) meniscului (proeminenței).

Cu toate acestea, atunci când curentul curge spre catod, în toate cele trei cazuri vor trece prin zona πr^2 . Prin urmare, densitatea de curent la catod (j) va fi [146]:

$$j = j_i \frac{S}{\pi r^2} \quad (4.4)$$

în care: j – densitatea de curent la catod (A/m^2); j_i – densitatea curentului ionic (A/m^2); S – aria suprafeței (m^2) meniscului (proeminenței); r - rază de la vârf a conului real (m).

Pentru un cilindru, un con și o sferă, aria S va fi egală cu $2\pi r h$, $\pi r l$ și respectiv $4\pi r^2$. În acest caz, factorul de amplificare a densității de curent β_i va fi cu $2h/r$ mai mare pentru un cilindru, cu l/r mai mare pentru un con (în care l este lungimea generatoarei conului) și cu $4R^2/r^2$ mai mare pentru o sferă [146]. Luând în considerație, că prin aplicarea DEI, se obțin asperități asemănătoare cu cele conice (vezi fig. 4.1, b), factorul de amplificare a densității de curent β_i pentru cazul propriu va fi determinat de raportul l/r , dar trebuie să fim atenți să utilizăm corect lungimea generatoarei asperității conice, deoarece, conform rezultatelor experimentale proprii, asperitățile nu prezintă conuri regulate.

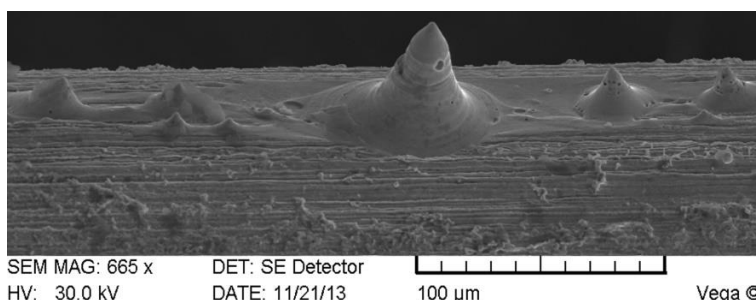


Fig. 4.2. Părțile componente ale asperității conice: vârf conic, trunchi de con și zona craterului (observate pe seama asperității centrale)

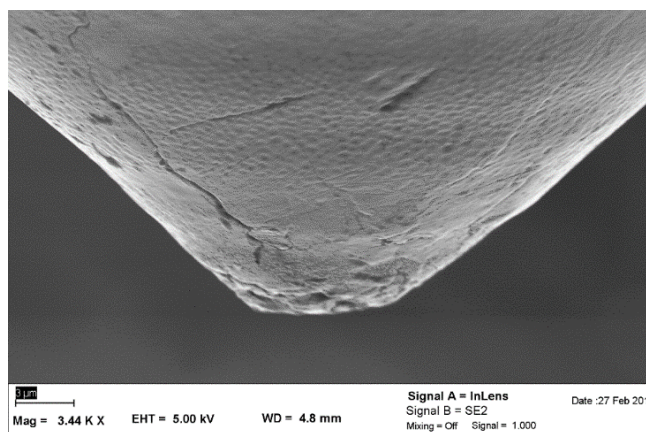


Fig. 4.3. Imagine SEM a suprafeței laterale ale vârfului asperității conice cu rază la vârf

Dacă privim la imaginea prezentată în fig. 4.2 și atragem atenția la asperitatea conică centrală observăm, că însuși asperitatea este formată din vârf conic, un trunchi de con și baza acestuia, care nu este altceva decât marginea craterului, din care s-a extras această formațiune. În continuare sunt prezentate rezultate experimentale care atestă, că micro și nanogeometria suprafeței laterale ale asperității conice este una complexă. În fig. 4.3 este reprezentată imaginea SEM a suprafeței laterale ale vârfului asperității conice.

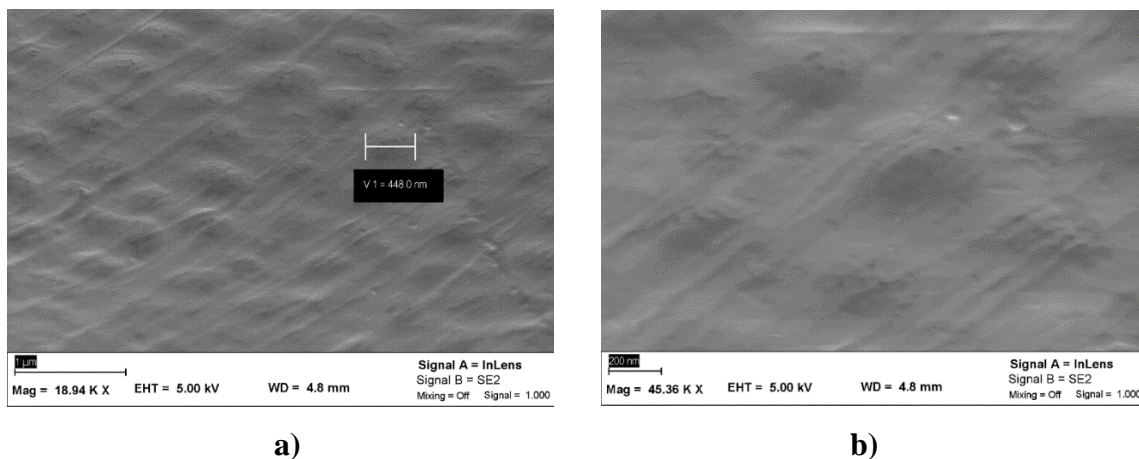


Fig. 4.4. „Ondulații” de dimensiuni micro și nanometrice prezente pe suprafața laterală a asperităților conice

Dacă se analizează această suprafață la o scară mai mare, atunci se observă existența unor „ondulații” de dimensiuni micro și chiar nanometrice (vezi imaginile din cadrul fig. 4.4). Aceste „ondulații”, sau „mobile”, la fel conduc la modificarea per ansamblu a suprafeței active ale catodilor. Cu ajutorul microscopului optic din cadrul centrului de cercetare al „Christian-Albrecht University” (orașul Kiel, Germania) de înaltă rezoluție (cu cea mai mare mărire optică posibilă pe timpul anilor 2013, cu distingerea clară a obiectelor de dimensiuni egale cu 120 – 150 nm) s-a observat, că la baza asperității de tip con Taylor sunt prezente o mulțime de „pete” care prezintă nu altceva decât micro și nanocratere generate la bază suprafețele laterale ale asperităților conice. Aceste imagini (vezi figurile 4.3 – 4.6) confirmă teoria înaintată pentru completarea tabloului fizic al descărcărilor electrice în impuls, prezentată la finele capitolului 3. Imaginile obținute cu ajutorul microscopului optic de înaltă rezoluție (Light Microscope Leica și Polylite Digital Microscope, CAU) au prezentat interes, de aceea aceste suprafețe au fost examinate și cu ajutorul microscopiei electronice. În fig. 4.6 este reprezentată vederea suprafeței laterale, la baza asperităților conice extrase de pe suprafețele pieselor executate din aliajul wolframului cu reniu (10%) prelucrate cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls. Se vede clar, că micro și nanogeometria suprafeței laterale ale asperităților conice este una complexă, și la moment, practic este imposibil de a găsi o

legitate de formare a acestor neregularități. În cazul cercetărilor realizate în prezenta se întâlnesc o multitudine de modificări a suprafeței active a catodului supus modificării prin aplicarea descărcărilor electrice în impuls. Astfel, în cadrul unei asperități se atesta o raza la vârful superior al acesteia (fig. 4.2 și fig. 4.3), ondulații de ordinul micro și nonometrice pe suprafața laterală a conului și asperități micrometrice de dimensiuni reduse (în comparație cu asperitatea principală) care se regăsesc la baza conului extras din catod (conform imaginii prezentate în fig. 4.2). Această morfologie suficient de complicată, induce dificultăți suplimentare în interpretarea științifică a rezultatelor obținute. Pentru cazul nostru mai simplu este să determinăm experimental valoarea factorului de amplificare a densității de curent și apoi să determinăm lungimea generatoarei conului, acesta prezintă vizual la scară micrometrică o curbă sinusoidală, dar cu mărimi de mai mari, se observă că nu este doar o simplă sinusoidă.

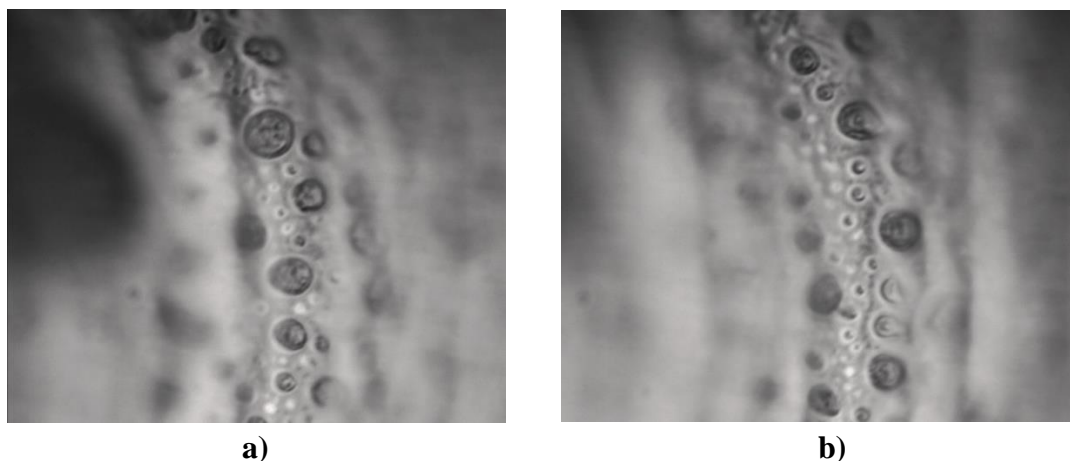


Fig. 4.5. Imagini ale suprafeței laterale la baza asperităților de tip con Taylor obținute cu ajutorul microscopului optic de înaltă rezoluție

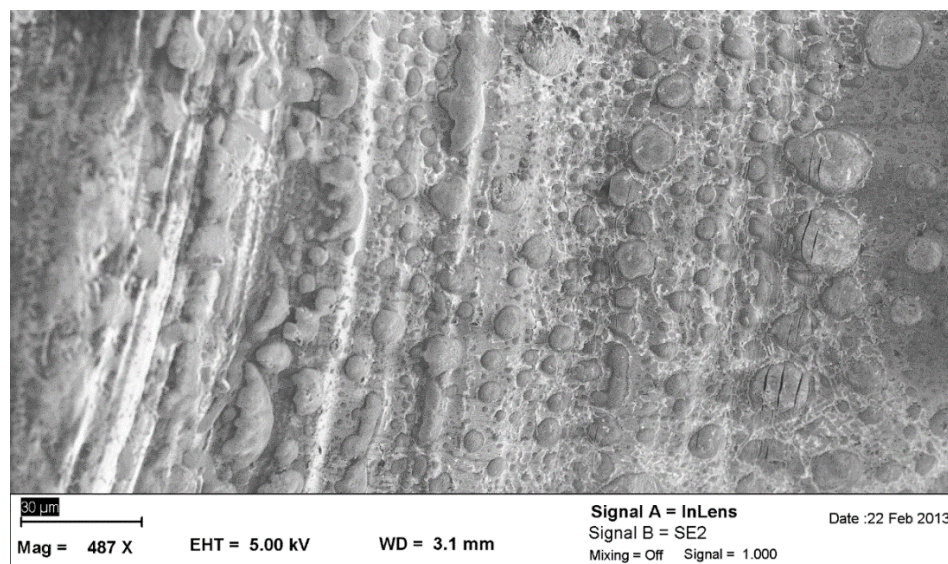


Fig. 4.6. Imagine SEM a suprafeței laterale ale bazei asperității conice

Pe suprafața laterală a meniscurilor, sub acțiunea plasmei se dezvoltă unde longitudinale. Au fost realizate încercări de a găsi mărimea lungimii de undă a acestor unde longitudinale. În fig. 4.7 se observă simularea, privind determinarea lungimii de undă care se atestă pe partea laterală a trunchiului de con solidificat.

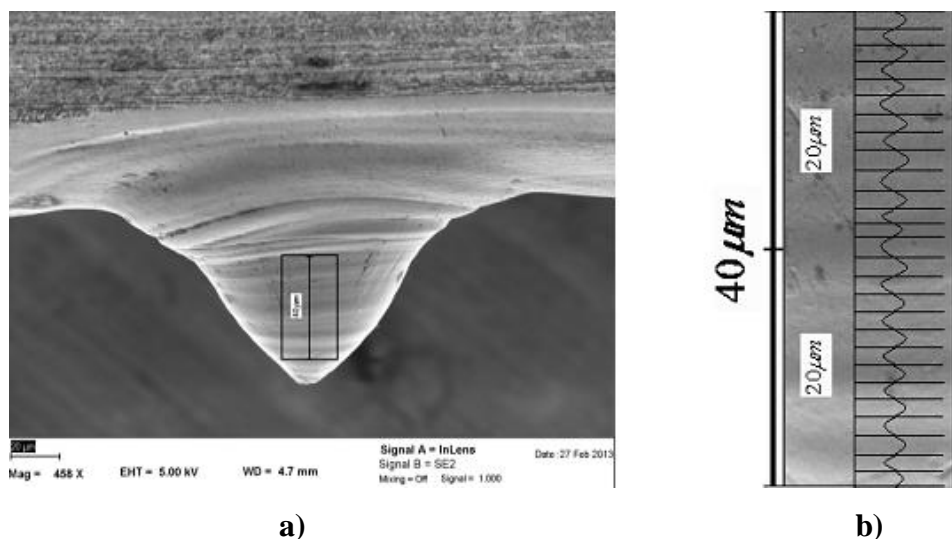


Fig. 4.7. Morfologia suprafeței asperităților de tip con Taylor: a) imagine obținută prin metoda SEM; b) determinarea lungimii de undă medii pentru unda transversală [58]

În urma modelării, s-a obținut valoarea medie a lungimii de undă mecanică longitudinală:

$$\lambda_{l\ med} = \frac{40\ \mu m}{13} = 3,077\ \mu m \quad (4.5)$$

în care: $\lambda_{l\ med}$ – lungimea medie a undei mecanice longitudinale (μm).

În baza imaginilor SEM obținute pentru asperitățile conice extrase din suprafețe plane ale pieselor din oțel 45, s-a determinat valoarea lungimii de undă mecanice longitudinale ce variază în limitele 3 – 5 μm (vezi fig. 3.30), iar pentru asperitățile extrase de pe suprafețele firelor metalice din wolfram și aliajele acestuia cu reniu, valoarea lungimii de undă longitudinală variază în limitele 3 – 15 μm (vezi fig. 3.16 a și 4.7).

4.2. Încercări experimentale, privind stabilirea caracteristicilor de emisie termoelectronică de către suprafețele prelucrate în cazul formării pe suprafețele active a unor straturi de oxizi și în cazul lipsei acestora, în condiții expres

În conformitate cu metodica cercetărilor experimentale de măsurare a intensității curenților de emisie a fost executate măsurători pentru termocatozi executați din fir de Wolfram și/sau aliajele acestuia cu suprafața activă fără, și în prezența meniscurilor extrase cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls [108, 109]. Realizarea măsurătorilor, cu privire la stabilirea valorii

intensității curentului electric de termoemisie, presupune utilizarea în camera de lucru, a vacuumului de o depresiune cât mai înalt posibilă. Din motiv, că depresiunea obținută cu ajutorul instalației de vacuumare de tipul „BYII-5”, la care sau realizat încercările expres, nu era una prea mare ($10^{-3} - 10^{-4}$ mbar), electrozii de wolfram nu erau durabili, cu alte cuvinte, erau în stare să funcționeze doar câteva ore, deoarece, deși lent, totuși se oxidau. Totuși, instalația „BYII-5”, permite realizarea măsurătorilor intensității curentilor electrice de saturație în cazul emisiei termoelectronice în condiții expres.

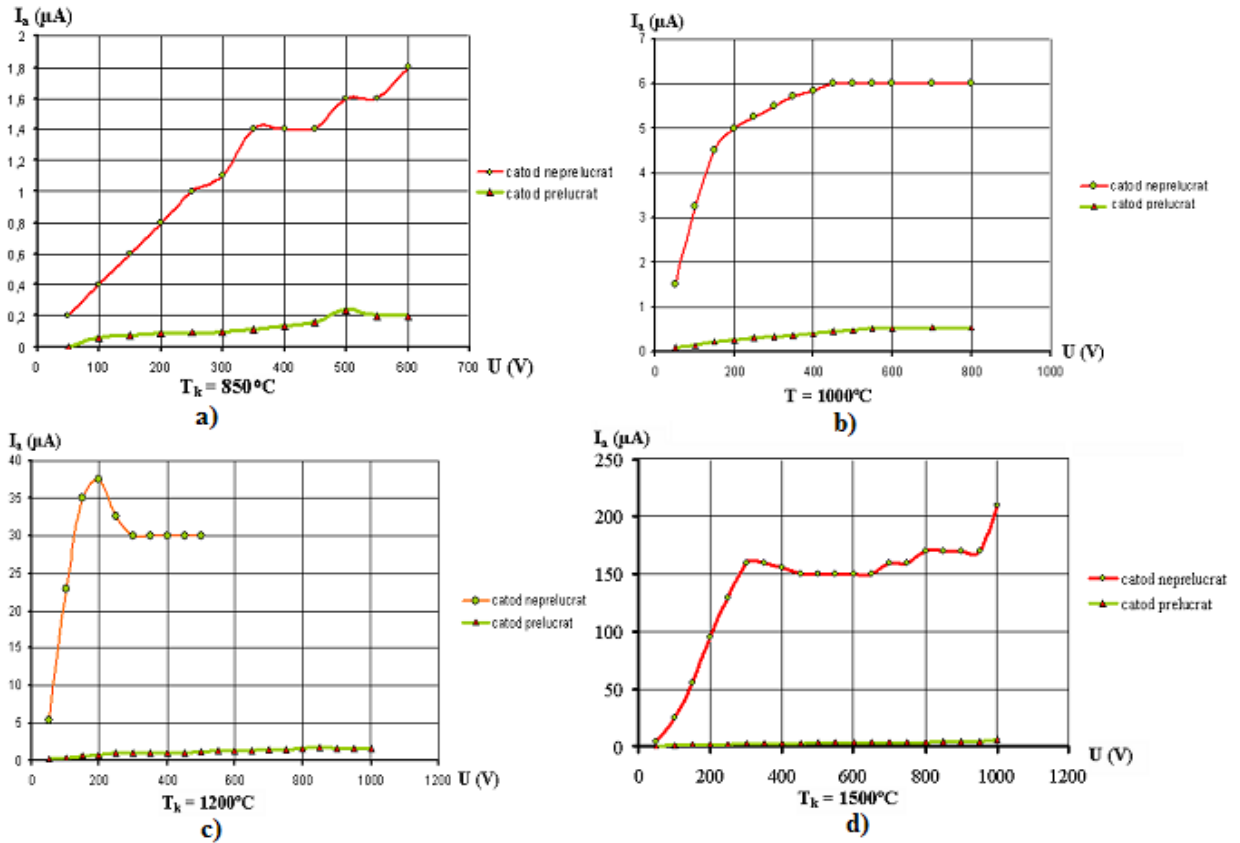


Fig. 4.8. Caracteristicile volt–amperice, obținute în condiții expres ale catodilor simpli în comparație cu cei care au fost prelucrați cu aplicarea DEI în mediu aer și care nu au fost supuși procedului de dezoxidare a suprafețelor active: a) $T_k = 850^\circ C$; b) $T_k = 1000^\circ C$; c) $T_k = 1200^\circ C$; d) $T_k = 1500^\circ C$

În fig. 4.8, sunt prezentate dependențele volt-amperice, privind încercarea catodilor la emisie termoelectronică în condiții expres. Se observă în toate aceste 4 cazuri, că la mărirea temperaturii, se mărește valoarea intensității curentului de termoemisiune. Dacă analizăm minuțios datele prezentate în fig. 4.8, observăm, că pentru termocatozii ai căror suprafețe au fost prelucrate cu aplicarea DEI și la care s-a asigurat creșterea suprafeței active, în loc să obținem valori ale intensităților măsurate mai mari, în comparație cu intensitățile obținute pentru termocatozii simpli,

neprelucrați prin metoda DEI, s-a obținut viceversa. Toate cazurile cercetate au demonstrat, ca prezența oxizilor diminuează considerabil proprietățile de emisiune electronica. Acest rezultat se explică relativ simplu. DEI care au avut loc în mediu aer, contribuie la formarea pe suprafețele prelucrate, a straturilor de oxizi. Straturile de oxizi, împiedică electronii liberi să părăsească metalul deoarece posedă o rezistență electrică mai mare, în raport cu suprafețele care nu sunt acoperite cu oxizi [91]. Reieșind din aceste considerente și pentru a obține un alt rezultat se impune a nu realiza modificarea microgeometriei suprafețelor termocatozilor executați din fire de wolfram, cu aplicarea DEI în mediu aer. Ținând cont de aceste constatări, modificarea microgeometriei suprafețelor catozilor se impune a fi realizată în medii mai inerte din punct de vedere chimic pentru a evita efectele oxidării în procesul prelucrării. Utilizarea mediilor inerte (vacuum sau gaze inerte) pentru execuția modificării suprafeței electrozilor executați din wolfram, în calitate de material de bază, cu scopul excluderii posibilității oxidării suprafețelor prelucrate cu aplicarea DEI, conduce la complicarea tehnologiei [65, 66]. În cazul, când, nu dorim, sau nu avem posibilitatea să evitam oxidarea suprafețelor prelucrate cu aplicarea DEI, am putea efectua decaparea suprafeței piesei, după executarea modificării microgeometriei suprafețelor metalice, iar în calitate de decapant poate fi folosită soluția de NaOCl – 15% încălzită până la 70°C, sau soluții constituite din NH₄OH – 28%, N₂O₂ – 30% și apă deionizată, în conformitate cu cele descrise în lucrările [22, 91]. Cu scopul evitării formării stratului de oxid pe suprafața piesei în procesul modificării microgeometriei, după cum a fost menționat în capitolul II, prelucrarea piesei se efectua în camera specială, în care se introducea argon. Prealabil, din cameră se evacua aerul, păstrând neschimbate regimurile de prelucrare. Așa dar, mărimea interstițiului ca și în cazurile precedente constituia $S = 0,2$ mm, energia degajată în interstițiu constituia $W_s = 0,09$ J (pentru tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare $U_c = 60$ V și capacitatea bateriei de condensatoare $C = 100$ μF). S-a observat, că după prelucrare în mediu argon pe suprafața electrodului nu se formează pelicula de oxid. Însă, este necesar a menționa, că în acest caz energia care se degajă în interstițiu este necesar a fi micșorată considerabil, deoarece în aceste condiții modificarea microgeometriei poartă un alt caracter, ceea ce poate fi condiționat de modificarea caracteristicilor mediului de lucru și redistribuirea energiei degajate în interstițiu. În cazul utilizării catozilor prelucrați în mediul gazului plasmagen (argon), s-a obținut un caracter total diferit al rezultatelor, privind caracteristicile volt-amperice pentru proba cu asperitate și pentru cea fără asperitate conică pe suprafața activă (vezi graficul prezentat în fig. 4.9). Acestea au fost primele rezultate experimentale pozitive, obținute în condiții expres, în care intensitatea curenților de emisie termoelectronică se obținea mai mare pentru termocatozilor care aveau o suprafață activă sporită, în comparație cu intensitatea obținută pentru termocatozii simpli.

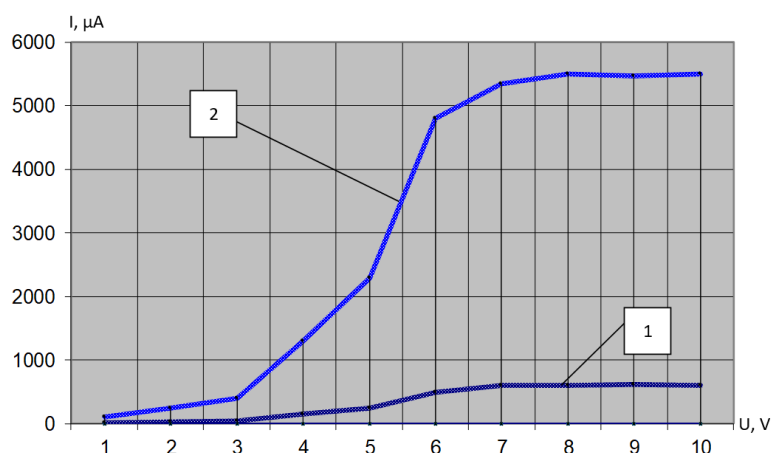
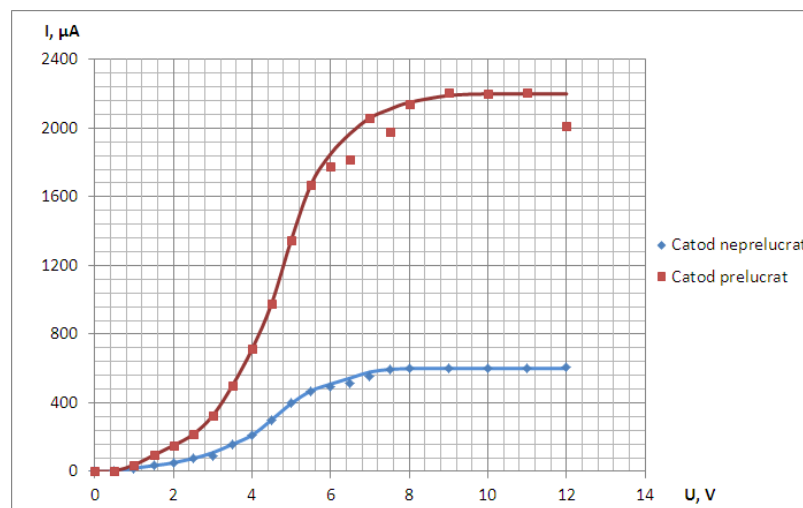


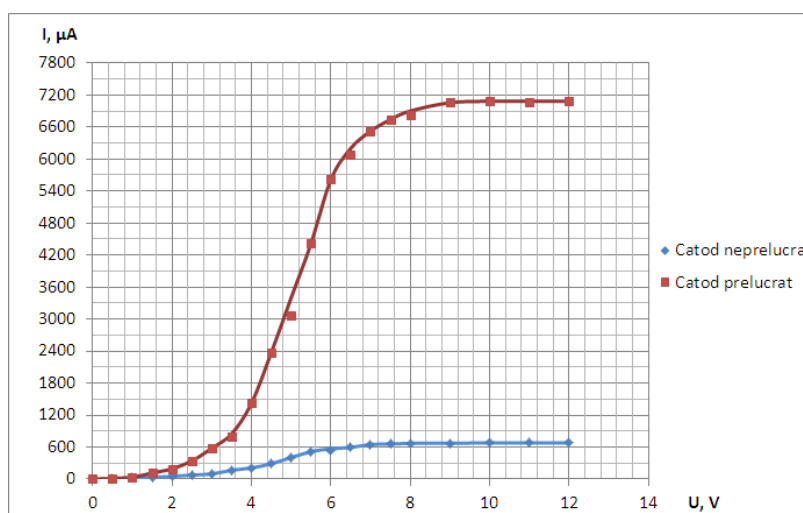
Fig. 4.9. Caracteristica volt-amperică de emisie obținută în condiții expres, în care diferența de potențial dintre catodi rămâne o mărime constantă [79]

Dacă analizăm cele prezentată în fig. 4.9, constatăm, că în cazul termocatozilor a căror suprafață conțin meniscuri conice, în aceleași condiții de exploatare cu cele ale catozilor cu suprafețe netede observăm, că intensitatea curentul de emisie (în regim de saturație) este aproximativ de 9 ori mai mare. Rezultatele emisie termoelectronice, prezentate grafic în fig. 4.9 sunt obținute pentru catodi realizați din fire cilindrice cu diametre de 1,1 mm executați din aliajul wolframului cu reniu (10%), diferența de potențial dintre anod și catod constituia 800 V, iar distanța dintre aceștia era de 4 mm. Gradul de vacuumare în camera de lucru varia în limita 10^{-3} – 10^{-4} mbari. Acest fenomen nu corespunde în tocmai relației Richarson–Dechmen. Acesta poate fi explicat prin faptul, că relația sus menționată, posibil a fost dedusă pentru suprafețe regulate, pe când cele formate experimental nu sunt de acest tip. Un alt motiv care ar explica rezultatele obținute este prezența vârfurilor conice ale meniscurilor care servesc și în calitate de concentratoare a câmpului electric în aceste zone, ceea ce poate influența suplimentar și benefic procesul de termoemisie a suprafețelor.

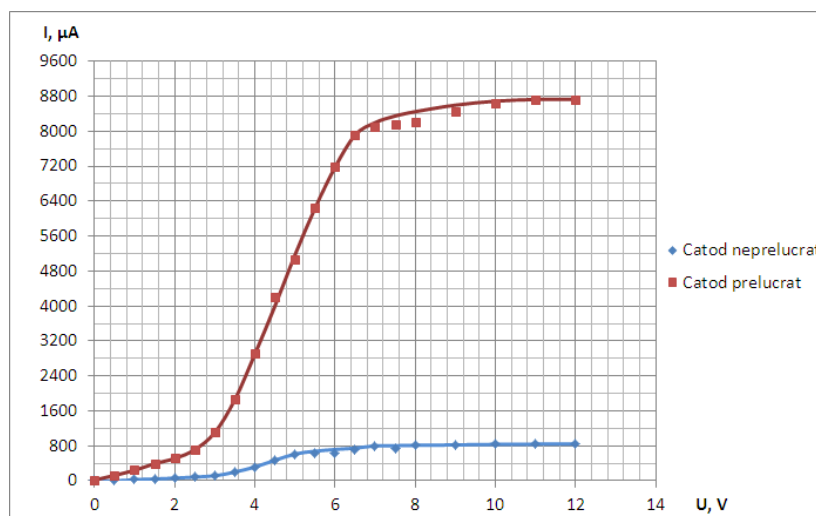
Așadar, putem constata, că formarea asperităților sub forma de meniscuri pe suprafețele de emisie sporesc eficiența de funcționare a catozilor și pot fi recomandați pentru aplicarea în realizarea termocatozilor. Realizare prelucrărilor în mediu inert sau de vacuum, conduce la crearea unor dezavantaje cum ar fi: complexitatea echipamentelor de prelucrare, crearea de cheltuieli nedorite de energie și materiale, se limitează posibilitățile de aplicare a tehnologiei prelucrării prin aplicarea DEI. Din cauza acestor dezavantaje majore s-a renunțat la ideea de a utiliza medii inerte sau de vacuum, cu scopul modificării microgeometriei suprafețelor metalice. Până într-un final, termocatozii au fost prelucrați în mediu aer, dar cu aplicarea metodelor, privind înlăturarea stratului de oxid de pe suprafața prelucrată.



a)



b)



c)

Fig. 4.10. Caracteristica volt-amperică de termoemisie pentru diverse diferențe de potențial dintre catod și anod egală cu: a) $U_{k-a} = 750$ V; b) $U_{k-a} = 900$ V și c) $U_{k-a} = 1050$ V [84]

După cum a fost menționat în capitolele II și III, o soluție mai eficientă a fost de a implica electrozi-scule executați din grafit, la aplicarea DEI [125]. Utilizarea electrozilor-scule executați din grafit, permitea de a obține suprafețe modificate microgeometric, în mediu aer, fără prezența straturilor de oxizi ce se formau, atunci când ambii electrozi erau confecționați din wolfram sau aliajele acestuia cu reniu.

În continuare vom analiza caracteristicile volt-amperice prezentate în fig. 4.10 a, b și c, construite pentru perechi de termocatozi (cu suprafață netedă și cu suprafață pe care este prezentă asperitatea-menisc la care lipsesc straturile de oxizi) supuși emisie termoelectronice. În acest caz, diferența de potențial dintre electrozi se modifica cu pasul de 150 V. Astfel, diagrama prezentată în fig. 4.10 a, este construită pentru diferența de potențial dintre anod și catod egală cu 750 V, pentru diagrama din fig. 4.10 b, egală cu 900 V, iar pentru diagrama prezentată în fig. 4.10 c, de 1050 V. Caracteristicile volt-amperice de emisie termoelectronică, prezentate grafic în fig. 4.10 sunt obținute pentru catozi realizați din fire cilindrice cu diametre de 1,1 mm executați din aliajul wolframului cu reniu (10%), distanța dintre electrozi era stabilită la fel egală cu 4 mm, iar gradul de vacuumare în camera de lucru varia în limita $10^{-3} - 10^{-4}$ mbari.

Dacă analizăm datele prezentate în fig. 4.10, atunci observăm, că în fig. 4.10 a, intensitatea de saturație se obține de circa 3,7 ori, iar în fig. 4.10 b și c, practic de 11 ori mai mare pentru termocatozii a căror suprafețe active prezintă asperități conice, în comparație cu termocatozii cu suprafața activă netedă. Comparând rezultatele obținute pe cale experimentală, pentru perechile de electrozi cu și fără prelucrarea prin DEI, prezentate în fig. 4.9 și fig. 4.10 vom concluda, că catozii care au fost prelucrați prin metoda descărcărilor electrice în impuls au prezentat o valoare a intensității curentului de saturație în cazul emisie termoelectronice mai mare, față de catozii neprelucrați prin această metodă.

Rezultatele prezentate pot varia în dependență de regimurile și condițiile stabilite pentru efectuarea experimentului, ca de exemplu: mărimea interstițiului dintre electrozi, temperatura de încălzire a termocatomului, dimensiunile și numărul de asperități raportate la o unitate de suprafață, condițiile de extragere a meniscurilor Taylor, gradul de oxidare a suprafeței prelucrate, diametrul și materialul firului pentru executarea catodului, gradul de vacuumare a camerei de lucru, s.a.

4.3. Măsurători, privind emisia termoelectronică în condiții de exploatare reală

În general, toate fenomenele în natură se manifesta mai mult sau mai puțin evident începând cu anumite condiții sau situații. Astfel, la temperatura camerei, emisia termoelectronică este neglijabilă, deoarece pentru eliberarea unui electron dintr-un careva metal numai sub acțiunea unui câmp electric exterior, teoretic ar fi necesar ca intensitatea acestuia să fie de ordinul 10^{10} –

10^{11} V/m. Experimental s-a constatat, că emisia electronică la temperatura mediului ambiant, numită și emisie la rece, poate avea loc și pentru intensități ale unui câmp electric exterior cu intensitatea de ordinul $10^7 - 10^9$ V/m. Acest fapt poate fi explicat numai prin modificarea formei barierei de potențial în prezența câmpului electric exterior, iar în consecință, a existenței posibilității ca unii electroni să străpungă pragul prin efect tunel. În continuare vom prezenta legăturile stabilite experimental, privind dependențele factorilor de ieșire de cei de intrare în cercetare.

În conformitate cu rezultatele obținute (vezi subcapitolul 4.1), intensitatea curentului termoelectronic I , va crește odată cu mărirea diferenței de potențial U_a , aplicată între anod și catod, datorită măririi intensității câmpului electric între cei doi electrozi, favorizându-se emisia prin câmp electric, numai până la o anumită valoare – numită intensitatea curentului de saturație I_s . Intensitatea curentului de saturație de obicei se măsoară direct, între anod și termocatod, implicând un microampermetru ce se conectează în serie, dar poate fi exprimată și cu relația (4.6):

$$I_s = \frac{e \cdot N}{t} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot N_{sec} \quad (4.6)$$

în care: I_s –intensitatea curentului de saturație (A); e – sarcina electronului (C); N – numărul de electroni; t – timpul (s), iar N_{sec} – numărul maxim de electroni extrași într-o secundă.

În urma studierii literaturii de specialitate și în conformitate cu propriile rezultate ale măsurătorilor experimentale obținute, se demonstrează, că mărimile N_{sec} și respectiv I_s cresc, odată cu sporirea temperaturii catodului. Conform relației (1.36), puterea de emisie este direct proporțională cu mărirea variației suprafeței active și de asemenea crește în dependență de temperatură, deoarece, valoarea temperaturii în această relație este la puterea a patra.

4.3.1. Determinarea mărimii variației suprafeței active ale catozilor

Măsurătorile experimentale a intensității curentului electric de emisie termoelectronică s-au realizat pentru catozi diferiți, ai căror arii active a suprafețelor, variaiu pentru suprafețe circulare cu și fără prezența meniscurilor conice.

În tabelele 4.1, 4.2 și 4.3 sunt prezentate valorile experimentale ale diametrului bazei și înălțimii meniscului conice, în funcție de regimul de prelucrare a suprafeței pentru probe executate din wolfram de puritate tehnică și aliaje ale wolframului cu reniu (10% sau 20% Re). În baza acestor rezultate a fost determinat și sporul de arie a suprafeței active (ΔA), prin extragerea din ea a unei asperități sub formă de con Taylor, cu condiția de a idealiza forma acestor asperități, spre forma unor conuri regulate, ceea ce în practică nu corespunde.

Tabelul 4.1. Variația mărimii suprafeței active pentru termocatozi executați din W de puritate tehnică [159]

Nr.	U _c , V	W _s , J	τ, μs	h _m , μm	d _{b.m.} , μm	ΔA, μm ²
1.	60	0,18	100	28	56	1206,47
2.	60	0,36	125	35	84	1991,94
3.	60	0,54	160	42	112	2945,88
4.	60	0,72	180	56	140	5154,53
5.	60	0,90	200	63	168	6628,23
6.	60	1,08	220	70	182	8133,43

Tabelul 4.2. Variația mărimii suprafeței active pentru termocatozi executați din aliajul wolframului cu reniu (10%) [159]

Nr.	U _c , V	W _s , J	τ, μs	h _m , μm	d _{b.m.} , μm	ΔA, μm ²
1.	60	0,18	100	49	84	3493,33
2.	60	0,36	125	70	84	6049,79
3.	60	0,54	160	84	112	9190,21
4.	60	0,72	180	98	140	12925,69
5.	60	0,90	200	112	168	17259,69
6.	60	1,08	220	126	196	22193,96

Tabelul 4.3. Variația mărimii suprafeței active pentru termocatozi executați din aliajul wolframului cu reniu (20%)

Nr.	U _c , V	W _s , J	τ, μs	h _m , μm	d _{b.m.} , μm	ΔA, μm ²
1.	60	0,18	100	50	86	3642,12
2.	60	0,36	125	71	88	6329,61
3.	60	0,54	160	83	116	9177,37
4.	60	0,72	180	97	143	12846,26
5.	60	0,90	200	111	169	17064,58
6.	60	1,08	220	124	194	21547,98

S-a observat, că sporirea ariei active este mai mare pentru probele executate din aliajul wolframului cu reniu. Analizând datele prezentate în tabelele 4.2 și 4.3, sporirea ariei active pentru aliajul wolframului cu reniu (10% sau 20%), este aproximativ aceeași. Pentru catozii din wolfram de puritate tehnică, odată cu creșterea energiei degajate în interstițiu (de la 0,18 până la 1,08 J), înălțimea meniscurilor variază de la 28 μm până la 70 μm, iar diametrul asperităților variază de la 56 μm la 182 μm, iar pentru catozii confecționați din aliajele wolframului cu reniu, prelucrate în aceleași condiții, înălțimea meniscurilor variază de la 49 μm până la 126 μm, iar diametrul asperităților variază de la 84 μm la 196 μm maxim. Obținerea pe suprafața aliajelor wolframului cu reniu, a meniscurilor cu înălțime mai mare, în comparație cu înălțimea acestora pe suprafața wolframului de puritate tehnică, se explică prin „efectul reniu”. După cum putem observa,

înălțimea meniscurilor și diametrul bazei acestora depinde în mare măsură de energia degajată în interstițiu. Cu alte cuvinte, cantitatea de energie degajată în interstițiu este un parametru important ce influențează formarea meniscurilor pe suprafețele metalice.

4.3.2. Rezultatele măsurătorilor pentru rezistența electrică, determinarea rezistivității materialului termocatodului și a funcțiilor $I(U)$, $P(U)$ și a $T(P)$

După cum a fost menționat în cadrul prezentei teze, termocatozii asemănători, care se utilizează până în zilele noastre, sunt realizați din fire de wolfram sau aliajele acestuia cu diametre de 0,15 – 0,3 mm. Firele cu diametre mai mari (de până la 1,2 mm în diametru), care au fost implicați în experimente privind modificarea microgeometriei suprafețelor metalice, nu au fost cercetați în experimente privind modificarea microgeometriei suprafețelor metalice, nu au fost cercetați la emisie termoelectronică, deoarece, din punct de vedere energetic, nu sunt rentabili. Au fost supuși realizării termocatozilor doar fire cu diametrul de 0,2 mm și respectiv 0,25 mm, executați din aliajul wolframului cu reniu (10%).

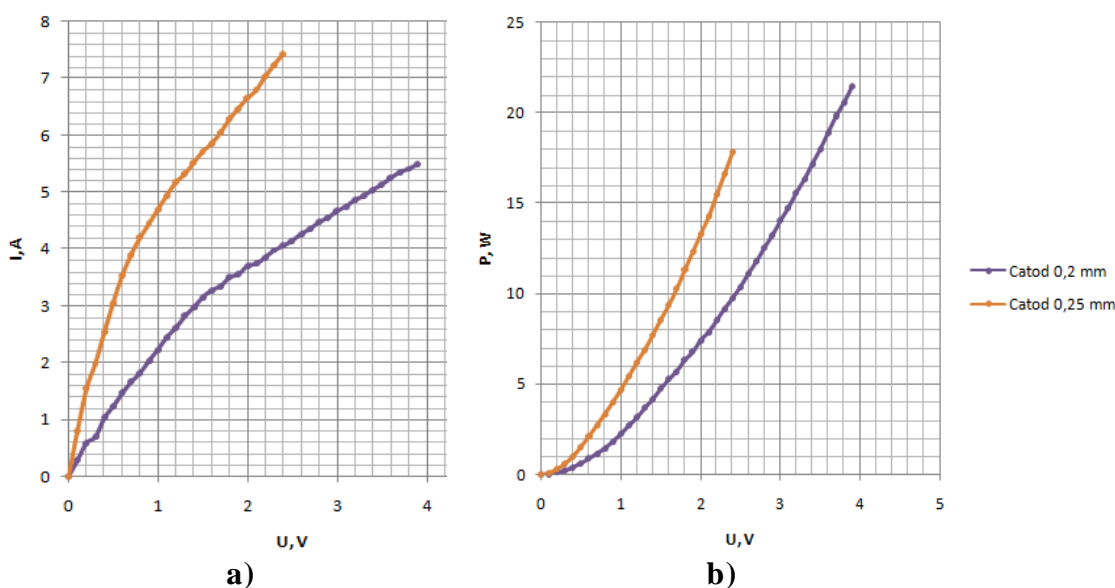


Fig. 4.11. Caracteristica volt-amperică (a) și dependența puterii disipate pe catod (b) în funcție de tensiunea aplicată de la sursă de alimentare pentru catodii cu diametre de 0,2 mm și respectiv 0,25 mm, executați din aliajul wolframului cu 10%Re [159]

Conform datelor prezentate în capitolul II, pentru firul cu diametrul de 0,2 mm și lungimea inițială de 66 cm a fost măsurată rezistența electrică egală cu 3,7 Ω , rezistivitatea egală cu aproximativ $17,6 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$, rezistența catodului cu lungimea de 2 cm (lungimea reală a firului utilizat pentru construirea termocatozilor) egală cu 0,112 Ω , iar pentru firul cu diametrul de 0,25 mm și cu lungimea de 134 cm a fost determinată rezistența de 4,2 Ω , rezistivitatea de aproximativ $15,38 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ și pentru acești termocatozi, rezistența electrică

pentru 2 cm de lungime era egală cu $0,063 \Omega$ [159]. În baza caracteristicii volt-amperice prezentate în fig. 4.11 (a), au fost stabilite dependențele funcțiilor $I(U)$, approximate cu relațiile:

$$I = 2,08 \cdot U^{0,77} \quad (4.7)$$

$$I = 4,44 \cdot U^{0,65} \quad (4.8)$$

în care: I – intensitatea curentului electric ce trece prin termocatod (A); U – tensiunea electrică aplicată termocatodului, de la sursa de curent (V).

În relația (4.7) indicele exponentei egal cu 0,77 corespunde catozilor cu diametre egale cu: $d = 0,2$ mm, iar în relația (4.8), indicele exponentei egal cu 0,65 corespunde catozilor cu diametre egale cu: $d = 0,25$ mm. Caracteristicile volt-amperice în ambele cazuri sunt asemănătoare, dar totuși diferă. Aceasta se explică prin aceea, că catodul cu diametru mai mic se încălzește mai repede.

Relațiile (4.9) și (4.10) prezintă dependența puterii disipate pe catod și în acest caz pentru diametru mai mic, valoarea parametrului crește mai rapid pentru grosimea mai mică a firului de execuție a catodului (vezi curbele prezentate în diagrama din cadrul fig. 4.11, b).

$$P = 2,08 \cdot U^{1,77} \quad (4.9)$$

$$P = 4,44 \cdot U^{1,65} \quad (4.10)$$

în care: P – puterea disipată pe termocatod (W); U – tensiunea electrică aplicată termocatodului, de la sursa de curent (V).

În timpul experimentului se măsoară direct valorile intensității curentului electrice I și ale tensiunii electrice U , pentru a determina valorile puterii, cu scopul determinării dependenței temperaturii (vezi fig. 4.12) de parametri de intrare. Ulterior se determină și dependența curentului de emisie termoelectronică, fiind posibilă o comparare a datelor teoretice și a datelor obținute experimental, pentru diferiți catozi (neprelucrați sau prelucrați prin aplicarea metoda DEI).

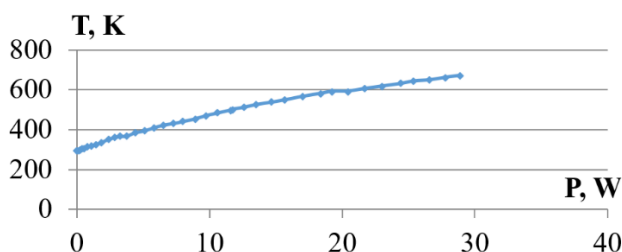


Fig. 4.12. Dependența temperaturii catodului în funcție de puterea disipată pe el de la sursa de curent [159]

În baza datelor prezentate grafic în fig. 4.12, s-a determinat relația dependenței temperaturii de încălzire a termocatozilor de puterea sursei de alimentare:

$$T = 293 + 25,22 \cdot P^{0,84} \quad (4.11)$$

în care: T – temperatura termocatodului (K); P – puterea disipată pe termocatod (W).

După cum se observă în fig. 4.12, dependența $T(P)$ este realizată de la temperatura camerei până la aproximativ 650 K. Se observă o dependență aproape liniară. Dependența curentului de emisie termoelectronică de parametrii sursei de alimentare (U , I sau P) au practic aceeași formă. Rezistivitatea electrică a materialului, respectiv rezistența electrică a termocatozilor se schimbă cu modificarea temperaturii, ceea ce se confirmă și experimental, iar legea lui Ohm nu poate fi aplicată pentru diapazonul de temperaturi mari.

4.3.3. Rezultate, privind determinarea intensității curentului electric de saturație ale termocatozilor în condiții de exploatare reală

Pentru valori mici ale diferenței de potențial aplicate în camera de lucru, între electrodul-anod și electrodul-catod U_{a-c} , intensitatea curentului de emisie I_e , crește la început lent. Aceasta se explică prin faptul, că la valori mici ale diferenței de potențial între electrozi nu toți electronii emiși de catod ajung la anod, fiind respinși de norul de electroni (sarcina spațială negativă), situat în spațiul dintre anod și catod. Cu creșterea în continuare a diferenței de potențial U_{a-c} , are loc dispersarea norului de electroni și intensitatea curentului de emisie I_e crește.

Astfel, în cadrul laboratorului de cercetare al Institutului Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizică și Inginerie Nucleară Horia Hulubei din București-Măgurele, România s-au realizat mai multe încercări. S-a observat, că dacă diferența de tensiune între electrozi este mai mare, atunci și intensitatea curentului electric de emisie sporește. Așa dar, experimental a fost determinat, că diferența de potențial optimă între electrozi trebuie să fie de minim 500 V, pentru distanța dintre electrozi egală cu 4 mm. Totuși, majoritatea experimentelor au decurs la diferențe de potențial egale cu 1000 și 1500 V. Sursa de tensiune avea posibilitate să genereze o diferență de potențial între electrozi egală cu 3 mii de volți. Pentru diferența de potențial între electrozi, U_{a-c} egală cu valoarea tensiunii de saturație, U_s , intensitatea curentului de emisie nu mai crește, deoarece toți electronii emiși de către catod, la temperatura la care s-a încălzit catodul, ajung la anod.

În fig. 4.13 sunt prezentate dependențele intensității curentului de emisie termoelectronică față de puterea sursei pentru catozii testați, cu scopul determinării valorilor maxime a intensității curentului de saturație a emisie termoelectronice. Se observă, că pentru valori mici ale puterii P disipate pe catod, intensitatea curentului de emisie I_e , crește la început lent pentru toate tipurile de catozi supuși încercărilor experimentale. Aceasta se explică și prin faptul, că la valori mici

ale puterii disipate pe catod, electronii liberi nu primesc suficientă energie pentru a se avea posibilitate să părăsească materialul din care este confecționat termocatodul.

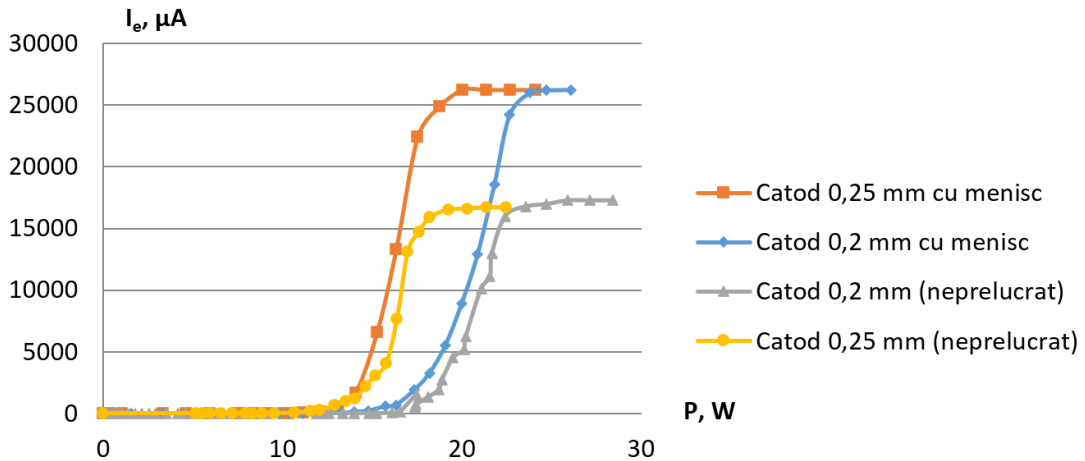


Fig. 4.13. Dependența intensității curentului de emisie termoelectronică funcție de puterea sursei de alimentare a termocatodului [159]

Dacă încercăm să prezentăm dependențele experimentale a intensității curentului de emisie termoelectronică ca funcție de puterea disipată pe catod, conform datelor prezentate în cadrul fig. 4.13, prin relații matematice, atunci acestea pot fi scrise sub forma [159]:

$$I_e = -0,007P^6 + 0,527P^5 - 12,55P^4 + 134,2P^3 - 633,5P^2 + 1039P - 214,0 \quad (4.12)$$

$$I_e = 0,019P^6 - 1,476P^5 + 41,05P^4 - 508,0P^3 + 2774,1P^2 - 5445P + 1326 \quad (4.13)$$

$$I_e = 0,000P^6 - 0,036P^5 + 2,458P^4 - 49,18P^3 + 369,6P^2 - 910,8P + 318,2 \quad (4.14)$$

$$I_e = 0,021P^6 - 1,692P^5 + 49,95P^4 - 677,9P^3 + 4221P^2 - 9655P + 45,19 \quad (4.15)$$

în care: I_e – intensitatea curentului de emisie termoelectronică (μA); P – puterea disipată pe termocatod (W).

Relațiile (4.12) și (4.13) exprimă respectiv intensitatea curentului de emisie termoelectronică ca funcție de puterea disipată pe el, pentru catodul cu diametrul egal cu $d = 0,2$ mm și pentru catodul cu diametrul de bază egal cu $d = 0,25$ mm, pe suprafața cărora se atestă prezența asperităților conice pe suprafața activă. Relațiile (4.14) și (4.15) prezintă aceiași dependențe, dar pentru catodii cu suprafață cilindrică netedă, la care nu s-a realizat modificarea microgeometriei prin aplicarea descărcărilor electrice în impuls.

Comparând rezultatele experimentale pentru toate cazurile, vom concluda, că catodii care au fost prelucrați prin metoda descărcărilor electrice în impuls cu extragerea din suprafața activă a asperităților de tip con Taylor și care nu prezintă la suprafață straturi de oxizi, au prezentat o intensitate a curentului de saturație pentru emisia termoelectronică mult mai mare, în raport cu catodii neprelucrați prin această metodă. În același timp se observă, că catodul cu diametrul mai

mare asigură o creștere mai rapidă a curentului electronic, fapt ce se poate explica prin aceea, că se încălzește mai rapid și, că posedă o suprafață exterioară mai mare. În același timp, se observă, că atingerea valorii curentului de saturație este similară, dacă ne referim la puterea consumată de catod, atât pentru catozii netezi cât și pentru cei cu asperități (vezi fig. 4.14).

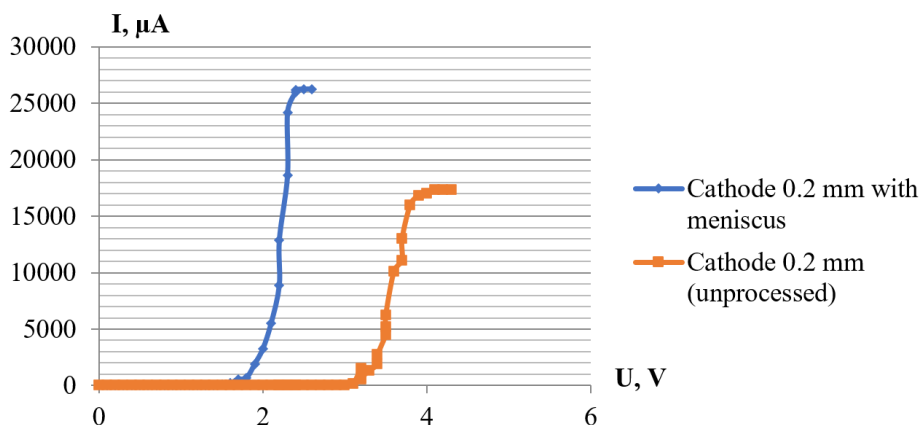


Fig. 4.14. Dependența intensității curentului de emisie termoelectronică față de tensiunea de alimentare a sursei de curent pentru catodul cu diametrul de 0,2 mm grosime

Sporirea ariei active a catodului cu aproximativ doar 0.02 mm^2 influențează considerabil sporirea curentului de emisie. S-ar părea, că se încalcă legile descrise de clasicii teoriei termoemisiei, însă lucrurile nu stau chiar așa. După cum a fost deja menționat în lucrările [19, 35, 38] suprafața asperității conice este una complexă, prezentând ondulații, iar pe suprafețele grăunților de cristalizare au fost observate asperități de ordin nanometric, care la rândul lor pot cauza sporirea eficienței emisiei electronilor. Asperitățile conice funcționează în calitate de concentratoare de câmpuri electrice, care la fel contribuie la sporirea efectului de emisie electronică. Așa dar, temperatura de funcționare a termocatozilor studiați este cuprinsă în limitele de la 700 până la 2300 °C. Durata de viață a termocatozilor este cuprinsă între sute și zeci de mii de ore, dacă se asigură vacuumarea înaltă a camerei în care aceștia funcționează. Pe măsură ce temperatura de funcționare se mărește, eficiența crește și, prin urmare, sporește intensitatea curentului de emisie, dar mărirea temperaturii de funcționare spre limitele de funcționare se va conduce la reducerea durabilității catozilor. Din motiv, că catozii noi elaborați sunt mai eficienți, este posibil ca aceștia să fie exploatați la temperaturi mai mici, neintimidând caracteristicile de emisie comparativ cu catozii obișnuiți, iar durabilitatea acestora să crească. În continuare, în graficele din fig. 4.14 și fig. 4.15 sunt prezentate caracteristicile volt-amperice pentru 2 perechi de termoelectrozi, o pereche fiind confecționată din fire din aliajul wolframului cu reniu (10%). În fig. 4.14 este prezentată caracteristica volt-amperică pentru termocatozii executați din fire cu diametre de 0,2 mm, iar în fig. 4.15 pentru cei cu diametre egale cu 0,25 mm.

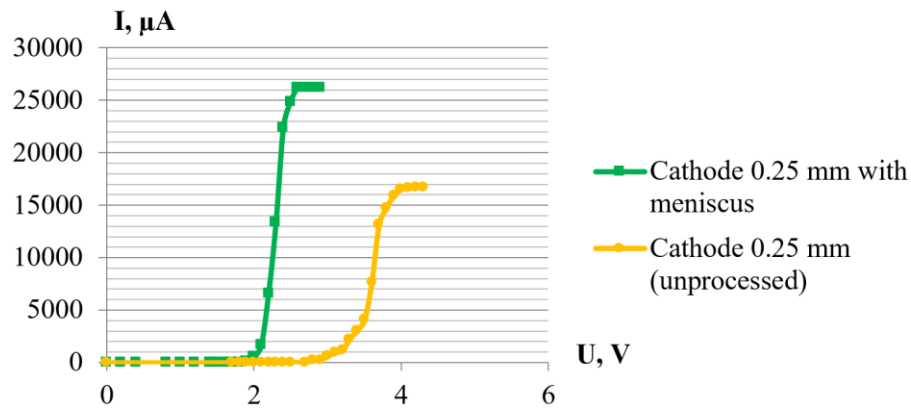


Fig. 4.15. Dependența intensității curentului de emisie termoelectronică față de tensiunea de alimentare a sursei de curent pentru catodul cu diametrul de 0,25 mm grosime

Dacă analizăm atent aceste caracteristici volt-amperice, observăm, că valoarea intensității curentului electric de saturație pentru catodii prelucrați cu aplicarea DEI, este mai mare cu aproximativ 1,5 – 1,6 ori, în raport cu catodii neprelucrați. Dacă comparăm cu cât se amplifică aria suprafeței active, dacă de pe suprafața catodului se extrage o asperitate de tip con Taylor, atunci observăm, că în mediu aceasta crește respectiv cu 1,5 – 1,6 ori (în baza datelor prezentate în tabelul 4.2 și 4.3). De aici, putem afirma, că coeficientul de amplificare a curentului electric de emisie, în cazul acestor cercetări este de aproximativ 1,5 – 1,6 ori (vezi fig. 4.14 și 4.15), iar, valoarea intensității de saturație a curentului de emisie termoelectronică se obține la tensiuni de alimentare a termocatozilor mai mici cu aproximativ 2 V, ceea ce prezintă un alt parametru ce atestă îmbunătățirea caracteristicilor de emisie termoelectronică (vezi datele experimentale prezentate grafic în fig. 4.14 și 4.15). Comparând rezultatele experimentale și anume a caracteristicilor volt-amperice, privind emisia termoelectronică, prezentate în fig. 4.14 și fig. 4.15, vom conclud, că catodii care au fost prelucrați prin metoda descărcărilor electrice în impuls cu extragerea din suprafața activă a asperităților de tip con Taylor, au prezentat o intensitate a curentului de saturație pentru emisia termoelectronică mult mai mare, față de catodii neprelucrați prin această metodă. Dacă analizăm graficile volt-amperice, observăm, că pentru toți catodii s-a depistat o creștere a valorii intensității curentului de saturație de la aproximativ 16500 mA la 26500 mA, adică cu aproximativ 10 mii de microamperi.

Este important a menționa, că odată cu creșterea substanțială a intensității curentului de emisie termoelectronică se atestă o creștere substanțială a acestui parametru la tensiuni aplicate de aproximativ 2 ori mai mici, iar valoarea curentului de saturație la fel se atinge pentru valori ale tensiunii aplicate cu 2 V mai mici. Ceia ce înseamnă ca pentru același curent de încălzire a catodului se va aplica, sau consuma o energii de cca 2 ori mai mica.

În cercetările executate anterior de către autorii [34, 58, 59] au fost stabilit, că temperatura de încălzire a catodului satisfac dependențele clasice pentru suprafețe regulate. Rezultatele prezentate în acest capitol diferă cu puțin în raport cu dependențele clasice, deoarece asperitățile conice, cum a mai fost menționat servesc în calitate de concentratoare ale câmpurilor electrice și termice și pe suprafața laterală există conuri de dimensiuni nanometrice, care la fel pot servi ca surse suplimentare de electroni. Experimental s-a demonstrat, că intensitatea curentului electric de saturație nu este direct proporțional cu numărul de asperități prezente pe suprafața activă a termocatodului. Totuși, pentru termocatozii care aveau pe suprafețele active mai mult de o asperitate conică pe vârf, se obținea doar cu puțin mai mare valoarea intensității de saturație a curentului electric de emisie.

4.4. Recomandări tehnologice de obținere a catozilor destinați emisiei termoelectronice

Pentru obținerea în practica a catozilor aplicabili în construcția aparatelor cu funcționare în baza fasciculelor de electroni se vor respecta următoarele operații tehnologice:

- Fixarea semifabricatului (prin înșurubare) sub forma de fir cilindric cu diametrul de 0,2 mm (sau 0,25 mm) și lungimea de 25 mm în dispozitiv, urmată de încălzirea la roșu ($T \approx 450 - 600$ °C) cu parcurgerea de curent electric și încovoierea la forma funcțională;
- Extragerea, prin deșurubare a catodului obținut;
- Sudarea electrică prin rezistență electrică a catodului de portcatod. Portcatodul reprezintă un disc ceramic (izolator) cu diametrul exterior de 14 mm, ce posedă 2 orificii perpendiculare discului la distanța de la margine egală cu 3 mm și conține 2 bare cilindrice executate din oțel inoxidabil (conductor) cu diametrul de 1,4 mm și lungimea de 25 mm, care la un capăt sunt cu o margine plană, obținută prin presare, pentru a fi mai ușor de sudat prin metoda rezistenței electrice;
- Montarea dispozitivul creat prin înșurubarea elementelor de fixare. Prinderea și fixarea catodului în dispozitivul instalație în calitate de anod cu suprafața de prelucrat orientată în jos: stabilirea valorii interstițiului $S = 0,2$ mm; conectarea sursei de impulsuri de curent; introducerea dispozitivului de fixare al electrozilor în camera de lucru; atingerea valorii gradului de vid de minim 10^{-2} mbar; introducerea în cameră a gazului inert (argon) la presiunea atmosferică;
- Asigurarea topirii locale a piesei determinată cu relația: $Q = \frac{4W_s}{\pi \cdot d_c^2 \cdot S} \geq Q_{top}$ [7] (conform relației 3.1). Cantitatea de căldură necesară topirii materialului piesei, Q_{top} , depinde de densitatea volumetrică de topire a materialului piesei, care ia în considerație căldura specifică de topire, q_{top} și densitatea materialului piesei, ρ ;

- În interstițiu se va crea un câmp electric cu intensitatea de cca 10^8 V/m [7], în conformitate cu relației (3.2): $E_{cr} = \sqrt[4]{64\pi^2\rho g\gamma \cdot 3 \cdot 10^4}$. Direcția de acțiune a câmpului electric va coincide cu direcția acțiunii forței de greutate;
- Realizarea descărcării electrice în impuls, cu extragerea asperității conice;
- Deconectarea sursei de tensiune. Demontarea dispozitivului prin deșurubarea elementelor de fixare. Extragerea dispozitivului de fixare a electrozilor destinați cercetării emisie termoelectronice.

4.5. Concluzii la capitolul IV

În urma analizei rezultatelor obținute de alți autori, cât și a rezultatelor cercetărilor experimentale realizate în prezenta, putem concluda următoarele:

- în majoritatea cazurilor, centrele de emisie au prezentat asperități conice, iar factorul de amplificare a câmpului electric, conform estimărilor autorilor [56, 146], poate atinge valori de 10^2 sau chiar și mai mult;
- asperități similare au fost depistate și pe suprafețele electrozilor executați din așa materiale ca: Cu, Ni, W, Al, Ta și oțel inoxidabil, ceea ce lărgeste diapazonul de aplicare;
- atât intensitatea curentului, cât și puterea, de emisie electronică sunt funcții direct proporționale de mărimea ariei active a suprafeței de emisie a electrozilor catod;
- intensitatea curentului de emisie electronică de saturație este o mărime constantă și nu depinde de diametrul catodului, dar care se obține considerabil mai repede pentru electrozilor cu diametru mai mic, dat fiind faptul, că acesta se încălzește mai repede;
- diferența de potențial aplicată asupra interstițiului din tunul electronic joacă un rol deosebit în sporirea intensității curentului de emisie;
- în condiții expres de măsurare pentru electrozii prelucrați (pe suprafața cărora sunt prezente asperități de tip con Taylor), valoarea intensității curentului de emisie termoelectronică de saturație se obține cu până la 10-11 ori mai mare în raport cu electrozii clasici;
- pentru valori mici ale puterii P , disipate pe catod, intensitatea curentului de emisie I_e , crește, la început lent pentru toate tipurile de catodi supuși măsurătorilor, aceasta se explică și prin faptul, că la valori mici ale puterii disipate pe catod, electronii nu primesc energia suficientă pentru a se îndepărta de acesta;
- sporirea neesențială a ariei suprafeței active a catodului (cu numai 0,01-0,02 mm²) prin extragerea asperităților conice cu aplicarea DEI, influențează considerabil creșterea valorii intensității curentului de termoemisie de la 17 mA la 26 mA.

CONCLUZII ȘI RECOMANDĂRI

Concluzii finale

În urma cercetărilor realizate și a rezultatelor obținute, pot fi formulate următoarele concluzii finale:

- în baza modelului fizic al fenomenului de electroeroziune și a completărilor acestuia propuse în capitolul III, paragraful 3.9, care are ca bază dezvoltarea undelor capilare pe suprafața metalului lichid sub acțiunea forțelor câmpului electric, tensiunii superficiale a metalului topit și forței de greutate, a fost demonstrată și confirmată posibilitatea extragerii și congelării asperităților conice de tip Taylor, din suprafețe metalice ale pieselor executate din wolfram de puritate tehnică, aliajele wolframului cu reniu (10 și 20 %), oțel 45 ș.a. [79];
- la finalul descărcării solitare, odată cu micșorarea intensității curentului, au loc procese de divizare a petelor electrodice „calde”, până la cele „rece” formate pe suprafețe fierbinți, care provoacă extragerea nanoasperităților din suprafața grăunților noi formați pe suprafața prelucrată prin solidificare [53, 59], iar în cazul repetării descărcărilor solitare, asperitățile extrase din suprafețe cresc în înălțime și se micșorează în diametru până la contopire (capitolul III, paragraful 3.7, subparagraful 3.7.4);
- mărimea interstițiului (S) și durata impulsului de descărcare (τ) influențează practic în același mod asupra mărimii înălțimii (h_m) și a diametrului bazei (d_m) asperităților conice extrase de pe suprafețele metalice, indiferent de compoziția materialului de execuție al pieselor, totuși vom constata, că ele sunt mult mai mari pentru piesele executate din wolfram de puritate tehnică, decât pentru aliajele wolframului cu reniu (10 sau 20%), fapt ce poate fi explicat prin temperatura mai înaltă de topire a wolfram de puritate tehnică în raport cu cea a aliajului wolfram-reniu (capitolul III, paragraful 3.8);
- pentru a extrage asperități conice din suprafețe metalice ale pieselor executate din wolfram de puritate tehnică, aliajele wolframului cu reniu (10 și 20 %), oțel 45 ș.a., este necesar de a respecta parametrii energetici de bază ce influențează geometria acestora (capitolul III, paragraful 3.8): energia degajată în interstițiu (W_s), cu valori cuprinse în limitele a 0,072 până la 4,8 J; durata impulsului de descărcare (τ), de la 100 la 220 μ s; mărimea interstițiului (S), de la 0,1 la 0,4 mm și a lua în considerare proprietățile materialului de execuție a electrozilor-probe (densitatea, căldura specifică de topire, ș.a.);
- extragerea asperităților conice poate avea loc la mărimi ale interstițiului cuprinse de la 0,1 până la 0,35 mm, intervalul optim fiind de 0,16 – 0,3 mm, iar înălțimea asperităților pot atinge

valori maxime de până la 0,15 mm, totuși nu se recomandă stabilirea interstițiului mai mic de 0,2 mm, cu scopul evitării micro-sudării celor doi electrozi și evitării scurtcircuitării circuitului electric (capitolul III, paragraful 3.2) [53, 59];

- intensitatea curentului de emisie electronică, cât și puterea sunt funcții direct proporționale cu mărimea ariei active a suprafeței de emisie a electrodului catod, iar cea a curentului de emisie electronică de saturație este o mărime constantă [84] și nu depinde de diametrul catodului, dar crește considerabil mai repede pentru electrodul cu diametrul mai mic, dat fiind faptul, că acesta se încălzește mai repede (capitolul IV, paragraful 4.3, subparagraful 4.3.3) [159];

- sporirea ariei suprafeței active a termocatodului cu numai 0,01 – 0,02 mm², comparativ cu suprafața inițială totală a acestuia egală cu aproximativ 12 – 15 mm² (capitolul III, paragraful 3.8), influențează considerabil creșterea valorii intensității curentului de emisie termoelectronică (de la 16,5 mA la 26,5 mA), astfel prezența asperităților conice, extrase din suprafețe metalice ale termocatozilor, cu aplicarea DEI permit sporirea intensității curentului de emisie termoelectronică cu cca 10⁴ μA, în raport cu termocatozii a căror suprafețe active nu au fost prelucrate prin această metodă [159].

Recomandări

Direcții ulterioare de cercetare

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

- stabilirea condițiilor de modificarea a microgeometriei suprafețelor probelor executate dintr-o gama mai largă de materiale aplicate în diverse domenii: industria construcției de mașini și aparate, micro și nanoelectronică;

- stabilirea condițiilor de extragere a mai multor asperități din suprafața prelucrată pentru aplicarea în diverse domenii precum construcția emițătoarelor și absorbantelor de radiații;

- studierea efectului de modificare a microgeometriei suprafețelor asupra sporirii eficacității de funcționare a răcitoarelor;

- cercetarea condițiilor și dimensiunilor asperităților formate pe organele funcționale precum producerea cantileverelor aplicate în construcția microscoapelor de forță atomică și în construcția unei noi clase de rugozimetre;

- în baza rezultatelor obținute se va purcede la proiectarea și producerea echipamentelor necesare implementării proceselor tehnologice în întreprindere, etc.

Recomandări tehnologice

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

- în procesul de prelucrare a suprafețelor pentru asigurarea eficacității de extragere și congelare a asperităților conice, electrozii se vor poziționa astfel ca, direcția de acțiune a câmpului electric să coincidă cu direcția acțiunii forței de greutate;

- piesa supusa prelucrării se va include în circuitul de descărcarea a generatorului de impulsuri de curent în calitate de anod;

- la extragerea meniscurilor conice din suprafețe metalice se va ține cont de parametrii energetici, interstițiu (0,2 – 0,3 mm) și proprietățile termo-fizice ale materialului de execuție;

- pentru extragerea și congelarea meniscurilor din suprafețele pieselor executate din materiale metalice plastice se va micșora tensiunea de încărcare a bateriilor de condensatoare sub 60 V, iar durata impulsului sub 100 μ s;

- pentru a evita formarea oxizilor în suprafața prelucrată, procesul de prelucrare se va produce în mediu de gaz plasmogen inert (vacuum, argon ș.a.);

- în vederea sporirii mărimii intensității curentului de termoemisie este necesară vacuumarea înaltă a camerei pentru încercări ($\leq 10^{-5}$ mbar) și crearea unei diferențe de potențial între electrozi de cel puțin 1000 V (cel mult 1,5 KV);

- pentru a asigura o emisie termoelectronică cât mai efectivă se va ține cont de proprietățile materialului de execuție a catodului, aria suprafeței active de emisie și temperatura de încălzire a lui.

BIBLIOGRAFIE

1. NEAGU, D. *Aplicații ale fascicului de electroni*. București, 2007. 26 p. Disponibil la: [http://www.dumitruneagu.ro/pdf/\(6.3.2\)APLICATIIale%20FE.pdf](http://www.dumitruneagu.ro/pdf/(6.3.2)APLICATIIale%20FE.pdf).
2. BOLUNDUȚ, I. *Materiale și tehnologii neconvenționale*. Tehnica-Info, Chișinău, 2012. 229 p. ISBN 978-9975-63-334-5.
3. DETLAV, A., IAVORSKI, B. *Curs de fizică*. Lumina, Chișinău, 1991. 606 p. ISBN 5-372-00755-9.
4. HERMAN, R. *Tehnologia materialelor*. Vol. II, Politehnica, București, 2010. 200 p. ISBN 978-606-554-091-0.
5. SLĂTINEANU, L. *Tehnologii neconvenționale în construcția de mașini*. Tehnica-Info, Chișinău, 2000. 265 p. ISBN 9975-910-99-8.
6. TOPALĂ, P. *Tehnologia materialelor: (notițe de curs)*. USARB, Bălți, 2001. 188 p. ISBN 9975-931-07-3.
7. TOPALĂ, P., STOICEV, P. *Tehnologii de prelucrare a materialelor conductibile cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls*. Tehnica-Info, Chișinău, 2008. 265 p. ISBN 978-9975-910-61-3.
8. SAMUSI, I. *Metode difractometrice și microscopice*. Tehnica-Info, Chișinău, 2006. 138 p. ISBN 978-9975-910-01-9.
9. VIZUREANU, P. *Metode și tehnici de cercetare în domeniu. Planificarea cercetării. Trening pe aparatură/Software performante (curs)*. Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi”, Școala Doctorală a FȘIM, Iași, 2011. 120 p. [citat 10.06.2021]. Disponibil la: <http://www.cuantumdoc.tuiasi.ro/desfasurare/Metode%20si%20tehnici%20SIM%201.pdf>.
10. *SEM Scanning Electron Microscope A to Z. Basic Knowledge For Using The SEM*. JEOL Serving Advanced Technology, No. 1101B972C (Ks). Japan, 32 p. Disponibil la: https://www.jeol.co.jp/en/applications/pdf/sm/sem_atoz_all.pdf.
11. MOHAMMED, A., ABDULLAH, A. *Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review*. In: Proceedings of 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics – HERVEX, November 7 – 9, Băile Govora, Romania, 2019, 9 p. ISSN 1454-8003. Disponibil la: <https://www.researchgate.net/publication/330169176>.
12. ROTARU, N., MALÎGA, O., CODREANU, I. *Radiologie și radioprotecție*. Centrul Editorial – Poligrafic Medicina, Chișinău, 2020. 242 p. ISBN 978-9975-82-177-3.
13. NORDBERG, G., FOWLER, B., NORDBERG, M., FRIBERG, L. *Handbook on the Toxicology of Metals*, Third Edition. Elsevier Academic Press. 2007. 975 p. ISBN 978-0-

12-369413-3. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-369413-3.X5052-6>.

14. *Clear periodic table of chemical elements: Wolfram*. Disponibil la: https://pt.kle.cz/ro_RO/wolfram.html. Accesat la data: 21.06.2021.
15. TOPALĂ, P., OLARU, I., RUSNAC, V. *Noi secvențe la tabloul fizic al fenomenului electroeroziunii*. Culegere de lucrări științifice: Tehnologii moderne, Calitate, Restructurare. Vol. 2, Chișinău, 2005. p. 299 – 302. ISBN 9975-9875-5-9.
16. СТАВИЦКИЙ, В.И. *Научные основы особо точных методов фермообразования поверхностей*. Электрическая размерная обработка материалов, Том 40, № 1, 2004. с. 4 – 17. ISSN 0013-5739.
17. SLĂTINEANU, L. *Tehnologii neconvenționale în construcția de mașini*. Tehnica-Info, Chișinău, 2000. 252 p. ISBN 9975-910-99-8.
18. TOPALĂ, P., SLĂTINEANU, L., DODUN, O., COTEAȚĂ, M., PÎNZARU, N. *Electrospark Deposition by Using Powder Materials*. Materials and Manufacturing Processes, 25, 2010. pp. 932 – 938. Copyright © Taylor & Francis Group, LLC ISSN 1042-6914 print/1532-2475 online. DOI: 10.1080/10426910903447238.
19. TOPALA, P., BEȘLIU, V., RUSNAC, V., **GUZGAN, D.**, PLEȘCO, I. *Obtaining surfaces with taylor cone shaped asperities of micro- and nano-scale dimensions using the EDI method*. International journal of modern manufacturing technologies, Vol. VI, number 2/2014, ModTech Publishing House, Romania, 2014, pp. 91 – 96. ISSN 2067-3604. https://ijmmt.ro/vol6no22014/Topala_Pavel.pdf.
20. TOPALA, P., OJEGOV, A., HIRBU, A., BESLIU, V., **GUZGAN, D.** *Physical and chemical phenomena at the interaction of EDI plasma with electrodes surfaces*. AIP Conference Proceedings 2075, 060012 (2019), DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5091190>. ISBN 978-0-7354-1803-5. https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/176573. IF: 0.43.
21. GINZEL, J., BEHRENS, A., WULFSBERG, J. *Technology development for EDM using statistical analysis of arc information*. Journal of Materials Processing Technology, 10 Iunie 2004, 14-th International Symposium on Electromachining. pp. 232 – 237. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2003.10.039.
22. BEȘLIU, V. *Cercetări privind tratarea termică și termochimică a suprafețelor pieselor prin aplicarea descărcărilor în impuls*. Rezumatul tezei de doctor. Galați, România. 2008. 56 p.
23. 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. pp. 277 – 282.

24. RUSNAC, V. *Modificarea microgeometriei suprafețelor pieselor la formarea straturilor de depunere prin metoda electroeroziunii. Rezumatul tezei de doctor.* Galați, România. 2008. 56 p.
25. IURCENCO, E. *Tehnologia de obținere a acoperirilor nanostructurate durificate prin scânteii electrice pe aliaje de aluminiu și utilizarea lor în restaurarea și repararea pieselor de mașini. Autoreferatul tezei de doctor în științe tehnice.* AȘM, IFA. Chișinău, 2016. 27 p.
26. TOSUN, N., COGUN, C., PIHTILI, H. *The Effect of Cutting Parameters on Wire Crater Sizes in Wire EDM.* Springer-Verlag London L.. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2003. pp. 857 – 865. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-002-1404-1>.
27. HER, M., WENG, F. *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. pp. 715 – 719. DOI: <https://doi.org/10.1007/s001700170116>.
28. TOPALA, P. *Studiul fundamental și aplicativ al efectelor electroerozive în tehnologiile neconvenționale. Autoreferat al tezei de doctor habilitat în tehnică.* Tehnica UTM, Chișinău, 2008. 51 p.
29. TOPALA, P., PINZARU, N., STOICEV, P. *Transformations in the surfaces of tool-electrodes during surfaces layer formation by applying electric discharges in impulse.* ModTech 2010, Iași-Chișinău-Belgrad, 2010. pp. 639 – 642. ISSN 2286-4369.
30. PARASCHIV, D., BARDAC, D., RÂNEA, C. *Procesarea suprafețelor metalice: manual pentru studenți.* Tehnica-Info, Chișinău, 2001. 180 p. ISBN 9975-63-043-X.
31. Ferreira, J. *A study of die helical thread cavity surface finish made by Cu-W electrodes with planetary EDM.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 34, Issue 11-12. 2007. pp 1120 – 1132. DOI: 10.1007/s00170-006-0687-z.
32. TOPALĂ, P., BEȘLIU, V., RUSNAC, V., OJEGOV, A., PÎNZARU, N. *Modificarea structurală a compoziției chimice și a microgeometriei suprafețelor pieselor cu aplicarea DEI.* Fizică și tehnică: Procese, modele, experimente, nr. 1, Bălți, 2011, pp. 36 – 42. ISSN 1857-0437. <http://libruniv.usarb.md/xXx/reviste/fizteh/fizteh.html>.
33. ТОПАЛА, П. *Массоперенос и диффузионные процессы в поверхностных слоях деталей машин при электроискровой обработке.* „Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования и технологической оснастки” Санкт-Петербург, 2007. с. 234 – 242. ISSN 0869-5326.
34. TOPALA, P., GUZGAN, D. *The technology of surface micro geometry modifications via application of electric discharges in impulse.* Advanced Manufacturing Technologies 2013,

- 26 – 30 June, Sozopol, Bulgaria, Edition Technical University of Sofia, pp. 97 – 104. ISSN 1313-4264.
35. TIGINYANU, I., TOPALA, P., URSAKI, V. *Nanostructures and Thin Films for Multifunctional Applications. Technology, Properties and Devices*. Springer, 2016. 576 p. ISBN 978-3-319-30197-6.
 36. КРАШОВА, Е., МОРГУНОВ, Ю., САУШКИН, Б. *Статистическое исследование шероховатости поверхности изделий из Ti-6Al-4V, построенных методом селективного электронно-лучевого плавления*. *Электронная обработка материалов*, 58 (6), 2022. с. 1 – 12. ISSN 0013-5739. DOI: <https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.6.01>.
 37. HIRBU, A., TOPALA, P., CANTER, V., OJEGOV, A. *Multi-canal electrode for plasma formation by electrical discharges in impulse with auto-ionization*. The 18-th International salon of research, innovation and technological transfer „Inventica 2014”, 2-4 July 2014, Editura Performantica, Iasi, Romania, 2014, pp. 553 – 554, ISSN 1844-7880.
 38. TOPALA, P., TIGHINEANU, I. STOICEV, P. *Aplicarea descărcărilor electrice în impuls în micro- și nano-tehnologii*. *Buletinul AGIR nr. 3/2015*. p. 71-76. ISSN 2247-3548.
 39. ЖАКИН, А. *Поверхностные электроны: теория и ЭГД приложение*. *ЭОМ*, 58 (6), 2022. с. 61 – 72. ISSN 0013-5739. DOI: <https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.6.61>.
 40. ТОПАЛА, П., БАЛАНИЧ, А., ПЫНЗАНУ, Н., СТОЙЧЕВ, П., СЛЭТИНЯНУ, Л. *Способы увеличения стойкости электродов-инструментов применяемых при формировании поверхностных слоев импульсными разрядами*. *Машиностроение и техносфера XXI века. Донецк-2009*, с. 168 – 172. ISBN 966-7907-25-2.
 41. PÎNZARU, N. *Experimental research on the behavior of tool-electrodes made of conductive materials by applying DEI*. *Nonconventional Technologies Review*. Romanian Association of Nonconventional Technologies Romania, December, 2016. pp. 15 – 20. ISSN 2359-8646.
 42. TOPALĂ, P., OJEGOV, A. *Formation of oxide thin pellicles by means of electric discharge in pulse*. Iași: *Buletinul Institutului Politehnic. Tomul LIV (LVIII)*, 2008. pp. 121 – 128. ISSN 1011-2855.
 43. САФРОНОВ, И., ТОПАЛА, П., ГОРБУНОВ, А. *Электроэрозионные процессы на электродах и микроструктурно-фазовый состав легированного слоя*. Chișinău: Tehnica-INFO, 2009. 473 с. ISBN 9975-65-092-X.
 44. 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, pp. 59 – 64. ISSN 2067–3604, 2017.

45. СМИРНОВ, А., ХВОЩАН, О., ЖЕКУЛ, В. *Эрозия электрода при высоковольтном электрическом разряде в жидкости*. Электронная обработка материалов, 58 (3), 2022. с. 21 – 33. ISSN 0013-5739. DOI: <https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.3.21>.
46. SLĂTINEANU, L., NAGÎȚ, G., DODUN, O., COTEAȚĂ, M., CHINESSTA, F., GONCALVES-COELHO, A., PAMIES-TEIXEIRA, J., SAN-JUAN, M., SANTO, L., SANTOS, F. *Non-traditional Manufacturing processes*. Tehnica-Info, Chisinau, 2004. 300 p. ISBN 9975-63-164-9.
47. LILIAN, P., VALERIE, J., SUBHASH, H. *Microstructure and microchemistry of silicon particles formed during electrical-discharge machining*. Journal of materials science: Materials in electronics 14, 2003. pp. 507 – 510. ISSN 0957-4522. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1023981103126>.
48. TOPALA, P., OJEGOV, A., BEȘLIU, V., HÎRBU, A., PÎNZARU, N. *Sculă cu mulți electrozi pentru prelucrarea suprafețelor prin descărcări electrice în impuls*. Brevet de invenție Int. Cl: B23H 7/00 (2006.1); B23H 7/22 (2006.1); B23H 7/26 (2006.1). Nr. depozit: a 2013 0051. Data depozit: 2013.07.25.
49. ȘERBAN, V., RĂDUȚĂ, A. *Știința și ingineria materialelor. Ediție revizuită și adăugită*. București: Politehnica, 2010. 526 p. ISBN 978-606-554-044-6.
50. КУНКИН, С. и др. *Математические методы обработки экспериментальных данных. Расчетные задания. Методические указания к практическим занятиям*. Санкт-Петербург, 2002. 68 с. УДК 681.322-683.1.
51. ГРИГОРЬЕВ, А., ШИРЯЕВА, С., БЕЛОНОЖКО, Д., КЛИМОВ, А. *О форме конуса тейлора и характерном времени его роста*. Электронная обработка материалов, № 4, 2004. с. 34 – 40. УДК 621.3.032.273.
52. WILSON, P. *Formation of Taylor Cones on a Molten Metal Surface Followed by Ion Injection Into the Vacuum*. SLAC, 2007. Disponibil la: [https://www.slac.stanford.edu/econf/C070523/talks/HG07_talk_Wilson\(R\).pdf](https://www.slac.stanford.edu/econf/C070523/talks/HG07_talk_Wilson(R).pdf).
53. TOPALĂ, P., GUZGAN, D., PLEȘCO, I. *Conditions of formation of Taylor cone shaped asperities on metal surfaces by the action of pulsed electric discharge machining*. AIP Conference Proceedings 2075, 060013 (2019), DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5091191>. ISBN 978-0-7354-1803-5. https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/130868. IF: 0.43.
54. BELYAEV, M., ZUBAREV, N., ZUBAREVA, O. *Conical structures on the surface of a liquid with ion current in the space-charge limited mode*. Published 2019, Materials Science 2019 IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL) DOI: <https://doi.org/10.1109/ICDL.2019.8796820>. Corpus ID: 20106811.

55. SUVOROV, V., LITVINOV, E. *Dynamic Taylor cone formation on liquid metal surface: numerical modeling*. Published 2000, Journal of Physics D: Applied Physics. Volumul 33, Nr. 11. ISSN 1361-6463. DOI:10.1088/0022-3727/33/11/301. Corpus ID: 122544965.
56. SUVOROV, V., ZUBAREV, N. *Formation of the Taylor cone on the surface of liquid metal in the presence of an electric field*. Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 37 Issue 2, 2004. pp. 289-297. ISSN 0022-3727. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/37/2/019>.
57. TOPALĂ, P., OJEGOV, A., BEȘLIU, V., RUSNAC, V., **GUZGAN, D.**, HIRBU, A., PLESCO, I. *Oxidation of Taylor cone-shaped asperities by application of plasma in normal condition*. Nonconventional Technologies Review. Vol. 19, Nr. 2, Editura Politehnica, Timisoara, Romania, 2015. pp. 56 – 61. ISSN 2359-8646. http://dspace.usarb.md:8080/jspui/bitstream/123456789/3167/1/Topala_oxidation.pdf.
58. TOPALA, P., **GUZGAN, D.**, RUSNAC, V. *Tehnologii de formare a suprafețelor pentru emisie electronică*. Lucrări științifice: Inginerie agrară și transport auto. Vol. 38. Universitatea Agrară de Stat din Moldova, Chișinău, 2013, p. 196 – 201. ISBN 978-9975-64-251-4.
59. TOPALĂ, P., **GUZGAN, D.**, PLESCO, I. *Increasing the surface thermo-emission by the formation of asperities of Taylor cone type*. In. NAITO, M., BUCHACZ, A., BAIER, A., TOPALA, P., NEDELICU, D. *Research and Innovation in Advanced Engineering Materials*. ModTech Publishing House. 2019. pp. 159 – 184. ISBN 978-606-93704-5-2.
60. Website: <https://simion.com/>. *Definition: Richardson-Dushman Equation*. Disponibil la: https://simion.com/definition/richardson_dushman.html. Accesat la data: 08.07.2021.
61. ЖЕРЕБЦОВ, В., КАСИКОВ, И. *Предельные характеристики термоэмиссионного преобразователя энергии*. Атомная энергия, Т. 110, ВЫП. 1, 2011. с. 12 – 17. ISSN 0004-7163.
62. TOPALĂ, P. *The energy distribution in the gap at the gap technological applying of the electrical discharges in impulses*. Nonconventional Technologies Review, No. 1, 2007. pp. 129 – 132. ISSN 1454-3087.
63. TOPALA, P., RUSNAC, V., BEȘLIU, V., OJEGOV, A., PÎNZARU, N. *Physical and chemical effects of EDI processing*. Internet Journal of Engineering and Technology, Vol. II, 2011, No. 2, Issue 1, 6 p. ISSN 1338-2357.
64. TOPALA, P., OJEGOV, A., BEȘLIU, V., STOICEV, P. *Tehnologii moderne și inovații în inginerie. Note de curs*. Indigou Color, Bălți, 2017, 217 p. ISBN 978-9975-9904-4-8.
65. ANGHEL, D. *Atmospheric pressure plasma with a flat spiral electrode*. J. Electrostat, 71, 2013. pp. 155 – 158. ISSN 0304-3886. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2013.01.012>.

66. ANGHEL, D. *Non-thermal plasmas in resonant circuits*. Ed. Presa Universitară Clujeană, Cluj-Napoca, 2011. 124 p. ISBN 978-973-595-295-2.
67. TOPALA, P., BESLIU, V., OJEGOV, A., **GUZGAN, D.**, MARIN, L. *Investigation on anti-corrosion properties of the surface layers formed by applying EDI*. International Journal of modern Manufacturing Technologies, ISSN 2067-3064, Vol. VII, No.2/2015. pp. 90 – 94. https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/181098.
68. РУЧАК, В., **ГУЗГАН, Д.** *Влияние магнитного поля на формирование конусов Тэйлора в процессе электроимпульсной обработки металлов*. Машиностроение и техносфера XXI века, Сборник трудов XVII международной научно-технической конференции, Том 3, Донецк, 2010, с. 67 – 72. http://konf-sev.donntu.ru/arhiv/tom3_2010.pdf.
69. TOPALA, P., BEŞLIU, V., RUSNAC, V., **GUZGAN, D.**, PLEŞCO, I. *Obtaining surfaces with taylor cone shaped asperities of micro- and nano-scale dimensions using the electric discharges in impulse method*. International Conference on Physics of Advanced Materials, IPCAM-10, Book of Abstracts, Iasi, Romania, 2014, pp. 156. https://www.academia.edu/8748955/International_Conference_on_Physics_of_Advanced_Materials_ICPAM_10_Book_of_ABSTRACTS.
70. YU, S., LEE, B., LIN, W. *Waveform monitoring of electric discharge machining by wavelet transform*. Springer-Verlag London L., Int. J. Manuf. Technol. 2001. pp. 339 – 343. ISSN 0268-3768. DOI: <https://doi.org/10.1007/s001700170168>.
71. TOPALA, P., VLADISLAV, R., **GUZGAN, D.** *Formation of Taylor conic meniscuses on cylindrical surfaces by applying electric discharges in pulse*. ModTech 2014, International Conference “Modern Technologies in Industrial Engineering”, Book of abstracts, July 13 – 16, Gliwice, Polonia, 2014, pp. 42. ISSN 2286-4369.
72. TOPALA, P., RUSNAC, V., **GUZGAN, D.** *Formation of Taylor conic meniscuses on cylindrical surfaces by applying electric discharges in pulse*. Advanced Materials Research Vol. 1036, Trans Tech Publications, Switzerland, 2014, pp. 178 – 183. ISSN 1662-8985. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1036.178>.
73. TOPALA, P., PINZARU, N., **GUZGAN, D.**, OJEGOV, A., BESLIU, V. *Peculiarity of the tool-electrode wear mechanism during surface machining with electric discharges in impulse*. Advanced Materials Research, Vol. 1036, Trans Tech Publications, Switzerland, DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1036.470>. 2014, pp. 470 – 475. ISSN 1662-8985.

74. TOPALA, P., **GUZGAN, D.**, RUSNAC, V., OJEGOV, A., BESLIU, V. *Specifics of surface micro-geometry modification under the action of temperature and electric field of electrode spots*. Trans Tech Publications, Switzerland. Applied Mechanics and Materials, Vols. 809 – 810. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.809-810.399>. 2015. pp. 399 – 404. ISSN 1662-7482. Disponibil la: <https://www.scientific.net/AMM.809-810.399.pdf>.
75. RUSNAC, V., TOPALA, P., **GUZGAN, D.**, POPERECINII, A. *Auto-adjusting of the gap at electroerosion processing*. ModTech 2017, International Conference “Modern Technologies in Industrial Engineering”, June 14 – 17, Book of abstracts, Sibiu, Romania. 2017, pp. 74. ISSN 2286-4369.
76. RUSNAC, V., TOPALA, P., **GUZGAN, D.**, POPERECINII, A. *Auto-adjusting of the gap at electroerosion processing*. ModTECH IOP Publishing. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 227 (2017) 012112. pp. 1 – 7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/227/1/012112>. Disponibil la: https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/174562.
77. BESLIU, V., TOPALA, P., STOICEV, P., OJEGOV, A., HÎRBU, A., **GUZGAN, D.** *Unele cercetări experimentale privind coroziunea peliculelor din grafit obținute prin descărcări electrice în impuls*. Meridian ingineresc, nr. 3. 2015, p. 40 – 46. ISSN 1683-853X. https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/41359.
78. MARIN, L., TOPALA, P., STOICEV, P., BESLIU, V., OJEGOV, A., PÎNZARU, N., **GUZGAN, D.**, PLATON, A. *Influenta parametrilor tehnologici – tensiune, cantitate de electricitate - la generarea formațiunilor spațiale alcătuite din atomi de carbon de tipul fulleranelor, la aplicarea descărcărilor electrice în impuls*. Meridian Ingineresc, nr. 1 (64). 2017. p. 30 – 35. ISSN 1683-853X. https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/53571.
79. **GUZGAN, D.** *The results on metal surface micro geometry modification by applying electric discharges in impulse*. Proceedings of the 1st international conference for doctoral students IPC 2013. ACTA Universitatis Cibiniensis – Technical Series. Vol LXV, 2014., “Lucian Blaga” University of Sibiu, pp. 32 – 38. ISSN 2668-6449. DOI: <https://doi.org/10.1515/aucts-2015-0006>.
80. TOPALA, P., RUSNAC, V., **GUZGAN, D.**, PLEȘCO, I., OJEGOV, A. *Cercetări experimentale privind extragerea meniscurilor conice de pe suprafețele metalice și oxidarea acestora cu aplicarea DEI*. Fizică și tehnică: Procese, modele, experimente, nr. 1, Bălți, 2013. p. 40 – 43. ISSN 1857-0437. https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/38692.
81. TOPALA, P., MELNIC, V., **GUZGAN, D.** *Micro-oxidation of silicon surfaces by means of electrical discharges in impulse*. Fizică și tehnică: Procese, modele, experimente, nr. 2, Bălți, 2013. p. 32 – 36. ISSN 1857-0437. https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/39317.

82. TOPALA, P., **GUZGAN, D.**, RUSNAC, V. *Cercetări experimentale privind modificarea geometriei suprafețelor pieselor metalice*. Colocviul „Tradiție și inovare în cercetarea științifică”, 18 octombrie 2013, Ediția 4, USARB, Bălți, 2014. p. 250 – 255. ISBN 978-9975-50-136-1. Disponibil la: https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/99302.
83. TOPALA, P., RUSNAC, V., **GUZGAN, D.** *Analiza morfologiei suprafețelor pentru emisie electronică obținute în urma prelucrării cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls*. Colocviul „Tradiție și inovare în cercetarea științifică”, Ediția 4, USARB, Bălți, 2014. p. 255 – 259. ISBN 978-9975-50-136-1. https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/99303.
84. **GUZGAN, D.** *Conferirea unei micro-geometriei prescrise a suprafețelor metalice în scopul sporirii intensității curentului de emisie termo-electronică*. Materialele Conferinței Știința și inovarea în nordul R. Moldova: Probleme, realizări, perspective, 25 – 26 septembrie, Filiala Bălți a AȘM. Indigou Color. 2015. p. 21 – 23. ISBN 978-9975-3054-5-7. Disponibil la: https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/136701.
85. TOPALA, P., RUSNAC, V., **GUZGAN, D.**, OJEGOV, A., MELNIC, V., BALANDIN, A. *Cercetări experimentale privind obținerea peliculelor de oxizi pe suprafețe semiconductoare cu aplicarea plasmei*. Materialele Colloquia Professorum, 10.10.2014. Tradiție și inovare în cercetare științifică. Ed. a V-a. Bălți, 2015. p. 212 – 217. ISBN 978-9975-50-144-6.
86. **GUZGAN, D.** *Modificarea micro-geometriei suprafeței catodului în scopul sporirii intensității curentului de emisie termo-electronică*. Materialele Conferinței Științifice Internaționale: Relevanța și calitatea formării universitare: competențe pentru prezent și viitor, consacrată celor 70 de ani de la fondarea universității bălțene din 8 octombrie 2015. Vol. I. Tipografia USARB, 2016. p. 142-144. ISBN 978-9975-50-177-4. http://dSPACE.usarb.md:8080/jspui/bitstream/123456789/2341/1/Guzgan_modificarea_suprafetei.pdf.
87. TOPALĂ, P., **GUZGAN, D.**, BEȘLIU, V., GUȚAN, I., BALANDIN, A. *Durificarea suprafețelor metalice cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls*. Simpozionul „Realizări și perspective în ingineria agrară și transport auto”, 4-5 octombrie, Lucrări Științifice, Vol. 51. Chișinău, 2018, p. 308 – 312. ISBN 978-9975-64-300-9. Disponibil la: https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/96355.
88. БАЛАН, Н., ИВАШОВ, Е., ЛУЧНИКОВ, П., НЕВСКИЙ, А. *Острые эмиттеры электронов микроприборов и конструктивно-технологические особенности их изготовления*. Вестник науки Сибири: Серия Инженерные науки, № 3 (4). 2012. с. 89 – 98. ISSN 2226-0064.

89. МЕСЯЦ, Г. *Взрывная электронная эмиссия: монография*. Физматлит, Москва, 2011. 280 с. ISBN 978-5-94052-207-2.
90. TOPALA, P., HIRBU, A., OJEGOV, A. *A acțiunea plasmei descărcărilor electrice asupra suprafețelor metalice*. Fizica și tehnologiile moderne, vol. 10, nr. 1-2, 2012. p. 13 – 21. ISSN 1810-6498. https://ibn.idsi.md/sites/default/files/j_nr_file/vol10_2012.pdf.
91. OJEGOV, A. *Obținerea peliculelor subțiri de oxizi pe suprafețele metalice ale aliajelor de fier, cupru, aluminiu și titan, cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls*. Autoreferatul tezei de doctor în tehnică. Tehnica UTM, Chișinău, 2014. 30 p.
92. HÎRBU, A. *Procese de excitare și relaxare a moleculelor în medii gazoase*. Autoreferatul tezei de doctor în fizică. Academia de Științe a Moldovei. Chișinău, 2016. 34 p.
93. PÎNZARU, N. *Cercetări privind conceperea, proiectarea și elaborarea „electrozilor-scule” pentru formarea straturilor de suprafață cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls*. Autoreferatul tezei de doctor în tehnică. Tehnica UTM. Chișinău, 2020. 26 p.
94. POPERECINÎI, A., TOPALĂ, P., OJEGOV, A., BEȘLIU, V., **GUZGAN, D.**, RUSNAC, V. *Process and pulse generator for carbon structures formation*. Materials of the XXIV-th International Exhibition of Inventics INVENTICA 2020, 29 – 31 July, 2020, Iasi, Romania, PERFORMANTICA. pp. 407. ISSN 1844-7880.
95. TOPALA, P., OJEGOV, A., **GUZGAN, D.**, PINZARU, N., BESLIU, V., RUSNAC, V. *Electroerosion - a complex phenomenon of a physicalchemical nature*. The 11th International Conference of the Balkan Physical Union “BPU11 CONGRESS”, 28 August 2022 - 1 September 2022, Book of Abstracts, Planeta Print, Belgrade, 2022. pp. 154. ISBN 978-86-7025-950-8. Disponibil la: <https://indico.bpu11.info/event/1/book-of-abstracts.pdf>.
96. САПРОНОВА, Т., УЛЬЯНОВ, К. *Теория высоковольтного тлеющего разряда с учетом термоэмиссии электронов*. Теплофизика Высоких Температур, том 57, № 3, 2019. с. 323–327. ISSN 0040-3644. DOI: 10.1134/S0040364419030153.
97. ZHANG, J., CAI, G., LIU, X., HE, B., WANG, W. *Molecular dynamics simulation of ionic liquid electrospray: Revealing the effects of interaction potential models*. Acta Astronautica, Vol. 179, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.11.018>. 2021. pp. 581 – 593. ISSN 0094-5765.
98. TOPALA, P., RUSNAC, V., **GUZGAN, D.** *Increasing the thermoelectric capacity of emission in cathodes by modifying their surface microgeometry*. The 16th International Conference Inventica 2012, June 13-15, 2012, Institutul Național de Inventică, Iași, România, Editura Performantica, Iași, 2012, pp. 623 – 624. ISSN 1844-7880.

99. TOPALA, P., **GUZGAN, D.** *Formation of electronic thermo-emission surfaces via micro-geometry modification under conditions of applying EDI plasma.* ModTech 2013, International Conference “Modern Technologies in Industrial Engineering” June 27 – 29, Book of abstracts, Sinaia, Romania, 2013, pp. 47. ISSN 2286-4369.
100. TOPALA, P., PINZARU, N., **GUZGAN, D.** *Specifics of tool-electrodes wear mechanism at surface processing by applying electrical discharges in impulse.* ModTech 2014, International Conference “Modern Technologies in Industrial Engineering”, July 13 – 16, Book of abstracts, Gliwice, Polonia, 2014, pp. 40. ISSN 2286-4369.
101. **GUZGAN, D.** *Experimental research on surface micro-geometry modification of tungsten wires.* International Scientific Conference Light and Photonics: Science and Technology dedicated to International Year of Light and Light-based Technologies-2015, Alecu Russo Balti State University, 22nd May, Book of abstracts, Bălți, 2015, pp. 29. ISBN 978-606-93704-1-4.
102. TOPALA, P., RUSNAC, V., MELNIC, V., **GUZGAN, D.** *Formation thin oxide films on semiconductor surfaces by applying EDM.* International Scientific Conference Light and Photonics: Science and Technology dedicated to International Year of Light and Light-based Technologies-2015. Alecu Russo Balti State University, 22nd May, Book of abstracts, Bălți. 2015, pp. 33. ISBN 978-606-93704-1-4.
103. TOPALA, P., OJEGOV, A., BEȘLIU, V., RUSNAC, V., **GUZGAN, D.** *Micro- și nanostructuri formate cu descărcările electrice în impuls.* Catalog oficial: Expoziția Internațională Specializată INFOINVENT, 25-28 noiembrie, AGEPI, 2015, pp. 92.
104. TOPALA, P., BESLIU, V., OJEGOV, A., **GUZGAN, D.**, PINZARU, N., RUSNAC, V. *Investigations on anti-corrosion properties of the surface layers formed by applying EDI.* The Third International Conference on Modern Manufacturing Technologies in Industrial Engineering. Book of Abstracts. Romania. 2015, pp. 257. ISSN 2286-4369.
105. POPERECINII, A., TOPALA, P., OJEGOV, A., HIRBU, A., BESLIU, V., **GUZGAN, D.**, RUSNAC, V. *Process and pulse generator for carbon structures formation.* The XX-th International Exhibition of Research, Innovation and Technological Transfer INVENTICA. 29.06-01.07, Iași, România. 2016, pp. 241 – 242. ISSN 1844-7880.
106. TOPALA, P., **GUZGAN, D.**, RUSNAC, V., BEȘLIU, V., OJEGOV, A., PLEȘCO, I., POPERECINÎI, A., MELNIC, V. *Experimental investigations aimed at the formation of graphite pellicles on semiconductor surfaces by applying pulsed electrical discharge machining.* ModTech 2016, the 4th International Conference “Modern Technologies in

- Industrial Engineering”. June 15 – 18, Book of abstracts, Iasi, România, 2016. pp. 210. ISSN 2286-4369.
107. TOPALA, P., **GUZGAN, D.**, RUSNAC, V., BEȘLIU, V., PINZARU, N., BALANDIN, A., BOTNARI, D., PULBERE, E. *Experimental investigations aimed at the formation of silicon carbide by direct applying pulsed electrical discharge machining*. ModTech 2016, the 4th International Conference “Modern Technologies in Industrial Engineering”, June 15 – 18, Book of abstracts, Iasi, România, 2016. pp. 211. ISSN 2286-4369.
 108. **GUZGAN, D.** *Experimental investigations aimed at the thermo-electronic emission of tungsten cathodes*. ModTech 2017, International Conference “Modern Technologies in Industrial Engineering”, June 14 – 17, Book of abstracts, Sibiu, Romania. 2017, pp. 204. ISSN 2286-4369.
 109. **GUZGAN, D.**, TOPALĂ, P. *Cercetări experimentale privind emisia termoelectronică a catozilor din wolfram*. Tezele comunicărilor la Colocviul Științific „Orientări actuale în cercetarea doctorală”, Ediția a VII-a, 7 dec., Bălți: Indigou Color. 2017, p. 28. ISBN 978-9975-50-207-8. Disponibil la: https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/124049.
 110. TOPALA, P., BESLIU, V., OJEGOV, A., **GUZGAN, D.**, PLESCO, I. *Complex surface analysis of graphite pellicles formed by applying PEDM*. ModTech 2017, International Conference “Modern Technologies in Industrial Engineering”, June 14 – 17, Book of abstracts, Sibiu, Romania. 2017, pp. 210. ISSN 2286-4369.
 111. **GUZGAN, D.**, TOPALĂ, P. *The influence of tool-electrode geometry on micro-geometry modification of the work-piece at processing by pulsed electric discharge machining method*. Conferința Școlii Doctorale, TUIASI, 23 – 24 Mai, Iași, România. 2018, pp. 65 – 66. https://doctorat.tuiasi.ro/wp-content/uploads/2022/02/2018_Program-CSD-2018.pdf.
 112. **GUZGAN, D.**, TOPALĂ, P. *Experimental research of thermo-electronic emission of tungsten cathodes with modified surface micro geometry by applying of pulsed electric discharge machining*. ModTech 2018, International Conference “Modern Technologies in Industrial Engineering”, June 13 – 16, Book of Abstracts, Constanta, Romania, 2018, pp. 78. ISSN 2286-4369.
 113. POPERECINII, A., TOPALĂ, P., **GUZGAN, D.**, PULBERE, E. *High frequency pulse generator for metal surface processing*. ModTech 2018, International Conference “Modern Technologies in Industrial Engineering”, June 13 – 16, Book of Abstracts, Constanta, Romania, 2018, pp. 106. ISSN 2286-4369.
 114. BALANDIN, A., TOPALĂ, P., **GUZGAN, D.** *Experimental research on metal oxide films formation at metal powder deposition by applying pulsed electric discharge machining*.

- ModTech 2018, International Conference “Modern Technologies in Industrial Engineering”, June 13 – 16, Book of Abstracts, Constanta, Romania, 2018, pp. 108. ISSN 2286-4369.
115. RUSNAC, V., TOPALĂ, P., **GUZGAN, D.**, POPERECINII, A. *Auto-adjusting of the gap at electroerosion processing*. ModTech 2018, International Conference “Modern Technologies in Industrial Engineering”, June 13 – 16, Book of Abstracts, Constanta, Romania, 2018, pp. 110. ISSN 2286-4369.
116. POPERECINÎI, A., TOPALĂ, P., OJEGOV, A., BEȘLIU, V., RUSNAC, V., **GUZGAN, D.** *Process for metal surface hardening by applying high frequency electrical discharges*. Technical University “Gheorghe Asachi” of Iasi and National Inventics Institute of Iasi, The 22nd International Exhibition of Inventics “INVENTICA 2018”, 28 – 29 June, Iași, Romania. 2018, pp. 285. ISSN 1844-7880.
117. HÎRBU, A., TOPALĂ, P., BEȘLIU, V., OJEGOV, A., **GUZGAN, D.** *Determinarea inductanței bobinelor cu ajutorul rezonanței curenților*. Technical University “Gheorghe Asachi” of Iasi and National Inventics Institute of Iasi, The 22nd International Exhibition of Inventics “INVENTICA 2018”, 28 – 29 June, Iași, Romania. 2018, pp. 292. ISSN 1844-7880.
118. BESLIU, V., OJEGOV, A., TOPALA, P., STOICEV, P., **GUZGAN, D.** *Analysis of the chemical composition and the quality of the machine parts superficial layers formed by applying PEDM*. ModTech 2020, International Conference “Modern Technologies in Industrial Engineering”, Online edition, July 23-27, Book of abstracts, 2020, pp. 266. ISSN 2286-4369.
119. **GUZGAN, D.**, TOPALA, P., BESLIU, V., OJEGOV, A. *Increasing the cooling efficiency of the radiator by modifying the micro-geometry of the surface by applying PEDM*. ModTech 2020, International Conference “Modern Technologies in Industrial Engineering”, Online edition, July 23-27, Book of abstracts, 2020, pp. 267. ISSN 2286-4369.
120. **GUZGAN, D.**, TOPALA, P., OJEGOV, A, HIRBU, A. *Creating the absolute black body model by applying PEDM*. ModTech 2020, International Conference “Modern Technologies in Industrial Engineering”, Online edition, July 23-27, Book of abstracts, 2020, pp. 268. ISSN 2286-4369.
121. TOPALĂ, P., MELNIC, V., **GUZGAN, D.** *Formarea peliculelor de oxizi pe suprafața siliciului cu aplicarea plasmei descărcărilor electrice în impuls de acțiune indirectă*. Simpozionul „Realizări și perspective în inginerie agrară și transport auto”, 12 – 13 noiembrie. Lucrări Științifice, Vol. 45. Chișinău, 2015, p. 249 – 252. ISBN 978-9975-64-276-7. Disponibil la: https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/74501.

122. **GUZGAN, D.** *Micro-geometry surface modification of tungsten electrodes in argon medium by applying PEDM.* The 18th Edition International Conference of Nonconventional Technologies, UTM 30th of June – 1st of July, Chişinău. 2016, pp. 21.
123. TOPALA, P., **GUZGAN, D.**, PINZARU, N., DIMA, S. *Experimental research on determining the tool-electrode's linear erosion regime at dimensional processing.* The 18th Edition International Conference of Nonconventional Technologies, UTM 30th of June – 1st of July, Chişinău. 2016, pp. 30.
124. TOPALA, P., **GUZGAN, D.**, MELNIC, V., OJEGOV, A., PLEŞCO, I. *Oxide pellicle formation on silicon surfaces by applying pulsed electrical discharges of hing voltage.* The 18th Edition International Conference of Nonconventional Technologies, UTM 30th of June – 1st of July, Chişinău. 2016, pp. 30.
125. TOPALA, P., POPERECINÎI, A., OJEGOV, A., **GUZGAN, D.**, BEŞLIU, V., RUSNAC, V. *The influence energy parameters on penetration of carbon into the surface layers of metal parts and improving the uniformity of carbon structures in order to harden metal surfaces by aplying PEDM.* The 18th Edition International Conference of Nonconventional Technologies, UTM 30th of June – 1st of July, Chişinău. 2016, pp. 31.
126. KESSELS, W., PUTKONEN, M. *Advanced process technologies: Plasma, direct-write, atmospheric pressure, and roll-to-roll ALD.* MRS Bulletin, Vol. 36. 2011. pp. 907 – 913. DOI: <https://doi.org/10.1557/mrs.2011.239>.
127. DANILOV, I., HACKERT-OSCHÄTZCHEN, M., ZINECKER, M., MEICHSNER, G., EDELMANN, J., SCHUBERT, A. *Process Understanding of Plasma Electrolytic Polishing through Multiphysics Simulation and Inline Metrology.* Micromachines, Vol. 10 (3), No. 214, 2019. pp. 1 – 22. ISSN 2072-666X. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi10030214>. Disponibil la: <https://www.mdpi.com/2072-666X/10/3/214#metrics>.
128. TOPALĂ, P., STOICEV, P., BALANICI, A. PÎNZARU, N. *Упрочнение и восстановление деталей машин нанесением покрытий из порошковых материалов электроимпульсными разрядами.* Universitatea Agrară de Stat din Moldova. Lucrări ştiinţifice, volumul 21. Chişinău, 2008. ISBN 978-9975-64-132-6. c. 164 – 170.
129. NIRANTAR, S., AHMED, T., BHASKARAN, M., HAN, J., WALIA, S., SRIRAM, S. *Electron emission devices for energy-efficient systems.* Advanced Intelligent Systems, Vol. 1, Issue 4, Wiley-VCH GmbH, Weinheim, August, 2019. 18 p. ISSN 2640-4567. DOI: <https://doi.org/10.1002/aisy.201900039>.

130. TAO, S., CHAN, H., GRAAF, H. *Secondary electron emission materials for transmission dynodes in novel photomultipliers*. Materials, Vol. 9, Issue 12 (1017), 16 Dec., 2016. 18 p. ISSN 1996-1944. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma9121017>.
131. SHARIFOV, Z., GURBANOV, F. *The Anode Material Selection for Electrospark Alloying (ESA) and its Mass Transition Phenomena*. TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 11, Nr. 4. 2017. pp. 623-626. ISSN 2083-6473. DOI: 10.12716/1001.11.04.07.
132. MARIN, L. *Cercetări privind omiterea efectelor de priză dintre suprafețele metalice și nemetalice prin intermediul peliculelor de grafit. Rezumatul tezei de doctor în științe inginerești*. Tehnica UTM. Chișinău, 2022. 34 p.
133. TOPALA, P. *Electrical charges as measures for removed metal mass the electrical discharge machining*. Iasi, PIM Publisher, Nonconventional Technologies Review, No. 4/2007, pp. 103 – 108. ISSN 2359-8646.
134. TOPALA, P., HIRBU, A., OJEGOV, A. *New directions in the practical application of electro erosion*. Nonconventional Technologies Review, No. 1/2011, pp. 49 – 56. ISSN 2359-8646.
135. TOPALA, P., HIRBU, A., OJEGOV, A. *Acțiunea plasmei descărcărilor electrice asupra suprafețelor metalice*. Fizica și Tehnologiile Moderne, Vol. 10, No. 1-2, 2012, pp. 13 – 21. ISSN 1810-6498.
136. TOPALA, P., SLATINEANU, L., STOICEV, P. *Physical and chemical processes during the machining by means of the electro-erosive method*. Nonconventional technologies review, No. 1/2010, pp. 50 – 54. ISSN 2359-8646.
137. RUSNAC, V. *The role of energy and duration of discharging pulse during the micro geometry changing process of metallic parts surfaces by applying electric discharges in impulse*. The Annals of Dunarea de Jos University of Galati, Fascicle V, Technologies in Machine Building, 2008, pp. 61 – 68, ISSN 1221-4566.
138. TOPALA, P., RUSNAC, V. *The influence of the magnetic field on the process of modifying the surfaces micro-geometry metal and semiconductor by applying the electrical discharges in impulse*. Proceedings of The 14th International Conference, Modern Technologies, Quality and Innovation, ModTech, Romania, 2010, pp. 643 – 646. ISSN 2066-3919.
139. TOPALA, P., OLARU, I., RUSNAC, V. *New sequences in the physical picture of the electroerosion phenomenon*. Collection of Scientific Papers, Modern Technologies, Quality, Restructuring, nr. 3, Chisinau, 2005. pp. 92 – 102. ISSN 1454-3087.

140. TOPALA, P., RUSNAC, V. *Experimental investigations concerning the extraction of cone meniscus on metal surfaces with electrical discharge machining exhibition*. Bulletin of the Polytechnic Institute of Iasi, Vol. LIV (LVIII), Fasc. 1-3, 2008, pp. 113 – 120, ISSN 1011-2855.
141. GAERTNER, G., KNAPP, W., FORBES, R. *Modern Developments in Vacuum Electron Sources*. Topics in Applied Physics 135, Springer Cham, 2020. 597 pp. ISBN 978-3-030-47290-0. DOI: 10.1007/978-3-030-47291-7.
142. PLESCO, I., TOPALA, P. *Dezoxidarea locală a suprafețelor metalice cu aplicarea plasmei descărcărilor electrice în impuls*. INTERUNIVERSITARIA, Ed. a X-a, Materialele Colocviului Științific Studentesc, 16.05.2014, Universitatea de Stat „Alec Russo” din Bălți, 2015, p. 11 – 14. ISBN 978-9975-50-143-9.
143. RUSNAC, V. *Modelarea prin metoda rețelelor neuronale a procesului de modificare a microgeometriei suprafețelor metalice sub acțiunea descărcărilor electrice în impuls*. Universitatea Agrară de Stat din Moldova. Lucrări științifice, V. 21. Chișinău, 2008, p. 160 – 164. ISBN 978-9975-64-132-6.
144. KIRKO, D., SAVJOLOV, A. *Properties of plasma in case of capillary discharge interaction with metals*. III International Conference on Laser and Plasma Researches and Technologies, 24–27 January, Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing Ltd, Moscow, Vol. 941, 2017. pp. 1 – 4. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/941/1/012017>. ISSN 1742-6596.
145. **GUZGAN, D.**, TOPALA, P., OJEGOV, A. *Cathodes with increased thermoelectronic emission properties*. The 11th International Conference of the Balkan Physical Union “BPU11 CONGRESS”, 28 August 2022 - 1 September 2022, Book of Abstracts, Planeta Print, Belgrade, 2022. pp. 157 – 158. ISBN 978-86-7025-950-8. Disponibil la: <https://indico.bpu11.info/event/1/book-of-abstracts.pdf>.
146. МЕСЯЦ, Г. *Эктон – лавина электронов из металла*. Обзор актуальных проблем. Успехи физических наук. Том 165, №. 6, 1995. с. 601 – 626. Web of Science A1995RL93800001. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0165.199506a.0601>.
147. TOPALA, P., KANTSER, V., HIRBU, A. *Theoretical and experimental study of mechanisms governing the occurrence of electric discharges in gases*. Moldavian Journal of the Physical Sciences, Vol. 14, No. 3-4, Chisinau, 2015, pp. 221 – 230, ISSN 1810-648X.
148. TOPALA, P. *Influence of different factors above intensity process of electroerozion*. Meridian ingineresc, Nr. 2. 2006. p. 94 – 97. ISSN 1683-853X.

149. YANZHEN, Z., YONGHONG, L., YANG, S., ZHEN, L., RENJIE, J., BAOPING, C. *A novel method of determining energy distribution and plasma diameter of EDM*. International Journal of Heat and Mass Transfer 75, 2014, pp. 425 – 432. ISSN 0017-9310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.03.082>.
150. GROSCH, H., HODER, T., WELTMANN, K., BRANDENBURG, R. *Discharge formation in air at atmospheric pressure in surface barrier micro-discharge arrangements*. IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 39, Issue 11. 2011. pp. 2174 – 2175. ISSN 0093-3813. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2011.2118769>.
151. GIUBILEO, F., BARTOLOMEO, A., IEMMO, L., LUONGO, G., URBAN, F. *Field emission from carbon nanostructures*. Applied Sciences 8, no. 4 (2018) 526. ISSN 2076-3417. DOI: <https://doi.org/10.3390/app8040526>.
152. JASINSKI, M., MIZERACZYK, J. *Plasma sheet generated by microware discharge at atmospheric pressure*. Ieee Transactions on Plasma Science, Vol. 39, No. 11, November 2011, pp. 2136 – 2137, ISSN 0093-3813.
153. RUSNAC, V. *Establishing the emission properties of conductible surfaces machined by applying EDI*. Proceedings of the 15th International Conference, Modern Technologies, Quality and Innovation, 25 – 27 May, “Vadul lui Voda”, Chisinau, Republic of Moldova, 2011, pp. 1161 – 1164, ISSN 2066-3919.
154. BOLOGA, M. *Savantul care a revoluționat domeniul prelucrării metalelor. La aniversarea a 110-a a academicianului Boris Lazarenko*. Istoria Științei. Akademos 3/2020. p. 95 – 101. ISSN 1857-0461.
155. МЕСЯЦ, Г., ЯЛАНДИН, М. *Пикосекундная электроника больших мощностей*. Обзор актуальных проблем. Успехи физических наук. Том 175, №. 3, 2005. с. 225 – 246. ISSN 0042-1294.
156. *Surse termice pentru sudare*. Disponibil la: <https://slidetodoc.com/surse-termice-pentru-sudare-surse-termice-la-sudarea/>. Accesat la data: 08.07.2021.
157. TOPALA, P., GUZGAN, D., OJEGOV, A. *Current-voltage characteristics of thermo-electronic emission process*. ModTech 2021, International Conference “Modern Technologies in Industrial Engineering”, Online edition, June 23rd – 27th, Book of abstracts, 2021. pp. 55. ISSN 2286-4369. Paper ID: A-15.
158. БАЛАН, Н., ИВАШОВ, Е. *Перспективные электродные материалы автоэмиссионных и туннельных микроприборов*. Материалы международной научно-практической конференции, Инфо-2012. 2013. с. 319 – 325.

159. TOPALA, P., GUZGAN, D., OJEGOV, A. *Increasing the energy efficiency of thermocathodes operation*. Global Journal for Research Analysis (India), DOI: <https://www.doi.org/10.36106/gjra/4914740>. Vol. 10, 07 July 2021, pp. 164 – 168. ISSN 2277-8160. IF: 5,956.
160. *Закон степени трёх вторых*. Материал из Википедии — свободной энциклопедии. Disponibil la: ru.wikipedia.org/wiki/Закон_степени_трёх_вторых. Accesat la data de: 08.07.2021.
161. *Parametrii principali ai microscopului electronic Vega TeScan 5130*. Disponibil la: <http://ncmst.utm.md/laborator-microscopie-electronica>. Accesat la data de: 09.07.2021.
162. BALCĂNUȚĂ, N., VÎRLAN, N. *Dezvoltarea procesului de depuneri prin electroeroziune a unui strat de pulberi metalice folosind tehnici de Data Mining*. Analele Științifice ale Universității de Stat „Bogdan Petriceicu Hasdeu” din Cahul, vol. II, 2007. p. 124 – 132. ISBN 978-9975-9626-2-9.
163. САУШКИН, Б. *Электрический разряд в жидких и газовых средах – основа нового поколения методов и технологий машиностроительного производства*. Электронная обработка материалов, № 1, 2004. с. 4 – 17. ISSN 0013-5739.
164. *Micro to Nano Innovative Microscopy Supplies. YPS Schottky Thermal Field Emission Sources High brightness, direct replacement electron sources*. Accesat la data de: 07.06.2023. Disponibil la: <https://www.microtonano.com/YPS-TFE-emitters-schottky-thermal-field-emission-sources.php>.
165. TRUCCHI, D., MELOSH, N. *Electron-emission materials: Advances, applications, and models*. Materials Research Society (MRS) Bulletin, Vol. 42, Springer, 10 JULY, 2017. pp. 488 – 492. ISSN 0883-7694. DOI: <https://doi.org/10.1557/mrs.2017.142>.
166. RUSNAC, V. *Distribuția temperaturii in piesa de lucru la aplicarea descărcărilor electrice in impuls*. Fizică și tehnică: procese, modele, experimente. Nr. 2. 2008. p. 53 – 56. ISSN 1857-0437.

ANEXE

Anexa 1. Imagine SEM în care se atestă mărimea unghiul de la vârful a asperității conice

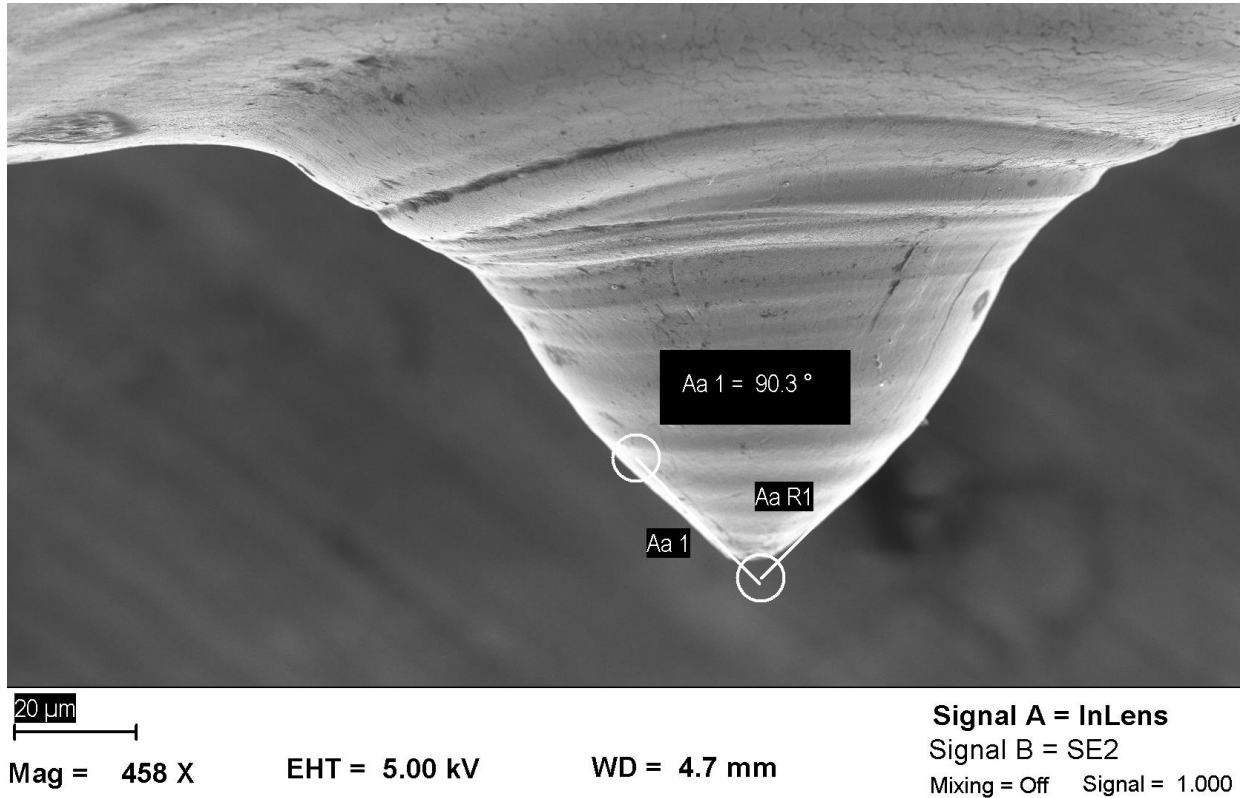


Fig. A1.1. Vedere generală a unui con Taylor cu unghiul de la vârful de 90°

În fig. A1.2 este reprezentată metoda de determinare a razei de la vârful a asperităților conice reale, pe baza imaginilor SEM. Așa dar, s-a trasat prelungirile generatoarelor laterale ale conului, până la intersecție acestora, aceste prelungiri sunt tangente la suprafața circulară a vârfului asperității conice, mărimea căreia corespunde cu raza de la vârful a asperităților conice reale.

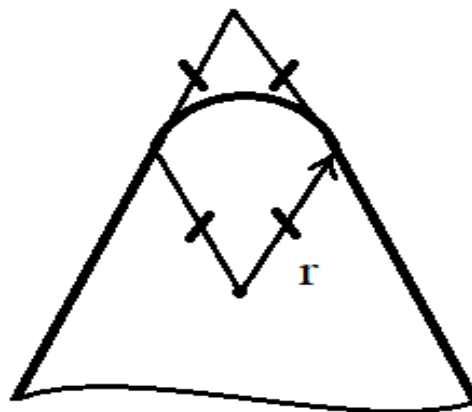


Fig. A1.2. Determinarea razei de la vârful a asperităților conice reale

Anexa 2. Alte instalații electrice utilizate în cadrul realizării cercetărilor experimentale

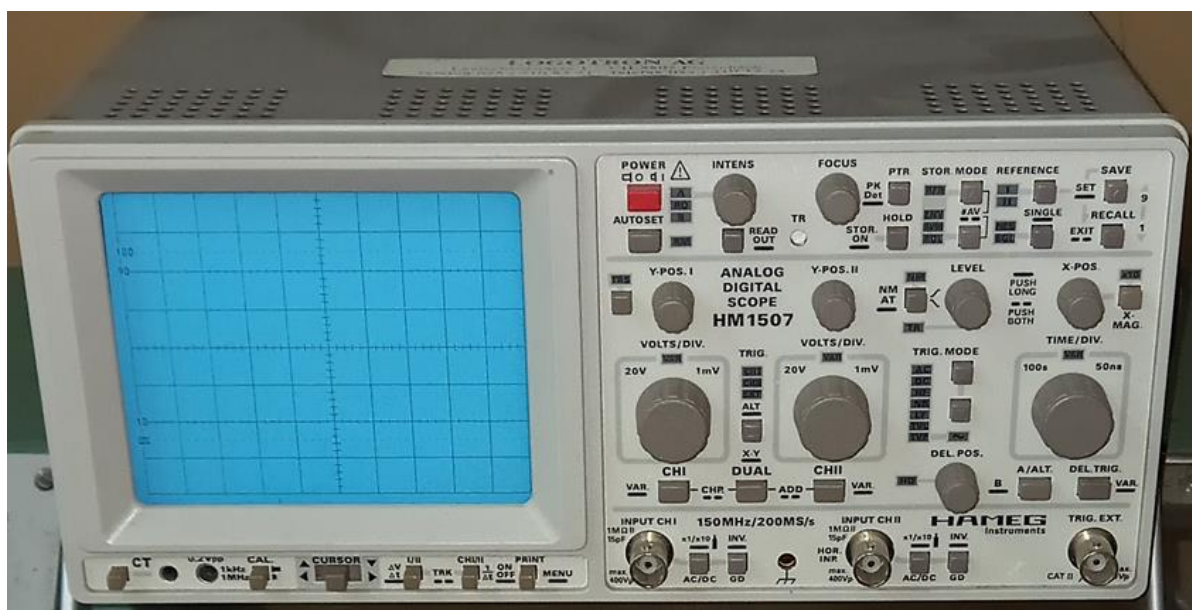


Fig. A2.1. Osciloscopul HM1507 (analog digital scope, HAMEG instruments)

Anexa 3. Dispozitive anexe ale standului experimental

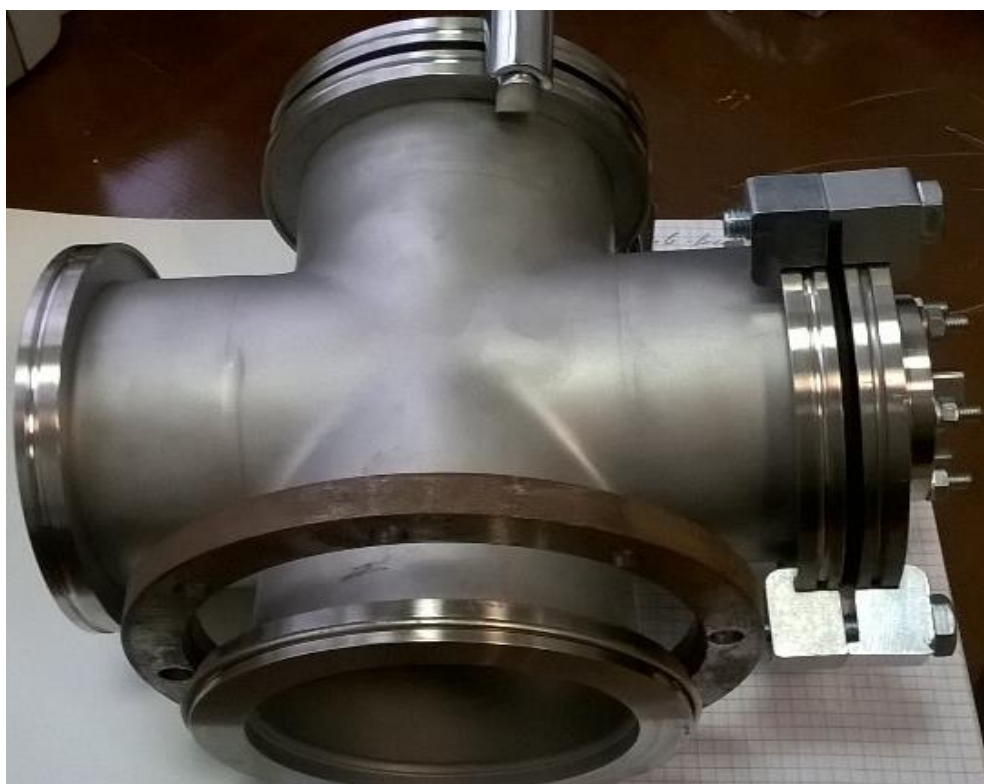


Fig. A3.1. Vedere generală a camerei de lucru

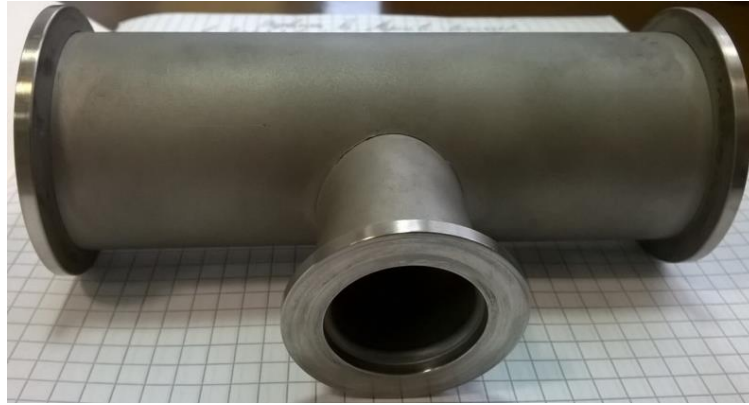


Fig. A3.2. Vedere generală a cilindrului cu trei ieșiri



Fig. A3.3. Măsurător de vacuum



Fig. A3.4. Sursa de tensiune înaltă reglabilă în limita a 0–3000 V



Fig. A3.5. Sursa de curent



Fig. A3.6. Multimetru digital: FLUKE 289



a)



b)

Fig. A3.7. Măsurători termici: a) multimetru „FLUKE 902”; b) cameră optică cu vizualizare termică, marca „FLIR”

Anexa 4. Parametrii microscopului electronic Vega TeScan 5130

Tabelul A4.1. Principalii parametri ai microscopului electronic Vega TeScan 5130

Nr.	Parametri	Descrieri
1	Rezoluția	3,5 nm la 30 kV și distanța de lucru (WD) 4 mm
2	Mărire	20 x (la WD = 30 mm, HV = 30 kV, imaginea 512x512 px) până la 500 000 x
3	Tensiunea acceleratoare	500 V - 30 kV
4	Arma electronică	Catodul din wolfram
5	Curentul prin proba	1 pA - 2 μA
6	Camera	Diametrul interior: 160mm; Numărul de mese: n = 7
7	Detectorii	SE - ET tip (YAG Crystal). Măsurarea curentului prin proba. BSE – scintilator circular (YAG Crystal) cu rezoluție atomică mare; EDX – unghiul de captare 35° - 45° WD de la 10 mm până la 25 mm
8	Suportul	Eucentric
9	Deplasarea suportului	X = 40 mm manual; Y = 24 mm manual; Z = 27 mm manual; Z' = 6 mm manual; Înclinare: de +/- 70° eucentric; Rotire: 360° manual
10	Vid	5×10^{-3} Pa
11	Timp de vacuumare	Minim 3 min

Studierea suprafeței cu ajutorul microscopului electronic Vega TeScan 5130 este destul de calitativ și exact, totuși acesta prezintă și unele limitări, cum ar fi:

- 1) Energie de rezoluție 130 eV; Limita detectării 1000-3000 pm;
- 2) Elementele identificate mai grele de Beriliu;
- 3) Rezoluția spațială: număr atomic mic Z: $1 - 5 \mu\text{m}^3$; Z mare: $0,2 - 1 \mu\text{m}^3$; Precizia: $\pm 0,1\%$;
- 4) Acuratețe: $\pm 1\%$ pentru proba lustruită și $\pm 5\%$ pentru particule și suprafețe cu rugozități.

Microscopul electronic (cu baleiaj) Vega TeScan 5130 folosește fasciculul focalizat de electroni pentru a scana zonele mici a probelor solide. În camera de mostre se află masă de lucru care oferă posibilitatea deplasării probei în trei direcții reciproc perpendiculare, ce permite să se modifice unghiul de înclinare a acesteia în raport cu fasciculul de electroni incidente de la 0 la 90° și rotirea probei în jurul axei sale. Pentru microscopurile electronice, rezoluția variază de la 1 nm până la 4 nm, iar coeficientul de mărire poate depăși valoarea de 500 mii [161].

Anexa 5. Imagini SEM cu referire la extragerea multiplă a asperităților conice

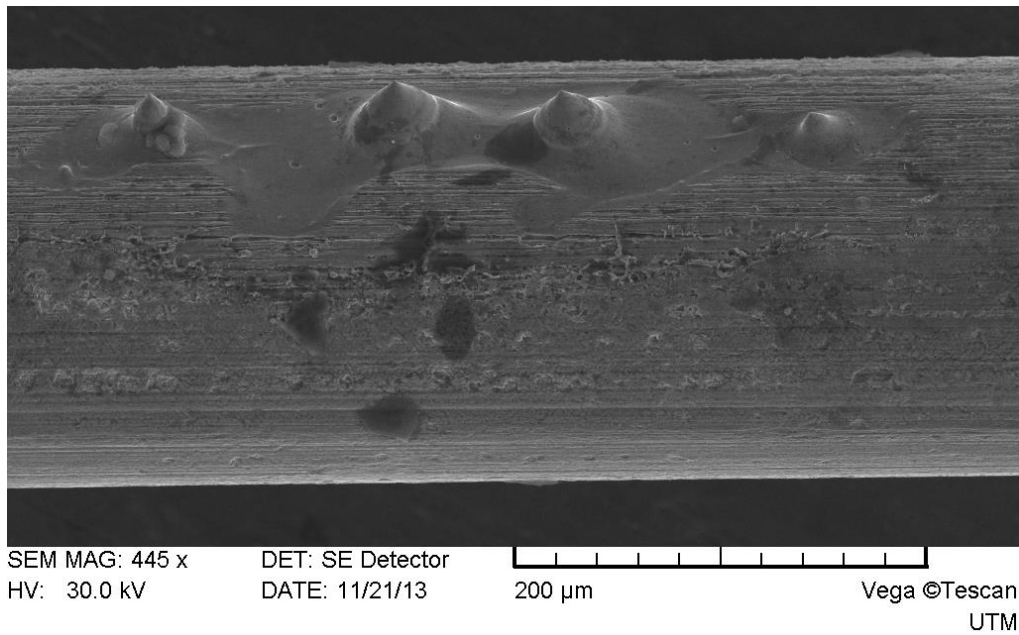
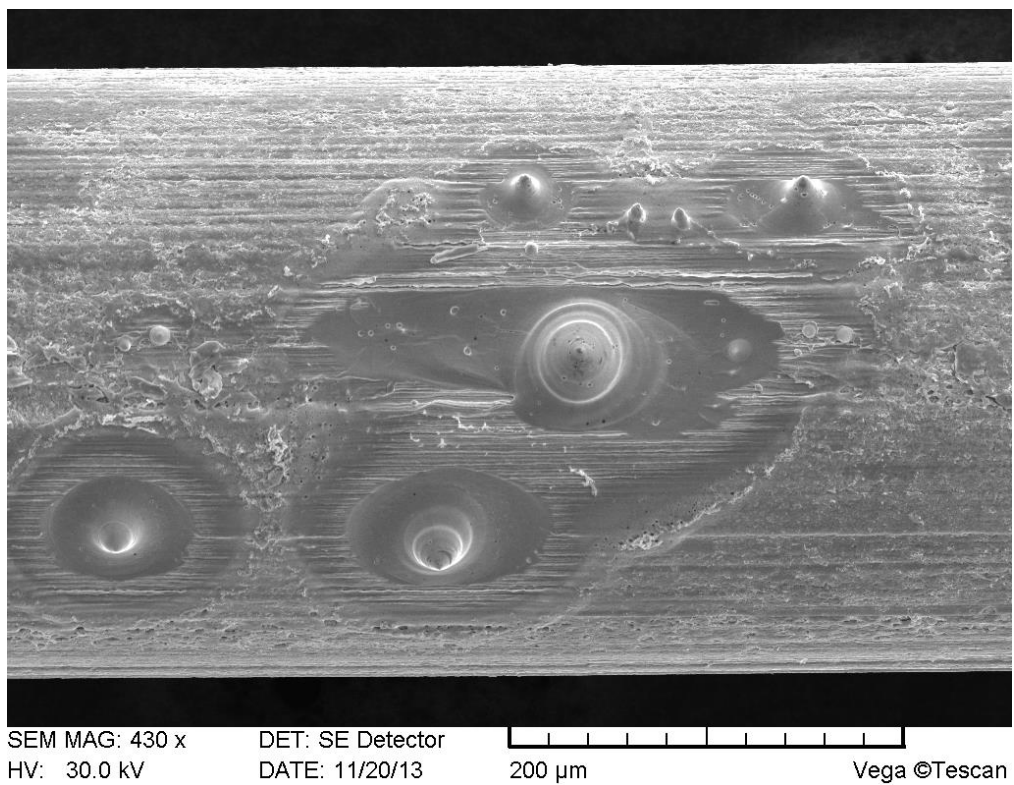
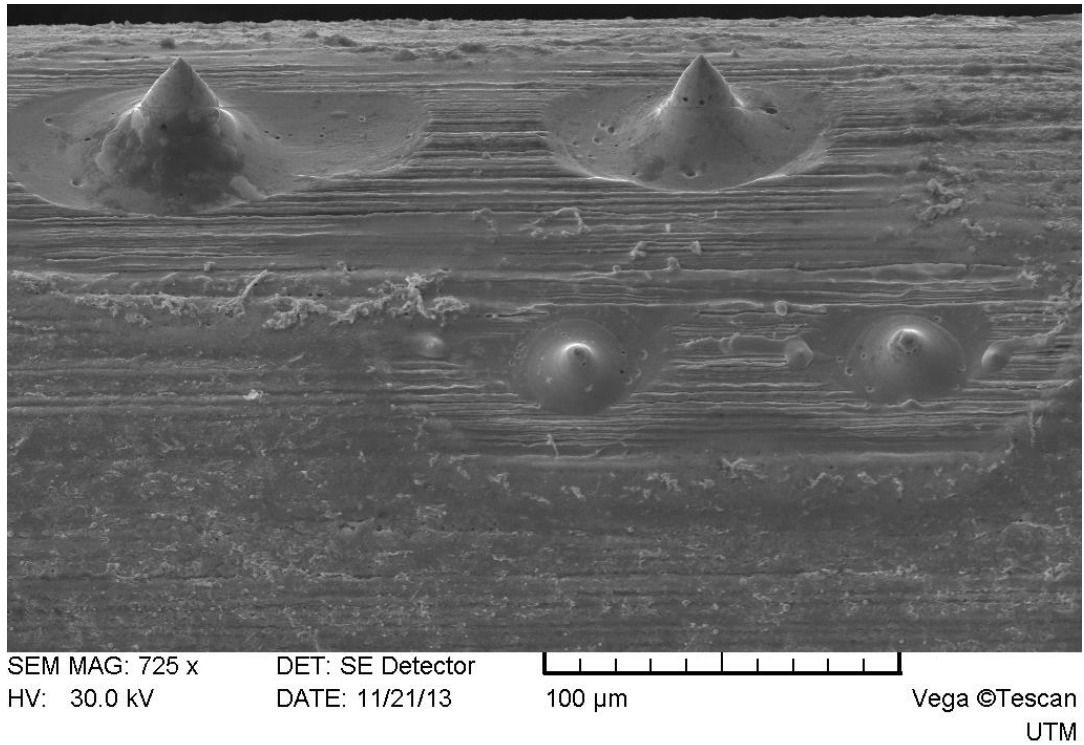


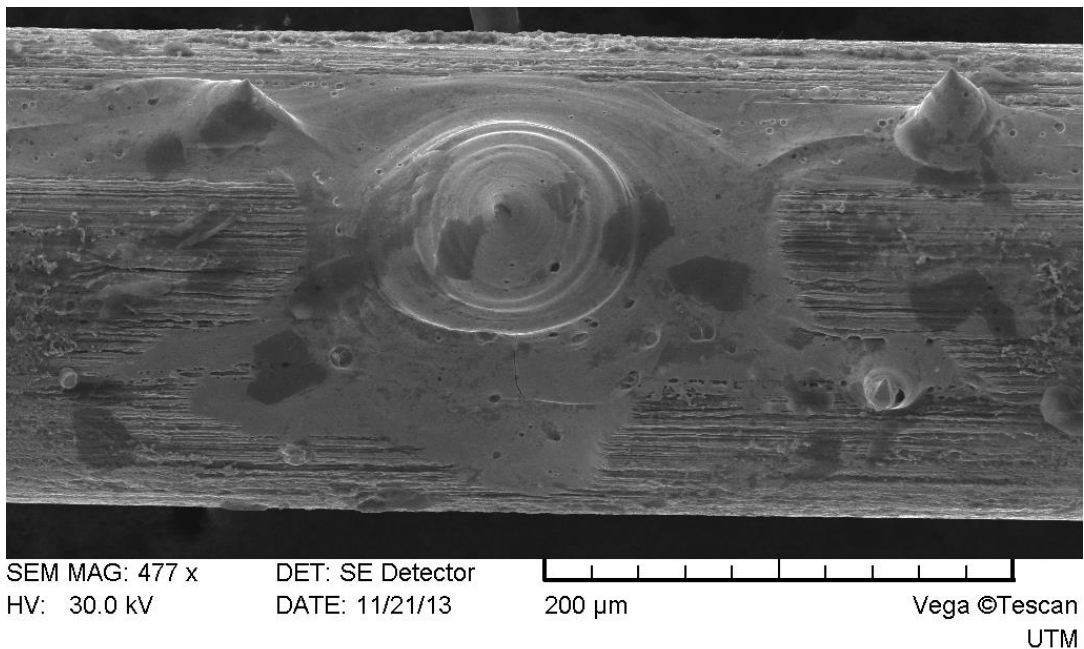
Fig. A5.1. Imagine SEM a asperităților conice observate în cadrul fig. 3.21 (d)



a)



b)



c)

Fig. A5.2. Imagine SEM a multitudinilor de asperități de tipul conurilor Taylor extrase de pe suprafețele catodilor din aliajul wolframului cu reniu, conectați în circuitul de descărcare în calitate de anod

Anexa 6. Imagini realizate cu microscopia optică cu referire la microsudare

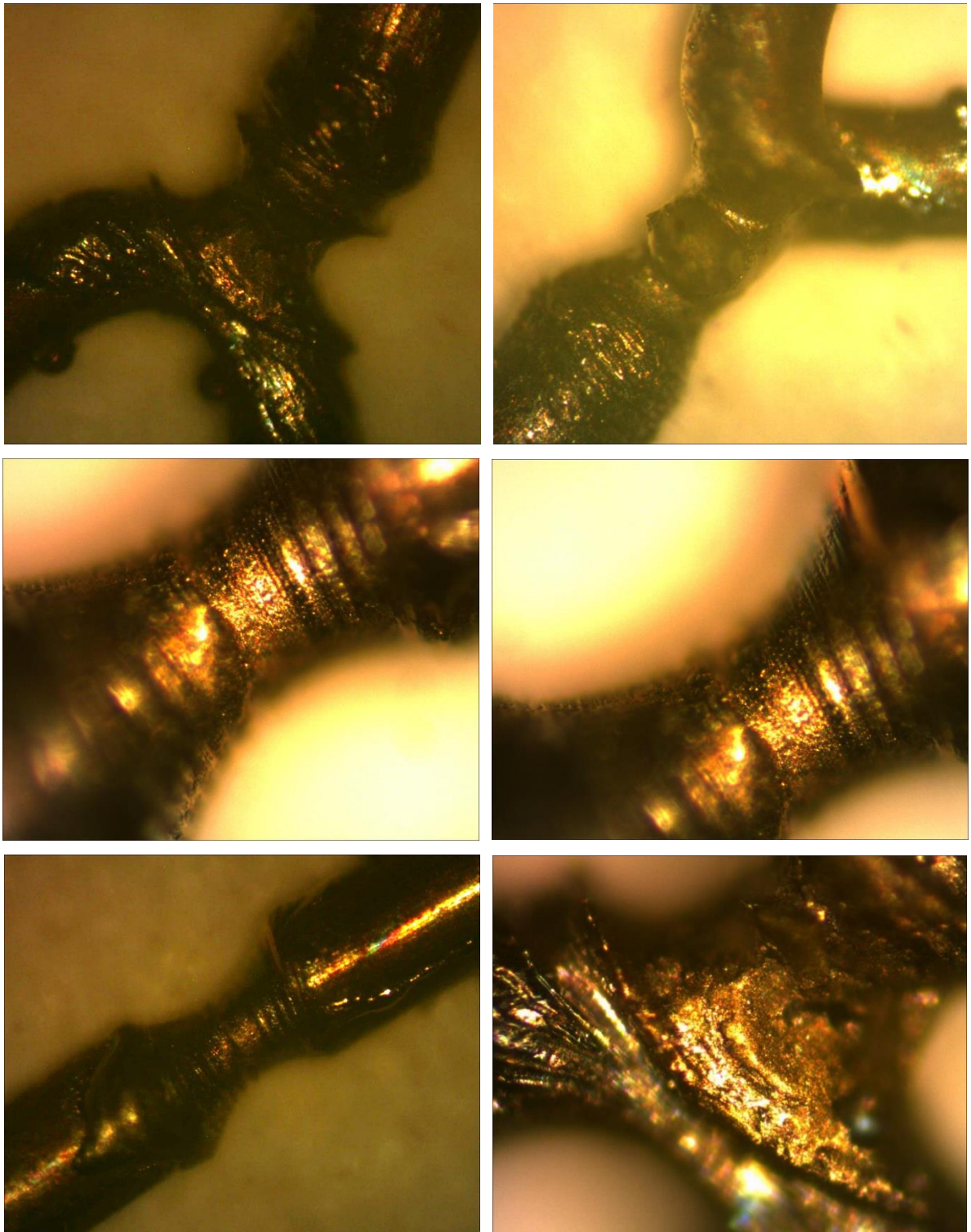


Fig. A6.1. Vedere generală a probelor microsudate cu aplicarea DEI

Anexa 7. Dependențe grafice în coordonate logaritmice

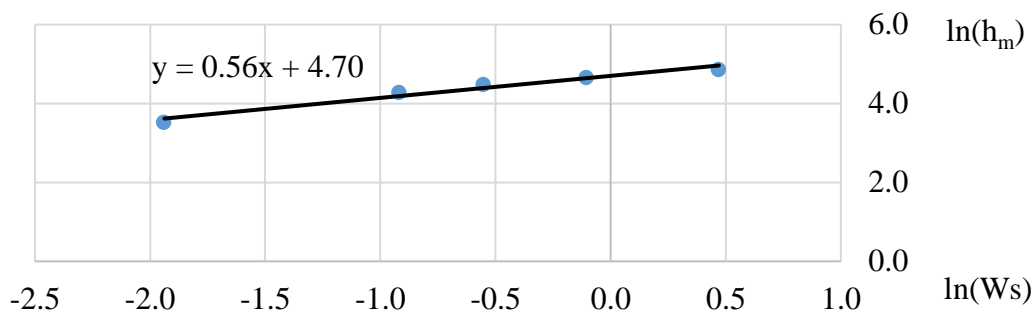


Fig. A7.1. Dependența înălțimii asperităților (h_m) ca funcție de energia degajată în interstițiu (Ws) în valori logaritmice; electrodul-piesă executat din fire de wolfram cu diametrul de 0,2 mm; $S = 0,2$ mm; $\tau = 125$ μ s

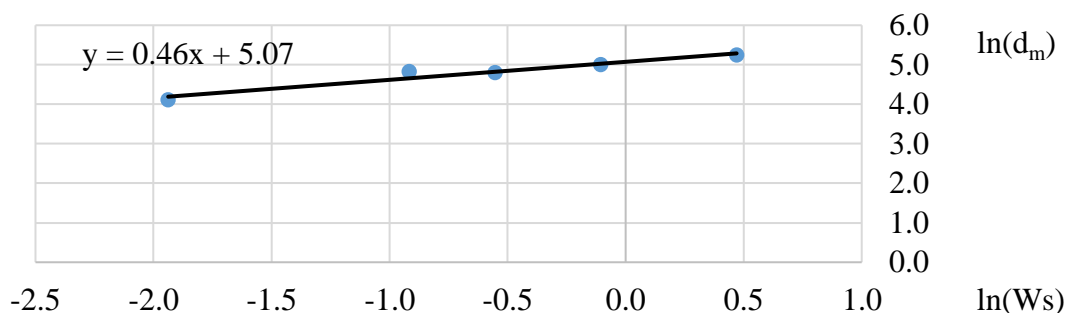


Fig. A7.2. Dependența diametrului bazei asperităților (d_m) ca funcție de energia degajată în interstițiu (Ws) în valori logaritmice; electrodul-piesă executat din fire de wolfram cu diametrul de 0,2 mm; $S = 0,2$ mm; $\tau = 125$ μ s,

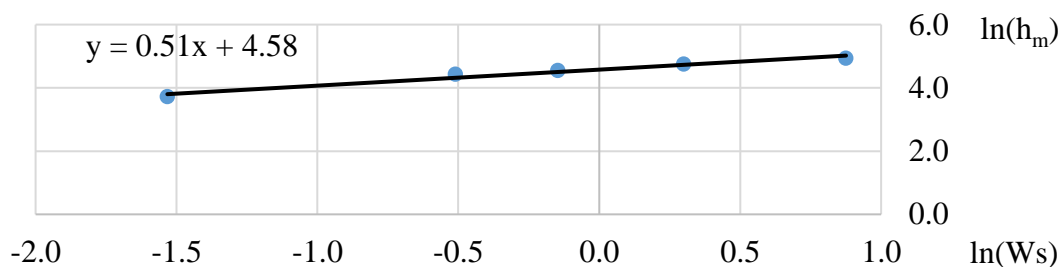


Fig. A7.3. Dependența înălțimii asperităților (h_m) ca funcție de energia degajată în interstițiu (Ws) în valori logaritmice; electrodul-piesă executat din fire din aliajul wolframului cu reniu (10 sau 20 %), cu diametrul de 0,2 mm; $S = 0,25$ mm; $\tau = 160$ μ s

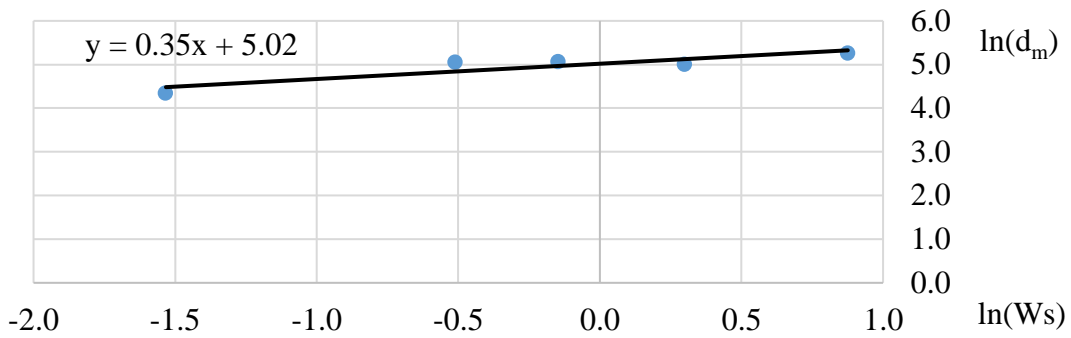


Fig. A7.4. Dependența diametrului bazei asperităților (d_m) ca funcție de energia degajată în interstițiu (W_s) în valori logaritmice; electrodul-piesă executat din fire din aliajul wolframului cu reniu (10 sau 20 %), cu diametrul de 0,2 mm; $S = 0,25$ mm; $\tau = 160$ μ s

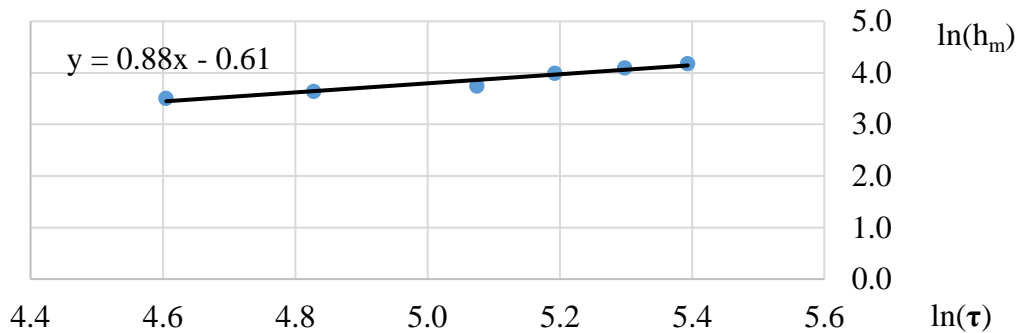


Fig. A7.5. Dependența înălțimii asperităților (h_m) ca funcție de durata impulsului de descărcare (τ) în valori logaritmice; electrodul-piesă executat din fire de wolfram cu diametrul de 0,2 mm; $S = 0,2$ mm; $W_s = 0,216$ J

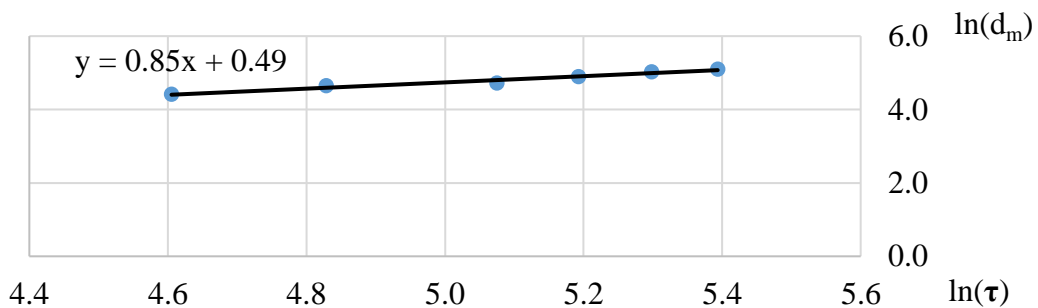


Fig. A7.6. Dependența diametrului bazei asperităților (d_m) ca funcție de durata impulsului de descărcare (τ) în valori logaritmice; electrodul-piesă executat din fire de wolfram cu diametrul de 0,2 mm; $S = 0,2$ mm; $W_s = 0,216$ J

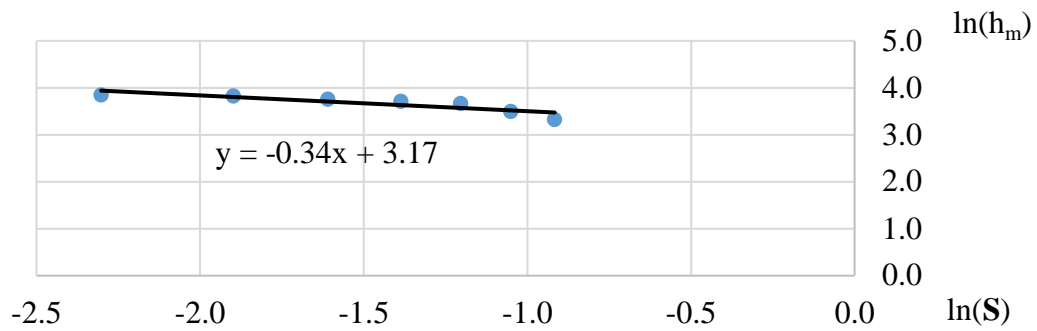


Fig. A7.7. Dependența înălțimii asperităților (h_m) ca funcție de mărimea interstițiului (S) în valori logaritmice; electrodul-piesă executat din fire de wolfram cu diametrul de 0,2 mm; $\tau=160 \mu\text{s}$; $W_s=0,216 \text{ J}$

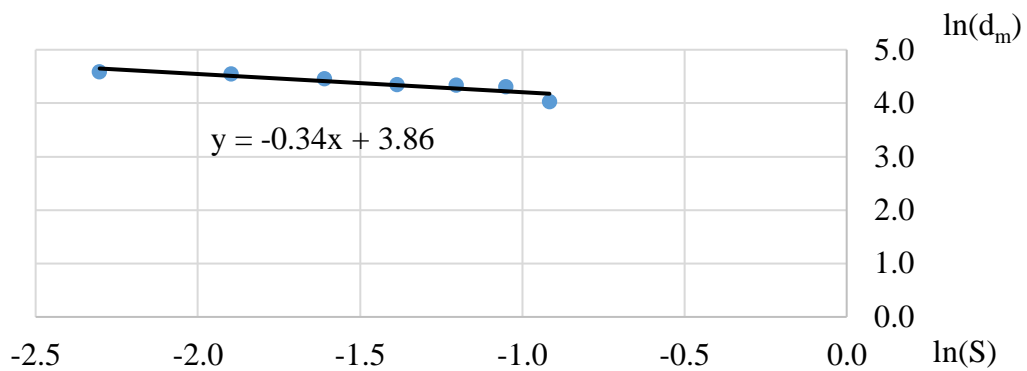






Fig. A7.8. Dependența diametrului bazei asperităților (d_m) ca funcție de mărimea interstițiului (S) în valori logaritmice; electrodul-piesă executat din fire de wolfram cu diametrul de 0,2 mm; $\tau=160 \mu\text{s}$; $W_s=0,216 \text{ J}$

Anexa 8. Acte de implementare a rezultatelor științifice

 <p>Decana Facultății de Științe Reale, Economiche și ale Mediului  dr. conf. univ. Ina Ciobanu</p>	 <p>Prim-prorector al Universității de Științe „Alec Russo” din Bălți  dr., conf. univ. Lidia Pădură</p>
---	---

ACT

de implementare a rezultatelor științifice, realizate de către asistent universitar **Dorin Guzman**, conducător științific de doctorat, DHC, dr. hab., prof. univ. **Pavel Topală**, în procesul de instruire a studenților de la ciclul II – studii superioare de master, specialitatea „Tehnologii de instruire și producere”.

Comisia de componență: președinte – șef catedră de științe fizice și ingineresti, dr., conf. univ. **Vitalie Beșliu**, membrii comisiei: DHC, dr. hab., prof. univ. **Pavel Topală**, dr., conf. univ. **Vladislav Rusnac**, dr., conf. univ. **Alexandr Ojegov**, au întocmit prezentul act despre implementarea în procesul didactic a rezultatelor obținute în teza de doctorat cu tema: **„Cercetări privind sporirea capacității de emisie termoelectronică a suprafețelor metalice prin metoda electroeroziunii”**, elaborată de către dl **Dorin Guzman**. Rezultatele au fost implementate în procesul didactic în perioada 2017-2023, în conformitate cu curriculum ale unităților de curs: „Tehnologii moderne și inovații în inginerie I”, „Tehnologii moderne și inovații în inginerie II”, și „Nanotehnologii” la specialitatea „Tehnologii de instruire și producere”, în grupele academice TI11M și TI21M.

Cursurile teoretice „Tehnologii moderne și inovații în inginerie I”, „Tehnologii moderne și inovații în inginerie II”, și „Nanotehnologii” au fost completate cu rezultatele cercetărilor experimentale obținute în cadrul realizării tezei de doctor cu tema: „Cercetări privind sporirea capacității de emisie termoelectronică a suprafețelor metalice prin metoda electroeroziunii”, elaborată de către dl Dorin Guzman și au contribuit la îmbunătățirea conținutului următoarelor teme conform curriculumului disciplinar:

1. Procedeu de oxidare superficială a pieselor cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls. Efecte economice;
2. Prelucrarea cu fascicul de electroni. Bazele fizice ale prelucrării materialelor cu fascicule de electroni;
3. Clasificarea convențională a procedeelor de prelucrare cu fascicul de electroni. Domenii de aplicare;

4. Metoda microscopiei electronice SEM, analizei XPS și EDX a nano-obiectelor.

La capitolul lucrări de laborator la unitățile de curs „Tehnologii moderne și inovații în inginerie II”, și „Nanotehnologii” s-au inclus sau modernizat următoarele lucrări:

1. Modificarea microgeometriei straturilor de suprafață cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls;
2. Obținerea straturilor de grafit cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls;
3. Obținerea straturilor de oxizi cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls;
4. Formarea peliculelor nanometrice de oxizi și hidro-oxizi pe suprafețe metalice.

O valoare practică reprezintă implementarea noilor lucrări de laborator, care au contribuit la îmbunătățirea și dezvoltarea aspectului ingineresc al procesului de învățământ pentru studenții ciclului II. Rezultatul implementării materialului teoretic și de laborator constă în familiarizarea studenților cu tehnologii avansate de modificare a microgeometriei suprafețelor metalice (aluminiiu, cupru, oțel 45, wolframul sau aliajele wolframului cu reniu) ca metodă de sporire a ariilor active cu scopul sporirii eficienței de emisie termoelectronică a catodilor executați din așa materiale cum ar fi wolframul sau aliajele acestuia cu reniu.

Președintele comisiei:

dr., conf. univ.

Vitalie Beșliu

Membrii comisiei:

DHC, dr. hab., prof. univ.

Pavel Topală

dr., conf. univ.

Vladislav Rusnac

dr., conf. univ.

Alexandr Ojegov

asist. univ.

Dorin Guzgan

Certific semnăturile d-lor: Vitalie Beșliu, Pavel Topală, Vladislav Rusnac, Alexandr Ojegov, Dorin Guzgan.

Secretar al consiliului Facultății de Științe Reale, Economice și ale Mediului

asist. univ.

Ianina Cazac

2

Fig. A.8.1. Act de implementare a rezultatelor științifice în procesul de instruire a studenților de la ciclul II, specialitatea Tehnologii de instruire și producere, USARB

Aprob

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

I. Cîrstea



Aprob

Prorectorul pentru activitatea științifică și

relații internaționale al USARB

conf. univ., dr. V. Prițcan



Act de implementare

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

Directorul de producere

G. Brînzilă

Handwritten signature of G. Brînzilă in blue ink over a horizontal line.

Președintele Consiliului Științific,

dr. hab., prof. univ. P. Topală

Handwritten signature of P. Topală in blue ink over a horizontal line.

Directorul tehnic

A. Baburin

Handwritten signature of A. Baburin in blue ink over a horizontal line.

Doctoranzii

N. Pînzaru

Handwritten signature of N. Pînzaru in blue ink over a horizontal line.

L. Marin

Handwritten signature of L. Marin in blue ink over a horizontal line.

D. Guzgan

Handwritten signature of D. Guzgan in blue ink over a horizontal line.

P. Cosovschi

Handwritten signature of P. Cosovschi in blue ink over a horizontal line.

Fig. A.8.2. Act de implementare obținut în cadrul proiectului instituțional de cercetare „Tehnologii de formare a peliculelor de grafit cu proprietăți anti-aderență și anti-uzură prin metoda electroeroziunii”, la Î.S. „Fabrica de Sticlă din Chișinău”

Anexa 9. Dovezi prin care se certifică participarea la simpozioane și conferințe



Fig. A.9.1. Participarea în cadrul saloanelor de invenții, inovații și transfer tehnologic INVENTICA și obținerea medaliilor de aur (2012, 2016)



Fig. A.9.2. Medaliei de bronz în cadrul INFOINVENT 2015



Fig. A.9.3. Medaliei de aur în cadrul INFOINVENT 2015



Fig. A.9.4. Participarea cu comunicare în cadrul conferinței ȘD organizată de Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași



MINISTERUL EDUCAȚIEI, CULTURII ȘI CERCETĂRII
AL REPUBLICII MOLDOVA
AGENȚIA NAȚIONALĂ PENTRU CURRICULUM ȘI EVALUARE



CERTIFICAT

Acordat doamnei/ domnului Guzgan Dorin

pentru participare la Seminarul tematic

“ Proprietatea intelectuală în Republica Moldova. Dreptul de autor.”

desfășurat, în cadrul

CONCURSULUI NAȚIONAL DE ȘTIINȚE ȘI INGINERIE

„MOLD SEF”, EDIȚIA a VI-a, la 17 februarie 2018,
în incinta Liceului Teoretic cu Profil Real “Mihai Marinciuc”, mun. Chișinău

Anatolie TOPALĂ,
directorul Agenției Naționale
pentru Curriculum și Evaluare



Angela CUTASEVICI,
Secretar de stat în domeniul educației

Fig. A.9.5. Participarea la seminarul tematic: „Proprietatea intelectuală în Republica Moldova. Dreptul de autor”



Fig. A.9.6. Certificat de participarea la conferința științifică internațională: „Tradiție și inovare în cercetare științifică”, Ediția a XII-a, USARB

DECLARAȚIA PRIVIND ASUMAREA RĂSPUNDERII

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

Dorin Guzman

Semnătura



Data: 22.06.2023

CURRICULUM VITAE AL CANDIDATULUI

INFORMAȚII PERSONALE



Dorin Guzgan

📍 str. Ciprian Porumbescu 52 / 17, mun. Bălți, 3110, R. Moldova

☎ +373 23129533

📞 +373 78880342

✉ dorin-guzgan@mail.ru;

dorin.guzgan@usarb.md;

doringuzgan.2003@gmail.com.

💬 Numele de utilizator Skype: dorin.guzgan1985

👤 Căsătorit | Sexul: masculin | Data nașterii: 09/08/1985

🇲🇩 Naționalitatea: moldovean

EXPERIENȚA PROFESIONALĂ

2021 - prezent

Profesor de Protecția muncii, Colegiului Pedagogic „Ion Creangă” din cadrul USARB, str. Pușkin 38, Bălți, MD-3121, Republica Moldova. Tel.: +37323152340, web: www.usarb.md;

2020 – prezent

Specialist securitate și sănătate în muncă, USARB;

2015 – prezent

Profesor de fizică (grad didactic II), Liceului Teoretic Republican „Ion Creangă”, str. Pușkin 38, Bălți, Tel.: +37323152356;

2014 – prezent

Asistent universitar, CȘFI, FȘREM, USARB;

2015 – 2019

Cercetător științific stagiar în cadrul Proiectului: „Tehnologii de formare a peliculelor de grafit cu proprietăți anti-aderență și anti-uzură prin metoda electroeroziunii”, cifrul 15.817.02.41A. Direcția strategică 18.02: „Materiale, tehnologii și produse inovative”, Laboratorul Științific de Micro- și Nanotehnologii, USARB;

2013 – 2014

Cercetător științific stagiar, Proiectului: „Cercetări tehnologice privind formarea suprafețelor cu proprietăți superioare de termoemisie electronică cu aplicarea DEI”, cifrul 11.817.05.30A, LȘMNT, USARB;

2012

Director adjunct pe educație și organizator în Gimnaziul Țîplești, s. Țîplești, r. Sîngerei, Republica Moldova;

2009 – 2014

Profesor de Matematică, Informatică, Fizică, Educație tehnologică și Educație civică, Diriginte, Șef de catedră (Științe socio-umane) în Gimnaziul Țîplești, s. Țîplești, r. Sîngerei, Republica Moldova;

2008

Profesor de fizică și astronomie, Colegiul Politehnic din Bălți, str. Ivan Franco 11, 3100, mun. Bălți, Republica Moldova. Tel./Fax 0231 7-20-94, www.cpbmd.info.

EDUCAȚIE ȘI FORMARE

2010 – 2013

Ciclul III, studii superioare de doctorat, specialitatea 242.05 Tehnologii, procedee și utilaje de prelucrare, CȘFI, FȘREM, USARB, str. Pușkin 38, Bălți, MD-3100, Tel.: +37323152340, web: www.usarb.md;

2009 – 2012

Școala Tânărului Specialist, Direcția Educație Sîngerei, r. Sîngerei, Republica Moldova;

2008 – 2010

Ciclul II, studii superioare de masterat, specialitatea Didactica fizicii, Catedra fizică, Facultatea Științe Reale, USARB, str. Pușkin 38, Bălți, MD-3100, Tel.: +37323152340, web: www.usarb.md;

2003 – 2008

Ciclul I, studii superioare de licență, specialitatea Instruire în inginerie și fizică, Catedra Tehnică și tehnologii, Facultatea Tehnică Fizica Matematică și Informatică, USARB, str. Pușkin 38, Bălți, MD-3100, Republica Moldova. Tel.: +37323152340, web: www.usarb.md.

COMPETENTE PERSONALE

Limba maternă: Alte limbi străine cunoscute	Română				
	Înțelegere		Vorbire		Scriere
	Ascultare	Citire	Participare la conversație	Discurs oral	
Rusa	C1	C1	C1	C1	B2
Germana	A2	A2	A2	A2	A1
Engleza	A2	A2	A2	A2	A1

Niveluri: A1/2: Utilizator elementar - B1/2: Utilizator independent - C1/2: Utilizator experimentat.
Cadru european comun de referință pentru limbi străine.

Competențe de comunicare	<ul style="list-style-type: none"> competențe de comunicare au fost dobândite prin experiența proprie în calitate de student la Universitate, cadru didactic în gimnaziu, colegiu și liceu, precum și în calitate de doctorand, cercetător științific stagiar, asistent universitar și specialist SSM în cadrul Serviciului intern de protecție și prevenire, USARB;
Competențe organizaționale / manageriale	<ul style="list-style-type: none"> au fost dobândite la locul de muncă în timp ce activam în calitate de: Șef adjunct pe educație, Organizator, Șef de catedră (Științe socio-umane) și diriginte în cadrul gimnaziului Țîplești, r. Sîngerei;
Competențe dobândite la locul de muncă	<ul style="list-style-type: none"> o bună cunoaștere a proceselor de control al calității dobândite în timpul implicării în cadrul unităților de curs: Nanotehnologii, Tehnologii moderne și inovații în inginerie, Instruirea asistată de calculator, Managementul producerii, Studiul materialelor, ș.a.; conducerea proiectelor de curs la disciplinele: Organe de mașini, Tehnologia materialelor I (metalice), USARB.
Competențe TIC	<ul style="list-style-type: none"> o bună cunoaștere a instrumentelor Microsoft Office™; utilizarea instrumentelor de design grafic (Paint, Autocad etc.); utilizarea instrumentelor de video-montare, ș. a.
Alte competențe	<ul style="list-style-type: none"> competențe privind: repararea computerelor, prepararea bucatelor, realizarea fotografiilor ș.a.; practică de lucru în ateliere (tâmplărie, prelucrarea prin așchiera lemnului și a metalelor, împletirea loziei, ș.a.); realizarea cu succes a discuțiilor de consiliere.
Permis de conducere	<ul style="list-style-type: none"> Categoria B.
STAGII:	<ol style="list-style-type: none"> Cercetare științifică în cadrul: „Christian-Albrecht University of Kiel”, Kiel, Germania, 01.02.2013 – 28.02.2013; Cercetare științifică în cadrul: „Institutului Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizică și Inginerie Nucleară Horia Hulubei”, București-Măgurele, România, 11.12.2016 – 21.12.2016; Fizica, Institutul de Formare Continuă, Chișinău, 24.12.2016 – 20.01.2017; Tehnologii avansate de instruire prin utilizare TIC, TeachME, USARB, 11.09.2018 – 30.10.2018; Educația incluzivă, Formare continuă, USARB, 16.04.2019 – 31.05.2019. Crearea cursurilor pe platforma Moodle, Centrul de formare profesională continuă, USARB, 22.06.2020 – 18.07.2020; Instruire în domeniul securității și sănătății în muncă, Centrul de instruire în domeniul relațiilor de muncă, Chișinău, 20.07.2020 – 24.07.2020; Cursuri de formare profesională continuă la Fizica, Universitatea de Stat din Tiraspol, Chișinău, 17.01.2022 – 05.02.2022; „Business și administrare”, specialitatea: „0413.2 Managementul resurselor umane”, nivelul CNC: 6, UTM, Chișinău, 21.09.2022 – 22.02.2023; Instrumente digitale pentru elaborarea produselor de design grafic, Centrul de formare profesională continuă, USARB, 14.06.2023 – 23.06.2023; Instruire în domeniul SSM, Serviciu extern de protecție și prevenire „RU&TSM SERVICII” S.R.L., Chișinău, 17.07.2023 – 21.07.2023.