

UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI

Cu titlul de manuscris
CZU: 621.0.484.755

OJEGOV ALEXANDR

**OBȚINEREA PELICULELOR SUBȚIRI DE OXIZI PE
SUPRAFETELE METALICE ALE ALIAJELOR DE FIER, CUPRU,
ALUMINIU ȘI TITAN, CU APLICAREA DESCĂRCĂRILOR
ELECTRICE ÎN IMPULS**

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

Teza de doctor în tehnică

Conducători științifici:

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

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

Autorul:

Chișinău, 2014

© Ojegov Alexandr, 2014

CUPRINS

ADNOTĂRI (română, rusă, engleză).....	5
LISTA ABREVIERILOR ȘI SEMNE CONVENȚIONALE UTILIZATE ÎN LUCRARE	8
INTRODUCERE.....	10
I. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND OBTINEREA PELICULELOR SUBȚIRI DE OXIZI PE SUPRAFEȚELE MATERIALELOR CONDUCTIBILE CU APLICAREA DESCĂRCĂRILOR ELECTRICE ÎN IMPULS	16
1.1. Analiza metodelor de obținere a peliculelor subțiri de oxizi.....	16
1.2. Caracterizarea metodelor utilizate pentru oxidarea suprafețelor metalice în plasmă electrolitică	16
1.2.1. Anodizarea în plasmă electrolitică	20
1.2.2. Microoxidarea suprafețelor în mediu electrolitic prin descărcări electrice în arc	24
1.3. Oxidarea superficială a materialelor conductibile prin intermediul arcului electric	28
1.4. Oxidarea superficială cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls	33
1.5. Concluzii la capitolul I	38
II. METODELE GENERALE ȘI ORIGINALE DE CERCETARE.....	39
2.1. Materialul, geometria probelor și schemele tehnologice de prelucrare.....	39
2.2. Instalația experimentală a generatorului de impulsuri de curent.....	40
2.3. Metodica realizării straturilor de oxizi	42
2.4. Metodele de cercetare a parametrilor de intrare și ieșire.....	48
2.5. Optimizarea matematică a tehnologiei formării peliculelor de oxizi	55
2.6. Concluzii la capitolul II	66
III. FIZICA PROCESULUI DE OXIDARE A SUPRAFEȚELOR METALICE CU APLICAREA DESCĂRCĂRILOR ELECTRICE ÎN IMPULS	67
3.1. Străpungerea interstițiului și formarea canalului de plasmă.....	67
3.2. Procese fizico-chimice ce se produc în interstițiu și la suprafețele electrozilor	68
3.3. Interacțiunea plasmei DEI cu suprafețele electrozilor.....	74
3.4. Procese de difuzie la formarea peliculelor de oxizi cu aplicarea DEI.....	75
3.5. Cocluzii la capitolul III.....	79
IV. CERCETĂRI TEHNOLOGICE PRIVIND FORMAREA PELICULELOR DE OXIZI PE SUPRAFEȚELE METALICE ALE ALIAJELOR DE FIER, CUPRU, ALUMINIU ȘI TITAN	80
4.1. Conectarea electrozilor în circuitul de descărcare a generatorului de impulsuri.....	80
4.2. Grosimea peliculelor de oxizi în funcție de parametrii de intrare	82
4.3. Dependența lățimii fâșiei peliculei de oxid de regimul energetic de prelucrare.....	83
4.4. Aproximarea dependențelor tehnologice	84
4.5. Productivitatea formării peliculelor de oxizi	85

4.5.1. Influența frecvenței impulsurilor descărcărilor electrice asupra intensității formării peliculelor de oxizi	85
4.5.2. Influența energiei degajate în interstițiu asupra intensității formării peliculelor de oxizi.....	86
4.5.3. Influența distanței dintre electrozi asupra intensității formării peliculelor de oxizi.....	87
4.6. Interdependența compoziției chimice și de fază a peliculelor formate și proprietățile acestora ...	88
4.6.1. Compoziția chimică și de fază a peliculelor formate	88
4.6.2. Structura și microduritatea stratului de suprafață prelucrat.....	94
4.6.3. Rezistența electrică de suprafață.....	94
4.6.4. Rezistența la coroziune.....	96
4.7. Concluzii la capitolul IV.....	100
V. CONTRIBUȚIILE LUCRĂRII PRIVIND APLICAREA TEHNOLOGIEI DE FORMARE A PELICULELOR DE OXIZI PRIN DEI	102
5.1. Aplicarea DEI la confecționare rezistoarelor electrice.....	102
5.2. Protejarea anticorozivă a suprafețelor cilindrice interioare.....	103
5.3. Construcția electrodului-sculă pentru oxidarea suprafețelor complexe cu aplicarea DEI.....	104
5.4. Implementarea rezultatelor în promovarea cursurilor universitare	106
5.5. Tehnologia de obținere a peliculelor de oxizi cu aplicarea DEI.....	106
5.5.1. Prelucrarea suprafețelor plane	106
5.5.2. Prelucrarea suprafețelor cilindrice.....	109
5.6. Compararea medodelor de obținere a peliculelor de oxizi	110
5.7. Calculul efectului economic al tehnologiei elaborate.....	111
5.8. Concluzii la capitolul V	113
CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI	114
BIBLIOGRAFIE	116
ANEXE.....	128
Anexa 1. Rezultatele experimentale privind determinarea dependențelor tehnologice	129
Anexa 2. Analize SEM și EDX a suprafețelor probelor executate din aliajele aluminiului și cuprului prelucrate cu EDI.....	133
Anexa 3. Aproximarea matematica a datelor experimentale privind dependențele tehnologice	148
Anexa 4. Act de implementare în procesul didactic	161
DECLARAȚIA PRIVIND ASUMAREA RĂSPUNDERII.....	163
CV-UL AUTORULUI.....	164

ADNOTARE

Autor – Ojegov Alexandr. **Titlul** – Obținerea peliculelor subțiri de oxizi pe suprafețele metalice ale aliajelor de fier, cupru, aluminiu și titan, cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls. **Lucrarea este compusă** din introducere, cinci capitole, concluzii generale și recomandări, bibliografie din 151 titluri, 4 anexe, 115 pagini (până la bibliografie), 61 figuri, 19 tabele. Rezultatele obținute sînt publicate în 36 lucrări științifice.

Cuvinte cheie: descărcări electrice în impuls, pelicule de oxizi, plasmă, pată electrodică, putere specifică.

Domeniul de studiu – tehnică. **Scopul tezei** este elaborarea tehnologiei obținerii peliculelor subțiri de oxizi pe suprafețele metalice ale aliajelor de fier, cupru, aluminiu și titan, cu aplicarea DEI în vederea sporirii rezistenței electrice de suprafață și rezistenței la coroziune a pieselor executate din ele. **Obiectivele lucrării:** elaborarea modelului fizic de formare a peliculelor de oxizi pe suprafețele metalice cu aplicarea DEI; cercetarea teoretică și experimentală a condițiilor de formare a peliculelor subțiri de oxizi pe suprafețele materialelor metalice cu aplicarea DEI; stabilirea legităților de bază ale procesului de formare a peliculelor de oxizi în funcție de materialul piesei și regimul tehnologic de prelucrare; determinarea unor proprietăți funcționale a peliculelor formate și stabilirea domeniilor de aplicabilitate; proiectarea și elaborarea unor machete de utilaje pentru realizarea tehnologiei de prelucrare superficială a materialelor cu aplicarea DEI; elaborarea recomandațiilor tehnologice privind implementarea tehnologiei elaborate.

Noutatea și originalitatea științifică a lucrării constă în: concretizarea și dezvoltarea bazelor teoretice, privind procesele de interacțiune a canalului de plasmă al DEI cu suprafețele electrozilor în condiții normale; elaborarea tehnologiei de obținere a peliculelor de oxizi nanometrice (până la 250 nm), cu aplicarea DEI, în vederea sporirii rezistenței electrice de suprafață (de până la 10^7 ori) și rezistenței la coroziune a suprafețelor metalice (de până la 100 ori).

Problema științifică importantă soluționată: *sporirea rezistenței electrice de suprafață și rezistenței la coroziune a pieselor metalice prin formarea peliculelor de oxizi cu aplicarea DEI.*

Importanța teoretică și valoarea aplicativă a lucrării este asigurată de: elaborarea bazelor teoretice privind tabloul fizico-chimic și fenomenele ce se produc în straturile superficiale pieselor prelucrate în procesul de formare a peliculelor de oxizi cu aplicarea DEI în condiții normale; recomandările teoretico-experimentale privind proiectarea și elaborarea generatoarelor de impulsuri de curent și electrozilor-sculă; construcția dispozitivelor electronice de tipul conductor-nemetal și combinațiile ale acestora; protecția anticorozivă a suprafețelor metalice cu aplicarea tehnologiei elaborate; folosirea rezultatelor cercetărilor experimentale în procesul de instruire a studenților și masteranzilor specialităților tehnice.

АННОТАЦИЯ

Автор - Ожегов Александр. **Тема** - Получение тонких оксидных пленок на металлических поверхностях железных, медных, алюминиевых и титановых сплавов, с применением электроимпульсных разрядов. **Работа состоит** из введения, пяти глав, выводов и рекомендаций, библиографии, включающей 151 наименование, 4 приложений, 115 страниц (до библиографии) 61 рисунка, 19 таблиц. Полученные результаты опубликованы в 36 научных работах.

Ключевые слова: электроимпульсные разряды, оксидные пленки, плазма, электродное пятно, удельная мощность.

Область исследования – техника. **Целью диссертации** является: разработка технологии получения тонких оксидных пленок на металлических поверхностях железных, медных, алюминиевых и титановых сплавов, с применением ЭИР, с целью повышения поверхностного электрического сопротивления и коррозионной стойкости деталей, изготовленных из них. **Задачи диссертации:** разработка физической модели формирования оксидных пленок на поверхности металлов, с применением ЭИР; теоретические и экспериментальные исследования условий формирования тонких оксидных пленок на поверхности металлических материалов с применением ЭИР; установление основных закономерностей процесса формирования оксидных пленок в зависимости от материала детали и технологического режима обработки; определение функциональных свойств образованных пленок и установление области их применения; проектирование и разработка моделей установок для осуществления технологии поверхностной обработки материалов с применением ЭИР; разработка технологических рекомендаций по внедрению разработанной технологии.

Новизна и научная оригинальность работы заключается в следующем: уточнение и развитие теоретических основ процесса взаимодействия канала плазмы ЭИР с поверхностью электродов в нормальных условиях; развитие технологии получения наноразмерных оксидных пленок (до 250 нм) с применением ЭИР, с целью увеличения поверхностного электрического сопротивления (до 10^7 раз) и коррозионной стойкости металлических поверхностей (до 100 раз).

Решаемая научная проблема: *увеличение поверхностного электрического сопротивления и коррозионной стойкости металлических деталей путем формирования оксидных пленок с применением ЭИР.*

Теоретическое и прикладное значение данной работы заключается в следующем: разработка теоретических основ физико-химической модели и явлений, происходящих в поверхностных слоях деталей в процессе формирования оксидных пленок с применением ЭИР при нормальных условиях; теоретическо-экспериментальные рекомендации по проектированию и разработке импульсных силовых генераторов и электродов-инструментов; изготовление электронных устройств типа «неметал-проводник» и их комбинаций; защита от коррозии металлических поверхностей с применением разработанной технологии; использование результатов экспериментальных исследований в подготовке студентов и мастерантов технических специальностей.

ANNOTATION

Author – Ojegov Alexandr. **Title** – Formation thin oxide pellicles on the metal surfaces of iron, copper, aluminum and titanium alloys, by applying electrical discharges in impulse. **The paper consists** of introduction, five chapters, general conclusions and recommendations, bibliography containing a list of 151 sources, 4 annexes, 115 pages (until the bibliography), 61 figures, and 19 tables. The obtained results are published in 36 scientific papers.

Key words: electrical discharges in impulse, oxide pellicles, plasma, electrode spot, specific power.

Field of study – technical. **The purpose of dissertation** is developing technology oxide thin pellicles formation on metal surfaces of iron alloys, copper, aluminum and titanium alloys, by applying EDI, to increase surface electrical resistance and resistance to corrosion of pieces made of them. **The objectives of dissertation** are: developing physical model of oxide pellicles formation on metal surfaces by applying EDI; theoretical and experimental investigations on the conditions of oxide thin pellicles formation on the metal surfaces by applying EDI; establishing basic regularities of the process of oxide pellicles formation depending on the piece material and on the processing technology regime; determining the functional properties of the formed pellicles and determining areas of their applicability; design and development of installation models for the realization of material surface processing by applying EDI; developing technological recommendations on implementation of the elaborated technology.

Novelty and scientific originality of dissertation consist in: concretization and development of theoretical basis on the processes of interaction of the EDI plasma canal with electrode surfaces under ordinary conditions; developing technology of nanoscale oxide pellicles formation (up to 250 nm) by applying EDI in order to increase surface electrical resistance (up to 10^7 times) and resistance to corrosion of metal surfaces (up to 100 times).

The important scientific problem: *increasing the surface electrical resistance and resistance to corrosion of metal pieces by oxide pellicles formation applying EDI.*

Theoretical importance and applied value of dissertation are provided by: developing theoretical bases on physicochemical model and phenomena that occur in the superficial layers of the pieces during the oxide pellicles formation by applying EDI under ordinary conditions; theoretical and experimental recommendations on the design and development of current impulse generators and tool-electrodes; construction of electronic devices of “conductor-non-metal” type and their combinations; anti-corrosion protection of metal surfaces by applying developed technology; using results of experimental investigations in the training of bachelor and master degree students of technical specialties.

LISTA ABREVIERILOR ȘI SEMNE CONVENȚIONALE UTILIZATE ÎN LUCRARE

DEI – descărcările electrice în impuls;

ASE – alierea prin scînteii electrice;

LRU – lichidul de răcire-ungere;

BC – blocul de comandă;

BA – blocul de amorsare;

G – generatorul;

O – osciloscopul;

SEM – Scanning electron microscopy – microscopie electronică;

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

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

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

ZC – zona de conductibilitate;

ZV – zona de valență;

V – volumul substanței, m^3 ;

m – masa, kg;

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

e – sarcina electronului, C;

W – energia, J;

W_S – energia descărcării degajată în interstițiu, J;

W_a – energia descărcării transmisă anodului, J;

W_k – energia descărcării transmisă catodului, J;

W_c – energia descărcării transmisă canalului de descărcare, J;

f – frecvența, Hz;

U – cădere de tensiune, V;

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

U_S – cădere de tensiune în interstițiu, V;

U_a – tensiunea arcului, V;

L_a – lungimea arcului, cm;

I – intensitatea curentului, A;

d – diametrul, m;

d_c – diametrul canalului de plasmă, m;

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

Q – căldura, J;

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

P – puterea, W;

P_S – puterea impulsului de descărcare, W;

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

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

T – temperatura, K;

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

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

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

A – aria suprafeței, m^2 ;

p – presiunea, Pa;

E – modulul lui Young, Pa;

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

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

η – randamentul, productivitatea procesului;

b – lățimea fâșiei de oxidare, m,

δ – grosimea stratului, m;

h – înălțimea, m;

τ – timpul, durata, s;

C – capacitatea, F;

R – rezistența electrică activă, Ω ;

n – frecvența de rotație, rot/min;

v_s – viteza de avans, mm/min;

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

INTRODUCERE

Este cunoscut faptul că piesele utilizate în construcția de mașini foarte frecvent funcționează în condiții de temperaturi cu diapazon larg, medii agresive, fiind supuse uzurii mecanice intensive etc. Aceste condiții de exploatare a tehnicii moderne impun cerințe deosebite referitor la durabilitatea și fiabilitatea construcțiilor în ansamblu și a elementelor componente ale lor în parte.

Orișice tehnologie nouă elaborată prezintă o valoare atât teoretică, cât și practică, dacă include în sine următoarele criterii: aplicabilitate practică; eficiență economică; fiabilitate și performanță. Din acest punct de vedere obținerea suprafețelor cu proprietăți deosebite a straturilor subțiri de ordinul nanometrilor este o tendință strategică a cercetărilor contemporane prin elaborarea de noi procedee și tehnologii de prelucrare a materialelor, astfel, încât să se asigure o înaltă productivitate, economie de materiale și energie și să se asigure o calitate înaltă a suprafețelor prelucrate.

Pe piața mondială a tehnicii și tehnologiilor de prelucrare a materialelor există o concurență tot mai aprigă între cele tradiționale și netradiționale. Vectorul principal de dezvoltare e de partea tehnologiilor noi, care de fapt au menirea de a anihila criza de materiale și energie care a cuprins întreaga omenire.

O problemă importantă în construcția de mașini este protecția anticorozivă a suprafețelor lucrătoare a pieselor, subansamblurilor și ansamblurilor mașinilor. Ea reprezintă o totalitate de măsuri, care pot fi întreprinse pentru a proteja materialele tehnice de acțiunea agresivă a mediilor corozive. Sunt cunoscute foarte mult metode și mijloace de protecție anticorozivă, care pot fi grupate în următoarele categorii:

- metode de prevenire a coroziunii [2, 4, 17, 18, 39, 42];
- utilizarea metalelor și aliajelor rezistente la coroziune [2-4, 17, 18, 20-26, 39, 41, 42, 73];
- metode de acționare asupra mediului coroziv [2, 4, 17, 18, 34-40, 42, 46, 48];
- metode noi de depunere a acoperirilor cu proprietăți anticorozive pe suprafețele metalice ale pieselor mașinilor și dispozitivelor [1-16, 27-33, 49-70, 72, 74-76, 83-93];
- pasivarea suprafețelor prin depunerea peliculelor de oxizi sau hidroxizi [1, 27-33, 43, 71, 77, 80, 82] etc.

Esența metodelor de prevenire a coroziunii constă în:

- alegerea corectă a materialelor utilizate în construcția de mașini și utilaje industriale, din punct de vedere a rezistenței la coroziune. În tabelul 1 [2] sînt prezentate vitezele de coroziune pentru o serie de metale și aliaje cel mai frecvent utilizate în construcția de mașini exploatare în diferite medii corozive;

- excluderea utilizării în contact de funcționare a unui metal față de altul cu un potențial mai electronegativ (aluminiiu – aliaje de cupru; bronzuri – oțeluri etc.);

Viteza de coroziune (mm/an)

Metalul	Soluții de acizi			Soluții alcaline	Soluții neutre		Aer atmosferic normal
	Neoxidați		Oxidați	Hidroxid de sodiu 5%	Apă proaspătă	Apă de mare	
	Sulfuric 5%	Acetic 5%	Azotic 5%				
Aluminiu	2...2,5	0,01...0,1	0,37...2,0	300...400	0,002	0,025...1,25	0...0,01
Zinc	foarte mare	15...20	foarte mare	0,375...5,0	0,01...0,25	0,01...0,25	0...0,01
Staniu	0,05...12,5	0,05...12,5	2,5...10,0	0,1...0,5	0...0,01	0,002	0...0,005
Plumb	0...0,5	0,25...3,75	25...150	0,1...12,5	0,002...0,05	0,005...0,37	0...0,005
Oțel carbon	0,3...10	0,25...10,0	25...250	0...0,005	0,002...0,25	0,002...0,25	0,02...0,2
Fonta silicioasă	0...0,1	0...0,005	0...0,5	0...0,25	0...0,05	0...0,07	0...0,05
Oțel inoxidabil	0...2,5	0...0,01	0...0,05	0...0,005	0...0,05	0...5,0	0...0,05
Aliaj de Cu	0,05...1,25	0,05...0,37	3,75...37,5	0,05...0,1	0...0,025	0,005...0,37	0...0,05
Aliaj de Ni	0,05...0,75	0,05...0,25	0,002...37,5	0...0,005	0...0,05	0...0,025	0...0,05
Titan	0,25...2,5	0,002	0,002...0,02	0,005	0,002	0,002	0,002
Argint	0...0,02	0,002	foarte mare	0,002	0,002	0,002	0,002
Platină	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Aur	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002

- la fel se va evita punerea în contact a metalelor ecrusate cu metalele recoapte sau turnate, deoarece din cauza diferenței de potențial electrochimic dintre ele, în prezența unui electrolit corespunzător, primele corodează;

- prelucrarea mai calitativă a suprafețelor pieselor funcționale, deoarece adânciturile, zgîrieturile favorizează și accelerează coroziunea.

Din grupa metalelor și aliajelor rezistente la coroziune fac parte metalele nobile și aliajele lor, dar utilizarea lor devine dificilă din motivul costului foarte înalt. Se pot utiliza, în schimb, metale și aliaje autoprotectoare, adică metale și aliaje care în urma coroziunii inițiale se acoperă cu o peliculă izolatoare datorită fenomenului de pasivare (exemplu pasivarea Ag în HCl prin formarea peliculei de AgCl, a Fe în HNO₃ concentrat prin formare peliculei de Fe(NO₃)₃ etc.). În majoritatea cazurilor se recurge la alierea metalelor cu un component adecvat. Uneori concentrațiile relativ scăzute ale componentului de aliere, reduc considerabil viteza de coroziune (de exemplu introducerea de 0,2...0,3 % Cu, Cr sau Ni în oțeluri de construcție etc.).

Sînt multe cazuri în care se poate acționa asupra mediului coroziv pentru scăderea evidentă a vitezei de coroziune. Există mai multe modalități dintre care pot fi menționate [2, 4, 17, 18, 39, 42]:

- reducerea valorii pH-ului, ceea ce înseamnă reglarea lui la o valoare convenabilă pentru metalul care trebuie protejat. Aceasta înseamnă eliminarea componentelor periculoase din mediul de coroziune, prin metode fizice, chimice sau mecanice (exemplu neutralizarea apelor reziduale cu substanțe chimice);

- îndepărtarea gazelor (O₂ și CO₂) care sporesc viteza de coroziune a mediilor corozive, mai ales a apei;

- utilizarea inhibitorilor sau a pasivatorilor, care sînt niște substanțe organice sau anorganice, care fiind introduse în cantități minime în mediul coroziv, micșorează sau anihilează complet viteza de coroziune a acesteia;

- protecția catodică (electroapărarea) constă în aplicarea unor metode galvanice de protecție a metalelor, folosind anodi metalici auxiliari, care corodează în locul metalului protejat.

Protecția prin acoperiri anticorozive [1-16, 27-33, 49-70, 72, 74-76, 83-93] se realizează prin depunerea metalului cu un strat subțire de material autoprotector. Stratul autoprotector trebuie să îndeplinească următoarele prescripții: să fie compact și aderent; să fie suficient de elastic și plastic, iar grosimea lui să fie cît mai uniformă. Stratul protector poate fi metalic sau nemetalic; cele metalice se pot realiza: pe cale galvanică; pe cale termică (care poate fi prin scufundare într-un metal topit); prin pulverizare; prin difuziune și prin placare. Aceste acoperiri, în afara celor obținute prin placare, prezintă de obicei o oarecare porozitate, ceea ce determină în timp apariția porțiunilor locale de coroziune, cu toate consecințele lor. Straturile protectoare nemetalice pot fi organice sau anorganice, realizate prin utilizarea lacurilor, vopselelor, emailurilor sau a foliilor de masă plastică etc.

Formarea peliculelor subțiri anorganice (de oxizi sau hidroxizi) pe suprafețele pieselor este o metodă progresivă de obținere a depunerilor protectoare la coroziune. Oxidul fiind mult mai pasiv decît metalul de bază al piesei, la interacțiunea cu mediul înconjurător, sporește potențialul de coroziune a suprafeței active a piesei. Creșterea stratului de oxizi depinde de un șir de factori, cum ar fi – de natura termică, chimică și electrică. Procesul de oxidare decurge mai intensiv nemijlocit sub petele electrolice (fig. 1). Acestea migrează pe suprafețele electrozilor alegînd locurile în care, pentru întreținerea procesului, este necesară o intensitate mai mică a cîmpului electric. Necătfînd la faptul că procesul de migrație a petelor electrolice poartă un caracter întîmplător, acestea scanează practic toată suprafața prelucrată într-o anumită perioadă de timp.

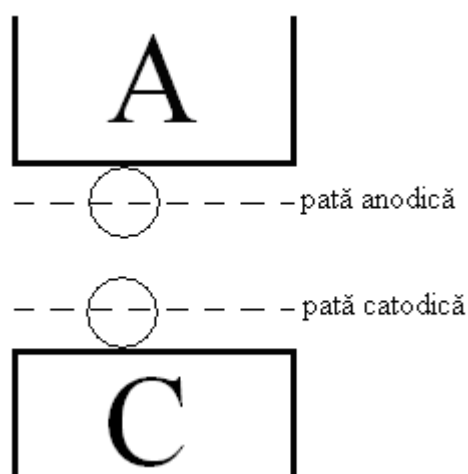


Fig. 1. Petele electrolice – sursele termice de prelucrare superficială

Alegerea uneia sau alteia dintre metodele de protecție depinde de:

- parametri tehnologici de funcționare a instalației;
- forma și dimensiunile obiectului protejat;
- calitatea materialului de bază;
- tehnologia de aplicare și posibilitățile de execuție a protecției anticorozive.

Formarea peliculelor de oxizi pe suprafețele active ale pieselor și-a găsit o aplicabilitate destul de largă în scopul sporirii rezistenței acestora la coroziune, modificarea proprietăților de conductibilitate electrică pentru piesele din aparatajele electronice și microelectronice. Pentru formarea peliculelor de oxizi pe suprafețele pieselor executate din diferite materiale se aplică microoxidarea cu arc în electrolit [1, 27-33], metoda de bombardare a suprafețelor cu jet de plasmă oxigenică [43, 71, 80], etc. Actualmente mai puțin studiată este metoda formării peliculelor de oxizi cu aplicarea DEI. Într-un șir de lucrări [113-117] se accentuează posibilitatea formării peliculelor de oxizi și hidro-oxizi în stare amorfă pe suprafețe metalice.

Proprietățile fizice, chimice și mecanice ale stratului superficial al piesei pot juca un rol foarte important în succesiunea fenomenelor de coroziune. Astfel, o peliculă de oxid de o anumită grosime, stabilă și aderentă la suprafața metalului, compactă, continuă și lipsită de pori sau fisuri poate frâna, într-o măsură oarecare, rularea procesului de coroziune. Condiția de protecție a peliculei poate fi exprimată prin valoarea coeficientului de expansiune [95] care indică raportul dintre volumul oxidului și cea a metalului:

$$\frac{V_{oxid}}{V_{metal}} > 1. \quad (1)$$

Pentru determinarea domeniilor de aplicabilitate ale peliculelor de oxizi formate pe suprafețele materialelor conductibile cu aplicarea DEI cu lămurirea pretențioasă a fenomenelor fizico-chimice ce se petrec pe suprafețele pieselor de prelucrat și ale electrodului-sculă, este necesară stabilirea proprietăților funcționale și conținutului chimic și de fază a acestor pelicule.

Unul dintre indicii tehnologici de bază al unui proces este productivitatea lui. La prelucrarea materialelor prin turnare și deformare plastică (laminare, tragere, presare, forjare, matrițare, ștanțare etc.) productivitatea se caracterizează prin numărul de piese confecționate într-o perioadă de timp. La prelucrarea materialelor prin așchiere (strungire, frezare, burghiere, rectificare, broșare etc.) în calitate de parametru al productivității servește timpul-mașină. În cazul formării straturilor de depuneri (prin electroeroziune, electrochimie etc.) este vorba despre variația masei catodului în timp în funcție de parametrii procesului. Pentru stabilirea eficacității procesului de formare a peliculelor subțiri de oxizi pe suprafețele materialelor conductibile cu aplicarea DEI în lucrare se propune determinarea timpului specific de prelucrare pentru o unitate de suprafață.

Un avantaj mare în dezvoltare a unei tehnologii este elaborarea recomandărilor tehnologice și stabilirea domeniilor de aplicare, elaborare a unor noi mostre de aparataj și scule și, nu în ultimul rând, protecția proprietății intelectuale.

Scopul constă în elaborarea tehnologiei obținerii peliculelor subțiri de oxizi pe suprafețele metalice ale aliajelor de fier, cupru, aluminiu și titan, cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls în vederea sporirii rezistenței electrice de suprafață și rezistenței la coroziune a pieselor executate din ele.

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

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

- elaborarea modelului fizic de formare a peliculelor de oxizi pe suprafețele metalice cu aplicarea DEI;
- cercetarea teoretică și experimentală a condițiilor de formare a peliculelor subțiri de oxizi pe suprafețele materialelor metalice cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls;
- stabilirea legăturilor de bază ale procesului de formare a peliculelor de oxizi în funcție de materialul piesei și regimul tehnologic de prelucrare;
- determinarea unor proprietăți funcționale a peliculelor formate și stabilirea domeniilor de aplicabilitate;
- proiectarea și elaborarea unor machete de utilaje pentru realizarea tehnologiei de prelucrare superficială a materialelor cu aplicarea DEI;
- elaborarea recomandărilor tehnologice privind implementarea tehnologiei elaborate.

Actualitatea temei de investigație și gradul de studiere a acesteia sunt argumentate de următoarele:

Încă în anii 90 a secolului trecut a fost depistată dizolvarea anormală a oxigenului în aliajele fierului cu formarea peliculelor micro- și nanometrice de oxizi și hidrooxizi în stare amorfă sub acțiunea DEI, dar cu regret acesta a rămas doar la starea de constatare.

Oxizii metalelor sub formă de pelicule, particole și fire nanostructurate își găsesc aplicabilitatea în nano- și microelectronică, electrotehnică, industria constructoare de mașini și aparate, medicină, bionică, etc.

Rezolvarea problemelor privind sporirea rezistenței la coroziune a pieselor ce funcționează în medii agresive, protejarea mediului ambiant, sporirea duratei de funcționare a pieselor aplicate în industria de produse alimentare, modificarea direcționată a proprietăților electrice a suprafețelor pieselor pentru micro- și nano-electronică este una actuală;

Dezvoltarea de noi cunoștințe prin concretizarea și elaborarea bazelor teoretice, privind procesele de interacțiune a canalului de plasmă al DEI cu suprafețele electrozilor în condiții normale;

Contribuțiile pe care le poate avea această cercetare în dezvoltarea procedeeelor și tehnologiilor noi de formare a straturilor de suprafață prin formarea oxizilor în stare amorfă legați structural poate depăși procedeele existente și favoriza dezvoltarea de noi tehnologii eficiente și simple în realizare.

Noutatea științifică a rezultatelor obținute constă în elaborarea unui nou model fizic de interacțiune a canalului DEI cu suprafețele metalice și stabilirea condițiilor necesare și suficiente de formare a peliculelor subțiri de oxizi pe suprafețele metalice cu aplicare descărcărilor electrice în impuls, concretizarea interdependenței compoziției chimice și de fază a peliculelor formate de regimul de prelucrare și proprietățile funcționale ale acestora.

Semnificația teoretică constă în elaborarea bazelor teoretice privind tabloul fizico-chimic și fenomenele ce se produc în interstițiu și straturile superficiale a pieselor prelucrate în procesul de formare peliculelor de oxizi cu aplicarea DEI în condiții normale.

Valoarea aplicativă a lucrării este asigurată de recomandările teoretico-experimentale privind proiectarea și elaborarea generatoarelor de impulsuri de curent, construcția dispozitivelor electronice de tipul conductor-nemetal și combinațiile ale acestora, protecția anticorozivă a suprafețelor metalice prin formarea peliculelor de oxizi în stare amorfă legați structural cu materialul de bază, posibilitatea formării peliculelor cu rezistență electrică de suprafață de excepție, elaborarea modelelor de electrozi-sculă pentru formarea peliculelor de oxizi cu aplicarea DEI.

Implementarea rezultatelor științifice: în baza rezultatelor din teza de doctor a fost elaborată o tehnologie nouă de obținere a rezistoarelor peliculare, au fost depuse 4 cereri de brevet de invenție privind construcția electrozilor-sculă și procedeele de formare a straturilor nanometrice de oxizi și hidro-oxizi în stare amorfă cu aplicarea DEI. Rezultatele teoretice și experimentale obținute au fost aplicate în pregătirea specialiștilor prin masterat la Universitatea de Stat „Alecu Russo” din Bălți, specialitatea „Tehnologii de instruire și producere” la promovarea cursurilor „Nanotehnologii” și „Tehnologii de formare a straturilor de suprafață”.

I. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND OBTINEREA PELICULELOR SUBȚIRI DE OXIZI PE SUPRAFEȚELE MATERIALELOR CONDUCTIBILE CU APLICAREA DESCĂRCĂRILOR ELECTRICE ÎN IMPULS

1.1. Analiza metodelor de obținere a peliculelor subțiri de oxizi

Dintre metodele de obținere a peliculelor subțiri de oxizi putem evidenția:

- metode care utilizează agenți cu acționarea termică (get de plasmă, fascicol de ioni, fascicol de electroni, laser) [2-4, 24, 43, 71, 77, 80, 82];
- metode care utilizează agenți cu acționarea chimică (agenți chimici) [20-23];
- metode care utilizează agenți cu acționarea electrochimică (metoda electrolitică) [1, 27-33];
- metode care utilizează agenți cu acționarea termoelectrică (descărcări electrice în impuls, arc electric) [2-4, 5-16, 49-70, 72, 74-76, 79, 83-93];

Fiecare dintre metodele menționate mai sus dispun atât de avantaje cât și dezavantaje. Din acest motiv, pentru a alege una sau altă metodă de formare a straturilor protectoare, este necesar de a cunoaște unele particularități ale acestora, domeniul de aplicabilitate și eficacitatea aplicării fiecăreia dintre ele.

1.2. Caracterizarea metodelor utilizate pentru oxidarea suprafețelor metalice în plasmă electrolitică

Oxidarea suprafețelor în mediul electrolitic prin descărcări electrice în arc, în dependența de tipul și starea mediului ce conține oxigen din interstițiul dintre electrozi se împarte în [1, 27-33]:

- anodizarea în soluții apoase a electroliților;
- anodizarea în topiturile sărurilor;
- anodizarea în plasmă gazoasă;
- anodizarea în plasmă electrolitică;
- microoxidarea suprafețelor în mediu electrolitic prin descărcări electrice în arc.

Anodizarea în soluții apoase a electroliților [1, 27-33] este o metodă clasică și cea mai răspândită a anodării (obținerii peliculelor anodice de oxizi). De obicei, ea se realizează la curent continuu în regimuri potențio- sau galvano-stactice, adică la tensiuni constante de formare (U_f) sau densități de curent anodic (i_a). În calitate de electrolit, mai des, sînt folosite soluții apoase a acizilor (anodizarea în soluții apoase de acid sulfuric, acid cronic, acid oxalic), mai rar - soluții alcaline, pentru obținerea peliculelor anodice de oxizi subțiri de destinație specială. Pentru obținerea peliculelor anodice de oxizi cu calitate necesară, înainte de anodizare, piesele sunt supuse prelucrării prealabile, care include o curățire brută; șlefuire; poleire mecanică, chimică sau electrochimică;

degreșare cu solvenți de la restul de ulei, LRU, și conservanți; degreșare chimică sau electrochimică, curățirea cu ultrasunete; spălarea în apa caldă și rece. După grosimea peliculelor anodice de oxizi obținute (δ) diferențiem:

- anodizarea fină (cu straturi subțiri) – obținerea peliculelor anodice de oxizi (de barieră, condensator) cu grosimea pînă la 3 μm ;
- anodizarea simplă – obținerea peliculelor anodice de oxizi cu grosimea medie de 20- 50 μm ;
- anodizarea brută – obținerea peliculelor anodice de oxizi cu porozitate mică de grosime mai mult de 20-50 μm care se realizează la temperaturi joase ($-10 \div +10^{\circ}\text{C}$). Pentru varianta dată în afară de răcirea intensivă a electrolitului este necesar răcirea piesei din interior.

Anodizarea fină se realizează în electroliți care aproape nu se dizolvă oxidul anodic (soda, acid boric) la tensiuni de formare U_f pînă la 300V și mai mult, dar anodizarea simplă și brută – în electroliți care slab sau moderat se dizolvă oxidul anodic (soluții apoase de acid sulfuric, acid cromic, acid oxalic) la U_f de ordinul 20 sau 100 V, respectiv.

Anodizarea în topiturile sărurilor [1, 27-33] dă posibilitatea formării peliculelor anodice de oxizi pe aluminiu, cupru și fier (în comparație cu anodizarea în soluții apoase a electroliților) cu rezistența mai mare la coroziune, grosimea și fiabilitatea parametrilor, datorită, în particular azeziunii mai mici a anionilor în ei din electrolit și temperaturii mai mari, care facilitează difuzia reciprocă în peliculă. Pentru anodizare în topiturile sărurilor sînt folosite săruri și amestecurilor lor cu temperaturi de topire joasă (150-250 $^{\circ}\text{C}$) și conductibilitate înaltă: KHSO_4 , NaHSO_4 , $\text{LiNO}_3+\text{KNO}_3$, $\text{KNO}_3+\text{NaNO}_3$, $\text{AlCl}_3+\text{NaCl}$, $\text{AlCl}_3+\text{NaCl}+\text{KCl}$, $\text{KNO}_2+\text{NaNO}_2$ etc.

Anodizarea în plasmă gazoasă [1, 27-33], ca și în soluții apoase a electroliților are mai multe modalități.

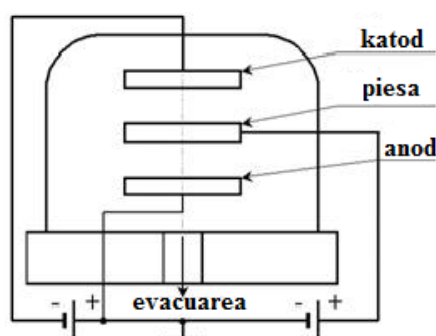


Fig. 1.1. Schema dispozitivului pentru anodizarea în plasmă gazoasă

Anodizarea în plasma descărcării la curent continuu se efectuează în coloana pozitivă a arcului, având în vedere lungimea acestuia, concentrația maximă de O^- și de intensitate mare de oxidare în ea, dar și faptul că mișcarea haotică a particulelor încărcate predomină asupra mișcării direcționate oferind formarea peliculei anodice de oxizi mai uniformă.

Schema cea mai răspândită a dispozitivului pentru anodizarea în plasma gazoasă este prezentată în fig. 1.1. Parametrii anodizării în plasma gazoasă: presiunea în cameră $p = 2,7 - 400$ Pa; tensiunea de descărcare 360 - 3500 V; curentul de descărcare 0,1 - 80 mA; densitatea curentului de formare $i_a = 0,02 - 3$ A/dm²; tensiunea de formare $U_f = 0 - 175$ V.

Anodizarea în descărcare prin frecvența înaltă (HF) este fără electrozi și dă vitezele oxidării mai mari, grosimea peliculei mare și uniformitate oxidului față de metoda anodizării în plasma descărcării la curent continuu. Neajunsul principal este complexitatea utilajului și nocivitatea HF-radiației.

Anodizarea în arc de tensiune joasă dă o mai mare viteză a oxidării și grosimii peliculei, dar pentru ea este caracteristică distrugerea rapidă a catozilor fierbinți în atmosfera oxigenului.

Anodizarea în plasmă electrolitică – o metodă specială la care anodul 1 este nu adânc scufundat în electrolitul 3, iar catodul 2 se află deasupra suprafeței lui (fig. 1.2), între ei se produce descărcare electrică, prin aplicarea unei tensiuni de mărimea 40-100 V și se întrerupe cu ajutorul unui scurt contact dintre catod și electrolit.

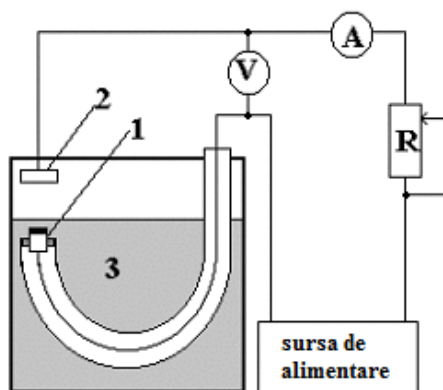


Fig. 1.2. Schema dispozitivului pentru anodizarea în plasmă electrolitică:

1 – piesa-anod, 2 – catod, 3 – electrolit

Aceasta dă posibilitatea obținerii plasmelor dense în apropierea metalului menținând în același timp o temperatură scăzută pe anod (datorită vaporilor electrolitului temperatura electrozilor nu depășește 80°C). Poziția electrozilor poate fi și inversă, dar cu toate acestea productivitatea și caracteristicile peliculelor anodice de oxizi se reduc la 15-25%. Mecanismul anodizării plasmelor electrolitice, conține în sine elementele anodizării în soluții apoase a electrolizilor, anodizării în plasma gazoasă și particularități caracteristice proprii. La scufundare neadâncă a anodului în electrolit, depărtării catodului, presiunii joase în interstițiu dintre electrozi și tensiunii de formare înalte, anodizarea în plasmă electrolitică este asemănată cu anodizarea în plasma gazoasă care se formează în vapori electrolitului în aer. În caz contrar avem altă stare extremă – anodizarea în soluție apoasă fierbinte a electrolitului. Descărcarea la anodizarea în plasmă electrolitică implică trei stadii:

nașterea canalului conductibilității; trecerea proceselor cu care se degajă energia în el; separarea lui cu transformarea în bula de gaz. Anodizarea în plasmă electroloitică de obicei se realizează în 3-20% soluției acidului sulfuric la scufundarea anodului de 2-6 mm. Creșterea peliculei anodice se termină în primele 8-18 min la grosimea ei finală pînă la 300 μm și porozitatea 10-40%. Această viteză mare de formare a straturilor superfeciale, se explică prin faptul că în interstițiul dintre electrozi au loc reacții plasmochimice și termice, unde sînt: vaporii electrolitului și aer ($O_2 + e \rightarrow O_2^-$; $O + e \rightarrow O^-$; $O_2 + e \rightarrow O^- + O$; $O_2^- \rightarrow O^- + O$; $H_2O \rightarrow O + 2H$ – termoliza apei la temperatura mai mare de 1000 °C).

Tabelul 1.1

Caracteristicile comparative ale diferitelor metode de anodizare și microoxidarea suprafețelor în mediu electrolitic prin descărcări electrice în arc

№ d/o	Tipul prelucrării superfeciale	Grosimea oxidului, μm, pînă la	Viteza creșterii oxidului, μm/min, pînă la	Mediul de lucru	Microduritatea, kgf/m ² , pînă la	Eficacitatea creșterii oxidului, %	Încărcarea singulară a echipamentului, m ² , pînă la
1	Anodizarea în soluții apoase a electroliților	200	1	Soluțiile acide și soluții alcaline	1200	Aproape o 100	100
2	Anodizarea în topiturile sărurilor	50	1	Topiturile sărurilor	600	Aproape o 100	0,01
3	Anodizarea în plasmă gazoasă	1	0,03	Aer sau oxigen în starea gazoasă	—	pînă la 30	0,01
4	Anodizarea în plasmă electroloitică	300	50	Vaporii acizilor și alcalinilor	600	30 - 60	0,01
5	Microoxidarea suprafețelor în mediu electrolitic prin descărcări electrice în arc	400	10	Vaporii acizilor, alcalinilor și sărurilor	2500	pînă la 30	1

Microoxidarea suprafețelor în mediu electrolitic prin descărcări electrice în arc la fel cu anodizarea în plasmă electroloitică se petrece cu participarea descărcărilor electrice, dar la rîndul său, are unele diferențe semnificative: ambii electrozi sunt scufundați în electrolit, iar canale conductivității prin descărcări cu plasmă se formează nu dintre electrozi dar în strat subțire lîngă electrod dintre suprafața metalului prelucrat și așa numit catod electroloitic în puncte care se află în mișcare haotică pe suprafețele prelucrabile, atunci cînd altă suprafață se află în contact cu soluție apoasă a electrolitului; plasma la microoxidarea suprafețelor în mediu electrolitic prin descărcări electrice în arc nu este compusă din aer și vaporii a electrolitului dar numai electroloitic; microoxidarea suprafețelor în mediu electrolitic prin descărcări electrice în arc mai des se realizează la curent alternativ în soluții alcaline a electroliților la tensiuni înalte – pînă la 1000 V. Particularitățile caracteristice a procesului includ temperatura înaltă în canalul descărcării; distrugerea termică a apei cu nașterea oxigenului atomic și ionizat; mărirea locală a concentrației electrolitului și trecerea

reacțiilor plasmochimice specifice în zona descărcării. În legătură cu aceasta, caracteristicile procesului și straturile superficiale sunt semnificativ diferite în comparație cu alte metode de anodizare (tab. 1.1) [1, 27-33].

1.2.1. Anodizarea în plasmă electrolică

După [1, 27-33] electrodul-sculă este substituit cu schemă electrică echivalentă prezentată în fig. 1.3. Ea prezintă un semiconductor cu capacitatea C_1' și rezistență R_1 și dielectric (oxidul depus pe suprafața) cu capacitatea C_2' și rezistența R_2 . Impedanța în cazul unei descărcări electrice în impuls se calculează cu relația:

$$Z = \Delta U/q, \quad (1.1)$$

unde: ΔU – tensiunea unui impuls în descărcare, q – cantitatea de sarcină transportată la o descărcare.

Numărul nivelelor-donor este de ordinul 10^{26} m^{-3} , iar mărimea sarcinii spațiale a semiconductorului constituie $0,32 \text{ Cl}\cdot\text{m}^{-3}$ [1, 27-33].

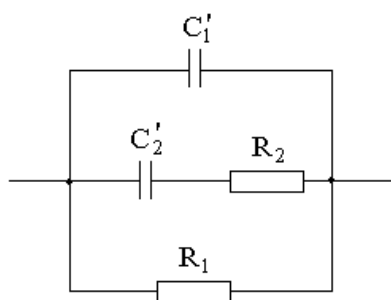


Fig. 1.3. Schema echivalentă care descrie partea semiconductoră a electrodului [1]:

C_1' și R_1 – capacitatea și rezistența semiconductorului;

C_2' și R_2 – capacitatea și rezistența stărilor superficiale

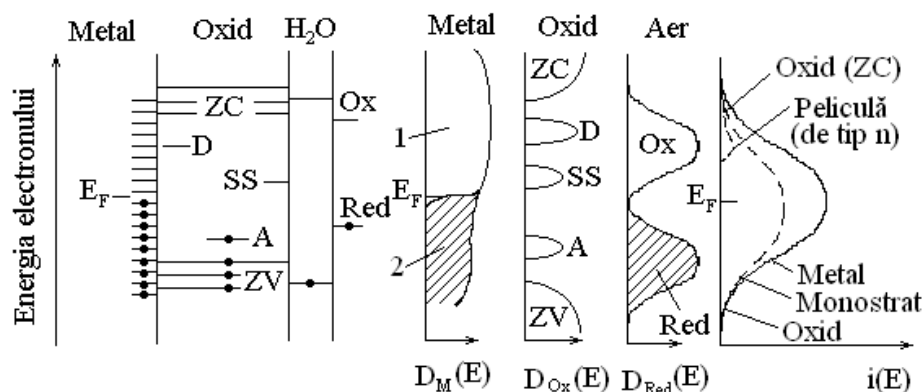
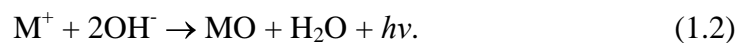


Fig. 1.4. Schema nivelelor electronice la granița „metal-oxid-aer” [1]: ZC – zona de conductibilitate; ZV – zona de valență; D – donor; SS – starea superficială; A – acceptor; Red, Ox – particule reduse și oxidate ale aerului; 1 și 2 – nivelele libere și ocupate; $D(E)$ – funcția de distribuție a nivelelor electronice; $i(E)$ – fracția densității de curent pentru diferite stări ale metalului; E_F – nivelul Fermi

În fig. 1.4 [1, 27-33] schematic sînt reprezentate nivelele electronice la granița „metal-oxid-aer”, zona de conductibilitate a oxidului, nivelele de donator și acceptor, stările superficiale, funcțiile de distribuție care corespund acestor nivele și densitatea de curent în funcție de energia electronilor E. Pentru electrodul pur metalic valoarea amplitudică a curentului se observă pentru energiile, egale nivelului Fermi. Apariția oxidului pe metal micșorează densitatea de curent, însă maximumul, ca și înainte de prelucrare, corespunde energiei nivelului Fermi. Pe semiconductorul de tipul „n” există curenți mici pe marginile zonelor de conductibilitate și de valență. În pelicule izolante de oxizi curentul electronic trece prin zona de conductibilitate.

Trecerea electronilor de pe nivelele de adaus în zona de conductibilitate este posibilă, dacă ei au energia necesară pentru depășirea barierei energetice, valoarea căreia depinde de intensitatea câmpului electric. Nivelul și forma barierei sînt determinate de interacțiunile culonice a electronilor cu centrele de adaus.

În rezultatul interacțiunii ionilor de hidroxizi cu ionii de metal provoacă radiația luminescentă după schemă:



Radiația acestei reacții fotochimice are spectru continuu care nu depinde de natura materialului, însă la formarea peliculei cu viteză mare, iluminarea nu se observă.

S. Iconopisov a obținut o corelație teoretică dintre intensitatea de luminescență și tensiune:

$$L_a = (A/B)[\exp(B\delta) - 1] - A\delta, \quad (1.3)$$

unde: A și B sînt constante, care depind de densitatea de curent și de natura materialului, δ – distanța dintre electrozi.

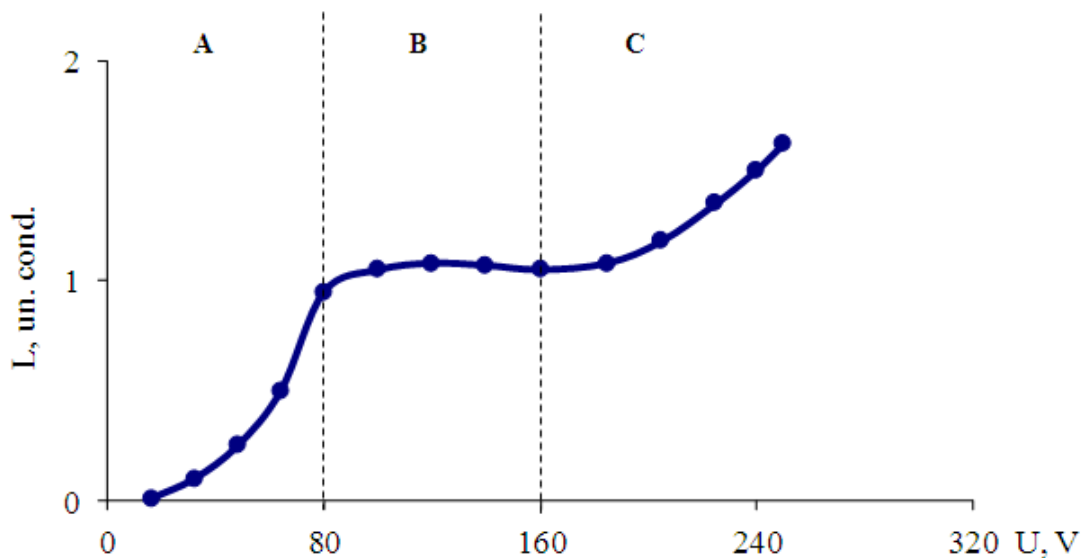


Fig. 1.5. Intensitatea de luminescență în funcție de tensiune [1]:
 regiunea A: porțiunea inițială – creșterea relativ rapidă a intensității;
 regiunea B: porțiunea de saturație; regiunea C: o nouă creștere a luminescenței la mărirea de
 mai departe a tensiunii pînă la străpungere

Dependența tipică experimentală a intensității de luminiscentă de tensiune este prezentată în fig. 1.5 [1].

Descriere cantitativă a galvanoluminiscenței se bazează pe prezentarea despre avalanșele electronice care nu aduc la distrugerea peliculelor de oxizi și care sînt uniform distribuite pe toată suprafața anodului.

La intensitatea cîmpului de 10^7 – 10^8 V/m în pelicula de baleaj care au loc două procese: ionizarea centrelor de luminiscentă, nemijlocit sub acțiunea cîmpului cu recombinația de mai departe a electronilor, și excitarea centrelor din motivul ciocnirilor neelastice. La intensități mari ale cîmpului, electronii cîpătă o energie necesară pentru ionizarea atomilor. Electronii noi formați, din cauza aceasta, la fel participă la ionizare. Se formează o avalanșă a electronilor, în urma căreia apar sarcini pozitive care practic nu se mișcă. Aceste sarcini frînează mișcarea electronilor și împiedică apariția de avalanșe mari care pot distruge dielectricul. Lungimea de limită a_v a avalanșei este puțin mai mică decît distanța dintre electrozi S (fig. 1.6).

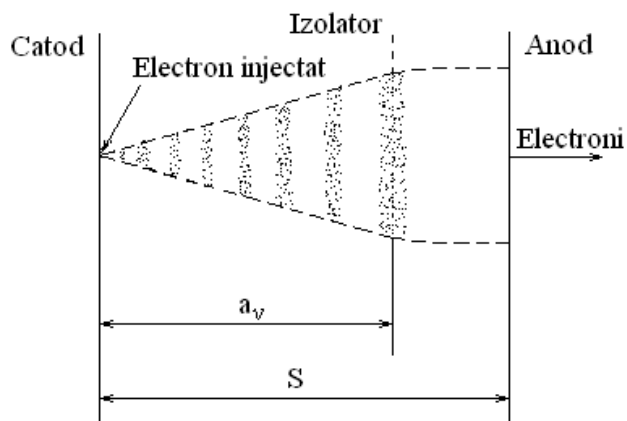


Fig. 1.6. Reprezentarea schematică a avalanșei formate de un electron injectat în izolator

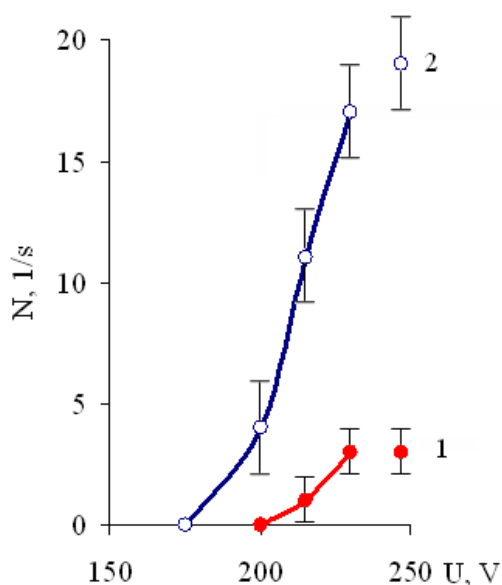


Fig. 1.7. Numărul de străpungeri într-o unitate de timp în funcție de tensiune: densitatea de curent, $A \cdot m^{-2}$: 1 – 10; 2 – 50

Odată cu creșterea tensiunii crește și numărul de străpungeri și depinde de densitatea curentului (fig. 1.7). În fig. 1.7 este prezentată dependența numărului de străpungeri într-o unitate de timp funcție de tensiunea aplicată pentru probele din Al [1].

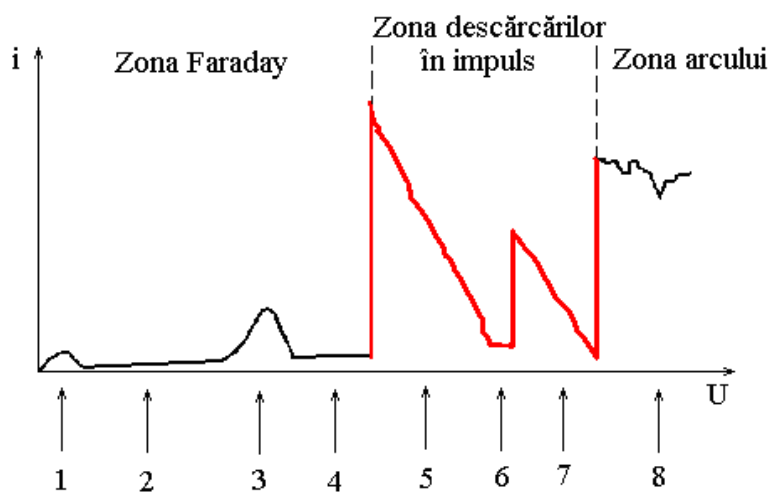


Fig. 1.8. Caracteristica volt-amperică a procesului de obținere a peliculelor de oxizi la DEI:
 1 – dizolvarea; 2 – peliculă pasivă; 3 – formarea oxidului pe unele porțiuni ale suprafeței;
 4 – formarea suprafeței continue; 5 – începutul oxidării DEI;
 6 - formarea stratului poros; 7 – formarea stratului continuu; 8 – deteriorarea stratului

Caracteristica volt-amperică a procesului de obținere a peliculelor de oxizi (vezi fig. 1.8) [1] ne demonstrează că prelucrarea trebuie să se efectueze în zona descărcărilor în impuls. Ca să se evite deteriorarea peliculelor, e necesar ca prelucrarea să se efectueze cu energii relativ mici, adică tensiunea și curentul de descărcare trebuie să fie alese în așa mod, încât să se obțină oxidarea cu productivitatea sporită fără străpungerea stratului de oxid obținut.

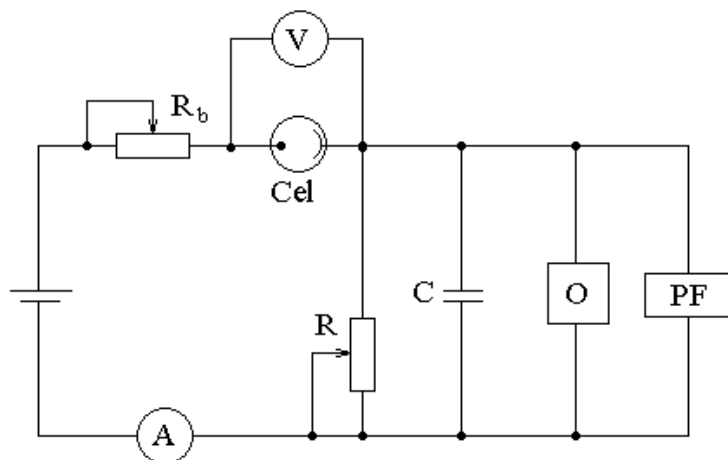


Fig. 1.9. Schema instalației experimentale pentru înregistrarea și numărarea scînteilor la DEI:
 R_b – rezistența de balast; Cel – celula; R – cutie de rezistențe; O – oscilograf cu memorie;
 PF – cymometer electronic de numărare

Pentru numărarea și înregistrarea scînteilor la DEI se va utiliza schema din fig. 1.9 [1].

În momentul străpunerii stratului de oxid anodul poate fi prezentat printr-o schemă echivalentă (fig. 1.10) [1].

Cunoscînd raza medie a craterului format la străpungere, autorii [20] propun următoarele relații pentru determinarea rezistenței specifice a peliculei de oxid și a canalului de descărcare:

$$\rho = RA/\Delta, \quad (1.4)$$

$$\rho_1 = ra/\Delta, \quad (1.5)$$

unde: R și r este rezistența stratului depus și, respectiv, a canalului de descărcare, A și a – respectiv, aria suprafeței de oxid depus și secțiunea canalului de descărcare, Δ – raza medie a craterului.

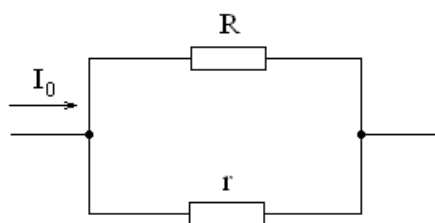


Fig. 1.10. Schemă echivalentă a anodului în momentul străpunerii:

I_0 – curentul celulei; R și r – rezistența stratului depus și, respectiv, a canalului de descărcare

Conținutul posibil al depunerilor obținute prin DEI este prezentat în tabelul 1.2 [1].

Tabelul 1.2.

Conținutul straturilor superficiale formate cu aplicarea descărcării electrice în impuls

Metalul	Conținutul depunerilor
Al	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3, \text{Al}(\text{OH})_3$
Mg	MgO, MgOH
Fe	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}, \text{Fe}(\text{OH})_3$
Zn	ZnO, ZnOH
Ni	NiO, NiOH

1.2.2. Microoxidarea suprafețelor în mediu electrolic prin descărcări electrice în arc

În baza microoxidării suprafețelor în mediu electrolic prin descărcări electrice în arc stă procesul oxidării anodice (anodizarea) a metalelor.

Teorie general acceptată a mecanismului formării structurii peliculelor anodice de oxizi nu există, însă, înaltă recunoaștere au primit modele [2, 4, 17, 18, 39, 42]:

- fizico-geometrică;
- coloid-electrochimică și
- plasmatică.

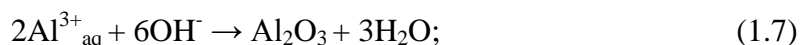
Teoria plasmatică a oxidării dă răspuns la un șir de întrebări, legate de strălucirea aluminiu la polarizare anodica. Conform acestei teorii, stratul de bariera de tip constant nu există – el se polimerizează numai în momentul deconectării curentului dintr-un strat foarte subțire a plasmiei bidimensionale reci din apropierea anodului, care se află într-o stare de fierbere și reînnoire. Diagrama de proces este prezentată în fig. 1.11 [2, 4, 17, 18, 39, 42].

Etapa 1:

ionizare Al pe anod:



Nașterea nucleului oxidului:



Polimerizarea nucleilor:

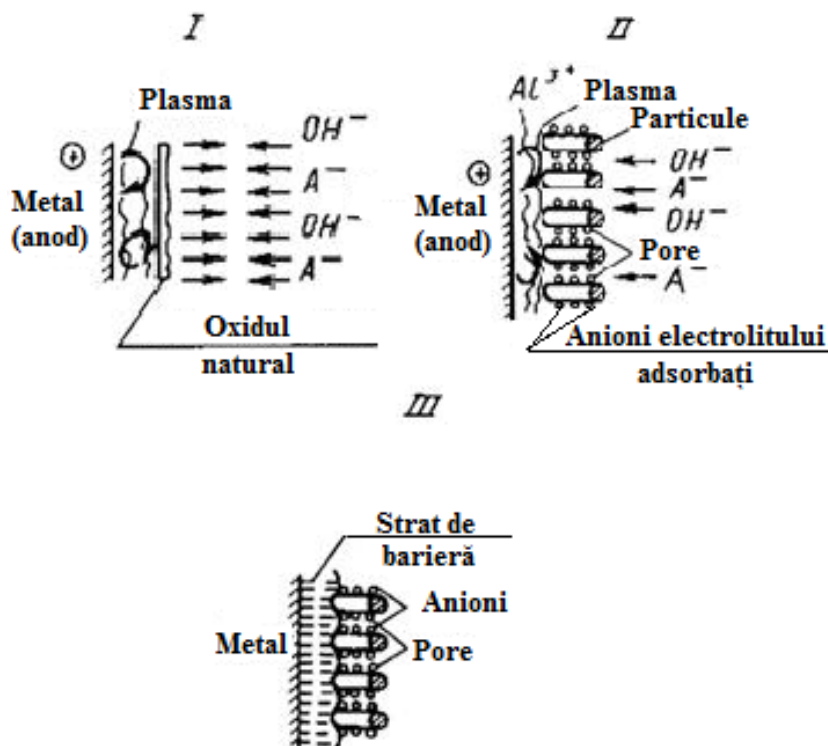


Fig. 1.11. Schema care ilustreaza modelul plasmatic al anodizării

Etapa 2:

hidratarea parțială a oxidului:



(pătrunde în materialul de bază împreună cu Al₂O₃).

Etapa 3:

după conectarea curentului – anionii, adsorbite pe particule, împiedică unirea lor într-un strat continuu.

În sprijinul acestei teorii se prezintă o serie de fapte:

- luminescența (de diferite culori), în funcție de forma, „luminozitate – tensiune” în prezența tensiunii de amorsare și a spectrului de luminozitate continuu corespunde spectrului plasmei descărcării de înaltă presiune, ceea ce explică nașterea porilor în peliculele anodice de oxizi;

- prin prezența plasmei se explică polimerizarea rapidă a fazei oxidului, caracterul eterogen a oxidului anodic după grosimea (îngustare lângă metal), orientarea poliionilor normal la suprafața metalului;

- adaosuri în electrolit, care fac oxid netransparent, stâng luminescența - ca în cazul în care ea se realizează sub pelicula de oxid.

Procesul microoxidării suprafețelor în mediu electrolitic prin descărcări electrice în arc, se petrece după un mecanism complicat și poate fi împărțit în mai multe etape care se desfășoară în serie sau în paralel:

1 – interacțiunea chimică a substratului și stratului superficial cu electrolit;

2 – procesele electrochimice, care au loc înainte de amorsare a descărcării electrice și în locuri în care o descărcare electrică la moment nu există (anodizare în soluții apoase a electroliților, electroliză);

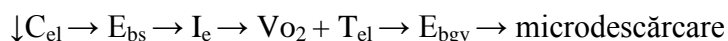
3 - de fapt microoxidarea suprafețelor prin descărcări electrice în arc, care include etapele inițiale ale luminescenței și scânteierii; etapa principală de ardere a microdescărcărilor electrice, și în cele din urmă, după formarea stratului de o anumită grosime, trecerea microdescărcării electrice la descărcarea în arc.

Se consideră că o condiție necesară pentru amorsarea descărcării electrice în electrolit este prezența stratului de gaz sau de vapori între electrolit și metalul prelucrat [2, 4, 17, 18, 39, 42] Descărcarea la microoxidarea suprafețelor în mediu electrolitic prin descărcări electrice în arc este gazoasă și apare în rezultatul străpungerii “dopurilor” gazoase, care se formează în micropori stratului de barieră a stratului de oxid poros. Aceste dopuri se formează în timpul procesului de electroliză de descărcare de ioni H^+ și/sau OH^- și în efervescența electrolitului în canalele porilor. Astfel, reacțiile principale eterogene apar între gaz ionizat și plasmă, precum și între materialul pereților (fundul microporilor) și electrolitul.

La anodizarea cu descărcări în arc, căderea de tensiune de la catod pînă la oricare punct care se află la anod la distanța mai mică de 0,5 mm, nu depășește 5V și căderea de tensiune totală este concentrată în domeniu îngust dintre anod și așa numit cuazi-catod (fig. 1.12). Se creează o mare tensiune a câmpului electric (cel puțin 10000V/cm), care după anumite fenomene de ionizare creează

descărcare, accelerarea anionilor, bombardarea ionică, multiplicarea purtătorilor impactului de ionizare etc. [16]. Formarea cuazi-catodului în jurul suprafeței anodului duce la polarizarea omogenă a pieselor de formă compusă și obținerea stratului superficial omogen, ceea ce prezintă avantaj pentru tehnologia microoxidării suprafețelor în mediu electrolitic prin descărcări electrice în arc. Mecanismul migrării descărcărilor pe suprafața prelucrată, conform unor autori [4], constă în aceea, că străpungerea are loc în locuri cu rezistența electrică mai mică, mai apoi pelicula crește și străpungerea trece în alt loc cu rezistența mai mică și așa mai departe, pînă cînd tensiunea de străpungere nu atinge valoarea nivelului de formare – atunci descărcare electrică dispare [4]. Conform altor autori, descărcarea activează termic în zona vecină cu el, tensiune de străpungere scade și el trece în acest loc – în așa mod se formează așa numit lanțuri de descărcare [4].

Dinamica dezvoltării descărcării poate fi descrisă după cum urmează. Punctul de pornire poate fi înșărăcirea electrolitului ($\downarrow C_{el}$) în micropori (în deosebi - în apropierea stratului de bariera) pîna la așa un nivel la care permeabilitate electrică a lui este comparabilă cu cea a apei ($\epsilon \sim 80$). Avînd în vedere faptul că permeabilitatea electrică a oxidului anodic este aproximativ 10, o mare parte a intensității cîmpului electric se concentrează pe stratul de barieră (E_{sb}), datorită cărui fapt apare străpungerea electrică cu luminescența și scînteii în sistema metal-oxid-electrolit. Străpungerea electrolitică, la rîndul său duce la creșterea bruscă a părții curentului de electroni (I_e), degajării intensive a oxigenului (VO_2) și creșterii temperaturii a electrolitului (T_{el}) în canale poroase care va promova o vaporare activă. Permeabilitatea electrică a oxigenului și vaporilor de apă este egală aproape cu o unitate, va fi redistribuirea intensității cîmpului electric și o mare parte a ei va fi concentrată în bulă din amestecul gazelor și vaporilor (E_{bgv}), ce în continuare va duce la amorsarea descărcării electrice. Așa dar, ionizarea inițială a interstițiului, are loc prin process de contact-separare în curs de extindere a bulelor de vaporii în pori după schema:



Mărimea inițială a bulei, străpunse după mecanismul lui Townsend, nu poate fi mai mică decît grosimea zonei de cădere a potențialului lîngă catod.

Descărcarea la microoxidarea suprafețelor în mediu electrolitic prin descărcări electrice în arc, în afară de sinteza plasmochimică în canalele porilor, are o influență mare asupra acțiunii termice și hidrodinamice pe catodul electrolitic, stratul superficial din oxizi și substrat metalic (materialul piesei prelucrate). Acțiunea plasmochimică a descărcării se exprimă prin apariția radicalilor, ionilor metastabili, excitarea moleculelor și creșterea temperaturii oscilatoare, ce duce la „dezghețarea” stadiilor de limită în lanțurile reacțiilor chimice și a creșterii constantelor. Apare posibilitatea reală de sinteză a diferitor oxizi și a compușilor lor cu diferite metale în soluții aluminatate, wolframate, solutii silicate și altele [4].

Cu toate acestea, cea mai mare influență are acțiunea termică - termoliza compușilor chimici, creșterea gradului de hidroliză a componentelor electrolitului, posibilitatea deshidratării termice ulterioară a produselor lui, topirea și retopirea stratului superficial și a substratelor lui, redistribuirea compoziției elementare, formarea fazelor (formarea spinelilor, aluminosilicațiilor, transformări polimorfice de fază), și formarea structurilor (recristalizare, etc.). Acțiunea termică asupra electrodului electrolitic se determină în primul rând prin aceea că gradul de termoliză a apei – solventului care decurge conform reacției $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$, depinde în mare măsură de temperatură (0,034 % - pentru 1015 °C și 8,6 % - pentru 2215 °C).

În al doilea rând, acțiunea termică poate influența asupra altor componente a electrolitului provocând hidroliza lor, gradul căruia crește brusc cu creșterea temperaturii, iar concentrația lui din strat pe lângă electrozi din cauza evaporării apei se mărește [4].

În general, microoxidarea suprafețelor în mediu electrolitic prin descărcări electrice în arc, prezintă un proces complex, caracteristicile căruia depind atât de factori exteriori (de componență, de concentrare, de pH-ul și temperatura electrolitului, de regimurile de lucru) cât și de factori interiori (componența aliajului, tratarea termică, rugozitatea etc). Acești factori determină grosimea straturilor superfeciale, structura și componența lor, densitatea și porozitatea, microduratea, proprietățile electrice și altele [4].

Către neajunsuri poate fi inclus faptul că utilizarea electroliților în baza diferitor compuși chimici provoacă poluarea mediului ambiant prin procesul de vaporizare și răspândire a acestora, și aceea că, cu metoda dată, se prelucrează în general metalele de grupă de ventil (aliajele aluminiului, titanului, niobiului și altele) [4].

1.3. Oxidarea superficială a materialelor conductibile prin intermediul arcului electric

Arcul electric este o descărcare electrică stabilă în mediul gazos, la o tensiune relativ joasă, densități de curent mari și un interstițiu mic. Descărcarea este însoțită de degajarea unei mari cantități de căldură și lumină. Această căldură, sursa cărei este arcul electric, se cheltuiește pentru încălzirea și topirea metalului.

Curentul electric poate circula prin gaze numai dacă ele sînt ionizate. Ionizarea gazelor se poate realiza prin mai multe procedee (oxidarea prin arc electric se realizează printr-un bombardament cu electroni care se obțin de la unul din cei doi electrozi, prin emisie termoelectronică). În metal există electroni liberi, însă aceștia nu pot ieși din metal decît dacă electronul are o energie suficient de mare, necesară pentru a străbate bariera de potențial de la suprafața metalului. Deci dacă e_0 este sarcina electronului, iar U_{ie} este tensiunea de ieșire, este necesar ca [2, 4, 17, 18, 39, 42]:

$$W > e_0 \cdot U_{ie}. \quad (1.10)$$

Tensiunea de ieșire U_{ie} este o mărime caracteristică pentru fiecare metal sau aliaj. Această energie poate fi obținută prin încălzirea metalului. Deci, încălzind metalul energia electronilor se mărește și în felul acesta unii dintre electroni părăsesc metalul (de obicei cei de pe ultimul strat electronic), formându-se un curent electric. După un timp electronii emiși de metal se grupează în apropierea acestuia. Distribuția electronilor care au părăsit metalul în apropierea suprafeței acestuia, se explică prin faptul că suprafața metalului rămâne încărcată pozitiv și atrage grupul de electroni care au părăsit metalul. Ca urmare a acestor fenomene, emisia termoelectronică încetează. Pentru ca emisia termoelectronică să nu înceteze, este necesar să se creeze un câmp electric extern destul de puternic care să îndepărteze electronii emiși. Pentru aceasta, un alt metal se amplasează în apropierea metalului care emite electroni, conectându-se într-un circuit la o sursă de curent. Metalul care acceptă electroni (anodul) se conectează la polul pozitiv, iar cel care emite electroni (catodul) la polul negativ.

Electronii emiși de metal și accelerați de câmpul electric exterior ciocnesc atomii gazelor, care se excită, iar electronii de pe orbitele atomilor de gaze sînt îndreptați spre orbitele mai apropiate ale nucleelor și absorb energia acumulată la ciocnire. Apoi electronii revin pe orbitele lor degajînd energia absorbită la ciocnire, care este radiată mediului ambiant în spectrul de unde vizibile spre ultraviolet. În această situație atomii provoacă o luminozitate puternică, iar această stare este nu altceva decît o stare de excitare a lor.

Pentru ca atomii unui gaz să fie excitați este necesar ca tensiunea câmpului electric care provoacă accelerarea unui electron a metalului care emite electroni, să atingă o anumită valoare a tensiunii de excitare U [2, 4, 17, 18, 39, 42].

Atomul de gaz poate deveni ion atunci, cînd electronul metalului, care emite electroni, are o energie înaltă și ca rezultat al ciocnirii cu atomii de gaz să smulgă un electron de pe orbita atomului de gaz avînd loc procesul de ionizare.

Pentru ca să aibă loc ionizarea unui gaz este necesar crearea unei tensiuni a câmpului electric care să accelereze electronul metalului în așa măsură, încît ciocnindu-se cu atomii gazului, să-l ionizeze. Această tensiune U'' este potențialul de ionizare.

Fiecare gaz are tensiunea sa de excitare și de asemenea potențialul său de ionizare. Gradul de ionizare este raportul dintre numărul de atomi ionizați și numărul total de atomi. În spațiul gazos al arcului, ionii se combină cu electronii formînd atomi, adică recombinaîndu-se.

Toate aceste fenomene: excitările, ionizările sau recombinațiile se produc cu o degajare de căldură și cu o mare luminozitate în arc format între anod și catod.

Mecanismul amorsării și formării arcului se poate de analizat luînd în vedere cele expuse mai sus. Între piesă (anod) și electrod (catod) (fără ca electrodul să fie în contact cu piesa) apare tensiunea de acțiune în gol U_0 . Punîndu-se în contact electrodul cu piesa (fig. 1.12, a), prin circuitul format va

trece un curent electric I_{sc} (de scurt-circuit) care datorită rezistenței mari în contact (aerul avînd o mare rezistență electrică), va degaja o cantitate mare de căldură (care va provoca topirea locală) și astfel la îndepărtarea ușoară a electrodului el începe să emită electroni (fig. 1.12, b). În continuare electronii sînt accelerați de curentul exterior ionizînd din ce în ce mai mult gazele dintre electrod și piesa (fig. 1.12, c). Tensiunea și curentul ajungînd la o stare stabilă formează arcul electric [2, 4, 17, 18, 39, 42].

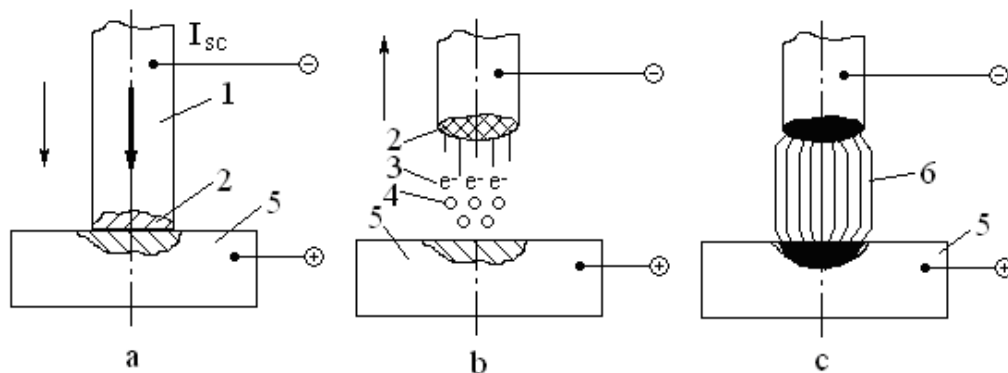


Fig. 1.12. Amorsarea arcului electric [4]:

a – electrodul și piesa se află în contact; b – electrodul și piesa sînt distanțate; c – electrodul îndepărtat de piesă, unde: 1 – electrodul (catodul); 2 – secțiunea transversală a electrodului; 3 – emisie de electroni; 4 – interstițiul de ionizare; 5 – piesa în prelucrare (anodul); 6 – arcul electric

Tensiunea de-a lungul arcului (fig. 1.13) se repartizează în trei zone: catodică, coloana arcului și anodică.

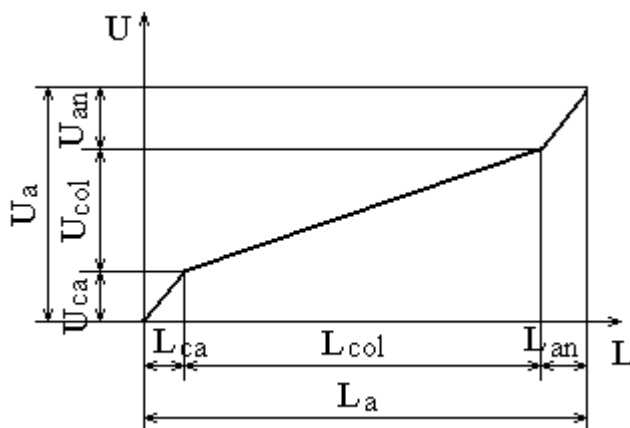


Fig. 1.13. Repartizarea tensiunii pe lungimea arcului [4]

Zona catodică (L_{ca}) este scurtă și în ea se găsesc electronii emiși de catod care pătrund în coloana arcului, precum și ionii care vin din coloana arcului și bombardează catodul. În această zonă se presupune că purtătorii de sarcină nu sînt supuși ciocnirilor.

Porțiunea redusă din suprafața catodului, pe care se concentrează curentul electric, poartă denumirea de pată catodică. Mărimea densității de curent, precum și suprafața petei, depind de intensitatea curentului.

Coloana arcului este o zonă extinsă în care au loc excitări, ionizări și recombinații. În această zonă curentul se datorește atât mișcării electronilor cât și mișcării ionilor, iar coloana arcului provoacă o luminozitate puternică.

Curentul electric, care parcurge coloana arcului, depinde de mai mulți factori și se poate determina cu relația [4]:

$$I_{prel} = \frac{d_{col}^2 \cdot e_0 \cdot U_{col}}{4 \cdot L_{col}} \cdot n \cdot x_0 \cdot D, \quad (1.11)$$

unde: d_{col} – este diametrul coloanei arcului; e_0 – sarcina electronului; U_{col} – tensiunea din coloana arcului; n – numărul total de atomi; x_0 – gradul de ionizare al amestecului de gaze; D – o constantă care depinde de masa purtătorilor de sarcină, de viteza medie determinată de agitația termică, de drumul liber mijlociu al purtătorilor de sarcină; L_{col} – lungimea coloanei arcului.

Din relația de mai jos [4] rezultă că temperatura coloanei arcului T depinde numai de tensiunea de ionizare a amestecului gazos:

$$T = 810 \cdot U'' \quad (1.12)$$

Zona anodică are o grosime mică, aproximativ egală cu cea catodică. În această zonă electronii din coloana arcului pătrund în metal, cedându-i anodului energia lor. Din măsurările efectuate preventiv rezultă că tensiunea anodică variază puțin. Dat fiind faptul că în zona anodului nu se consumă energie pentru emiterea electronilor, temperatura este mai mare decât cea din zona catodului. S-a constatat de asemenea că densitatea de curent, la pata anodică (spre deosebire de pata catodică) variază puțin față de densitatea curentului din interstițiu.

Caracteristica arcului electric este definită prin relațiile dintre intensitatea curentului I_{prel} , U_a și L_a . Parametrii arcului electric determină comportarea lui la prelucrare.

Pentru determinarea caracteristicii arcului nu există o relație matematică generală, sînt cunoscute numai expresii matematice empirice, formulate de diverși autori. Astfel Seferian [4] a propus următoarea relație pentru a determina caracteristica arcului:

$$U_a = a + c \cdot \frac{L_a}{I_{prel}} \quad (1.13)$$

Valorile coeficienților a și c au fost determinate experimental, așa ca exemplu pentru electrozii din oțel $a = 11$ V și $c = 5500$ V·A/cm [2, 4, 17, 18, 39, 42].

Natura coloanei și presiunea mediului înconjurător influențează puternic caracteristicile termice ale arcului. Se deosebesc două tipuri de arce în funcție de natura mediului gazos din coloana arcului: arcul în mediul de vapori, ca cel obținut la prelucrarea oțelului (în acest caz partea principală a gazului coloanei este formată din vapori ai Fe); arcul în mediul gazului de argon (gaz monoatomic) cu electrozi de W. Se știe că, cu cât este mai mare presiunea mediului înconjurător, cu atât este mai mare și temperatura coloanei.

Căldura dezvoltată de arcul electric este descrisă cu relația [4]:

$$Q = U_a \cdot I_{prel} \cdot t \text{ [J]}, \quad (1.14)$$

în care t este timpul de existență a arcului electric.

Sursele termice utilizate la oxidarea cu arc electric se caracterizează prin puterea termică și o anumită repartizare spațială a fluxului termic generat de sursă.

Puterea P a sursei se calculează cu relația [4]:

$$P = 0,24 \cdot \eta \cdot U_a \cdot I_{prel} \quad (1.15)$$

unde: U_a este tensiunea arcului, V; I_{prel} - intensitatea curentului de prelucrare, A; η - randamentul termic al arcului electric.

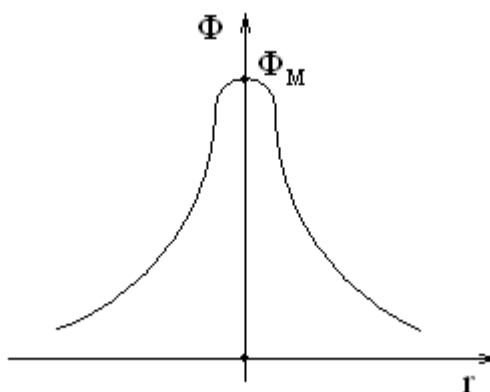


Fig. 1.14. Distribuția fluxului termic ale surselor normale

Repartizarea spațială a fluxului termic în cazul oxidării cu arc electric este simetrică în raport cu axa arcului (fig. 1.14) și poate fi exprimat cu relația [4]:

$$\Phi = \Phi_M e^{-k \cdot r^2}, \quad (1.16)$$

unde: Φ_M este fluxul maxim, r – distanța de la punctul considerat pe axa sursei, iar k – coeficientul de concentrare al fluxului termic.

Puterea P a sursei și fluxul maxim Φ_M corelează între ele prin relația [4]:

$$P = \frac{\pi}{k} \Phi_M \quad (1.17)$$

Fluxul maxim Φ_M și coeficientul de concentrare depinde de regimul de prelucrare. Astfel la prelucrarea oțelului la un curent de $I_{prel} = 550$ A, o tensiune a arcului de 37,5 V și o viteză de prelucrare de 12 cm/s, $k = 1,32 \text{ cm}^{-2}$, fluxul maxim atinge o valoare de $\Phi_M = 4,17 \text{ kJ}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ [4, 18, 19].

În cercetarea proceselor termoelectrice, care decurg pe suprafața catodului pot fi luați în vizor următorii parametri de intrare [2, 4, 17, 18, 39, 42]: materialul catodului, caracterizat de conductibilitatea termică λ , constanta lui Richardson A , lucrul de ieșire ϕ , gradul de murdărire a suprafeței catodului ϵ ; gazul în care are loc amorsarea arcului, caracterizat prin potențialul de ionizare

V_i , greutatea atomică și presiunea p ; curentul în arc I . Parametrii înregistrați la ieșire pot fi: lucrul efectiv de ieșire φ_{ef} , fluxul termic îndreptat spre catod Φ , intensitatea câmpului electric pe suprafața catodului E , densitatea de curent de emisie j_e și temperatura pe suprafața catodului T .

Cunoscînd curentul în arc putem determina densitatea lui [2, 4, 17, 18, 39, 42]:

$$j_e = \frac{I}{\pi r^2}, \quad (1.18)$$

unde r este raza petei catodice a arcului, m .

În conformitate cu legea lui Richardson, referitor la termoemisie, densitatea de curent de emisie în funcție de temperatură se poate exprima prin relația [2, 4, 17, 18, 39, 42]:

$$j_e = AT^2 \exp\left(-\frac{e\varphi - \sqrt{eE}}{kT}\right), \quad (1.19)$$

unde j_e este densitatea curentului de emisie, A/m^2 ; T – temperatura metalului, K ; A – constanta lui Richardson, $A \cdot m^{-2} \cdot K^{-2}$; φ – lucrul efectiv de ieșire, eV ; \sqrt{eE} – micșorarea lucrului efectiv din cauza influenței câmpului electric (corijarea lui Șottki), eV ; k – constanta lui Bolzman, J/K .

Fluxul termic îndreptat spre catod poate fi apreciat prin relația [4]:

$$\Phi = \frac{4\lambda}{\pi r} (T - T_0), \quad (1.20)$$

unde λ este conductibilitatea termică a materialului catodului; T_0 – temperatura mediului înconjurător la distanța infinit de mare.

Așa dar, manevrînd cu tensiunea arcului electric, curentul și viteza de prelucrare se poate de stabilit condițiile optime energetice pentru oxidarea suprafețelor. Eficiența procesului de oxidare a suprafețelor, în acest caz, va depinde de stabilitatea arcului. Încălzirea trebuie să fie uniformă în toate direcțiile suprafeței care se prelucrează, pentru ca să obținem pelicule de o grosime și componență chimică constantă. Grosimea stratului obținut depinde de mărimea fluxului termic direcționat spre piesă, lungimea arcului și timpul de interacțiune a piesei cu arcul electric (numărul de treceri).

1.4. Oxidarea superficială cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls

Mai puțin cunoscută în prezent este metoda formării peliculelor de oxizi cu aplicarea *descărcărilor electrice în impuls* [16, 70, 79, 113-117]. Ea se bazează pe interacțiunea dintre canalul de plasmă al DEI cu suprafața piesei prelucrate prin intermediul petelor electrodice de tipul I, adică a petelor electrodice „reci”. Formarea canalului de plasmă are loc dintre electrozi, unul dintre care reprezintă materialul prelucrat.

Este cunoscut că plasma reprezintă un gaz înalt ionizat. Plasma se caracterizează prin temperaturi și densități de sarcini înalte. Obținerea plasmei se poate de realizat prin diferite metode:

în plasmatroane speciale la descărcarea electrică, în urma arderii unui gaz la încălzirea metalului cu flacără ș.a.

Amorsarea și dezvoltarea canalului de plasmă în interstițiu la DEI în condiții normale. Este cunoscut faptul că, tensiunea de amorsare în funcție de mărimea interstițiului S și presiunea gazelor p se descrie cu relația lui Pașen [16, 79], care poate fi interpretată în baza teoriei de străpungere a lui Taundsen. În conformitate cu această lege tensiunea minimală de amorsare în aer, la presiune normală, în funcție de materialul electrozilor, constituie aproximativ 250...300V. În același timp pentru cazul formării depunerilor din materiale compacte cu rupere de contact diapazonul tensiunilor utilizate constituie 15...200V, ceea ce este inferior minimumului curbei lui Pașen.

Astfel, rezultatele cercetărilor mai multor autori [16, 79] demonstrează că, la tensiunea de amorsare de 100...200V, mărimea interstițiului poate atinge valorile de 5...10 μm .

Conform [15, 16, 79] străpungerea interstițiului la prelucrările prin electroeroziune în condițiile când tensiunea de amorsare constituie $U_{am} \leq 300V$, nu poate fi lămurită în baza avalanșei de ionizare din două motive: lipsa tensiunii necesare în interstițiu (pentru accelerarea electronilor care ar supune ionizarea moleculelor și atomilor la ciocnire) și insuficiența numărului necesar de ciocniri a electronilor cu moleculele și atomii din interstițiu.

Analizând amorsarea descărcărilor electrice din contul curentului de autoemisie, autorii [15, 16, 70] menționează că, în acest caz este necesar a lua în considerație acțiunea pondemotoră a câmpului electrostatic, care poate provoca tensiuni mecanice considerabile iar acestea pot depăși limita de rezistență a materialului electrozilor. De exemplu, pentru tensiunea de străpungere a interstițiului, tensiunea mecanică pe suprafețele electrozilor (calculată cu relația [16]: $\tau = \frac{E^2}{8\pi}$), constituie cca 450 MPa.

În cazul utilizării DEI în regim de subexcitare este semnificativ faptul că, asupra interstițiului se aplică un impuls de putere mică, dar tensiunea înaltă (12...24 kV) care este responsabilă de formarea canalului de conductibilitate prin care apoi se degajă energia acumulată pe bateria de condensatoare a generatorului de impulsuri. Acest tip de impulsuri se aplică și în cazul formării straturilor de depunere din pulberi metalice [16, 79]. Pentru formarea straturilor de depunere din pulberi metalice, acestea sunt introduse în interstițiu în zona anodică [16, 79] pentru a le asigura o durată de timp mai mare pentru interacțiunea cu canalul de plasmă al DEI.

Rezultatele experimentale ale interacțiunii plasmei DEI cu suprafața catodului. Oxidarea superficială cu plasmă este însoțită de o gamă largă de schimbări structurale și de fază [5-11, 13-16, 79]. Transformările de fază sunt condiționate de apariția fazei lichide și a vaporilor particulelor depuse ce interacționează cu canalul descărcării, mediul înconjurător, materialul catodului și cu procesele transferului de masă în faza lichidă și solidă. După cum s-a accentuat anterior, datorită

proceselor electroeroziunii, materialul catodului poate fi în starea “lichid-vapori” și să interacționeze cu mediul înconjurător, de aceea, de obicei, în stratul format din pulberi, în afară de oxizi, nitrurile și componentele sale intermetalice, pot intra materialul catodului și, respectiv, celelalte faze ale acestuia [7, 16, 79]. Aceste condiții au fost realizate la cercetările Roentgen a componentei fazice a straturilor superficiale pentru oțeluri (oțel 3, oțel 45) și titan (BT 1-0) [16, 79]. Interacțiunea plasmei s-a obținut în regimul prelucrării continue (fără includerea pulberii în zona prelucrării) când zonele de interacțiune s-au suprapus parțial sau multiplu (s-a variat numărul de treceri i pe una și aceeași porțiune de suprafață) [16, 79]. “Electrodul-anod” sub formă cilindrică a fost confecționat din grafit [16, 79]. Valoarea interstițiului a variat în intervalul $0,15 \div 2$ mm, iar ceilalți parametri au avut valorile: $U_c = 240$ V și $f = 40$ Hz [16, 79]. Analiza schimbării componentei fazice a suprafețelor prelucrate (oțel 45, titan BT 1-0) a demonstrat că rolul de bază în aceste schimbări îi revine nu numai încălzirii și răcirii accelerate, dar și interacțiunii acestora cu mediul înconjurător în timpul prelucrării [16, 79]. Intensitatea acestor schimbări depinde de proprietățile materialului și condițiile de prelucrare, precum și de mărimea interstițiului (care în timpul experiențelor a variat, iar energia degajată în interstițiu W a fost constantă) [16, 79]. La prelucrarea titanului, pe suprafața lui au fost depistate, practic, toate fazele care sunt posibile la interacțiunea lui cu oxigenul și azotul din aer (fig. 1.15, a) [16, 79]. Oxizii (TiO , Ti_2O) și nitrura de titan (TiN) se formează mai intensiv pentru interstițiu $S < 1$ mm. Pentru valori mai mari ale interstițiului ($S \approx 2$ mm) au fost înregistrate numai urme de TiO și TiN ([79], fig. 20). La acțiunea multiplă a plasmei, chiar și pentru valori mari ale interstițiului pe suprafața titanului se formează aceeași componentă fazică ([79], fig. 18), adică pe suprafață apar din nou TiO , TiO_2 , TiN . În această privință mai puțin activ se prezintă oțelul și sporirea timpului de prelucrare (din contul numărului de treceri n) schimbă componenta fazică neesențial (fig. 1.15, b) [16, 79]. După acțiunea plasmei la descărcări pe suprafața oțelurilor, împreună cu liniile caracteristice pentru faza ferită, apar și linii corespunzătoare fazei austenită. Cantitatea maximă de austenită se obține pentru $S \leq 0,5$ mm, adică atunci când suprafața atacată este, practic, acoperită de lichidul materialului probei. O parte din liniile difractogramelor pot fi identificate ca linii caracteristice pentru carbura (Fe_3C) și nitrurile fierului (Fe_3N-Fe_4N) (vezi fig. 1.16) [16, 79].

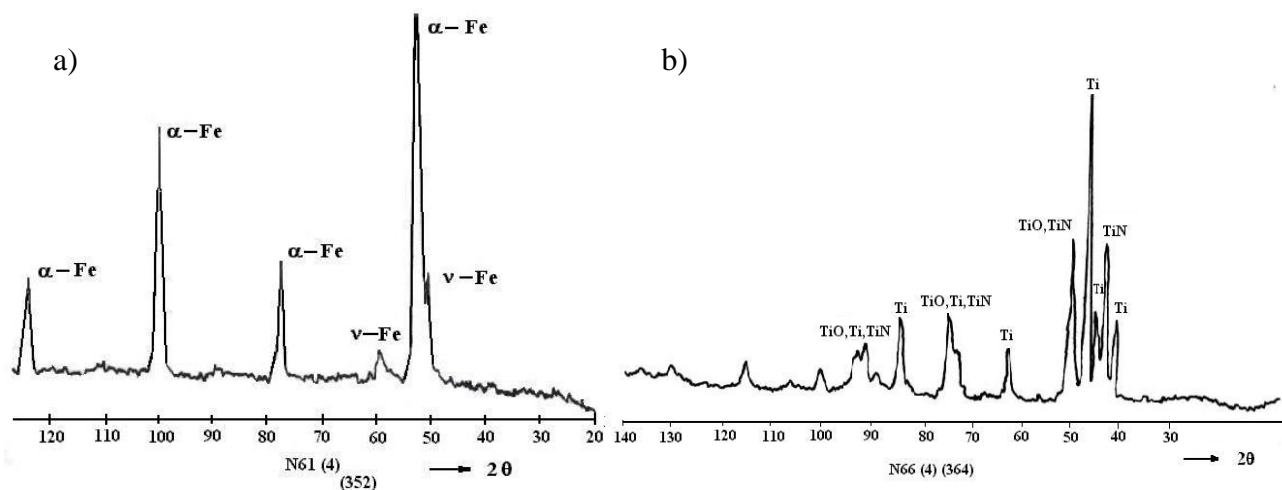


Fig. 1.15. Roentghenograma oțelului 45 (a) și titanului BT-1-0 (b) tratat superficial în regimul petelor electrodice „reci” [16, 79]

Prezența liniilor austenitei și cementitei la prelucrarea oțelului 3 este determinată de transferul prin interstițiu a materialului anodului (grafit) pe suprafața catodului. Lipsa oxizilor pentru regimurile cercetate, conform metodei Roentgen, la o primă apreciere (în condiții normale) confirmă ipoteza că petele mai „reci” ard oxizii și impurificările stratului superficial [10-12, 16, 79], adică canalul descărcării „migreză” în principiu pe aceste defecte ale suprafeței, care în final condiționează înlăturarea lor prin vaporizare (aceasta este valabil pentru treceri unitare). Datorită acestui fenomen se lămurește procesul tehnologic de curățare a suprafețelor de oțel cu descărcări-arc în vid [12].

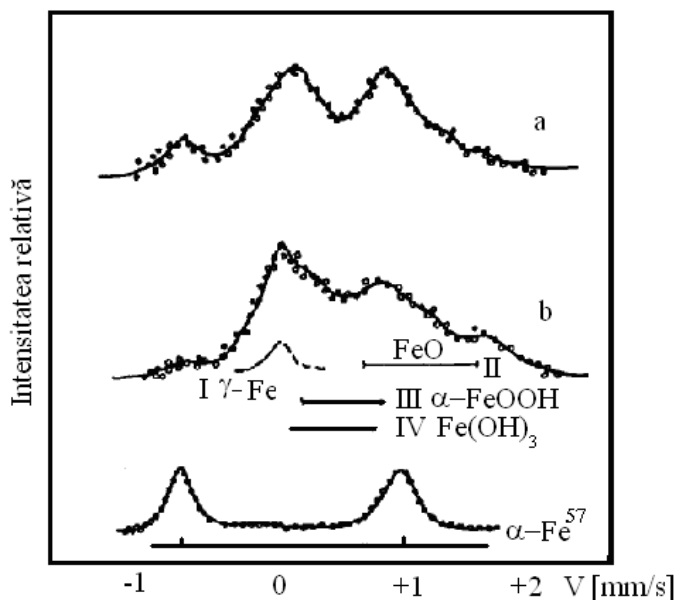


Fig. 1.16. Spectrele Mössbauer a probelor din oțel St. 3 după prelucrare cu scînteii: S=2 mm (a); S=0,5 mm (b) [13, 16, 79]

Cercetările detaliate [13] ale suprafețelor prelucrate prin analiza spectrelor Mössbauer a probelor din oțel (fig. 1.16) au scos la evidență ambele spectre și reprezintă o superpoziție evazivă a dubletelor de oxizi și hidroxizi ai fierului și confirmă prezența fazei γ -Fe pentru $S=0,5$ mm. Distribuția fierului, oxigenului, carbonului și azotului sunt prezentate în figura 1.17, a, din care se observă că carbonul se concentrează în deosebi la suprafață.

Concentrația carbonului scade brusc odată cu mărirea adâncimii stratului superficial, iar concentrația oxigenului atinge valoarea de 30% at. [13, 16, 79]. Această concentrație sporită a oxigenului se datorează formării hidroxizilor în stratul superficial al probei. La o adâncime a stratului de până la 300 nm, concentrația azotului atinge valoarea de până la 5 – 6 % at. (fig. 1.17) [13, 16, 79].

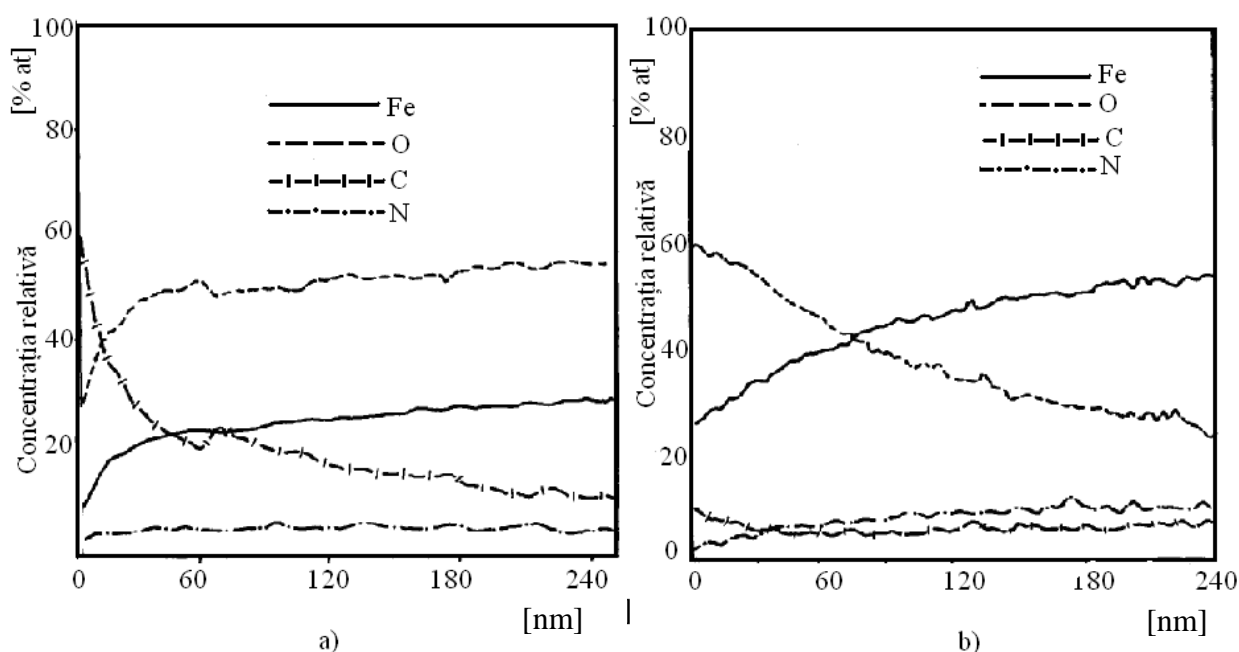


Fig. 1.17. Distribuția elementelor în oțel St. 3 după prelucrare cu DEI, pentru: $S=0,5$ mm (a); $S=2$ mm (b); 1 – Fe; 2 – O; 3 – C; 4 – N [13, 16, 79]

Pentru interstițiul de $S=2$ mm, componentele de bază ale stratului superficial îl constituie fierul și oxigenul, iar cele secundare – sunt, respectiv, carbonul și azotul (fig. 1.17, b) [13, 16, 79]. Concentrația oxigenului atinge la suprafață 60% at. și scade mult în adâncimea probei, care poate fi explicată prin faptul că la suprafață se formează hidroxizi, iar la adâncime – oxizi metastabili. Din roentgenogramele obținute se observă că la suprafața probei lipsește FeO (unicul oxid de fier paramagnetic la temperatura de cameră).

Deci se poate admite metastabilitatea unor straturi foarte subțiri de Fe_2O_3 și Fe_3O_4 , fapt care e bine cunoscut în bibliografia de specialitate [14]. Nu este exclusă și posibilitatea formării hidroxizilor

de fier în stare amorfă [14]. Complexitatea spectrelor Mössbauer ne demonstrează că identificarea univocă a hidroxizilor amorfi este foarte dificilă.

Componența fazică a straturilor superficiale de titan și oțel după înlăturarea prin rectificare a unui strat cu grosimea de 5...10 μm se schimbă neesențial: pe titan se micșorează cantitatea de oxizi, iar pe oțel – cea de nitruri. Schimbarea regimului energetic nu provoacă schimbări esențiale calitative, ci au loc numai schimbări cantitative (pentru S – const) [13, 16, 79].

Așa dar, studierea difractogramelor a demonstrat că dintre elementele regimurilor de prelucrare, cele mai importante ce influențează asupra componentei fazice a suprafeței sunt: valoarea interstițiului și, respectiv, timpul de interacțiune cu plasma (numărul de treceri).

1.5. Concluzii la capitolul I

Analizând metodele aplicate în scopul oxidării suprafețelor metalice și rezultatele științifice înregistrate de cercetători la nivel internațional putem concluda că:

- oxidarea superficială a materialelor conductibile cu aplicarea arcului electric în scopul formării peliculelor de oxizi este inefficientă și necesită cheltuieli mari de energie (pentru ionizarea gazului, radiații termice și de lumină);
- în cazul oxidării suprafețelor prin metoda plasmă electrolitice sunt necesare medii speciale (electrolizii de diferite tipuri) disocierea cărora necesită cheltuieli suplimentare de energie, mediile de lucru sunt agresive, vaporizarea acestora provoacă coroziunea dispozitivelor și utilajelor de lucru, are loc impurificarea mediului ambiant cu elemente nocive;
- aplicarea DEI la oxidarea suprafețelor este simplu de realizat, materialele supuse prelucrării pot fi conductoare (metalele) și semiconductoare, grosimea stratului oxidat este de ordinul nanometrelor, mediul ambiant nu este impurificat, însă aplicarea metodei este puțin studiată la moment.

II. METODELE GENERALE ȘI ORIGINALE DE CERCETARE

2.1. Materialul, geometria probelor și schemele tehnologice de prelucrare

În calitate de materiale pentru probe de cercetare au fost alese aliajele fierului (oțel St. 3, oțel 45), aliajele titanului (BT-8, BT 1-0), aliajul aluminiului (Д16) și aliajele cuprului (M0, alamă Л63, bronz БрА5). Conținutul chimic al materialelor [101] este prezentat în tab. 2.1. Pentru evitarea influenței elementelor ce intră în componența materialului electrodului-sculă și care pot pătrunde în suprafața probei în procesul formării peliculelor de oxizi sub acțiunea DEI, electrodul-sculă a fost confecționat din același material ca și piesa supusă prelucrării.

Tabelul 2.1

Conținutul chimic al materialelor pentru probe de cercetare

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

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

Suprafețele active ale probelor supuse prelucrării au fost șlefuite cu hîrtie abrazivă de Șmirghel (3-0) și lustruite cu pasta Goya pînă la luciul de oglindă. Pentru prepararea suprafețelor

plane, probele au fost fixate în dispozitiv special de fixare și prelucrate pe o suprafață de sticlă, pentru ca în procesul prelucrării prin DEI suprafețele opuse ale electrozilor să fie paralele între ele.

Schemele tehnologice utilizate la formarea peliculelor de oxizi cu aplicarea DEI sînt prezentate în fig. 2.1. Piesa supusă prelucrării era conectată în circuitul de descărcare în calitate de catod, iar electrodul-sculă – în calitate de anod.

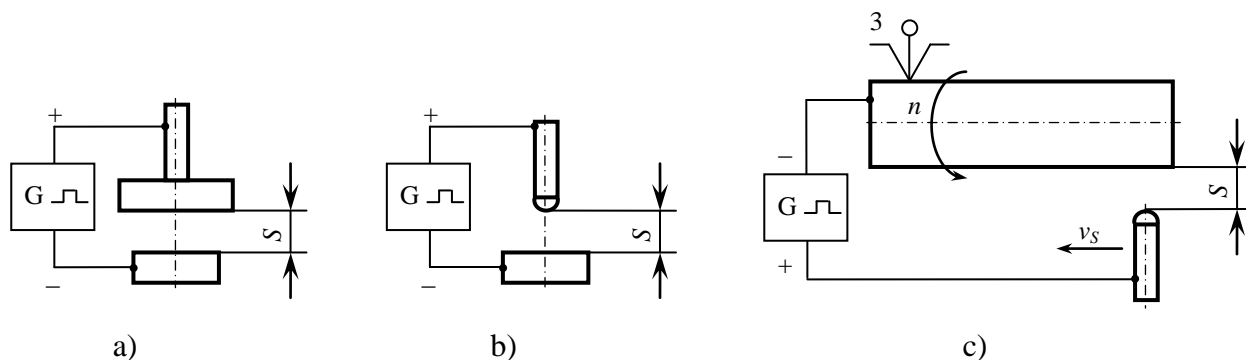


Fig. 2.1. Scheme tehnologice de formare a peliculelor de oxizi cu aplicarea DEI: a) pe suprafața plană cu electrodul-sculă plan; b) pe suprafața plană cu electrodul semirotund; c) pe suprafețe cilindrice exterioare

2.2. Instalația experimentală a generatorului de impulsuri de curent

Generatorul pentru formarea peliculelor de oxizi pe suprafețele metalice ale pieselor cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls cuprinde următoarele blocuri electrice: generatorul de impulsuri de putere, blocul de amorsare (destinat pentru inițierea descărcărilor electrice) și blocul de comandă, rolul căruia este de a sincroniza impulsurile de putere și amorsare.

În rezultatul analizei bibliografice de specialitate [5-16, 49-70, 79] s-a ajuns la concluzia că, pentru micro- și nanooxidarea suprafețelor pieselor conductoare, cu succes pot fi utilizate generatoare de tipul RC cu amorsare paralelă.

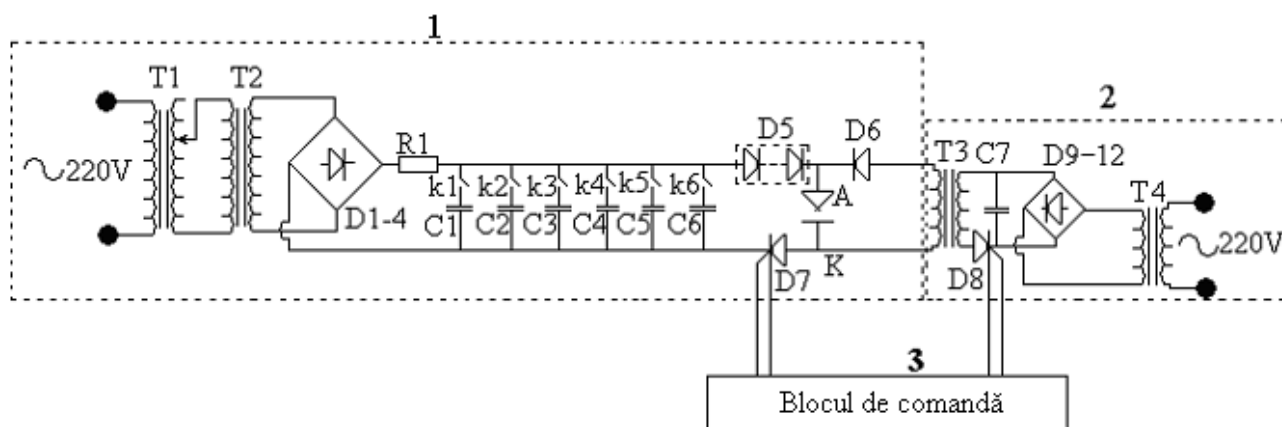


Fig. 2.2. Schema electrică principală a generatorului de impulsuri destinat formării peliculelor de oxizi: 1 – generatorul de impulsuri de putere; 2 – blocul de amorsare; 3 – blocul de comandă

În figura 2.2 este prezentată schema electrică a generatorului menit pentru modificarea compoziției chimice a suprafețelor pieselor conductoare de electricitate sub acțiunea DEI.

Generatorul de impulsuri de putere este compus din autotransformatorul (T1), transformatorul de putere (T2), redresorul (D1-4), rezistența de balast (R1), bateria de condensatoare (C1- C6), întrerupătoarele (k1-k6), blocul de diode (D5) și tiristorul (D7). Blocul de amorsare conține următoarele elemente: transformatorul (T4), redresorul (D9-12), condensatorul (C7), tiristorul (D8) și transformatorul de tensiune înaltă (T3). Blocul de comandă permite de a efectua nu numai sincronizarea impulsurilor, dar și modificarea frecvenței de lucru a generatorului.

Principiul de funcționare a generatorului, schema electrică a căruia este prezentată în figura 2.2, se bazează pe acumularea unei cantități de energie electrică pe bateria de condensatoare și descărcarea ei într-un impuls de durată scurtă ($\tau = 50-220 \mu s$). De la o sursă de curent continuu, care este formată din autotransformatorul T1, transformatorul de putere T2 și redresorul D1-4 sunt alimentate, prin impedanța de încărcare R1 și capacitățile C1-C6. Autotransformatorul T1 permite reglarea fină a tensiunii de lucru și alimentează generatorul de impulsuri. Blocul de diode D5 este destinat pentru protejarea generatorului de pătrunderea tensiunii înalte în acesta. Rezistența R1 are funcția de limitare a curentului de încărcare, ceea ce împiedică transformarea DEI în descărcarea prin arc electric.

În procesul de funcționare a instalației are loc încărcarea simultană a bateriei de condensatoare C1-C6 și a condensatorului C7. Blocul de comandă emite un semnal care provoacă deschiderea tiristorului D8. Datorită acestui fapt, condensatorul 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.

Datorită tensiunii înalte, are loc străpungerea interstițiului și formarea canalului de conductibilitate. Concomitent, blocul de comandă emite un alt semnal, care provoacă deschiderea tiristorului D7 și descărcarea bateriei de condensatoare C1-C6, cu formarea impulsului de bază. În continuare acest proces se repetă din nou.

Durata dintre momentele de deschidere a tiristorului D7 și tiristorului D8 este foarte mică și poate fi reglată în limite largi, datorită blocului de comandă.

În calitate de bloc de comandă poate fi folosit generatorul de impulsuri standarde $\Gamma 5-60$, care permite atât modificarea frecvenței de lucru, cât și sincronizarea impulsurilor de putere și de amorsare.

2.3. Metodica realizării straturilor de oxizi

Cercetările privind interacțiunea canalului de plasmă al DEI cu suprafețele electrozilor au demonstrat, că 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 impuritățile de pe ele [16, 70, 79] și provoacă atât curățarea suprafețelor de impurități, cât și interacționează termic cu acestea, provocând schimbări structurale în straturile superficiale de grosimi mici (de ordinul micrometrilor); tipul II – pe suprafețele electrozilor după petele electrodice “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 [16, 70, 79]. Dacă tipul II de interacțiune a canalului de plasmă cu suprafețele electrozilor și-a găsit o aplicare destul de largă la prelucrările dimensionale [20-23, 83-93] și celei de formare a straturilor de depunere (atât din materiale compacte [5-15, 73], cât și din pulberi [16, 70, 79, 81]), atunci acțiunile de tipul I sunt descrise în literatura de specialitate numai ca niște constatări științifice și din acest motiv este necesară elucidarea condițiilor și efectelor de tratare termică superficială și a scoate la iveală dacă acest tip de interacțiune este pur termic, sau este o interacțiune termo-chimică.

Analizând rezultatele obținute de către autorul lucrării [79] a fost stabilit, că pentru a obține pe suprafețele pieselor o interacțiune de tipul I cu canalul de plasmă este necesar ca densitatea de energie pe suprafața prelucrată să fie mai mică decât căldura specifică de topire a materialului și aceasta din urmă poate fi apreciată cu relația [16, 70, 79]:

$$Q < \frac{4W}{\pi d_c^2 \cdot S}, \quad (2.1)$$

$$Q = q\rho,$$

unde: q și ρ sînt respectiv căldura specifică de topire și, respectiv, densitatea materialului piesei; W – energia degajată în interstițiu, d_c – diametrul canalului de plasmă și S – mărimea interstițiului.

După cum se observă din relația (2.1), în cazul cînd se cunoaște regimul energetic de prelucrare, mărimea interstițiului și proprietățile termofizice ale materialului piesei poate fi determinat diametrul canalului de plasmă, care coincide după dimensiuni cu cel al amprentei acestuia pe suprafața prelucrată. Dacă se numește un coeficient de suprapunere a amprentelor $k=0,5\dots 1,0$ și frecvența descărcărilor electrice în impuls f , poate fi determinată productivitatea procesului tehnologic cu relația:

$$\eta = \frac{k\pi d_c^2 f}{4} \quad (2.2)$$

În lucrarea [79] a fost demonstrat că, la aplicarea DEI în scopul prelucrărilor superficiale, procesele de eroziune însoțite de topirea și vaporizarea explozivă a materialului electrozilor pentru marea majoritate a metalelor și aliajelor studiate, au loc pentru durate ale impulsurilor de curent cuprinse în limitele 10^{-6} s. Rezultă că pentru a obține efecte scontate este necesar a asigura impulsuri de descărcare de durată relativ mică.

Efectele ce au loc pe suprafețele electrozilor sunt funcție [6, 7, 79] de modul de includere a piesei în circuitul de descărcare (în calitate de anod sau de catod). Aceste deziderate au fost studiate în [79] și s-a stabilit că pentru impulsuri de durată scurtă acestea sînt “catodice”, iar de durată mare acestea sunt “anodice” – deci în cazul tratamentelor termice superficiale piesa se va include în circuit în calitate de catod. În cazul tratării termice a pieselor executate din oțeluri duritatea acestora crește de 2...3 ori, iar pentru cele din titan de 2...5 ori, pentru grosimi ale straturilor formate de la cîteva micrometri pînă la cîteva zeci de micrometri. Adîncimea acestor straturi atinge valoarea maximă la trei treceri pentru oțeluri și la cinci pentru titan și aliajele lui.

Interacțiunea canalului de plasmă cu suprafața electrodului-piesă nu totdeauna poartă un caracter pur termic, ci adesea suprafața piesei este îmbogățită cu elemente ce se conțin în mediul înconjurător și cu cele din conținutul materialului anodului-sculă. Adîncimea de pătrundere [16, 79] a acestor elemente în stratul superficial al piesei este funcție afît de energia impulsului, cît și de mărimea interstițiului și poate fi exprimată cu relația:

$$h = \frac{k W_S}{AS}, \quad (2.3)$$

în care $W_S = \int_0^{\tau} U(t)I(t)dt$ – este energia degajată în interstițiu în decursul unei descărcări; U și I – corepunzător tensiunea pe interstițiu și curentul în el; τ – durata impulsului; A – aria suprafeței atacate la o descărcare; S – mărimea interstițiului; k – o constată ce este funcție de proprietățile termo-fizice ale materialului prelucrat.

Aceste straturi pot fi utilizate în diferite domenii ale construcției de mașini datorită faptului că, unele din ele dispun de o duritate înaltă [69, 70, 125, 128, 141, 144], iar altele de o înaltă rezistență la coroziune [44, 45, 63, 65, 66, 117, 127-130].

Din punct de vedere tehnologic, formarea straturilor de tratare termică a suprafețelor pieselor executate din oțeluri și titan tehnic pur sau aliajele lui [17, 70, 79, 113-117], pot fi realizate în condiții atmosferice obișnuite. În condiții normale pot fi obținute structuri de tipul Fe- γ la prelucrarea suprafețelor pieselor executate din Oțel 45 și compușii chimici (TiN) pentru piesele executate din aliajele titanului, care servesc drept indicatori ai durificării stratului supus prelucrării. Aceste faze au fost depistate prin metoda roentghenografică (vezi fig. 1.15, a și b).

În cazul introducerii în interstițiu a particulelor de pulberi de dimensiuni mici, acestea pot fi topite, vaporizate și transferate pe suprafața prelucrată cu formarea straturilor de grosimi micrometrice, similar cazului bombardării cu ioni. După cum a fost menționat deja, chiar și la durate destul de mici ale DEI, pe suprafața prelucrată a piesei se formează un strat de cca 1 μm de fază lichidă, ceea ce îi asigură stratului de depunere format o aderență bună a materialului pulberii cu cel de bază. Astfel, în cazul formării depunerilor subțiri din pulberi de paladiu sau amestecuri de nichel-crom [79], procedeul permite sporirea rezistenței la coroziune a pieselor de pînă la 100 ori. Aceasta se datorește faptului că în stratul superficial, în afară de intermetalizi, se mai formează oxizi (FeO) și hidrooxizi (FeOOH, Fe(OH)₃) în stare amorfă, dat fiind faptul că fierul este un metal foarte receptiv față de oxigen.

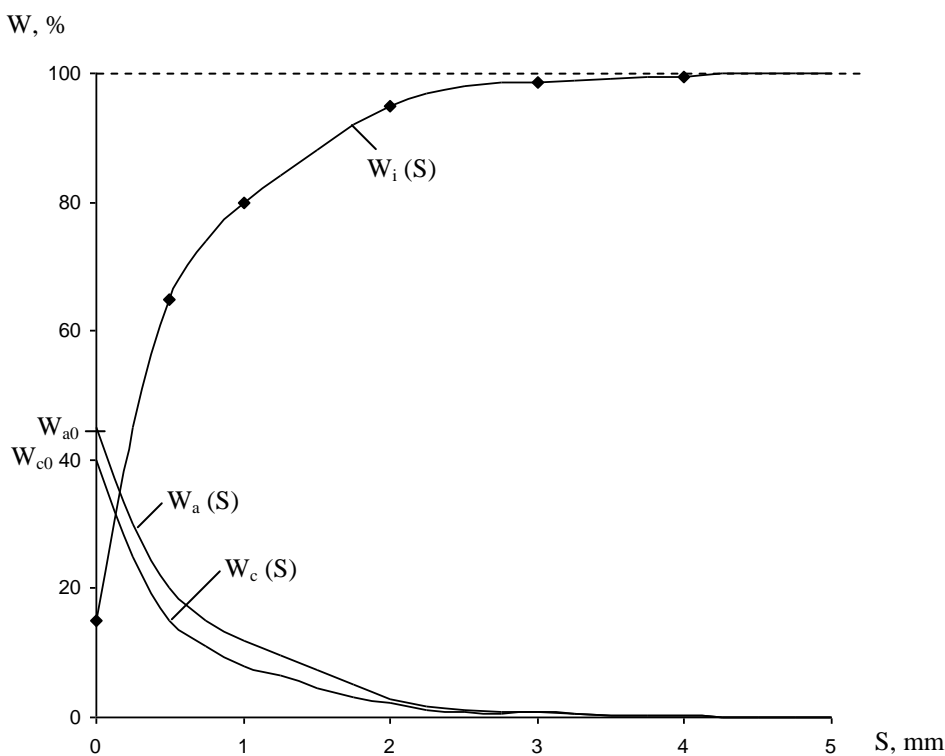


Fig. 2.3. Variația bilanței energetice interstițiale în funcție de mărimea lui S:

W – energia descărcării, W_a, W_c, W_s – cantitățile de energie a descărcării degajate pe anod, catod și, respectiv, în interstițiu

Experimental [79] a fost determinat caracterul degajării energiei pe suprafețele electrozilor la modificarea mărimii interstițiului (S):

$$W_a = \frac{W - W_c}{1 + \Delta\gamma} K_0; \quad W_k = \frac{W - W_a}{K_0 + \Delta\gamma} \Delta\gamma, \quad (2.4)$$

unde $W = W_a + W_c + W_s$; $W = \int_0^{\tau} u(t)i(t)dt$ – energia descărcării; W_a , W_c , W_s – sunt energiile

descărcării electrice în impuls degajate pe anod, catod și, corespunzător, în interstițiu la o descărcare solitară; $u(t)$, $i(t)$ – căderea de tensiune pe interstițiu și, corespunzător, curentul ce circulă la o descărcare solitară; τ – durata impulsului; $\Delta\gamma = \frac{\Delta\gamma_c}{\Delta\gamma_a}$ – uzura relativă a electrozilor; K_0 – coeficient ce depinde de constantele termofizice ale materialelor electrozilor și durata impulsului.

Cantitativ, pentru regimurile de prelucrare realizate, dependența bilanței energetice interstițiale ca funcție de mărimea interstițiului este prezentată în fig. 2.3.

Din fig. 2.3 se observă că odată cu majorarea mărimii interstițiului sporește și raza coloanei de plasmă, care poate fi exprimată prin relația [79]:

$$R \sim S^n, n = 1,6-1,8; \quad (2.5)$$

ceea ce conduce la micșorarea coeficientului de concentrare a sursei de căldură pe suprafețele electrozilor și, respectiv, la micșorarea intensității deteriorării lor prin eroziune.

Schimbarea mărimii interstițiului permite de a obține oricare grad de activare a suprafețelor de lucru cu degajarea energiei pe suprafețele supuse prelucrării. Majorînd mărimea interstițiului se poate de obținut așa stări, cînd încălzirea volumului de material prelucrat este neesențială și geometria suprafețelor probelor nu se modifică. Această posibilitate poate fi aplicată pentru elaborarea unor noi tehnologii de prelucrare a suprafețelor cu aplicarea DEI.

Reieșind din faptul că obținerea peliculelor de oxizi pe suprafețele metalice este posibilă la aplicarea asupra electrozilor a energiilor relativ mici (pînă la 6 J) [113-117], în continuare vom schimba mărimile interstițiului în limitele 1-2 mm.

S-a dovedit experimental [113, 114] că, oxidarea superficială este mai eficientă atunci cînd piesa este conectată în circuitul de descărcare în calitate de catod, deoarece pe suprafața anodului se observă cratere formate la străpungerea dielectricului la interacțiunea lui cu plasma DEI.

Formarea peliculelor anorganice prin utilizarea DEI prezintă un proces complicat care includ în sine procesele de pasivare a metalului (formarea stratului de baliaj de oxizi), străpungerea lui și formarea depunerilor anorganice.

Apariția stării pasive ține de formarea pe suprafața metalului a straturilor monoatomice de oxigen absorbit, hidroxil, straturilor monomoleculare de oxizi sau peliculelor tridimensionale de oxizi. Starea pasivă depinde în marea măsură de natura metalului.

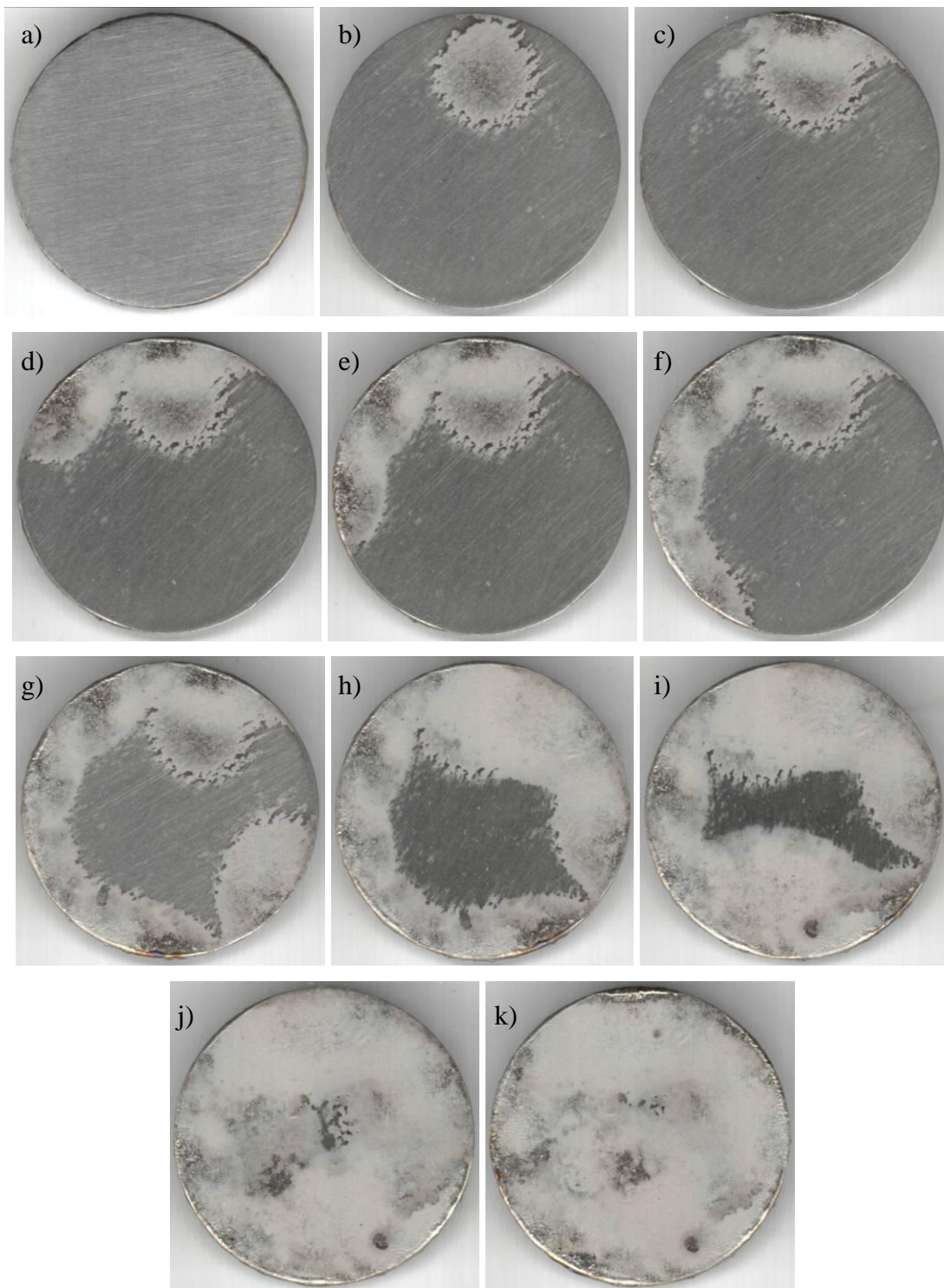


Fig. 2.4. Vederea generală a suprafeței plane prelucrate cu electrodul-sculă plan cu aplicarea DEI, $\times 4$. Regimul energetic de prelucrare: distanța dintre electrozi $S = 2$ mm; tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare $U_c = 240$ V; capacitatea bateriei de condensatoare $C = 600$ μ F; energia degajată în interstițiu $W_S = 5,27$ J; durata impulsului de putere $\tau = 220$ μ s. Numărul de impulsuri, i : a) 0 (suprafața neprelucrată); b) 1; c) 2; d) 3; e) 4; f) 5; g) 10; h) 15; i) 20; j) 25; k) 30.

Materialul piesei și electrodului-sculă – aliajul titanului BT-8

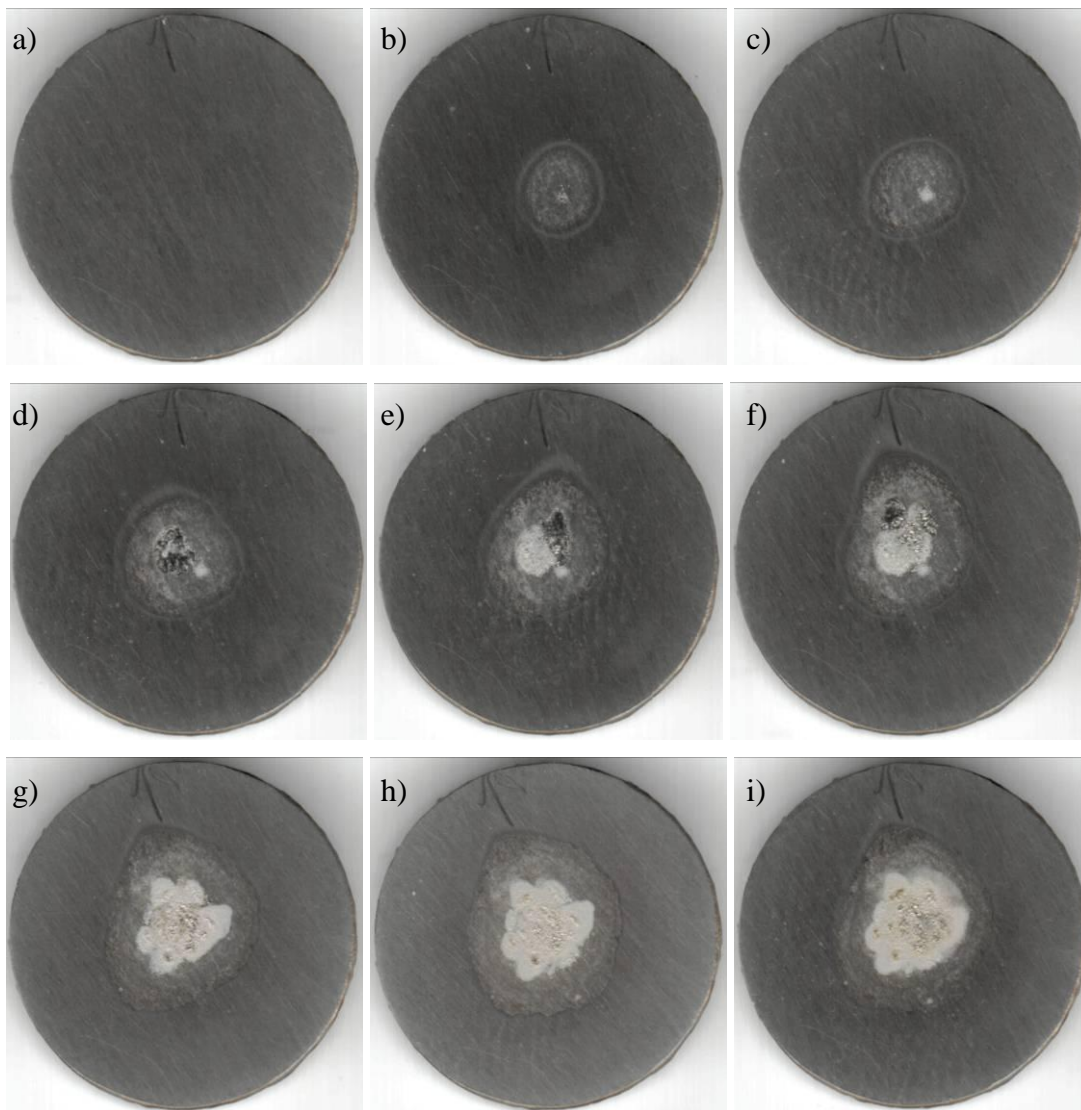


Fig. 2.5. Vederea generală a suprafeței plane prelucrate cu electrodul-sculă semirotund (bară \varnothing 6 mm) cu aplicarea DEI, $\times 4$. Regimul energetic de prelucrare: distanța dintre electrozi $S = 1,5$ mm; tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare $U_c = 140$ V; capacitatea bateriei $C = 600$ μ F; energia degajată în interstițiu $W_S = 3,15$ J; durata impulsului de putere $\tau = 220$ μ s. Numărul de impulsuri, i : a) 0 (suprafața neprelucrată); b) 1; c) 2; d) 3; e) 4; f) 5; g) 10; h) 15; i) 20.

Materialul piesei și electrodului-sculă – aliajul titanului BT-8

Posibilitatea formării peliculelor de oxizi pe suprafețele metalului sunt determinate de conținutul chimic al stratului pasiv și tipul de conductibilitate a lui. În cazul formării peliculelor de oxizi pe suprafețele plane, probele erau fixate în mandrinele opuse ale dispozitivului de stabilire a interstițiului în așa fel ca suprafețele electrozilor erau paralele între ele. A fost stabilită anumită distanță dintre electrozi, anumită capacitate și tensiune de încărcare a bateriei de condensatoare a generatorului de impulsuri. După ce a fost determinat regimul energetic optim (pentru distanța optimă dintre electrozi a fost aleasă tensiunea de încărcare/descărcare a condensatoarelor și capacitatea lor) a fost pus în funcțiune generatorul de impulsuri. Prelucrarea suprafețelor se termina

atunci cînd nu mai apărea descărcarea între electrozi, ceea ce însemna că pe suprafața de prelucrare s-a format stratul continuu pasiv de oxizi. Productivitatea formării peliculelor de oxizi este în funcție de regimul energetic de prelucrare (energia descărcării, distanța dintre electrozi și frecvența impulsurilor), materialul și geometria probelor și mediul de descărcare. În cazul prelucrării suprafețelor plane cu electrodul-sculă plan, confecționate din aliajul titanului BT-8, cu aplicarea DEI în condiții normale, în aer, conform regimului energetic optimal, formarea peliculei de oxizi pe suprafața cu aria de 1 cm^2 se termină după 30 de impulsuri (fig. 2.4).

În cazul folosirii electrodului-sculă sub formă de bară rotunjită la capăt pelicula pe suprafața plană a probei se formează după 20 impulsuri, iar diametrul mediu al peliculei constituie aproximativ diametrul barei plus două distanțe dintre electrozi (fig. 2.5). În procesul prelucrării piesa și electrodul nu se mișcă.

Așadar, aplicînd DEI putem prelucra suprafețe conjugate de diferite forme (de exemplu, suprafața plană cu electrodul plan) cu formarea peliculelor continui de oxizi, sau putem forma fâșii discrete de oxizi folosind electrodul-sculă sub formă de bară rotunjită. Lățimea fâșiei de oxidare va depinde de geometria electrodului-sculă și regimul energetic de prelucrare.

2.4. Metodele de cercetare a parametrilor de intrare și ieșire

Pentru analiza cantitativă și calitativă a proprietăților peliculelor de oxizi obținute au fost efectuate un șir de cercetări științifice experimentale.

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

Pentru determinarea cantitativă a parametrilor de intrare a fost utilizat oscilografal cu memorie C8-13, care se conectă în schemă printr-un șunt special cu rezistența $R_{\text{ș}} = 0,003\Omega$. Schema electrică – bloc de măsurare a caracteristicilor electrodinamice a descărcărilor electrice în impuls este prezentată în fig. 2.6. Conform acestei scheme-bloc, șuntul $R_{\text{ș}}$ este conectat în serie cu circuitul de descărcare, iar divizorul de tensiune R_1, R_2 – paralel cu circuitul de descărcare. Energia degajată în impuls, precum și energia degajată în interstițiu, se determină prin metoda osciloscopării, adică prin metoda integrării [16, 79]:

$$W = \int_0^{\tau} I(t)U_e(t)d(t), \quad (2.6)$$

$$W_s = \int_0^{\tau} I(t)U_s(t)dt. \quad (2.7)$$

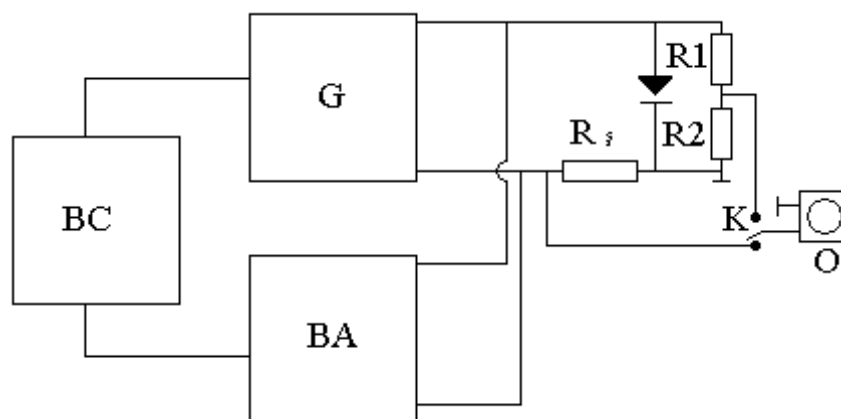


Fig. 2.6. Schema electrică-bloc de măsurare a caracteristicilor electrodinamice ai DEI: BC- blocul de comandă; G- generator de impulsuri; BA- blocul de amorsare; O- osciloscop; R_s -șuntul; R1-R2- divizor de tensiune; K- comutatorul

Puterea impulsului de descărcare disipată în intestițiu se va calcula cu relația [16, 79]:

$$P_s = \frac{dW_s}{dt} = \frac{W_s}{\tau}, \quad (2.8)$$

unde τ este durata impulsului de descărcare.

Forma impulsurilor ale descărcărilor electrice de bază, în funcție de valoarea capacității condensatoarelor de lucru, este prezentată în fig. 2.7.

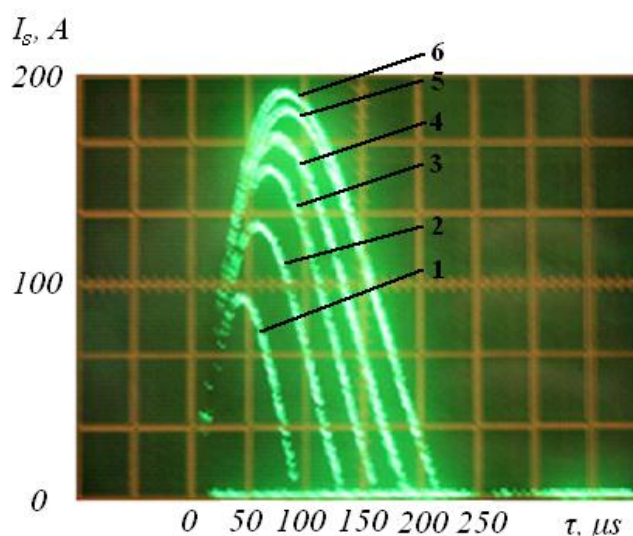
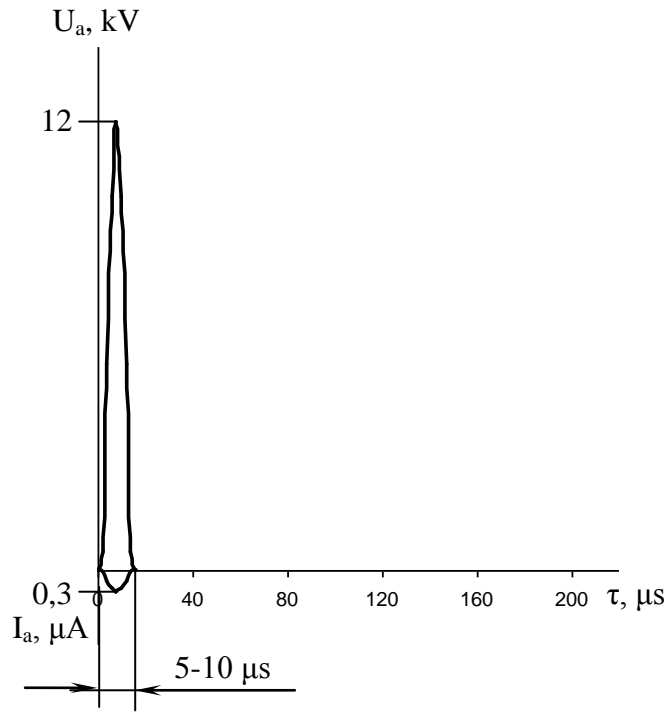


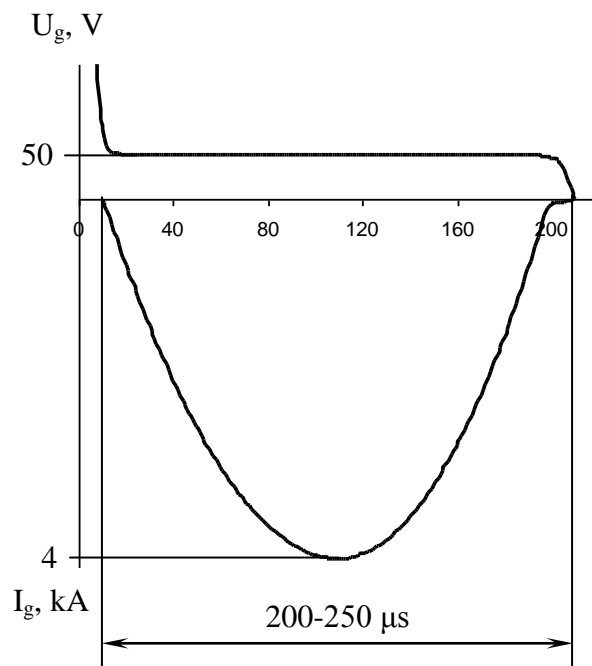
Fig. 2.7. Oscilogramele impulsurilor de bază a descărcărilor electrice în impuls pentru diferite valori ale capacității bateriei de condensatoare a generatorului:

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

Caracteristica tehnică a generatorului de impulsuri utilizat este prezentată în Anexa 1, tab. A.1.1 [122, 133].



a)



b)

Fig. 2.8. Variația intensității curentului și tensiunii respectiv:
a) a impulsului blocului de amorsare;
b) a impulsului generatorului de putere [122, 133]

Blocul de amorsare permite ionizarea preventivă a interstițiului cu un impuls de tensiune înaltă de 12 kV și valoarea curentului 0,3 μ A. Forma impulsurilor blocului de amorsare și a celui de putere este prezentată în fig. 2.8 [122, 133].

Pentru variația mărimii interstițiului, în procesul de cercetare a fost utilizat dispozitivul de mișcare a microscopului MPB-2. Dispozitivul dat a fost utilizat pentru stabilirea precisă a distanței dintre electrozi. În mandrină, vertical se fixau electrozii. Masa de lucru în procesul cercetărilor putea fi deplasată atât longitudinal cât și transversal în scopul poziționării electrozului-sculă și a piesei supuse prelucrării. Măsurarea interstițiului se efectua cu o precizie de 0,01 mm.

Metodica măsurării lățimii fâșiei de oxidare. Pentru a efectua cercetările experimentale, privind aprecierea lățimii fâșiei de oxidare funcție de materialul probelor și regimul energetic de prelucrare, au fost utilizate: generatorul de impulsuri de curent cu amorsare de la un bloc de tensiune înaltă de 12 kV și curentul de 0,3 μ A, instalația de laborator care asigură poziționarea, fixarea și rotirea probelor în procesul de prelucrare cu o frecvență de rotație reglabilă în limitele de la 0 pînă la 150 rot/min.

Electrodul-sculă utilizat era executat sub formă de bară cilindrică rotunjit la capătul de lucru sub formă de emisferă și executat din același material ca și piesa de prelucrare. Piesa-catod reprezintă un cilindru cu \varnothing 11,28 mm. Electrocul-sculă – anod – cilindru cu \varnothing 6 mm cu capăt semirotund. Schema tehnologică este prezentată în fig. 2.9 [120, 121].

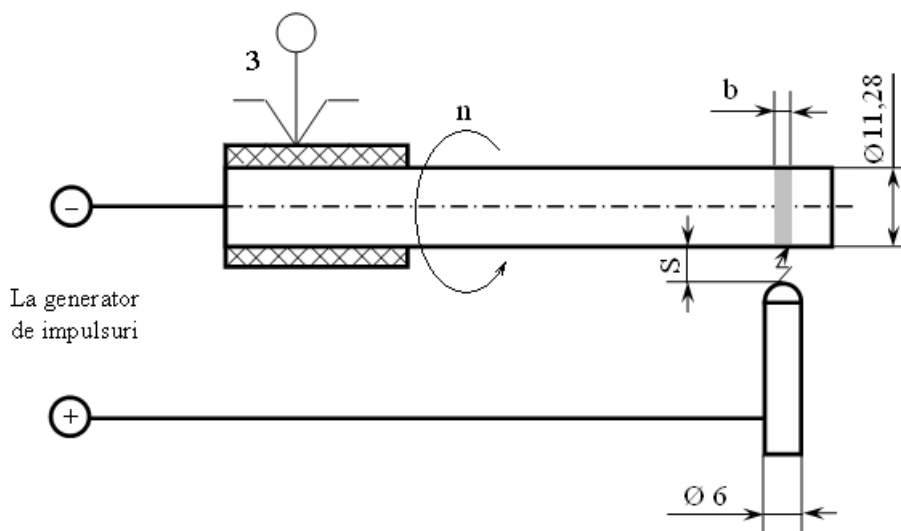


Fig.2.9. Schema prelucrării suprafețelor cilindrice exterioare pentru determinarea dependenței lățimii fâșiei de oxidare de parametrii de intrare

În calitate de material pentru perechile de electrozi (piesa/sculă) au fost alese: aliajul aluminiului Д-16; oțel 45; aliajul titanului BT8.

Măsurarea dimensiunilor fâșiilor de prelucrare se execută în regim continuu de prelucrare la care zonele solitare de interacțiune a canalului de plasmă cu suprafețele probelor se suprapuneau cu coeficientul de suprapunere $k_{sp}=0,5$, iar frecvența de rotație a piesei se stabilea în funcție de frecvența DEI ținându-se cont de mărimea lui k_{sp} . Lățimea fâșiilor au fost apreciate pentru diferite materiale și regimuri tehnologice de prelucrare.

Lățimea fâșiei peliculelor de oxizi a fost măsurată cu ajutorul microscopului METAM cu scara de măsură: precizia de măsurare $\pm 0,025$ mm, valorile măsurate (cîte 20 pentru fiecare regim) au fost controlate conform criteriului lui Student la apartenența intervalului de încredere [102-110], apoi a fost calculată valoarea lor medie. Abaterea relativă a rezultatelor nu a depășit 2 %.

Măsurarea rezistenței electrice de suprafață a peliculelor de oxizi. Pentru măsurarea rezistenței ohmice a peliculelor obținute a fost proiectat și realizat un stand special (fig. 2.10). Pe o placă de sticlă 7 a fost înțeleiată o plăcuță subțire de cupru 2 și pe dînsa un izolator subțire 3 (bandă adezivă) în așa fel, ca pentru suprafața de contact cu proba să rămîină 1 mm^2 . Pentru ca forța de strîngere a probelor în contactul cu cupru să fie constantă a fost utilizat un magnet 4. Pentru a obține o precizie mai mare de măsurare a fost utilizat un ohmmetru digital 1 cu limita de măsurare de ordinul $M\Omega$ în mai multe puncte ale suprafeței prelucrate.

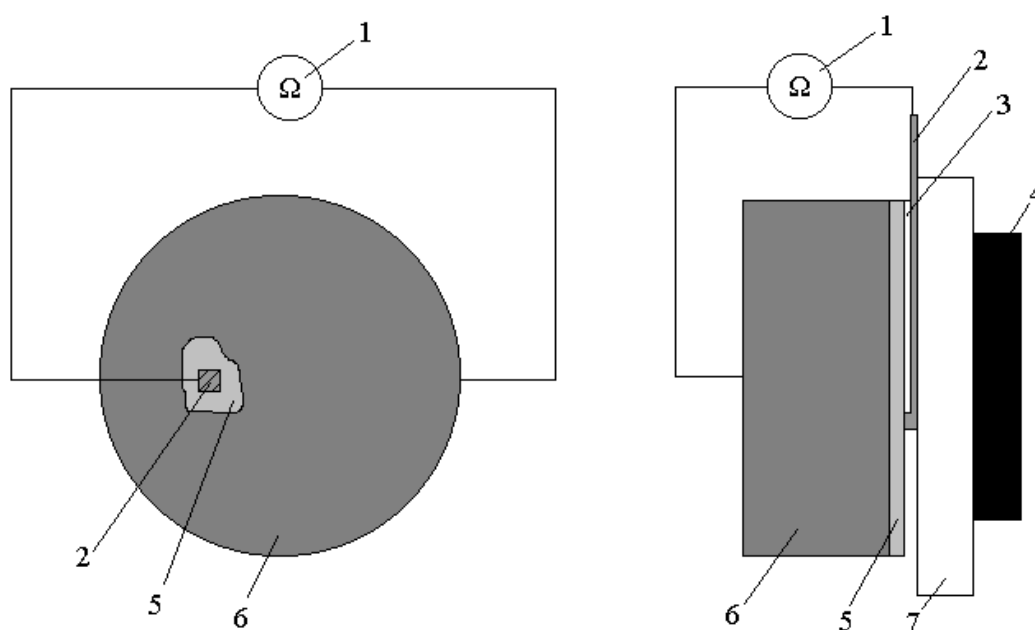


Fig. 2.10. Măsurarea rezistenței peliculelor de oxizi:

- 1 – ohmmetru digital; 2 – placa de cupru cu suprafața de contact de 1 mm^2 ;
 3 – izolator; 4 – magnet permanent; 5 – stratul de oxid; 6 – metalul de bază; 7 – sticlă

Deoarece peliculele de oxid au grosimea mică prin ele nu trebuie să treacă un curent mare (de ordinul mA), deaceea pentru măsurarea rezistenței este necesară o punte care ar diviza curentul de la sursa ohmmetrului (fig. 2.11). Pelicula de oxid avînd rezistență electrică mare R_p (de ordinul $M\Omega$)

este șuntată de o rezistență ohmică cu mult mai mică, $R_{\text{ș}}$ (de ordinul $k\Omega$ sau zeci de $k\Omega$), și atunci maximum de curent total va trece prin rezistență de șunt.

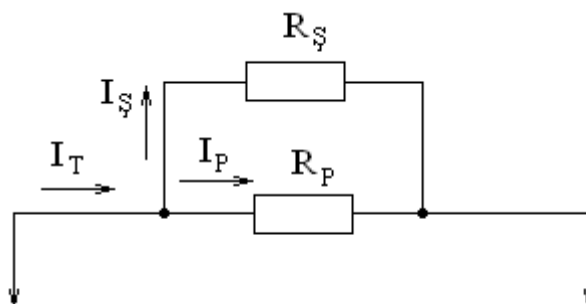


Fig. 2.11. Puntea pentru divizarea curentului

Pentru calculul rezistenței peliculei se folosește relația (2.9):

$$R_P = R_T R_{\text{ș}} / (R_{\text{ș}} - R_T), \quad (2.9)$$

unde: R_T – rezistența totală a circuitului de măsurare.

Măsurarea rezistenței electrice a probelor înainte de prelucrare se efectuează cu ajutorul ohmmetrului digital cu limita de măsurare de ordinul zecimilor sau sutimilor de Ω , deoarece probele reprezintă materialul metalic cu conductibilitate bună.

Metodica determinării potențialului și vitezei de coroziune a probelor. Pentru măsurarea potențialului și vitezei de coroziune a fost elaborată o instalație, schema căreia este prezentată în fig. 2.12. Într-un vas 1 cu electrolitul 2 (soluția apoasă de 3 % NaCl pentru probele confecționate din oțeluri de construcție și soluție apoasă de 40 % de H_2SO_4 pentru probele din aliajele titanului, cuprului și aluminiului) se fixează proba și catodul 6. Catodul se unește la polul „-”, iar proba la polul „+” a sursei de curent continuu cu reglarea lină a tensiunii. În serie cu sursa se conectează un miliampermetru și în paralel un voltmetru. Pentru măsurarea potențialului de coroziune al stratului superficial de oxid 4, metalul de bază 3 este amplasat într-o garnitură de cauciuc 5, care are o gaură 7 pentru ca în contact cu electrolitul să se afle numai suprafața oxidată a probei. Tensiunea se mărește treptat pînă la apariția curentului, ce ne va indica voltmetrul – valoarea potențialului de coroziune, iar miliampermetrul – curentul de coroziune. Pentru majorarea preciziei de măsurare se realizează mai multe măsurări pentru diferite părți ale suprafeței probelor.

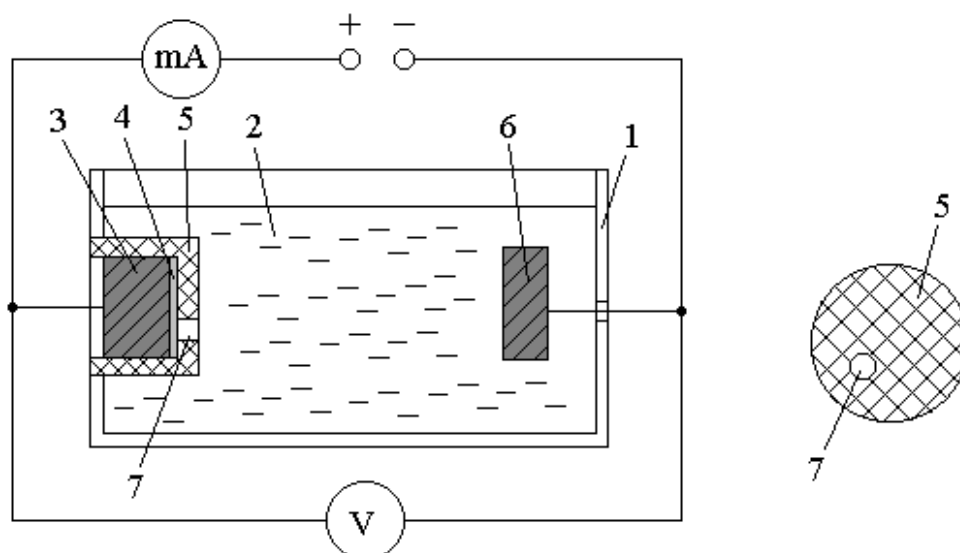


Fig. 2.12. Schema de măsurare a potențialului și vitezei de coroziune:
 1 – vas; 2 – electrolitul; 3 – metalul de bază; 4 – stratul de oxid; 5 – garnitura de cauciuc;
 6 – catodul; 7 – gaură pentru contactul suprafeței oxidate cu electrolitul din baie

În scopul executării încercărilor de rezistență la coroziune chimică a probelor prelucrate (cu pelicule de oxizi formate pe suprafața activă cu aplicarea DEI) a fost preparați electroliți din apă distilată și agenți chimici cu concentrația respectivă la temperatura camerei. Peliculele de oxizi au fost formate cu DEI cu parametrii energetici optimați pentru fiecare material cercetat.

Probele erau fixate în dispozitivul elaborat (fig. 2.12) astfel ca din suprafața prelucrată să fie supusă dizolvării numai o porțiune sub formă de cerc. Aceasta era inclusă în circuitul de dizolvare anodică în calitate de anod. Încercările se executau în regim de funcționare a instalației experimentale la curent continuu și modificarea tensiunii aplicate pas cu pas cu 0,1 V.

Viteza de coroziune se determină prin cântărirea probelor pînă și după încercare, la cântarul analitic de marca BJI-200, cu precizia de 10^{-5} g.

Indicele vitezei de coroziune se determină cu relația [96]:

$$K = \frac{\Delta m}{S \cdot t}; \quad (2.10)$$

unde K – viteza de coroziune (indicatorul masic), $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$; S – aria suprafeței de lucru a probei, m^2 ;
 t – durata încercării (timpul de lucru), h; Δm – pierderi (sau adăusul) de masă, g;

$$\Delta m = m_i - m_f; \quad (2.11)$$

unde m_i – masa inițială a probei, g; m_f – masa finală a probei, g.

Condițiile în care a fost executate încercările pentru determinarea experimentală a vitezei de coroziune sunt următoarele: proba – anod; tensiunea între electrozi $U = 2$ V; distanța dintre electrozi $d = 10$ mm, electrolitul (soluție apoasă 3 % NaCl, sau 40 % H_2SO_4); timpul de prelucrare la fiecare etapă de măsurare $t = 0,5$ h; aria suprafeței de lucru (de contact cu electrolitul) $S = 50,24$ mm^2 .

Metodica măsurării microdurității straturilor de suprafață prelucrată. Măsurarea microdurității suprafeței probelor neprelucrate a fost efectuată cu ajutorul aparatului PMT-3 cu indentorul din piramida patrulateră din diamant cu unghiul de la vîrf 136° și greutatea 50 g. Rezultatele obținute au fost verificate și comparate cu cele căpătate pentru suprafețele cu pelicule de oxizi la microdurimetrul electronic Vickers DM 8-B instalat în laboratorul de cercetare „Nano Science and Surface Research”, Facultatea de Inginerie, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Germania. Deoarece grosimea peliculelor de oxizi formate pe suprafețe prelucrate este de ordinul sutelor de nm, microduritatea peliculei a fost înregistrată la momentul distrugerii ei.

Analiza morfologiei (SEM), a compoziției chimice (EDX) și compoziției fazice (XPS) a straturilor superficiale. Analiza morfologiei (SEM – Scanning electron microscopy) și a compoziției chimice (EDX – Energy dispersive X-ray analysis) a straturilor superficiale a probelor supuse prelucrării, au fost efectuate cu ajutorul microscopului electronic de tip TESCAN dotat cu dispozitivele de analiză necesare, iar grosimea peliculelor de oxizi a fost determinată la profilometrul optic Photomap 3D. Spectrul fazic a peliculelor de oxizi a fost înregistrat utilizînd tehnica XPS (X-ray photoelectron spectroscopy) și softului PHI SUMMIT (PHI Multipack 8.2 C), bazată pe caracteristicile echipamentului Versa Probe 5000.

Cercetările au fost efectuate în cinci centre de cercetări științifice:

1. Centrul Național de Studiu și Testare a Materialelor, Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, Republica Moldova.
2. CARPATH Center for Applied Research in Physics and Advanced Technologies, Universitatea „A.I. Cuza” din Iași, România.
3. National Institute for Research and Development in Microtechnologies IMT, București, România.
4. Nano Science and Surface Research, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Germania.
5. Centrul de cercetări și analiză a suprafețelor. Departamentul de Fizică, Universitatea din Aveiro, Portugalia.

2.5. Optimizarea matematică a tehnologiei formării peliculelor de oxizi

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

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

Pentru analiza matematică a datelor experimentale a fost folosită metoda eliminării erorilor grosolane folosind criteriul lui Student la valoarea necunoscută a abaterii mediei pătratice σ [102-110].

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

1) Valoarea medie aritmetică:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i . \quad (2.12)$$

2) Abaterea medie pătratică corectată:

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

3) Abaterea maximală posibilă:

$$\Delta x = 3S . \quad (2.14)$$

4) Dispersia:

$$D = S^2 . \quad (2.15)$$

5) Abaterea medie pătratică a rezultatelor luate în parte:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} . \quad (2.16)$$

6) Abaterea medie pătratică a mediei aritmetice:

$$\sigma^* = \frac{S}{\sqrt{n}} . \quad (2.17)$$

7) Limitele intervalului de încredere a valorilor măsurărilor:

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

unde $t(P;k)$ - coeficientul lui Student; $k=n-1$. Pentru probabilitatea P și argumentul k distribuirea coeficientului lui Student se ia din tabelul 2.2 [109].

8) Valoarea erorii aleatoare:

$$\Delta x = t(P;k) \cdot \sigma^* . \quad (2.18)$$

9) Limitele intervalului de încredere a lotului în întregime:

$$|x_i - \bar{x}| < t(P;k) \cdot \sigma^* . \quad (2.19)$$

10) Valoarea adevărată a mărimii măsurate:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x . \quad (2.20)$$

11) Abaterea relativă a rezultatelor:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x} 100\% . \quad (2.21)$$

În calitate de model matematic a fost elaborat un soft pe baza programului Microsoft Office Excell 2010 [111], care permite determinarea apariției erorilor grosolane, eliminarea valorii rezultatului „greșit” și calculul valorii adevărate a mărimilor măsurate pentru nivelul probabilității minimale de apariție a erorilor de 5% ($P=0,95$).

Tabelul 2.2

Distribuirea coeficientului lui Student $t = t(P; k)$ [102]

$k \backslash P$	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999
4	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610
5	2,015	2,571	3,365	4,032	6,859
6	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959
7	1,895	2,365	2,998	3,499	5,405
8	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041
9	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781
10	1,812	2,228	2,767	3,169	4,587
11	1,796	2,201	2,718	3,106	4,487
12	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318
13	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221
14	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140
15	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073
16	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015
18	1,734	2,103	2,552	2,878	3,922
20	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850
25	1,708	2,060	2,485	2,787	3,725
30	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646
35	1,689	2,030	2,437	2,724	3,591
40	1,684	2,021	2,423	2,704	3,551
45	1,679	2,014	2,412	2,689	3,522
50	1,676	2,008	2,403	2,677	3,497
60	1,671	2,000	2,390	2,660	3,460
70	1,667	1,995	2,381	2,648	3,436
80	1,664	1,990	2,374	2,639	3,416
90	1,662	1,987	2,368	2,632	3,401
100	1,660	1,984	2,364	2,626	3,391
∞	1,645	1,960	2,326	2,576	3,291

Aproximarea funcțiilor dependențelor tehnologice. La aproximarea funcțiilor se utilizează diferite metode: metoda grafoanalitică, metoda celor mai mici pătrate, metoda planificării experimentului (experimentul factorial complet), etc. [102-110].

Metoda grafoanalitică. Esența acestei metode constă în faptul că toate mărimile necunoscute, ce sînt incluse în ecuația propriu-zisă, se determină prin metoda grafoanalitică. Pentru

aceasta, prin punctele obținute experimental, se duce o curbă, care ar trece cât mai aproape de dependența funcțională reală și aceste puncte ar determina parametrii curburii [111].

În sistemul de coordonate rectangulare cu scara logaritmică (sau semilogaritmică) majoritatea dependențelor obține forma $y = A + Bx$, această este ecuația liniei drepte.

Există câteva metode de construire a unei drepte după punctele experimentale [111]:

Construirea celei mai convenabile drepte cu ajutorul riglei. Depunem pe grafic punctele obținute experimental (în coordonate logaritmice). Dacă folosim pe grafic o riglă transparentă, o putem orienta astfel ca, toate punctele experimentale să se găsească cât se poate mai aproape de riglă. Din grafic se determină mărimile A și B (fig. 2.13, a).

Metoda punctelor pare constă în determinarea mărimii optime a tangentei de înclinare a dreptei. Unim în perechi punctele experimentale și determinăm câteva valori a tangentei de înclinare și în calitate de cea mai reușită se ia valoarea medie B. Dreapta, în acest caz, se duce prin punctul cu coordonatele egale cu valorile medii ale mărimilor X și Y. Prin această metodă se obțin rezultate satisfăcătoare, dacă marimile $(x_4 - x_1)$, $(x_5 - x_2)$, $(x_6 - x_3)$ etc. sînt aproximativ egale.

Metoda grafică de construire a dreptei prin metoda pătratelor minimale. Această metodă dă rezultate bune în cazul, dacă intervalele dintre valorile X sînt egale.

Dreapta se construiește astfel (vezi fig. 2.13, b): unim punctele 1 și 2 printr-un segment de dreaptă. Ne deplasăm în direcția punctului 2 și depunem un segment la distanța $\frac{2}{3}S$, notînd punctul obținut printr-un semn. Unim punctul obținut cu punctul 3; deplasîndu-ne în direcția punctului 3, notăm din nou un segment egal cu $\frac{2}{3}S$ și notăm punctul nou obținut deasemenea printr-un semn. Vom repeta acest procedeu pînă vom obține ultimul punct al graficului. Acest punct se va găsi pe dreapta cea mai optimală, adică pe dreapta pătratelor minimale. Vom începe apoi aceeași construcție da la capătul opus și vom repeta întregul proces, deplasîndu-ne în direcție opusă. Astfel vom obține al doilea punct ce se găsește pe dreapta căutată.

În toate cazurile mărimile A și B se determină grafic, după tangenta unghiului de înclinare a dreptei obținute ($B = \operatorname{tg}\alpha = y/x$) și segmentul obținut la intersecția dreptei cu axa verticală de coordonate ($A = a; x = 0$).

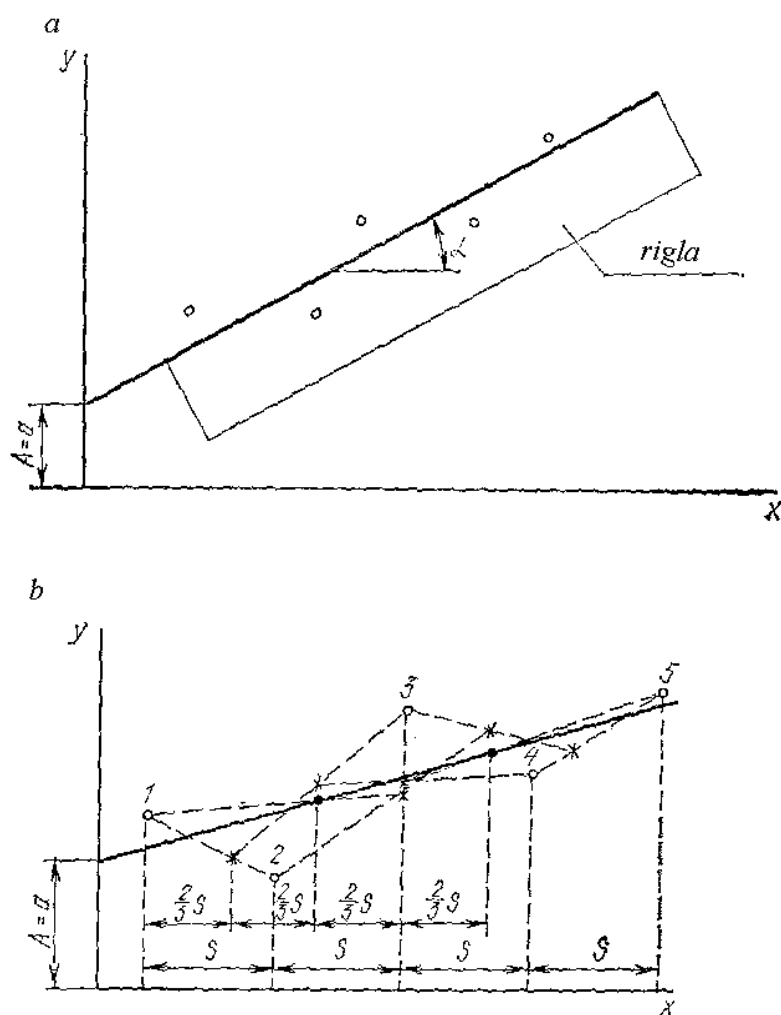


Fig. 2.13. Metode grafice de construire a dreptelor [111]:
a – cu ajutorul riglei; b – prin metoda pătratelor minime

Metoda celor mai mici patrate (CMMP). Esența metodei CMMP este asemenea metodei grafoanalitice [102-110], numai că parametrii ecuației căutate se determină pe cale analitică. Teoria probabilității arată, că cea mai apropiată de dreapta căutăată, va fi dreapta, pentru care suma patratelor distanțelor măsurate pe verticală de la puncte pînă la dreapta căutăată, va fi minimală.

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

$$\sum_{i=1}^n (y_i - A - Bx_i)^2 \rightarrow \min, \quad (2.22)$$

unde n reprezintă numărul de puncte experimentale.

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

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

ori

(2.23)

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

Rezolvând sistemul de ecuații, vom obține:

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

(2.24)

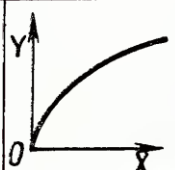
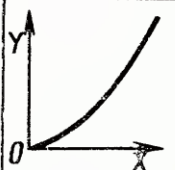
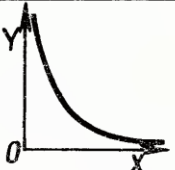
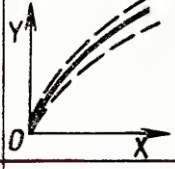
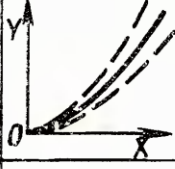
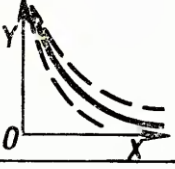
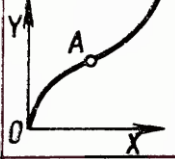
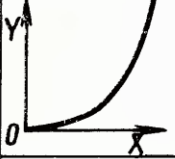
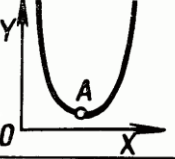
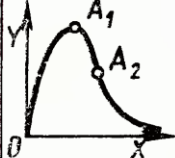
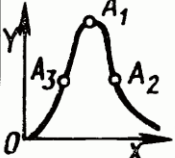
$$B = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i)^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n (x_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}.$$

Curbele care au extremume (maximumuri sau minimumuri) construite după punctele experimentale în majoritatea cazurilor nu pot fi approximate cu ajutorul ecuațiilor de putere [124]. În aceste cazuri se poate proceda în diferite feluri: curbele pot fi exprimate cu ajutorul șirurilor matematice, cu ajutorul formulelor de interpolare sau cu ajutorul unor formule empirice, care au caracter extremic.

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

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

Forma graficelor ecuației $y = a \cdot x^b \cdot e^{cx}$ în dependența de valoarea constantelor [111]

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

Dintr-o mulțime de formule empirice pentru aproximarea rezultatelor experimentului [124] interesul deosebit reprezintă ecuația $y = a \cdot x^b \cdot e^{cx}$. În afară de argumentul x , ecuația mai conține încă trei constante a , b și c . În cazul descrierii rezultatelor cercetărilor experimentale ale proceselor tehnologice, constanta a are valori numerice fracționare sau întregi strict pozitive ($a > 0$). Constanta b (indicile de putere pe lângă argumentul x) și constanta c (care reprezintă înmulțitorul în indicile de putere pe lângă e) pot avea valori atât pozitive, cât și negative. În caz particular, când constanta $c = 0$, ecuația empirică primește forma ecuației de putere, exprimată de parabolă (când $b > 0$) sau de hiperbolă (când $b < 0$). Pentru $b = 0$, ecuația empirică are forma ecuației exponențiale.

Așa dar, ecuația empirică cercetată reprezintă formarea matematică din produsul ecuației de putere $y = a \cdot x^b$ cu funcția exponențială naturală $y = e^{cx}$ (tab. 2.3 [111]).

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

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

Aproximarea rezultatelor cercetărilor experimentale cu ajutorul ecuației polinomiale. Teoretic parametrii polinomului $y = a_0 + a_1 \cdot x + \dots + a_n \cdot x^n$ pot fi determinate din sistemul de ecuații liniare:

$$\begin{cases} a_0 \cdot \sum \omega + a_1 \cdot \sum x \cdot \omega + \dots + a_n \cdot \sum x^n \cdot \omega = \sum y \cdot \omega, \\ a_0 \cdot \sum x \cdot \omega + a_1 \cdot \sum x^2 \cdot \omega + \dots + a_n \cdot \sum x^{n+1} \cdot \omega = \sum y \cdot x \cdot \omega, \\ \dots \\ a_0 \cdot \sum x^n \cdot \omega + a_1 \cdot \sum x^{n+1} \cdot \omega + \dots + a_n \cdot \sum x^{2n} \cdot \omega = \sum y \cdot x^n \cdot \omega, \end{cases}$$

unde semnul \sum înseamnă suma după toate datele (de exemplu, $\sum x \cdot \omega = \sum_{k=1}^N x_k \omega_k$), iar ω_k este ponderea măsurărilor.

Pentru calculul parametrilor polinomului se recomandă [102] de-l reprezentat în forma:

$$y = b_0 \cdot p_0(x) + b_1 \cdot p_1(x) + \dots + b_n \cdot p_n(x), \quad (2.25)$$

unde $p_i(x)$ sînt polinoame ortogonale ale lui Cebîșev pe mulțimea punctelor x_k cu ponderea $\omega_k = \omega(x_k) > 0$. Această înseamnă că, pentru orișice $i \neq j$ se îndeplinește condiția:

$$\sum_{k=1}^N p_i(x_k) \cdot p_j(x_k) \cdot \omega_k = 0. \quad (2.26)$$

Parametrii ecuației (2.1) sînt calculate cu relații:

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

care nu depind de puterea n a polinomului precăutat.

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

$$\begin{cases} p_0(x) = 1, \quad p_1(x) = x - \bar{x}, \\ p_2(x) = x^2 - \frac{\overline{x^3} - \overline{x^2} \bar{x}}{x^2 - \bar{x}^2} + \frac{\overline{x^3} \bar{x} - (\overline{x^2})^2}{x^2 - \bar{x}^2}, \end{cases} \quad (2.27)$$

unde valorile medii se determină în modul obișnuit:

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

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

$$p_{j+1}(x) = (x + \beta_{j+1}) \cdot p_j(x) - \frac{H_j}{H_{j-1}} p_{j-1}(x), j = \overline{1, n}, \quad (2.28)$$

unde:

$$H_j = \sum_{k=1}^N p_j^2(x_k) \cdot \omega_k, \beta_{j+1} = -\frac{1}{H_j} \sum_{k=1}^N x_k \cdot p_j^2(x_k) \cdot \omega_k, j = \overline{0, n-1} \quad (2.29)$$

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

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

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

Ecuațiile (2.27)-(2.29) obțin forma:

$$p_0(u) = 1, p_1(u) = u \quad (2.27^*)$$

$$p_{j+1}(x) = u \cdot p_j(u) - \frac{H_j}{H_{j-1}} p_{j-1}(u), j = \overline{1, n}, \quad (2.28^*)$$

unde:

$$H_j = \sum_{k=1}^N p_j^2(u_k), j = \overline{0, n-1}. \quad (2.29^*)$$

Aproximarea rezultatelor cercetărilor experimentale cu ajutorul ecuației funcției pătratice $y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$. Parametrii funcției pătratice $y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$ se determină din sistemul ecuațiilor liniare:

$$\begin{cases} a \cdot s_4 + b \cdot s_3 + c \cdot s_2 = \sum_{k=1}^N y_k \cdot x_k^2 \cdot \omega_k, \\ a \cdot s_3 + b \cdot s_2 + c \cdot s_1 = \sum_{k=1}^N y_k \cdot x_k \cdot \omega_k, \\ a \cdot s_2 + b \cdot s_1 + c \cdot s_0 = \sum_{k=1}^N y_k \cdot \omega_k, \end{cases} \quad (2.30)$$

unde $s_m = \sum_{k=1}^N x_k^m \cdot \omega_k, m = \overline{1, 4}, \omega_k, k = \overline{1, N}$ – ponderile măsurărilor.

În cazul cînd toate măsurările sînt efectuate cu aceeași precizie ($\omega_k = 1, k = \overline{1, N}$) și toate punctele sînt distribuite simetric față de valoarea medie \bar{x} :

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k, \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y_k, s_0 = N,$$

$$x_{k+1} - x_k = h = \text{const}, k = \overline{1, N-1}.$$

Vom scrie funcția pătratică în forma:

$$y = a_1 \cdot u^2 + b_1 \cdot u + c_1, \quad (2.31)$$

unde $u = \frac{x - \bar{x}}{h}$.

Pentru numărul impar al datelor experimentale ($N=2M-1$):

$$\begin{cases} a_1 = \frac{1}{3 \cdot H_2} \left[3 \cdot \sum_{k=1}^N y_k \cdot (k - M)^2 - \frac{N^2 - 1}{4} \sum_{k=1}^N y_k \right], \\ b_1 = \frac{1}{H_1} \sum_{k=1}^N y_k \cdot (k - M), \\ c_1 = \bar{y} - \frac{H_1}{N} a_1. \end{cases} \quad (2.32)$$

Pentru numărul par al datelor experimentale ($N=2M$):

$$\begin{cases} a_1 = \frac{1}{12 \cdot H_2} \left[3 \cdot \sum_{k=1}^N y_k \cdot (2k - N - 1)^2 - (N^2 - 1) \sum_{k=1}^N y_k \right], \\ b_1 = \frac{1}{2 \cdot H_1} \sum_{k=1}^N y_k \cdot (2k - N - 1), \\ c_1 = \bar{y} - \frac{H_1}{N} a_1. \end{cases} \quad (2.32^*)$$

unde: $H_1 = N(N^2 - 1)/12, H_2 = N(N^2 - 1)(N^2 - 4)/180$ (2.33)

Parametrii ecuației pătratice precăutate:

$$\begin{cases} a = \frac{a_1}{h^2}, \\ b = \frac{b_1}{h} - \frac{2 \cdot \bar{x} \cdot a_1}{h^2}, \\ c = c_1 + \frac{a_1 \cdot (\bar{x})^2}{h^2} - \frac{b_1 \cdot \bar{x}}{h} \end{cases} \quad (2.34)$$

Aproximarea rezultatelor cercetărilor experimentale cu ajutorul ecuației empirice

$y = a \cdot x^b \cdot e^{cx}$. Să precăutăm cazurile particulare:

1) $a > 0, b \neq 0, c = 0$. Obținem ecuația $y = a \cdot x^b$, care reprezintă parabolă cu axa orizontală (pentru $0 < b < 1$), parabolă cu axa verticală (pentru $b > 1$) sau hiperbolă (pentru $b < 0$) (tab. 2.3, fig. 1, 5, 9).

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

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

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

Obținem ecuația liniei drepte:

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

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

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

Determinarea coeficienților ecuației are loc în coordonate semilogaritmice:

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

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

Obținem ecuația liniei drepte:

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

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

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

$$x_0 = -\frac{b}{c} \quad (2.35)$$

și două puncte de curbură:

$$x_{1,2} = -\frac{b \pm \sqrt{b}}{c} \quad (2.36)$$

Consecutivitatea determinării coeficienților:

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

$$\ln y = \ln a + b \ln x + c \cdot x. \quad (2.37)$$

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

$$\ln y = \ln a + b \ln x - \frac{b}{x_0} x,$$

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

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

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

Coefficienții ecuațiilor dependențelor tehnologice au fost determinate cu ajutorul programelor Microsoft Office Excell 2010 și Matlab ver. 6.5 release 13 [111, 112].

2.6. Concluzii la capitolul II

– reieșind din necesitățile industriei contemporane în calitate de materiale pentru probe de cercetare au fost alese aliajele fierului (oțel St. 3, oțel 45), aliajele titanului (BT-8, BT 1-0), aliajul aluminiului (Д16) și aliajele cuprului (M0, alamă Л63, bronz БрА5). Pentru evitarea influenței elementelor ce intră în componența materialului electrodului-sculă și care pot pătrunde în suprafața probei în procesul formării peliculelor de oxizi sub acțiunea DEI, electrodul-sculă a fost confecționat din același material ca și al piesei supuse prelucrării;

– pentru formarea peliculelor nanometrice de oxizi pe suprafețele probelor este suficient de utilizat generatorul de impulsuri de tipul RC cu amorsarea paralelă;

– în scopul elaborării tehnologiei este necesar de măsurat și calculat parametrii de intrare a procesului tehnologic: durata și forma impulsului, energia și puterea degajată în interstițiu la o singură descărcare, frecvența impulsurilor;

– pentru analiza calitativă și cantitativă a suprafețelor probelor prelucrate este suficientă cercetarea proprietăților, morfologiei, compoziției chimice și fazice a straturilor superficiale, utilizând metode contemporane de analiză: SEM, EDX, XPS etc, cât și parametrii de ieșire a procesului tehnologic: grosimea peliculelor, lățimea fâșiei de oxidare și productivitatea formării peliculelor de oxizi.

III. FIZICA PROCESULUI DE OXIDARE A SUPRAFETELOR METALICE CU APLICAREA DESCĂCRĂRILOR ELECTRICE ÎN IMPULS

3.1. Străpungerea interstițiului și formarea canalului de plasmă

Este cunoscut faptul că, tensiunea de amorsare în funcție de mărimea interstițiului S și presiunea gazelor p se descrie cu relația lui Pașen [16, 47, 70, 79], care poate fi interpretată în baza teoriei de străpungere a lui Taundsen. În conformitate cu această lege, tensiunea minimală de amorsare în aer, la presiune normală, în funcție de materialul electrozilor, constituie aproximativ 250...300V. În același timp pentru cazul formării depunerilor din materiale compacte cu rupere de contact, diapazonul tensiunilor utilizate constituie 15...200V, ceea ce este inferior minimumului curbei lui Pașen. Astfel rezultatele cercetărilor mai multor autori [16, 79] demonstrează că, la tensiunea de amorsare de 100...200V mărimea interstițiului poate atinge valorile de 5...10 μm .

Conform [16, 79] străpungerea interstițiului la prelucrările prin electroeroziune în condițiile când tensiunea de amorsare constituie $U_{am} \leq 300V$, nu poate fi lămurită în baza avalanșei de ionizare din două motive: lipsa tensiunii necesare în interstițiu (pentru accelerarea electronilor care ar supune ionizării moleculele și atomii la ciocniri) și insuficiența numărului necesar de ciocniri a electronilor cu moleculele și atomii din interstițiu.

Analizând amorsarea descărcărilor electrice din contul curentului de autoemisie, autorii [15, 16] menționează că, în acest caz este necesar a lua în considerație acțiunea pondemotoră a câmpului electrostatic, care poate provoca tensiuni mecanice considerabile, iar acestea pot depăși limita de rezistență a materialului electrozilor. De exemplu, pentru tensiunea de străpungere a interstițiului, tensiunea mecanică pe suprafețele electrozilor (calculată cu relația [16, 79]: $\tau = \frac{E^2}{8\pi}$), constituie cca 450 MPa.

În cazul utilizării descărcărilor electrice în impuls în regim de subexcitare este semnificativ faptul că, asupra interstițiului se aplică un impuls de putere mică, dar tensiune înaltă (12...24 kV) care este responsabil de formarea canalului de conductibilitate prin care apoi se degajă energia acumulată pe baterea de condensatoare a generatorului de impulsuri. Acest tip de impulsuri se aplică și în cazul formării straturilor de depunere din pulberi metalice [16, 79]. Pentru formarea straturilor de depunere din pulberi metalice acestea sunt introduse în interstițiu în zona anodică [16, 70, 79] pentru a le asigura o durată de timp mai mare pentru interacțiunea cu canalul de plasmă al DEI.

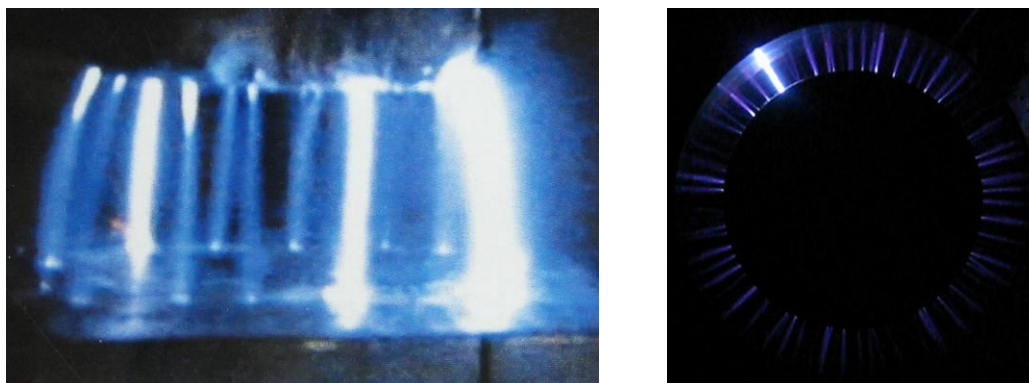


Fig. 3.1. Formarea petelor electrodice și a canalelor de plasmă la prelucrarea cu aplicarea DEI

În fig. 3.1 sunt prezentate formațiunile de plasmă pentru cazul DEI la interstiții de ordinul 10-25 mm, pentru tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare de 28 kV. Din acesta se observă clar că, formațiunile de plasmă (de formă sferică) iau naștere la suprafețele electrozilor (se observă zone luminoase evidente de formă sferică) din care apoi se dezvoltă canalul de plasmă preponderent de la catod spre anod. Rezultă că, petele electrodice sunt responsabile nu numai de efectele de natură electrică și termică ce se produc la suprafețele electrozilor, dar și de efectele ce se produc în interstițiu.

3.2. Procese fizico-chimice ce se produc în interstițiu și la suprafețele electrozilor

Procesele fizico-chimice caracteristice prelucrării prin electroeroziune. Cercetările efectuate anterior, privind depunerea straturilor din pulberi metalice [16, 70, 79], au demonstrat că, în cazul unor valori mari ale interstițiului ($S=0,5\div 1,5$ mm), când cea mai mare parte a energiei DEI se degajă în interstițiu pentru parametrii stabiliți ai descărcării ($U_c=100\div 500$ V, $C=100\mu\text{F}$), electrozii sunt supuși eroziunii, iar materialul lor în faza lichidă și de vapori participă la formarea straturilor de suprafață. În lucrarea [79] se menționează că ponderea materialului electrozilor în strat poate atinge 20%. De aici rezultă că proprietățile straturilor depuse vor depinde direct de cantitatea acestui material.

Cercetările au demonstrat că, cei mai importanți factori dintre aceștea sunt mărimea interstițiului frontal (S_F) și energia de descărcare (W_e) [79]. În principiu acești parametri determină procesul de depunere și anume interacțiunea plasmei cu particulele de pulbere și suprafețele electrozilor. Iar variația lor într-un diapazon larg, determină posibilitățile aplicative ale metodei în cauză. Pornind de la aceste constatări s-a impus dezvoltarea în continuare a acestor cercetări. Influența energiei W_e și a interstițiului S asupra eroziunii electrice, pentru valorile interstițiului de câțiva zeci de micrometri, a fost cercetată de învățatul B. N. Zolotîh [83, 86].

Analizînd bilanțul energetic în interstițiu, dlui a stabilit următoarea relație [83]:

$$W_i = W_a + W_c + W_k \quad (3.1)$$

unde W_a , W_c , W_k – sunt energiile transmise anodului, canalului descărcării și, respectiv, catodului, iar W_i – este energia degajată în interstițiu la un impuls. S-a demonstrat că energia transmisă electrozilor poate fi determinată cu relația [83]:

$$W_{el} = \int_0^{t_i} U(t) \cdot i(t) \cdot dt - S \int_0^{t_i} \varepsilon(t) \cdot i(t) \cdot dt \quad (3.2)$$

unde: $U(t)$ și $i(t)$ sunt tensiunea și, respectiv, curentul electric în descărcare; t_i – durata impulsului; $\varepsilon(t)$ – gradientul potențialului pe canalul de plasmă.

Relația (3.1) determină condițiile de care depinde energia degajată în interstițiu la un impuls W_i , transmisă electrozilor. Cercetările experimentale efectuate de B.N. Zolotîh [83] au demonstrat că odată cu creșterea valorilor interstițiului crește și partea energiei care se degajă în canalul de plasmă, aceasta din urmă – fiind neliniară (fig. 2.3). Din acest motiv energia transmisă electrozilor se micșorează și, corespunzător, scade eroziunea lor.

Pentru valori mai mari ale interstițiului (sute de μm), caracterul proceselor de electroeroziune este diferit. S-a demonstrat că, la variația valorilor interstițiului S , între 3 și 500 μm [16, 79], schimbarea eroziunii electrice nu este liniară și anume pentru Al, Ti și oțel, creșterea mărimii interstițiului până la 100-250 μm , provoacă sporirea cantitativă și calitativă a eroziunii, iar depășirea acestor valori înregistrează o scădere a eroziunii ($\Delta\gamma_w$).

Decalajul rezultatelor obținute de către diferiți autori, privind influența mărimii interstițiului S_F asupra proceselor de electroeroziune, indică asupra faptului că, fenomenele ce se produc pe suprafețele electrozilor au un caracter complex și sunt funcție de condițiile în care se dezvoltă procesul, precum și de proprietățile materialelor din care sunt confecționați electrozii.

De către autorii lucrării [13] a fost cercetată interacțiunea canalului de plasmă a DEI cu suprafața electrozilor executați din oțelurile 3 și 45, titan BT-1-0 cu cupru M3, funcție de mărimile interstițiului $S=0,03-3$ mm, de tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare $U_c=80-400$ V și de capacitatea bateriei de condensatoare a generatorului de impulsuri de curent $C=100-600$ μF ([79], fig. 6-7). Prelucrarea s-a efectuat în mediul de aer liber cu electrozi în formă de anod conic și catod plan. În calitate de sursă a fost utilizat generatorul instalației „Razread-2M” care a permis cercetarea interacțiunii plasmei cu suprafața electrozilor utilizând unul și, respectiv, mai multe impulsuri.

În cea din urmă s-a cercetat varianta în care craterele s-au situat alături, ori s-au suprapus, adică s-a realizat procesul de prelucrare continuă a suprafeței catodului, fără introducerea pulberilor metalici în interstițiu. Acest proces s-a cercetat prin variația frecvenței DEI în limitele 1÷40Hz și prin deplasarea piesei de formă plată față de electrodul de formă conică.

În cazul utilizării descărcărilor electrice cu impulsuri unitare, s-a apreciat diametrul craterului (când acesta a fost omogen), diametrul fazei lichide și zonei suplimentare ce a apărut în

afara limitelor fazei lichide în cazul eroziunii totale. Aceiași parametri au fost apreciați și în cazul prelucrării continuă, însă în loc de diametrul craterului s-a determinat lățimea fâșiei de fază lichidă h_L , ori lățimea zonei suplimentare h_S .

Cercetările efectuate au demonstrat că, pentru interstiții mai mici de $1 \div 2$ mm (limite ce sunt stabilite de tensiunea descărcărilor) pe suprafața „plăcii-catod” s-au obținut cratere cu o geometrie și cu dimensiuni caracteristice electroeroziunii, obișnuite în mediu gazos [13, 16]. S-a constatat că pentru valori ale interstițiului $S > 1 \div 2$ mm și în deosebi, pentru energii mari ale descărcării ($U_c > 200$ V), în punctul de acțiune al plasmăi, craterul degenerază într-o pată sau în câteva pete plane de fază lichidă ulterior solidificată, cu dimensiuni de la fracțiuni de μm până la câțiva μm ([79], fig. 8), adâncimea craterelor fiind mai mică decât dimensiunile lor transversale. În cazul descărcărilor unitare, între cratere și grupele de cratere s-au depistat porțiuni de suprafețe neafectate de acțiunea plasmăi.

Cele două cazuri ale electroeroziunii menționate mai sus nu sunt caracteristice pentru descărcările electrice utilizate la prelucrarea dimensională și la alierea suprafețelor prin contact electric.

Cercetările efectuate anterior au fost realizate pentru descărcările cu arc electric în vid [15] și descărcările în impuls în aer pentru $U > 500$ V.

Reieșind din cele expuse confirmă faptul că, pentru tensiunile utilizate în cazul prelucrării dimensionale și al alierii (80-400V), pentru descărcări în aer în regim de subexcitare ($S = 0,03 \div 3,0$ mm), se observă un proces asemănător eroziunii electrice.

Fenomenele menționate anterior pot fi lămurite în baza rezultatelor științifice efectuate: se cunoaște că în cazul prelucrării dimensionale și alierii prin contact electric, mărimile interstițiului sunt destul de mici, zeci de μm la prelucrarea dimensională și numai câțiva μm la aliere [5, 7], motiv pentru care plasma descărcării se găsește într-o stare de comprimare radială, iar procesele ce au loc pe suprafețele electrozilor și din canalul descărcării sunt, practic, inseparabile.

În aceste condiții eroziunea în zona de acțiune a plasmăi se manifestă prin apariția unui crater, al cărui diametru este egal cu diametru canalului de plasmă [7, 13].

În rezultatul cercetărilor efectuate ($S \geq 0,03$ mm), au fost stabilite condițiile favorabile pentru evidențierea caracterului multicanal al DEI. Această legătură a fost depistată pentru prima dată de I. Gh. Nekrașevici și I. A. Bacuto [151]. Cercetând caracterul discret al amprentelor de eroziune și desfășurată în timp a spectrogramelor descărcărilor electrice, autorii [151] au înaintat ipoteza unui mecanism de migrare a petelor electrodice, conform căruia, în fiecare moment de timp, curentul în impuls nu circulă prin toată zona de interacțiune a electrozilor, ci numai printr-o porțiune de suprafață mult mai mică, iar aceasta este funcție de locul în care se află pata electrodică la moment. Acest proces se realizează prin canale cu diametre foarte mici, care continuu „migrează” în zona

descărcării. Datorită diametrului foarte mic al canalului descărcării în punctul de interacțiune („pata”) cu electrodul, densitatea de curent este mare, (10^7 - 10^8 A/cm²), ceea ce provoacă încălzirea și vaporizarea explozivă a materialului electrodului. După prelevarea prin vaporizare explozivă, canalul dispare, ori se deplasează pe altă porțiune de suprafață. Rezultatul integral al eroziunii la o descărcare solitară este de fapt nu alt ceva decât un rezultat al eroziunilor elementare provocate de mulțimea de canale „migratoare” [151].

În funcție de condițiile evoluției descărcării, în punctele de contact ale plasmei din canalele de descărcare cu suprafețele electrozilor apar zone de interacțiune, denumite pete electrodice „reci” și „calde” [16, 70, 79, 151].

Petele „reci” apar imediat după străpungerea interstițiului și „se mișcă” foarte repede (urma erozivă se prezintă sub forma unor cratere mici separate ([79], fig. 8), fără semne evidente de topire), iar petele „calde” apar mai târziu pe locul celor „reci”, posedă o viteză mai mică „de mișcare” și produc o eroziune substanțial mai mare ca primele (în punctele de acțiune a lor apare faza lichidă a materialului electrodului [9, 16]).

Rezultatele cercetărilor experimentale ne indică faptul că, în diferite cazuri pot predomina petele „reci”, ori cele „calde” și ca rezultat, se schimbă caracterul eroziunii electrice, iar efectele termice de interacțiune a plasmei cu electrozii depind de mărimea interstițiului, parametrii descărcării și alți factori prin care poate fi determinat aspectul prelucrării. Ca exemplu poate fi adusă prelucrarea termică a oțelului 45 în vid [16], când în regimul arcului electric ponderea o au petele „reci”. În acest caz s-au obținut straturi de o grosime de $100 \div 200$ μ m, cu o duritate cca 790-820 daN/mm² (mai mare decât cea inițială, de $1,5 \div 2$ ori).

Apresiasi cantitativă a procesului de prelucrare prin electroeroziune cu aplicarea descărcărilor unitare, pentru valori mici ale interstițiului ($S < 0,2 \div 0,3$ mm), este practic imposibil de realizat din motivul transferului reciproc de masă între electrozi, formării legăturilor chimice (oxizi, nitrați, ș.a.) și mai cu seamă datorită schimbării foarte mici a masei probei cercetate, masa erodată la o descărcare fiind de cca ($10^{-6} - 10^{-4}$ g).

Pe figurile 11 și 12 din [79] sunt prezentate variațiile maselor catozilor din oțel, titan și a anozilor din cupru, oțel și, respectiv, din grafit în funcție de mărimea interstițiului. Pentru mărimile interstițiului de $S \leq 0,2 \div 0,3$ mm s-a depistat o creștere a masei catozilor ([79], fig. 11) care poate fi explicată pe baza transferului materialului anodului pe catod. În diapazonul valorilor interstițiului $S = 0,3 \div 0,8$ mm se observă o eroziune a catodului, iar pentru $S > 1,2 \div 1,5$ mm, când predomină interacțiunea petelor „reci”, uzura catodului este foarte mică.

Odată cu creșterea mărimii interstițiului eroziunea anozilor din cupru și oțel se micșorează ([79], fig. 12). Distribuția eroziunii anodului din grafit poartă un caracter diferit de cel al anozilor din oțel și cupru ([79], fig. 12) și este asemănător cu cel al catodului metalic ([79], fig. 11).

Din dependențele prezentate în figura 6 din [79] poate fi stabilită limita de separație a interacțiunii predominante a petelor „reci” sau „calde” cu suprafața catodului și caracterul eroziunii în intervalul cercetat, al mărimii interstițiului. Aceasta este important pentru alegerea regimului de prelucrare în lipsa depunerilor [16] și pentru determinarea particularităților interacțiunii particulelor de pulberi cu suprafața piesei (fază lichidă ori solidă) în cazul formării depunerilor din ele. În figura 3.2, zona hașurată reprezintă limitele de acțiune a petelor „calde”, între curbele 1 și 2 – zona de acțiune a petelor „reci” și „calde”, iar deasupra curbei 2 – numai acțiunea petelor „reci”, fără topirea suprafeței și schimbarea esențială a geometriei.

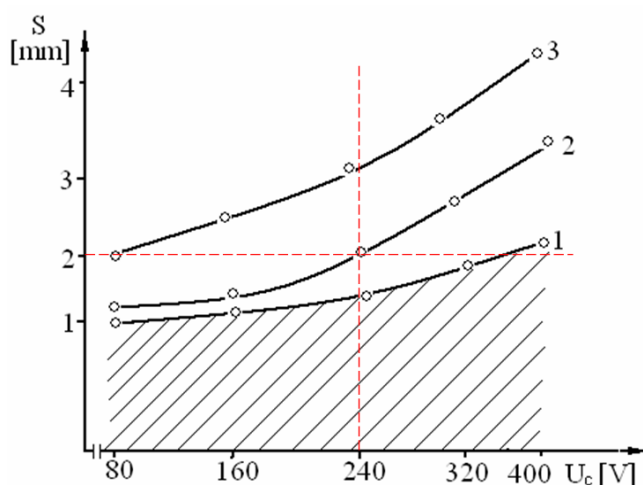


Fig. 3.2. Mărimea interstițiului S_f în funcție de tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare de lucru U_C care determină limitele existenței urmelor petelor „calde” sub formă de fază lichidă (porțiunea hașurată) și urmele petelor „reci” (sub curba 3); între curbele 1 și 2 se constată acțiunea ambelor tipuri de pete: „calde” și „reci” [16]

În rezultatul studierii suprafețelor catozilor și anozilor, supuși interacțiunii cu plasma DEI, au fost depistate niște vârfuri cu înălțimea de 0,1 – 0,7 mm, uniform distribuite pe toată suprafața acestora (fig. 3.2). Înălțimea maximă au avut-o vârfurile situate în zona frontală a electrozilor. Acestea au apărut pe suprafața activă conică sau sferică a electrozilor, când diametrul zonei de acțiune al petelor „reci” a rămas constant (curbele 1'÷5', fig. 6 din [79]).

Procesele fizico-chimice caracteristice prelucrării cu aplicarea DEI în regim de subexcitare. În cadrul cercetărilor experimentale executate anterior [13] a fost depistată dizolvarea anormală a oxigenului în oțeluri de construcție. Acest fenomen nu poate fi explicat în baza teoriei lui B.R. Lazarenko privind interacțiunea canalului de plasmă a descărcărilor electrice cu suprafețele electrozilor. În cazul formării depunerilor din materiale compacte și pulberi mărimea interstițiului format de electrozi este relativ mică (0,03 – 0,5 mm), deaceia observarea fenomenelor ce se produc în el este dificilă.

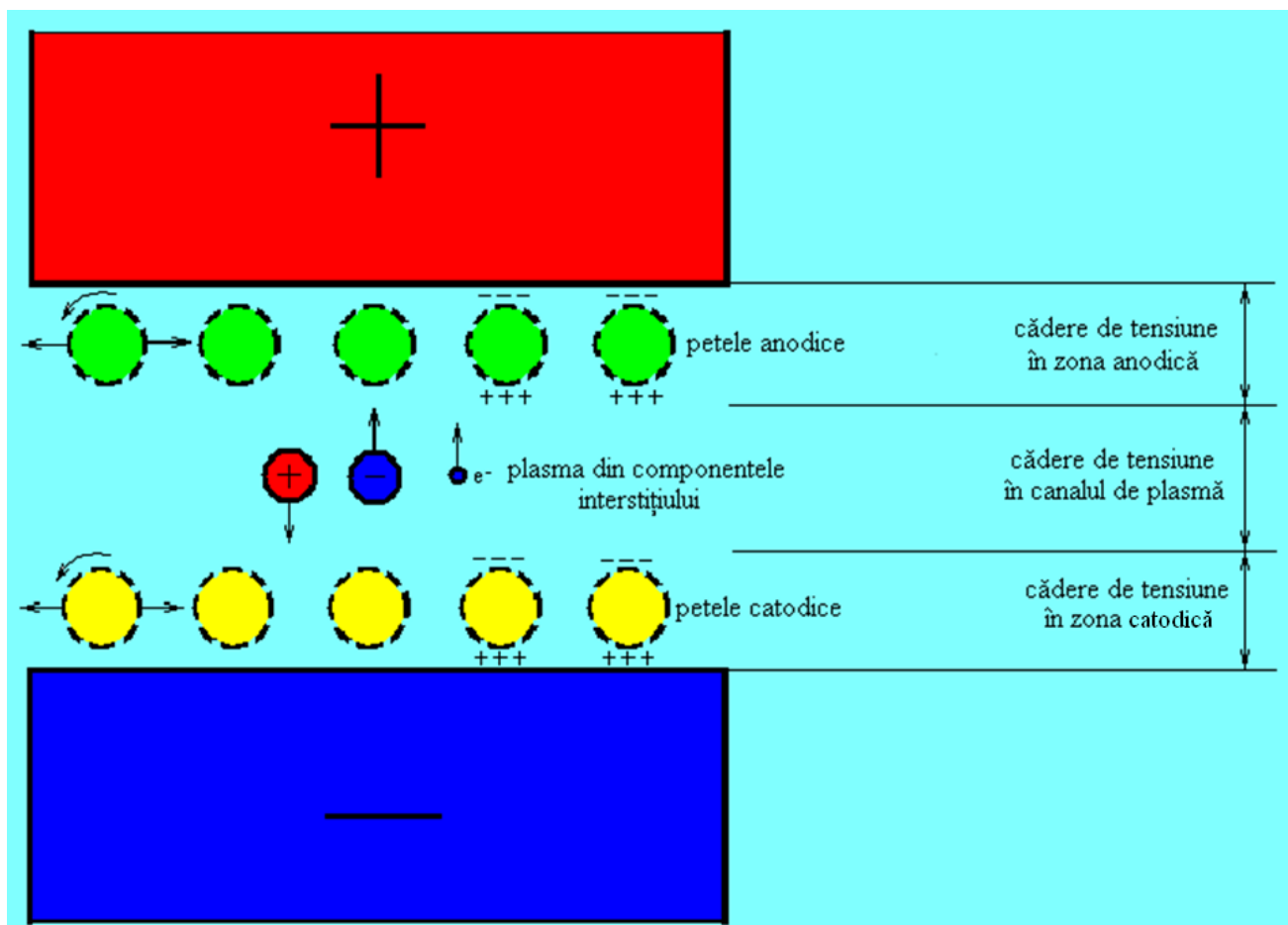
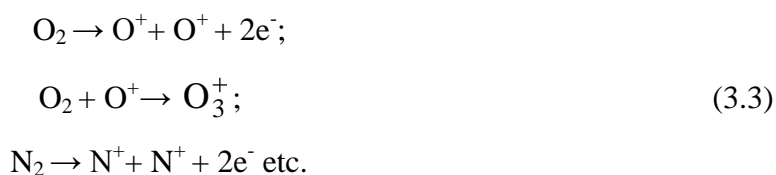


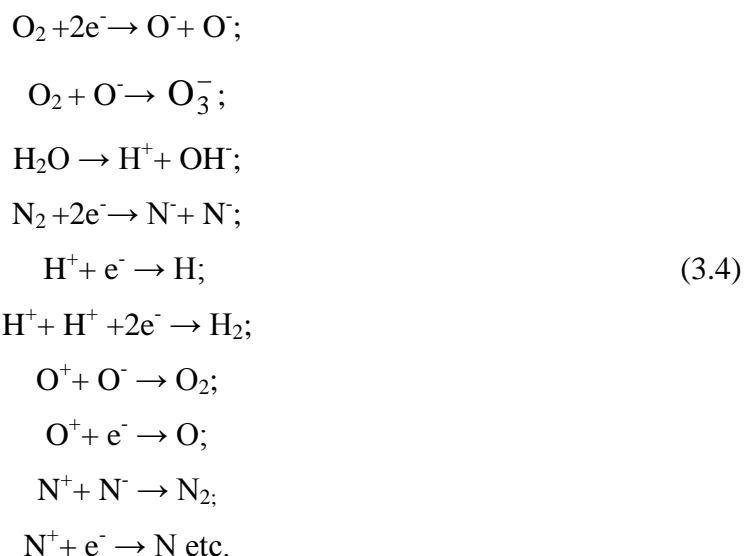
Fig. 3.3. Modelul fizic de formare a peliculelor de oxizi cu aplicarea DEI

Autorii mai multor lucrări în domeniu [83-86] au numit formațiunea din el „plasmă condensată”. În prezenta se propune a precăuta fenomenele în interstițiu pentru DEI, cum urmează: străpungerea interstițiului; nașterea petelor electrodice anodice și catodice; formarea canalului de plasmă sub acțiunea acestora (fig. 3.3). În cazul în care se admite un așa model, pot fi explicate și rezultatele interacțiunii plasmei cu suprafețele electrozilor. Spre exemplu în [16, 70, 79] se menționează că, petele electrodice sunt surse punctiforme de câmpuri electrice puternice și de căldură. În această situație la suprafața catodului și respectiv anodului iau naștere câmpuri electrice cu intensitatea de ordinul $10^6 - 10^7$ V/m, pe când intensitatea sumară a câmpurilor electrice pe interstițiu constituie numai 10^4 V/m.

În momentul străpungerii interstițiului electronii zmulși de pe suprafața catodului se îndreaptă spre anod. Electronii sunt accelerați în câmpul electric din interstițiu, se ciocnesc cu moleculele și atomii gazului din el și produc ionizarea mediului de lucru în conformitate cu reacțiile:



Paralel are loc disocierea și recombinarea mediului interstițial:



3.3. Interacțiunea plasmei DEI cu suprafețele electrozilor

Asupra electronilor și ionilor disociați acționează forțele câmpului electric:

$$\begin{aligned}
 F_e &= eE; \\
 F_q &= qE,
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

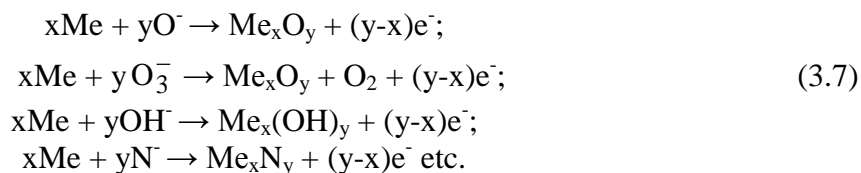
unde e și q sînt respectiv sarcina elementară și sarcina ionului.

Datorită temperaturii înalte în canalul de plasmă moleculele, atomii și ioni participă la o mișcare accelerată haotică cu viteze determinate de temperatura plasmei și masele particulelor elementare care pot fi exprimate cu relația:

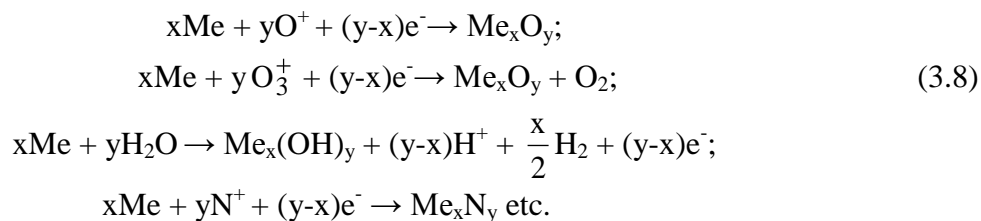
$$v = \sqrt{\frac{3kT}{m}}. \tag{3.6}$$

Atît viteza cît și direcția de mișcare a particulelor purtătoare de sarcină electrică pot fi modificate sub acțiunea forței Lorentz cauzată de parcurgerea interstițiului de curenți electrici de intensitate înaltă. Acțiunea forțelor gravitaționale și celor coulombiene dintre particulele elementare, asupra procesului de mișcare a acestora poate fi neglijată. Rezultanta tuturor forțelor care acționează asupra particulelor încărcate, moleculelor și atomilor din interstițiu le direcționează pe majoritatea dintre ele spre electrozi. La rîndul său, ele pot pătrunde în straturile superficiale ale electrozilor formînd elemente importante, pot interacționa cu materialul suprafeței piesei și sculei formînd oxizi, hidro-oxizi, nitruri etc. Reacțiile ce decurg la suprafețele electrozilor pot fi descrise cum urmează:

- la anod:



- la catod:



3.4. Procesele de difuzie la formarea peliculelor de oxizi cu aplicarea DEI

Din momentul aplicării DEI în scopuri tehnologice pentru prelucrarea dimensională [20-23], formarea depunerilor din materiale compacte și pulberi [5-16] au fost studiate procesele micro-metalurgice ce se produc în stratul de suprafață al piesei prelucrate atât în fază lichidă, cât și solidă. S-a stabilit că, formarea noilor aliaje în suprafața prelucrată este însoțită de amestecarea convectivă a componentelor în fază lichidă și difuzia elementelor în substrat din faza lichidă a depunerii. În lucrarea [16] a fost demonstrat că, pentru interstiții mai mari de 0,03 mm interacțiunea canalului de plasmă al DEI cu suprafața prelucrată se manifestă prin apariția unei amprente constituite din zona centrală ce prezintă un crater cu fază lichidă și zona influenței termice de culoarea metalului proaspăt decapat. Pentru anumite mărimi ale interstițiului, zona centrală dispăre, iar suprafața prelucrată prezintă numai zona influenței termice în care se produc fenomene de călire și îmbogățirea materialului piesei cu elemente ale mediului de lucru.

La tratarea termică sau termochimică a pieselor prin descărcări electrice în impulsuri unipolare prezintă de asemenea interes determinarea coeficientului de difuzie și a grosimii stratului superficial oxidat sau hidrooxidat. Conform lucrării [79] și celor menționate mai sus, putem afirma faptul că, în cazul aplicării impulsurilor unipolare, fiecare ciclu de tratare termică sau termochimică decurge în câteva etape: etapa de temperatură înaltă, când canalul de plasmă a DEI interacționează cu suprafața piesei prin intermediul petelor electrodice reci cu durata de viață 0.2...0,5 μs [15], și etapa de temperatură joasă, datorită pauzei dintre perioada acțiunii repetate a petei electrodice reci, cât și a pauzei dintre două descărcări electrice premărgătoare.

Durata de viață a petelor electrodice reci este funcție de densitatea maximă a curentului în interstițiu și poate fi determinată experimental prin filmări ultrarapide sau teoretic cu relația:

$$\begin{aligned}T_{pe} &= \tau / N_{pe} \\N_{pe} &= A / A_{pe}\end{aligned}\tag{3.9}$$

în care τ - este durata impulsului de descărcare; N_{pe} - numărul de pete electrodice existente în decursul unei descărcări solitare; A - aria suprafeței prelucrate la o descărcare electrică solitară și A_{pe} - aria suprafeței prelucrate de o pată electrodică .

În calculul grosimii peliculei de oxizi formată se va ține cont de relația experimentală obținută de către autorii lucrării [13, 16]:

$$h = kW_s / AS, \quad (3.10)$$

unde $W_s = \int_0^{\tau} U(t)I(t)dt$ - energia degajată în interstițiu la o descărcare solitară; U, I - cădere de

tensiune pe interstițiu și, respectiv, intensitatea momentană a curentului; τ - durata impulsului de descărcare; A - aria suprafeței de atac; S - mărimea interstițiului; k - coeficient de proporționalitate care depinde de proprietățile termofizice a materialului prelucrat. Cele relatate țin cont de densitatea volumică de energie în interstițiu și proprietățile materialului prelucrat și pot fi aplicate pentru a determina acțiunile integrale nepunând în evidență fenomenele reale ce decurg în interstițiu și pe suprafețele electrozilor.

În realitate, petele electrodice reci au un caracter migratoriu și selectiv, așa cum a fost menționat deja în lucrarea [15], aceste se deplasează pe suprafața prelucrată cu viteza de 70...100 m/s și iau naștere pe aspiritățile și impuritățile ei.

Dacă ținem cont de urmele lăsate de acestea pe suprafa (vezi fig. 2.4, b), atunci pentru o descărcare solitară urma lăsată de petele electrodice este una ramificată, ceea ce demonstrează atât caracterul migratoriu al acestora, cât și faptul că, imediat ce a avut loc oxidare, rezistența activă a suprafeței a sporit și condițiile de curgere ale curentului s-au agravat. La repetări ale DEI (fig. 2.4, c-i) putem observa că, caracterul de continuitate al prelucrării suprafeței sporește, acesta se datorește și faptului că, o parte din aspirități sau vaporizat, iar unele impurități au fost supuse volatilizării. Prelucrare de mai departe (la n cicluri) demonstrează că acesta are un caracter continuu (fig. 2.4, j-k) și rugozitatea ei constituie $R_a=0,1...0,2 \mu\text{m}$ [79]) ceea ce corespunde amprentelor petelor electrodice „reci”.

Prelucrările s-au efectuat pe suprafețele pieselor executate din oțeluri de construcție, aliaje ale titanului, aluminiului și cuprului. S-a constatat că atât cantitatea de oxigen dizolvat (până la 60% at. pentru aliajele fierului, 50% at. pentru aliajele cuprului, 35% at. pentru aliajele titanului, 20% at. pentru aliajele aluminiului), cât și adâncimea pătrunderii acestuia în probe este diferită în funcție de proprietățile materialului de execuții al ei. În condițiile aplicării DEI pentru oxidare superficială cele mai active s-au dovedit a fi oțelurile, după care urmează aliajele Al, Ti și Cu. Cele menționate confirmă într-un fel sau altul și comportarea acestor materiale în natură. Dacă se va ține cont de dimensiunile atomilor fiecărui element și de compactitatea rețelei cristaline, atunci rezultatele obținute se vor înscrie într-o legitate normală [79].

Analiza celor descrise în lucrările menționate permit a determina coeficientul efectiv de difuzie al elementelor D_{ef} , cu relația de forma:

$$D_{ef}t = N(D_1t_1 + D_2t_2 + \dots + D_nt_n + D_it_i) \quad (3.11)$$

în care: N – este numărul ciclurilor de tratare termică sau termochimică; D_1 – coeficientul de difuzie la prima interacțiune; D_2 - coeficientul de difuzie în pauza dintre prima și a doua interacțiune cu pata electrodică; D_n - coeficientul de difuzie în a n interacțiune; D_i - coeficientul de difuzie în pauza dintre două descărcări; t_1, t_2, \dots, t_n sunt duratele timpului de interacțiune a suprafeței prelucrate cu pata electrodică în decursul unei DEI; t_i este durata pauzelor dintre cele două descărcări premărgătoare, t - timpul total de tratare termică sau termochimică.

Cantitativ numărul ciclurilor de tratare termică sau termochimică corespunde cu numărul DEI pe suprafața tratată a piesei. Dacă ținem cont că fiecare descărcare electrică în impuls lasă pe suprafața tratată o amprentă sub formă de cerc, cu diametrul d_0 , atunci pentru o suprafață A_0 , pentru care se determină concentrația elementelor, putem scrie: ($A_0 = \pi d_0^2 / 4$), iar dacă suprafața tratată reprezintă un patrat cu latura a , aria suprafeței tratate este $A_d = a^2$. Ținând cont de faptul că, la tratarea termică sau termochimică a suprafețelor cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls, $A_d \geq A_0$, rezultă că numărul ciclurilor de tratare termică sau termochimică se va determina cu relația de forma:

$$N = (A_d / A_0) f \tau \quad (3.12)$$

în care f - reprezintă frecvența DEI, iar τ - timpul de tratare termică sau termochimică a suprafeței probei.

În intervalul de timp ce constituie pauza dintre două descărcări electrice premergătoare, redistribuirea elementelor în stratul de depunere nu are loc, deoarece temperatura este mică, iar ca rezultat viteza de difuzie în această perioadă este mult mai mică. Cercetările executate de către autorii lucrării [124] au demonstrat că straturile formate cu aplicarea DEI sunt compuse din două zone: prima este zona distribuției practic uniforme a elementelor de aliere – numită zona de amestecare - și cea de-a doua zona - numită difuzională. În prima zonă se produc procese metalurgice complicate, cauzate de vaporizarea, topirea și amestecarea fazelor lichide a materialelor de aliere și al matricei materialului piesei, pe când în cea de-a doua au loc procese de difuzie, cauzate de procesele termice în faza solidă, la adâncimi considerabile în materialul piesei. Cercetările s-au executat pentru cazul când suprafața prelucrată era supusă prepondrent în regim de difuzie al elementelor mediului de lucru în suprafață.

Pentru descrierea mecanismului propus ar putea fi aplicată în conformitate cu [79] ecuația unidimensională a difuziei elementelor dintr-un strat de grosimea h (în calitate de grosime a stratului inițial este considerată grosimea stratului catodic, adică grosimea stratului de aer cuprins între pata catodică și suprafața prelucrată a piesei) într-un corp semiinfinit:

$$\frac{\partial C_j}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_j}{\partial x^2}, (j = 1, \dots, N) \quad (3.13)$$

Condițiile inițiale pentru primul ciclu de tratare termică sau termochimică (prima interacțiune a petei electrodice ”reci” cu suprafața prelucrată) sunt după cum urmează:

$$C_1(x,0) = \begin{cases} C_0, & \text{pentru } 0 \leq x \leq h; \\ 0, & \text{pentru } x > h. \end{cases} \quad (3.14)$$

în care C_0 reprezintă concentrația inițială a materialului piesei din stratul de suprafață depus pe suprafața probei. În cazul interacțiunii suprafeței prelucrate cu petele electrodice ”reci” acesta poartă un caracter multiplu și la fiecare interacțiune premărgătoare în suprafață există deja o porțiune a acestuia cu compoziția modificată. Pentru ciclurile următoare condițiile inițiale se determină din distribuția concentrației elementelor din ciclul precedent, ținându-se cont de grosimea stratului depus în continuare:

$$C_j(x,0) = \begin{cases} C_0, & \text{pentru } 0 \leq x \leq h; \\ C_{j-1}(x-h), & \text{pentru } x > h. \end{cases} \quad j \geq 2. \quad (3.15)$$

Conform acesteia, grosimea stratului h se consideră constantă pentru fiecare ciclu de tratare termică sau termochimică și se determină separat pentru fiecare caz, reieșind din ecuația de echilibru a cantității de substanță cu relația:

$$h = \frac{\int_0^{\infty} C(x) dx}{C_0 N} \quad (3.16)$$

Din cele analizate putem afirma faptul că coeficientul efectiv de difuzie poate fi determinat experimental și în cazul aplicării impulsurilor unipolare după metodica descrisă în lucrarea [79], iar aplicând modelul matematic descris anterior determinăm grosimea stratului format.

În mod experimental s-a demonstrat că, grosimea stratului de oxizi format pe suprafețele metalice nu depășește ordinul sutelor de nanometri la interacțiuni multiple cu petele electrodice reci. În cazul asigurării interacțiunilor solitare aceasta nu va depăși ordinul nanometrilor.

3.5. Concluzii la capitolul III

Reieșind din rezultatele cercetărilor experimentale și analiza rezultatelor obținute la nivel teoretic putem concluda că:

- în cazul utilizării DEI în regim de subexcitare este semnificativ faptul că, asupra interstițiului se aplică un impuls de putere mică, dar tensiune înaltă (de ordinul 10 kV) care este responsabil de formarea canalului de conductibilitate prin care apoi se degajă energia acumulată pe baterea de condensatoare a generatorului de impulsuri;
- la aplicarea descărcărilor electrice componentele mediului interstițial interacționează cu materialul suprafeței piesei și sculei formînd oxizi, hidro-oxizi, nitruri etc.;
- dirijind numărul interacțiunilor petelor electrodice cu suprafața piesei poate fi reglată adâncimea de difuzie a elementelor din interstițiu;
- procesele de difuzie a elementelor în suprafața piesei prelucrate sunt determinate de tipul și timpul interacțiunii canalului de plasmă cu suprafața prelucrată.

IV. CERCETĂRI TEHNOLOGICE PRIVIND FORMAREA PELICULELOR DE OXIZI PE SUPRAFEȚELE METALICE ALE ALIAJELOR DE FIER, CUPRU, ALUMINIU ȘI TITAN

4.1. Conectarea electrozilor în circuitul de descărcare a generatorului de impulsuri

În scopul de a stabili modul de conectare a piesei și a electrodului-sculă în circuitul de descărcare a generatorului de impulsuri au fost efectuate încercări de probă variind mărimea interstițiului, tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare și capacitatea lor, adică variind energia și puterea DEI.

În fig. 4.1 și 4.2 sînt prezentate vederile generale ale suprafețelor probelor din oțel 3 și oțel 45 după prelucrare în condiții normale la diferite regimuri energetice conform schemei din fig. 2.1a.

Analizînd suprafețele prelucrate s-a observat că un strat mult mai uniform de oxizi și fără zone de străpungere a acestuia s-a format pe probele care au fost conectate în circuitul de descărcare în calitate de catod. Este necesar a menționa că, suprafețe mult mai calitative de o continuitate deplină se atestă pentru tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare de 160-240V la un interstițiu de 1-2 mm (ce corespunde puterii impulsului disipate în interstițiu $P_S=15...25$ kW). Acest fenomen poate fi lămurit în baza petei mari de contact al canalului de plasmă cu suprafața prelucrată și valoarea optimă a densității de energie și puterii degajate în interstițiu, pe de o parte, și prin faptul că, plasma care s-a format în interstițiu conține ioni pozitivi ai oxigenului care sub acțiunea forțelor electrodinamice ale cîmpului electric din interstițiu se mișcă spre suprafața prelucrată a catodului.

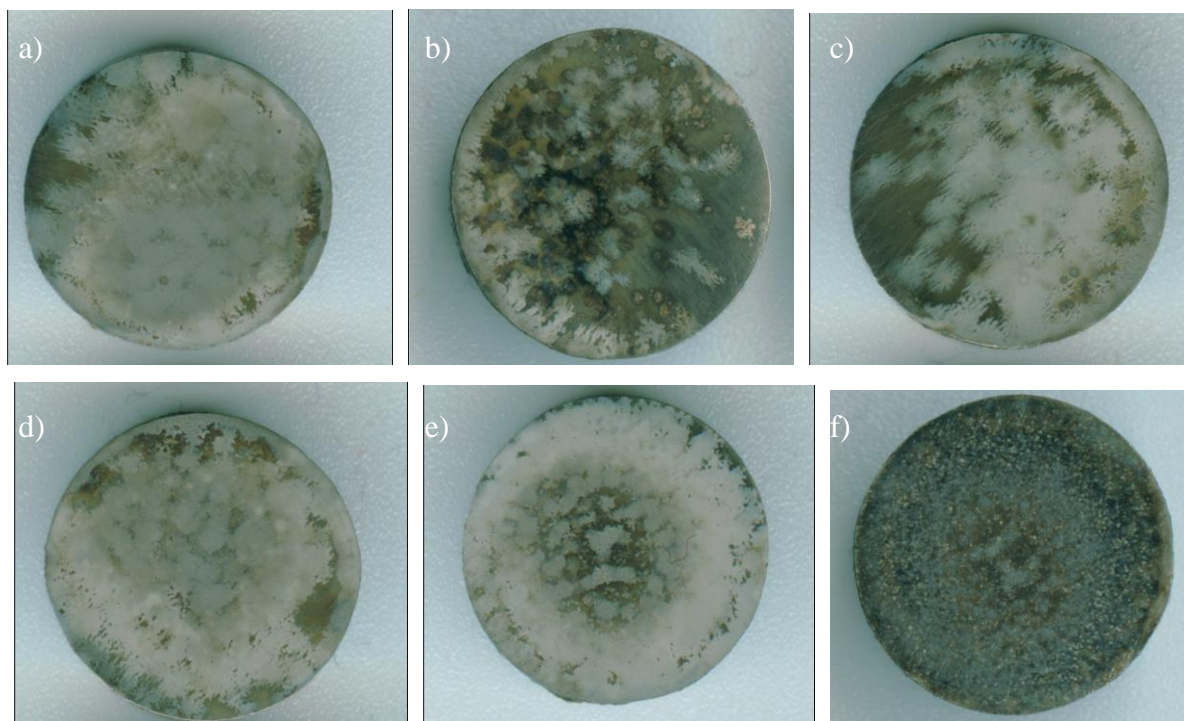


Fig. 4.1. Suprafața probelor din oțel 3 după prelucrare:

$C = 8 \mu\text{F}$, $f = 8 \text{ Hz}$: a) piesa – catod, $S = 1 \text{ mm}$, $U = 400 \text{ V}$; b) piesa – anod, $S = 1 \text{ mm}$, $U = 400 \text{ V}$;
c) piesa – catod, $S = 1,2 \text{ mm}$, $U = 500 \text{ V}$; d) piesa – catod, $S = 0,75 \text{ mm}$, $U = 300 \text{ V}$;
 $C=8\mu\text{F}$, $f=16 \text{ Hz}$: e) piesa – catod, $S = 0,5 \text{ mm}$, $U = 250 \text{ V}$; f) piesa – anod, $S = 0,5 \text{ mm}$, $U = 250 \text{ V}$

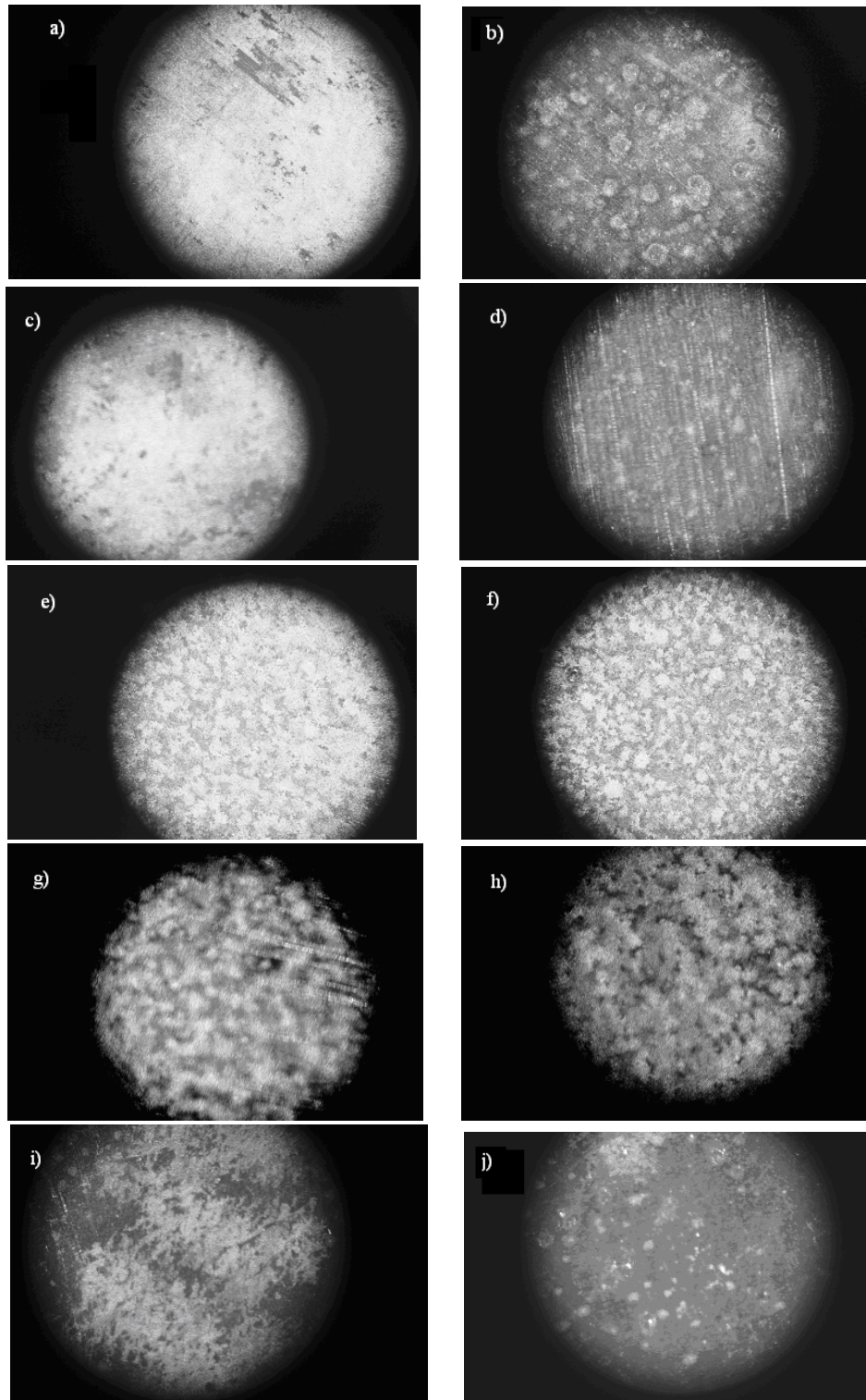


Fig. 4.2. Suprafața probelor din oțel 45 după prelucrare ($C = 8 \mu\text{F}$, $f = 40 \text{ Hz}$):
 a) piesa – catod, $S = 1 \text{ mm}$, $U = 400 \text{ V}$; b) piesa – anod, $S = 1 \text{ mm}$, $U = 400 \text{ V}$;
 c) piesa – catod, $S = 1 \text{ mm}$, $U = 300 \text{ V}$; d) piesa – anod, $S = 1 \text{ mm}$, $U = 300 \text{ V}$;
 e) piesa – catod, $S = 0,5 \text{ mm}$, $U = 130\text{V}$; f) piesa – anod, $S = 0,5 \text{ mm}$, $U = 130 \text{ V}$;
 g) piesa – catod, $S = 0,5 \text{ mm}$, $U = 100\text{V}$; h) piesa – anod, $S = 0,5 \text{ mm}$, $U = 100 \text{ V}$;
 i) piesa – catod, $S = 1,2 \text{ mm}$, $U = 400\text{V}$; j) piesa – anod, $S = 1,2 \text{ mm}$, $U = 400 \text{ V}$

Suprafața catodului fiind activată de către petele electrodice favorizează procesul de oxidare și difuzie a elementelor mediului în adâncimea piesei. Pe suprafețele probelor-anozi (la suprafețele cărora căderea de tensiune este mai înaltă) se observă cratera formate în urma străpungerii stratului de oxizi. În același timp procesul de oxidare a acestuia decurge mai puțin intens din motivul bombardării acestuia cu electroni emiși de către catod. Aceasta se datorește și faptului că pe lângă anodul care are sarcină pozitivă se acumulează electronii, ei având energia mare dovedesc să încălzească stratul subțire de dielectric de pe suprafața anodului și să-l străpungă.

4.2. Grosimea peliculelor de oxizi în funcție de parametrii de intrare

Prin metoda osciloscopării conform schemei de măsurare din fig. 2.6 a fost măsurată tensiunea și curentul în interstițiu, iar prin metoda integrării cu ajutorul formulei (2.7) calculată energia degajată în interstițiu. Puterea disipată în interstițiu la o descărcare solitară a fost determinată cu formula (2.8).

Dependența grosimii stratului de oxid δ de puterea disipată în interstițiu este prezentată în fig. 4.3, iar de mărimea interstițiului – în fig. 4.4.

Analizând curbele prezentate în fig. 4.3 și 4.4 vom observa că, grosimea stratului de oxizi crește exponențial odată cu valoarea parametrilor energetici de intrare. Acest lucru poate fi explicat prin faptul că, odată cu creșterea mărimii lor, randamentul energiei, și respectiv, puterii degajate în interstițiu devine mai mic [123], în același timp crește și rezistența activă a interstițiului și o mai mare cantitate de energie este cheltuită pentru așa efecte secundare cum ar fi sporirea luminozității și intensității sunetului creat de unda de șoc.

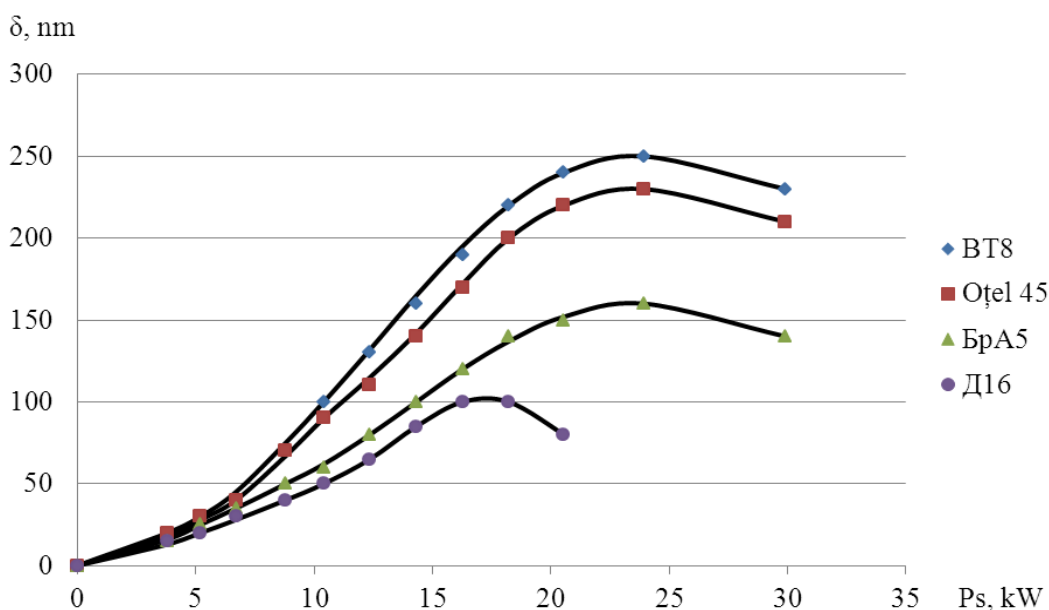


Fig. 4.3. Dependența grosimii peliculelor de oxizi de puterea disipată în interstițiu. Materialul piesei-catod și a electrodului-sculă: \blacklozenge – aliajul titanului BT8; \blacksquare – oțel 45; \blacktriangle – aliajul cuprului БрА5; \bullet – aliajul aluminiului Д16. Schema de prelucrare conform fig. 2.1a

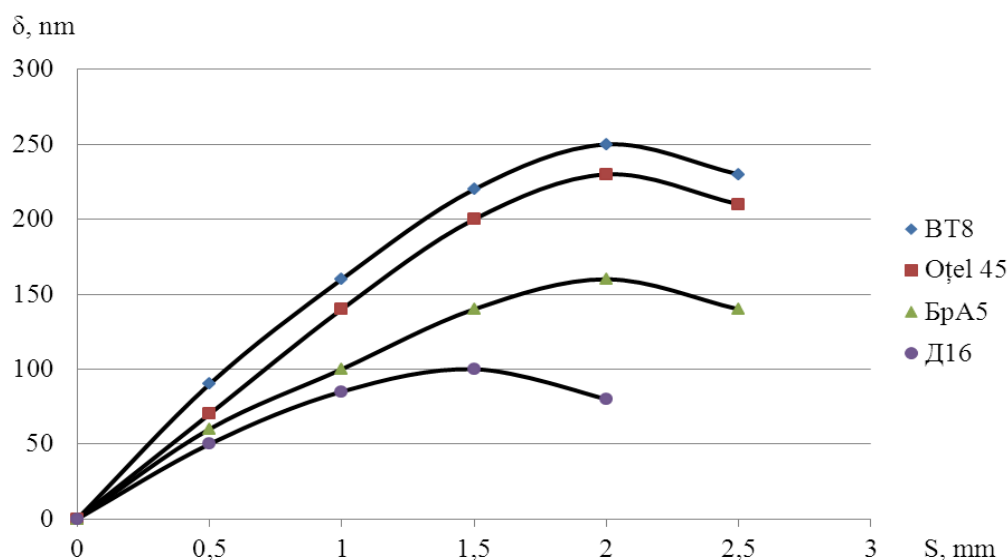


Fig. 4.4. Dependența grosimii peliculelor de oxizi de mărimea interstițiului. Materialul piesei-catod și a electrodului-sculă: \blacklozenge – aliajul titanului BT8; \blacksquare – oțel 45; \blacktriangle – aliajul cuprului БpA5; \bullet – aliajul aluminiului Д16. Schema de prelucrare conform fig. 2.1a

La aplicarea puterii impulsului descărcării electrice mai mare de valoare critică (pentru aliajele titanului, fierului și cuprului această valoare este 30 kW, iar pentru aliajele aluminiului – 20 kW) cresc procesele de evaporare a stratului superficial supus prelucrării, ceea ce duce la micșorarea grosimii peliculelor de oxizi.

Valoarea optimală a puterii impulsurilor pentru oxidarea superficială a suprafețelor metalice constituie $P_S=20\dots30$ kW la mărimi ale interstițiului $S=1,5\dots2$ mm pentru aliajele fierului, titanului și cuprului și, respectiv, $P_S=15\dots20$ kW și $S=1,0\dots1,5$ mm pentru aliajele aluminiului.

4.3. Dependența lățimii fâșiei peliculei de oxid de regimul energetic de prelucrare

Rezultatele cercetărilor experimentale privind determinarea dependenței lățimii fâșiei de oxidare de regimul energetic de prelucrare sînt prezentate în Anexa 1 tab. A.1.2, tab. A.1.3 și în fig. 4.5.

Din fig. 4.5 putem observa că, dependențele lățimii fâșiei prelucrate pe suprafața piesei-catod în funcție de puterea disipată în interstițiu reprezintă o dependență parabolică pentru toate materialele prelucrate. Procesul decurge mai inensiv pe suprafețele probelor din aliajul titanului, oțel și la fine este situat aliajul aluminiului. Aceste efecte pot fi lămurite în baza proprietăților de emisie a electronilor de aceste materiale cît și de aviditatea elementelor constituente ale acestora față de oxigen.

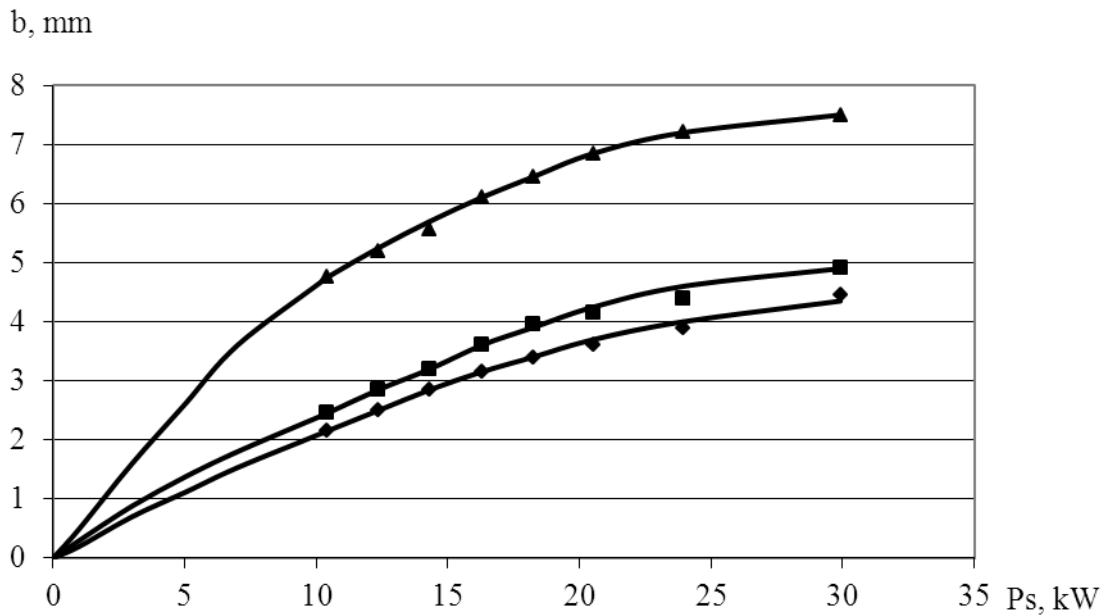


Fig. 4.5. Dependența lățimii fășiei de oxidare de puterea impulsului disipată în interstițiu pentru probele executate respectiv din: \blacklozenge – Д-16; \blacksquare – oțel 45; \blacktriangle – BT8
Schema de prelucrare conform fig. 2.1c

4.4. Aproximarea dependențelor tehnologice

Dependențele tehnologice obținute după prelucrare matematică conform metodicilor descrise în paragraful 2.5 (Anexa 3, fig. A.3.1-A.3.10) pot fi approximate cu ecuațiile:

- 1) Grosimea peliculei de mărimea interstițiului:

$$\delta_{Ti} = \frac{373 \cdot S^{1,53}}{e^{0,77 \cdot S}}; \quad \delta_{Fe} = \frac{379 \cdot S^{1,82}}{e^{0,91 \cdot S}}; \quad \delta_{Cu} = \frac{231 \cdot S^{1,46}}{e^{0,73 \cdot S}}; \quad \delta_{Al} = \frac{213 \cdot S^{1,51}}{e^{1,01 \cdot S}}; \quad (4.1)$$

- 2) Grosimea peliculei de puterea disipată în interstițiu:

$$\delta_{Ti} = \frac{0,12 \cdot P_S^{3,52}}{e^{0,15 \cdot P_S}}; \quad \delta_{Fe} = \frac{0,08 \cdot P_S^{3,67}}{e^{0,15 \cdot P_S}}; \quad \delta_{Cu} = \frac{0,05 \cdot P_S^{3,66}}{e^{0,15 \cdot P_S}}; \quad \delta_{Al} = \frac{0,01 \cdot P_S^{5,08}}{e^{0,28 \cdot P_S}}. \quad (4.2)$$

- 3) Lățimea fășiei de oxidare de puterea disipată în interstițiu:

$$\begin{aligned} b_{Al} &= 0,46 \cdot P_S^{0,68}; \\ b_{Fe} &= 0,55 \cdot P_S^{0,66}; \\ b_{Ti} &= 1,66 \cdot P_S^{0,46}. \end{aligned} \quad (4.3)$$

4.5. Productivitatea formării peliculelor de oxizi

Pentru apreciere cantitativă a productivității a fost măsurat timpul specific de prelucrare T [s/cm^2] sau [min/cm^2], care reprezintă timpul de prelucrare a unei suprafețe cu aria $A = 1 \text{ cm}^2$. Sfirșitul prelucrării se înregistrează când nu mai apare descărcare între probele cercetate, faptul ce ne indică că pe suprafața s-a format o peliculă de oxizi continuă.

Productivitatea se calculează ca valoarea inversă a timpului specific de prelucrare:

$$\eta = \frac{1}{T} \text{ [cm}^2/\text{min]}. \quad (4.4)$$

4.5.1. Influența frecvenței impulsurilor descărcărilor electrice asupra intensității formării peliculelor de oxizi

În cazul formării peliculelor de oxizi pe suprafețele metalice prin DEI viteza de prelucrare poate fi schimbată variind frecvența impulsurilor. Variația frecvenței impulsurilor este posibilă prin rotirea manetei blocului de comandă a generatorului de impulsuri într-o poziție gradată respectiv.

Pentru cercetări experimentale a fost stabilită mărimea interstițiului $S = 2 \text{ mm}$, capacitatea bateriei de condensatoare $C = 600 \text{ }\mu\text{F}$, tensiunea de încărcare a bateriei $U_c = 240 \text{ V}$ și frecvența impulsurilor $f = 2 \div 40 \text{ Hz}$. Rezultatele cercetărilor sînt prezentate în Anexa 1, tab. A.1.4 și în fig. 4.6.

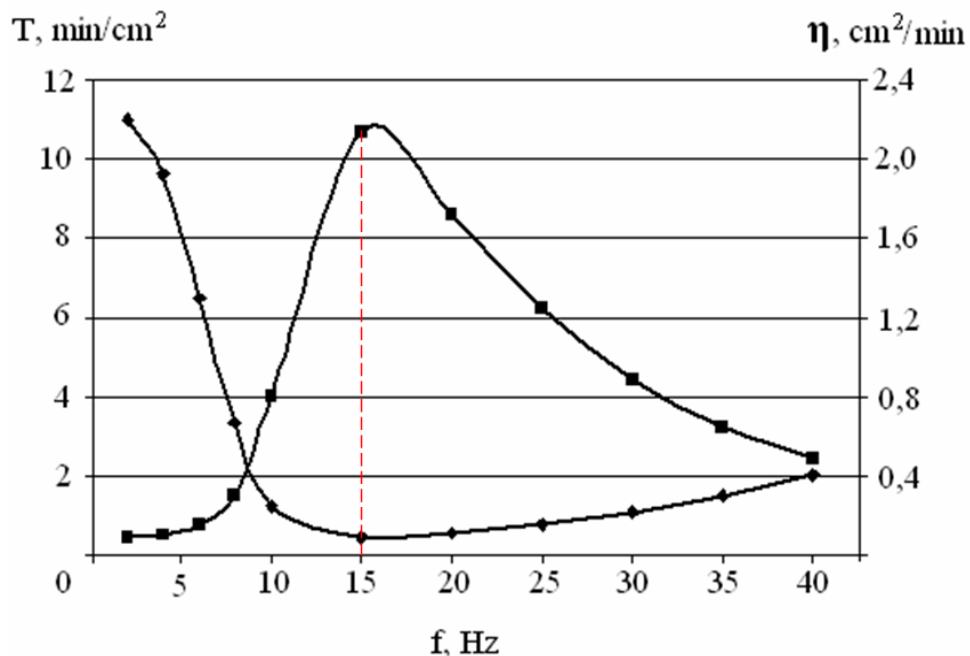


Fig. 4.6. Dependența timpului specific de prelucrare (\blacklozenge) și productivității formării peliculelor de oxizi (\blacksquare) pentru suprafețe conjugate ale electrozilor din oțel 45 de frecvența impulsurilor: mărimea interstițiului $S = 2 \text{ mm}$; capacitatea bateriei de condensatoare $C = 600 \text{ }\mu\text{F}$; tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare $U_c = 240 \text{ V}$.

Schema de prelucrare conform fig. 2.1a

Odată cu mărirea frecvenței impulsurilor de descărcare (de la 0 la 15 Hz) crește și productivitatea, atingând valoarea maximală $\eta \approx 2,14 \text{ cm}^2/\text{min}$ pentru $f = 15 \text{ Hz}$, iar pentru valori $f > 15 \text{ Hz}$ productivitatea scade hiperbolic.

Micșorarea productivității formării peliculelor de oxizi se datorește faptului că bateria de condensatoare nu dovedește să se încarce total, iar mediul de lucru din interstițiu nu se restabilește complet și din această cauză scade energia de descărcare, ceea ce duce la micșorarea volumului canalului de plasmă și, ca rezultat, la micșorarea zonei de influență termică pe suprafața de prelucrare. Pentru anihilarea acestui efect nedorit se propune de micșorat valoarea rezistenței de balast (sau de înlocuit totalmente pe rezistența de balast cu cheia electronică) pentru a micșora timpul de încărcare a bateriei de condensatori a generatorului de impulsuri și de acordat alimentarea suplimentară a interstițiului cu oxigen pentru restabilirea mediului de lucru.

Luând în considerație valoarea optimală a frecvenței impulsurilor, pentru care s-a obținut maximum, cercetările influenței a altor parametri asupra productivității formării peliculelor de oxizi au fost efectuate pentru $f = 15 \text{ Hz}$.

4.5.2. Influența energiei degajate în interstițiu asupra intensității formării peliculelor de oxizi

În cazul cercetării influenței energiei degajate în interstițiu, valoarea ei a fost schimbată variind capacitatea bateriei de condensatoare și tensiunea de încărcare a capacităților. Rezultatele experimentale sînt prezentate în Anexa 1, tab. A.1.5 și în fig. 4.7.

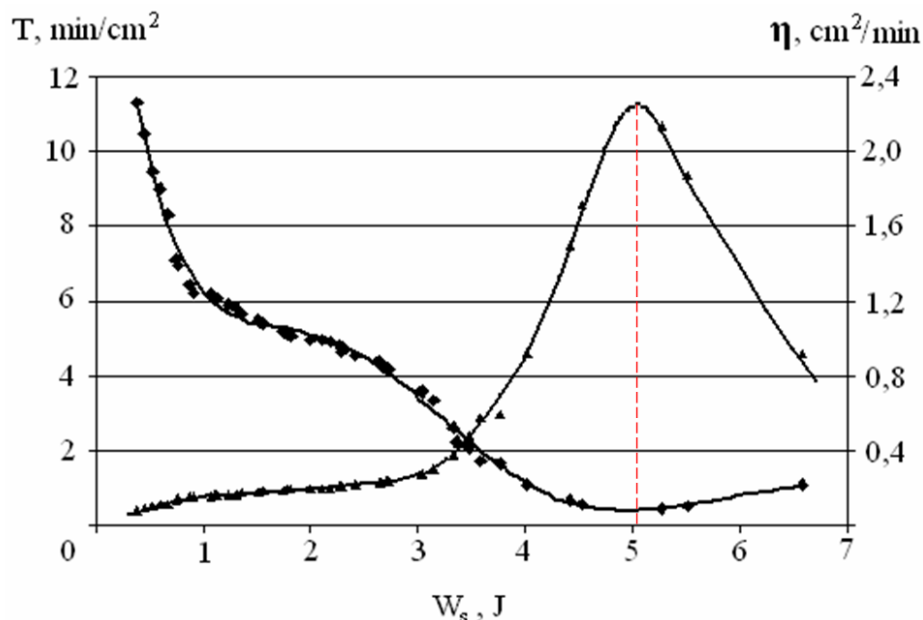


Fig. 4.7. Dependența timpului specific de prelucrare (\blacklozenge) și productivității formării peliculelor de oxizi (\blacktriangle) pentru suprafețe conjugate ale electrozilor din oțel 45 de energia degajată în interstițiu.

Frecvența impulsurilor $f=15 \text{ Hz}$
 Schema de prelucrare conform fig. 2.1a

Obținerea unui maximum în acest caz (pentru $W_s \approx 5$ J, la capacitatea bateriei de condensatoare $C = 600 \mu\text{F}$, tensiunea de încărcare a bateriei $U_C = 240$ V și distanța între electrozi $S = 2$ mm) poate fi explicată prin faptul că la energii mai mari asupra stratului superficial al probei, în afară de petele electrodice „reci”, acționează și petele „calde” (fig. 3.2), care provoacă topirea suprafeței în zona de descărcare, ceea ce duce la reînnoirea ei și, ca consecință, la posibilitatea de străpungere a interstițiului.

4.5.3. Influența distanței dintre electrozi asupra intensității formării peliculelor de oxizi

Dependența timpului specific de prelucrare și productivității formării peliculelor de oxizi pentru suprafețe conjugate ale electrozilor din oțel 45 de mărimea interstițiului pentru trei valori a tensiunii de încărcare a bateriei de condensatoare de capacitate $C = 600 \mu\text{F}$ este prezentată în Anexa 1, tab. A.1.6 și în fig. 4.8.

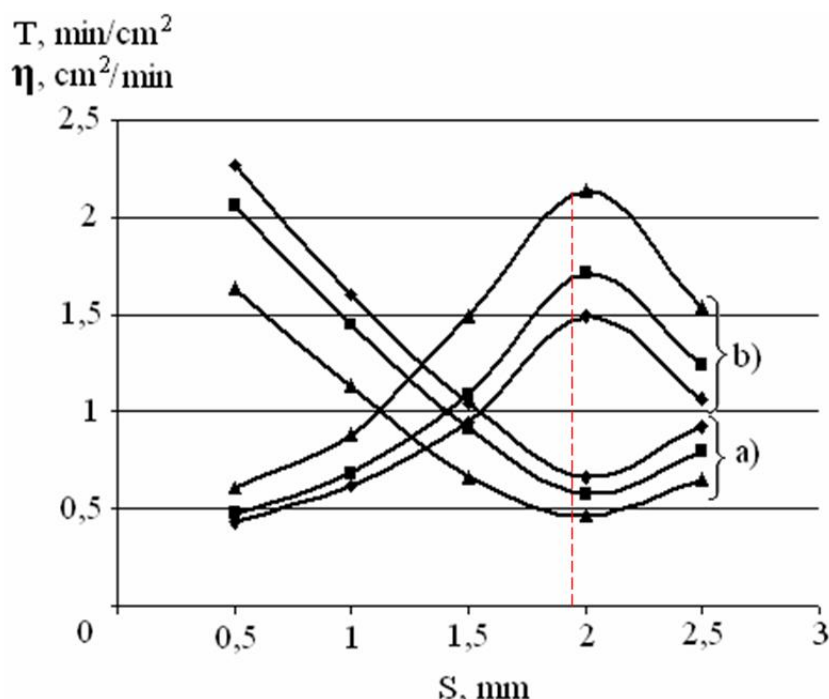


Fig. 4.8. Dependența timpului specific de prelucrare (a) și productivității formării peliculelor de oxizi (b) pentru suprafețe conjugate ale electrozilor din oțel 45 de mărimea interstițiului: energia degajată în interstițiu W_s : ◆ - 3,5÷4 J; ▲ - 4÷4,5 J; ■ - 4,5÷5 J. Frecvența impulsurilor $f=15$ Hz, capacitatea bateriei de condensatoare $C = 600 \mu\text{F}$. Schema de prelucrare conform fig. 2.1a

După cum a fost stabilit anterior [79], dependența volumului zonei centrale fierbinți a canalului de plasmă în funcție de mărimea interstițiului ([79], fig. 29) capătă un maximum pentru $S=1,5\div 2$ mm în cazul energiei degajate în interstițiu $W_s=3,5\div 6$ J. Maximum cantității de căldură în canalul de plasmă corespunde productivității maxime de pe fig. 4.8 (pentru toate 3 cazuri ($W_s = 3,5\div 4$ J, $W_s = 4\div 4,5$ J și $W_s = 4,5\div 5$ J) maximum s-a obținut pentru $S=1,5\div 2$ mm).

Așa dar, luând în considerație influența parametrilor DEI asupra intensității formării peliculelor de oxizi pe suprafețele conjugate din oțeluri de construcție a fost stabilit regimul optimal de prelucrare: frecvența impulsurilor de descărcare $f = 15$ Hz; distanța dintre electrozi $S = 1,5-2$ mm; capacitatea bateriei de condensatoare a generatorului de putere $C = 600$ μ F; tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare $U_c = 240$ V (valoarea medie a energiei degajate în interstițiu pentru acești valori $W_s = 5,27$ J). Timpul specific de prelucrare în acest caz nu întrece $0,5$ min/cm², iar productivitatea constituie $\eta \approx 2,14$ cm²/min.

4.6. Interdependența compoziției chimice și de fază a peliculelor formate și proprietățile acestora

4.6.1. Compoziția chimică și de fază a peliculelor formate

Rezultatele analizelor SEM și EDX a probelor prelucrate la regimul optimal stabilit sînt prezentate în fig. 4.9-4.12, Anexa 2, fig. A.2.1-A.2.24 și în tab. 4.1.

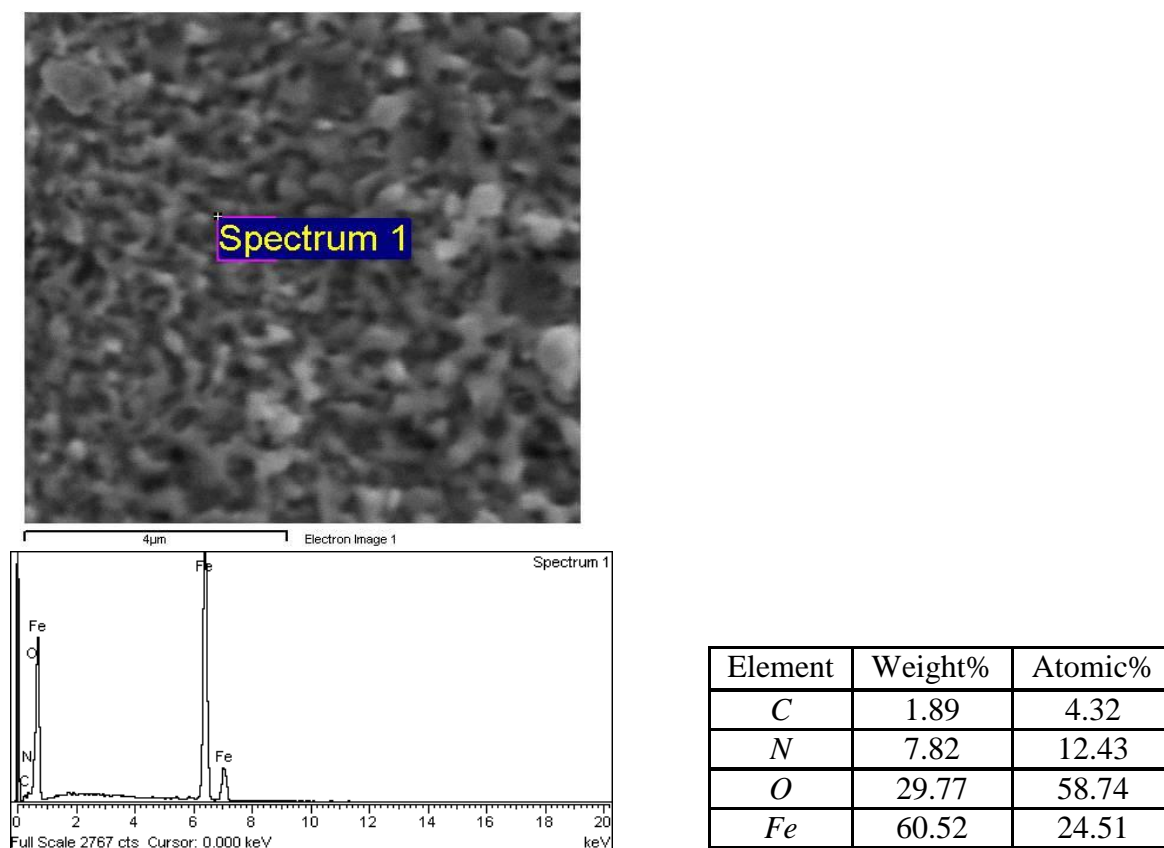


Fig. 4.9. Microscopie electronică (SEM) TESCAN a stratului superficial din oțel 45 prelucrată cu aplicarea DEI

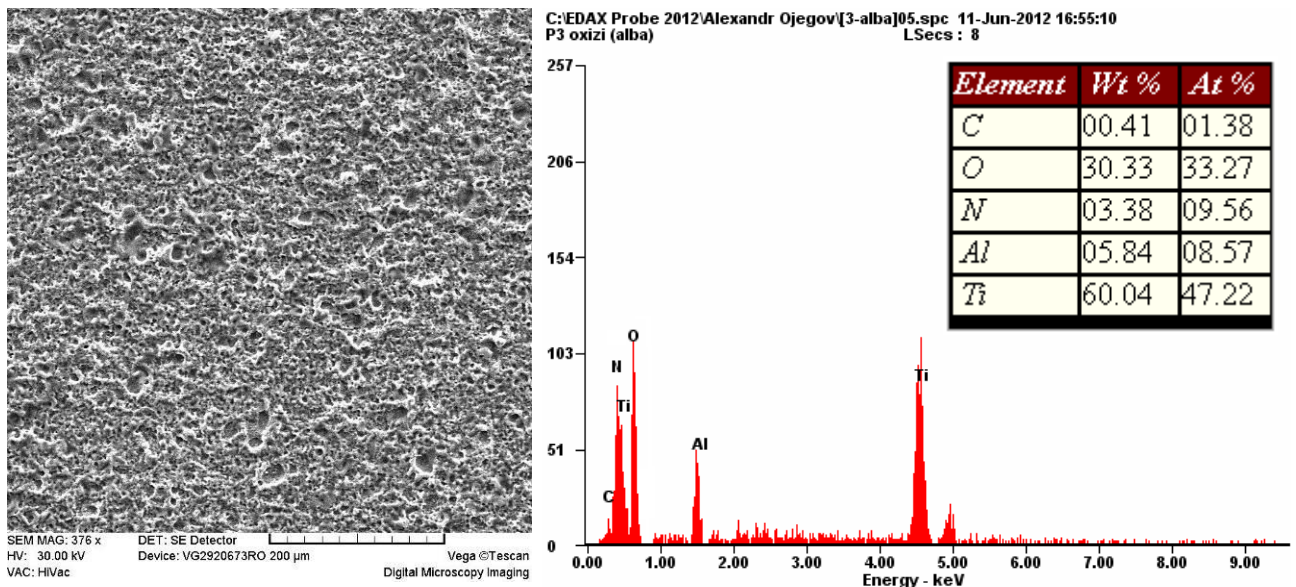


Fig. 4.10. Analiza SEM și EDX a suprafeței aliajului titanului BT8

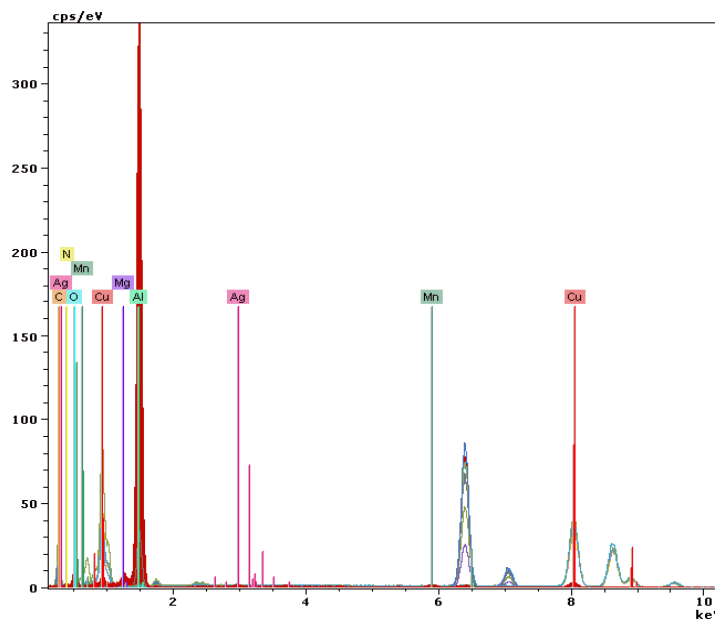
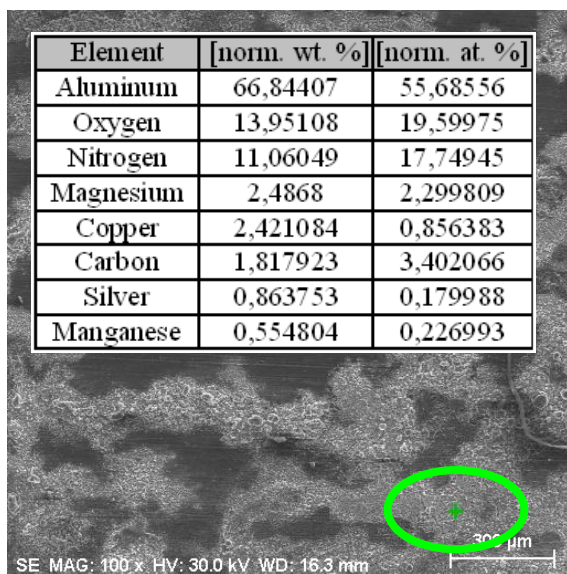
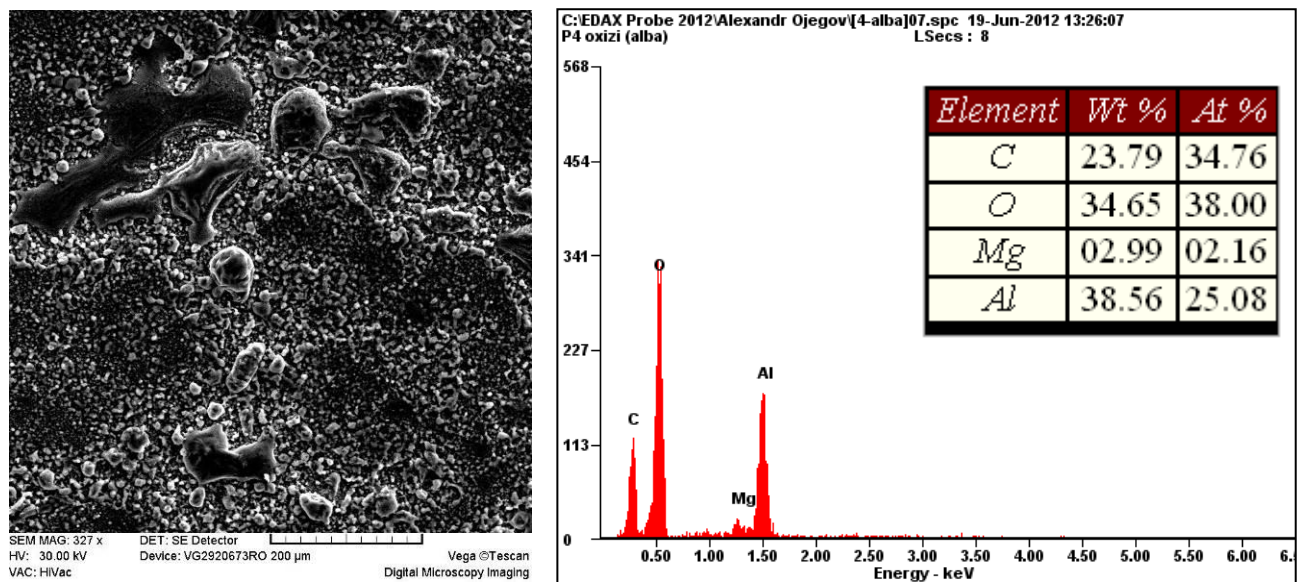
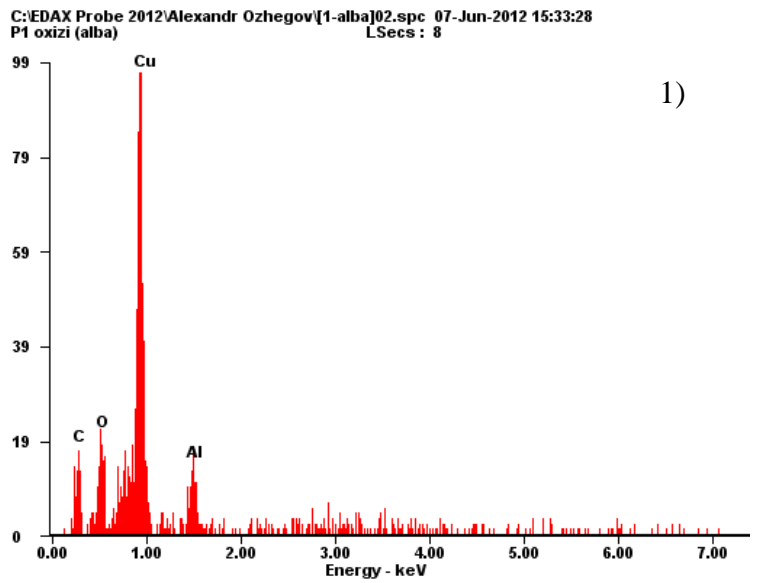
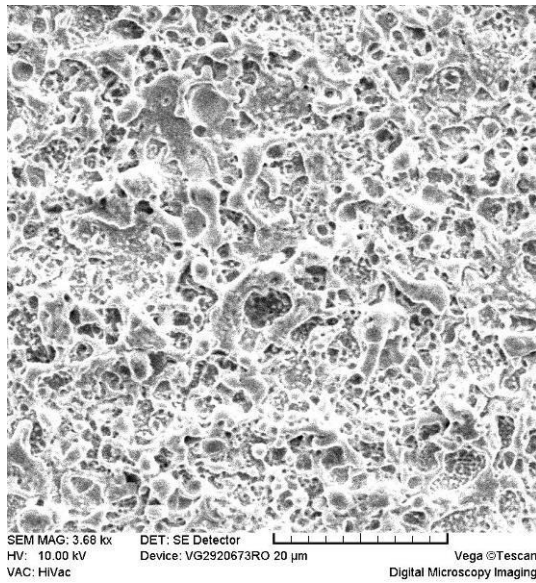
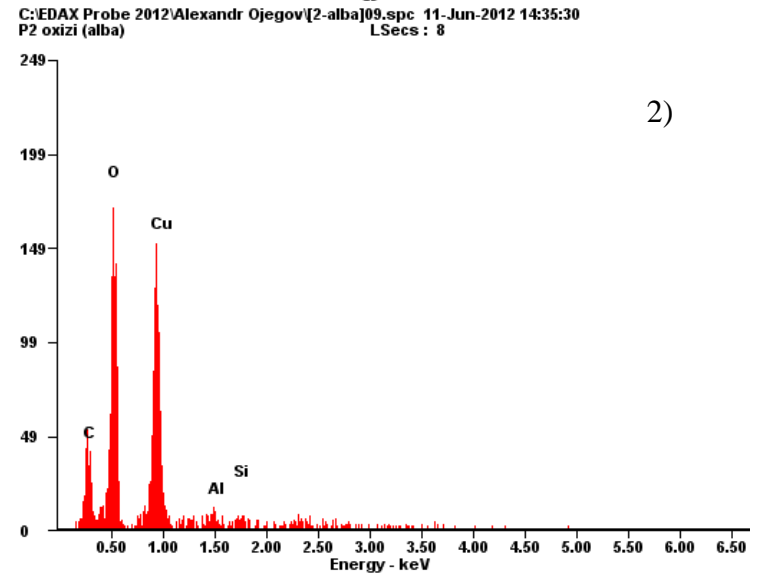
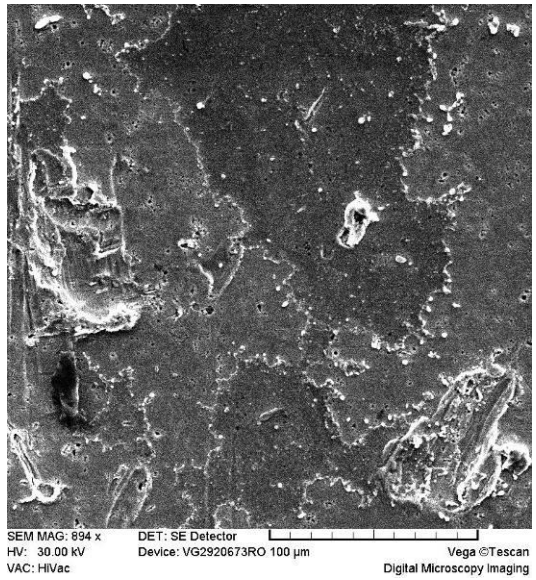


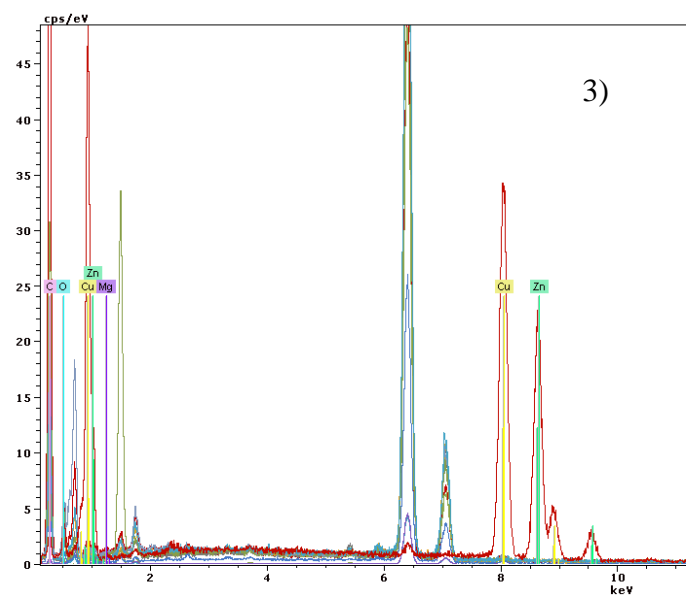
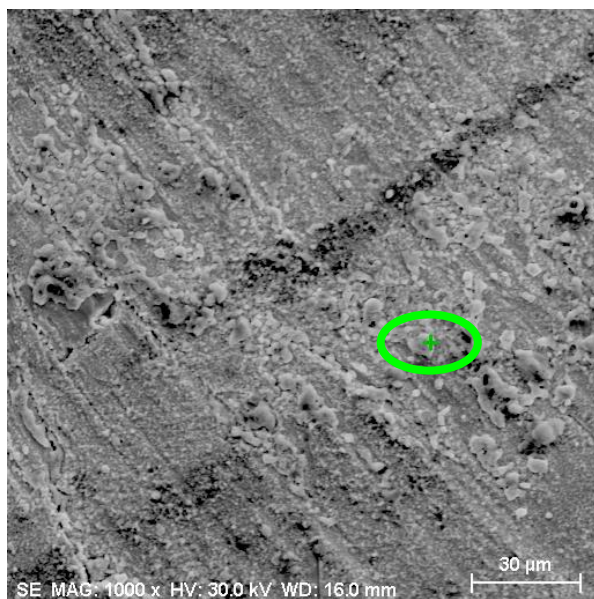
Fig. 4.11. Analiza SEM și EDX a suprafeței aliajului aluminiului D16



1)



2)



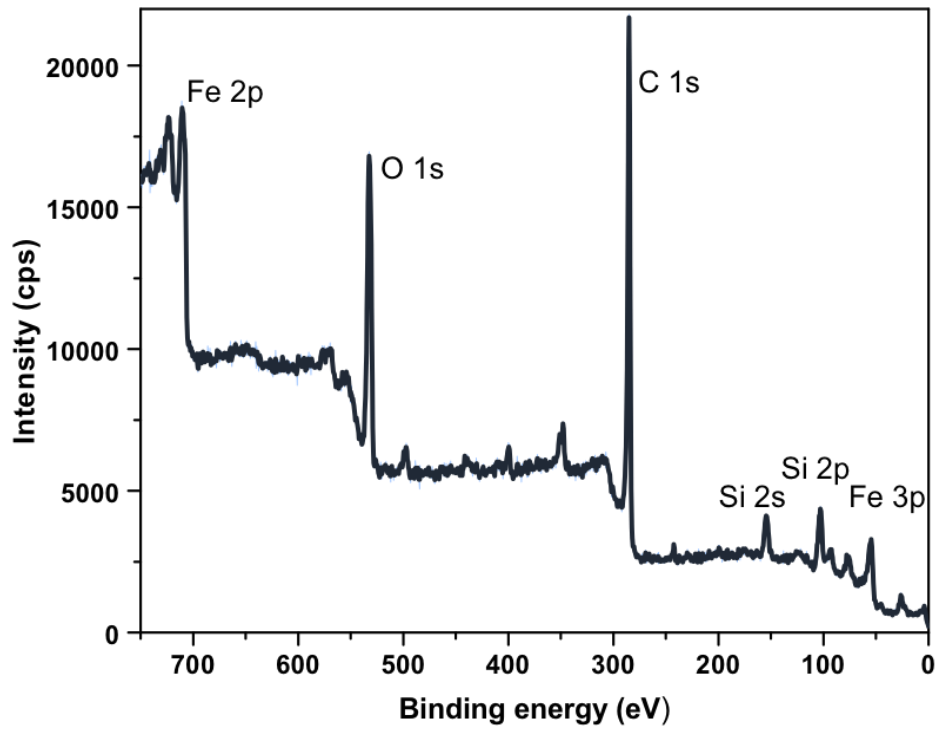
3)

Fig. 4.12. Analiza SEM și EDX a suprafeței aliajelor cuprului:
1 – cupru ethnic pur M0; 2 – bronz БpA5; 3 – alamă JI63

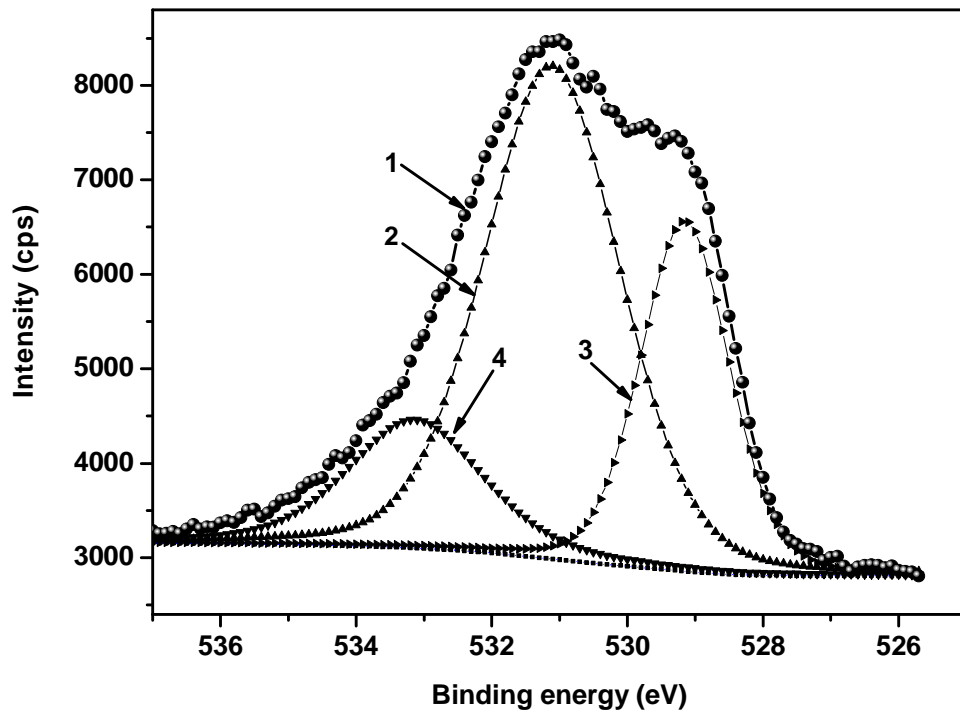
Analiza EDX a conținutului chimic al suprafețelor prelucrate

Materialul de bază a probei	EDX conținutului chimic al suprafețelor prelucrate		
	Elementele	[norm. wt.%]	[norm. at.%]
Oțel 45	Carbon	1.89	4.32
	Azot	7.82	12.43
	Oxigen	29.77	58.74
	Fier	60.52	24.51
Aliajul titanului BT-8	Carbon	00.41	01.38
	Oxigen	30.33	33.27
	Azot	03.38	09.56
	Aluminiu	05.84	08.57
	Titan	60.04	47.22
Aliajul aluminiului Д16	Aluminiu	66.84	55.68
	Oxigen	13.95	19.60
	Magneziu	2.49	2.30
	Carbon	1.82	3.40
	Cupru	2.42	0.86
	Mangan	0.55	0.23
	Argint	0.86	0.18
Cupru tehnic pur M0	Cupru	59.5	25.55
	Oxigen	29.53	50.50
	Carbon	10.22	23.20
	Aluminiu	0.75	0.76
Bronz БрА5	Cupru	52.97	21.18
	Oxigen	26.66	42.34
	Carbon	14.83	31.38
	Aluminiu	02.66	02.50
	Siliciu	02.87	02.60
Alamă JI63	Cupru	42.30	23.25
	Zinc	32.89	17.57
	Oxigen	16.72	36.50
	Carbon	7.52	21.86
	Magneziu	0.57	0.82

După cum se vede din rezultatele prezentate mai sus se observă o dizolvare anormală a oxigenului în metalele cercetate după prelucrarea suprafețelor conform tehnologiei elaborate [121]. Este demonstrat că dizolvarea oxigenului la prelucrarea probelor din oțeluri de construcție atinge 60% at., din aliajele titanului – 30-35% at., celor confecționate din aliajele aluminiului – pînă la 20% at., iar celor din aliajele cuprului – 50% at. Stratul superficial al suprafeței probelor prelucrate din oțel și aliajul titanului mai include azotul, în afară de oxigen.



a)



b)

Fig. 4.13. Compoziție de fază (analiza XPS) a peliculelor de oxizi pentru probelor din oțel 45:
 a – compoziție spectrală totală a suprafeței; b – spectrul oxigenului a suprafeței:
 1 – spectrul general; 2 – componenta OH; 3 – componenta O²⁻;
 4 – structuri de tipul O-C și O-C=O

Analiza compoziției fazice a peliculelor de oxizi (fig. 4.13) a fost efectuată cu ajutorul tehnicii XPS în limitele energiei specifice 0÷750 eV cu pasul 0,5 eV. În spectrul total al stratului superficial al suprafeței (fig. 4.13, a) au fost înregistrate picuri spectrului oxigenului (O 1s), carbonului (C 1s), fierului (Fe 2p, Fe 3p) și siliciului (Si 2p, Si 2s), ultimile trei fiind partea componentă a aliajului cercetat (oțel 45).

Spectrul general XPS a oxigenului este prezentat în fig. 4.13, b, curba 1.

Analiza semnalului arată prezența oxigenului O 1s în trei tipuri de compuși chimici (numiți componentele). Aceștia sînt:

- a) componenta O^{2-} cu energia specifică 529,6 eV (care conține atomii de oxigen în oxizii metalice, fig. 4.13, b, curba 3);
- b) componenta OH^- cu energia specifică 531,5 eV (fig. 4.13, b, curba 2);
- c) structurile de tipul C–O și O–C=O cu energia 533,4 eV (fig. 4.13, b, curba 4).

Analiza chimică a arătat concentrația fiecărei component care este C(a):C(b):C(c)=0,89:1,00:0,50, ceea ce înseamnă că peliculă este constituită în mare majoritate din oxizii și hidroxizii metalului de bază a probei. Studiul adăugător a stratului superficial a evidențiat posibilitatea existenței componente a patra a oxigenului de tipul O–H₂, dar valoarea concentrației relative a acestei componente nu întrece 0,15.

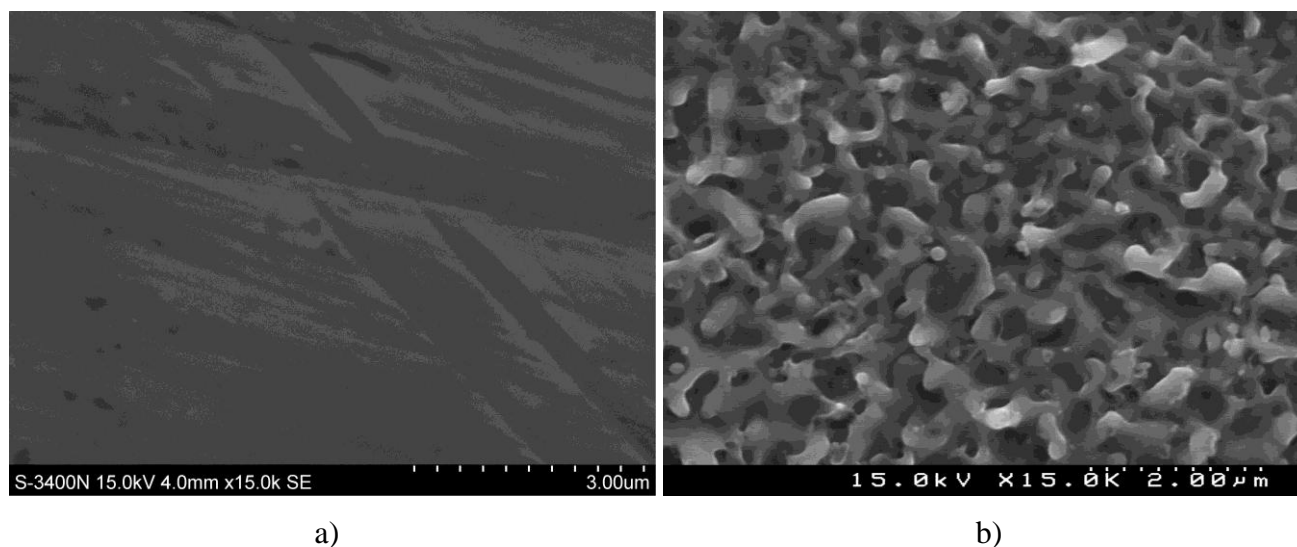


Fig. 4.14. Morfologia stratului superficial a probelor supuse prelucrării:
a – suprafață neprelucrată; b – suprafața prelucrată cu aplicarea DEI

Dacă analizăm fig. 4.14, b, care reprezintă morfologia stratului de suprafață prelucrat, putem constata că calitatea suprafeței cu peliculă de oxizi ($Ra \approx 0,1 \div 0,2 \mu m$) a crescut în comparație cu suprafața prelucrată numai mecanic ($Ra \approx 0,63 \mu m$, fig. 4.14, a). Acest fenomen poate fi lămurit prin aceea că ascutișurile rămase după prelucrarea mecanică se rotungesc în urma acțiunii plasmiei DEI.

4.6.2. Structura și microduritatea stratului de suprafață prelucrat

Stratul superficial obținut după prelucrarea cu aplicarea DEI de obicei are structură dublă. El constă din stratul interior de bază la graniță metal-depunere și stratul exterior de suprafață. Stratul de bază este mai dur, de porositate fină, are structură cristalină omogenă și constituie 60...90% din grosimea peliculei. Stratul exterior este mai moale și mai poros, de structură amorfă și ocupă 10...40% din grosimea peliculei.

Dat fiind faptul că grosimea peliculei de oxizi este de ordinul sutelor de nm, atunci nu putem aplica tehnica de măsurare la nivelul nano-. Microduritatea o vom măsura pentru stratul superficial al probei în ansamblu cu pelicule de oxizi.

Rezultatele cercetărilor stratului de suprafață privind determinarea microdurității sînt prezentate în tab. 4.2.

Tabelul 4.2

Microduritatea după Vickers a stratului superficial al probelor prelucrate

Materialul de bază a probelor	Microduritatea stratului superficial HV	
	al materialului de bază	al probelor după prelucrarea cu DEI
Oțel 3	137	165
Oțel 45	198	230
BT8	292	390
Д16	48	120
БрА5	186	220

După cum se observă din tab. 4.2, microduritatea stratului superficial a crescut cu aproximativ 30 unități față de cel neprelucrat pentru oțeluri de construcție și aliajele cuprului. În ceea ce privește sporirea mai considerabilă a microdurității suprafețelor pieselor din aliajele titanului și aluminiului (cu 80...100 unități), această poate fi lămurită prin faptul că în straturile superficiale ale acestor aliaje se formează compuși chimici care posedă duritatea sporită față de materialul de execuție a piesei: nitruri de titan și oxizi de aluminiu. Creșterea durității a stratului superficial poate fi lămurită prin fenomenele de călire ca rezultat al acțiunii plasmei DEI cu suprafața piesei supuse prelucrării.

4.6.3. Rezistența electrică de suprafață

În fig. 4.15 sunt prezentate rezultatele cercetărilor suprafețelor supuse procesului de oxidare în regim de întreținere a DEI pe pete electrodice „reci”. Se vede că pentru piesa-catod (fig. 4.15, a) prelucrarea a avut loc pe toată suprafața, pe cînd pe suprafața probei-anod (fig. 4.15, b) se observă urme evidente de migrare a canalului de plasmă (zone de culoare mai deschisă), iar printre acestea zone de culoare mai întunecată (în care suprafața electrodului a interacționat cu partea periferică a canalului de plasmă).

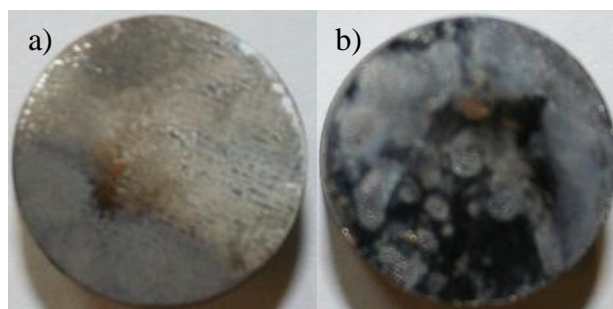


Fig. 4.15. Vedere generală a probelor executate din oțel 45 prelucrate cu aplicarea DEI (capacitatea bateriei de condensatoare $C = 600 \mu\text{F}$, tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare $U_c = 160 \text{ V}$, distanța între electrozi $S = 1,5 \text{ mm}$, frecvența impulsurilor $f = 15 \text{ Hz}$, energia acumulată pe bateria de condensatoare $W_c = 7,68 \text{ J}$, energia degajată în interstițiu $W_s = 3,58 \text{ J}$):

a) proba – catod; b) proba - anod

Pentru prima dată a fost măsurată rezistența electrică de suprafață pentru probele executate din oțel 45 prelucrate cu aplicarea DEI (tab. 4.3) atât pentru suprafața electrodului-anod, cât și pentru suprafața electrodului-catod. Rezistența electrică de suprafață a probelor neprelucrate este cuprinsă în limitele $0,05 \div 0,09 \Omega/\text{mm}^2$. Din analiza rezultatelor prezentate în tabelul 4.3 putem stabili că, în toate cazurile se atestă o creștere substanțială a rezistenței active de suprafață a electrozilor ce au participat în procesul DEI, însă rezistența activă de suprafață a electrodului anod este de cca 3 ori mai mică decât cea a catodului. Ultima constatare poate fi explicată prin faptul că, la suprafața anodului în aceleași condiții se degajă o cantitate mai mare de energie și posibil au loc procese mai intense de vaporizare, din care motiv și intensitatea procesului de formare a peliculelor de oxizi decurge mai lent.

Tabelul 4.3

Rezistența electrică de suprafață a peliculelor de oxizi pentru probele din oțel 45

Proba	Rezistența electrică de suprafață, $\times 10^6 \Omega/\text{mm}^2$				
	Date experimentale				Valoarea medie
Catod	0,88	0,72	1,46	0,71	0,98
	0,97	1,52	0,68	0,72	
	0,73	1,09	0,76	0,83	
	1,33	1,10	1,04	0,73	
	1,07	0,88	1,21	0,78	
Anod	0,81	0,26	0,46	0,31	0,33
	0,11	0,14	0,56	0,34	
	0,29	0,11	0,62	0,38	
	0,87	0,38	0,11	0,15	
	0,12	0,13	0,27	0,17	

În continuare (tab. 4.4) a fost efectuată măsurarea rezistenței electrice de suprafață a stratului superficial pentru probele-catozi din aliajele titanului, aluminiului și cuprului.

Rezistența electrică de suprafață a peliculelor de oxizi formate pe suprafețele probelor-catozi

Materialul de bază a probelor prelucrate	Rezistența electrică de suprafață medie, $\times 10^6 \Omega/\text{mm}^2$
Aliajul titanului BT8	1,6
Duraluminiu Д16	0,25
Cupru tehnic pur M0	0,15
Bronz БрА5	0,17
Alamă Л63	0,19

După cum se observă din rezultatele prezentate în tab. 4.3 și 4.4, rezistența electrică de suprafață este funcție de materialul de execuție a probelor supuse cercetărilor și are valori mai mari pentru materiale cu conductibilitatea electrică mai înaltă.

4.6.4. Rezistența la coroziune

În lucrările menționate [113-116] au fost stabilite condițiile suficiente și necesare pentru ca să fie prelucrate suprafețele în așa mod, ca pe suprafețele lor să nu ia naștere faza lichidă. Evitarea apariției fazei lichide este necesară din două motive: omite procesul de eroziune a suprafeței prelucrate și formarea craterelor, iar ca rezultat sporirea rugozității suprafeței finale prelucrate.

Investigarea microscopică a suprafeței a două probe identice din oțel 45 (fig. 4.16, a – suprafața cu pelicule de oxizi, fig. 4.16, b – suprafața neprelucrată) după 3 ani de păstrare a lor în aer în condiții normale arată apariția ruginei pe suprafața neprelucrată, pe când pe suprafața prelucrată nu se observă rezultatele interacțiunii cu mediul înconjurător.

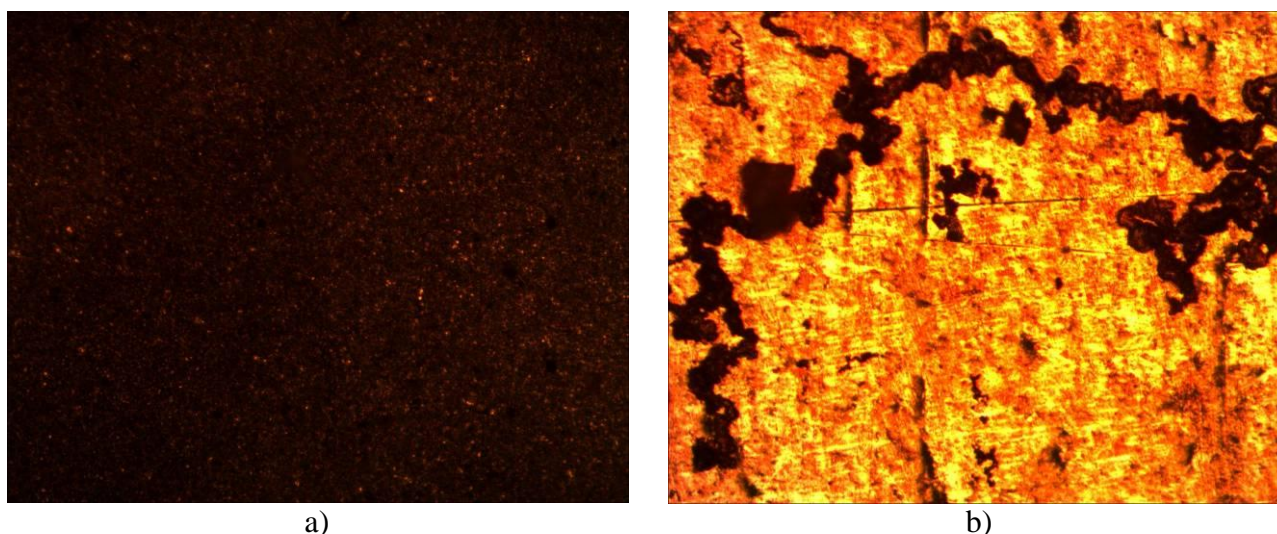


Fig. 4.16. Vedere generală a suprafeței probelor din oțel 45 după 3 ani de păstrare în aer în condiții normale: a) suprafața probei cu peliculă de oxizi; b) suprafața neprelucrată

În continuare sunt prezentate rezultatele cercetărilor experimentale privind formarea peliculelor de oxizi pe suprafețele pieselor executate din oțeluri de construcție. În cazul executării încercărilor experimentale în scopul evitării transferului de material de altă natură de pe suprafața sculei pe cea a piesei acestea erau executate echivalent. Cercetarea suprafețelor piesei (fig. 4.17, a) și electrodului (fig. 4.17, b) au permis a stabili, că și ultimul este supus oxidării. Stratul format pe electrod-sculă este discontinuu cu urme evidente de topire și eroziune electrică. Electrudul-sculă își pierde proprietățile de conductivitate electrică, își modifică caracterul inițial al geometriei și necesită înnoirea sau curățarea suprafeței active în procesul de funcționare. Din motivele menționate se impune executarea lui dintr-un material rezistent atât la electroeroziune, cât și la oxidare.

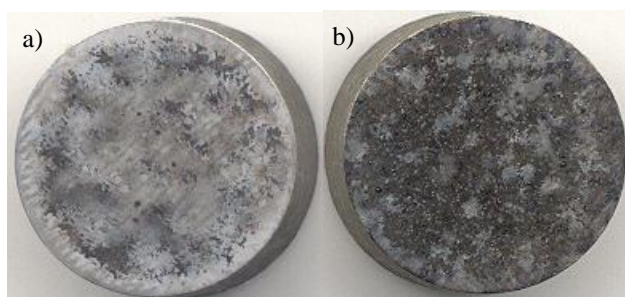


Fig. 4.17. Vederea generală a suprafețelor probelor din oțel 45 după prelucrare cu DEI (parametrii regimului de prelucrare: tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare $U_c = 140$ V; capacitatea bateriei de condensatoare $C = 600 \mu\text{F}$; distanța între electrozi $S = 1,5$ mm; frecvența impulsurilor $f = 15$ Hz; durata prelucrării $\tau = 2$ min):

- a) piesă-catod;
- b) sculă-anod

Studiul suprafețelor executate din oțel 45 prelucrate în regim de oxidare cu aplicarea DEI și analiza conținutului chimic a acestora au permis a stabili, că în acestea se atestă prezența C, N, O, Fe în procentaj considerabil (fig. 4.9-4.12, tab. 4.1). Dintre elementele depistate Fe și C sunt prezente în materialul de execuție al piesei, iar O și N sunt implantate în materialul piesei din mediul de lucru (aer). În același timp putem afirma că, în rezultatul prelucrării suprafețelor în regim de oxidare cu aplicarea DEI nu se atestă o deteriorare semnificativă a suprafeței prelucrate, pe ea se atestă aspritate submicrometrică (fig. 4.17). Anterior în lucrările [113-116] a fost depistată formarea oxizilor și hidro-oxizilor de fier în stare amorfă, ceea ce se va confirma în continuare prin încercările la coroziune.

În baza încercărilor privind determinarea rezistenței la coroziune a fost construită caracteristica volt-amperică atât pentru probe cu suprafețe oxidate cât și suprafețe neoxidate (fig. 4.18).

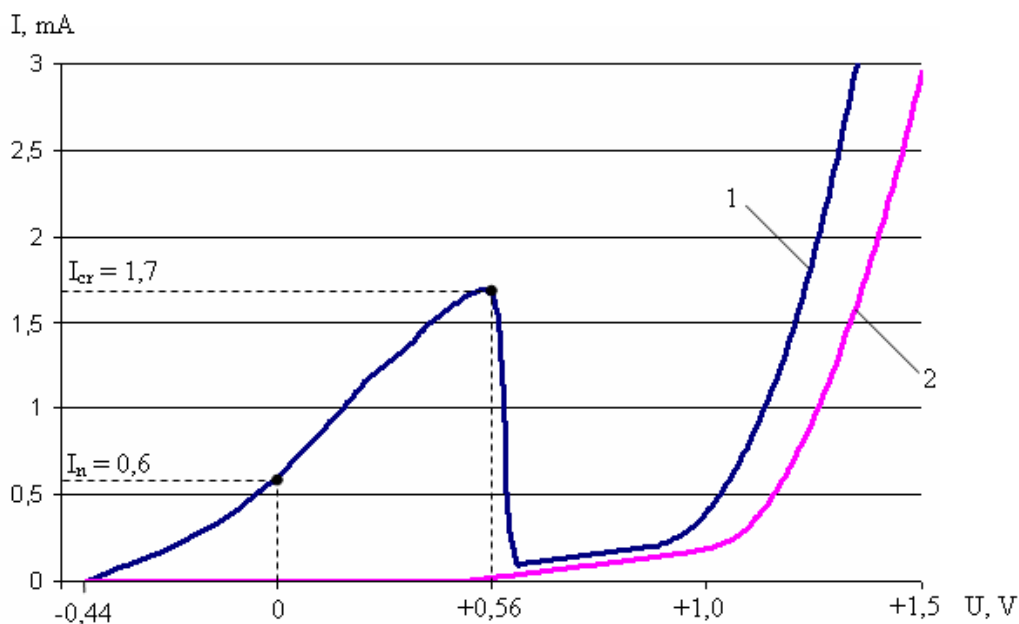


Fig. 4.18. Caracteristica volt-amperică a procesului de coroziune a probelor din oțel 45 în electrolit (soluție apoasă de 3% NaCl):
1 – suprafața crudă; 2 – suprafața prelucrată

Dacă comparăm rezultatele prezentate în (fig. 4.19) putem observa că, potențialul de dizolvare anodică a probei prelucrate a crescut de 6 ori în raport cu cel al probei neprelucrate. Odată cu sporirea tensiunii aplicate asupra electrozilor tabloul de dizolvare anodică a pieselor supuse încercărilor se modifică. De exemplu în cazul tensiunii $U = 2V$ curentul în circuit, pentru piesa neprelucrată, constituie 300 mA, iar pentru proba cu pelicule de oxizi aceasta constituie 161 mA.

Din caracteristica volt-amperică reprezentată în fig. 4.19 putem observa că caracteristicile volt-amperice pentru proba neprelucrată și cea prelucrat în intervalul de tensiuni 1,5-2,5 V sunt practic paralele, ceea ce atestă prezența unei pelicule izolatoare pe suprafața probei prelucrate care sporește rezistența activă a acesteia.

Dacă ținem cont de rezultatele obținute anterior [121] pentru cazul măsurării rezistenței active de suprafață, atunci am putea concluda că straturile de oxizi formate pe suprafețele probelor nu au o continuitate totală, din care motiv procesul de dizolvare anodică a acestora decurge mai intensiv decât era de așteptat.

În scopul determinării vitezei de coroziune au fost supuse la încercări 5 perechi de probe neprelucrate și cele prelucrate în aceleași condiții de dizolvare anodică. În baza măsurătorilor au fost completate tabelele 4.5-4.8.

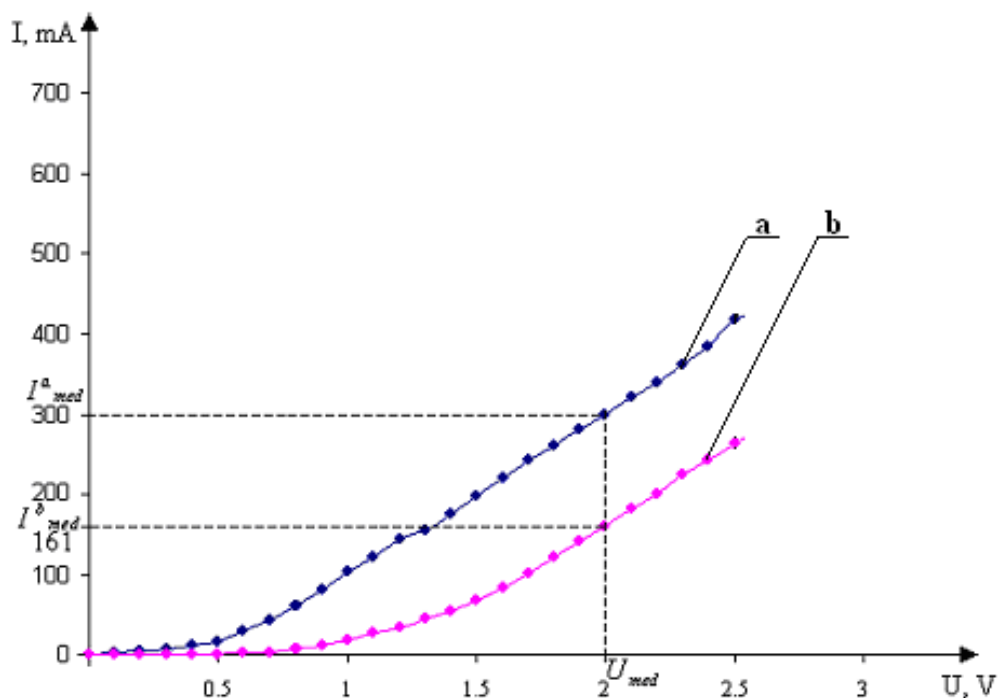


Fig. 4.19. Caracteristica volt-amperică a procesului de coroziune electrochimică
a – suprafață neprelucrată, b – suprafață prelucrată

Dacă analizăm rezultatele obținute putem constata că, pentru cazul probelor prelucrate viteza de coroziune la tensiune aplicată de 2 V, practic în toate cazurile acestea, este de 2 ori mai mică decât pentru probele neprelucrate prin oxidare.

În cazul în care se va ține cont că potențialul de coroziune natural este de zeci și sute de ori mai mic decât în cazul încercărilor realizate, atunci și eficiența aplicării peliculelor de oxizi va spori mai simțitor. De exemplu, dacă revenim la fig. 4.18 atunci putem constata că, pentru tensiuni aplicate în limitele 0 și +0,4 V, curent în circuitul format de piesa prelucrată nu există, deci și viteza de coroziune va fi zero, pe când în aceleași condiții, pentru piesa neprelucrată, se atestă curenți considerabili deci viteza de coroziune este semnificativă. În final am putea admite că aplicarea peliculelor de oxizi pe suprafețele metalice cu DEI este benefică pentru sporirea rezistenței active ale acestora cât și celei de coroziune.

Tabelul 4.5

Viteza de dizolvare anodică a probelor din oțel 45 cu suprafețe neprelucrate

Nr d/o	Masa inițială a probei m_i , g	Masa finală a probei m_f , g	Δm , g	Viteza de coroziune K, $g/m^2 \cdot h$
1	12,8441	12,8237	-0,0204	812,10
2	13,1458	13,1254	-0,0204	812,10
3	13,3225	13,3025	-0,0200	796,17
4	14,0610	14,0417	-0,0193	768,31
5	13,0248	13,0031	-0,0217	863,85

Tabelul 4.6

Viteza de dizolvare anodică a probelor din oțel 45 cu suprafețe oxidate

Nr d/o	Masa inițială a probei m_i , g	Masa finală a probei m_f , g	Δm , g	Viteza de coroziune K, $g/m^2 \cdot h$
1	12,8569	12,8441	- 0,0128	509,55
2	13,1605	13,1458	-0,0147	585,19
3	13,3338	13,3225	-0,0113	449,84
4	14,0717	14,0610	-0,0107	425,95
5	13,0366	13,0248	-0,0118	469,74

Tabelul 4.7

Viteza de dizolvare anodică a probelor din BT8 cu suprafețe neprelucrate

Nr d/o	Masa inițială a probei m_i , g	Masa finală a probei m_f , g	Δm , g	Viteza de coroziune K, $g/m^2 \cdot h$
1	1,6803	1,6700	-0,0103	103
2	1,6700	1,6599	-0,0101	101
3	1,6599	1,6466	-0,0133	133
4	1,6466	1,6324	-0,0142	140
5	1,6324	1,6198	-0,0126	126

Tabelul 4.8

Viteza de dizolvare anodică a probelor din BT8 cu suprafețe oxidate

Nr d/o	Masa inițială a probei m_i , g	Masa finală a probei m_f , g	Δm , g	Viteza de coroziune K, $g/m^2 \cdot h$
1	1,9582	1,9578	-0,0004	4
2	1,6615	1,6613	-0,0002	2
3	1,8829	1,8828	-0,0001	1
4	1,8325	1,8324	-0,0001	1
5	1,7648	1,7647	-0,0001	1

4.7. Concluzii la capitolul IV

Rezultatele experimentale obținute și analiza acestora permit a concluda că:

1. La prelucrarea suprafețelor cu aplicarea DEI în condiții normale oxidarea superficială este mai eficientă când piesa este conectată în circuitul de descărcare în calitate de catod.
2. Grosimea stratului obținut la oxidarea cu DEI este funcție de puterea energiei degajate în interstițiu, durata descărcării electrice în impuls, mărimea interstițiului și numărul de descărcări ce revin unei unități de suprafață prelucrată.
3. Productivitatea formării peliculelor de oxizi prin această metodă este funcție de regimul energetic de prelucrare și poate atinge valori de la 1 pînă la 20 cm^2/min în dependență de materialul de execuție a piesei.
4. Dizolvarea oxigenului în suprafața atinge 60% at. pentru probele din oțel, 30-35% at. – pentru probele din aliajele titanului, 20% at. – pentru probele din aliajele aluminiului și 50% - pentru aliajele cuprului. Stratul superficial al probelor din oțel și aliajele titanului mai conține, în afară oxigenului, și nitrogen în valoarea 10-15% at. Analiza fazică XPS a suprafeței prelucrate cu aplicarea DEI a

probelor din oțel 45 a arătat prezența oxigenului în trei tipuri de compuși chimici (componente): a) componenta OH^- (hidroxizi); b) componenta O^{2-} (oxizi) și c) componenta cu structuri de tipul O-C și O-C=O (compuși organici). Concentrația fiecărei dintre aceste componente este $\text{C(a):C(b):C(c)}=1,00:0,89:0,50$.

5. Datorită fenomenelor de călire ca rezultat al acțiunii plasmei DEI cu suprafața piesei supuse prelucrării, microduritatea stratului superficial a crescut cu aproximativ 30 unități față de cel neprelucrat pentru oțeluri de construcție și aliajele cuprului și cu 80-100 unități pentru aliajele titanului și ale cuprului. O creștere mai semnificativă a microdurității suprafeței pentru aliajele titanului și aluminiului poate fi lămurită prin faptul că pe suprafața lor se formează compuși chimici cu duritatea sporită: nitruri de titan și oxizi de aluminiu.

6. Rezistența ohmică de suprafața a suprafețelor prelucrate cu aplicarea DEI crește de aproximativ 10^7 ori pentru toate materialele supuse încercării, iar viteza de coroziune scade de 2 ori față de suprafața neprelucrată a probelor din aliajele fierului, de până la 100 de ori – pentru aliajele titanului. Potențialul de coroziune își schimbă semnul (de exemplu, pentru oțeluri de la -0,44 la +0,4 V, iar pentru aliajele titanului de la -0,56 la +0,22 V). Această se datorește formării compușilor chimici cu proprietăți izolatoare în stare amorfă.

V. CONTRIBUȚIILE LUCRĂRII PRIVIND APLICAREA TEHNOLOGIEI DE FORMARE A PELICULELOR DE OXIZI PRIN DEI

Ținând cont de rezultatele obținute în lucrările anterioare privind rezistență electrică de suprafață [113-116] și rezistența la coroziune [120, 121] a peliculelor de oxizi formate cu aplicarea DEI putem stabili următoarele domenii de aplicare a tehnologiei elaborate:

- 1) la confecționarea rezistențelor de dimensiuni mici (de ordinul nano- și micrometrilor);
- 2) la protejarea anticorozivă a suprafețelor interioare a țevelor industriale.

5.1. Aplicarea DEI la confecționare rezistoarelor electrice

Primele încercări privind confecționarea rezistorilor au fost efectuate pentru probele cilindrice coaxiale, conform fig. 5.1. Anodul a fost confecționat din aliajul cuprului (în primul caz – alamă, în al doilea caz – bronz), catodul fiind confecționat din oțel 3. Centrarea a fost efectuată cu ajutorul șaibelor izolatoare (ebonită, textolită).



Fig. 5.1. Construcția pieselor componente la confecționarea rezistorilor prin formarea peliculelor de oxizi pe suprafețele metalice

Pe viitor se propune confecționarea rezistențelor de dimensiuni de ordinul nano- și micrometri pe baza metalică (fig. 5.2).

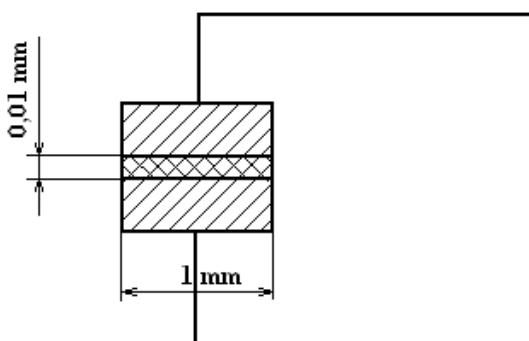


Fig. 5.2. Confecționarea rezistențelor de dimensiuni mici

5.2. Protejarea anticorozivă a suprafețelor cilindrice interioare

O variantă a schemei de oxidare a suprafeței interioare cilindrice a țevelor cu electrozi-bară este prezentată în fig. 5.3. Tehnologia formării peliculelor de oxizi necesită prelucrarea mecanică anterioară a suprafeței.

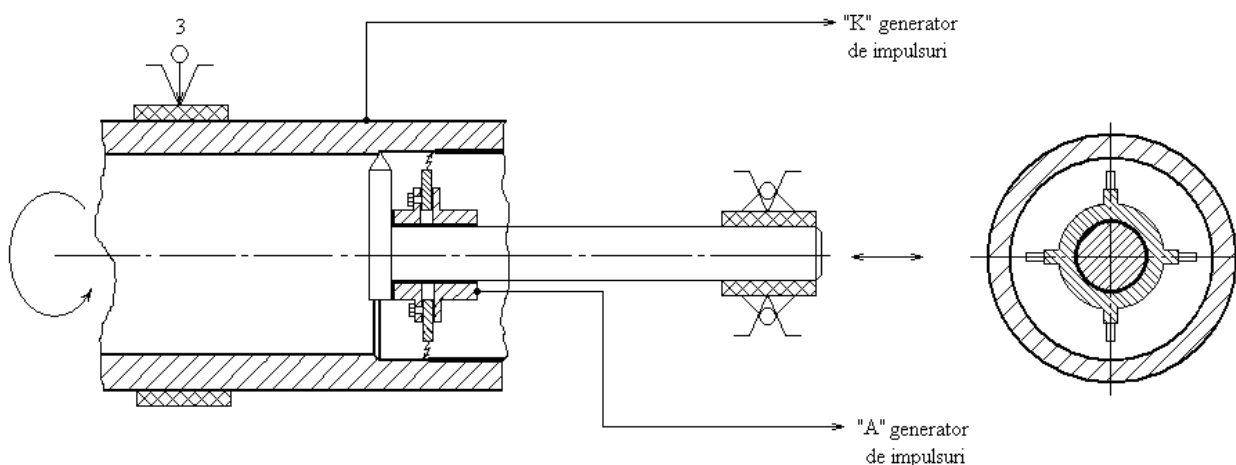


Fig. 5.3. Schema instalației pentru prelucrarea interioară a țevelor

În [119, 127, 148, 150] a fost propus un electrod-sculă în formă drepunghiulară confecționat din mai multe canale (fire) izolatoare unu de altul. După analogie a fost proiectat și elaborat electrodul-sculă cilindric pentru prelucrarea interioară cilindrică cu DEI (fig. 5.4).

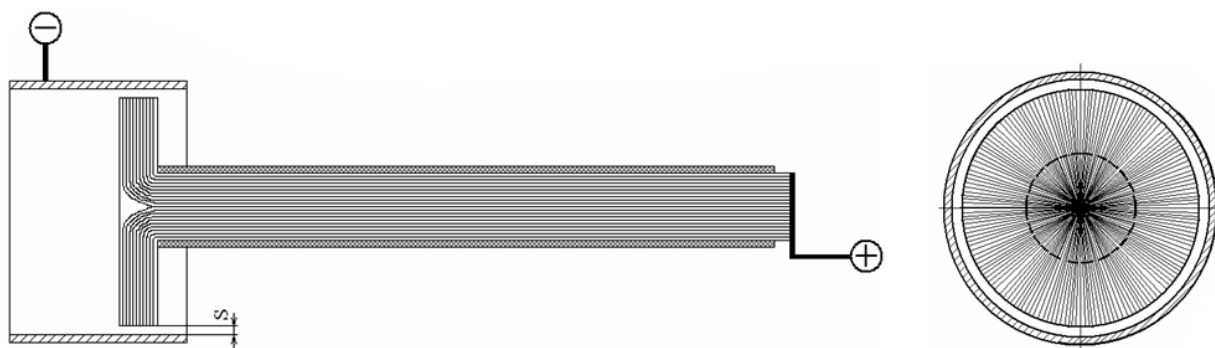


Fig. 5.4. Schema conectării electrodului-sculă și piesei de prelucrat

Pentru alimentarea electrodului-sculă elaborat a fost confecționat generatorul de impulsuri cu schema multiplicatoare de tensiune după Arkadiev-Marks [97] (fig. 5.5). Dacă la intrare a multiplicatorului se dă tensiune de 25 kV, atunci la ieșire ținând cont de pierderi în circuitul vom căpăta ≈ 80 kV.

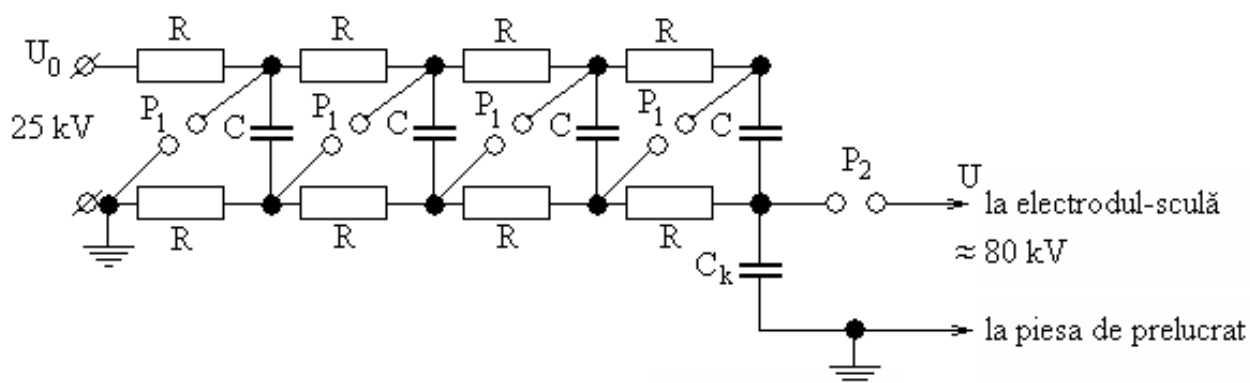


Fig. 5.5. Schema electrică principală a generatorului de impulsuri după schema multiplicatoare de tensiune după Arkadiev-Marks [97]

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

În fig. 5.6, a este prezentat desenul de ansamblu a electrodului sculă, specificul constructiv al unei plăci conductoare fig. 5.6, b și al unei plăci de fixare fig. 5.6, c.

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

Electrodul-sculă propus funcționează după cum urmează:

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

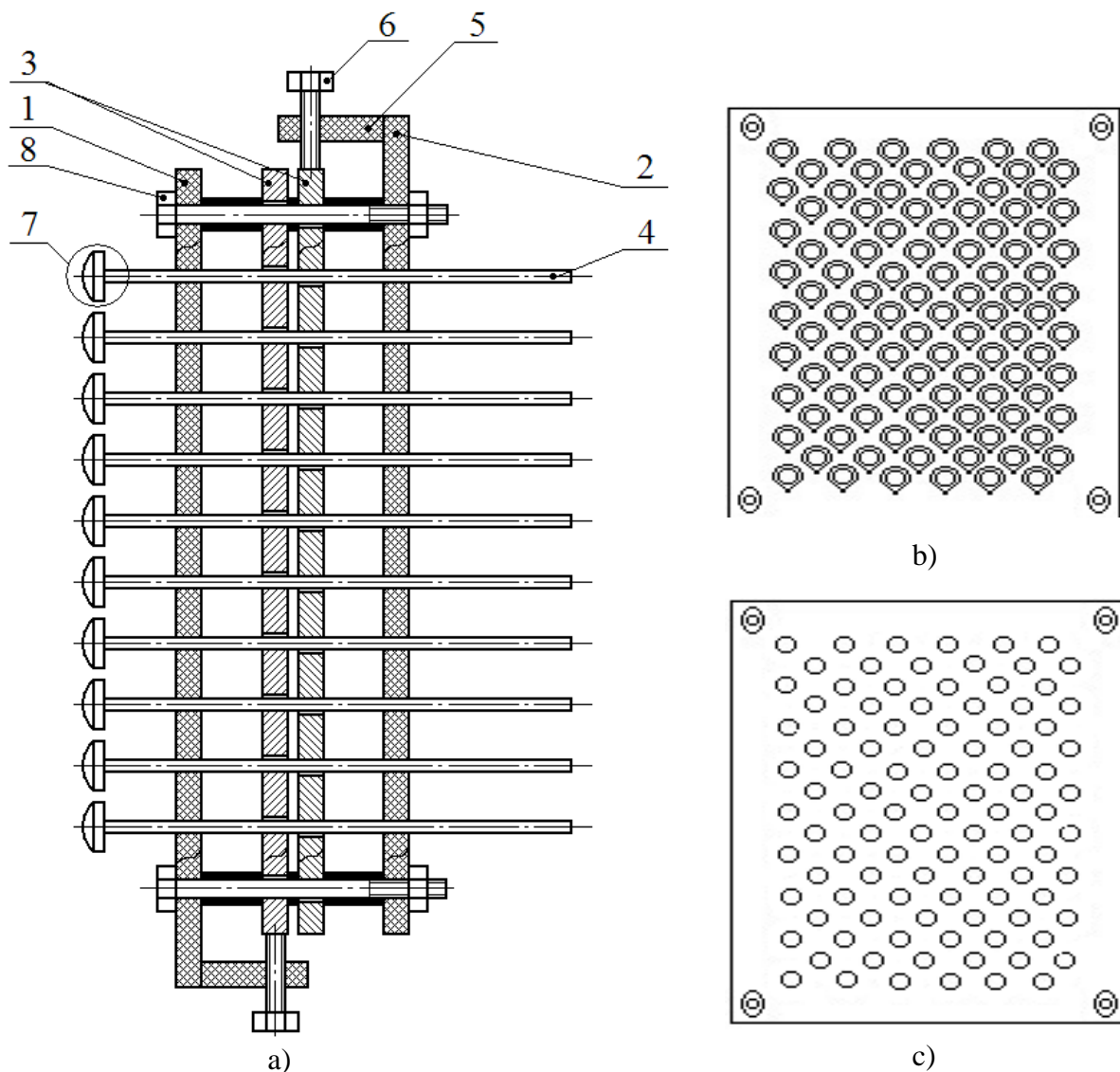


Fig. 5.6. Electrocul-sculă pentru oxidarea suprafețelor complexe cu DEI

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

Varianta propusă a electrocului este brevetată (Cerere de brevet de invenție. Nr. depozit: a 2013 0051. Data depozit: 2013.07.25. [149]).

5.4. Implementarea rezultatelor în promovarea cursurilor universitare

Tehnologia formării peliculelor subțiri de oxizi pe suprafețe metalice cu aplicarea DEI a fost implementată în promovarea cursurilor „Nanotehnologii” și „Tehnologii de formare a straturilor de suprafață” în grupele ET11M și ET21M, ciclul II, masterat, la Universitatea de Stat „Alec Russo” din Bălți (vezi Anexa 4).

5.5. Tehnologia de obținere a peliculelor de oxizi cu aplicarea DEI

5.5.1. Prelucrarea suprafețelor plane

Tehnologia se aplică în următoare consecutivitate:

- 1) Schema tehnologică conform fig. 2.1, a.
- 2) Luând în considerație condiția bilanțului energetic de formare a peliculelor de oxizi cu aplicarea DEI (formula 2.1) de stabilit proprietățile materialului de prelucrare (tab. 5.1).

Tabelul 5.1

Proprietățile termice a materialului de prelucrare

Nr. d/o	Materialul supus prelucrării	Căldura specifică de topire q_{top} , kJ/kg [99, 100]	Densitatea materialului ρ_{top} , kg/m ³ [93] – la temperatura de topire T_{top} , °C	Căldura volumică de topire Q_{top} , J/m ³
1.	Fier	270	6900 kg/m ³ – 1500 °C	1863
	Oțeluri de construcție	84		580
2.	Titan și aliajele lui	470	4450 kg/m ³ – 1668 °C	2091
3.	Aluminiu și aliajele lui	393	2380 kg/m ³ – 660 °C	935
4.	Cupru și aliajele lui	213	8000 kg/m ³ – 1083 °C	1704
5.	Wolfram	185	18200 kg/m ³ – 3380 °C	3367
6.	Nichel	305,5	8000 kg/m ³ – 1453 °C	2444
7.	Crom	280	7340 kg/m ³ – 1903 °C	2055
8.	Zinc	112,2	6500 kg/m ³ – 420 °C	730

3) De numit mărimea interstițiului din condiția de lipsa acțiunii petelor electrodice „calde” (fără topirea și evaporarea suprafeței materialului, fig. 3.2) și luând în considerație valoarea optimă a interstițiului pentru productivitatea maximală de formare a peliculelor de oxizi (fig. 4.9):

$$S=1,0\div 2,5 \text{ mm.}$$

4) De determinat diametrul urmei de interacțiune a canalului de plasmă (d_c) cu suprafața de prelucrare la o descărcare solitară. În tabelul 5.2 sunt prezentate rezultatele măsurării valorilor d_c pentru materiale alese pentru cercetările experimentale.

Diametrul urmei de interacțiune a canalului de plasmă cu suprafața de prelucrare

Nr. d/o	Materialul supus prelucrării	d_c , mm
1.	Oțeluri de construcție (45, St. 3)	2,5÷5
2.	Titan și aliajele lui (BT8)	5÷7,5
3.	Aluminiu și aliajele lui (Д16)	2÷3,5
4.	Cupru și aliajele lui (M0, БрА5, Л63)	2,5÷5

5) De fixat piesa în dispozitiv.

6) De fixat electrodul-scula în dispozitiv.

7) De ajustat interstițiul de lucru. Interstițiu se ajustează cu ajutorul dispozitivului confecționat pe baza microscopului MPB-2 folosind schema electrică prezentată în fig. 5.7.

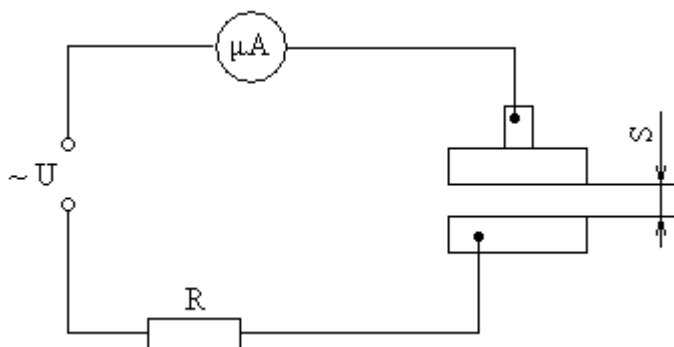


Fig. 5.7. Schema electrica pentru ajustarea interstițiului de lucru

În momentul inițial, electrodul-sculă se apropie de proba supusă prelucrării pînă la contact electric. Valoarea intensității curentului în acest caz este maximală $I_{(S=0)} = \frac{U}{R}$. Îndepărtînd electrodul-sculă de suprafața de prelucrare, crește componenta reactivă (capacitivă) a rezistenței electrice a circuitului. Intensitatea curentului se micșorează în dependență de mărimea interstițiului (deci în dependență de capacitatea condensatorului plan format din două suprafețe plane paralele):

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}; \\
 X_C &= \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}; \\
 C &= \frac{\varepsilon \varepsilon_0 A}{S},
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

unde f este frecvența sursei de alimentare a circuitului; A – aria suprafeței electrozilor; S – mărimea interstițiului.

Conform graficului prezentat în fig. 5.8 fiecărei valori ai interstițiului îi corespunde valoarea respectivă a intensității curentului. Interstițiul se ajustează o dată și se menține constant pe toată perioadă de prelucrare.

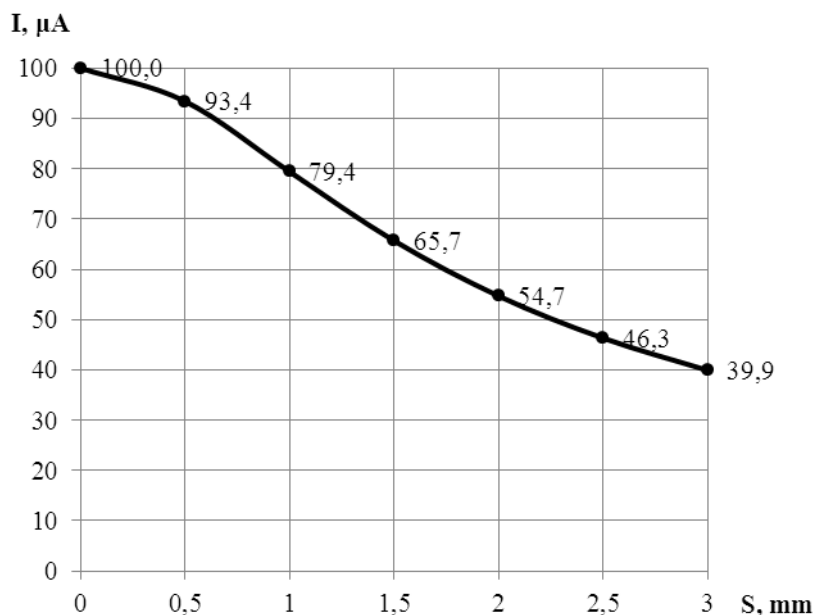


Fig. 5.8. Graficul dependenței intensității curentului de mărimea interstițiului a circuitului prezentat în fig. 5.7

8) De stabilit frecvența DEI. În conformitate cu fig. 4.6 stabilim valoarea 15 Hz.

9) De stabilit valoarea tensiunii de amorsare:

$$U_{am} \geq E_{am} \cdot S = 30 \cdot 10^3 \cdot (1,0 \div 2,5) \cdot 10^{-3} = 30 \div 75 \text{ (V)}$$

10) De fixat valorile tensiunii și capacității bateriei de condensatoare a generatorului de putere în dependență de materialul supus prelucrării. Pentru aliajele alese pentru prelucrare se fixează parametrii energetici din tab. 5.3.

Tabelul 5.3

Parametrii energetici ai generatorului de impulsuri de putere

Nr. d/o	Materialul probei	Interstițiul S, mm	Capacitatea bateriei de condensatoare C, μF	Tensiunea de încărcare a bateriei U _C , V	Frecvența impulsurilor f, Hz	Energia degajată în interstițiu W _S , J	Puterea disipată în interstițiu P _S , kW
1.	Oțel 45, St. 3	2,0	600	200	15	4,5	20,5
2.	BT8	2,0	600	240	15	5,3	24
3.	Д16	1,0	100	60	15	0,5	4
4.	M0, БpA5, Л163	1,5	600	160	15	4	18

5.5.2. Prelucrarea suprafețelor cilindrice

Prelucrarea suprafețelor cilindrice presupune următoarele momente:

- 1) Schema tehnologică conform fig. 2.1, c.
- 2) De stabilit frecvența de rotație a semifabricatului.

Din fig. 5.9 viteza unghiulară de rotație a piesei supuse prelucrării este:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{\pi \cdot D}{k \cdot d_c} \cdot \frac{1}{1/f} = \frac{2\pi f D}{d_c} \text{ [s}^{-1}\text{]}, \quad (5.2)$$

unde f – frecvența impulsurilor DEI; D – diametrul piesei de prelucrare; d_c – diametrul urmei de interacțiune a canalului de plasmă cu suprafața de prelucrare la o descărcare solitară (tab. 5.2); $k=0,5$ – coeficientul de reacoperire a impulsurilor.

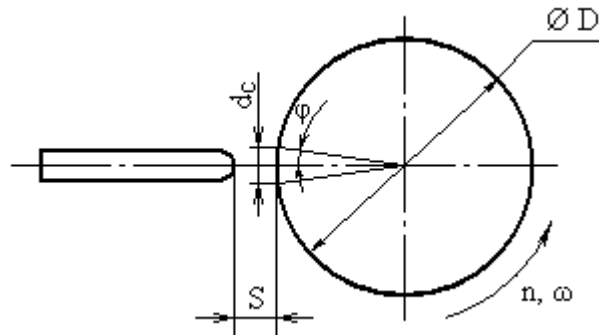


Fig. 5.9. Schema de prelucrare suprafețelor cilindrice cu DEI

Atunci frecvența de rotație a piesei se va calcula cu relație:

$$n = \frac{60 \cdot \omega}{2\pi} = \frac{60 \cdot f \cdot D}{d_c} \text{ [rot/min]}. \quad (5.3)$$

3) De stabilit viteza de avans. Avansul electrodului-sculă luîn în considerație valoarea coeficientului de reacoperire a impulsurilor $k=0,5$:

$$s_0 = \frac{k \cdot d_c}{1 \text{ rot}} = \frac{d_c}{2} \text{ [mm/rot]}. \quad (5.4)$$

Viteza de avans:

$$v_s = \frac{s_0 \cdot n}{60} = \frac{f \cdot D}{2} \text{ [mm/s]}. \quad (5.5)$$

4) De fixat parametrii energetici ai generatorului de impulsuri de putere conform tab. 5.3.

5.6. Compararea metodelor de obținere a peliculelor de oxizi

În tab. 5.4 este prezentată comparația metodei de obținere a peliculelor de oxizi cu aplicarea DEI cu metodele existente.

Tabelul 5.4

Analiza comparativă a metodelor de obținere a peliculelor de oxizi

Parametru	Metoda de obținere a peliculelor de oxizi				
	DEI	Fascicol de electroni, de ioni, de fotoni (radiația laser)	Plasma electrolitică	Arc electric	Agenți chimici
Costul echipamentului	~1000€	~500000€	~10000€	~1000€	~5000€
Cheltuieli de energie a instalației	≤0,75 kW·h	10÷20 kW·h	2÷5 kW·h	2÷10 kW·h	-
Randamentul utilizării energiei	40÷60%	5÷10%	60÷70%	20÷30%	50÷60%
Mediul de lucru	Aer în condiții normale	Camera cu oxigen	Soluții apoase de acizi	Aer în condiții normale	Soluții apoase de acizi
Grosimea stratului oxidat	≤250 nm	≤100 nm	1÷400 μm	200÷500 μm	1÷100 μm
Aderența față de materialul de bază	Puternică, difuzia oxigenului în materialul de bază, reacții chimico-termice	Puternică, difuzia oxigenului în materialul de bază, reacții chimico-termice	Puternică, reacții chimico-termice	Slabă, pelicula fragilă	Puternică, reacții chimice
Calitatea suprafeței după prelucrare	Ra 0,1	Ra 0,1	Ra 6,3	Rz 20	Ra 6,3
Continuitatea prelucrării	100%	Numai în locuri de acțiune termică	Porozitate pînă la 10÷40%	<40%, apar locuri de topire a suprafeței	Numai în locuri de acțiune chimică
Tipuri de materiale supuse prelucrării	Materiale conductibile (metale și semiconductori)	Materiale conductibile (metale și semiconductori)	Metale și aliaje pe baza Al, Cu, Fe	Oțeluri de construcție	Metale și aliaje pe baza Al, Cu

Din tab. 5.4 reiese avantajele principale ale tehnologiei de obținere a peliculelor de oxizi cu DEI față de metode cunoscute:

- 1) Au costul echipamentului scăzut;
- 2) Cheltuieli de energie mic și randamentul sporit de utilizare a acesteia;
- 3) Grosimea stratului oxidat este de ordinul sutelor de nm, pelicula are aderență bună cu materialul de bază datorită proceselor de difuzie în straturile superficiale;

- 4) Mediul de lucru este aer, în condiții normale, nu se folosesc acizii nocivi și echipamente speciale pentru crearea mediului;
- 5) Calitatea suprafeței crește pînă la Ra 0,1 μm;
- 6) Continuitatea prelucrării constituie 100%, iar productivitatea atinge 20 cm²/min;
- 7) Formarea peliculei poate fi realizată pe suprafețele materialelor conductibile (metale, semiconductori).

5.7. Calculul efectului economic al tehnologiei elaborate

Efectul economic este rezultatul aplicării propunerilor de raționalizare, care asigură economia resurselor de muncă, materiale, bănești, majorarea volumului de comercializare a producției și obținerea profitului.

Calculul efectului economic al tehnologiei elaborate în urma aplicării propunerilor de raționalizare este elaborat în conformitate cu Legea Republicii Moldova nr. 138-XV din 10.05.2001 cu privire la activitatea de raționalizare [19].

Pentru calcularea efectului social-economic poate fi întrebuințată metoda absolută sau comparativă a eficacității. Metoda eficacității absolute presupune calcularea rezultatelor efective: costul de producție integral, volumul vânzărilor, mărimea pierderilor cauzate de trecerea la producția nouă, reducerea consumurilor totale de muncă reală și materializată la întreprindere, atât în sfera de producție, cât și în cea de exploatare.

Pentru propunerile de raționalizare cu soluții alternative (baza pentru comparație) se calculează eficacitatea economică comparativă, în acest scop se efectuează o analiză comparativă a parametrilor tehnico-economici și sunt stabilite avantajele economice ale propunerilor, ca obiect de schimb la întreprinderea în cauză în anul precedent celui, în care a demarat utilizarea propunerii, în cazul lipsei bazei de comparație, ea poate fi aleasă la o altă întreprindere.

La calcularea efectului pozitiv de pe urma utilizării propunerilor de raționalizare se folosesc prețurile și tarifele curente la materiale și articole de asamblare, sistemul stabilit de impozitare, ordinea în vigoare privind determinarea costului de producție a bunurilor (serviciilor, lucrărilor). Calcularea indicilor efectului social-economic se efectuează în monedă națională.

În cazul utilizării propunerii de raționalizare care a contribuit la perfecționarea producției obținute, în urma careia vor fi modificate indicii de comercializare, eficiența economică se determină din relația [78]:

$$E_r = \left(\frac{P_b - P_{rem.b.}}{R_b} - \frac{P_r - P_{rem.r.}}{R_r} \right) R_r, \quad (5.6)$$

unde P_b este prețul de producție a 1 unități convenționale a piesei de bază; $P_{rem.b.}$ este prețul remanent după exploatarea piesei de bază; P_r este prețul de producție a 1 unități convenționale a

piesei recondiționate; $P_{rem.r.}$ este prețul remanent după exploatarea piesei recondiționate; R_b este resursa piesei de bază; R_r este resursa piesei recondiționate.

Tabelul 5.5

Calculul eficienței economice la prelucrarea pieselor din oțeluri de construcție cu aplicarea tehnologiei de formare a peliculelor de oxizi prin DEI

Nr. d/o	Indicatorii	Formula de calcul/notare a indicatorului	Valoarea
1.	Eficiența prelucrării, lei	$E_r = \left(\frac{P_b - P_{rem.b.}}{R_b} - \frac{P_r - P_{rem.r.}}{R_r} \right) R_r$	5,4
2.	Prețul de producție a 1 un. conv. (100 cm ²) a piesei prelucrate, lei	$P_r = C_{mat} + C_{man} + C_{r.a.} + C_a$	7,387
3.	Cost materiale, lei	$C_{mat} = C_s + \sum g_i \cdot C_i$	1
4.	Cost semifabricat	C_s	1
5.	Cost material de adaos, lei/kg	C_i	-
6.	Masa materialului, kg	g_i	-
7.	Cost manoperă, lei	$C_{man} = C_{s.b.} + C_{s.sup.} + C_{a.soc.} + C_{a.med.}$	4,258
8.	Salariul de bază, lei	$C_{s.b.} = T_{u.c.} \cdot R_{t.o.} \cdot K_{i.sup.}$	1,98
9.	Volumul de muncă, ore	$T_{u.c.}$	0,15
10.	Retribuția tarifară orară, lei/h	$R_{t.o.}$	12
11.	Coeфициentul ce ia în considerație surplusul de retribuție	$K_{i.sup.}$	1,1
12.	Spor la salariul de bază, lei	$C_{s.sup.} = 0,7C_{s.b.}$	1,386
13.	Contribuții de asigurări sociale de stat obligatorii și impozit, lei	$C_{a.soc.} = 0,23(C_{s.b.} + C_{s.sup.})$	0,774
14.	Prima de asigurare obligatorie medicală, lei	$C_{a.med.} = 0,035(C_{s.b.} + C_{s.sup.})$	0,118
15.	Cost regie atierii, lei	$C_{r.a.} = 0,3C_{man}$	1,277
16.	Cost amortizare, lei	$C_a = 0,2C_{man}$	0,852
17.	Resursa piesei de bază, h	R_b	200
18.	Resursa piesei prelucrate, h	R_r	450
19.	Prețul remanent după exploatarea piesei de bază, lei	$P_{rem.b.}$	0,6
20.	Prețul remanent după exploatarea piesei prelucrate, lei	$P_{rem.r.}$	0,6
21.	Prețul de producție a 1 un.conv. a piesei de bază, lei	P_b	6

Prețul de producție a unei unități convenționale a piesei recondiționate se determină din relația [78]:

$$P_r = C_{mat} + C_{man} + C_{r.a.} + C_a \quad (5.7)$$

în care C_{mat} este costul materialelor folosite la recondiționarea unei unități convenționale a piesei;
 C_{man} - costul manoperii; $C_{r.a.}$ - costul regiei atelierului; C_a - costul de amortizare.

La rîndul său costul manoperii se determină cu relația [78]:

$$C_{man} = C_{s.b.} + C_{s.sup.} + C_{a.soc.} + C_{a.med.} \quad (5.8)$$

în care $C_{s.b.}$ este salariul de bază pentru o unitate convențională și se determină ca produsul dintre volumul de muncă necesar pentru recondiționarea unei unități convenționale ($T_{u.c.}=0,08$ ore), retribuiția tarifară orară ($R_{t.o.}=5$ lei) și coeficientul care ia în considerație surplusul de retribuiție ($K_{i.sup.}=1,1$); $C_{s.sup.}$ - spor la salariu de bază; $C_{a.soc.}$ - contribuții de asigurări sociale de stat obligatorii și impozit; $C_{a.med.}$ - prima de asigurare obligatorie medicală.

Rezultatele calculului eficienței economice în cazul aplicării tehnologiei de formare a peliculelor de oxizi prin DEI în scopul protecției anticorozive a pieselor confecționate din oțeluri de construcție sînt prezentate tab. 5.5.

5.8. Concluzii la capitolul V

- Ținînd cont de proprietățile electrice și funcționale ale peliculelor de oxizi formate pe suprafețe metalice cu aplicarea DEI putem stabili următoarele domenii de aplicare a tehnologiei elaborate: la confecționarea rezistorilor de dimensiuni mici (de ordinul nano- și micrometrilor); la protejarea anticorozivă a suprafețelor interioare a conductelor de apă.
- Cu scopul aplicării tehnologiei elaborate a fost confecționat generatorul de impulsuri de curent și a electrozilor-sculă de configurație specială pentru formarea peliculelor de oxizi pe suprafețe cilindrice interioare și suprafețe de geometrie complexă;
- Cunoștințele științifice obținute au fost implementate în promovarea cursurilor universitare „Nanotehnologii”, „Tehnologii de formare a straturilor de suprafață” în grupele ET11M și ET21M, ciclul II, masterat, la Universitatea de Stat „Alec Russo” din Bălți.

CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI

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

1. Modelul fizic de interacțiune a canalului de plasmă cu suprafața prelucrată prin intermediul petelor electrodice „reci” explică procesele de difuzie nanometrică în stratul de suprafața prelucrat;
2. Difuzia anormală a oxigenului în suprafața electrozilor metalici poate se datorește sintezei ozonului în plasmă și a intensității înalte a câmpului electric în zonele anodice și catodice de ordinul $10^6 \div 10^8$ V/m;
3. La prelucrarea suprafețelor pieselor executate din aliajele fierului, cuprului, aluminiului și titanului cu aplicarea DEI în condiții normale oxidarea superficială este mai eficientă când piesa este conectată în circuitul de descărcare în calitate de catod;
4. Grosimea stratului obținut la oxidarea cu DEI a suprafețelor pieselor executate din aliajele fierului, cuprului, aluminiului și titanului este funcție de proprietățile fizico-mecanice ale materialului de execuție, densitatea energiei degajate în interstițiu, durata DEI și numărul de descărcări ce revin unei unități de suprafața prelucrată;
5. Prelucrarea suprafețelor pieselor executate din aliajele fierului, cuprului, aluminiului și titanului în lipsa mișcărilor relative dintre electrozi poate fi realizată cu electrozi cu suprafețe conjugate în raport cu suprafața de prelucrat sau cu aplicarea electrozului-sculă special conceput și realizat în prezenta lucrare;
6. Grosimea nanometrică a peliculelor de oxizi și hidrooxizi plasează acest procedeu în rândul nanotehnologiilor;
7. Tehnologia elaborată în lucrare permite sporirea rezistenței active de suprafața a suprafeței pieselor executate din aliajele fierului, cuprului, aluminiului și titanului de 10^7 ori, creșterea potențialului de coroziune spre valori pozitive (pentru aliajele fierului de la -0,44 la +0,4 V; pentru aliajele titanului de la -0,56 la +0,22 V) și micșorarea vitezei de coroziune în soluții chimic agresive (pentru aliajele fierului de 2 ori și pentru aliajele titanului de 10^2 ori).

Recomandări tehnologice. Reieșind din rezultatele cercetărilor experimentale privind proprietățile peliculelor de oxizi (sporirea rezistenței electrice de suprafața de 10^7 ori și rezistenței la coroziune a suprafețelor prelucrate), tehnologia obținerii peliculelor de oxizi cu aplicarea DEI poate fi recomandată spre implementare în micro- și nanoelectronică la confecționarea rezistențelor peliculare de ordinul micro- și nanometric; în industria constructoare de mașini, chimică și alimentară la protejarea anticorozivă a suprafețelor metalice.

Contribuții personale. Teza lui este consacrată elaborării unei noi tehnologii de formare a peliculelor de oxizi cu grosimi de ordinul nanometrelor pe suprafețele metalice cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls, în scopul sporirii proprietăților de exploatare a pieselor din construcția de mașini, industrie chimică, micro- și nanoelectronică. Baza teoretică a tezei este argumentată de analiza stadiului actual privind metodele de obținere a straturilor de oxizi, evidențierea avantajelor și neajunsurilor tehnologiilor existente, de fundamentarea teoretică a procesului de formare a peliculelor de oxizi cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls. Problema majoră pusă spre rezolvare este sporirea rezistenței la coroziune a suprafețelor metalice, care este una actuală în domeniul industriei contemporane.

Contribuții teoretice:

- elaborarea bazelor teoretice privind tabloul fizico-chimic și fenomenele ce se produc în interstițiu și straturile superficiale ale pieselor prelucrate în procesul de formare peliculelor de oxizi cu aplicarea DEI în condiții normale;
- descrierea fenomenelor de difuzie la formarea peliculelor de oxizi cu aplicarea DEI;
- elaborarea recomandărilor teoretico-experimentale privind proiectarea și elaborarea generatoarelor de impulsuri de curent, construcția dispozitivelor electronice de tipul conductor-nemetal și combinațiile ale acestora, protecția anticorozivă a suprafețelor metalice prin formarea peliculelor de oxizi în stare amorfă legați structural cu materialul de bază.

Contribuții practice:

- elaborarea tehnologiei de obținere a peliculelor de oxizi de ordinul nm pe suprafețele materialelor conductibile cu aplicarea DEI;
- formarea peliculelor cu rezistență electrică de suprafață de ordinul $M\Omega/mm^2$;
- sporirea rezistenței la coroziune a aliajelor de fier și titan;
- elaborarea modelelor de electrozi-sculă pentru formarea peliculelor de oxizi cu aplicarea DEI;
- implementarea rezultatelor cercetărilor teoretice și experimentale în promovarea cursurilor universitare.

Propuneri de perspectivă. Cercetarea într-un domeniu nu pot finaliza printr-o teză de doctorat. Aceasta este doar o contribuție modestă în acest domeniu al cercetării. Din care motiv pentru viitor se propune:

- determinarea proprietăților tribologice, cele de absorbție și radiație ale peliculelor de oxizi;
- adaptarea tehnologiei elaborate la oxidarea superficială a suprafețelor pieselor executate din materiale semiconductoare;
- implementarea rezultatelor obținute în economia națională: întreprinderi din industria alimentară, industria chimică, construcția de mașini și aparate, micro- și nanoelectronică; se impune proiectarea și elaborarea echipamentelor necesare impementării tehnologiei în întreprinderi.

BIBLIOGRAFIE

1. Черненко И. И., Снежко Л. А., Папанова И. И. Получение покрытий анодно-искровым электролизом, Л.: Химия, 1991, 128 с.
2. Nanu A. Tehnologia materialelor. Chişinău: Ştiinţa, 1992, 552 p.
3. Marinescu N. I. ş. a. Prelucrări neconvenţionale în construcţia de maşini, vol. II, Bucureşti: Editura Tehnică, 1993, 228 p.
4. Pîlfalvi A. ş.a. Tehnologia materialelor. Chişinău: Ştiinţa, 1993, 544 p.
5. Парканский Н. Я. Исследования процесса электроискрового нанесения покрытий из порошковых материалов в электрическом поле. Дис. канд. техн. наук. Киев: Институт проблем материаловедения АН УССР, 1979, 27 с.
6. Ливурдов В.И. и др. Структура и эксплуатационные свойства деталей с покрытиями, полученными электроискровым легированием порошковыми материалами. ЭОМ, 1980, № 5, с. 33-35.
7. Парканский Н.Я., Гитлевич А.Е. Особенности поверхности слоев катода при электроискровом нанесении порошковых материалов. ЭОМ, 1981, с. 32- 35.
8. Гитлевич А. Е. и др. Электроискровое легирование металлических поверхностей, Кишинев, Штиинца, 1985, 196 с.
9. Любимов Г.А., Раховский В.И. Катодное пятно вакуумной дуги. УФН, № 125, вып. 4, 1978, с. 665-706.
10. Бушик А.И. Исследование динамики процессов при импульсном разряде на сложных электродах. Автореф. дис. канд, ф.-м. наук. Минск: ФТИ АН БССР, 1973, 23 с.
11. Антонов С.А. и др. Дуговая эрозия катодов, содержащих включения эмиссионноактивной фазы. ЖТФ, № 52, Вып. 52, 1982, с. 266-270.
12. Булат В.Е., Эстерлив М.Х. Очистка металлических изделий от окалины, окисной плёнки и загрязнений электродуговым разрядом в вакууме. ФХОМ, 1987, №3, с. 49-53.
13. Немошкаленко В.В. и др. Особенности формирования поверхностных слоев при искровых разрядах. Киев: Металлофизика, т. 12, № 3, с. 132-133, 1990. ISSN 0204-3580.
14. Levitz P., Calas G., Bonin D. Etude par spectroscopie Mösbauer du fer (III) dans verres silicates multicomposants d'intérêt géologique. Phys. Appl. 1980, Nr. 15 p. 1169-1173.
15. Мицкевич М. К. и др. Электроэрозионная обработка металлов, Минск: Наука и техника, 1988, 216 с.
16. Topala P. Cercetări privind obţinerea straturilor de depunere din pulberi metalice cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls. Rezumatul tezei de doctorat, Bucureşti, Universitatea Politehnica, 1993, 32 p.
17. Topală P. Tehnologia materialelor. Bucureşti, 2002, 380 p.

18. Amzu Gh., Dumitru L. M., Rîndosu O. Tehnologia materialelor. Vol I, București, 2002, 380 p.
19. Metodica determinării efectului economic sau al unui alt efect pozitiv obținut în urma utilizării propunerilor de raționalizare. Ministerul finanțelor al Republicii Moldova. Publicat: 13.06.2003 în Monitorul Oficial Nr. 116, art Nr. 146.
20. Артамонов Б. А. и др. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. Том 1. Москва: Высшая школа, 1983, 254 стр.
21. Волосатов В. А. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки. Ленинград: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1988, 724 с.
22. Попилов Л. Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов. Справочник, изд. 2. Москва: Машиностроение, 1982, 392 с.
23. Бирюков Б. Н. Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки. Москва: Машиностроение, 1981, 128 с.
24. Тюрин Ю.Н., Жадкевич М.Л. Плазменные упрочняющие технологии. Киев: Наукова думка, 2008, 216 с.
25. Витязь П.А., Солцев К.А. Технологии конструкционных наноструктурных материалов и покрытий. Минск: Беларуская навука, 2011, 283 с. ISBN: 978-985-08-1292-6.
26. Пейсахов А.М., Кучер А.М. Материаловедение и технология конструкционных материалов. Учебник. 3-е издание. - СПб.: Изд-во Михайлова В. А., 2005, 416 с.
27. Gordienko P.S. Formation of Coatings on Anodic-Poled Electrodes in Water-Based Electrolytes at Potential of Sparking and Breakdown. Vladivostok: Dalnauca, 1996. 136 p.
28. Chernenko V.I., et al. Theory and Technology of Anodic Processes at High Voltage. Kiev: Naukova Dumka, 1995. 120 p.
29. Suminov I.V., et al. Micro-Arc Oxidation. Theory, Technology, Equipment. Moscow. Ekonst, 2005. 148 p.
30. Ushakov S.S., et al. Micro-Arc Oxidation of Pipes and Shipbuilding Components Made of Titanium Alloys. Manual RD5. AEIS. 2459-2006. Saint-Petersburg: FSUE CRI KM "Prometey", 2006. 242 p.
31. Gordienko P.S., Rudnev V.S. Electrochemical Formation of Coatings on Aluminium and Its Alloys at Potential of Sparking and Breakdown. Vladivostok: Dalnauca, 1999. 116 p.
32. RF Patent No. 2283901. Technique of electrolytic oxidation of valvular metals and their alloys. Gordienko P.S., et al. Publ. 20.09.2006. Bulletin of inventions No. 28, 2006.
33. Gordienko P.S., et al. Formation of coatings on valvular metals and alloys in electrolytes with capacitive energy control at micro-arcwise oxidation. Protection of Metals, 42 (5): 500-505, 2006.

34. Стерин И.С. Материаловедение. Учебник для вузов. - М.: Дрофа, 2009. - 352 с.
35. Моряков О.С. Материаловедение. Учебник для студ. учреждений сред. проф. образования. - М.: Издательский центр "Академия", 2008. - 240 с.
36. Șerban V.-A., Răduță A. Știința și ingineria materialelor. Ediție revizuită și adăugită. București: Editura Politehnica, 2010, 526 p. ISBN: 978-606-554-044-6
37. Колесов С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учебник для вузов / С.Н. Колесов, И.С. Колесов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2007, 535 с. ISBN: 978-5-06-005817-8.
38. Mitelea I. Știința materialelor II. București: Editura Politehnica, 2010, 416 p. ISBN: 978-606-554-035-4.
39. Herman R. Tehnologia materialelor. Vol. II. București: Editura Politehnica, 2010, 200 p. ISBN: 978-606-554-091-0.
40. Tratat de știința și ingineria materialelor metalice. Vol.5. Tehnologii de procesare finală a materialelor metalice / Saban R., Dumitrescu C. Editura: A.G.I.R., 2012, 1282 p. ISBN: 978-973-720-391-5.
41. Нанотехнологии в электронике. Вып. 2 / Под редакцией чл.-корр. РАН Чаплыгина Ю.А. М.: Техносфера, 2013. – 688 с. ISBN 978-5-94836-353-0.
42. Martin J. The Concise Encyclopedia of Materials Processing. Elsevier, 2009, 854 p. ISBN: 978-0-08-096492-8.
43. Schmidt B., Wetzig K. Ion Beams in Materials Processing and Analysis. Springer, 2013, 418 p. ISBN 978-3-211-99356-9.
44. Ramanathan Sh. Thin Film Metal-Oxides. Fundamentals and Applications in Electronics and Energy. Springer, 2010, 337 p. ISBN 978-1-4419-0664-9.
45. Wu J., Cao J., Han W.-Q., et al. Functional Metal Oxide Nanostructures. Springer, 2012, 368 p. ISBN 978-1-4419-9931-3.
46. Ван Флек. Теоретическое и прикладное материаловедение. Москва: Атомиздат, 1975, 472 с.
47. Китель Ч. Введение в физику твердого тела. Москва: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1978, 176 с.
48. Rădulescu M. Studiul metalelor. Chișinău: Știința, 1992, 331 с. ISBN 5-376-01548-3.
49. Topală P.A., Balcănuță N.P. Caracteristicile electrodinamice ale descărcărilor electrice în impuls. Tehnologii moderne, calitate, restructurare, Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, 2001, pp. 203-208.
50. Avoris Ph. et al. AFM-tip-induced and current-induced local oxidation of silicon and metals // Appl. Phys. 1998. A 66. p. 659–667.

51. Mittova I. Ya., Pshestanchik V. R. The chemistry of processes which create dielectric layers with functional group substituents on semiconductors by impurity thermo-oxidation. Russian Chemical Reviews Volume 60 (1991), Number 9, p. 967-979.
52. Kushida-Abdelgafar K. et al. Integrated Ferroelectrics 13, 113 (1997).
53. Shoji K. et al. 1996 Symposium on VLSI Technology Digest of Technical Papers (Widerkehr and Associates, Gaithersburg, 1996), p. 28.
54. Kushida-Abdelgafar K. et al. Mechanism of TiN barrier-metal oxidation in a ferroelectric random access memory. Journal of materials research, vol. 13, No. 11, Nov. 1998, p. 3265-3269.
55. Yang M. et al. Scanned probe oxidation on an octadecyl-terminated silicon (111) surface with an atomic force microscope: kinetic investigation in line patterning // Nanotechnology. 2006. Vol. 17. p. 330–337.
56. Topală P. Conditions of thermic and thermo-chemical superficial treatment innards with the adhibition of electric discharge in impulses. Nonconventional technologies review, București: Editura BREN, 2005, p. 27-30.
57. Avoris Ph. et al. Atomic force microscope tip-induced local oxidation of silicon: kinetics, mechanism, and nanofabrication // Appl. Phys. Lett. 1997. Vol. 71 (2). p. 285–287.
58. Topală P. Aplicații ale electroeroziunii în dezvoltarea tehnologiilor fine de prelucrare superficială a pieselor. Analele Științifice ale Universității de Stat „Alec Russo” din Bălți. – Serie nouă. Fasc. A. – 2004. – Tom XX, p. 66-69.
59. Mönch W. Semiconductor surfaces and interfaces. Springer Ser. Surf. Sci., 26 (1993) ch 17, p. 276.
60. Nishioka Y. et al. Proceedings of 1995 International Electron Device Meeting (1995), p. 903.
61. Анкудинов А.В. и др. Нанорельеф окисленной поверхности скола решетки чередующихся гетерослоев $Ga_{0.7}Al_{0.3}As$ и $GaAs$. Физика и техника полупроводников, 1999, том 33, вып. 5, с. 594-597.
62. Быков В.А., Лемешко С.В., Саунин С.А. Локальное окисление поверхности полупроводников и металлов твердотельным зондом СЗМ в режиме полуконтактного сканирования как перспективный метод создания элементов нанoeлектроники // Материалы всерос. совещания «Зондовая микроскопия –2000». Нижний Новгород, 28 февраля – 2 марта 2000. ИФН РАН. 2000. С. 308–314.
63. Корниенко Л.П. и др. Электрохимическое и коррозионное поведение титана с электроискровыми покрытиями Pd и Cr-Pd. Защита металлов, Москва, 1991, Т.29, Nr.3, с. 351-358.

64. Миттова И.Я. и др. Особенности термоокисидирования GaAs под воздействием наноразмерных композиций (PbO+V₂O₅). Химия твердого тела и современные микро и нанотехнологии. VII международная конференция. Кисловодск – Ставрополь: СевКавГТУ, 2007, с. 510.
65. Топала П.А., Гитлевич А.Е., Корниенко Л.П. Коррозионное поведение титана с электроискровыми покрытиями. Защита металлов, Москва, 1989, Т. 29, № 3, с. 351-356.
66. Топала П. и др. Влияние отжига на коррозионное поведение титана с электроискровыми покрытиями. Защита металлов, Москва, т.26, №3, 1990, стр.433-437.
67. Ковалева С.А. и др. Морфология и структура локальных анодных пленок оксида кремния, полученных зондовым окислением с использованием атомно-силового микроскопа / Нанотехнологии Pornano RU/ НИОКР/ Исследования/ 10.12.2008.
68. Соколов Д.В. Механизмы наноокисидирования n-In GaAs с помощью атомно-силового микроскопа // ЖТФ. 2002. Т. 72, вып. 1. С. 60–65.
69. Топала П. и др. Упрочнение металлических поверхностей на участках для электроискрового легирования. Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XIII Международной научно-технической конференции. Том 3. Донецк, 2006, стр. 262-265.
70. Topală P., Stoicev P. Tehnologii de prelucrare a materialelor conductibile cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls. Chişinău: Editura Tehnica-Info, 2008, 265 p.
71. Kiseliu Iu. Studiul și elaborarea tehnologiei și a utilizării de tăiere a metalelor cu arcul de plasmă la polaritatea inversă. Autoreferat al tezei de doctor habilitat în tehnică. Chişinău, 2005, 39 p.
72. Topală P. The energy distribution in the gap at the gap technological applying of the electrical discharges in impulses. Nonconventional technologies review, 2007, Nr.1. Iași: Editura PIM, p. 129 – 132.
73. Slătineanu L. Tehnologii neconvenționale în construcția de mașini. Chişinău: Tehnica Info, 2000, 252 p.
74. Kao C.C., Shih J.A. Sub-nanosecond monitoring of micro-hole electrical discharge machining pulses and modeling of discharge ringing. International Journal of Machine Tools & Manufacture, No. 46, 2006, pp.1996-2008.
75. Pecas P., Henriques E. Electrical discharge machining using simple and powder-mixed dielectric: The effect of the electrode area in the surface roughness and topography, Journal of materials processing technology, 2007, pp. 1 – 9.
76. Li Y. et al. Micro electro discharge machine with an inchworm type of micro feed mechanism, Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, 26, 2002, pp. 7–14.

77. Uno Y. et al. A new polishing method of metal mold with large-area electron beam irradiation, *Journal of Materials Processing Technology*, 187–188, 2007, pp. 77–80.
78. Malai L. Sporirea fiabilității îmbinărilor de tip lagăr renovate cu materiale compozite polimerice. Teza de doctor în tehnică. Chișinău: Universitatea Agrară de Stat din Moldova, 2013, 154 p.
79. Topala P. Cercetări privind obținerea straturilor de depunere din pulberi metalice cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls. Teza de doctorat în tehnică. București: Universitatea Politehnica, 1993, 161 p.
80. Шорюров М.Х., Харламов Ю.А. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. М.: Наука, 1978, 224 с.
81. Дорожкин Н.Н., Абрамович Т.М., Ярошевич В.К. Импульсные методы нанесения порошковых покрытий. Шнек. Наука и техника, 1985, 179 с.
82. Леонтьев П.А., Чекалова Н.Г., Хан. М.Г. Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов. М.: Metallurgia, 1986, 144 с.
83. Золотых Б.Н., Мельдер Р.Р. Физические основы электроэрозионной обработки. М.: Машиностроение, 1977, 43 с.
84. Топала П.А. Особенности явлений на электродах при низковольтных разрядах на промежутках больше пробивных. Тезисы докладов Республиканской конференции молодых учёных, Кишинев: Штиинца, 1986, с. 252-253.
85. Душенко В.Ф., Парканский Н.Я., Гитлевич А.Е. Оптимизация процесса электроискрового легирования порошковыми материалами. ЭОМ, 1978, №5, с. 37-29.
86. Золотых Б.Н. Физические основы электроискровой обработки металлов. М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1953, 107 с.
87. Золотых Б.Н., Круглов А.И. Методика и результаты исследования потенциалов канала импульсного низковольтного разряда. В кн. Проблемы электрической обработки материалов. М: Изд-во АН СССР, 1960, с. 20.
88. Зингерман А. С. Каплан Д.А. Зависимость электрической эрозии анода от расстояния между электродами. ЖТФ, Т.ХХVIII, вып. 2, 1958, с. 386.
89. Намитоков К.К. Электроэрозионные явления. Изд-во Энергия, 1978, 456 с.
90. Гордеев В.Ф. и др. Излучательная способность поверхности дугового пятна на вольфрамовом катоде. Поверхность, 1987, №3, с. 73-77.
91. Ревуцкий В.М. и др. Исследования распределения элементов в электроискровых покрытиях с помощью радиоактивных изотопов. ЭОМ, 1981, №6, с. 32-85.
92. Ревуцкий В.М. и др. Влияние параметров импульсного разряда на распределение элементов электродов в электроискровых покрытиях. ЭОМ, 1983, с. 22.

93. Сафронов И.И., Топала П.А., Горбунов А.С. Электроэрозионные процессы на электродах и микроструктурнофазовый состав легированного слоя, Кишинев: TENNICA-INFO, 2009, 495 с.

94. Гаврилов П.В. и др. Микродуговое оксидирование рабочих поверхностей элементов технологической оснастки, выполняемых из алюминиевых сплавов. Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки. Часть 2. Материалы 9-й международной практической конференции 10-13 апреля 2007 г. С.-П. Издательство Политехнического университета, 2007. – с. 77-79.

95. Gutt S., Gutt Gh. Chimia materialelor electrotehnice. Curs. Universitatea „Ștefan cel Mare” Suceava. România, 1992, 304 p.

96. Алаи С.И. и др. Практикум по машиноведению: Учеб. пособие для студентов пед. ин-тов. М.: Просвещение, 1979, с. 67-70.

97. Воробьев Г.А., Месяц Г.А. Техника формирования высоковольтных наносекундных импульсов. М.: Атомиздат, 1963. 167 с.

98. Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. акад. Кикоина И.К. Москва: Атомиздат, 1976. 1008 с.

99. Енохович А.С. Справочник по физике. М.: Просвещение, 1990. 384 с.

100. Енохович А.С. Справочник по физике и технике. М.: Просвещение, 1983, 255 с.

101. Келоглу Ю. П., Захариевич К.М., Карташевская М.И. Металлы и сплавы. Справочник, изд. 2-е., Кишинёв, 1977. 264 с.

102. Румшинский, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. Москва: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1971. 192 с.

103. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. 540 с. ISBN 5-03-001071-8.

104. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерения. Л.: Наука, 1967. 88 с.

105. Математические методы обработки экспериментальных данных. Расчетные задания. Методические указания к практическим занятиям. / Кункин С.Н. и др. Санкт-Петербург, 2002. 68 с.

106. Лунев В.А. Планирование и обработка технологического эксперимента: Учебное пособие. Л.: ЛПИ, 1985 г. 84 с.

107. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. М.: Финансы и статистика, 1983. 471 с.

108. Востров В.Н., Макутов В.С., Юргенсон Э.Е. Статистические методы исследования процессов обработки металлов давлением. Учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1997. 95 с.
109. Грановский, Г.И. Обработка результатов экспериментальных исследований резания металлов. М.: Маш., 1982. 112 с.
110. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. 2-е изд. М.: Наука, 1976. 279 с.
111. Додж М., Стинсон К. Эффективная работа с Microsoft Excel 2000. СПб.: Издательство «Питер», 2000. 1056 с.
112. Дьяконов В.П., Абраменкова И.В. Матлаб 5.0/5.3. Система символьной математики. М.: Нолидж, 1999. 640 с.
113. Topală P., Ojegov A. Formation of oxide thin pellicles by means of electric discharges in pulse. Annals of the Oradea University. Fascicle of management and technological engineering, volume VII (XVII), 2008. CD-ROM Edition. Editura Universităţii din Oradea, România. ISSN 1583-0691, CNCSIS „Clasa B+”. p. 1824-1829.
114. Topală P., Ojegov A. Formation of oxide thin pellicles by means of electric discharges in pulse. Buletinul Institutului Politehnic Iaşi. Tomul LIV (LVIII), 2008. p. 121-128.
115. Topală P., Ojegov A. Formation of oxide thin pellicles by means of electric discharges in pulse. ANNALS of the ORADEA UNIVERSITY. FASCICLE of MANAGEMENT and TECHNOLOGICAL ENGINEERING. Vol. VII (XVII), 2008. p. 309.
116. Topală P., Ojegov A. Protejarea suprafeţelor cilindrice interioare a ţevilor industriale cu peliculele de oxizi obţinute la aplicarea descărcărilor electrice în impuls. Universitatea Agrară de Stat din Moldova. Lucrări ştiinţifice. Vol. 21. Chişinău, 2008. p. 171-174.
117. Topala P., Stoicev P., Ojegov A. Experimental investigations on microoxidation of surfaces by means of applying electrical discharges in impulse under ordinary conditions. Creativity Management International Conference – New Face of TCMR. 21-23th May 2009. Culegeri de lucrări ştiinţifice. Ediţia XIII-a. Editura U.T.M., Chişinău, 2009. p.172-175.
118. Besliu V., Topala P., Ojegov A. Predicting the thickness of the surface layer subjected to thermo-chemical treatment applying EDI using modeling through the method of neuronal model. Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XVI международной научно-технической конференции в г. Севастополе 14-19 сентября 2009 г. В 4-х томах. Донецк: ДонНТУ, 2009. Т. 4. p. 30-34.
119. Ojegov A., Hîrbu A., Topală P. Dispozitiv de căpătare a plasmei în aer în condiţii normale. “Proprietăţile fizice ale substanţelor în diverse stări”: Tezele comunicărilor la Conf. şt.

intern., 9-10 oct. 2009, Bălți: Presa univ. bălțeană, 2009, p. 24-25. ISBN 978-9975-931-66-3. CZU 54(082) P 94.

120. Topala P., Stoicev P., Ojegov A., Pinzaru N., Monaco E. Analysis of processes occurring on the tool and piece electrode surface during the formation of oxide pellicles by applying electrical discharges in impulse. ModTech 2010. 20-22 May, 2010. Slănic-Moldova, România. p. 631-634.

121. Topala P., Stoicev P., Ojegov A., Pinzaru N. Effects of abnormal dissolving of oxygen in metals under the influence of electrical discharges in impulse plasma. International Journal of Modern Manufacturing Technologies. Vol. 2, 2010. p. 95-102. ISSN 2067-3604.

122. Ojegov A. The action of electrical discharges in impulse plasma on structure and properties of steel 45 surface strata. Meridian ingineresc. Vol. 4, 2010. Editura U.T.M. p. 44-47. ISSN 1683-853X.

123. Topală P., Besliu V., Rusnac V., Ojegov A. Despre randamentul utilizării energiei descărcări electrice în impuls la prelucrările prin electroeroziune. Fizică și tehnică: Procese, modele, experimente. Vol. I, 2010. Bălți: Presa univ. bălțeană, 2010. p. 69-74. ISSN 1857-0437.

124. Топала П.А., Визуряну П., Ожегов А.В., Стойчев П.Н., Пержу М.-К. Некоторые результаты микрооксидирования металлических поверхностей электроимпульсными разрядами. Материалы 13-ой Международной научно-практической конференции «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня». Санкт-Петербург, 12-15 апреля 2011. p. 1087-1094.

125. Topala P., Mazuru S., Besliu V., Cosovschii P., Ojegov A. Application of EDI in increasing durability of glass moulding forms poansons. ModTech-2011. 25-27 May, 2011. Vadul lui Voda-Chisinau, Republic of Moldova, p. 1093-1096.

126. Topală P., Beșliu V., Rusnac V., Ojegov A., Pînzaru N. Modificarea structurală a compoziției chimice și a microgeometriei suprafețelor pieselor cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls. Fizică și tehnică: Procese, modele, experimente. Vol. I, 2011. Bălți: Presa univ. bălțeană, 2011, p. 36-42. ISSN 1857-0437.

127. Topala P., Hirbu A., Ojegov A. New directions in the practical application of electro erosion. ANNUAL SESSION OF SCIENTIFIC PAPERS IMT ORADEA – 2011, Oradea, Felix Spa, May 26-28th, 2011, sect. TEHNOLOGIA CONSTRUCȚIEI DE MAȘINI. Annals of the Oradea University. Fascicle of Management and Technological Engineering, 2011.

128. Топала П.А., Бешлиу В.И., Ожегов А.В. Применение электроимпульсных разрядов с графитным электродом. Сборник трудов XVIII международной научно-

технической конференции: “МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОСФЕРА XXI ВЕКА”, 12-17 сентября, 2011, Донецк, с. 240-245.

129. Topala P., Rusnac V., Beşliu V., Ojegov A., Pînzaru N. Physical and chemical effects of EDI processing. Proceedings of International conference NewTech 2011, Brno, Czech Republic. 14-15 septembrie, 2011. Part. Advances in non-traditional manufacturing, rapid prototyping and reverse engineering. p. 15.

130. 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 1454-3087.

131. Topala P., Rusnac V., Beşliu V., Ojegov A., Pînzaru N. Physical and chemical effects of EDI processing. Internet Journal of Engineering and Technology, Vol. II, 2011, No. 2, Is.1. 6 p. ISSN 1338-2357. http://www.i-jet.eu/journal_ijet/c_p_ijet1112.pdf.

132. Topala P., Hirbu A., Ojegov A. Acţiunea plasmei descărcărilor electrice asupra suprafeţelor metalice. Fizica şi tehnologiile moderne, Vol. 10, nr. 1-2, 2012, p. 13-21.

133. Ojegov A. Influenţa parametrilor descărcărilor electrice în impulsuri asupra intensităţii formării peliculelor de oxizi pe suprafaţa oţelului-45. Fizica şi tehnologiile moderne, Vol. 10, nr. 3-4, 2012, p. 18-24.

134. Ojegov A. Investigations on morphology and chemical content of copper alloy surfaces processed by applying electrical discharges in impulse under subexcitation regime. Proceedings of the “Doctoral Intensive Summer School on Evolutionary Computing in Optimisation and Data Mining” (ECODAM), 17-24 iunie, 2012. Iaşi: Editura Universităţii „Alexandru Ioan Cuza”, 2012, p. 88-92. ISBN: 978-973-703-851-7.

135. Topala P., Ojegov A. About chemical and phase content of nano-pellicles formed on metal surfaces by applying electrical discharges in impulse. Proceedings of International Scientific Conference «10 YEARS OF NANOTEHNOLOGY DEVELOPMENT IN THE REPUBLIC OF MOLDOVA», October 22 – 23rd, 2012, Balti. p. 21. ISBN 978-9975-50-085-9.

136. Hirbu A., Topala P., Ojegov A. Auto-ionization plasma in laboratory condition. Proceedings of International Scientific Conference «10 YEARS OF NANOTEHNOLOGY DEVELOPMENT IN THE REPUBLIC OF MOLDOVA», October 22 – 23rd, 2012, Balti. p. 33. ISBN 978-9975-50-085-9.

137. Topala P., Besliu V., Stoicev P., Ojegov A. Application of electric discharges in impulse in micro and nano-technology. Proceedings of The 16th International Conference *Modern Technologies, Quality and Innovation - New face of TMCR*, Vol. II, 24-26 May 2012, Sinaia, Romania, p. 969-972. ISSN 2069-6736.

138. Topala P., Luca D., Ojegov A., Stoicev P., Pinzaru N. Results on metal surface nano-oxidation by electrical discharges in impulse. ICCCI 2012. The Fourth International Conference on

The Characterization and Control of Interfaces for High Quality Advanced Materials. Kurashiki, Japan. September 2-5, 2012. p. 85.

139. Topala P., Ojegov A, Stoicev P., Pinzaru N. Oxide pellicle formation technology. The 16th International Conference Inventica 2012, June 13-15, 2012, Iași, România. Editura Performantica, Institutul Național de Inventică, Iași. p. 625-626. ISSN 1844-7880.

140. Topala P., Ojegov A, Besliu V. Oxygen diffusion during the formation of thin pellicles by applying EDI. ModTech International Conference “Modern Technologies in Industrial Engineering”, Book of abstracts, June 27-29, 2013, Sinaia, Romania, p. 356. ISSN 2286-4369.

141. Topala P., Besliu V., Stoicev P., Ojegov A. Structural modifications – properties of surface micro-strata with graphite depositions. ModTech International Conference “Modern Technologies in Industrial Engineering”, Book of abstracts, June 27-29, 2013, Sinaia, Romania, p. 357. ISSN 2286-4369.

142. Hirbu A., Topala P., Ojegov A. Secondary physical phenomena at the interaction of EDI plasma radiation and filter glass. ModTech International Conference “Modern Technologies in Industrial Engineering”, Book of abstracts, June 27-29, 2013, Sinaia, Romania, p. 358. ISSN 2286-4369.

143. Hirbu A., Topala P., Ojegov A. Auto-ionization laboratory plasma. ModTech International Conference “Modern Technologies in Industrial Engineering”, Book of abstracts, June 27-29, 2013, Sinaia, Romania, p. 359. ISSN 2286-4369.

144. Topala P., Besliu V., Stoicev P., Ojegov A. STRUCTURAL MODIFICATIONS – PROPERTIES OF SURFACE MICRO-STRATA WITH GRAPHITE DEPOSITIONS. International Journal of Modern Manufacturing Technologies, 2013, vol II, p. 97-102. ISSN 2067–3604.

145. Hirbu A., Topala P., Ojegov A. Formarea plasmei de laborator fără ionizarea preventivă a mediului activ. Catalogul oficial al Expoziției Internaționale Specializate INFOINVENT 2013, 19-22 noiembrie, 2013, p. 194.

146. Hirbu A., Topala P., Ojegov A. Laboratory plasma formation without preventive ionisation of the active medium. The 17th international salon of research and technological transfer „INVENTICA 2013”, p. 721-722.

147. Procedeu de formare a straturilor nanometrice de oxizi și hidro-oxizi în stare amorfă / Topala Pavel, Tighineanu Ion, Ojegov Alexandr, Hirbu Arefa. Cerere de brevet de invenție. Nr. depozit: a 2013 0049. Data depozit: 2013.07.25.

148. Procedeu și dispozitiv de obținere a plasmei prin descărcări electrice în impuls / Hirbu Arefa, Topala Pavel, Cașter Valeriu, Ojegov Alexandr. Cerere de brevet de invenție. Nr. depozit: a 2013 0050. Data depozit: 2013.07.25.

149. Sculă cu mulți electrozi pentru prelucrarea suprafețelor prin descărcări electrice în impuls / Topala Pavel, Ojegov Alexandr, Beșliu Vitalie, Hirbu Arefa, Pînzaru Natalia. Hotărîre pozitivă privind acordarea brevetului 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.

150. Electrode multicanal destinat obținerii plasmei prin descărcări electrice în impuls cu auto-ionizare / Hirbu Arefa, Topala Pavel, Cașter Valeriu, Ojegov Alexandr. Cerere de brevet de invenție. Nr. depozit: a 2013 0052. Data depozit: 2013.07.25.

151. Некрашевич И.Г., Бакуто И.А. Механизм эрозии металлов при электрическом импульсном разряде. В кн.: Сб. научных трудов ФТИ АН БССР, вып. 6, Минск: изд-во АН БССР, с. 193-215.

ANEXE

Anexa 1. Rezultatele experimentale privind determinarea dependențelor tehnologice

Tabelul A.1.1

Caracteristica tehnică a generatorului de impulsuri [133]

Capacitatea bateriei de condensatoare $C, \mu\text{F}$	Durata impulsului $\tau, \mu\text{s}$	Tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare U_c, V	Mărimea interstițiului S, mm	Energia degajată în interstițiu W_s, J	Puterea disipată în interstițiu P_s, kW
100	100	100	1,5	0,38	3,8
		120	1,5	0,45	4,5
		140	1,5	0,52	5,2
		160	1,5	0,6	6,0
		180	1,5	0,67	6,7
		200	2,0	0,75	7,5
		240	2,0	0,88	8,8
		280	2,0	1,1	11,0
200	125	100	1,5	0,76	6,08
		120	1,5	0,91	7,28
		140	1,5	1,07	8,56
		160	1,5	1,23	9,84
		180	1,5	1,36	10,88
		200	2,0	1,52	12,16
		240	2,0	1,75	14,0
		280	2,0	2,19	17,52
300	160	100	1,5	1,13	7,06
		120	1,5	1,3	8,13
		140	1,5	1,56	9,75
		160	1,5	1,81	11,31
		180	1,5	2,0	12,5
		200	2,0	2,29	14,31
		240	2,0	2,63	16,44
		280	2,0	3,33	20,81
400	180	100	1,5	1,51	8,39
		120	1,5	1,79	9,94
		140	1,5	2,1	11,67
		160	1,5	2,42	13,44
		180	1,5	2,71	15,06
		200	2,0	3,04	16,89
		240	2,0	3,47	19,28
		280	2,0	4,42	24,56
500	200	100	1,5	2,0	10,0
		120	1,5	2,27	11,35
		140	1,5	2,65	13,25
		160	1,5	3,03	15,15
		180	1,5	3,37	16,85
		200	2,0	3,77	18,85
		240	2,0	4,42	22,1
		280	2,0	5,51	27,55
600	220	100	1,5	2,29	10,41
		120	1,5	2,72	12,36
		140	1,5	3,15	14,32
		160	1,5	3,58	16,27
		180	1,5	4,01	18,23
		200	2,0	4,52	20,55
		240	2,0	5,27	23,95
		280	2,0	6,58	29,91

Tabelul A.1.2

Date experimentale privind determinarea dependenței lățimii fâșiei de oxidare de regimul energetic
 Capacitatea bateriei de condensatoare – $C = 600 \mu\text{F}$. Frecvența impulsurilor – $f = 15 \text{ Hz}$. Frecvența de rotație a piesei – $n = 30 \text{ rot/min}$.

Tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare U_C, V	Mărimea interstițiului S, mm	Materialul piesei/electrodului	Lățimea medie a fâșiei de oxizi b, mm
100	1,5	Д-16	2,15
		Oțel 45	2,45
		BT8	4,75
120	1,5	Д-16	2,50
		Oțel 45	2,85
		BT8	5,20
140	1,5	Д-16	2,85
		Oțel 45	3,20
		BT8	5,55
160	1,5	Д-16	3,15
		Oțel 45	3,60
		BT8	6,10
180	1,5	Д-16	3,40
		Oțel 45	3,95
		BT8	6,45
200	2	Д-16	3,60
		Oțel 45	4,15
		BT8	6,85
240	2	Д-16	3,90
		Oțel 45	4,40
		BT8	7,20
280	2	Д-16	4,45
		Oțel 45	4,90
		BT8	7,50

Tabelul A.1.3

Dependența lățimii fâșiei de oxizi de energia degajată în interstițiu și puterea disipată în interstițiu

Energia degajată în interstițiu W_s, J	Puterea disipată în interstițiu P_s, kW	Lățimea fâșiei de oxizi b, mm		
		Materialul probelor		
		Д-16	Oțel 45	BT8
2,29	10,41	2,15	2,45	4,75
2,72	12,36	2,5	2,85	5,2
3,15	14,32	2,85	3,2	5,55
3,58	16,27	3,15	3,6	6,1
4,01	18,23	3,4	3,95	6,45
4,52	20,55	3,6	4,15	6,85
5,27	23,95	3,9	4,4	7,2
6,58	29,91	4,45	4,9	7,5

Tabelul A.1.4

Dependența timpului specific de prelucrare și a productivității formării peliculelor de oxizi pentru suprafețe conjugate ale electrozilor din oțel 45 de frecvența impulsurilor

Nr d/o	Frecvența impulsurilor f, Hz	Timpul specific de prelucrare T		Productivitatea η , cm ² /min
		s/cm ²	min/cm ²	
1	2	660	11,00	0,091
2	4	580	9,67	0,103
3	6	390	6,50	0,154
4	8	200	3,33	0,300
5	10	74	1,23	0,811
6	15	28	0,47	2,143
7	20	35	0,58	1,714
8	25	48	0,80	1,250
9	30	67	1,12	0,896
10	35	92	1,53	0,652
11	40	123	2,05	0,488

Tabelul A.1.6

Dependența timpului specific de prelucrare și a productivității formării peliculelor de oxizi pentru suprafețe conjugate ale electrozilor din oțel 45 de mărimea interstițiului.

Frecvența impulsurilor $f=15$ Hz, capacitatea bateriei de condensatoare $C = 600 \mu\text{F}$

Nr d/o	Mărimea interstițiului S, mm	Timpul specific de prelucrare T						Productivitatea η , cm ² /min		
		$U_C = 180 \text{ V}$ $W_S = 3,5 \div 4 \text{ J}$		$U_C = 200 \text{ V}$ $W_S = 4 \div 4,5 \text{ J}$		$U_C = 240 \text{ V}$ $W_S = 4,5 \div 5 \text{ J}$		$U_C = 180 \text{ V}$ $W_S = 3,5 \div 4 \text{ J}$	$U_C = 200 \text{ V}$ $W_S = 4 \div 4,5 \text{ J}$	$U_C = 240 \text{ V}$ $W_S = 4,5 \div 5 \text{ J}$
		s/cm ²	min/cm ²	s/cm ²	min/cm ²	s/cm ²	min/cm ²			
1	0,5	136	2,27	124	2,07	98	1,63	0,441	0,484	0,612
2	1	96	1,60	87	1,45	68	1,13	0,625	0,690	0,882
3	1,5	63	1,05	55	0,92	40	0,67	0,952	1,091	1,500
4	2	40	0,67	35	0,58	28	0,47	1,500	1,714	2,143
5	2,5	56	0,93	48	0,80	39	0,65	1,071	1,250	1,538

Dependența timpului specific de prelucrare și a productivității formării peliculelor de oxizi pentru suprafețe conjugate ale electrozilor din oțel 45 de energia degajată în interstițiu. Frecvența impulsurilor $f=15$ Hz

Nr d/o	Energia degajată în interstițiu W_s , J	Timpul specific de prelucrare T		Productivitatea η , cm^2/min
		s/cm^2	min/cm^2	
1	0,38	680	11,33	0,088
2	0,45	630	10,50	0,095
3	0,52	570	9,50	0,105
4	0,6	540	9,00	0,111
5	0,67	500	8,33	0,120
6	0,75	428	7,13	0,140
7	0,76	418	6,97	0,144
8	0,88	388	6,47	0,155
9	0,91	375	6,25	0,160
10	1,07	370	6,17	0,162
11	1,1	368	6,13	0,163
12	1,13	365	6,08	0,164
13	1,23	356	5,93	0,169
14	1,3	350	5,83	0,171
15	1,36	341	5,68	0,176
16	1,51	331	5,52	0,181
17	1,52	328	5,47	0,183
18	1,56	325	5,42	0,185
19	1,75	311	5,18	0,193
20	1,79	307	5,12	0,195
21	1,81	306	5,10	0,196
22	2	300	5,00	0,200
23	2,1	298	4,97	0,201
24	2,19	295	4,92	0,203
25	2,27	289	4,82	0,208
26	2,29	280	4,67	0,214
27	2,42	273	4,55	0,220
28	2,63	264	4,40	0,227
29	2,65	260	4,33	0,231
30	2,71	253	4,22	0,237
31	2,72	250	4,17	0,240
32	3,03	218	3,63	0,275
33	3,04	215	3,58	0,279
34	3,15	200	3,33	0,300
35	3,33	157	2,62	0,382
36	3,37	136	2,27	0,441
37	3,47	125	2,08	0,480
38	3,58	105	1,75	0,571
39	3,77	100	1,67	0,600
40	4,01	65	1,08	0,923
41	4,42	40	0,67	1,500
42	4,52	35	0,58	1,714
43	5,27	28	0,47	2,143
44	5,51	32	0,53	1,875
45	6,58	65	1,08	0,923

Anexa 2. Analize SEM și EDX a suprafețelor probelor executate din aliajele aluminiului și cuprului prelucrate cu EDI

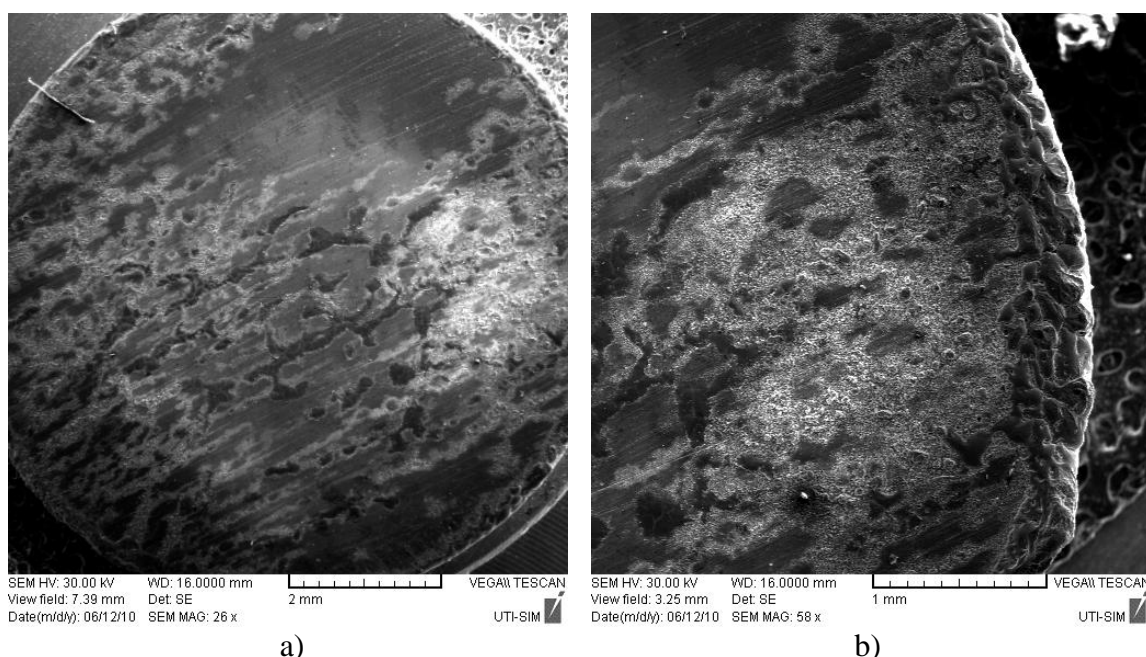


Fig. A.2.1. Analiza SEM a suprafeței: a) Fotografie ansamblu, 26x; b) Zona de margine, 58x
Regimul de prelucrare: tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare $U_c = 120$ V; capacitatea bateriei de condensatoare $C = 600 \mu\text{F}$; distanța între electrozi $S = 1,5$ mm; frecvența impulsurilor $f = 15$ Hz; materialul probei – aliajul aluminiului D16

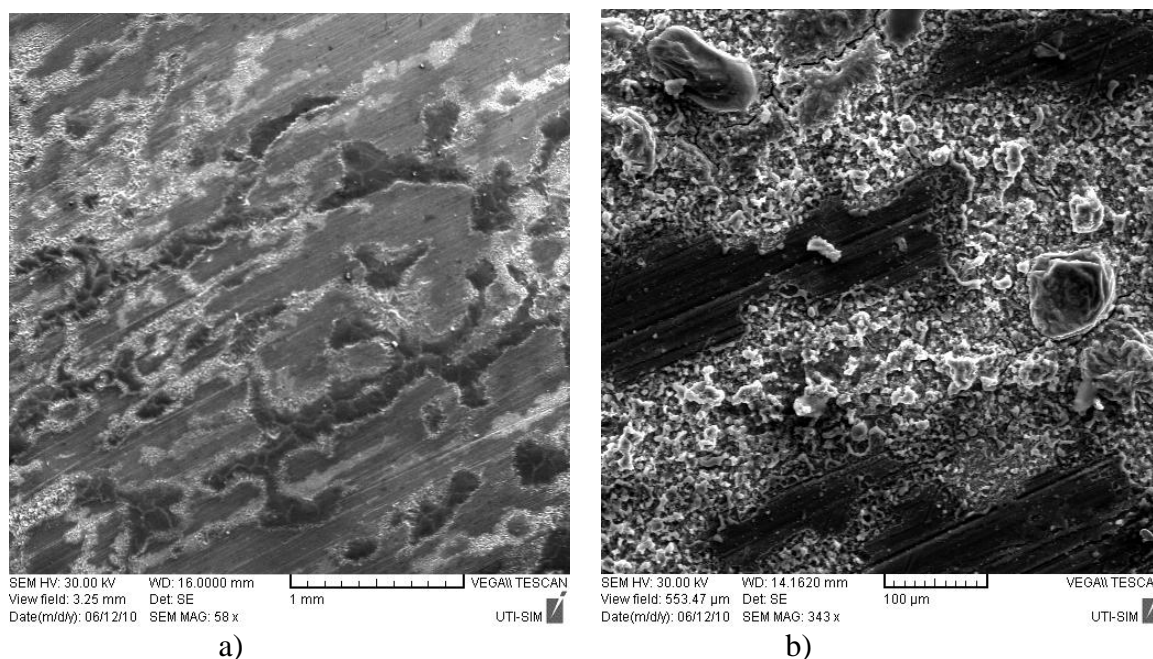


Fig. A.2.2. Microstructuri SEM a suprafeței: a) 58x; b) 343x
Regimul de prelucrare: tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare $U_c = 120$ V; capacitatea bateriei de condensatoare $C = 600 \mu\text{F}$; distanța între electrozi $S = 1,5$ mm; frecvența impulsurilor $f = 15$ Hz; materialul probei – aliajul aluminiului D16

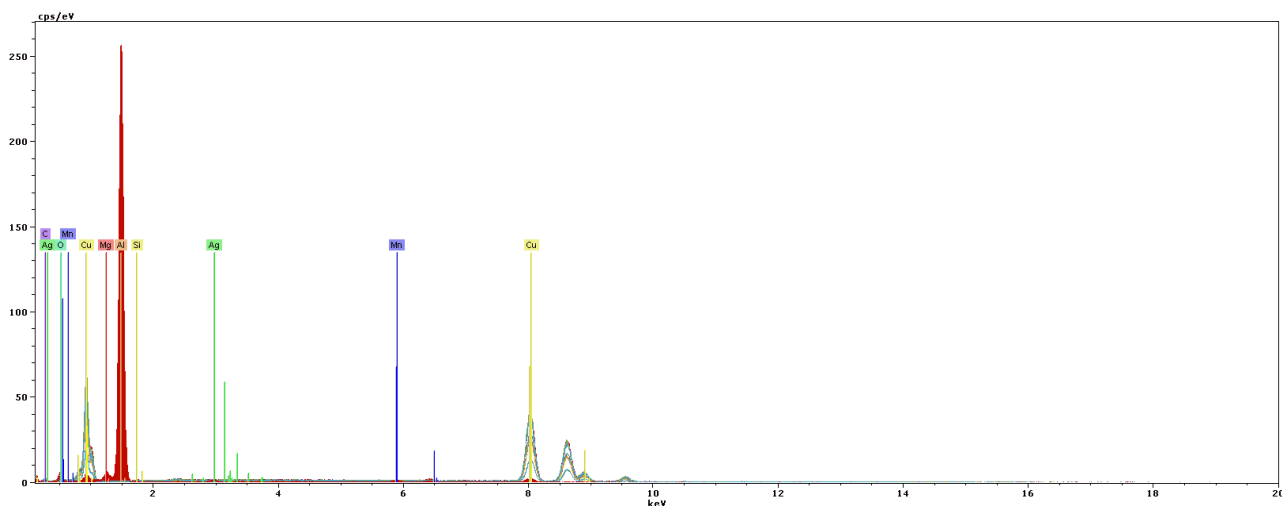


Fig. A.2.3. Spectrul compozitiei chimice a zonei 58x

Tabel A.2.1. Compozitia chimica a zonei 58x

Bruker AXS Microanalysis GmbH, Germany 12/06/2010							
Date: 12/06/2010							
Element	AN	series	Net	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Aluminium	13	K-series	186897	113,9187	80,83878	75,49929	5,739427
Oxygen	8	K-series	2191	12,4096	8,806075	13,86975	2,395963
Copper	29	K-series	3697	4,023473	2,855129	1,132211	0,147166
Carbon	6	K-series	745	3,904187	2,770481	5,812538	1,031216
Magnesium	12	K-series	5181	3,586034	2,544714	2,638355	0,247192
Manganese	25	K-series	1555	1,19377	0,847121	0,388564	0,070198
Silver	47	L-series	1178	1,148693	0,815133	0,190426	0,078937
Silicon	14	K-series	417	0,736413	0,522572	0,468871	0,081946
			Sum:	140,9209	100	100	

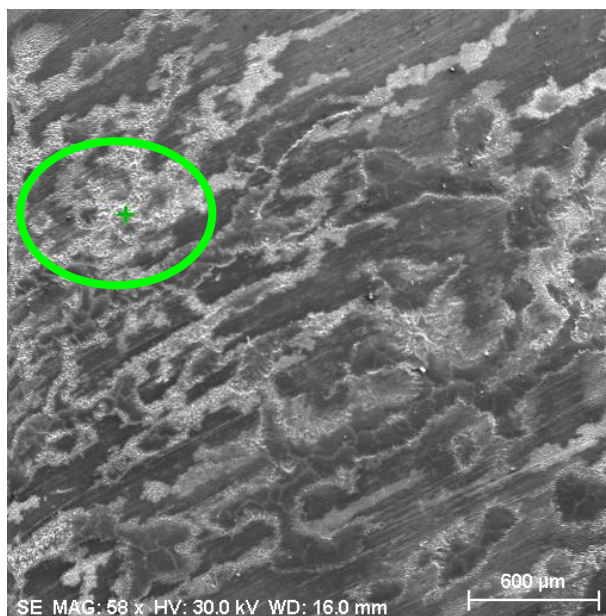


Fig. A.2.4. Analiza in punctul 1 (58x).
Materialul probei – aliajul aluminiului Д16

Tabel A.2.2. Compozitia chimica în punctul 1

Bruker AXS Microanalysis GmbH, Germany 12/06/2010							
Date: 12/06/2010							
Element	AN	series	Net	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Aluminium	13	K-series	187604	106,9711	86,32768	84,86914	5,390863
Oxygen	8	K-series	1225	7,524326	6,072273	10,06732	1,644354
Copper	29	K-series	3464	3,9386	3,178525	1,326795	0,145962
Magnesium	12	K-series	5317	3,366359	2,716716	2,964934	0,233238
Silver	47	L-series	1359	1,487047	1,200075	0,295109	0,092381
Silicon	14	K-series	354	0,625427	0,504731	0,476699	0,07577
			Sum:	123,9128	100	100	

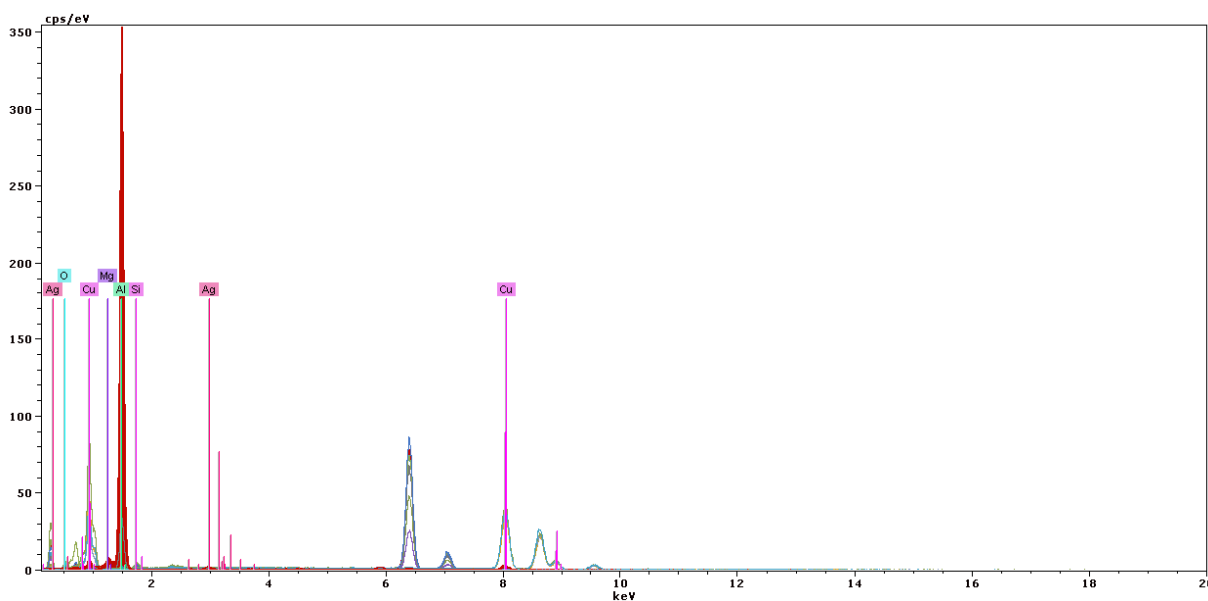


Fig. A.2.5. Spectrul elementelor chimice la analiza în punctul 1

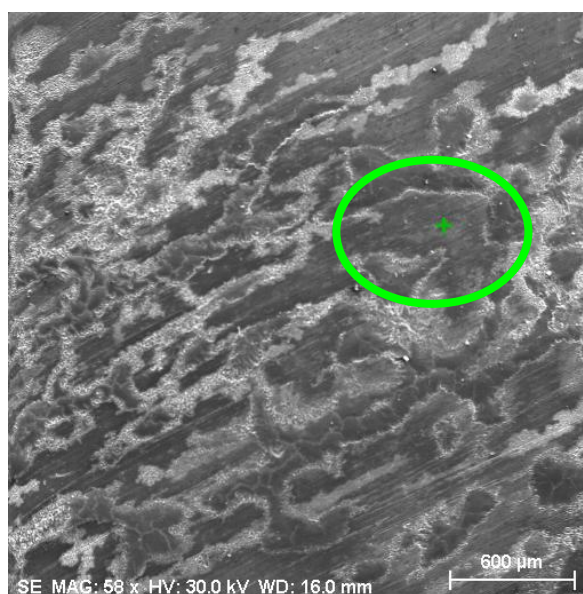


Fig. A.2.6. Analiza în punctul 2 (58x).
Materialul probei – aliajul aluminiului D16

Tabelul A.2.3. Compozitia chimica în punctul 2

Bruker AXS Microanalysis GmbH, Germany 12/06/2010							
Date: 12/06/2010							
Element	AN	series	Net	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Aluminium	13	K-series	188711	129,3345	82,34412	76,84208	6,51255
Oxygen	8	K-series	3167	15,47148	9,850319	15,50172	2,728424
Copper	29	K-series	3687	3,84441	2,447643	0,969824	0,141786
Magnesium	12	K-series	4896	3,796692	2,417262	2,504156	0,261116
Carbon	6	K-series	549	2,843603	1,810453	3,795259	0,830205
Silver	47	L-series	949	0,915109	0,582628	0,135998	0,070516
Manganese	25	K-series	1229	0,860053	0,547575	0,25096	0,059751
			Sum:	157,0658	100	100	

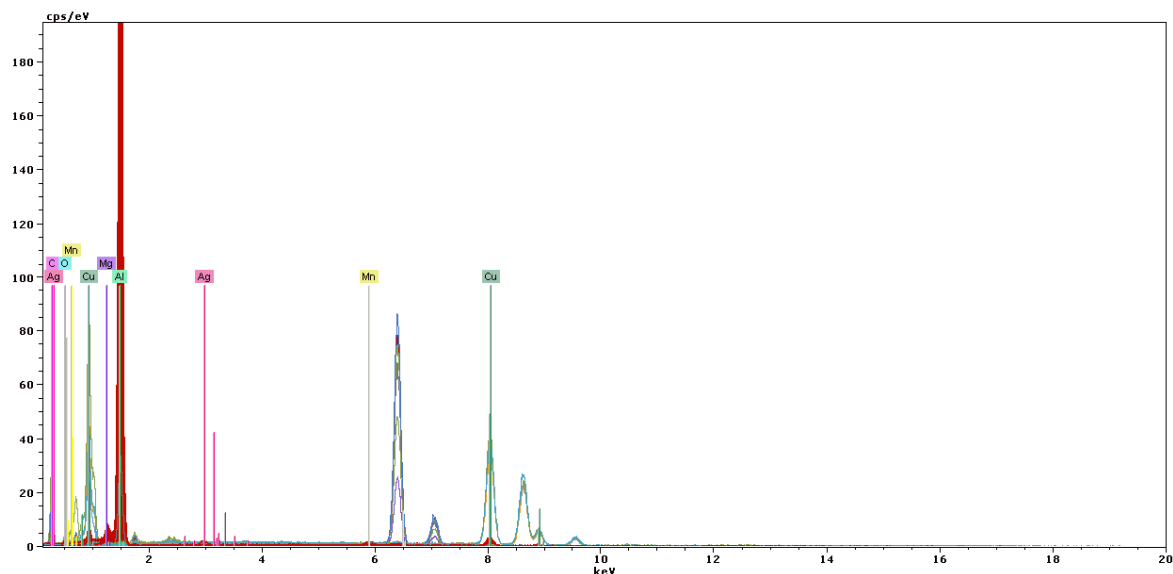


Fig. A.2.7. Spectrul elementelor chimice la analiza in punctul 2

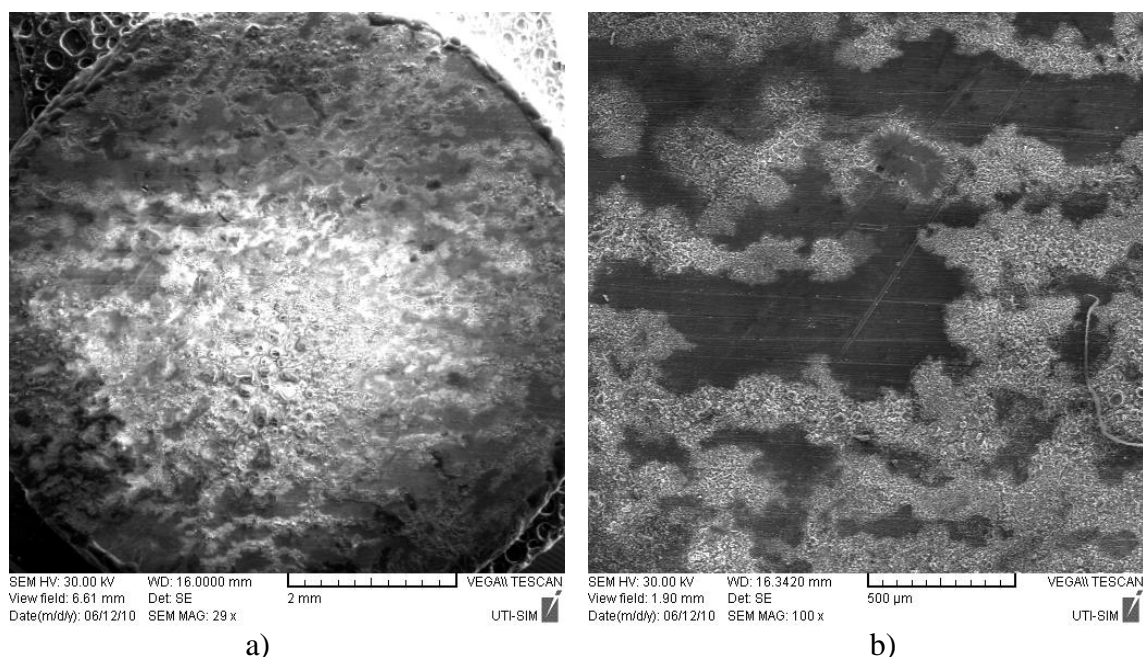
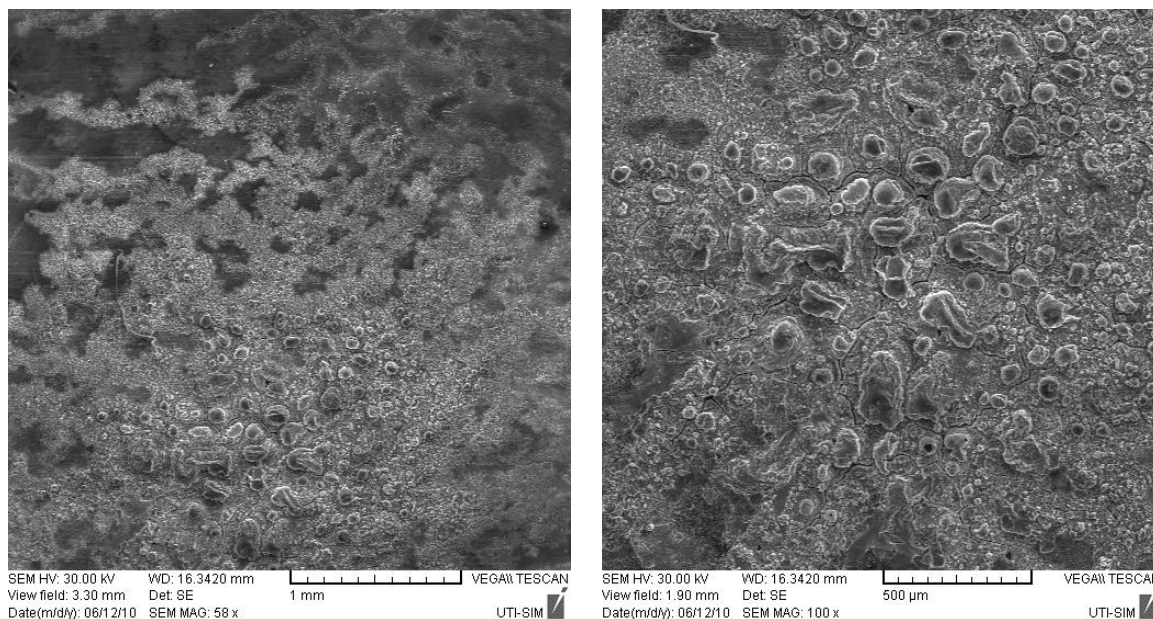


Fig. A.2.8. a) Fotografie ansamblu, 29x; b) Zona de mijloc, 100x

Regimul de prelucrare: tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare $U_c = 160$ V; capacitatea bateriei de condensatoare $C = 600 \mu\text{F}$; distanța între electrozi $S = 1,5$ mm; frecvența impulsurilor $f = 15$ Hz. Materialul probei – aliajul aluminiului D16



a) b)

Fig. A.2.9. Microstructuri SEM; a) 58x; b) 100x

Regimul de prelucrare: tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare $U_c = 160$ V; capacitatea bateriei de condensatoare $C = 600 \mu\text{F}$; distanța între electrozi $S = 1,5$ mm; frecvența impulsurilor $f = 15$ Hz. Materialul probei – aliajul aluminiului D16

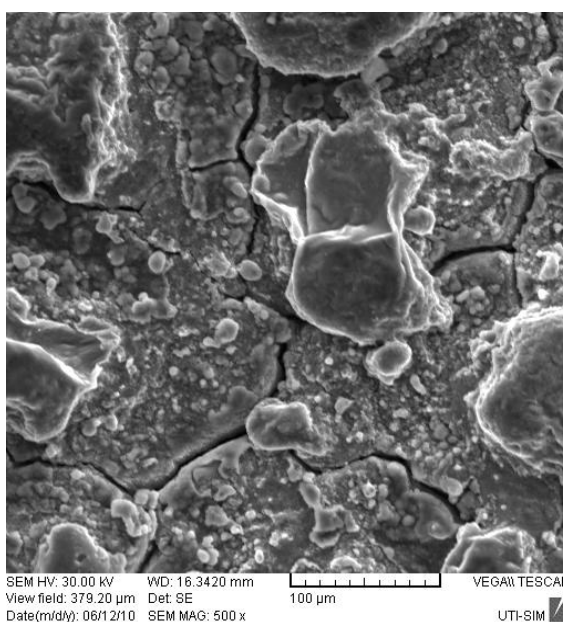


Fig. A.2.10. Microstructura SEM; a) 500x

Regimul de prelucrare: tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare $U_c = 160$ V; capacitatea bateriei de condensatoare $C = 600 \mu\text{F}$; distanța între electrozi $S = 1,5$ mm; frecvența impulsurilor $f = 15$ Hz. Materialul probei – aliajul aluminiului D16

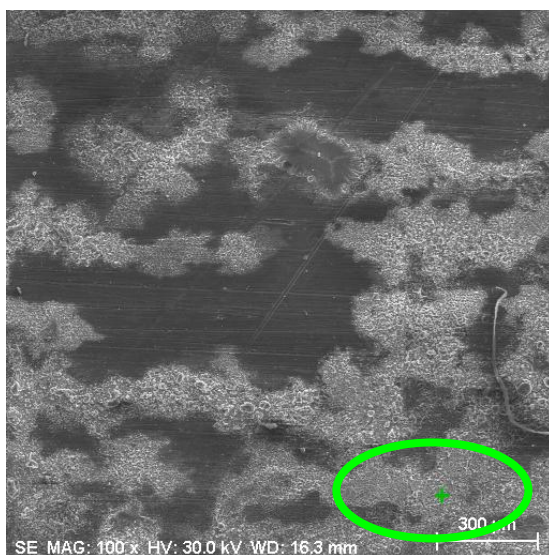


Fig. A.2.11. Analiza în punctul 1 (100x).
Materialul probei – aliajul aluminiului D16

Tabelul A.2.4. Compozitia chimica a punctului 1

Element	AN	series	Net	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Aluminium	13	K-series	187125	97,80382	66,84407	55,68556	4,93105
Oxygen	8	K-series	1791	20,41272	13,95108	19,59975	4,149014
Nitrogen	7	K-series	1406	16,18331	11,06049	17,74945	3,369955
Magnesium	12	K-series	5857	3,638596	2,4868	2,299809	0,248769
Copper	29	K-series	3046	3,542442	2,421084	0,856383	0,136435
Carbon	6	K-series	1250	2,659919	1,817923	3,402066	0,599491
Silver	47	L-series	1458	1,263812	0,863753	0,179988	0,081325
Manganese	25	K-series	1108	0,811769	0,554804	0,226993	0,058817
			Sum:	146,3164	100	100	

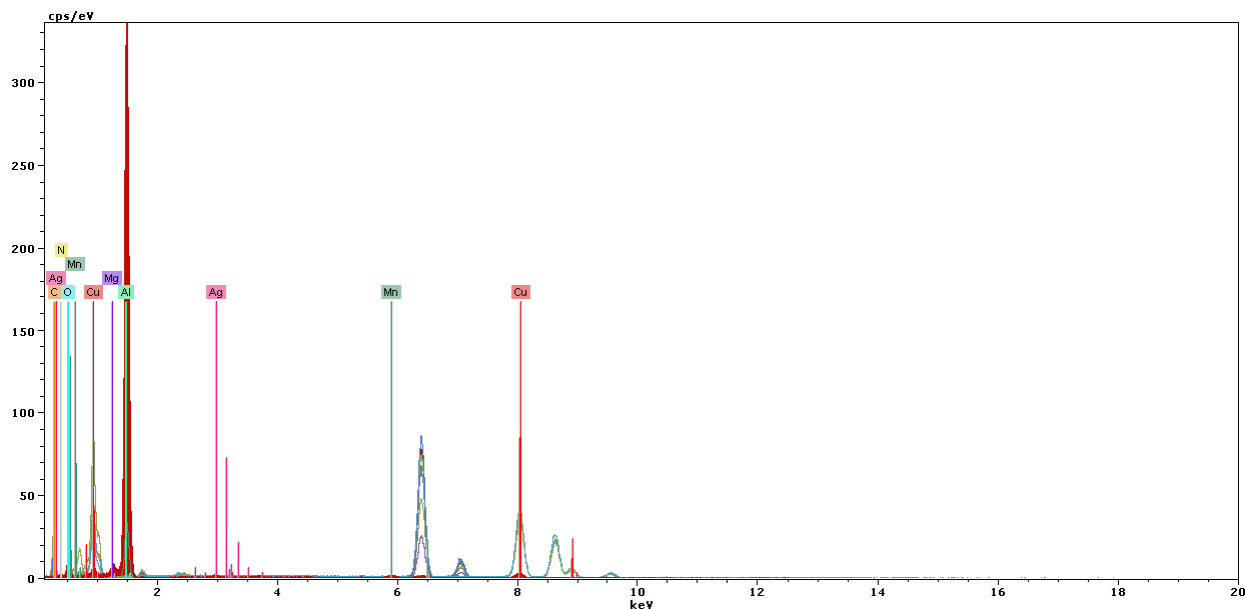


Fig. A.2.12. Spectrul compozitiei chimice la analiza punctului 1

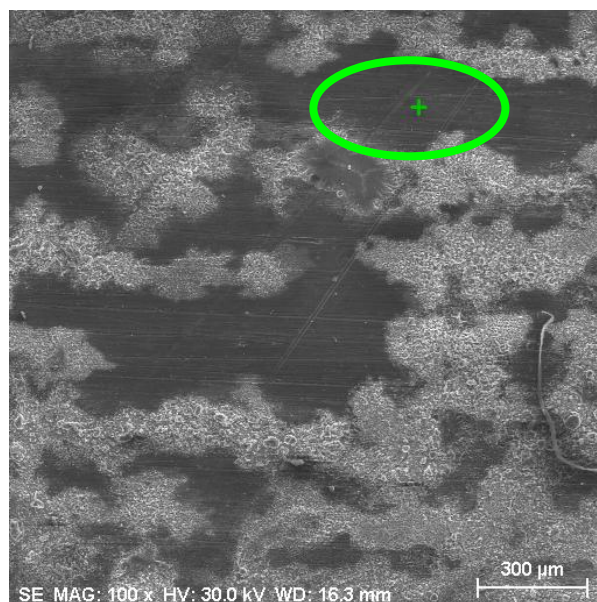


Fig. A.2.13. Analiza în punctul 2 (100x).
Materialul probei – aliajul aluminiului Д16

Tabel A.2.5. Compozitia chimica a punctului 2

Element	AN	series	Net	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Aluminium	13	K-series	187748	106,426	76,90807	69,98993	5,363511
Oxygen	8	K-series	3170	16,08704	11,62519	17,84132	2,841157
Carbon	6	K-series	1297	5,236193	3,7839	7,735545	1,165388
Copper	29	K-series	3644	4,688557	3,388155	1,309198	0,167715
Magnesium	12	K-series	5360	3,519953	2,543671	2,569779	0,242631
Silver	47	L-series	1488	1,440995	1,041325	0,237041	0,088912
Manganese	25	K-series	1167	0,982071	0,709687	0,317194	0,065277
			Sum:	138,3808	100	100	

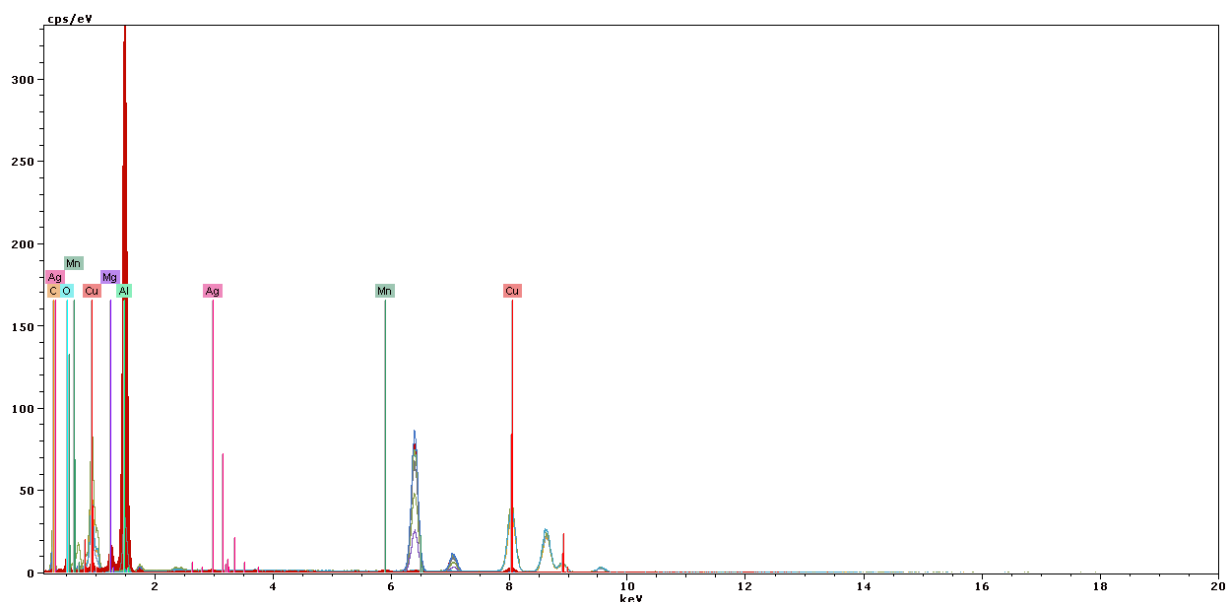
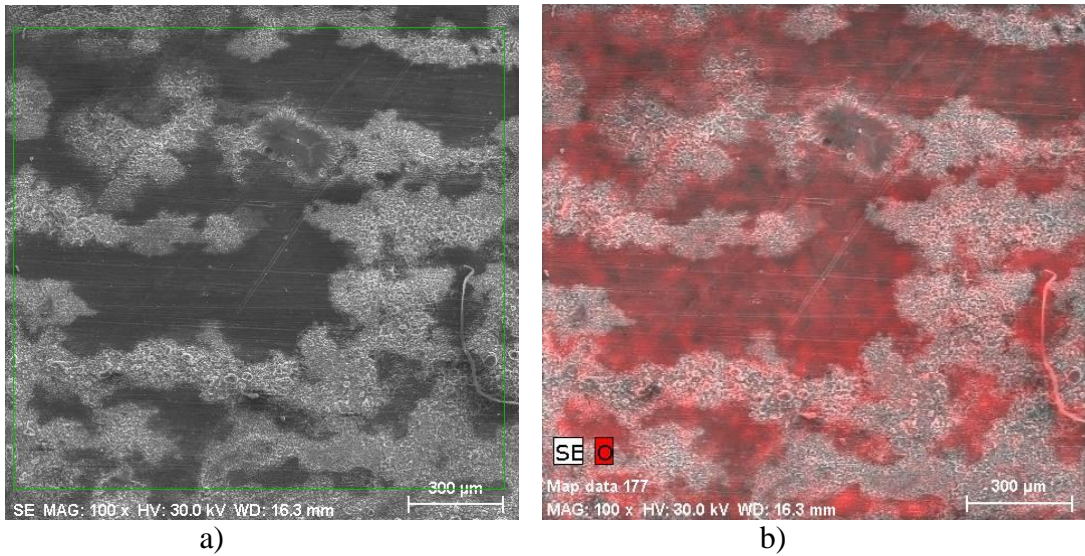
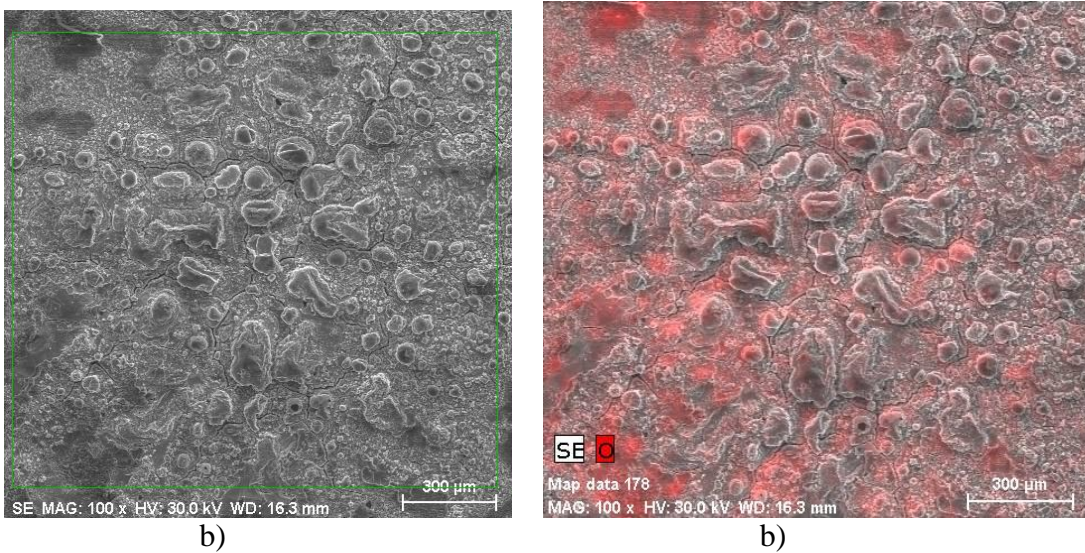


Fig. A.2.14. Spectrul compozitiei chimice la analiza punctului 2



a) b)
 Fig. A.2.15. Distribuția elementelor; a) 100x; b) Oxigen
 Materialul probei – aliajul aluminiului D16



b) b)
 Fig. A.2.16. Distribuția elementelor; a) 100x; b) Oxigen
 Materialul probei – aliajul aluminiului D16

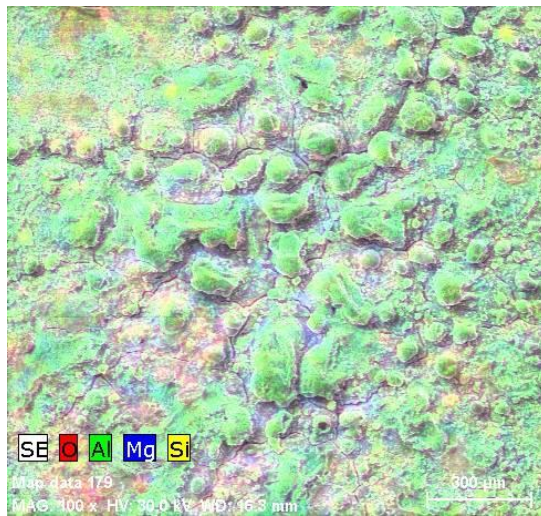


Fig. A.2.17. Distribuția elementelor în stratul de suprafață al probei executate din aliajul D16

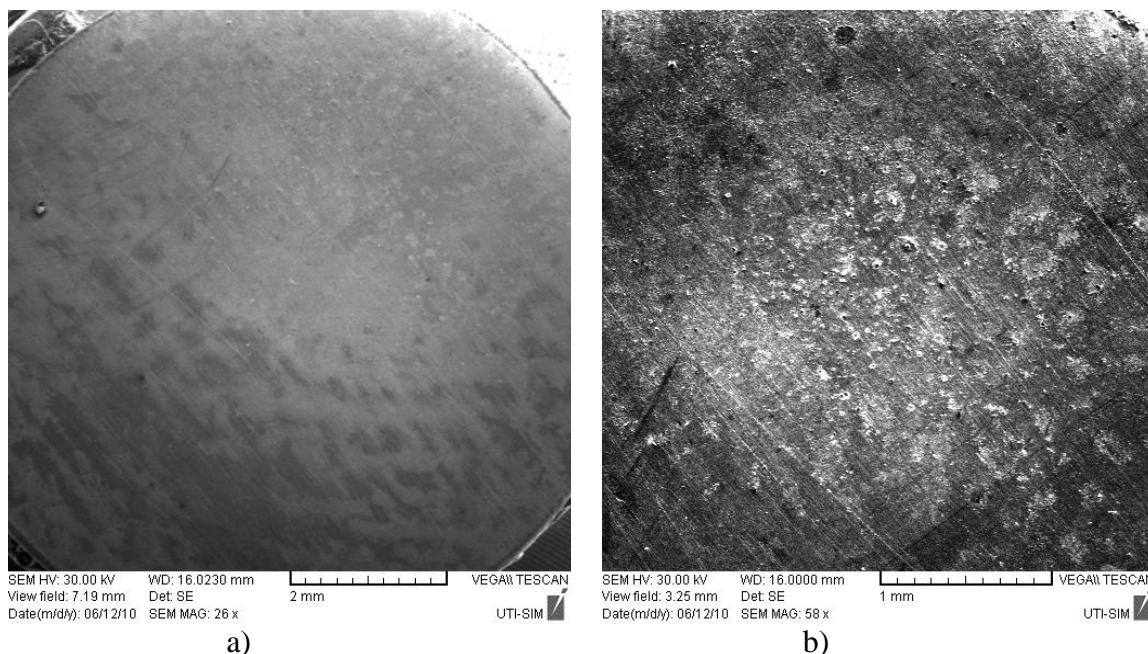


Fig. A.2.18. Microstructuri SEM; a) ansamblu, 26x; b) zona de mijloc, 58x

Regimul de prelucrare: tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare $U_c = 120$ V; capacitatea bateriei de condensatoare $C = 600 \mu\text{F}$; distanța între electrozi $S = 1,5$ mm; frecvența impulsurilor $f = 15$ Hz. Materialul probei – alamă JI63

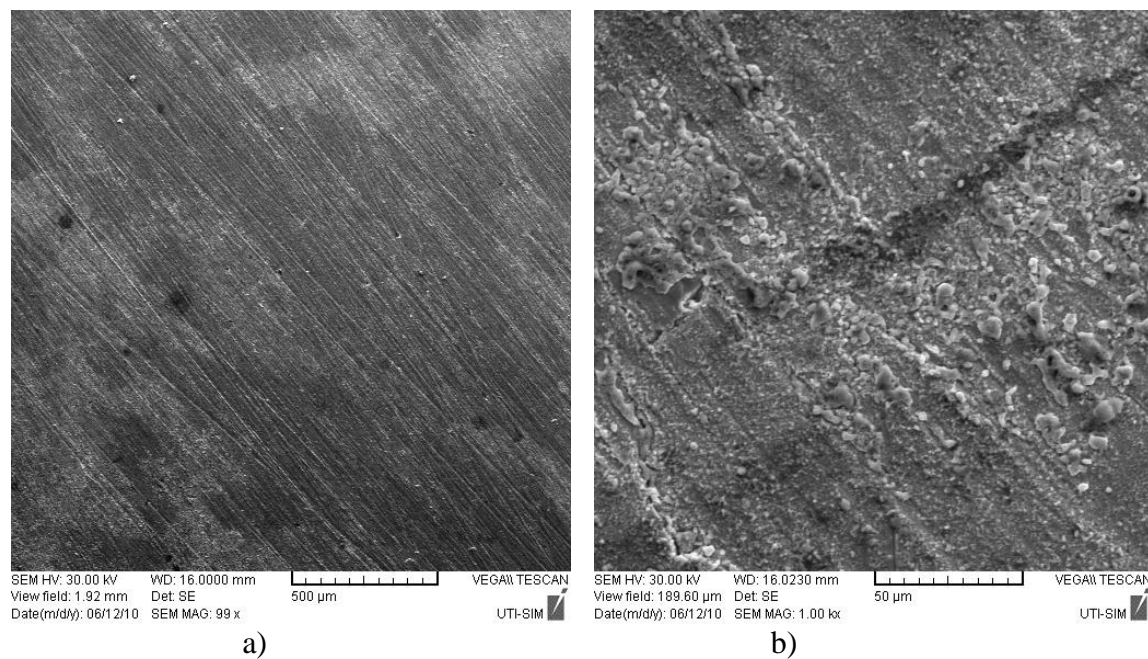


Fig. A.2.19. Microstructuri SEM; a) 99x; b) 1.00kx

Regimul de prelucrare: tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare $U_c = 120$ V; capacitatea bateriei de condensatoare $C = 600 \mu\text{F}$; distanța între electrozi $S = 1,5$ mm; frecvența impulsurilor $f = 15$ Hz. Materialul probei – alamă JI63

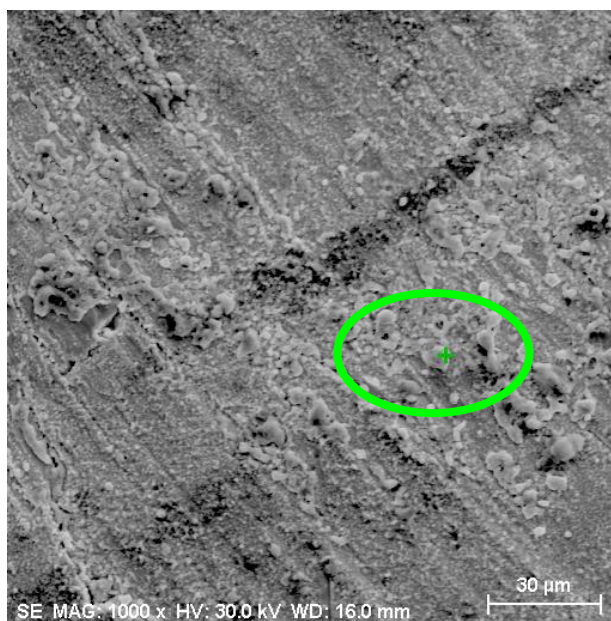


Fig. A.2.20. Analiza în punct (1000x).
Materialul probei – lamă JI63

Tabelul A.2.6. Compoziția chimică în punct

Element	AN	series	Net	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Copper	29	K-series	57474	37,38215	42,30071	23,25075	0,955825
Zinc	30	K-series	37623	29,06826	32,89292	17,56987	0,751771
Oxygen	8	K-series	2710	14,77477	16,71876	36,49874	2,637644
Carbon	6	K-series	2594	6,64353	7,517651	21,86153	1,211133
Magnesium	12	K-series	262	0,503696	0,56997	0,819094	0,076852
			Sum:	88,37241	100	100	

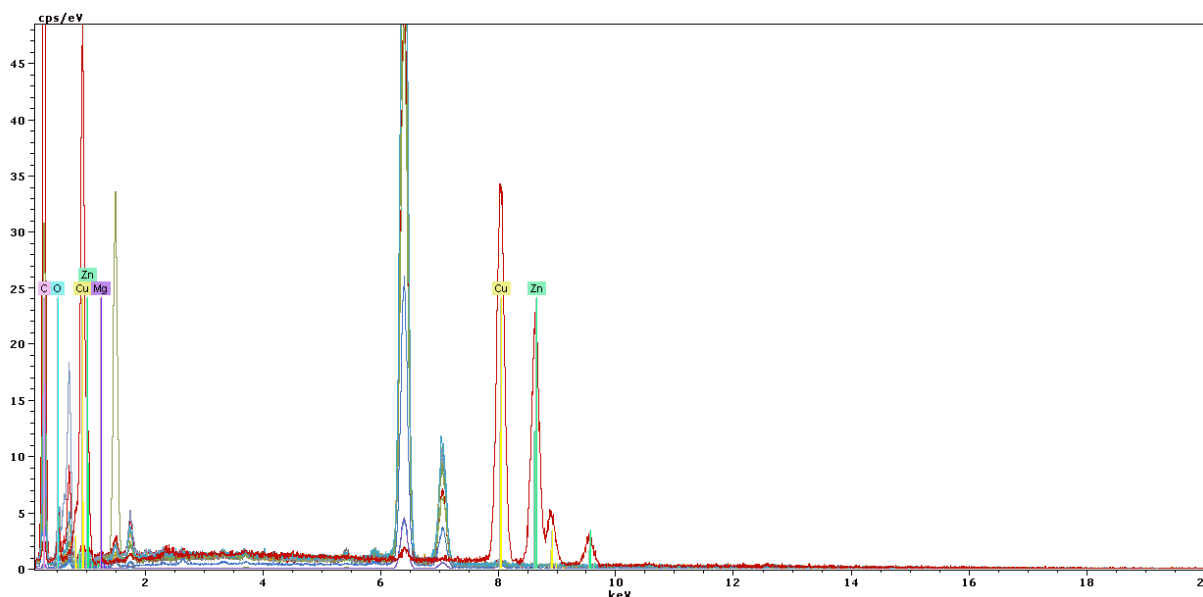


Fig. A.2.21. Spectrul compoziției chimice la analiza în punct

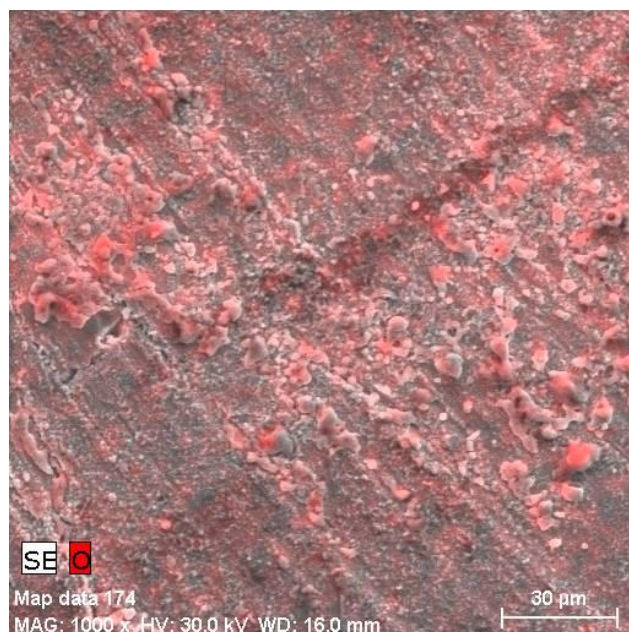
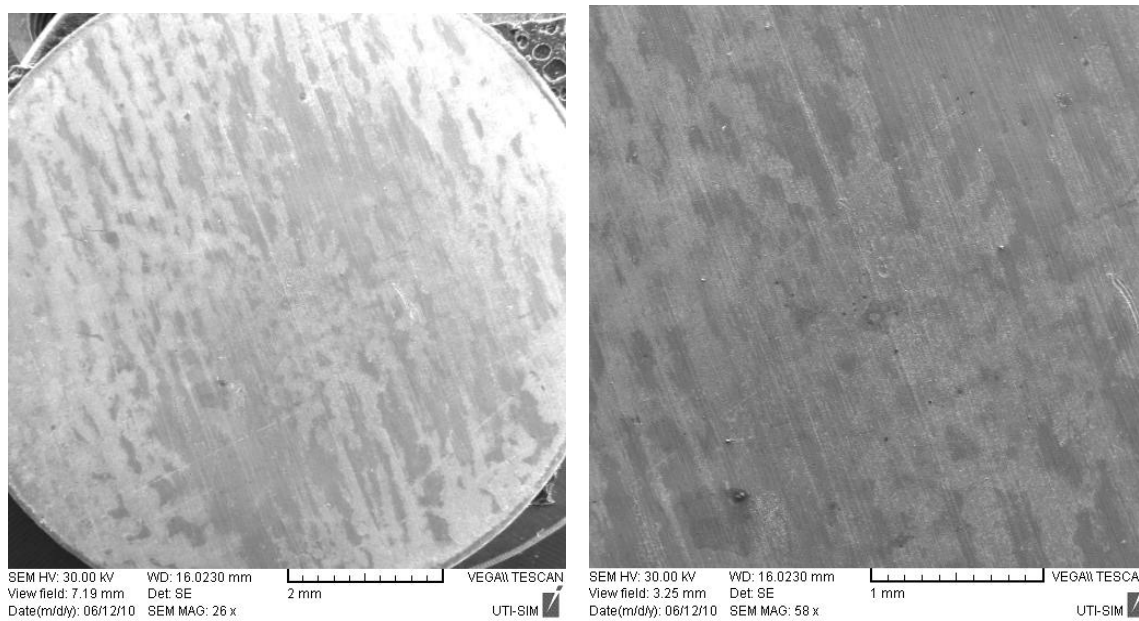


Fig. A.2.22. Distribuția oxigenului (1000x).
Materialul probei – alamă JI63



a)

b)

Fig. A.2.23. Microstructuri SEM; a) ansamblu, 26x; b) 58x

Regimul de prelucrare: tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare $U_c = 160$ V; capacitatea bateriei de condensatoare $C = 600$ μ F; distanța între electrozi $S = 1,5$ mm; frecvența impulsurilor $f = 15$ Hz. Materialul probei – alamă JI63

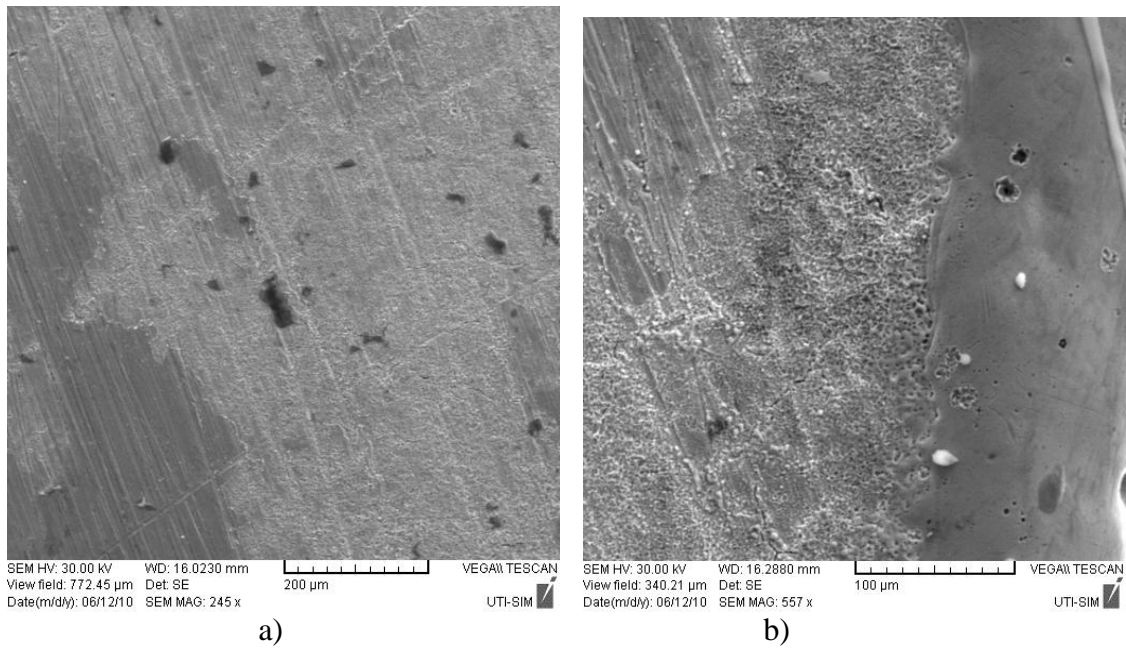


Fig. A.2.24. Microstructuri SEM; a) 245x; b) 557x

Regimul de prelucrare: tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare $U_c = 160$ V; capacitatea bateriei de condensatoare $C = 600 \mu\text{F}$; distanța între electrozi $S = 1,5$ mm; frecvența impulsurilor $f = 15$ Hz. Materialul probei – alamă JI63



Fig. A.2.25. Analiza în punctul 1 (564x).
Materialul probei – alamă JI63

Tabel A.2.7. Compozitia chimica în punctul 1

Element	AN	series	Net	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Copper	29	K-series	74023	51,26458	56,31805	44,49616	1,296609
Zinc	30	K-series	40970	33,90298	37,24501	28,59696	0,870866
Carbon	6	K-series	1505	5,859344	6,436937	26,90687	1,215098
Sum:				91,0269	100	100	

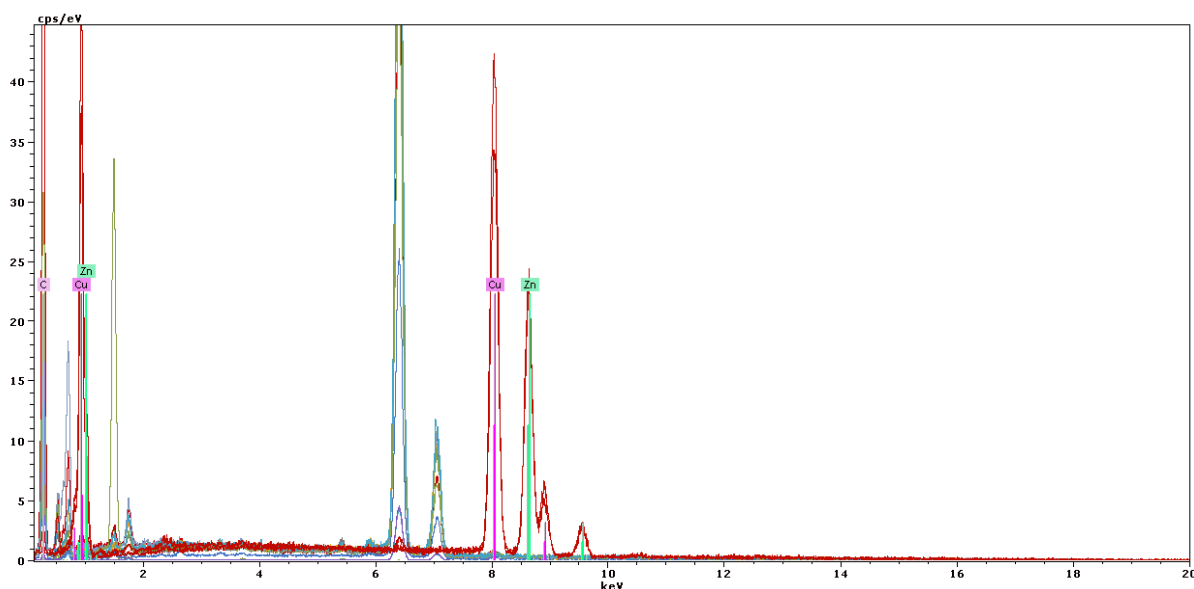


Fig. A.2.26. Spectrul compozitiei chimice la analiza în punctul 1

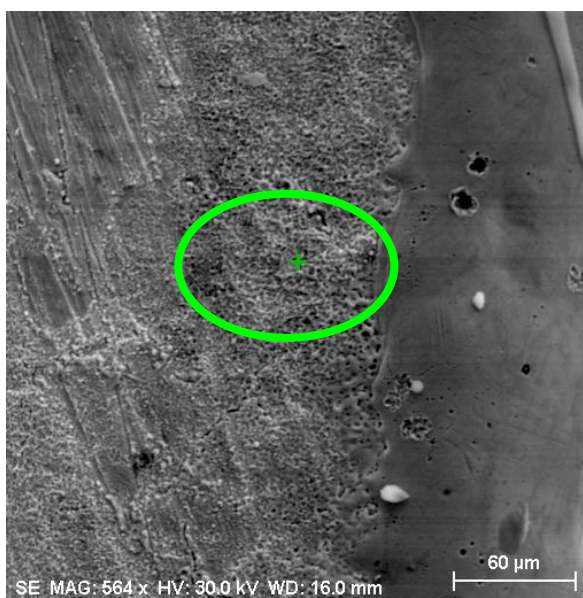


Fig. A.2.27. Analiza în punctul 2 (564x).
Materialul probei – alamă JI63

Tabel A.2.8. Compozitia chimica în punctul 2

Element	AN	series	Net	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Copper	29	K-series	53139	38,46523	44,05333	23,73165	0,984129
Zinc	30	K-series	30732	26,68875	30,566	16,00164	0,696116
Oxygen	8	K-series	2220	14,83405	16,98909	36,34995	2,767614
Carbon	6	K-series	2585	7,327127	8,391587	23,91676	1,334157
			Sum:	87,31516	100	100	

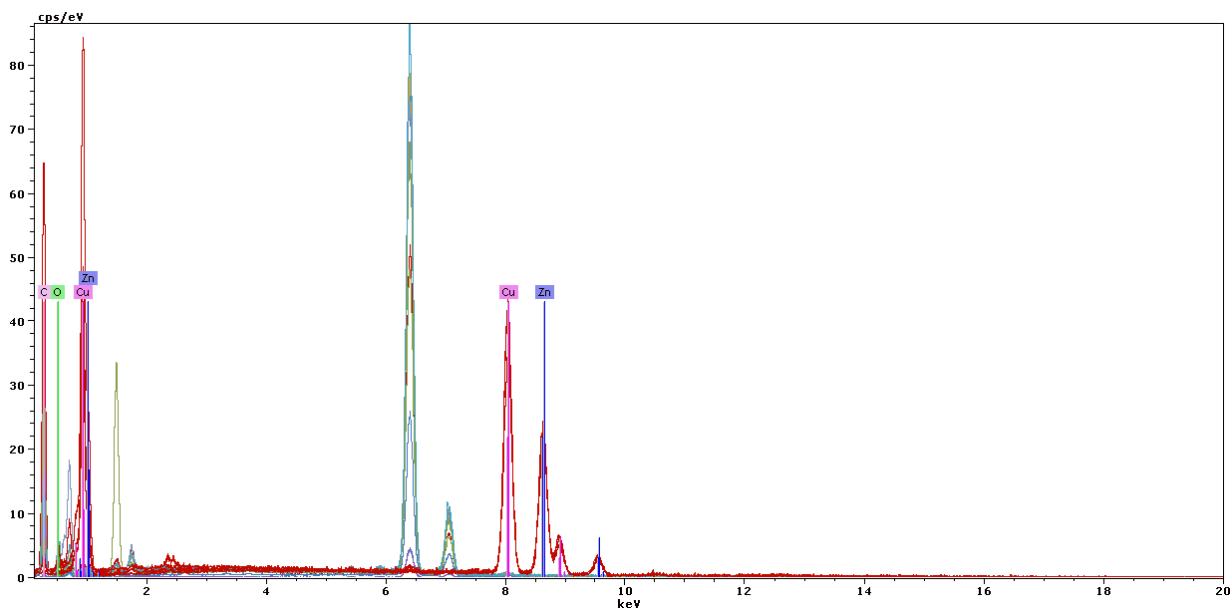


Fig. A.2.28. Spectrul compozitiei chimice la analiza in punctul 2

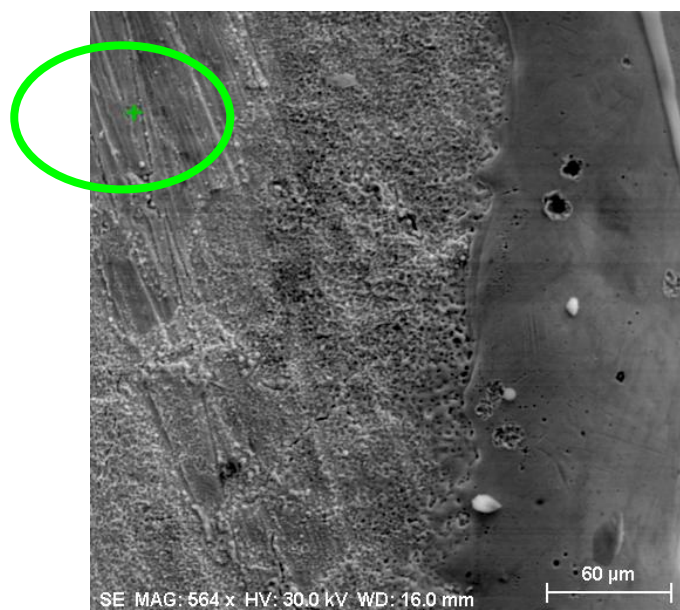


Fig. A.2.29. Analiza în punctul 3 (564x).
Materialul probei – alamă JI63

Tabel A.2.9. Compozitia chimica în punctul 3

Element	AN	series	Net	[wt.%]	[norm. wt.%]	[norm. at.%]	Error in %
Copper	29	K-series	59310	37,38636	42,46657	25,00438	0,955437
Zinc	30	K-series	42247	31,95516	36,29735	20,76925	0,821696
Oxygen	8	K-series	2793	13,52155	15,35892	35,91816	2,4005
Carbon	6	K-series	1887	5,174086	5,877162	18,3082	1,018806
Sum:				88,03715	100	100	

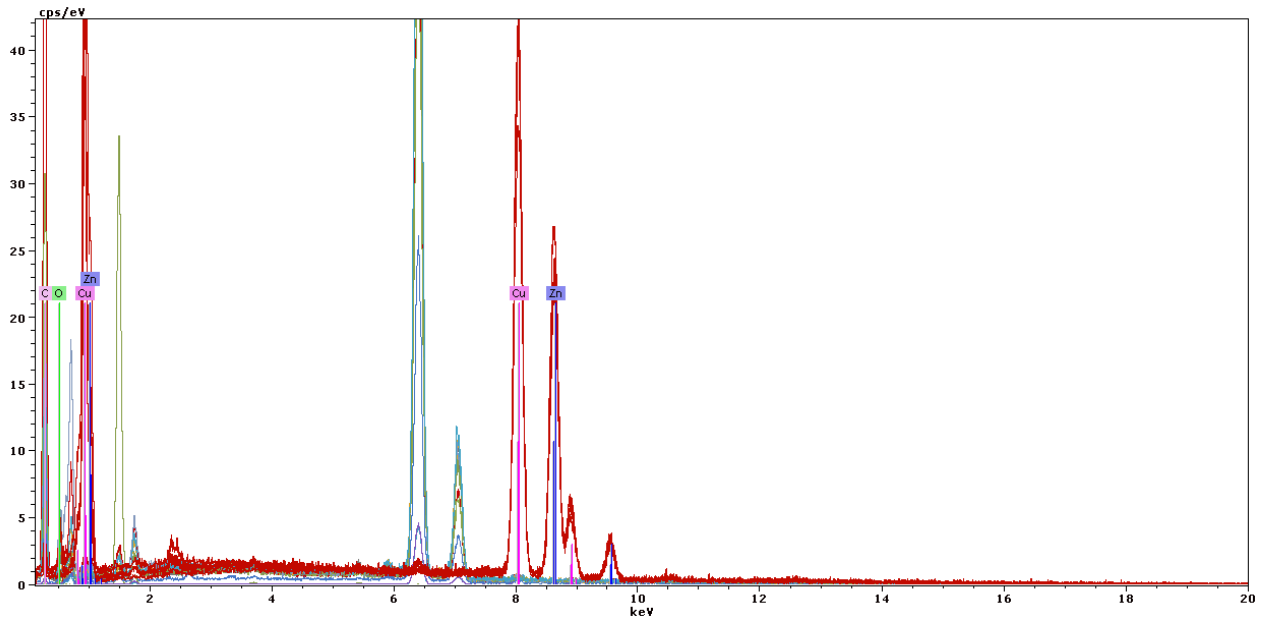


Fig. A.2.30. Spectrul compozitiei chimice la analiza în punctul 3

Anexa 3. Aproximarea matematica a datelor experimentale privind dependențele tehnologice

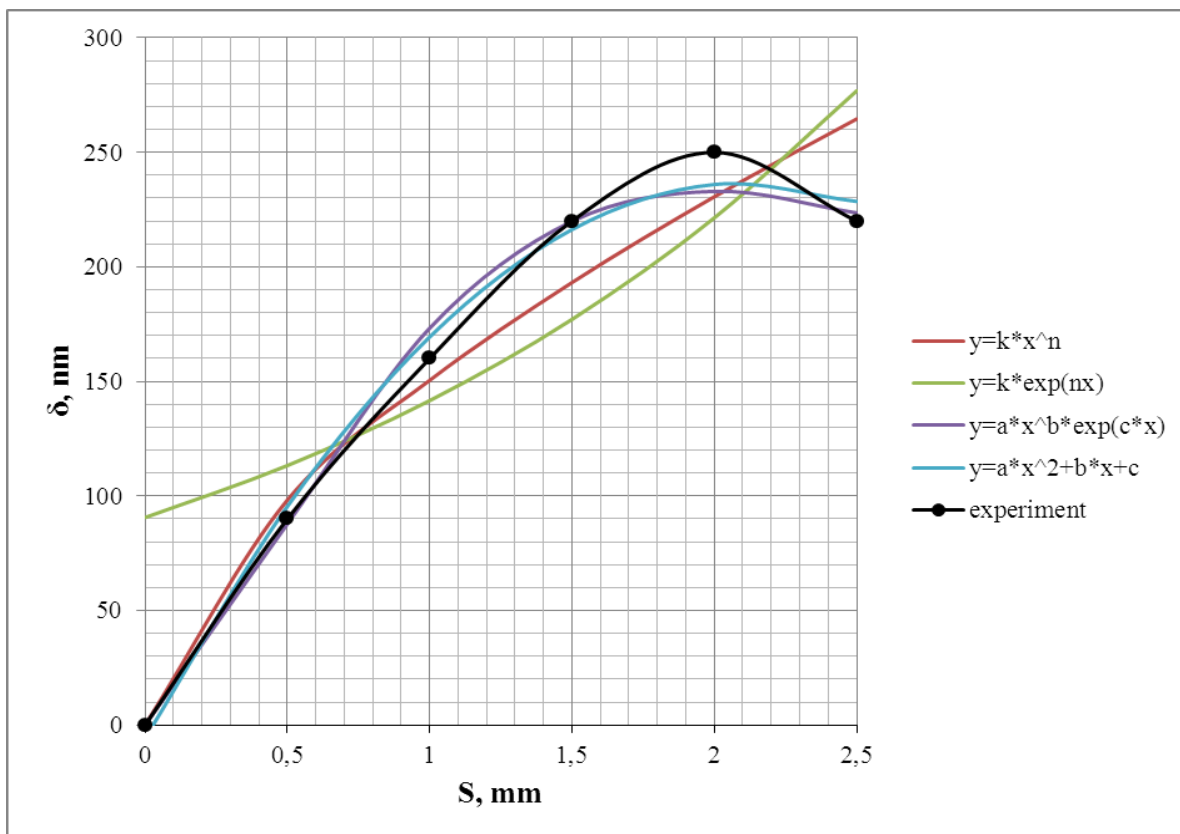


Fig. A3.1. Aproximarea dependenței grosimii stratului oxidat de mărimea interstițiului folosind programul Microsoft Excel 2010

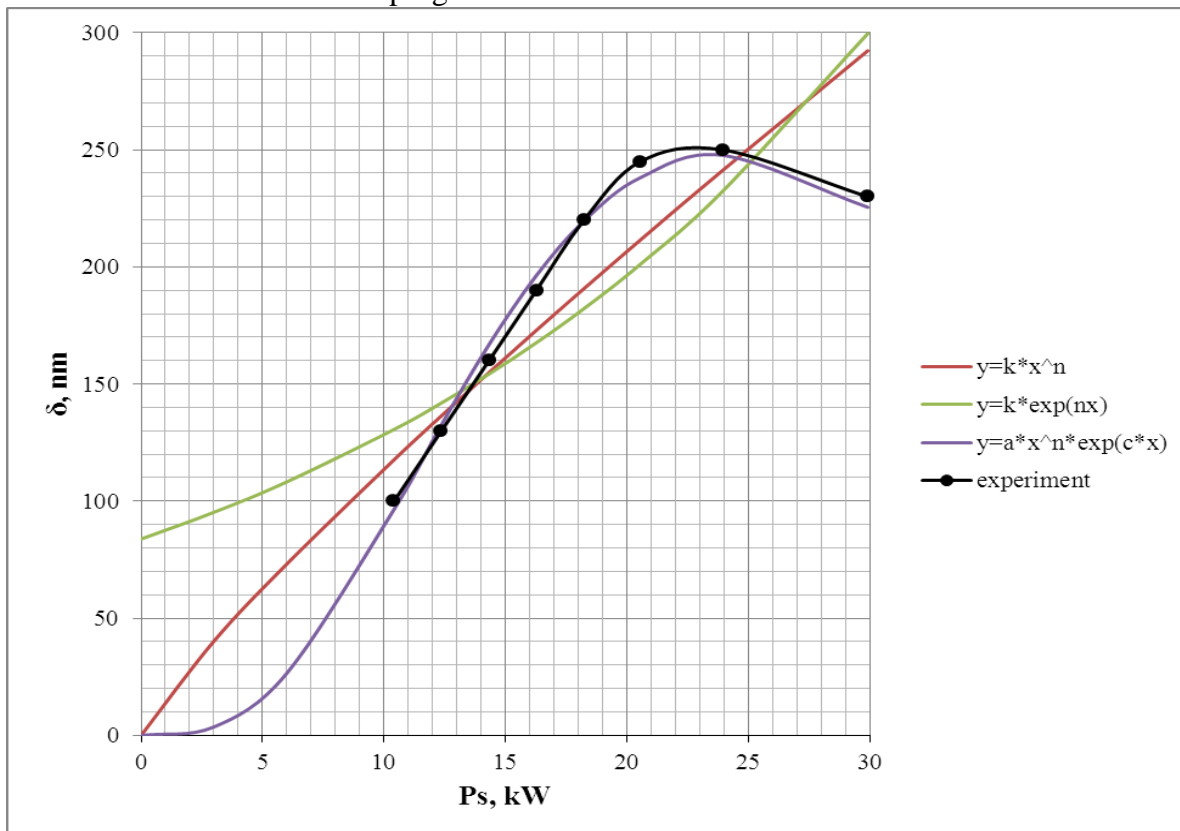


Fig. A3.2. Aproximarea dependenței grosimii stratului oxidat de puterea disipată în interstițiu folosind programul Microsoft Excel 2010

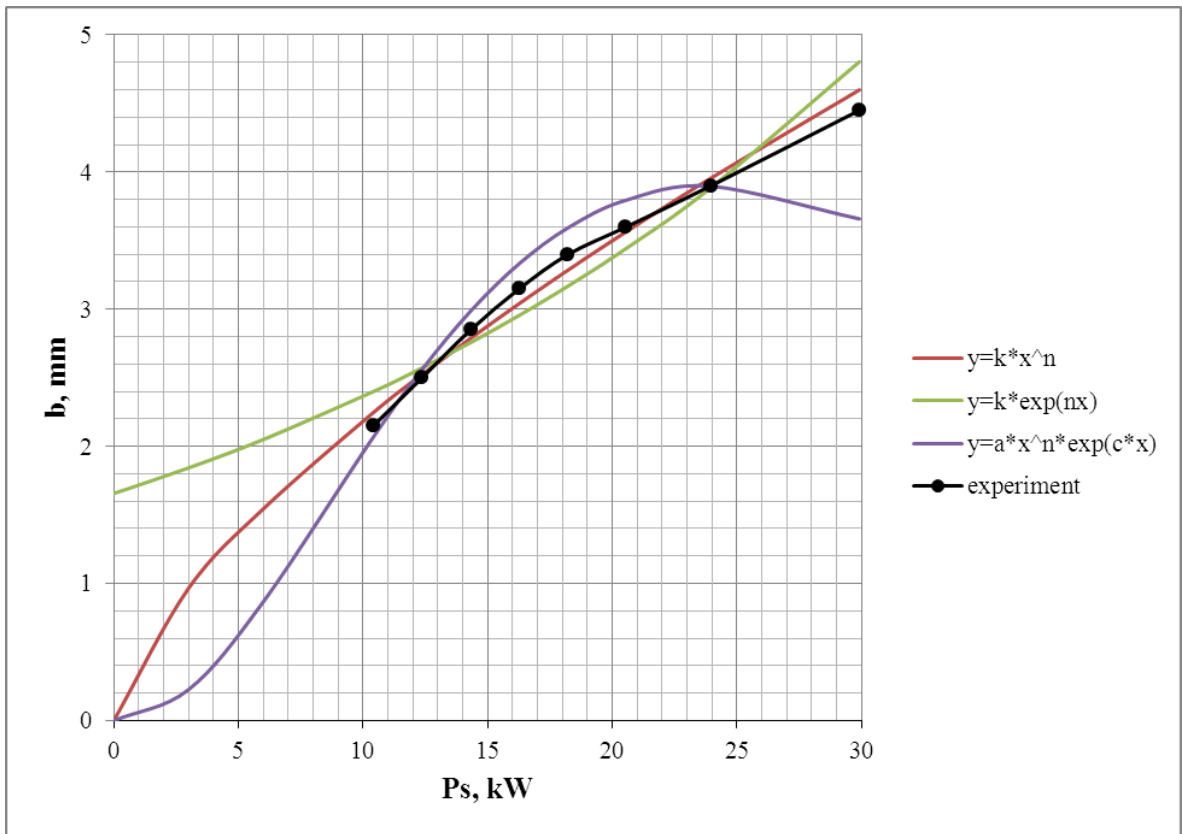


Fig. A3.3. Aproximarea dependenței lățimii fășiei de oxidare de puterea disipată în interstițiu folosind programul Microsoft Excel 2010. Materialul piesei – aliajul aluminiului D16

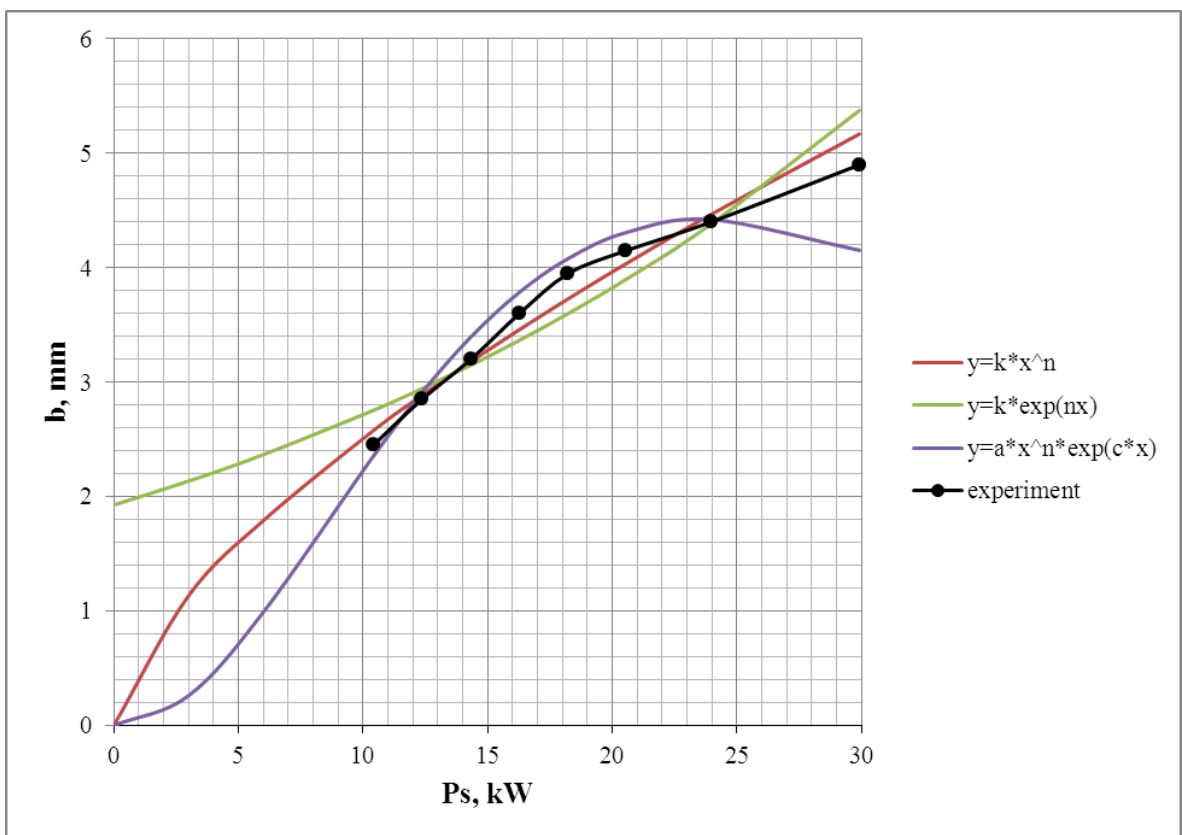


Fig. A3.4. Aproximarea dependenței lățimii fășiei de oxidare de puterea disipată în interstițiu folosind programul Microsoft Excel 2010. Materialul piesei – oțel 45

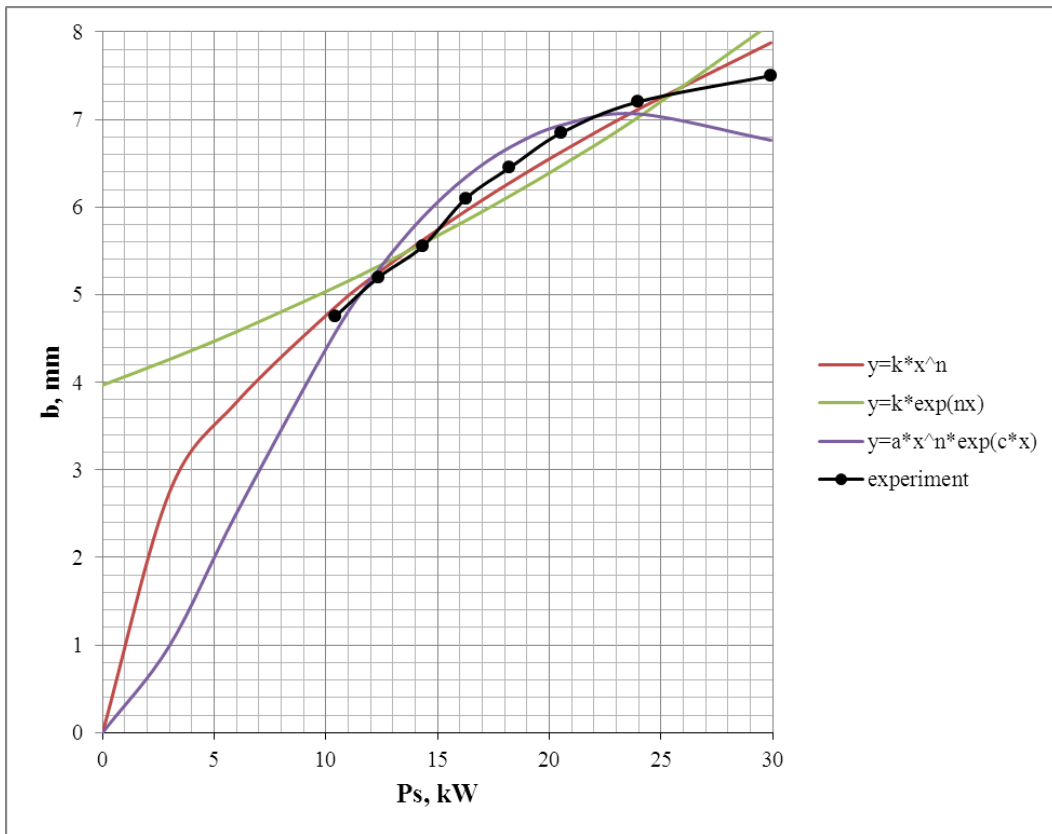


Fig. A3.5. Aproximarea dependenței lățimii fășiei de oxidare de puterea disipată în interstițiu folosind programul Microsoft Excel 2010. Materialul piesei – aliajul titanului BT8

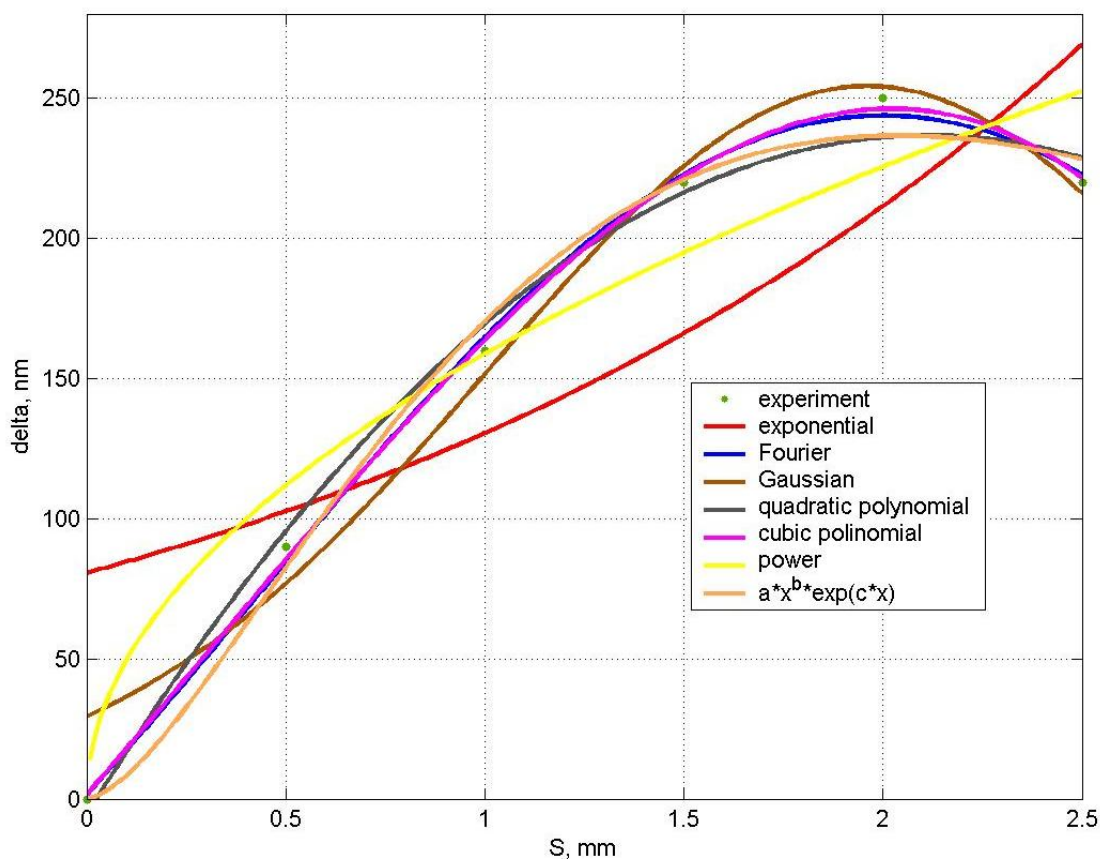


Fig. A3.6. Aproximarea dependenței grosimii stratului oxidat de mărimea interstițiului folosind programul MATLAB 5.0

MATLAB 5.0 MAT-file, Platform: PCWIN, Created on: Thu May 22 11:14:16 2014

General model Exponential:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 80.5 \quad (-9.288, 170.3)$$

$$b = 0.4827 \quad (-0.0756, 1.041)$$

Goodness of fit:

$$\text{SSE: } 1.432e+004$$

$$\text{R-square: } 0.6869$$

$$\text{Adjusted R-square: } 0.6086$$

$$\text{RMSE: } 59.83$$

General model Fourier:

$$f(x) = a_0 + a_1 \cdot \cos(x \cdot w) + b_1 \cdot \sin(x \cdot w)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a_0 = 74.18 \quad (-97.45, 245.8)$$

$$a_1 = -72.59 \quad (-228.1, 82.92)$$

$$b_1 = 153.2 \quad (-96.17, 402.6)$$

$$w = 1.007 \quad (0.2149, 1.798)$$

Goodness of fit:

$$\text{SSE: } 110.2$$

$$\text{R-square: } 0.9976$$

$$\text{Adjusted R-square: } 0.994$$

$$\text{RMSE: } 7.424$$

General model Gaussian:

$$f(x) = a1 * \exp(-((x-b1)/c1)^2)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a1 = 254.2 \quad (209.7, 298.8)$$

$$b1 = 1.961 \quad (1.648, 2.273)$$

$$c1 = 1.335 \quad (0.8671, 1.803)$$

Goodness of fit:

$$\text{SSE: } 1177$$

$$\text{R-square: } 0.9743$$

$$\text{Adjusted R-square: } 0.9571$$

$$\text{RMSE: } 19.81$$

General model Quadrant polynomial:

$$f(x) = p1 * x^2 + p2 * x + p3$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = -54.29 \quad (-79.35, -29.22)$$

$$p2 = 229.4 \quad (164.1, 294.7)$$

$$p3 = -5.714 \quad (-40.42, 28.99)$$

Goodness of fit:

$$\text{SSE: } 434.3$$

$$\text{R-square: } 0.9905$$

$$\text{Adjusted R-square: } 0.9842$$

$$\text{RMSE: } 12.03$$

General model Cubic polynomial:

$$f(x) = p1 * x^3 + p2 * x^2 + p3 * x + p4$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = -19.26 \quad (-42.43, 3.912)$$

$$p2 = 17.94 \quad (-70.29, 106.2)$$

$$p3 = 163.5 \quad (74.7, 252.2)$$

$$p4 = 1.508 \quad (-21.34, 24.36)$$

Goodness of fit:

$$\text{SSE: } 58.73$$

$$\text{R-square: } 0.9987$$

$$\text{Adjusted R-square: } 0.9968$$

$$\text{RMSE: } 5.419$$

General model Power:

$$f(x) = a * x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 158.7 \quad (58.39, 259.1)$$

$$b = 0.5064 \quad (-0.4118, 1.424)$$

Goodness of fit:

$$\text{SSE: } 2758$$

$$\text{R-square: } 0.8306$$

$$\text{Adjusted R-square: } 0.7741$$

$$\text{RMSE: } 30.32$$

General model $a * x^b * \exp(c * x)$:

$$f(x) = a * x^b * \exp(c * x)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 377.9 \quad (-621.5, 1377)$$

b = 1.623 (-2.045, 5.29)
 c = -0.7967 (-3.272, 1.679)

Goodness of fit:

SSE: 413.4

R-square: 0.9746

Adjusted R-square: 0.9492

RMSE: 14.38

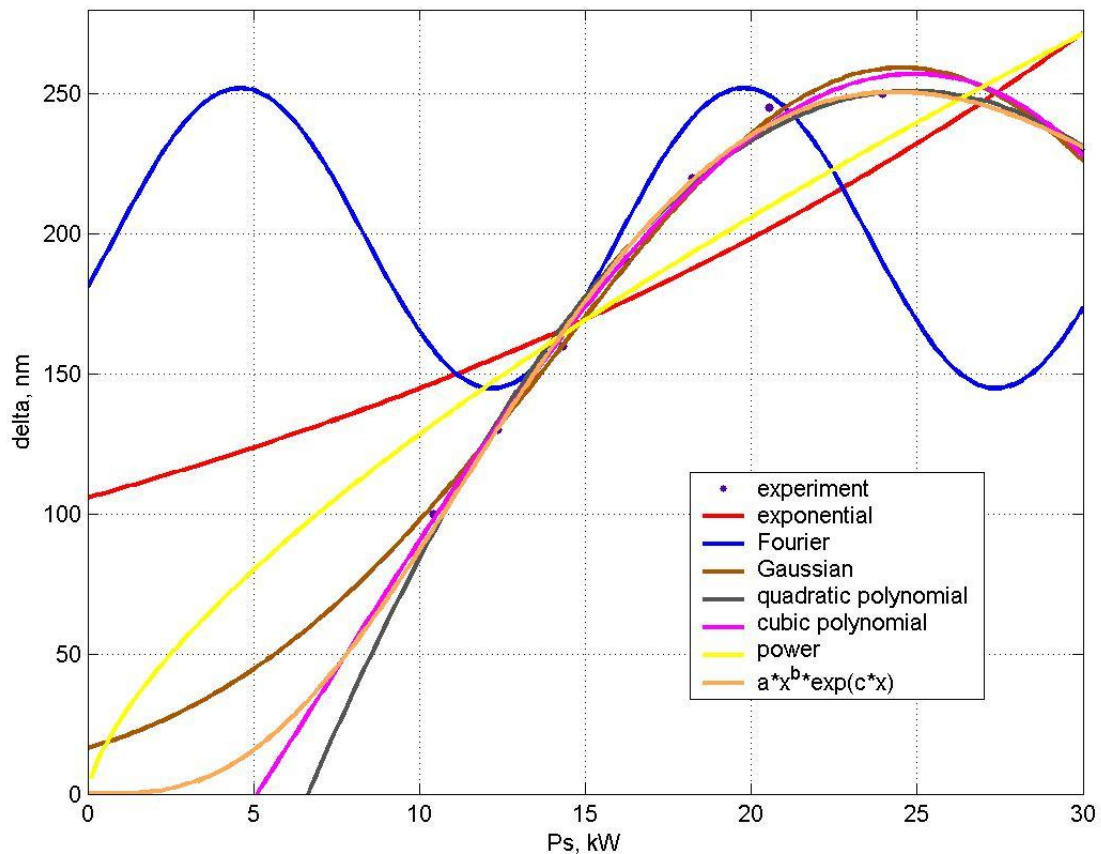


Fig. A3.7. Aproximarea dependenței grosimii stratului oxidat de puterea disipată în interstițiu folosind programul MATLAB 5.0

MATLAB 5.0 MAT-file, Platform: PCWIN, Created on: Thu May 22 11:14:16 2014

General model Exponential:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

a = 105.6 (46.94, 164.3)

b = 0.03151 (0.005926, 0.05709)

Goodness of fit:

SSE: 8309

R-square: 0.6175

Adjusted R-square: 0.5538

RMSE: 37.21

General model Fourier:

$$f(x) = a_0 + a_1 \cos(x*w) + b_1 \sin(x*w)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$\begin{aligned} a_0 &= 198.4 \quad (143.4, 253.4) \\ a_1 &= -17.23 \quad (-260.5, 226) \\ b_1 &= 50.74 \quad (-44.36, 145.8) \\ w &= 0.4137 \quad (0.1907, 0.6367) \end{aligned}$$

Goodness of fit:

$$\begin{aligned} \text{SSE} &: 1.135e+004 \\ \text{R-square} &: 0.4774 \\ \text{Adjusted R-square} &: 0.08543 \\ \text{RMSE} &: 53.27 \end{aligned}$$

General model Gaussian:

$$f(x) = a_1 \exp(-((x-b_1)/c_1)^2)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$\begin{aligned} a_1 &= 259.3 \quad (250.9, 267.7) \\ b_1 &= 24.54 \quad (23.85, 25.23) \\ c_1 &= 14.72 \quad (13.57, 15.87) \end{aligned}$$

Goodness of fit:

$$\begin{aligned} \text{SSE} &: 133.9 \\ \text{R-square} &: 0.9938 \\ \text{Adjusted R-square} &: 0.9914 \\ \text{RMSE} &: 5.176 \end{aligned}$$

General model Quadrant polynomial:

$$f(x) = p_1 * x^2 + p_2 * x + p_3$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$\begin{aligned} p_1 &= -0.7559 \quad (-0.9148, -0.5969) \\ p_2 &= 37.57 \quad (31.13, 44.01) \\ p_3 &= -216 \quad (-276.5, -155.6) \end{aligned}$$

Goodness of fit:

$$\begin{aligned} \text{SSE} &: 204.4 \\ \text{R-square} &: 0.9906 \\ \text{Adjusted R-square} &: 0.9868 \\ \text{RMSE} &: 6.394 \end{aligned}$$

General model Cubic polynomial:

$$f(x) = p_1 * x^3 + p_2 * x^2 + p_3 * x + p_4$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$\begin{aligned} p_1 &= -0.01927 \quad (-0.04915, 0.01061) \\ p_2 &= 0.4048 \quad (-1.401, 2.21) \\ p_3 &= 15.74 \quad (-18.61, 50.09) \\ p_4 &= -88.35 \quad (-293.7, 117) \end{aligned}$$

Goodness of fit:

$$\begin{aligned} \text{SSE} &: 113.5 \\ \text{R-square} &: 0.9948 \\ \text{Adjusted R-square} &: 0.9909 \\ \text{RMSE} &: 5.327 \end{aligned}$$

General model Power:

General model Power1:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 26.67 \quad (-6.946, 60.28)$$

$$b = 0.6822 \quad (0.2635, 1.101)$$

Goodness of fit:

SSE: 5419

R-square: 0.7506

Adjusted R-square: 0.709

RMSE: 30.05

General model $a \cdot x^b \cdot \exp(c \cdot x)$:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.1111 \quad (-0.005433, 0.2275)$$

$$b = 3.521 \quad (2.992, 4.051)$$

$$c = -0.1446 \quad (-0.171, -0.1182)$$

Goodness of fit:

SSE: 119.4

R-square: 0.9945

Adjusted R-square: 0.9923

RMSE: 4.887

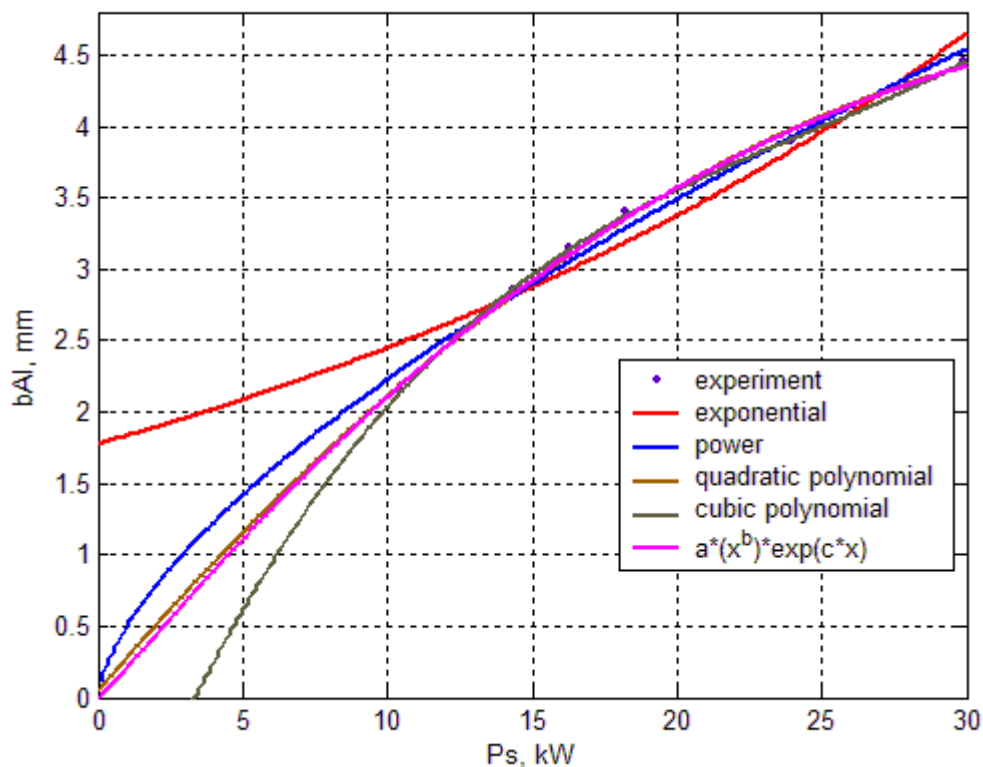


Fig. A3.8. Aproximarea dependenței lățimii fășiei de oxidare de puterea disipată în interstițiu folosind programul MATLAB 5.0. Materialul piesei – aliajul aluminiului Д16

General model Exponential:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 1.776 \quad (1.447, 2.106)$$

$$b = 0.03209 \quad (0.02358, 0.04061)$$

Goodness of fit:

$$\text{SSE: } 0.2673$$

$$\text{R-square: } 0.9323$$

$$\text{Adjusted R-square: } 0.9211$$

$$\text{RMSE: } 0.2111$$

General model Quadrant polynomial:

$$f(x) = p1 \cdot x^2 + p2 \cdot x + p3$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = -0.003036 \quad (-0.00442, -0.001652)$$

$$p2 = 0.2368 \quad (0.1807, 0.2928)$$

$$p3 = 0.05013 \quad (-0.476, 0.5762)$$

Goodness of fit:

$$\text{SSE: } 0.01549$$

$$\text{R-square: } 0.9961$$

$$\text{Adjusted R-square: } 0.9945$$

$$\text{RMSE: } 0.05567$$

General model Cubic polynomial:

$$f(x) = p1 \cdot x^3 + p2 \cdot x^2 + p3 \cdot x + p4$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.0002328 \quad (0.0001006, 0.000365)$$

$$p2 = -0.01706 \quad (-0.02505, -0.009069)$$

$$p3 = 0.5005 \quad (0.3485, 0.6525)$$

$$p4 = -1.492 \quad (-2.401, -0.5839)$$

Goodness of fit:

$$\text{SSE: } 0.002221$$

$$\text{R-square: } 0.9994$$

$$\text{Adjusted R-square: } 0.999$$

$$\text{RMSE: } 0.02357$$

General model Power:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.5009 \quad (0.3836, 0.6182)$$

$$b = 0.6482 \quad (0.5703, 0.7261)$$

Goodness of fit:

$$\text{SSE: } 0.05448$$

$$\text{R-square: } 0.9862$$

$$\text{Adjusted R-square: } 0.9839$$

$$\text{RMSE: } 0.09529$$

General model $a \cdot x^b \cdot \exp(c \cdot x)$:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$a = 0.2167$ (0.09537, 0.3379)
 $b = 1.086$ (0.8, 1.372)
 $c = -0.0226$ (-0.03708, -0.00813)

Goodness of fit:

SSE: 0.01271

R-square: 0.9968

Adjusted R-square: 0.9955

RMSE: 0.05043

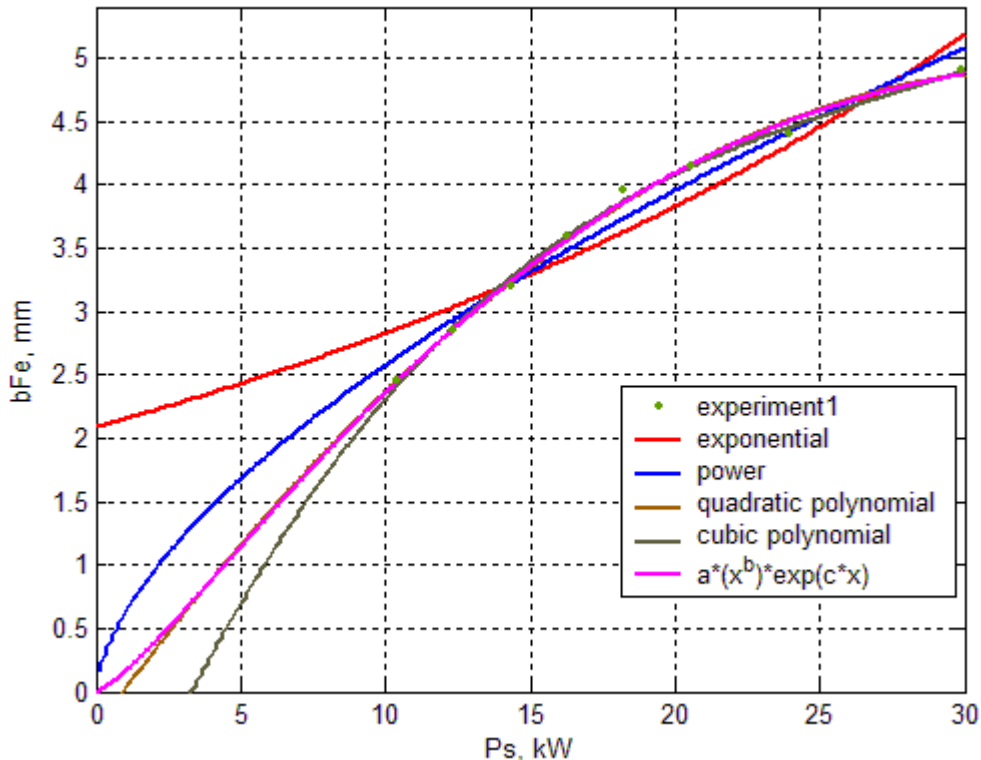


Fig. A3.9. Aproximarea dependenței lățimii fășiei de oxidare de puterea disipată în interstițiu folosind programul MATLAB 5.0. Materialul piesei – oțel 45

MATLAB 5.0 MAT-file, Platform: PCWIN, Created on: Thu May 22 11:14:16 2014

General model Exponential:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$a = 2.086$ (1.627, 2.545)
 $b = 0.03033$ (0.02015, 0.04051)

Goodness of fit:

SSE: 0.488

R-square: 0.897

Adjusted R-square: 0.8798

RMSE: 0.2852

General model Quadrant polynomial:

$$f(x) = p1 \cdot x^2 + p2 \cdot x + p3$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$p1 = -0.004715$ (-0.006481, -0.002949)
 $p2 = 0.3133$ (0.2417, 0.3848)

$$p3 = -0.2885 (-0.9598, 0.3828)$$

Goodness of fit:

SSE: 0.02523

R-square: 0.9947

Adjusted R-square: 0.9925

RMSE: 0.07103

General model Cubic polynomial:

$$f(x) = p1*x^3 + p2*x^2 + p3*x + p4$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.0001982 (-0.0001522, 0.0005486)$$

$$p2 = -0.01666 (-0.03783, 0.004517)$$

$$p3 = 0.5379 (0.1351, 0.9407)$$

$$p4 = -1.602 (-4.009, 0.8057)$$

Goodness of fit:

SSE: 0.0156

R-square: 0.9967

Adjusted R-square: 0.9942

RMSE: 0.06245

General model Power:

$$f(x) = a*x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.6234 (0.4096, 0.8371)$$

$$b = 0.6166 (0.5022, 0.7309)$$

Goodness of fit:

SSE: 0.1514

R-square: 0.9681

Adjusted R-square: 0.9627

RMSE: 0.1588

General model $a*x^b*exp(c*x)$:

$$f(x) = a*(x^b)*exp(c*x)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.1682 (0.05948, 0.2769)$$

$$b = 1.301 (0.9706, 1.632)$$

$$c = -0.03534 (-0.0521, -0.01858)$$

Goodness of fit:

SSE: 0.02159

R-square: 0.9954

Adjusted R-square: 0.9936

RMSE: 0.06571

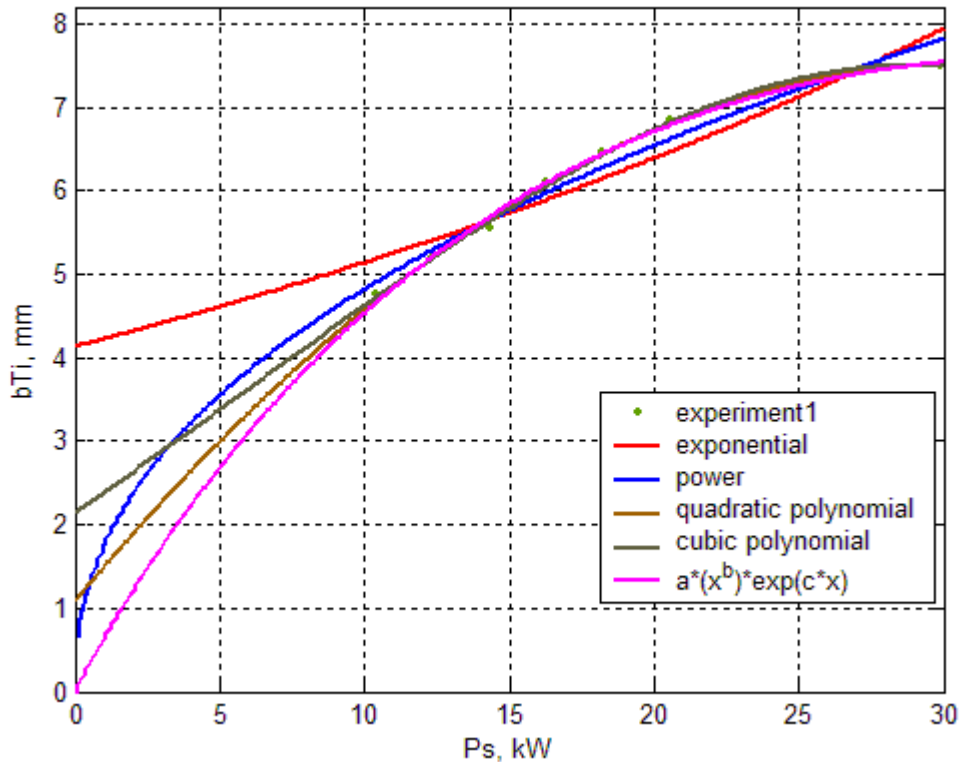


Fig. A3.10. Aproximarea dependenței lățimii fâșiei de oxidare de puterea disipată în interstițiu folosind programul MATLAB 5.0. Materialul piesei – aliajul titanului BT8

MATLAB 5.0 MAT-file, Platform: PCWIN, Created on: Thu May 22 11:14:16 2014

General model Exponential:

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

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 4.132 \quad (3.463, 4.801)$$

$$b = 0.02178 \quad (0.01404, 0.02952)$$

Goodness of fit:

SSE: 0.7644

R-square: 0.8861

Adjusted R-square: 0.8671

RMSE: 0.3569

General model Quadrant polynomial:

$$f(x) = p1 \cdot x^2 + p2 \cdot x + p3$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = -0.006744 \quad (-0.008349, -0.005139)$$

$$p2 = 0.4166 \quad (0.3515, 0.4816)$$

$$p3 = 1.088 \quad (0.4777, 1.698)$$

Goodness of fit:

SSE: 0.02084

R-square: 0.9969

Adjusted R-square: 0.9957

RMSE: 0.06455

General model Cubic polynomial:

$$f(x) = p1*x^3 + p2*x^2 + p3*x + p4$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = -0.0001614 \quad (-0.0004987, 0.0001758)$$

$$p2 = 0.002979 \quad (-0.0174, 0.02336)$$

$$p3 = 0.2337 \quad (-0.154, 0.6213)$$

$$p4 = 2.157 \quad (-0.1599, 4.475)$$

Goodness of fit:

SSE: 0.01445

R-square: 0.9978

Adjusted R-square: 0.9962

RMSE: 0.06011

General model Power:

$$f(x) = a*x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 1.752 \quad (1.3, 2.204)$$

$$b = 0.4397 \quad (0.3525, 0.5268)$$

Goodness of fit:

SSE: 0.2501

R-square: 0.9627

Adjusted R-square: 0.9565

RMSE: 0.2042

General model $a*x^b*exp(c*x)$:

$$f(x) = a*(x^b)*exp(c*x)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.6626 \quad (0.3559, 0.9693)$$

$$b = 0.9534 \quad (0.7141, 1.193)$$

$$c = -0.02704 \quad (-0.03941, -0.01466)$$

Goodness of fit:



SSE: 0.03376

R-square: 0.995

Adjusted R-square: 0.993

RMSE: 0.08218

Anexa 4. Act de implementare în procesul didactic

 Decanul Facultății de Științe Reale, Economice și ale Mediului <hr/> Dr.hab., prof.univ. Topală Pavel 08 09 2014		 Prim-prorector al Universității de Stat „Alecu Russo” din Bălți <hr/> Dr., conf.univ. Balanici Alexandru 08 09 2014
--	--	---

ACT

de implementare a rezultatelor științifice, realizate de către asistent universitar **Ojegov Alexandr**, conducători științifici de doctorat dr.hab., prof.univ. **Topală Pavel**, dr.hab., prof.univ. **Stoicev Petru**, în procesul de instruire a studenților de la ciclul II de studii prin masterat, specialitatea „Tehnologii de instruire și producere”.

Comisia în componență: președinte – șef catedră de științe fizice și ingineresti, dr., conf.univ. **Beșliu Vitalie**, membrii comisiei: **Pereteatcu Pavel**, dr., conf.cerc.; **Rusnac Vladislav**, dr., conf.univ.; **Fotescu Emil**, dr., conf.univ., membru al comisiei metodice, au întocmit prezentul act despre implementarea în procesul didactic a rezultatelor obținute în teza de doctorat cu tema: **„Obținerea peliculelor subțiri de oxizi pe suprafețele metalice ale aliajelor de fier, cupru, aluminiu și titan, cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls”**, elaborată de către dl **Ojegov Alexandr**. Rezultatele au fost implementate în procesul didactic în conformitate cu curriculumul ale disciplinelor: „Nanotehnologii” și „Tehnologii de formare a straturilor de suprafață” la specialitatea „Tehnologii de instruire și producere”, în grupele academice ET11M și ET21M.

Cursurile teoretice „Nanotehnologii” și „Tehnologii de formare a straturilor de suprafață” au fost completate cu următoarele subiecte în teme conform curriculumului disciplinar:

- 1. Tehnologia obținerii peliculelor nanometrice de oxizi pe suprafețele metalice cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls;**
- 2. Construcția generatoarelor de impulsuri de curent cu amorsarea paralelă a interstițiului pentru oxidarea superficială a suprafețelor metalice;**
- 3. Protecția anticorozivă a suprafețelor metalice prin formarea peliculelor subțiri de oxizi cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls.**

La capitolul lucrări de laborator la discipline „Nanotehnologii” și „Tehnologii de formare a straturilor de suprafață” s-au inclus următoarele lucrări:

1. Formarea peliculelor subțiri de oxizi pe suprafețele metalice cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls;

2. Determinarea rezistenței electrice de suprafață a peliculelor de oxizi formate pe suprafețele metalice cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls;

3. Determinarea vitezei de coroziune a peliculelor de oxizi formate pe suprafețele metalice cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls.

O valoare practică reprezintă implementarea noilor lucrări de laborator, care au contribuit la îmbunătățirea și dezvoltarea procesului de învățămînt pentru studenții din domeniul ingineresc și tehnico-tehnologic. Scopul materialului teoretic și de laborator constă în familiarizarea studenților cu tehnologii avansate de formare a straturilor nanometrice de suprafață în scopul protecției anticorozive ale materialelor metalice.

Președintele comisiei:

dr., conf.univ.

Membrii comisiei:

dr., conf.cerc.

dr., conf.univ.

dr., conf.univ.

asist.univ.

Beșliu Vitalie,

Pereteatcu Pavel

Rusnac Vladislav

Fotescu Emil

Ojegov Alexandr

Certific semnăturile d-lor: Beșliu Vitalie, Pereteatcu Pavel, Rusnac Vladislav, Fotescu Emil, Ojegov Alexandr.

Secretar științific

al Consiliului Facultății ȘREM,

dr., conf univ.

Abramciuc Valeriu

DECLARAȚIA PRIVIND ASUMAREA RĂSPUNDERII

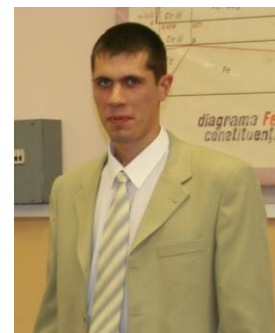
Subsemnatul Ojegov Alexandr, declar pe răspundere personală că materialele prezentate în teza de doctorat sunt rezultatul propriilor cercetări și realizări științifice. Conștientizez că, în caz contrar, urmează să suport consecințele în conformitate cu legislația în vigoare.

Ojegov Alexandr

Semnătura

Data 01.09.2014

CV-UL AUTORULUI



Numele, prenumele	OJEGOV, Alexandr
Data, anul, locul de naștere	25.01.1983, or. Basarabeasca
Studii	Liceul Teoretic „N. Gogol”, m. Bălți, bacalaureat (2001); USARB (studii universitare de licență), Specialitatea Instruire în Inginerie și Informatică (2006); USARB (studii postuniversitare de masterat), Specialitatea Inginerie (2007); Universitatea Tehnică din Moldova (studii postuniversitare de doctorat), Specialitatea 242.05 „Tehnologii, procedee și utilaje de prelucrare” (2013)
Titluri didactico-științifice	asist. univ. (2007-prezent)
Grade științifice	-
Funcții administrative	-
Publicații	4 brevete de invenții, peste 30 de articole științifice
Alte detalii	Membru al filialei din Bălți al <i>Asociației Românilor pentru Tehnologii Neconvenționale</i> (din 2014)
Stagii de formare	Institutul de cercetări științifice IMT Baneasa, București, România (2012); Universitatea Tehnică din Sofia, Bulgaria (2013); Universitatea din Landshut, Germania (2013)
Personalial	Peste 20 trimiteri la lucrările publicate. Profesor invitat la Universitatea Tehnică din Sofia, Bulgaria (din 2013-prezent). Profesor asociat la Universitatea „A.I. Cuza” din Iași, România (din 2013-prezent)
Distincții	6 medalii de aur, 2 diplome de excelență la expoziții și conferințe internaționale Inventica, InfoInvent, ModTech.
Date de contact	Republica Moldova, mun. Bălți 3102, str. Cahul, nr. 48, ap. 50; Telefon: +373 231 46580; mob. +373 792 15624; e-mail: alexandr.ozhegov@yahoo.com