

INSTITUTUL DE FIZICĂ APLICATĂ

**Cu titlu de manuscris
C.Z.U: 621.7:62-408(043)**

KAZAK NATALIA

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

251.03 - TEHNOLOGII ELECTROFIZICE ȘI INGINERIA SUPRAFEȚELOR

Teză de doctor în științe ingineresti

Conducător științific:

MIHAILOV Valentin,

doctor în științe tehnice



Autor:

KAZAK Natalia



CHIȘINĂU, 2023

© **Kazak Natalia, 2023**

CUPRINS

Cuprins	3
Adnotare	6
Summary	7
Аннотация	8
Lista abrevierilor	9
Introducere	10
1. STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII ÎN DOMENIUL MODIFICĂRII SUPRAFEȚELOR METALICE PRIN METODE FIZICO-CHIMICE	15
1.1. Metode fizico-chimice de modificare a suprafețelor metalice	15
<i>1.1.1. Metalizarea prin pulverizare termică</i>	16
<i>1.1.2. Depunerea acoperirilor prin detonarea cu gaz</i>	18
<i>1.1.3. Metalizarea în jet de plasmă</i>	19
<i>1.1.4. Modificarea suprafețelor metalice cu laser</i>	21
<i>1.1.5. Tratamentul termochimic al metalelor</i>	25
<i>1.1.5.1. Carburarea suprafețelor metalice</i>	26
<i>1.1.5.2. Nitrurarea suprafețelor metalice</i>	27
<i>1.1.5.3. Carbonitrurarea suprafețelor metalice</i>	28
1.2. Alierea prin scânteii electrice - metodă eficientă de modificare a suprafețelor metalice	28
<i>1.2.1. Modelul procesului alierii prin scânteii electrice</i>	32
<i>1.2.2. Influența formei de mișcare a electrodului de prelucrare asupra formării stratului pe suprafața catodului</i>	36
<i>1.2.3. Transformările fazo-structurale în straturile formate la ASE și modificarea proprietăților fizico-mecanice ale acestora</i>	38
<i>1.2.4. Materiale utilizate în calitate de electrozi pentru alierea prin scânteii electrice</i>	43
1.3. Concluzii la capitolul 1	45
2. MATERIALE, METODE ȘI TEHNICI DE FORMARE A ACOPERIRILOR ȘI INVESTIGAREA ACESTORA	46
2.1. Selectarea materialelor și a instalațiilor utilizate pentru realizarea procesului de sintetizare prin scânteii electrice a acoperirilor	46
<i>2.1.1. Materiale utilizate în calitate de catod (suport)</i>	46
<i>2.1.2. Materiale utilizate în calitate de anod (electrozi de prelucrare)</i>	46
<i>2.1.3. Instalații tehnologice de realizare a procesului ASE</i>	47
2.2. Metode de investigare microstructurală a suprafețelor acoperite prin ASE	48

2.2.1. <i>Determinări structurale și compoziționale prin difracție cu raze X (XRD)</i>	48
2.2.2. <i>Investigații prin microscopia electronică</i>	49
2.2.3. <i>Investigații privind microscopia optică</i>	49
2.2.4. <i>Confecționarea șlifurilor</i>	49
2.3. Analiza matematică a datelor experimentale	52
2.4. Metode și tehnici de investigare a proprietăților fizico-mecanice	56
2.4.1. <i>Determinarea durității acoperirilor</i>	56
2.4.2. <i>Analiza morfologică a suprafețelor durificate</i>	57
2.4.3. <i>Rezistența la uzură</i>	57
2.4.4. <i>Rezistența la coroziune</i>	59
2.5. Concluzii la capitolul 2	59
3. LEGITĂȚILE DE BAZĂ ALE PROCESULUI SINTETIZĂRII CARBURILOR ȘI FAZELOR NANOSTRUCTURATE PE SUPRAFEȚELE METALICE LA ALIEREA PRIN SCÂNTEI ELECTRICE	60
3.1. <i>Parametrii de bază ai procesului alierii prin scântei electrice</i>	60
3.2. Sintetizarea carburilor la alierea succesivă prin scântei electrice cu electrozi din titan, tantal, wolfram și grafit	61
3.3. Influența valorii energiei descărcării în impuls asupra transferului de masă a anodului și formării acoperirii pe catod	62
3.3.1. <i>Determinarea timpului specific de prelucrare (min./cm²)</i>	62
3.3.2. <i>Cinetica transferului de masă al anodului și formarea straturilor depuse pe suprafața catodului la alierea succesivă prin scântei electrice cu electrozi compacți</i>	63
3.4. Modernizarea procesului ASE prin introducerea în interstițiu a materialelor pulverulente și utilizarea electrozilor de prelucrare cu mișcare rotativă	68
3.4.1. <i>Procedeul de aliere prin scântei electrice cu pulberi metalice</i>	68
3.4.2. <i>Cinetica formării acoperirilor pe catod cu electrozi rotativi în plan perpendicular pe suprafața de prelucrare</i>	76
3.5. Sintetizarea compușilor ternari (MAX-fazelor)	77
3.6. Analiza microstructurii acoperirilor sintetizate utilizând microscopia optică	81
3.7. Transformări structurale în acoperirile formate la alierea prin scântei electrice	87
3.8. Concluzii la capitolul 3	97
4. INVESTIGAȚII PRIVIND PROPRIETĂȚILE FIZICO-CHIMICE ALE ACOPERIRILOR OBȚINUTE LA ALIEREA PRIN SCÂNTEI ELECTRICE CU ELECTROZI DIN GRAFIT, Ti, Ta, W ȘI COMPUȘII ACESTORA	99

4.1. Evaluarea proprietăților tribologice ale oțelului C45 supus alierii prin scânteii electrice cu electrozi din molibden și compuși ternari (TiAlC, TiAlN și TiSiC)	99
4.2. Caracteristicile tribologice ale oțelului inoxidabil Cr18Ni10Ti supus alierii succesive cu W+grafit, Ti + grafit, Mo + grafit, Ti+Al+grafit	108
4.3. Caracteristicile tribologice ale oțelului inoxidabil 40X13 și al aliajului de titan BT6	111
4.4. Rezistența la coroziune a acoperirilor sintetizate prin metoda ASE	116
4.5. Concluzii la capitolul 4	123
CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI	125
MULȚUMIRI	129
BIBLIOGRAFIE	130
ANEXE	141
CURRICULUM VITAE	145
DECLARAȚIE	148

ADNOTARE

KAZAK NATALIA

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Implementarea rezultatelor științifice: Rezultatele științifice obținute în cadrul prezentei teze au fost valorificate în cadrul mai multor proiecte internaționale, inclusiv proiectul EU H2020 MSCA-RISE-SMARTELECTRODES-778357, precum și în cadrul elaborărilor ce țin de construcția utilajelor noi de durificare prin scânteii electrice.

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

SUMMARY

KAZAK NATALIA

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Implementation of scientific results: The results obtained during research for this thesis have been implemented in several international projects, including project EU H2020 MSCA-RISE-SMARTELECTRODES-778357; as well as in elaborations related to the manufacturing of new hardening equipment via electric spark alloying.

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

АННОТАЦИЯ

КАЗАК НАТАЛЬЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Внедрение научных результатов: научные результаты, полученные в данной диссертации, были использованы в нескольких международных проектах, включая **EU H2020 MSCA-RISE-SMARTELECTRODES-778357**; а также в разработках, связанных с созданием нового оборудования для электроискрового упрочнения.

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

Lista abrevierilor

ASE	- Alierea prin scântei electrice
AEE	- Alierea prin electroeroziune
MeC	- Metal plus carbon
PT	- Pulverizare termică
AF	- Acoperirea cu flacără
MAE	- Metalizarea prin arc electric
DADG	- Depunerea acoperirilor prin detonare cu gaz
ZAT	- Zona acțiunii termice
T	- Temperatura (°C)
Hz	- Herți
TTCH	- Tratamentul termochimic al metalelor
TT	- Tratament termic
HRC	- Duritatea Rockwel după scara C (HRC)
HV	- Duritatea Vickers (HV)
E _d	- Energia descărcării în impuls (J)
F	- Coeficientul de frecare
V _u	- Volumul real de uzură (mm ³)
I _h	- Intensitatea uzurii (μm /min.)
h	- Uzura liniară (μm)

Introducere

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

Astfel de electrozi se confecționează prin sinterizare la uzine specializate în industria pulberilor în țări cum ar fi Rusia, Ucraina și Belarus. În Moldova, aceste materiale se importau din regiunile menționate, însă în ultima perioadă, practic, nu mai pot fi procurate, din motivul diminuării substanțiale, ba chiar și suspendării fabricării acestora.

În fața specialiștilor care utilizează aceste materiale a apărut o problemă dificilă – de a găsi o alternativă a acestor electrozi standardizați.

Ca element de noutate poate aduce o teză de doctorat în domeniul înlocuirii electrozilor standardizați, scumpi și deficitari.

Bazându-ne pe experiența anterioară [1, 2] de utilizare a grafitului, ca sursă de carbon pentru modificarea suprafețelor metalice în scopul durificării acestora și, luând în considerare efectul interacțiunii plasmă descărcărilor în impuls de tensiune joasă cu materialele electrozilor în procesul alierii prin scânteii electrice, ne putem aștepta la crearea premiselor de sintetizare a carburilor metalice de tip „MeC” la prelucrarea succesivă cu electrozi din grafit și cu unele metale componente ale electrozilor standardizați (Ti, W, Ta). În acest context, teza de doctorat își propune să studieze legăturile principale ale procesului alierii prin scânteii electrice la acțiunea succesivă cu electrozi din grafit și unele metale tranzitorii: Ti, W sau Ta.

Astfel, realizarea practică a procesului de durificare cu electrozi accesibili și ieftini din grafit, Ti, Ta și W este o abordare nouă din perspectiva publicațiilor de specialitate tradiționale.

Studiul complex al procesului ASE cu electrozi din grafit, titan, tantal și wolfram ne-a permis obținerea unor cunoștințe noi, de rezultate și concluzii valoroase, privind sintetizarea, în straturile superficiale ale metalelor, a carburilor cu proprietăți fizico-mecanice și de exploatare avansate.

Actualitatea și importanța temei abordate

De-a lungul anilor, metoda alierii prin scânteii electrice se utilizează cu succes pentru durificarea și recondiționarea organelor de mașini, astfel sporindu-se considerabil fiabilitatea acestora [3]. După cum am menționat mai sus, în ultima perioadă (10 – 15 ani) utilizatorii acestor tehnologii ASE se află într-o criză a lipsei de electrozi standardizați. Din această cauză sunt nevoiți să apeleze la metodele tradiționale pentru a satisface necesitățile privind întreținerea utilajelor și echipamentelor tehnologice, metode cum ar fi metalizarea cu arc electric sau plasmă, metode electrochimice ș. a., care, după cum se știe, sunt complexe, consumatoare mari de energie și

materiale, necesită deservire cu personal calificat, ceea ce nu-și pot permite societățile economice mici și mijlocii. În legătură cu aceasta, problema poate fi soluționată doar prin găsirea unei alternative de înlocuire a electrozilor standardizați. Astfel, ținând cont de faptul că electrozii standardizați sunt compuși din două sau trei carburi – TiC, WC, TaC, iar aceștia la rândul lor, prezintă în sine un metal tranzitoriu (Ti, Ta, W) și carbon, este ușor de înțeles că în condițiile plasmăi descărcărilor în impuls probabilitatea interacțiunii electrozilor din metalele indicate cu carbonul electrozilor din grafit creează condiții favorabile de formare a carburilor. Analiza cu raze X a acoperirilor depuse în procesul prelucrării succesive cu electrozi din titan și grafit, apoi din tantal, wolfram și grafit, a demonstrat formarea de carburi TiC, TaC, WC și W₂C. Însă pentru elaborarea acestei variante noi a procesului ASE sunt necesare investigații sistematice ale procesului în vederea stabilirii legăturilor de bază ale transferului de masă de la anod la catod și formării straturilor pe suprafețele metalice. Acestui scop sunt consacrate investigațiile ulterioare.

Scopul lucrării este stabilirea legăturilor procesului de sintetizare în straturile superficiale ale metalelor din carburi de tip „MeC” la alierea succesivă prin scânteii electrice cu electrozi din grafit, titan, tantal și wolfram, precum și cu pulberi ale acestora.

Pentru atingerea acestui scop, în lucrare sunt puse următoarele **obiective**:

- Efectuarea studiului stadiului actual al cercetărilor în domeniul modificării suprafețelor metalice utilizând metoda alierii prin scânteii electrice;
- Elaborarea concepției de sintetizare a carburilor de tip „MeC” la alierea succesivă a suprafețelor metalice cu electrozi din grafit, titan, wolfram și tantal, constituenți ai electrozilor standardizați WC-TiC-Co și WC-TiC-TaC-Co;
- Investigații privind cinetica transferului de masă al anodului (electrodului de prelucrare) și formării stratului superficial durificat pe catod în funcție de parametrii energetici ai procesului: valorii energiei descărcării în impuls, a curentului mediu și cei tehnologici – durata prelucrării și forma mișcării electrozilor de prelucrare: vibrații, rotații și vibrații + rotații.
- Investigații privind cinetica formării acoperirilor pe suprafața catodului la alierea succesivă prin scânteii electrice cu pulberi din grafit, titan, tantal și wolfram;
- Cercetări fazo-structurale ale straturilor formate la alierea succesivă cu electrozi compacți din grafit, titan, wolfram și tantal.
- Optimizarea parametrilor energetici și tehnologici ai procesului de aliere prin scânteii electrice pentru obținerea straturilor compacte cu conținut de carbon de calitate înaltă, continuitate, uniformitate a grosimii și omogenitate a structurii;
- Elaborarea recomandărilor tehnologice privind sintetizarea carburilor metalice de tip „MeC” pe suprafețele lucrătoare ale organelor de mașini la alierea succesivă prin scânteii electrice cu electrozi din grafit, titan, wolfram și tantal, precum și pulberi ale acestora.

În prezenta lucrare s-a pus sarcina cercetării posibilității obținerii carburilor în procesul alierii prin scânteii electrice cu electrozi din grafit și unele metale tranzitorii cum ar fi titanul, tantalul și wolframul - elemente ce sunt constituenți ai electrozilor standardizați pentru durificarea prin scânteii electrice. Ținând cont de faptul că în canalul descărcării electrice în impuls se dezvoltă temperaturi de ordinul 10^4 °C, cât și presiuni de mii de atmosfere, putem presupune că în astfel de condiții va avea loc formarea fazelor cu conținut de carburi la interacțiunea carbonului electrodului din grafit și suportul din titan, tantal și wolfram și alte metale tranzitorii.

Prezenta lucrare este dedicată cercetării posibilității de modificare a suprafețelor metalice prin obținerea pe acestea a fazelor cu conținut de carburi metalice la alierea succesivă prin scânteii electrice cu electrozi din grafit și unele din metalele tranzitorii din grupele IV – VI ale tabelului periodic (Ti, Ta și W).

Ipoteza de cercetare

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

Sinteza metodologiei de cercetare și justificarea metodelor de cercetare alese

Pentru realizarea procesului de sintetizare a carburilor metalice și a fazelor nanostructurate și amorfă pe suprafețele de lucru ale organelor de mașini, s-a aplicat procesul de aliere prin scânteii electrice cu electrozi din grafit, titan, tantal și wolfram, precum și pulberi ale acestora, care se deosebesc printr-o afinitate sporită față de carbon.

Convingerea că există posibilități reale de sintetizare a carburilor în straturile superficiale ale metalelor, cât și faze nanostructurate și amorfă, s-a bazat pe cunoașterea profundă a proceselor ce au loc la interacțiunea materialelor electrozilor cu plasma descărcării în impuls, în care, după cum s-a menționat mai sus, se dezvoltă temperaturi de ordinul zecilor de mii de grade Celsius și presiuni de mii de atmosfere [3, 4]. Aceste procese spectaculoase nu numai că contribuie la efectuarea transformărilor alotropice cu formarea tuturor fazelor din diagrama de echilibru, dar și pseudoalajelor ce nu există pe această diagramă.

Analiza fazo-structurală cu raze X și microscopia metalografică ne-au permis să stabilim cu mare precizie componența fazelor formate și a structurii în acoperirile depuse, iar investigațiile cu ajutorul microscopiei cu scanare electronică ne-au permis studierea minuțioasă a morfologiei suprafețelor probelor supuse durificării prin scânteii electrice [5, 6, 7, 8].

Astfel, utilizarea metodelor moderne de studiere a solidului, pe de o parte, iar pe de altă – testările tribologice și rezistenței la coroziune au confirmat o dată în plus justificarea metodelor de prelucrare a suprafețelor metalice și de cercetare a acestora.

Sumarul capitolelor tezei

În **capitolul 1** este prezentată o caracteristică succintă a principalelor metode tradiționale de modificare a suprafețelor lucrătoare ale organelor de mașini și ale sculelor, în scopul creșterii fiabilității acestora, după care se evidențiază metoda convențională de durificare a suprafețelor metalice, alierea prin scânteii electrice, care posedă o serie de avantaje în raport cu procesele tradiționale. Aceste procese spectaculoase se desfășoară în plasma descărcării în impuls cu temperaturi de 10^4 °C și presiuni de mii de atmosfere, care contribuie la o interacțiune explozivă cu materialele electrozilor, cu formarea unei game largi de compuși metalici și soluții solide cu o aderență înaltă cu suportul. Suplimentar la aceasta vom menționa că procesul alierii prin scânteii electrice e simplu în realizare și este un mic consumator de energie și materiale. Iar utilajul și echipamentele, în raport cu cele tradiționale, sunt de gabarite mici și ușor transportabile. De aici și prețurile mici, accesibile pentru un cerc mai larg de consumatori. Aceste performanțe au servit drept motiv de selectare a acestei metode pentru atingerea scopului: sintetizarea carburilor pe suprafețele metalice, precum și a fazelor nanostructurate și amorse.

În **capitolul 2** sunt descrise tehnicile de cercetare și analiză utilizate. Pentru studiul acoperirilor formate s-au folosit echipamente performante. O serie de investigații au fost realizate prin colaborări cu grupuri de cercetare de la centre științifice de top din mai multe țări. Astfel, transformările fazo-structurale în acoperirile formate și testarea caracteristicilor de bază ale acestora - rezistența la uzură și coroziune – s-au efectuat în colaborare cu specialiști de la centrele științifice din Lituania și Belarus [6, 9, 10, 11].

În **capitolul 3** sunt prezentate rezultatele investigării sistematice ale procesului alierii prin scânteii electrice cu electrozi din titan, tantal, wolfram și grafit într-o succesiune anumită în vederea stabilirii legăturilor de bază ale sintetizării carburilor metalice cu proprietăți fizico-mecanice înalte. Tot în acest capitol au fost aplicate și alte variante ale procesului alierii prin scânteii electrice, precum alierea cu introducerea în interstițiu dintre electrozi a materialelor pulverulente și procedeul cu utilizarea electrozilor rotativi în plan perpendicular pe suprafața de prelucrare.

Inițial s-au determinat timpul specific (min./cm²) de prelucrare pentru fiecare material al anodului a unei unități de suprafață în vederea obținerii continuității maxime a acoperirii. Depășirea acestui timp specific duce la apariția unor defecte în formă de arsuri și microfisuri.

Sunt descrise influența valorii energiei descărcării electrice în impuls asupra transferului de material erodat al anodului și ale formării acoperirii pe catod. Sunt prezentate rezultatele investigațiilor privind cinetica transferului de material al anodului și formării acoperirii la alierea succesivă cu electrozi compacți. S-a stabilit că, odată cu creșterea valorii energiei descărcării, crește și cantitatea de material transferat pe catod, ceea ce se încadrează perfect în rezultatele obținute anterior de mai mulți specialiști în domeniul alierii prin scânteii electrice [3, 12, 13, 14].

S-a mai stabilit că, în cazul utilizării electrozilor de prelucrare din metale refractare, temperatura de topire a căroră este mai mare decât a materialului catodului ($T_a > T_c$), formarea acoperirii este dificilă, ceea ce se încadrează bine în criteriul Palatnik – Zolotîh [15, 16, 17, 18].

Drept exemplu, poate servi limitarea posibilității depunerii acoperirilor cu electrozi din materiale refractare. Pentru depășirea acestor impedimente s-au aplicat două procedee tehnologice noi: 1. Utilizarea în calitate de elemente de aliere a pulberii din aceleași materiale ca și ale anozilor, adică a pulberii din grafit, Ti, Ta și W. 2. Folosirea electrozilor cu mișcare rotativă în plan perpendicular pe suprafața catodului.

Tot în capitolul 3, utilizând procedeele alierii succesive cu introducerea în interstițiu dintre anod și catod a pulberii, precum și electrozii rotativi în plan perpendicular pe suprafața de prelucrare, s-au obținut acoperiri ternare, așa – numitele MAX-faze care manifestă o îmbinare unică a proprietăților caracteristice, atât pentru metale, cât și pentru ceramică. Toate aceste investigații experimentale au fost însoțite de analize ale structurii și componenței acoperirilor, folosind cele mai moderne metode și aparate de studiere a solidului: analiza cu raze X, microscopia optică și cu scanare electronică. Aceste investigații au permis stabilirea corelației dintre structură, componența straturilor sintetizate și proprietățile fizico-mecanice ale acestora.

Cu ajutorul microscopiei cu scanare electronică în straturile sintetizate la ASE au fost detectate formațiuni cristaline în limita $(50 \div 61) \text{ \AA}$, fapt ce denotă formarea nanoparticulelor și nanofazelor în aceste acoperiri [5]. Autenticitatea existenței în straturile sintetizate ale MAX-fazelor, precum și a fazelor nanostructurate și amorfizate, este confirmată de proprietățile fizico-mecanice ale acoperirilor formate.

În **capitolul 4** sunt prezentate rezultatele testării rezistenței la uzură și coroziune a probelor din metalele selectate în calitate de obiecte de studiu: oțeluri de construcții C45, 40X13, X18H10T și aliaje de titan BT6 și OT4. Încercările tribologice s-au efectuat în condiții de ungere și în lipsa acesteia (pe uscat). Absolut toate straturile depuse în procesul ASE cu electrozi și pulberi din grafit, titan, tantal și wolfram, cât și din compuși ternari Ti+Al+C, Ti+AlN și Ti+SiC au manifestat proprietăți înalte la uzură în comparație cu aliajele neacoperite. Studiul comportamentului acelorăși acoperiri în condiții agresive (soluție de 3% NaCl) de asemenea au demonstrat o rezistență înaltă la coroziune, în special a acoperirilor obținute la prelucrarea succesivă cu electrozi din grafit + titan și grafit + wolfram. S-a demonstrat că rezistența acestor acoperiri a crescut cu două ordine. Se consideră că toate aceste rezultate se datorează straturilor sintetizate care au în componența lor faze amorfe și nanostructurate. Aceasta demonstrează odată în plus că acoperirile formate în procesul alierii succesive cu electrozi și pulberi din grafit, titan, tantal și wolfram, cu siguranță, pot prezenta o alternativă acoperirilor formate la ASE cu electrozi standardizați care au dispărut de pe piață.

1. STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII ÎN DOMENIUL MODIFICĂRII SUPRAFEȚELOR METALICE PRIN METODE FIZICO-CHIMICE

1.1. Metode fizico-chimice tradiționale de modificare a suprafețelor metalice

Formarea proprietăților fizico-chimice ale suprafețelor lucrătoare ale organelor de mașini prezintă în sine o problemă de bază a tehnologiilor de confecționare și reparație a acestora. Pentru soluționarea acestei probleme sunt elaborate diferite metode și procedee de acțiune asupra suprafețelor semifabricatelor [19, 20]. Metodele și procedeele pot fi clasificate:

1. După caracterul formării stratului superficial:

- metode bazate pe distribuirea în spațiul micro-volumelor materialului stratului superficial; de exemplu, deformarea plastică superficială;
- metode bazate pe înlăturarea straturilor superficiale ale metalului, cum ar fi cele de finisare, prin care se înlătură straturile de metal comensurabil după grosime cu adâncimea stratului format cu proprietăți modificate (prelucrarea abrazivă fină);
- metode bazate pe depunerea straturilor de material pe suprafața substratului (depunerea electrochimică, încărcarea cu arc electric);
- metode complexe fără folosirea materialului aditiv cu proprietăți ce se deosebesc de materialul de bază;
- cu folosirea componentelor aditive, care influențează asupra formării proprietăților necesare ale stratului superficial.

Astfel de aditivi pot avea rolul de elemente de aliere, de reagenți ai reacțiilor chimice cu rezultate scontate, de formare a diferitor faze și microvolume ale stratului superficial cu acoperiri metaloceramice și compozite, cât și de formare a dimensiunilor prescrise ale stratului superficial, așa cum are loc la încărcarea cu arc.

2. După felul modificării proprietăților stratului superficial, responsabile de durificare, se evidențiază următoarele grupe de metode:

- durificarea prin modificarea componenței chimice a stratului superficial. La acestea se referă toate metodele și procedeele bazate pe saturarea prin difuziune a stratului superficial;
- durificarea prin modificarea structurii stratului superficial. La acestea se referă metodele de acțiune (influență) termică asupra stratului superficial: călirea cu laser, cu plasmă, cu curenți turbionari, prelucrarea termomecanică și altele;
- durificarea prin modificarea rezervei energetice a stratului (prelucrarea în câmp magnetic);
- durificarea prin modificarea rugozității suprafeței (poleirea chimică și electrochimică, deformarea plastică);

- durificarea prin modificarea proprietăților structurale ale volumului piesei (prelucrarea termică și criogenică).

Cele mai răspândite și de perspectivă metode și procedee de modificare a straturilor superficiale reflectă mecanismul de acțiune asupra suprafeței potrivit particularității de clasificare sau procesul fizico-chimic de realizare a acestui mecanism.

Descrierea fiecărui procedeu de prelucrare se va efectua la nivelul principiului de lucru, fără descrierea detaliată a fenomenelor fizico-chimice, dat fiind faptul că nu acesta este scopul prezentei lucrări și că toate aceste procese se descriu în literatura specialitate.

1.1.1. Metalizarea prin pulverizare termică

Depunerile prin pulverizare termică (PT) se folosesc pentru creșterea rezistenței la uzură și rezistenței termice a organelor de mașini, pentru restabilirea dimensională a acestora [21, 22]. Esența procesului constă în faptul că materialul de depunere în formă de sârmă sau de pulberi se introduc în câmpul termic format de o sursă de căldură, în care acesta se topește și se pulverizează pe suprafața de prelucrare cu un jet de gaz în formă de picături mici dispersate. După caracterul încălzirii se deosebesc următoarele:

- acoperirea cu flacără (AF) [21, 22] – se bazează pe flacăra forței gazului combustibil. Jetul de gaz transportă materialul de depunere. Temperatura la ieșirea din arzător atinge 2500°C, iar viteza particulelor de 50÷70 m/s;

- metalizarea prin arc electric (MAE) [21, 22] – se bazează pe topirea materialului în arc electric ($T=4000^{\circ}\text{C}$) și depunerea pe suprafața metalului cu un jet de gaz sub presiune;

- la depunerea prin detonare [19, 21, 22] în camere speciale de ardere cu o frecvență de câțiva herți se inițiază o explozie a amestecului de acetilenă, oxigen, pulberea materialului de depunere și gazul portant. Temperatura la ieșire – 4700°C, iar viteza particulelor atinge 800 m/s;

- depunerea cu get de plasmă – se realizează prin încălzirea, topirea și transportul particulelor de pulberi de către plasma formată de gazul plasmogen în dispozitivul- plasmotron.

Temperatură la ieșirea din plasmotron atinge (10000÷12000)°C, cu viteza jetului de (200÷500) m/s.

Datorită acestui fapt, se pot depune metale refractare, de exemplu, wolfram ($T=3410^{\circ}\text{C}$), compuși refractari de tip carbură de tantal ($T=3880^{\circ}\text{C}$), oxid de zirconiu ($T=2700^{\circ}\text{C}$).

Avantajele depunerilor prin această metoda sunt: productivitatea înaltă, gama largă a materialelor de depunere (metale, aliaje, boruri, carburi, aliaje dure, oxizi, cermeți de tip $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{NiAl}$), duritate înaltă a acoperirilor (H până la 20000 MPa la pulverizarea ceramicii), posibilitatea prelucrării termice și mecanice a acestora, etc.

Dezavantajele depunerii cu get de plasma sunt: acestea au porozitate înaltă (până la 15 %), sunt anizotrope sau neuniforme, adeziunea dintre depunere și substrat neînsemnată, în procesul depunerii se formează o suprafață riguroasă.

Acoperire cu flacără (AF) [19] se execută prin trei scheme tehnologice fiecare dintre ele generând anumite avantaje și dezavantaje:

1. AF fără topire ulterioară se utilizează la depunerea acoperirilor cu grosimi de până la 2 mm care nu sunt supuse șocurilor, sarcinilor alternante, încălzirii.
2. AF cu topirea simultană a pulberilor se folosește pentru recondiționarea pieselor din oțel și fontă, care lucrează în regim de sarcini alternative.
3. AF cu topirea ulterioară asigură o rezistență înaltă la uzură, la temperaturi și coroziune.

Procesul tehnologic constă din trei faze distincte: încălzirea suprafeței până la $(200 \div 250)^\circ\text{C}$, depunerea substratului și a straturilor funcționale de bază. Pentru realizarea AF sunt elaborate și se utilizează în serie mașini și utilaje. În figura 1.1 este prezentat capul de lucru al AF, care constă din corpul cu duză și buncărul cu pulberi. Pulberea se transportă în zona de lucru cu ajutorul gazului, a cărui temperatură este condiționată de arderea gazului în mediul de oxigen.

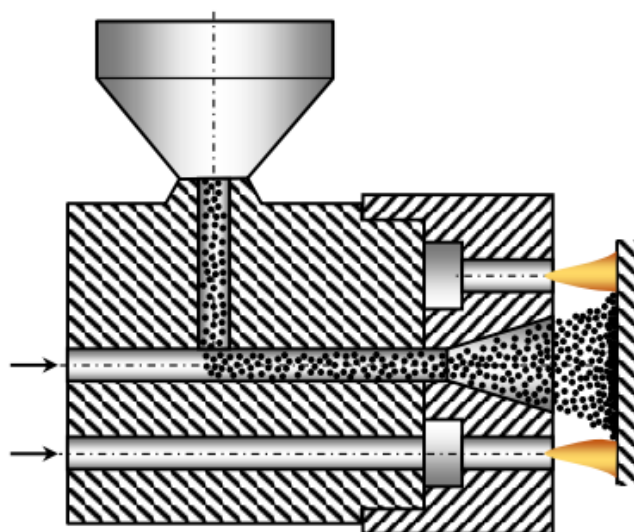


Fig. 1.1. Schema acoperirii cu flacără [19]

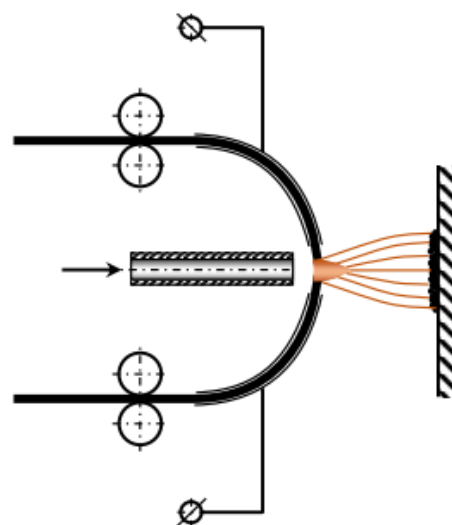


Fig. 1.2. Metalizarea cu arc electric [19]

Aparatul pentru metalizarea cu arc electric (figura 1.2) este compus din doi electrozi din sârmă, care cu ajutorul a două role de acționare se introduc în zona arderii arcului. Directoarele asigură orientarea impusă a capetelor sârmei-aditiv [19].

Prin duză se furnizează gazul cu presiunea de 0,6 MPa. Viteza mare a particulelor din metale $(120 \div 200) \text{ m/s}$, timpul scurt de zbor 10^{-3} s asigură deformarea plastică a acestora, umplerea cu particule a neregularităților, aderența particulelor între ele și cu ținta. Stratificarea succesivă permite formarea unei depuneri cu grosimea de până la 10 mm. În timpul prelucrării suprafața

piesei se încălzește cu $(50\div70)^{\circ}\text{C}$, fapt care permite depunerea pe suprafețele pieselor executate din metale, mase plastice și lemn.

1.1.2. Depunerea acoperirilor prin detonarea cu gaz

Depunerea acoperirilor prin detonare cu gaz (DADG) [19] se efectuează la instalația, a cărei schemă este prezentată în figura 1.3. În țeava cu răcire 1 din mixerul 3 se injectează o porțiune de gaz inflamabil care se aprinde cu o descărcare electrică a bujei incandescente 2. În urma detonației (exploziei) de aprindere are loc scurgerea din țeavă a produselor de ardere, care captează particulele de pulbere injectate de dozatorul 5 din buncărul 6. Pulberea se încălzește și cu viteză mare se injectează către piesa 8. Instalația funcționează în regim de impuls cu o frecvență de 10Hz, iar sincronizarea injectării gazului, pulberii și aprinderii se efectuează de blocul de comandă 4.

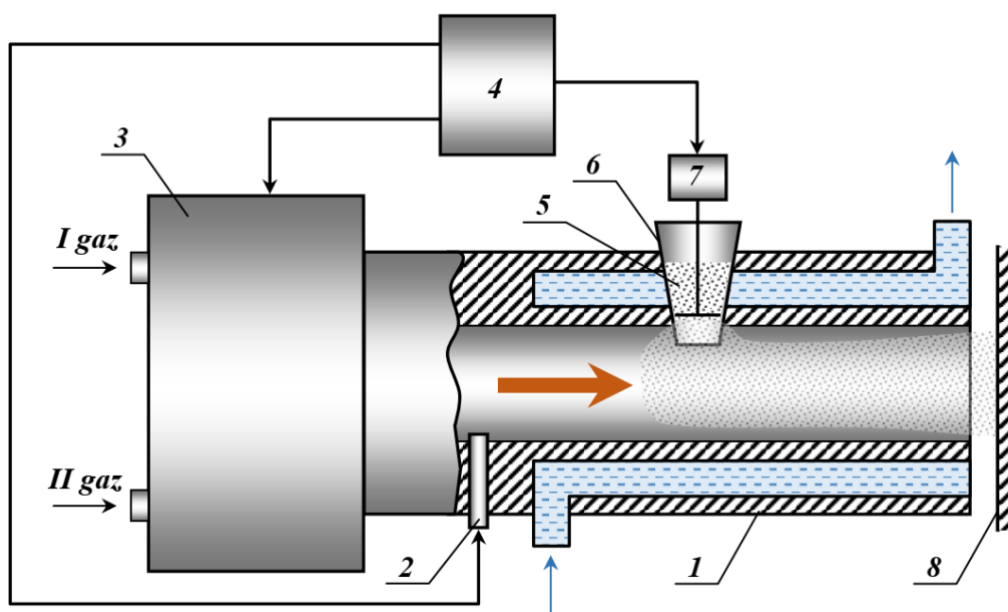


Fig. 1.3. Schema depunerii acoperirilor prin detonare cu gaz:

1 – țeavă răcită cu apă, 2 – bujie de aprindere, 3 – mixer, 4 – bloc de comandă, 5 – dozator, 6 – buncăr, 7 – mecanism de acționare, 8 – piesa de prelucrat [19]

Metoda permite obținerea de depuneri de înaltă calitate de diverse destinații și are următoarele avantaje:

- aderență înaltă a acoperirilor cu suportul, fără a-l încălzi;
- calitatea acoperirii nu depinde de gradul de pregătire a suprafeței;
- productivitate înaltă a procesului;
- grosimea depunerii $(0,2\div0,5)$ mm;
- resursele pieselor prelucrate cresc de $(2\div3)$ ori.

1.1.3. Metalizarea în jet de plasmă

Depunerile în jet de plasmă sunt destinate formării pe suprafețele metalice a filmelor și a straturilor cu grosimi considerabile (până la câțiva milimetri), cu componență și microstructură deosebită de materialul substratului.

Pentru încălzirea, topirea parțială sau completă materialelor de depunere sub formă de pulbere sau sârmă, se aplica plasmă de temperatură joasă. Aceasta prezintă un gaz parțial sau complet ionizat, în care densitatea sarcinilor pozitive și negative sunt aproximativ egale. Plasma de temperatură joasă se formează la descărcarea electrică în mediu gazos și se caracterizează prin concentrația înaltă a energiei în volume mici, prin temperaturi și viteze înalte de desfășurare a diferitor procese fizico-chimice [21, 22].

Procese fizico-chimice în plasmă se desfășoară în intervalul de temperaturi de $10^3 \div 10^4$ K, presiuni de ordinul $10^2 \div 10^8$ Pa, durata interacțiunii cuprinsă în limitele $10^{-5} \div 1$ s, la viteza mișcării gazului plasmogen de cca $40 \div 4000$ m/s. Într-un astfel de tip de depunere, plasma încălzește și transportă materialul de depunere, ce asigură transferul lui la suprafața țintei.

Avantajele metodei sunt: posibilitatea obținerii straturilor superficiale cu proprietăți fizico-mecanice în absența unor deformări ale pieselor și modificări ale structurii piesei prelucrate; temperatura înaltă a plamei permite depunerea practic a oricăror materiale, inclusiv a celor refractare; productivitatea înaltă a procesului (până la 20 kg/h de pulberi), posibilitatea depunerii multe straturilor, inclusiv din compozite .

Dezavantajele metodei: porozitatea înaltă a straturilor ($4 \div 16$) % și consum relativ mare de gaz ($2 \div 6$) mii l/h, randament mic de utilizare a energiei (până la 10%), cerințe înalte privind stabilitatea proprietăților plamei.

La depunerea cu plasmă în atmosferă cu ajutorul acceleratoarelor de plasmă – plasmotroane, materialul de depunere în formă de pulberi sau sârmă sunt introduse în jetul de plasmă, în care acesta se încălzește, se topește, se pulverizează și se transportă către suprafața de prelucrat. La impactul cu acesta, particulele materialului de depunere se condensează pe acesta, încălzind materialul țintei. Aderența materialului depus cu suprafața piesei este asigurată de griparea mecanică, interacțiunea chimică, procese de difuziune și prin punțile de micro-sudură. Depunerea în sine poate fi atestată ca un material compus din particule deformate, unite pe suprafața de contact cu sectoare circulare.

Dispozitivele pentru obținerea plamei de temperatură joasă pot fi clasificate după principiul de funcționare în plasmotroane cu arc electric, inductive și de frecvență înaltă. O răspândire mai largă în tehnică au obținut dispozitivele cu arc electric. În astfel de plasmotroane între catodul infuzibil de wolfram răcit cu apă și anodul din cupru, confecționat în formă de duză și de asemenea răcit cu apă, se amorsează arcul electric, în care se ionizează gazul plasmogen în

duză (argon, hidrogen, azot). Această instalație, a cărei plasmotron este prezentat în figura 1.4, include în sine dispozitivul de transportare a pulberii, sursa de curent specială, sistemul de alimentare cu gaz și apă răcită [19].

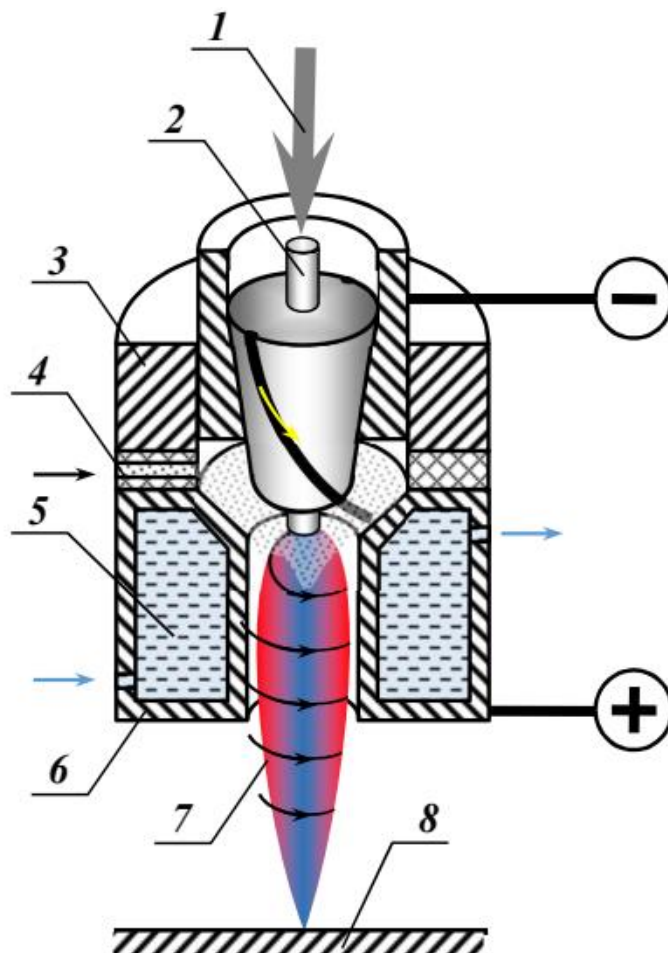


Fig. 1.4. Schema plasmotronului cu arc:

1 – gaz generator de plasmă; 2 – catod; 3 – carcasă; 4 – transportarea gazului; 5 – răcire; 6 – anod; 7 – jet de plasmă; 8 – suprafața de prelucrare [19]

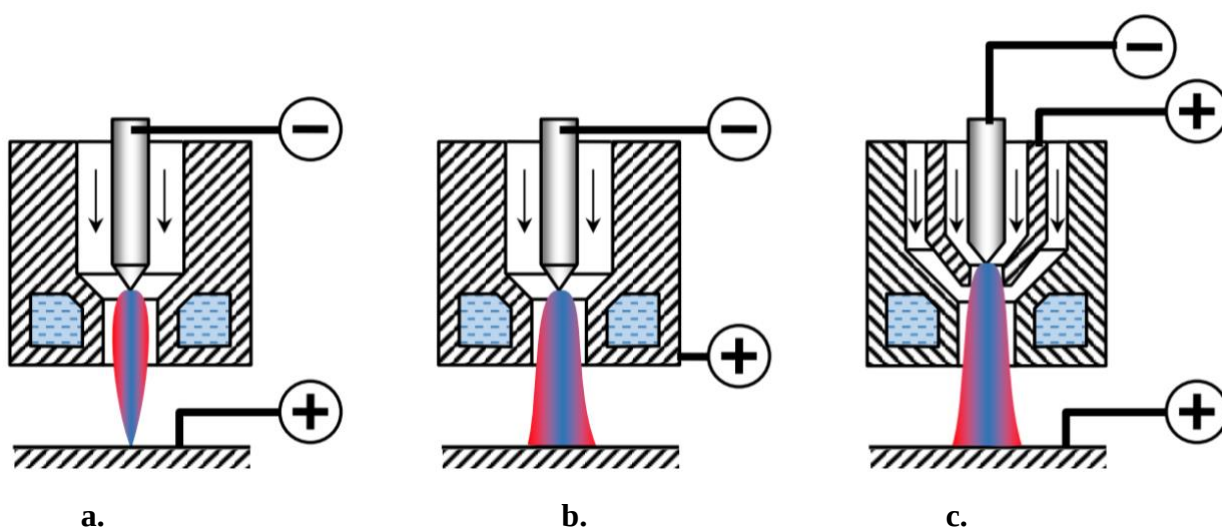


Fig. 1.5. Schema plasmotronului cu generarea arcului de acțiune directă (a), indirectă (b) și complexă (c) [19]

După forma arcului, plasmotroanele pot fi cu acțiune directă și indirectă sau de tip complex (figura 1.5). După modul de stabilizare a arcului, se împart în dispozitive cu stabilizare turbionară sau cu strat de gaz.

De menționat că utilizarea plasmotroanelor speciale cu jet de plasmă laminar permite micșorarea consumului de gaz de 3÷5 ori, iar lungimea jetului de gaz se mărește de 8 ori și constituie cca 500÷700mm, nivelul de zgomot scade până la 40 dB în comparație cu 120 dB în cazul jetului turbulent. Există, de asemenea, plasmotroane pentru pulverizarea materialelor în vid [19].

1.1.4. Modificarea suprafețelor metalice cu radiație laser

Principiul acțiunii cu radiație laser asupra materialului se bazează pe concentrarea energetică de mare putere (până la 10^{13} Wt/cm²) pe un sector foarte mic al suprafeței (10÷100) μm. Aceasta permite atingerea vitezei de încălzire de (10^4 ÷ 10^6) K/s și obținerea de structuri și faze neechilibrate cu creșterea caracteristicilor mecanice. Răcirea rapidă se datorește conductivității termice a metalelor și zonelor de mici dimensiuni supuse proceselor de tratare. Acțiunea termică a radiației laser, în funcție de durată și puterea impulsului, asigură procesul de topire, evaporare; transferul de căldură și masă, ceea ce permite realizarea diferitor procedee tehnologice: topirea neregularităților, alierea straturilor superficiale, curățarea [23, 24].

Tehnologia prelucrării cu radiație laser a suprafețelor are următoarele avantaje:

- natura spațio-temporală de acțiune a radiației laser permite prelucrarea straturilor superficiale fără a încălzi masa de bază a materialului piesei, ceea ce coboară la minimum deformarea ei;
- vitezele înalte de încălzire-răcire permit obținerea de structuri metastabile unice;
- procesul poate fi bine dirijat și automatizat, cu posibilitatea reglării acțiunii termice;
- lipsesc forțele mecanice, ceea ce permite prelucrarea materialelor fragile și nerezistente;
- posibilitatea prelucrării în aer;
- lipsa deșeurilor tehnologice periculoase;
- posibilitatea transportării radiației la distanțe mari și alimentare cu ghidaje flexibile de lumină în locuri greu accesibile.

Aceste tehnologii pot fi clasificate în felul următor:

- prin natura dezvoltării proceselor fizice: încălzire, topire, evaporare, acțiune mecanică locală în cazul procedeelor combinate de prelucrare;
- prin natura proceselor chimice: cu schimbarea componenței chimice a stratului superficial;

- după criteriile tehnologice: prelucrarea termică a suprafeței, topirea, amortizarea, alierea superficială, fuziunea, pulverizarea cu laser în vid, curățarea, inițierea reacțiilor chimice pe suprafețe.

Modelul fizic general al prelucrării superficiale cu laser, presupune prelucrarea prin parcurgerea următoarelor faze:

- absorbția energiei fotonilor de către materialul piesei de lucru și transformarea ei în căldură;
- răspândirea căldurii și încălzirea zonelor aferente;
- desfășurarea procesului de difuzie, transformărilor de structură și fază în materialul încălzit;
- răcirea zonei de acțiune termică după finalizarea acțiunii razei laser și a procesului de modificare a stratului superficial.

Procesul absorbției luminii și transmiterea ulterioară a energiei în interiorul corpului se realizează în mod diferit pentru materiale semiconductoare și cele dielectrice.

La interacțiunea radiației laser (fluxului de lumină coerentă) cu metale, acesta, se absoarbe de electron de conducție din stratul superficial cu grosimea de $\delta=(10^5\div10^4)$ cm, ceea ce duce la creșterea energiei lor. Pentru momentul de timp $\tau_{el}\sim10^{-11}$ s în metal se încălzește numai gazul electronic. Creșterea temperaturii gazului electronic are loc atâta timp, cât cantitatea de energie transmise rețelei se egalează cu cantitatea de energie primită de la sursa externă. În continuare, diferența de temperatură a gazului electronic și a rețelei se micșorează, tinzând la o anumită limită, care este egală cu temperatura totală a materialului. Pentru metale la densitatea constantă a puterii radiației, noțiunea de temperatură totală (T) se poate include, începând cu $t\sim10^9$ s [22].

Una dintre particularitățile ale interacțiunii razei laser cu suprafața metalului o are reflexia deosebit de puternică a luminii de la suprafețele metalelor, care atinge până la 99 %. O așa situație este caracteristică momentului inițial al prelucrării cu radiație laser. Odată cu creșterea temperaturii suprafeței metalului, conductivitatea electrică a acestuia se micșorează, iar odată cu el crește și coeficientul de absorbție . Din această cauză, trebuie prevăzute măsuri speciale de mărire a coeficientului de absorbție, utilizându-se diferite tipuri de acoperiri absorbante. Condiția principală la alegerea acoperirii de absorbție este coeficientul înalt de absorbție a radiației luminoase.

Componența acoperirii trebuie să fie simplă de confecționat, ieftină, ușor de aplicat pe suprafață și să asigure o adeziune înaltă cu suprafața de prelucrare, precum și stabilă la păstrare.

Acoperirea, de asemenea, trebuie să posede temperaturi de distrucție mari, cât și conductivitate termică înaltă, ca să asigure aprovizionarea eficientă cu energie termică a suportului.

Absorbția de către materialul piesei sau al acoperirii energiei fotonilor se transmite din zona acțiunii radiației laserului în interiorul substanței cu ajutorul diferitor mecanisme de conductivitate termică prin electroni, fotoni și prin radiații. La intervalul de temperaturi ($10^2 \div 10^4$) K, transferul energiei în metal se efectuează cu ajutorul conductivității electronice.

Conductivitatea cu fotoni, jucând un rol substanțial la temperaturi joase în intervalul de temperaturi indicat, este cu totul joasă în comparație cu conductivitatea electronică. Conductivitatea radiantă joacă un rol substanțial în procesul transferului energiei la temperaturi de 10^4 K.

Conductivitatea termică a unui material se caracterizează prin coeficientul de conductivitate termică λ , fiind coeficientul proporționalității în legea Fourier (1.1):

$$I = -\lambda \text{ grad } T, \quad (1.1)$$

În care : I – fluxul de căldură.

Pentru descrierea proceselor la prelucrarea cu laser este foarte important a cunoaște distribuția spațio-temporală a temperaturii în volumul obiectului. Descrierea câmpului termic are ca bază soluția ecuației termoconductivității ca valoare limită (1.2):

$$\frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = d \nabla^2 T(r,t) + f(r,t), \quad (1.2)$$

unde:

$d = \frac{\lambda}{c\rho}$ – coeficientul termoconductivității;

c – capacitatea de căldură volumetrică;

ρ – densitatea substanței;

$f(r,t)$ – funcția ce caracterizează densitatea surselor de căldură;

r – vectorul razei ce caracterizează coordonatele curente al punctului.

La acțiunea laserului asupra suprafeței, se formează o zonă relativ locală cu temperatură înaltă. Creșterea temperaturii duce la creșterea exponențială a coeficientului de difuzie și a intensificării procesului de difuzie, atât din mediul înconjurător, cât și între fazele aparte al aliajului, ceea ce duce modificarea stării fazo-structurale. În acest caz, o astfel de zonă se numește zona acțiunii termice (ZAT).

Particularitatea distinctă a transformărilor de structură și fază la prelucrarea cu laser constă în faptul, că timpul caracteristic al energiei proceselor termice „încălzire-răcire” este mai mic decât timpul caracteristic al efectuării complete a transformărilor de structură și fază în metale, determinat de coeficientul de difuzie.

Astfel, dacă vom lua în calcul diferența dintre dimensiunile fazelor în aliaj cu dimensiunea zonei acțiunii termice și creșterea exponențială a coeficientului difuziei odată cu creșterea

temperaturii, atunci diferența între timp se micșorează, însă rămâne în defavoarea proceselor de difuzie. Așadar, încălzirea rapidă cu radiații laser are loc cu transformări de fază necomplete în metale în raport cu diagrama stării, acceptată în știința materialelor.

Vom descrie în continuare unele procedee ale prelucrării cu laser.

Tratamentul termic superficial se utilizează pentru crearea impusă a transformărilor structurale și de bază în stratul superficial cu ajutorul acțiunii termice a razei laser.

Călirea cu laser este una dintre operațiile cele mai răspândite și este destinată creșterii micro-durității stratului superficial pe baza formării fazelor metastabile. În oțeluri se formează martensita aciculară, în fontă – faza de cementită fină [19-25].

În rezultat are loc creșterea rezistenței la uzură și coroziune a pieselor de mașini. O astfel de prelucrare s-a manifestat bine la durificarea capetelor de ambutisare, sculelor așchietoare, cămașei cilindrului motoarelor cu ardere internă, segmentilor de compresie a pistoanelor compresoarelor, arborilor cotiți și celor de distribuție.

Recoacerea cu laser se folosește pentru compensarea tensiunilor remanente în stratul superficial și diminuarea gradului de defectare. Regimurile de prelucrare se selectează astfel încât vitezele proceselor de încălzire și răcire să nu fie prea mari. Revenirea metalelor cu raze laser se folosește relativ rar pentru creșterea gradului de dispersie a fazelor în stratul superficial.

Un alt proces de modificare a straturilor superficiale cu laser este alierea (implantarea cu laser) și depunerea acoperirilor prin încărcare. Ambele procese se realizează în regim de încălzire cu laser cu topirea suprafeței și se deosebesc prin adâncimea topirii: la depunerea prin încărcare topirea piesei este neesențială, iar componenta chimică se formează pe baza adaosurilor; în procesul alierii topirea stratului superficial este determinată de materialul suportului. În afară de aceasta, la depunerea prin încărcare dimensiunile geometrice ale piesei se modifică pe baza grosimii acoperirii depuse.

Drept sursă de componente pentru aliere servesc adaosurile de materiale (folie, sârmă, pulberii, faze gazoase și lichide). Adaosul se introduce în zona prelucrării în prealabil sau nemijlocit în procesul radierii. În primul caz, materialul de adaos se pulverizează, se depune pe cale chimică sau electrochimică, precum la alierea prin electroeroziune, sau se întăresc mecanic de suprafața de prelucrare.

Alierea cu laser cu componente nemetalice (C, B, N) se efectuează prin aplicarea pe suprafață a pastelor ce conțin aceste substanțe. Pastele, în același timp, joacă un rol de absorbție a luminii (coeficientul de absorbție (40÷60)%). Adâncimea medie a alierii constituie (0,3÷0,4) mm la acțiunea laserului în impulsuri și (0,3÷1,0) mm în cazul prelucrării cu laser continuu. La alierea cu metale și aliaje se utilizează adaosuri din pulberi sau depuneri galvanice subțiri.

Componentele de aliere și regimul de prelucrare se selectează în așa fel ca să asigure formarea în stratul superficial a fazelor dure cu grăunți mărunți: carburi, nitruri, boruri. În mod experimental s-a demonstrat posibilitatea sintetizării carburilor rezistente în zona alierii la depunerea pe suprafață a amestecului de metal refractar (W, Mo) și a grafitului.

Depunerea cu laserul a amestecului de pulberi și gaz este de mare perspectivă, asigurând o calitate înaltă a stratului depus. În cazul acesta, în zona încălzirii cu laser se injectează un flux de pulbere, ale cărei particule se încălzesc și se topesc împreună cu materialul piesei. În acest caz, se obțin niște fâșii cu lățimea de (0,5÷5,0) mm și grosimea de (0,3÷3,0) mm. În calitate de mijloc de transport se folosesc gazele: aerul, bioxidul de carbon, azotul și gazele inerte.

Avantajele prelucrării cu radiație laser sunt:

- precizia înaltă a prelucrării.
- lipsa acțiunii mecanice asupra metalului;
- precizia prelucrării;
- lipsă încălzirii în timpul prelucrării;
- pot fi prelucrate metale nemetalice precum lemnul, plasticul, stofele și altele.

Printre dezavantajele prelucrării cu laser putem menționa:

- imposibilitatea prelucrării semifabricatelor la adâncimi mari;
- prețurile înalte ale utilajului și necesitatea deservirii de către un personal calificat.

1.1.5. *Tratamentul termochimic al metalelor*

Tratamentul termochimic al metalelor (TTCH) reprezintă un proces de modificare a componenței chimice, microstructurii și proprietăților stratului superficial al piesei [26]. Modificarea componenței chimice a straturilor superficiale este un rezultat al interacțiunii materialului probe cu mediul în care decurge procesul (solid, lichid, gazos sau plasmă). În urma modificării componenței chimice se modifică componența fazică și microstructura.

Parametrii de bază ai tratamentului termochimic sunt temperatura de încălzire și durata menținerii la temperatura stabilită. La baza oricărui TTCH sunt procesele de disociere, absorbție și difuzie. Disocierea reprezintă obținerea elementului de saturare în stare activă atomică în urma reacției chimice. De exemplu (1.3):



Absorbția este proprietatea de atragere de către suprafața materialului a elementului de saturare. Difuzia reprezintă deplasarea atomilor absorbiți în adâncimea materialului semifabricatului. Pentru realizarea procesului de absorbție și difuzie este necesar ca elementul de saturare să interacționeze cu metalul de bază, formând soluții solide sau compuși chimici.

1.1.5.1. *Carburarea suprafețelor metalice*

Carburarea, sau cementarea suprafețelor metalice reprezintă tratamentul termochimic care constă în saturarea prin difuzie cu carbon a straturilor superficiale ale pieselor metalice de obicei din oțel, prin încălzire și menținere în medii active carburante, la temperaturi în intervalul de stabilitate a austenitei ($930 \div 950$)°C. Carburarea asigură obținerea durității înalte, conferă straturilor superficiale ale pieselor rezistența la uzură a straturilor superficiale, creșterea rezistenței la oboseală și altele [26, 27].

TTCH de cementare se aplică pieselor din oțeluri carbon și celor aliate cu un conținut până la 0,25 %C (oțeluri de cementare) și are drept scop obținerea în straturile superficiale ale pieselor, la o adâncime de circa ($1 \div 2$) mm, a unei concentrații de carbon de ($0,7 \div 1,1$) %, care după călirea piesei îi atribuie acesteia o duritate superficială înaltă (în jur de 60 HRC). În acest fel se poate atribui miezului piesei o tenacitate ridicată, o duritate înaltă suprafeței, rezistență la uzură, la presiunea de contact și la oboseală.

După carburare se aplică în mod obligatoriu un tratament termic, în general călire și revenire joasă în funcție de proprietățile impuse pieselor.

Fenomene fizico-chimice:

1. Reacții între componenții mediului de carburare.
2. Transportul spre suprafața metalică a compușilor care eliberează carbon.
3. Transferul de carbon la interfața mediu-piesă (adsorbție).
4. Difuzia carbonului în matricea metalică.
5. Interacțiunea carbonului cu componenții materialului solid.

Medii de carburare:

- solid – carbonul (mangal, cocs, cărbune de proveniență animală) și activatori (carbonații metalelor alcalino-pământoase sau alcaline, cloruri). Din cauza oxigenului din aer, are loc arderea incompletă a cărbunilor cu formarea monoxidului de carbon (CO), care se descompune cu formarea carbonului atomic conform reacției: $2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}_{\text{at}}$:

- lichid – compoziția mediului: 75-85% Na_2CO_3 ; 10-15% NaCl și 5-10% SiC;

- gazos – medii naturale, introduse direct în spațiul de carburare, gaz de sondă etc; medii produse prin piroliza (disocierea termică) a unor hidrocarburi lichide, picurate în spațiul de lucru al cuptorului; medii gazoase formate din endogaz cu adaosuri de gaz natural sau propan, drept gaze active.

Avantajele cementării suprafețelor metalice:

- TTCH prin care se mărește concentrația de azot la suprafața pieselor la temperaturi cuprinse între ($500 \div 550$)°C;

- rezistentă la coroziune bună în: atmosferă umedă, apa din rețeaua industrială, aburi supraîncălziți, soluții alcaline slabe;
- se reduce foarte mult efectul la crestătură (zgârieturile suprafețelor și ale rizurilor provocate de sculele așchietoare);
- se aplică numai oțelurilor aliate cu Cr, Al, Mo, V și Ti;
- oțelurile carbon nu se nitrurează deoarece, prin acest tratament se obține o suprafață fragilă.
- duritatea superficială (600÷1200) HV, în funcție de compoziția chimică a oțelului;
- rezistența la uzură prin frecare și rezistența la oboseală, la solicitări de încovoiere și torsiune (25÷35)%.

1.1.5.2. Nitrurarea suprafețelor metalelor

Nitrurarea prezintă în sine tratamentul termochimic, prin care straturile superficiale se supun saturației cu azot. După nitrurare crește nu numai duritatea și rezistența la uzură, dar și rezistența la coroziune [27].

La nitrurare, procesul se încarcă în sobe ermetice, în care se pompează amoniac NH_3 cu o anumită viteză. La încălzire amoniacul disociază conform reacției (1.4):



Azotul atomic este absorbit de suprafață și difuzează în adâncimea produsului. Fazele ce se obțin în straturile nitrurate ale oțelurilor carbon nu asigură o duritate înaltă și stratul format este fragil.

Pentru nitrurare se folosesc oțeluri ce conțin aluminiu, molibden, crom și titan. Nitrurile acestor elemente sunt dispersate și posedă duritate înaltă și stabilitate termică. Adâncimea și duritatea superficială a stratului nitrurat depind de un șir de factori, principalii fiind temperatura nitrurării, durata și componența oțelului pentru nitrurare.

În dependență de condițiile de funcționare ale piesei se utilizează nitrurarea pentru creșterea durității superficiale și rezistenței la uzură, se realizează în cuptoare speciale în care oțelurile se încălzesc la (500÷600)°C, într-o atmosferă de amoniac, din care azotul degajat este absorbit de piesă. Timpul de menținere este de 80÷90 ore, după care urmează o răcire lentă de 0,01 mm/h. Conținutul azotului în stratul superficial constituie 10÷12 %, adâncimea stratului de pătrundere este de 0,3÷0,6 mm. În stratul de suprafață se obține o duritate de aproximativ 1000HV.

Acest procedeu se aplica mai rar, datorită timpului îndelungat de răcire și numai pentru cazul pieselor supuse la sarcini alternative (încovoiere și răsucire).

Nitrurarea anticorozivă se realizează pentru îmbunătățirea rezistenței la coroziune a pieselor executate din oțelurile aliate și oțeluri carbon. Temperatura de realizare a nitrurării –

(650÷700)°C, durata procesului este de 10 ore. Pe suprafață se formează un strat cu grosimea de (0,01÷0,03) mm, care manifestă o stabilitate înaltă contra coroziunii.

Nitrurarea se aplică pieselor finite, care au fost prelucrate mecanic și tratate termic (călite și revenite). După nitrurare, în miezul materialului se păstrează structura sorbitei, care asigură o rezistență și tenacitate înaltă.

Avantajele nitrurării: mărește duritatea oțelului de 1,5 ori față de oțelul cementat, nu necesită călire ca în cazul pieselor cementate; piesele astfel tratate obțin o rezistență înaltă la coroziune.

1.1.5.3. Carbo-nitrurarea suprafețelor metalice

Carbonitrurarea (CN) se realizează în amestec de gaze din – gazul de carburare și amoniacul disociat. Componenta gazului, temperatura procesului sunt determinate de raportul carbonului și al azotului în stratul cianurat. Adâncimea stratului este funcție de temperatura și durata expunerii [27].

În funcție de temperatură, carbonitrurarea poate avea loc la temperaturi înalte: (800÷900)°C, medii: (700÷720)°C și joase: (550÷580)°C.

În funcție de transformările care au loc în miez, CN poate fi cu transformare $\alpha \rightarrow \gamma$ în miez (727÷900)°C și fără transformare $\alpha \rightarrow \gamma$ în miez (< 727°C).

Procesul de CN se aplică atât pieselor executate din oțeluri carbon, cât și oțeluri aliate. CN se realizează în medii solide (ferocianură de potasiu), în medii lichide (baie de cianură) și în medii gazoase (CH₄, amoniac gazos). Temperatura de menținere este de 800÷950 °C, urmând apoi un tratament termic de călire și revenire. În medii lichide și gazoase, cianurarea se poate face și la 550÷600 °C.

Avantajele procesului de CN constau în faptul că, sporește duritatea, rezistența la uzură, la oboseală și la presiunea de contact. Se obține o suprafață mult mai dură decât cea obținută prin cementare. Datorită duratei mici de prelucrare a suprafețelor cu duritate sporită se aplica des, în special pentru tratarea roților dințate și a diverselor piese de automobil.

1.2. Alierea prin scânteii electrice – metodă eficientă de modificare a suprafețelor metalice

Metoda electrofizică de prelucrare a materialelor – alierea prin scânteii electrice a suprafețelor metalice în premieră a fost elaborată și realizată de către savanții Boris și Natalia Lazarenko în anul 1943, simultan cu metoda prelucrării dimensionale prin scânteii electrice [28]. Dacă, în cazul prelucrării dimensionale realizată ca regulă în lichide dielectrice are loc îndepărtarea unei părți din materialul anodului (electrodului-piesă), ca rezultat al eroziunii electrice, în cazul alierii prin scânteii electrice, efectuată în medii gazoase, are loc prelevarea, transferul și depunerea

materialului anodului pe suprafața catodului, sau îmbogățirea stratului superficial al catodului cu elemente ce intră în componența materialului anodului și a mediului de lucru.

Alierea prin scânteii electrice (ASE) [28] se bazează pe fenomenul transferului polar al materialului anodului (electrodului de prelucrare) pe suprafața catodului (piesei) la amorsarea între ele a descărcărilor electrice în impulsuri (E_d). Procesul realizării metodei este simplu, iar utilajul transportabil și de gabarite mici. Schema electrică de principiu este prezentată în figura 1.6. Ea este constituită dintr-un generator de curent continuu (G), care asigură încărcarea bateriei de condensatoare C printr-o rezistență de balast R la care este conectat în calitate de anod electrodul (2) acționat de dispozitivul (3) și în calitate de catod piesă (1). Principiul de funcționare este următorul: condensatorul variabil (C) se încarcă de la sursa de curent continuu (G) printr rezistență de balast (R), iar la apropierea anodului de catod are loc descărcarea în impuls.

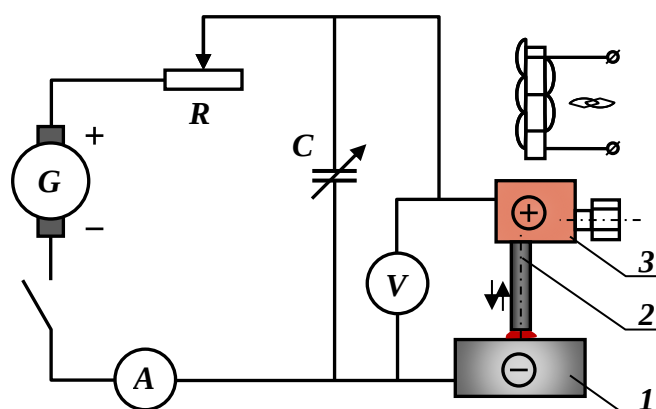


Fig. 1.6. Schema electrică tradițională de principiu a instalației de aliere prin scânteii electrice: 1 – piesa de prelucrat (catod); 2 – electrod (anod); 3 – dispozitiv de acționare

La ora actuală, metoda alierii prin scânteii electrice este în continuă dezvoltare pe următoarele direcții: dezvoltarea de noi procedee de prelucrare superficială [28] (tratare termică și chimico-termică, modificarea geometriei suprafeței active), sinteza de noi materiale pentru depunere și conceperea, proiectarea și fabricarea de noi echipamente, și dotări tehnologice în vederea creșterii performanțelor: productivității formării depunerilor și asigurării calității impuse [29, 30].

Prelucrarea cu scânteii electrice a demonstrat avantaje concurențiale pe care le posedă în raport cu alte metode de prelucrare a materialelor, datorită simplității realizării, micului consum de materiale, energie și multe altele. În pofida vârstei onorabile de peste 70 de ani, ASE până în prezent este considerată o metodă de perspectivă care cu trecerea timpului nu numai că a crescut în prioritate, dar s-a și extins în aplicare în diverse sfere tehnologice de prelucrare. Extinderea metodei ASE și după hotarele arealului tradițional demonstrează valoarea acestei tehnologii.

Dacă până în 1990 lider în producerea utilajului tehnologic de durificare prin scânteii electrice se considera Uzina-Pilot al Institutului de Fizică Aplicată din R. Moldova, la ora actuală producerea instalațiilor ASE s-a extins pe mai multe continente. De exemplu, firmele japoneze au scos pe piață mai multe modele de instalații cu acțiune manuală de tip Micro Depo, Tehno Coat Internațional (figurile 1.7, 1.8, 1.9) [29].



Fig. 1.6. Instalație de tip Ultrasonic Depo [29]



Fig. 1.7. Instalații de tip Micro Depo [29]



Fig. 1.8. Instalație de tip Spark Depo [29]

Elaborări interesante în acest domeniu prezintă „TWI Ltd - World Centre for Materials Joining Technology” cu aplicator rotativ dirijat de mâna robotului ce se deplasează pe 6 coordonate, ceea ce asigură o calitate înaltă a straturilor formate și o productivitate sporită.

De menționat – caracteristicile tehnice ale instalațiilor japoneze se încadrează în aceleași regimuri energetice cum și cele ale producătorilor din R. Moldova, ceea ce denotă faptul optimizării perfecte a parametrilor tehnologici efectuate de către specialiștii moldoveni. Este și firesc acest lucru, deoarece există o corelare strictă între regimurile energetice de prelucrare și calitatea straturilor formate. O mică deviere de la parametrii optimizați duce la scăderea bruscă a calității straturilor durificate.

Declinul economic în statele postsovietice s-a reflectat negativ și în domeniul durificării prin scânteii electrice. Astfel, a încetat să mai funcționeze Uzina-Pilot a Institutului de Fizică Aplicată din Republica Moldova, a cărei preocupare de bază au fost prototipurile de diferite echipamente tehnologice și în deosebi a celor de aliere prin scânteii electrice.

Cu toate acestea, la Institutul de Fizică Aplicată din Republica Moldova a continuat cercetarea proceselor și fenomenelor însoțitoare a alierii prin scânteii electrice atât în domeniul fundamental cât și aplicativ.

Astfel, a fost organizată elaborarea și confecționarea modelelor noi de instalații manuale și mecanizate cu diverse destinații funcționale. Cercetările tehnologice fundamentale au permis să

stabilim că un rol important în obținerea straturilor durificate de înaltă calitate îl joacă forma traiectoriei de mișcare electrodului în raport cu suprafața de prelucrare și folosirea în calitate de elemente de aliere a pulberii aceluiași materiale ce intră în componența electrozilor compacți de prelucrare.

Prelucrarea prin scânteii electrice se divizează în două direcții independente:

1. Generarea suprafețelor, adică obținerea pieselor cu o geometrie și dimensiuni impuse – prelucrarea dimensională prin scânteii electrice.

2. Atribuirea suprafeței de lucru a piesei de noi proprietăți fizico-mecanice – modificarea compoziției și structurii stratului de suprafață a pieselor.

Prelucrarea dimensională prin electroeroziune are posibilități deosebit de largi:

a. Lichidarea completă a rupturii dintre posibilitățile metalurgiei, care elaborează materiale cu proprietăți fizico-mecanice crescânde și posibilitățile prelucrării metalelor prin așchiere.

b. Dezvoltarea sigură a posibilității confecționării sculelor de prelucrare ieftine și durabile pentru ștanțare.

c. Elaborarea unui șir de procese unice de prelucrare, ce nu pot fi realizate prin alte metode: orificii cu axe curbilinii și secțiuni de orice complexitate; debitarea metalelor și aliajelor dure.

Cea de a II-a direcție atribuirea suprafeței de lucru a piesei de proprietăți noi fizico-mecanice a suprafețelor se aplică pe larg pentru creșterea fiabilității aparatelor, echipamentelor, pentru creșterea rezistenței la uzură, coroziune și refractarității suprafețelor pieselor, pentru recondiționarea organelor de mașini uzate și în alte scopuri.

1.2.1. Modelul procesului alierii prin scânteii electrice

Modelul procesului ASE a fost elaborat de către autorii acestuia. La amorsarea descărcării prin impuls, între electrozii apropiați are loc topirea straturilor superficiale ale acestora și eroziunea preponderentă a anodului.

Particulele topite și prelevate ale anodului, atingând suprafața catodului, parțial se contopesc sau pătrund în matrice (catod). Urmează noua acțiune a anodului pe suprafața de depunere, acesta acționează atât mecanic, cât și prin noul impuls de curent care parcurge suprafața. Energia degajată de impulsul următor, vine să microsudeze particulele între ele, cât și cu suprafața prelucrată a piesei. Procesul este însoțit și de difuzia componentelor particulelor provenite din materialul anodului matricea catodului, și de reacțiile chimice între materialele electrozilor și elementele mediului înconjurător. Șocul mecanic provocat de anod, tasează acoperirea formată, sporind omogenitatea și densitatea ei. În continuare, anodul începe să se miște în sus și ciclul astfel se sfârșește [30-44].

Pentru a obține o acoperire uniformă după grosime, este necesară deplasarea anodului vibrator pe suprafața catodului cu o anumită viteză. Aceasta se datorează faptului [14] că drept rezultat al trecerii impulsului electric în punctul atingerii canalului descărcării cu suprafața electrozilor, are loc îndepărtarea materialului electrozilor, cu formarea craterelor cu margini ce se înalță deasupra suprafeței inițiale.

Dacă impulsurile electrice sunt concentrate și acționează într-un singur punct, atunci pe catod nu se formează un strat al materialului transferat, ci o adâncitură semnificativă. Însă dacă viteza deplasării anodului are o valoare încât la momentul trecerii următorului impuls reușește să se deplaseze cu un diametru egal cu cel al adânciturii, atunci suprafața catodului va obține un profil fodezvoltat cu o rugozitate greu de prognozat, ceea ce nu este acceptabil.

În mod experimental s-a stabilit că o acoperire continuă se poate obține la deplasarea electrozilor cu 0,25 din diametrul craterului, într-un interval de timp dintre două impulsuri. În acest caz, fiecare descărcare va trece peste marginea adânciturii formată de descărcarea anterioară.

Pe catod, va avea loc un proces micro metalurgic ca rezultat al interacțiunii materialului acestuia cu particulele topite. Prin aceasta se explică aderența înaltă a materialului stratului depus cu suprafața prelucrată a catodului-piesa.

De menționat că în cercetările [43] s-a stabilit că volumul de material depus pe catod, în urma acțiunii descărcărilor în impuls, în mare măsură depinde de compoziția chimică a materialelor de execuție a ambilor electrozi, de valoarea energiei impulsurilor și durata prelucrării. Pentru procesul ASE este caracteristic faptul, că graficul dependenței adaosului de masa a catodului de timpul prelucrării prezintă o linie curbă cu maximum. Cu cât este mai mare valoarea energiei impulsului, cu atât mai repede se atinge acest maximum.

Au fost înaintate mai multe ipoteze ce explică acest efect pe curba adaosului de masa catodului. Autorii [13, 42, 43] presupun, că una din cauze ar putea fi producerea unor reacții chimice atât dintre materialele de execuție a electrozilor, cât și a materialelor acestora cu elementele mediului de lucru.

Efectuarea procesului ASE în gaze inerte (heliu, argon, hidrogen) a demonstrat că, la valori egale ale energiei impulsurilor electrice, transferul de masă al materialului anodului pe suprafața catodului diferă considerabil. Astfel, la alierea în atmosferă de argon sau hidrogen [43] s-au obținut adaosuri de masa ale catodului de circa 6 ori mai mari decât în aer

Cercetările executate pentru elucidarea acestui subiect cu aplicarea în calitate de mediu de lucru a gazelor rare nu au permis obținerea unui răspuns clar despre rolul atmosferei inerte asupra transferului de masă a materialului anodului pe suprafața catodului, deoarece, la temperaturi ale plasmiei de circa 10^4 °K, inertitatea gazelor nu este demonstrată, iar pentru unele perechi de materiale de execuție a electrozilor nu s-a adevărit creșterea adaosului de masa a catodului.

Autorii lucrării [44] au executat procesul ASE în vid, prin care interacțiunea între materialele electrozilor și atmosferă se diminuează substanțial.

Deși, a fost exclusă interacțiunea electrozilor metalelor cu oxigenul și azotul ce contribuie la formarea oxizilor și nitrurilor care, după constatarea mai multor autori [43-45], atribuie straturilor formate un grad înalt de fragilitate iar dependența adaosului de masa a catodului în timp și în acest caz prezintă o curbă cu maximum. Aceasta ne demonstrează o dată în plus că asupra limitării grosimii stratului format pe suprafața catodului influențează mai mulți factori.

Cercetările ulterioare [39, 44, 45] au scos în evidență încă un factor important care contribuie la apariția maximumului pe curba dependenței adaosului de masa a catodului în funcție de durata prelucrării, și anume – acumularea în straturile superficiale formate a tensiunilor remanente. Procesele nestaționare de încălzire și răcire a materialului electrozilor în zona acțiunii plasmei descărcărilor în impuls sunt o cauză a apariției în straturile durificate a tensiunilor remanente.

Transformările de fază în aliajele fierului sunt însoțite de modificări ale volumului care duc la formarea în ele a stărilor tensionate [3]. Aceste transformări decurg odată cu creșterea volumului specific (transformării martensitei), sau cu micșorarea acestuia.

În procesul ASE, la interacțiunea materialului anodului cu cel al catodului, are loc formarea de faze noi, însoțite de apariția tensiunilor remanente datorate de defectele structurale. Valorile acestor tensiuni din straturile superficiale ale eșantioanelor executate din titan și oțel au fost determinate în mai multe studii [39, 40, 44, 46]. Cercetările în cauză au demonstrat, că valoarea și semnul acestor tensiuni și caracterul repartizării lor în stratul format depind de natura materialului electrodului de prelucrare, de timpul specific de prelucrare, de valoarea energiei descărcării și mediul de lucru din interstițiu.

Natura materialului electrodului de prelucrare influențează substanțial asupra repartizării tensiunilor remanente în adâncimea stratului format. De exemplu, la ASE cu metalele care formează cu fierul soluții solide, tensiunile remanente ating cele mai mari valori la suprafața stratului, iar în restul cazurilor – la limita dintre stratul alb și cel intermediar. Cele mai mari valori ale tensiunilor remanente s-au stabilit în cazul ASE cu anodi care formează cu materialul substratului compuși metalici (niobiu, tantal), precum și în cazul dizolvării limitate a materialului substratului (catodului). De menționat că valoarea absolută a tensiunilor remanente diferă substanțial. De exemplu, durificarea oțelului de construcție cu conținut de carbon $\approx 0,45\%$ cu electrozi din carburi de titan și zirconiu este însoțită de formarea în straturile superficiale a tensiunilor de $3,8 \text{ kgf/mm}^2$ și $7,8 \text{ kgf/mm}^2$, respectiv, iar cu anodi din carburi de bor și niobiu – respectiv 34 și 55 kgf/mm^2 [47].

Energia descărcării și timpul specific de prelucrare nu influențează în egală măsură asupra valorii tensiunilor remanente. Însă tendința creșterii acestora odată cu creșterea valorii parametrilor procesului ASE se observă, practic, în toate cazurile [46].

Analiza influenței materialului piesei (catodului) asupra valorii și a caracterului repartizării tensiunilor remanente a demonstrat, că informații mai ample privind această problemă au fost obținute în cazul prelucrării titanului. La ASE a probelor executate din titan s-au observat aceleași legități ale formării tensiunilor remanente în straturile superficiale ca și la prelucrarea celor executate din oțel.

La regimuri identice ale procesului ASE se manifestă influența materialului electrodului de prelucrare, durata prelucrării, precum și componența mediului de lucru din interstițiu. Aceasta din urmă influențează în special asupra valorii tensiunilor remanente, neschimbând caracterul repartizării acestora în adâncimea stratului format.

Prelucrarea probelor executate din titan și aliajele lui, ale metalelor greu fuzibile și a unor metale pure cu electrozi executați din grafit în mediu de argon a demonstrat că tensiunile remanente maxime se concentrează la suprafața probelor, pe când în mediu de aer – la adâncimea de circa $(40\div60)$ μm . De menționat că, la prelucrarea în aer, valoarea tensiunilor întotdeauna este mai mare decât la prelucrarea în argon. Valorile mai mari ale tensiunilor remanente la prelucrarea în mediu de aer sunt legate de conductibilitatea și capacitatea termică mai mici (de 2 ori) ale argonului, decât ale aerului. Datorită acestui fapt, răcirea în argon a micro sectoarelor probelor supuse sarcinii termice în impuls la trecerea descărcărilor electrice, are loc cu viteză mai mică și, în consecință, tensiunile remanente apărute sunt mai mici. S-a observat că, după punctul maximum, tensiunile remanente scad brusc până la adâncimea de $(100\div120)$ μm , după care se micșorează mai lent. Un astfel de caracter al repartizării tensiunilor în stratul durificat este cauzat de faptul că, pe măsura pătrunderii în adâncul probei, se micșorează influența termică a plasmii descărcării electrice în impuls și concentrația elementelor provenite din materialul anodului în cel al catodului. Alierea cu scânteii electrice cu anodi din diferite materiale, în condiții egale (regim energetic, diametru electrod și lungime, durată a prelucrării), ca regulă, duce la formarea straturilor cu diferite tensiuni remanente, ceea ce poate fi explicat prin schimbarea (creșterea sau micșorarea) volumului specific în care au avut loc transformările de fază.

Cele mai mari valori ale tensiuni remanente se atestă în straturile durificate cu vanadiu, zirconiu, aluminiu și carbură de molibden, iar mai mici – la prelucrarea cu molibden pur, tantal și cu carbură de wolfram. Se vede că, în primul caz, tensiunile ce au apărut ca rezultat al transformărilor de fază au același semn cu cele termice și valoarea sumară a tensiunilor este mai mare, iar în al doilea – se formează tensiuni de sens opus, și în unele cazuri le compensează pe cele termice, astfel, valoarea sumară este mai mică.

1.2.2. Influența formei de mișcare a electrodului de prelucrare asupra formării stratului pe suprafața catodului

Tradițional, pentru realizarea procesului ASE echipamentele tehnologice se dotează cu dispozitive care conferă electrodului de prelucrare o mișcare sub forma de vibrații. Multiple cercetări experimentale realizate cu diverse materiale au permis a stabili, că în multe cazuri, în funcție de natura materialului anodului, mișcarea în formă de vibrații nu asigură rezultatele scontate. În premieră acest lucru a fost observat și de către autorul lucrării [48]. Acesta, în scopul creșterii fiabilității contactelor în sistemele de comutare ale stațiilor de telecomunicații au efectuat procesul ASE cu o „perie” din sârmă de argint care se rotea în plan perpendicular la suprafața catodului. Astfel, s-a obținut o productivitate cu mult mai mare a procesului formării acoperirilor și o continuitate maximă a acestora. Rezultate similare s-au obținut și în lucrarea [49], în care s-au depus acoperiri de argint și aur pe contactele releelor telefonice, ceea ce a permis creșterea considerabilă a rezistenței la uzură a contactelor, micșorarea rezistenței electrice de contact și, plus la aceasta – micșorarea nivelului de zgomot de $(30 \div 100)$ ori.

Rezultate interesante au fost obținute la alierea prin scânteii electrice cu electrozi din sârmă a unor metale și aliaje relativ plastice care există pe piața industrială, cum ar fi aluminiul, nichelul, fierul, cuprul, titanul, oțelul inoxidabil austenitic, oțelul cu conținut de carbon de $\approx 0,3\ \%C$, oțelul pentru arcuri și altele [40]. Electrosculă cu care s-a efectuat procesul reprezintă un disc, în planul vertical al căruia sunt fixați electrozi de sârmă cu diametrul de $(1,5 \div 2,0)$ mm și lungimea de $(70 \div 80)$ mm.

În timpul procesului ASE, discul cu șase electrozi se rotea într-un plan perpendicular la suprafața catodului. Numărul de electrozi – 6 și frecvența de rotație de circa 600 rotații/minut au fost alese pentru a asigura o sincronizare a frecvenței generatorului de impulsuri de curent cu frecvența contactului capătului electrodului cu suprafața catodul. La atingerea de către capătul unui electrod a distanței de străpungere a interstițiului, are loc descărcarea în impuls, care este însoțită de prelevarea unei porțiuni de material în formă lichidă, care în momentul următor, este „unsă” de vârful electrodului pe suprafața catodului, unde se cristalizează, după care acul se repeta. Datorită acestui procedeu, s-a reușit formarea straturilor cu un înalt grad de continuitate și grosimi de zeci de ori mai mari (vezi Fig.1.10, [40]). După cum se vede din fig 1.10, pe curba dependenței adaosului de masă a catodului de timpul prelucrării cu anodul vibrator există un sector de saturație, ceea ce confirmă limitarea grosimii în acest caz, iar pe de altă parte, la prelucrarea cu electrozi rotativi, transferul de masă este uniform și continuu.

Unicul dezavantaj care poate fi menționat este că la grosimi mai mari de 2,0 mm începe formarea pe suprafața catodului a unor proeminente, care poate fi explicată prin efectuarea

procesului în mod manual, ce nu poate asigura o deplasare uniformă a anodului pe suprafața catodului.

Astfel observăm că forma mișcării anodului (vibrație, sau rotație) în raport cu catodul influențează substanțial asupra transferului polar. Drept, că mecanismul precis al acestui efect nu este încă cunoscut la moment, însă acesta ne orientează spre posibilitatea obținerii straturilor groase cu resurse mult mai mari, ceea ce nu este posibil în cazul utilizării electrozilor cu vibrații.

De menționat, încă un avantaj al procesului ASE cu mișcare de rotație a electrozilor de prelucrare. S-a observat în primele momente ale prelucrării suprafeței catodului o interacțiune intensă a materialelor anodului și catodului cu formarea stratului alb, după care treptat începe depunerea metalului anodului în stare pură. De exemplu, la ASE a titanului cu electrozi din aluminiu stratul alb format manifestă o duritate de $(3 \div 5)$ ori mai mare, decât cea a titanului. Analiza cu raze X a demonstrat prezența compușilor metalici $TiAl$, $TiAl_2$, $TiAl_3$, Ti_3Al .

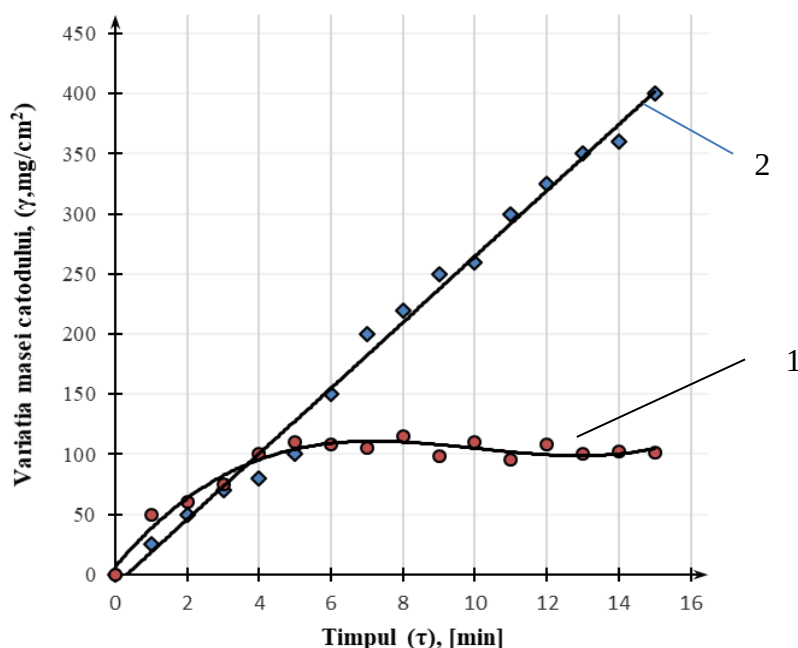


Fig.1.10. Dependența adaosului masei catodului în funcție de forma de mișcare a electrodului: 1 – vibrator; 2 – rotativ [40]

În cazul utilizării în calitate de electrozi a nichelului, s-a observat același tablou al formării acoperirii; mai întâi se formează stratul alb cu grosimea de circa $(100 \div 150)$ μm , după care se depune nichelul în stare pură. S-a stabilit că stratul alb conține compuși metalici $TiNi$, TiN_2 și Ti_2Ni . Duritatea acestora constituie $(950 \div 1150)$ kgf/mm^2 .

Compusul intermetalic Ti_2Ni s-a dovedit a avea o rezistență deosebit de mare la coroziune, în condițiile trecerii curentului electric.

1.2.3. Transformările fazo-structurale în straturile formate la ASE și modificarea proprietăților fizico-mecanice al acestora

Acțiunea periodică a descărcărilor electrice poate fi prezentată drept un ciclu de procese repetate: încălzirea bruscă, topirea și evaporarea materialului de pe suprafața electrozilor, amestecarea metalului depus cu materialul substratului, care, în final, duc la schimbarea componenței acestuia și se finalizează cu cristalizarea rapidă a topiturii [50]. În urma acestor procese are loc modificarea dimensiunii și a formei grăunților metalului, apar diferite defecte ale rețelei cristaline [51, 52].

Pentru studierea microstructurii metalelor sunt utilizate pe larg metode chimice, electrochimice și ionice de evidențiere a structurii [53, 54].

Particularitățile deosebite ale straturilor formate la alierea prin scânteii electrice nu au permis mai mult timp specialiștilor să descifreze structura acestora. Folosind reactivile (substanțele) tradiționale de decapare, s-a reușit numai evidențierea „stratului alb”. Astfel de straturi s-au observat pe suprafețele materialelor supuse rectificării, aşchierii, frezării, prelucrării electromecanice și cu bile, la acțiunea fluxurilor concentrate de energie. Comun pentru toate aceste cazuri este faptul că formarea straturilor albe are loc în condițiile acțiunii locale a temperaturilor și presiunilor înalte. Viteza înaltă de transmitere a căldurii în limitele unei particule a stratului de câțiva micrometri duce la micșorarea temperaturii de topire și, respectiv, la transformări de fază. În legătură cu aceasta, cristalizarea transformărilor de fază, difuzia și interacțiunea chimică, ce însoțesc procesul ASE, duc la formarea unor straturi neechilibrate cu grăunți mici, cu un grad înalt de eterogenitate după componență, structură și proprietăți.

Astfel, duritatea stratului format în majoritatea cazurilor prevalează asupra durității materialului catodului la ASE a oțelurilor și aliajelor de titan cu metalele refractare și aliajele acestora. Cercetările metalografice ale straturilor superficiale obținute prin metoda ASE au demonstrat că, la utilizarea în calitate de catod a metalelor pure, s-au detectat două zone, stratul alb și o zonă a acțiunii termice, iar la durificarea catodului din oțeluri – trei zone, stratul alb, o zonă îmbogățită cu carbon și zona acțiunii termice.

În lucrarea [55] s-au efectuat studii aprofundate în sensul descifrării structurii stratului alb. Folosind reactiv chimice speciale și la rezoluții mari de cca x2000, s-a reușit evidențierea structurii în cazul alierii prin scânteii electrice a fierului Armco și oțelului de scule OSC8 cu electrod din grafit. S-a stabilit că, la ASE a oțelului în mediul de aer, stratul superficial la o adâncime considerabilă se îmbogățește cu carbon și în acest strat pot fi detectate toate straturile și fazele care sunt evidențiate în diagrama de echilibru Fe-C, precum și structurile și fazele neechilibrate obținute la prelucrarea termică a oțelului. S-a stabilit că între stratul format la ASE și bază are loc difuzia reciprocă a elementelor.

În ultimii ani, mai mulți cercetători [50, 54, 56] au stabilit că straturile obținute ca rezultat al ASE sunt construite din cristaline în formă de coloane orientate perpendicular pe granița dintre stratul depus și bază, adică în direcția degajării temperaturii. Lungimea cristalinelor constituie cca $(5\div6)$ μm , iar lățimea $(0,5\div4,0)$ mm. În unele cazuri se observă clar că stratul superficial pe catod este separat de mai multe straturi cristaline. În lucrările [57, 58] s-au stabilit că forma adânciturii apărute pe suprafața catodului în urma descărcării în impuls reflectă simetria planului cristalografic respectiv. Fraționarea cristalinelor în zonele centrale ale adânciturii pe aluminiu și nichel a fost descoperită cu ajutorul razelor X în baza lărgirii liniilor de difracție; totodată, a fost detectată forfecarea deformațională în straturile superficiale ale metalului, ceea ce confirmă existența unor forțe radiale considerabile în timpul dezvoltării descărcării [17, 18].

Acoperirile obținute prin ASE pe oțeluri, ca regulă, formează structuri austenito-martensitice cu un grad înalt a densității defectelor cristaline [59].

În unele cazuri, în straturi se formează o structură celulară tridimensională – grila Franc, asemănătoare structurii aliajelor de ferită și aluminiu după prelucrarea termomecanică la temperaturi înalte [60].

În straturile superficiale ale oțelului C45 supus alierii prin scânteii electrice cu crom, acestea au fost descoperite între substrat și acoperirea depusă.

Densitatea dislocațiilor în stratul intermediar constituie $(10^{10}\div10^{11})\text{ cm}^{-1}$. Perturbarea structurală autorii [61] o explică prin deformarea termoplastică, care apare la încălzirea prin impuls, cât și prin formarea compușilor fragili cu azot, oxigen și carbon, care persistă în calitate de impurități în substratul de oțel. Creșterea valorii energiei descărcării duce la creșterea deformațiilor și, în cele din urmă – la creșterea densității dislocațiilor.

Calculul tensiunilor termice interioare care se formează în straturile superficiale ale molibdenului și fierului la acțiunea sursei periodice de căldură a demonstrat că variația tensiunilor are un caracter ondular: de la întindere – la cele de compresiune, atenuându-se odată cu îndepărtarea de la sursă [18].

Formarea fisurilor ca rezultat al acțiunii impulsurilor electrice a fost studiată detaliat pe exemplul prelucrării dimensionale prin electroeroziune a oțelurilor în gaz lampant și apă distilată [56]. Studiul a demonstrat că densitatea maximă a dislocațiilor se observă la curenți mici și durate mari ale curentului descărcării în impuls. Componenta neomogenă și structura stratului superficial retopit, difuzia carbonului din substratul oțelului și a lichidului de lucru contribuie la formarea fisurilor. Fisurile se extind, ca regulă, de la suprafață în adâncime și se opresc la granița dintre acoperire și substrat, însă pot să se răspândească și în volumul substratului.

Formarea defectelor se poate explica prin apariția tensiunilor de întindere în timpul cristalizării stratului topit pe suprafața craterului de descărcare.

În lucrarea [56] au fost calculate valorile tensiunilor de întindere în straturile superficiale ale oțelurilor după acțiunea descărcărilor în impuls în mediu dielectric, iar în [40] – după ASE a titanului cu metale pure (Ti, W, Cr, Ni, Mo, Al) și cu o serie de carburi ale metalelor tranzitorii: TiC, VC, Cr₃C₂, Mo₂C, WC, TaC, ZrC, HfC. Măsurările s-au efectuat în baza carburii în condițiile dizolvării electrolitice.

S-a stabilit că maximul tensiunilor remanente se localizează la o adâncime oarecare de la suprafața prelucrată și se deplasează în adâncul probei odată cu creșterea duratei acțiunii impulsurilor electrice, fără schimbarea vârfului intensității tensiunilor.

În straturile superficiale ale metalelor supuse acțiunii impulsurilor electrice pot avea loc diferite schimbări de fază: trecerea dintr-o stare de agregare în alta, transformări polimorfe în metale însoțite de trecerea dintr-o modificare cristalină în alta la variația temperaturii, formarea de noi faze (soluții solide, compuși intermetalici) în urma interacțiunii cu elementele de aliere și realocarea impurităților substratului. Transformările de fază al unui sistem din două componente, în funcție de temperatură și concentrație, la o presiune constantă poate fi prognozată prin analiza diagramei acestui sistem [62].

Pentru majoritatea sistemelor bimetalice, diagramele de echilibru sunt cunoscute. Acestea descriu starea de echilibru a substanței atunci când transformările de fază au loc la viteze de încălzire și răcire infinitezimale. Însă în condiții reale viteza schimbării temperaturii este cu mult mai mare (la ASE aceasta atinge $(10^5 \div 10^7)$ K/c), de aceea se schimbă nu numai temperatura de transformare, dar și condițiile transformărilor de fază din cauza întârzierii proceselor de difuzie în procesul formării structurii cristaline noi. Cu cât mai mari sunt vitezele de încălzire și răcire, cu atât mai înalt este gradul de supraîncălzire sau suprarăcire al aliajului [63]. Așadar, componența fazică a acoperirilor formate în procesul ASE, la o concentrare cunoscută a metalelor, poate să nu corespundă diagramei de echilibru al sistemului dat. Legitățile formării fazelor în straturile superficiale ale metalelor supuse acțiunii descărcărilor în impuls, au fost studiate, folosind metodele radiației cu raze X și microscopia electronică, într-o serie de lucrări [39, 46, 63-66].

Electrozii – (anozi) din metale refractare formează cu oțelurile și fierul acoperiri în care predomină soluții solide și compuși metalici. Compușii se formează cu acele perechi de electrozi care, conform diagramelor de echilibru, formează faze, însă în acestea raportul molar între metale este deplasat spre fier și, ca regulă, nu corespunde modificărilor de echilibru cunoscute [62]. În unele cazuri, în acoperirile formate prin ASE a fost descoperită faza γ -Fe, ceea ce este o consecință a procesului de călire în condițiile unei răciri de mare viteză a topiturii. Schimbări analogice ale structurii și componenței fazice s-au observat și la călirea aliajelor sub acțiunea fasciculului laser [67, 68].

După ASE în aer, pe suprafața anodului și catodului au fost detectate nitrurile și oxizii metalelor, însă acestea se întâlnesc mai rar.

La ASE a oțelurilor au loc procese selective de interacțiune a oțelului cu carbonul, sau cu elementele de aliere, de dizolvare și difuzie. În cazul ASE a probelor de oțel cu conținut de carbon $\sim 3,0\%$ cu electrod din grafit, s-a stabilit penetrarea atomilor de carbon în rețeaua cristalină a fierului, în urma căreia se formează austenita și martensita tetragonală, cât și cementita. Cantitatea de austenită ajunge la 40%. La alierea oțelului C45 cu aliaje crom-nichel s-a stabilit că faza de bază în acoperire este – Fe [66]. Dacă elementele aliajelor pot forma carburi, atunci acestea pot fi detectate și la energii mici ale descărcărilor. La ASE cu energii mai înalte ale descărcărilor, în acoperirile formate s-au detectat subcarburi. În cazul utilizării electrozilor cu conținut mare de nichel, în acoperiri s-au obținut oxidul de nichel cu asemănări metalice și carburi.

În multe cazuri, după alierea prin scânteii, pe suprafața catodului se depune materialul pur al anodului. S-a observat că transformările de fază în straturile superficiale ale catodului la ASE depind atât de activitatea chimică a materialelor, cât și de valoarea energiei descărcărilor electrice. Astfel, în [40], la alierea suprafeței titanului tehnic BT1-0 cu electrod din nichel pur, s-a observat că la valoarea energiei impulsurilor între $(1,0 \div 3,0)$ J au loc transformări de fază cu formarea compușilor TiNi, TiNi₂, TiNi₃, însă odată cu creșterea valorii energiei descărcării până la 6,0 J – în straturile superficiale se formează compusul metalic Ti₂Ni cu proprietăți anticorozive înalte în condițiile existenței diferenței de potențial între electrozi [69].

Datorită acestui fenomen, a fost posibilă elaborarea electrozilor neconsumabili pentru protecția catodică a rețelelor urbane, conductelor de gaze și petrol, a corpurilor navale maritime, a utilajelor din industria de obținere a clorului etc. La ASE, concomitent cu interacțiunea materialelor electrozilor, în acest proces participă și elementele atmosferei în care are loc prelucrarea.

Procese de schimb de căldură și masă ale plamei în zona apropiată de electrozi, în componența căreia intră particulele neutre și cele încărcate ale gazului, cât și temperaturile înalte ce se dezvoltă în zona acțiunii descărcărilor și în sectoarele adiacente, intensifică considerabil interacțiunea metalelor cu mediul înconjurător. Analiza chimică a suprafețelor electrozilor metalici supuse acțiunii descărcărilor în aer a demonstrat că conținutul de oxigen și azot în acestea crește odată cu creșterea valorii energiei descărcărilor, duratei de aliere, cât și temperaturii de topire a metalului [70]. După acțiunea descărcărilor electrice, concentrația de oxigen pe suprafața fierului atinge $(50 \div 60)$ % atom.

Oxizi și nitruri au fost detectați în mai multe cazuri după acțiunea descărcărilor electrice [71], însă, ca regulă, concentrația de nitruri este mai mică decât a oxizilor, în pofida faptului că concentrația de azot în aer este de aproape 3 ori mai mare.

O excepție s-a observat în cazul titanului și al molibdenului: la alierea acestora în aer, pe suprafața lor se formează preponderent TiN și MoN, respectiv.

Informații despre mecanismul și cinetica oxidării metalelor la acțiunea descărcărilor electrice în impuls practic lipsesc. În lucrările consacrate cercetării formării oxizilor la acțiuni energetice analogice cum ar fi iradierea cu laser, cu plasmă de temperatură joasă, sunt descrise două mecanisme de bază ale oxidării. Primul presupune formarea oxizilor în urma oxidării vaporilor de metal în aer [72]. Anume, la acțiunea laserului asupra metalelor, când densitatea fluxului de lumină prevalează un prag critic, materialul țintei începe să se dizolve intens. Produsele de evaporare intră în reacție cu oxigenul aerului, iar pe urmă parțial se condensează pe suprafața materialului.

În al doilea mecanism se ia în calcul formarea unui strat subțire de oxid pe suprafața materialului la încălzirea lui în zona căderii fluxului de căldură. Grosimea stratului de oxid se mărește în timp.

Modelul oxidării suprafeței metalului este examinat în lucrările consacrate tăierii cu laser a oțelurilor în atmosferă de oxigen [73, 74], cât și eroziunii metalelor în fluxul de plasmă [75, 76]. S-a stabilit că în urma oxidării la temperaturi înalte particulele de fier desprinse ca rezultat al eroziunii se acoperă cu un strat de FeO. În cazul acțiunii descărcărilor electrice de tensiune joasă se observă același fenomen (încălzirea suprafeței și evaporarea materialelor electrozilor, formarea particulelor în urma eroziunii), de aceea mecanismele descrise mai sus pot fi folosite și pentru descrierea proceselor de oxidare în cazul ASE.

Interacțiunea gazelor cu metalele sub acțiunea descărcărilor electrice influențează asupra condițiilor de formare a acoperirilor ASE și a proprietăților acestora. Formarea oxizilor și a nitrurilor blochează pătrunderea materialului transferat în substrat, contribuie la fragilizarea acoperirilor și în final la limitarea grosimii stratului modificat [3]. De aceea, în condiții egale, dacă procesul ASE se efectuează în medii de argon sau hidrogen, s-a reușit formarea acoperirilor cu mult mai groase decât în aer liber.

La formarea acoperirilor cu electrozi din oțeluri cu conținut mare de elemente și compuși refractari în mediu cu conținut sporit de oxigen se poate întâmpla o selecție a oxidării elementelor, ceea ce modifică componența inițială a materialului electrodului în timpul prelucrării [77]. De exemplu, în timpul depunerii acoperirii WC-Co se observă micșorarea cantității carbonului în carbura de wolfram [78].

În unele lucrări consacrate depunerii cu plasmă a materialului W-Co pe suport de oțel se presupune că motivele de bază ale pierderii carbonului din carbura de wolfram (WC) pot fi mecanismele de ordin termic și chimic [73, 74]. Descompunerea termică a carburii de wolfram în

W lichid și grafit solid are loc în reactorul de plasmă la temperatura de 2785°C. Decarburarea chimică este condiționată la interacțiunea WC cu oxigenul/aerul în fluxul de plasmă.

Studiile încălzirii carburii de wolfram în mediu de gaz cu presiune scăzută a oxigenului (10^{-3} Pa) în diapazonul de temperaturi 80 și 900 K au demonstrat că în aceste condiții se formează amestecul de oxigen de wolfram WO oxicarbura de wolfram (WC_xO_y) și wolfram-metal [79].

Oxidarea particulelor de WC, la o temperatură de 1300 K duce la pierderea definitivă a carbonului în straturile superficiale în urma interacțiunii cu oxigenul și a evoluției monoxidului de carbon. Pe suprafața particulei se formează un strat subțire de WO, sub care este amplasat wolframul-metal. Oxidul de wolfram WO_3 se formează la temperaturi de 600 K și presiunea de 10^4 Pa.

În urma ASE cu material pe bază de TiCN și AlN, în stratul durificat, pe suprafața aliajelor dure au fost detectate faze de oxizi și compuși intermetalici, care s-au format drept rezultat al descompunerii și oxidării TiCN, AlN la acțiunea descărcărilor în impuls [80, 81].

Astfel, oxidarea metalelor sub acțiunea descărcărilor electrice în aer este un fapt împlinit. Însă mecanismele formării oxizilor și nitrurilor, cinetica oxidării metalelor în condițiile alierii prin electroeroziune, influența asupra componenței fazice și a altor caracteristici al suprafețelor modificate nu sunt suficient studiate.

1.2.4. Materiale utilizate în calitate de electrozi pentru alierea prin scânteii electrice

În practica durificării prin electroeroziune a suprafețelor lucrătoare a organelor de mașini și al sculelor până în prezent se utilizează electrozi din aliaje dure pe baza carburilor de titan (TiC), tantal (TaC) și wolfram (WC), însă acestea nu întotdeauna satisfac cerințele înaintate către electrozii de prelucrare, în legătură cu rezistența înaltă la eroziune și prețurile mari. În ultimul deceniu pe lângă preț s-a mai adăugat și deficitul și chiar lipsa totală a acestor electrozi pe piață, dată fiind criza economică în țările producătoare ale electrozilor standardizați – Ucraina și Rusia.

Analiza datelor bibliografice privind ASE a oțelurilor carbon, aliate și rapide ne-au demonstrat că autorii utilizează mai frecvent un spectru larg de electrozi de prelucrare, în special compuși greu fuzibil (tabelul 1.1) [77, 82].

Din tabelul 1.1 se vede tendința utilizării electrozilor standardizați de tip BK și TK, însă până în prezent în literatura de specialitate lipsesc anumite criterii de alegere a electrozilor din aliaje dure, bazate pe studiul interdependenței componenței, structurii, proprietăților și tehnologiilor. Unica argumentare intuitivă de alegere este duritatea și rezistența la înaltă uzură în comparație cu materialul supus durificării.

Cu toate că aceste aliaje se deosebesc considerabil prin caracteristicile mecanice, prin componența chimică, structura atomo-cristalină – nimeni din cercetători nu a atras atenția și nu a

încercat să stabilească interdependența acestor proprietăți, determinate de natura materialului electrodului și condițiile formării stratului durificat, caracteristicile acestuia.

Dacă în calitate de criteriu se ia duritatea electrodului de prelucrare și aceasta poate fi considerată acceptabilă pentru obținerea acoperirilor rezistente la uzură, apoi folosirea acestui criteriu pentru acoperiri cu alte densități, cum ar fi rezistența la coroziune, la temperatură – nu este potrivită.

Tabelul 1.1. Material utilizate în calitate de electrozi pentru ASE

Materialul anodului	Materialul catodului	Destinația acoperirii
Grafit	Oțeluri: P18, 65Г, T15K6	R_t, R_u, R_{st}
FeCr	Oțeluri: 35, 45, Y8A, X12M, 40X, 4XH2C	R_u, R_{um}, R_s
Bronze БрБ2, БрАЖНЦ-9	Oțeluri: 45, P18, X12Φ1, 2X13 și fonte	R_u, R_{ua}
BK2	Oțeluri: 45, P6M5, 5XHT	R_u
BK3	Oțeluri: 45, Y7, 65Г, P18, P6M5, T15K6	R_{ua}, R_{um}, R_u, R_s
BK6, BK6M	Oțeluri: 2, C45, Y7, P6M5	R_{ua}, R_s
BK8	Oțeluri: 45, Y7, 9XC, Y8, 40X, 4XГC, X18H9T, P6M3, P6M5	R_{ua}, R_{um}, R_s
BK15	Oțeluri: Y8, P6M5	R_u, R_{um}
T15K10	Oțeluri: C45, P6M3, P6M5	R_{ua}, R_s
T14K8	Oțelul: 2X13	R_u
T15K6	Oțeluri: 45, Y7, Y8, P6M5, P18, 9XC, XБГ, X18H9T, 65Г, БЖ2, fontă	R_{ua}, R_{um}, R_u, R_s
T30K4	Oțeluri: 15, Y8, 40X, P18, P6M5, T15K6, BT20	R_{ua}, R_{um}, R_s
TiC-Ni-Mo	Oțeluri: C45, X12Φ1	R_s, R_{um}, R_u
WC-Co-B	Oțelul: C45	R_s
WC-Co-Ni ₃ Al WC-Co-Ni-Cr-B-Si	Oțeluri: C45, X12Φ1, BT20, BT3-1	R_s, R_{um}
W-Co-Al ₂ O ₃	Oțel C45, aliaje de titan BT20, BT3-1	R_u, R_s
Al	Al, Cu, oțeluri: CT36 35, Y10A, Ti, XБГ, BT20	R_c, R_u
Ag	Cu, Д16Т, 35XH3Φ, BT6A	R_u, R_{cont}

Notă: Destinația acoperirilor: R_t – rezistența la temperatură, R_u – rezistența la uzură, R_c – rezistența la coroziune, R_s – rezistența sculelor, R_{st} – rezistența ștanțelor, R_{cont} – rezistența contactelor electrice, R_{um} – rezistența utilajului metalurgic, R_{ua} – rezistența utilajului agricol.

Un dezavantaj al metodei ASE este productivitatea mică a procesului și continuitatea insuficientă; în acest aspect aliajele dure pe bază de carburi ale wolframului, tantalului și ale titanului sunt mai puțin eficiente din cauza rezistenței înalte la eroziune. De exemplu, duritatea stratului aliat cu electrozi standardizați de tip BK și TK este similară cu duritatea stratului obținut la alierea cu un metal tranzitoriu și grafit. În unele studii [2], în calitate de electrod de prelucrare s-a folosit grafitul, însă aceste informații sunt limitate și nu au fost comparate cu datele obținute

la ASE cu aliajele WC-Co, TiC-Co și, în final, nu conțin rezultate privind studiul condițiilor de formare a stratului durificat și interdependența cu parametrii ASE.

1.3. Concluzii la capitolul 1

Studiul și analiza surselor bibliografice existente pe domeniul tehnologiilor de formare a straturilor de depunere ne permit a concluda ca:

- Metoda ASE este una simplă, ușor realizabilă și nu necesită timp îndelungat pentru pregătirea specialiștilor;
- Investigații științifice sistematice ale procesului ASE în vederea formării acoperirilor cu conținut de carburi prin prelucrarea succesivă cu Ti, Ta, W, C – constituenți ai electrozilor standardizați: WC+TiC+Co și WC+TiC+TaC+Co va permite stabilirea legăturilor de bază ale procesului sintetizării carburilor metalice și va crea în perspectivă premise de elaborare a bazelor tehnologice de sintetizare a acoperirilor cu proprietăți fizico-mecanice și de exploatare similare cu cele obținute la prelucrarea cu electrozi standardizați [83].
- Utilizarea în direct a materialelor compacte sau aplicarea pulberilor, permite a sintetiza structurile și compozițiile prescrise direct pe suprafețele pieselor.

2. MATERIALE, METODE ȘI TEHNICI DE FORMAREA A ACOPERIRILOR ȘI INVESTIGAREA ACESTORA

2.1. Selectarea materialelor și a instalațiilor utilizate pentru realizarea procesului de sintetizare prin scânteii electrice a acoperirilor

2.1.1. Materiale utilizate în calitate de catod (suport)

În calitate de catod au fost selectate materiale din clasa oțelurilor de construcție: oțelul C45 (0,45% C) (SR EN 10083-2:1995), oțelul inoxidabil X10CrNiTi18-10 (STAS), oțelul aliat 40Cr13 (STAS) și aliajele de titan BT6, BT14, OT4 (GOST 19807(1991) (tabelul 2.1). Probele pentru catod, realizate din oțeluri și aliaje de titan, au avut dimensiunile: 10x10mm, 15x15 mm, 20x20 mm și au fost confecționate cu ajutorul mașinilor-unelte specializate.

În afară de aceasta, în calitate de probe martor au fost selectate metalele de puritate tehnică: Fe-Armco (fier pur) și titanul BT1-0 cu cantități minime de impurități, pentru a exclude influența acestora asupra rezultatelor obținute. Selectarea acestor materiale este motivată de utilizarea lor pe scară largă în economia națională.

Tabelul 2.1. Caracteristica materialelor

Denumirea	Compoziția
Otel C45	97%Fe; 0,42÷0,5%C; 0,25 %Ni; 0,04 %S; 0,035 %P
X10CrNiTi18-10	0,12%C; 17÷18%Cr; 9÷11%Ni; 0,8%Ti
40Cr13	4%C; 12÷14%Cr
BT1-0	(99,24÷99,7)%Ti; 0,25%Fe; 0,07%C; ≤0,1%Si; 0,04%N; 0,2%O; 0,01%H ₂
BT6	(86,45÷90,9) %Ti; ≤0,6 %Fe; 0,1 C; ≤0,1%Si; (3,5-5,3)%V; 0,05 %N; 5,3-6,8 %Al; ≤ 0,3 %Zr
BT14	3,5÷6,3% Al; 2,5÷3,8% Mo; 0,9÷1,9%V, restul – titan
OT4	3,5÷5,0%Al; 0,3%Zr; 0,8÷2,0%Mn; 0,12%Si; 0,3%Fe

2.1.2. Selectarea materialelor utilizate în calitate de anod (electrozi de prelucrare)

În calitate de elemente de aliere prezente în compoziția chimică a electrozilor compacți sau a pulberilor s-au folosit metalele tranzitorii Ti, Ta, W și grafitul (ca sursă de carbon). Carbonul are o afinitate accentuată în raport cu aceste metale, ceea ce favorizează formarea carburilor stabile de tip „MeC”. Epruvetele (probele metalice suport cu dimensiuni de (40x4x5) mm, sau diametrul de (4,0÷5,0) mm au fost confecționate prin tăiere prin electroeroziune pe mașini-unelte specializate.

Cu scopul eficientizării procesului de formare (sintetizare) a acoperirilor, pulberile metalice Ti, Ta, W și pulberea de grafit au fost selectate pentru o granulație între $(50\div 200)$ μm , fiind achiziționate din import.

2.1.3. Instalații tehnologice de realizare a procesului ASE

Studiul procesului de sintetizare a carburilor metalice la prelucrarea succesivă cu electrozi din titan, tantal, wolfram și grafit s-a efectuat utilizând o serie de instalații manuale, industriale, experimentale și mecanizate (figura 2.1), care au asigurat prelucrarea la valori ale energiei descărcării în impuls de $(0,1\div 6,0)$ J.



Fig. 2.1. Instalații tehnologice de aliere prin scânteii electrice:
a), b), c), e) – instalații manuale industriale; d), f) – instalații manuale experimentale; g), h) – instalații experimentale cu comandă numerică

Toate aceste instalații tehnologice asigură realizarea procesului alierii prin scânteii electrice în limita valorilor energiei descărcării electrice în impuls (0,1÷6,0) J și posibilitatea schimbării formei mișcării electrodului de prelucrare (vibrații, rotații și mișcare complexă: vibrații + rotații + oscilații).

2.2. Metode de investigare microstructurală a suprafețelor acoperite prin ASE

2.2.1. Determinări structurale și compoziționale prin difracție cu raze X (XRD)

Analiza structurală cu raze X s-a efectuat cu ajutorul difractometrului DRON-3.0, utilizând radiația liniei $K\alpha$ de la tubul de cupru cu anticatod, filtrate la lungimea de undă $\lambda = 1,541 \text{ \AA}$. Distanța interplanară a zonelor cristalografice s-a determinat conform formulei lui Wulff-Bragg.

$$2d \sin \Theta = n\lambda, \quad (2.1)$$

unde:

d – distanța interplanară, μm ;

Θ – unghiul de împrăștiere Bragg;

λ – lungimea de undă, μm .

Lungimea medie a cristalitelor L s-a calculat după formula lui Scherrer:

$$L = \frac{\lambda}{\Delta} \cos Q, \quad (2.2)$$

în care:

Δ – jumătate din lățimea maximului de difracție;

Θ – unghiul a maximului, de difracție.

Pentru un studiu mai detaliat a modificării structurale, s-a cercetat caracterul funcțiilor de corelare $W(r)$, legate de distribuția radială a densității atomice $4\pi r^2 \rho(r)$ – condiție ce rezultă din formula Zernike-Prince [85]:

$$W(r) = 4\pi r^2 \rho(r) - 4\pi r^2 \rho_{av} = 8\pi r \int \frac{I_o(S) - S f_k^2(S)}{\sum_k f_k^2(S)} S \sin(2\pi r S) dS, \quad (2.3)$$

unde:

r – modulul vectorului interatomic (raza sferei de coordonare);

ρ_{av} – densitatea atomica medie;

$\rho(r)$ – densitatea electronică pe sfera de rază (r);

$I_o(S)$ – intensitatea normalizată a radiației cu raze X împrăștiate;

S – vectorul spațiului reciproc;

f_k^2 – factorul structural k al atomului.

Pe roengenograme s-au determinat: poziția unghiulară 2Θ a fiecărui reflex, intensitatea reflexului (I), raportul (I_m/I), în care: I_m – reflexul maximal pe roengenogramă.

2.2.2. Investigații prin microscopie electronică

Studierea morfologiei suprafeței durificate a probelor s-a efectuat utilizând microscopul electronic MIRA-3 TESCAN. Acesta este un microscop electronic de scanare de generația a patra (SEM), cu un catod Schottky care oferă imagini SEM și analiză elementară în timp real într-o singură fereastră a software-ului TESCAN Essence TM, care simplifică foarte mult achiziția de date asupra morfologiei suprafeței eșantionului.

Coloana actualizată a microscopului electronic MIRA-3 TESCAN este controlată de o electronică avansată, care asigură o tranziție instantanee de la modul imagistică de mărimi considerate puternice la modul de studiere a compoziției elementare a probelor, fără schimbarea mecanică a diaframelor, sau alinierea mecanică a oricăror elemente din interiorul coloanei. Analiza structurii probelor cu acoperiri s-a efectuat cu rezoluții de până la 3000 ori.

2.2.3. Investigații privind microscopia optică

Analiza microstructurii metalelor și a aliajelor este o componentă importantă a expertizei metalurgice. Ea permite detectarea și explicarea prezenței defectelor interioare în metale, precum și caracterizarea straturilor superficiale depuse.

O metodă mai răspândită și accesibilă de studiere a microstructurii este microscopia optică, ce permite utilizarea rezoluției de până la 1000 ori. Această metodă de investigare cere o pregătire specială a probei prelucrate – confecționarea microșlifului care constă în obținerea suprafeței oglină și identificarea microstructurii prin atac cu reactiv chimic sau printr-o metodă electrochimică (vezi 2.2.4). În prezenta teză, pentru studiul microstructurii probelor cu acoperiri complexe depuse în procesul alierii prin scânteii electrice, s-a utilizat microscopul metalografic NEOFOT-30.

Toate microfotografiile obținute la rezoluții de x250 și x500 ne-au permis să identificăm structura probelor cu acoperiri și să măsurăm microduritatea pe toată suprafața acestora.

2.2.4. Confecționarea șlifurilor

Pentru confecționarea șlifurilor, mai întâi se pregătesc dispozitive speciale – mandrină cu cleme, între care probele în formă de plăcuțe dreptunghiulare se dispun în pachet fixate cu șuruburi. Probele cu formă cilindrică se fixează într-o mandrină mecanică, inele de formă circulară

sau eliptică, în care se înglobează într-o masă plastică, bachelită, rășini etc. (figura 2.2). Pregătirea suprafeței are loc prin șlefuire și lustruire, care se efectuează cu ajutorul materialelor abrazive. Materialele abrazive sunt reprezentate prin roci măcinate, pulberi de diamant, corund, granit, cuarț, dioxid de aluminiu, oxid de fier și altele [84].

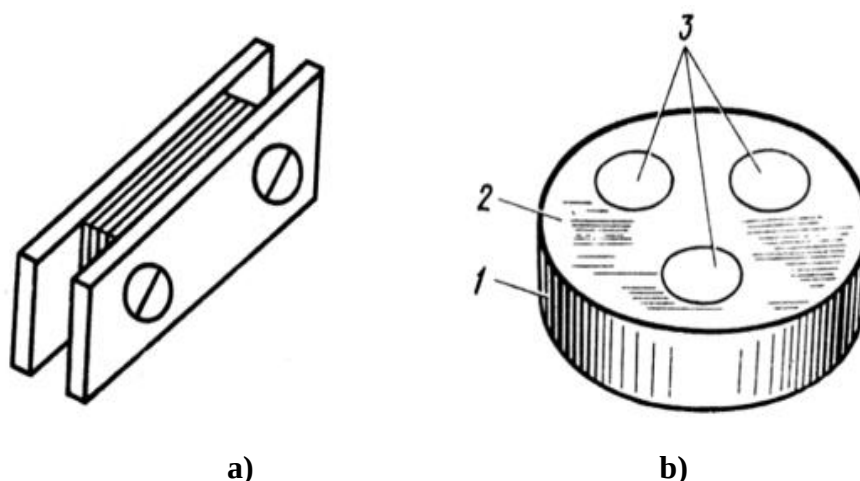


Fig.2.2. Mandrină cu cleme pentru șlifuri (a), mandrina circulară cu probe înglobate (b) (1) suport inelar, 2) bachelită, 3) probe pentru analize) [84]

Șlefuirea începe pe hârtie abrazivă cu granulație mare, după care treptat se trece la granulații fine. Șlefuirea se poate realiza manual pe hârtie abrazivă, care se așază pe sticlă sau se fixează pe platanele mașinii de șlefuit.

La șlefuirea manuală, proba se apasă cu mâna pe hârtia abrazivă și se orientează în direcția perpendiculară la rizurile formate la prelucrarea anterioară. Se șlefuește până la dispariția rizurilor, după care suprafața se șterge cu vată și se spală. Dispozitivul cu probe se întoarce la 90° și se șlefuește pe hârtie cu granulație fină. Se șlefuește până la dispariția definitivă a rizurilor. Șlefuirea se poate face și cu paste speciale aplicate pe hârtie densă curată.

Pentru a obține o calitate bună a suprafeței, este necesar să se efectueze operațiile de șlefuire corect și cu mare acuratețe. Nu se poate trece de la o hârtie abrazivă cu o granulație mare la una fină; în acest caz, rizurile mari nu se elimină definitiv; acestea se umplu cu bavuri, pulberi abrazive și suprafața se pare că e pregătită bine; în această situație, nu se ajunge la rezultatul scontat și se reiau etapele șlefuirii.

După finisarea șlefuirii pe hârtie abrazivă cu cea mai fină granulație, prin lustruire îndepărtăm rizurile fine și suprafața prelucrată a probei devine strălucitoare. Lustruirea se poate efectua prin metode mecanice sau electrochimice. Lustruirea mecanică se face cu dispozitive speciale cu discuri din oțel, pe care se îmbracă o stofă sau fetru. Frecvența rotațiilor constituie (700÷800) rot./min. Stofa se umezește cu un lichid de lustruire. Proba cu partea șlefuită se apasă

pe suprafața discului cu stofă și în procesul lustruirii periodic se rotește într-o parte sau în alta. Se lustruiește până la dispariția definitivă a rizurilor. Această procedură durează (5÷10) minute. Pentru a obține un rezultat bun al lustruirii, proba nu trebuie apăsată tare pe stofă, pentru că asta duce la deformarea structurii. La lustruire se folosesc suspensii pe bază de pulberi de oxid de aluminiu, oxid de crom, oxid de fier și oxid de magneziu [84, 85].

Lichidul pentru lustruire se formează în următoarea proporție: la 1 litri de apă (10÷15) g de oxid de crom și 5 g de oxid de aluminiu. După lustruire proba se spală cu apă, lichidul se îndepărtează de pe suprafața ei cu un tampon uscat de vată. Probele se păstrează în exicator. Pentru identificarea structurii suprafeței lustruite aceasta este supusă atacului chimic cu soluții de acizi, baze, săruri. În timpul atacului chimic sectoarele neomogene ale metalului sau al aliajului devin vizibile sub microscop.

Esența procesului de investigare a structurii metalelor și aliajelor prin atac chimic sau constă în gradul diferit al dizolvării sau a colorării unor componente a structurii – a grăunților cristalini a metalelor, soluțiilor solide, compuşilor chimici.

Atacul chimic se poate efectua prin diferite metode, dar este necesar să se asigure observarea suprafeței supuse analizei. Pot fi indicate mai multe metode de decapare:

1. Reactivul se toarnă într-o ceașcă de porțelan, iar proba se ia cu o pensă nichelată și se imersează în acest reactiv cu partea lustruită în sus.
2. Reactivul se toarnă într-o ceașcă de porțelan, iar proba se ia cu o pensă nichelată și se scufundă cu partea lustruită în jos și permanent după intervale scurte de timp se întoarce cu fața în sus și se urmărește suprafața supusă atacului chimic.
3. Proba se ține în mâna stângă cu suprafața lustruită în sus, cu ajutorul pipetei se toarnă pe suprafața aceasta picături, astfel ca reactivul să se extindă pe toată suprafața lustruită.

Durata atacului chimic depinde de tipul oțelului și a structurii sale, ea fiind de ordinul secundelor. Un indiciu al atacului chimic cu reactiv este reprezentat de culoarea suprafeței. După atac proba se spală cu apă și alcool, după care se usucă cu hârtie de filtru.

Tabelul 2.2. Compoziția reactivilor chimici utilizați pentru evidențierea structurii oțelurilor și aliajelor pe bază de titan

Nr. d/o	Materialul	Compoziția chimică
1.	Oțeluri carbon și oțeluri slab aliate	5 ml HNO ₃ ; (98÷99) ml alcool etilic
2.	Titanul și aliajele pe bază de titan	- 2 ml HNO ₃ ; 2 ml HF; 96 ml H ₂ O - 10 ml HF; 90 ml H ₂ O

Șliful pregătit pentru investigații se studiază la microscopul metalografic optic MIM-7, MIM-8 sau NEOFOT-30. Pentru probele din oțel de construcții C45 s-a utilizat reactivul indicat în tabelul 2.2.

2.3. Analiza matematică a datelor experimentale

Ca rezultat al efectuării experiențelor, s-au obținut dependențe discrete între cantitatea de material (γ) și timpul depunerii lui (t).

Datele experimentale sunt prezentate în formă de tablouri, care constau din perechi de date (γ_i, t_i), în cazul dependențelor de o singură variabilă independentă, sau seturi de date ($\gamma_i, t_i, E_{di}, i...$), în cazul mai multor variabile independente, cum ar fi:

γ_i – cantitatea de material depusă la aliere prin scânteii electrice;

t_i – timpul alierii prin scânteii electrice;

E_{di} – energia descărcării în impuls;

i – numărul măsurărilor.

Problema constă în aproximarea dependențelor discrete (γ_i, t_i) sau ($\gamma_i, t_i, E_{di}, i...$) cu dependențe continue $\gamma(t)$ sau $\gamma(E_d, t)$.

Se deosebesc trei tipuri de aproximări:

1. Interpolarea și extrapolarea (predicția) datelor.
2. Regresia datelor.
3. Filtrarea datelor cu o ulterioară interpolare sau regresie.

La interpolare, funcția $\gamma(t)$ trece prin punctele (γ_i, t_i) și aproximează dependența $\gamma_i(t_i)$ doar în interiorul intervalului ce conține valorile t_i . La extrapolare, se aproximează această dependență în afara acestui interval [86].

La regresie, funcția $\gamma(t)$ nu trece obligatoriu prin punctele (γ_i, t_i). Tehnica de regresie se mai numește netezirea datelor experimentale. La filtrarea datelor, unele din ele (care se consideră greșite sau inutile) fie se exclud din setul inițial, fie se reduce influența lor în corespundere cu un oarecare algoritm de filtrare. Interpolarea datelor se face cu metoda Lagrange sau Newton, în cazul alegerii în calitate de funcție continuă a unui polinom de ordinul N sau cu ajutorul funcțiilor spline, în cazul alegerii polinoamelor de grad mic pentru diferite segmente de variație a variabilei independente. În primul caz, se obține o funcție explicită iar în al doilea caz acest lucru nu este posibil.

Interpolarea se aplică atunci când datele experimentale sunt obținute cu o mare precizie (4÷5 semne după virgulă), iar numărul de măsurări în cadrul unui experiment este

mic. Această restricție este cauzată de gradul înalt al polinomului obținut și de creșterea esențială a erorilor de calcul numeric.

Ideea metodei constă în determinarea coeficienților clasei de funcții alese (de exemplu, pentru un polinom).

$$\gamma(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + \dots + a_m \cdot t^m, \quad (2.4)$$

din condiția coinciderii valorilor funcției $\gamma(t)$ cu valorile γ_i în nodurile t_i de interpolare.

Tehnicile de filtrare se aplică la analiza stratului depus, pentru excluderea efectelor de exfoliere a materialului depus, adică pentru funcții intensive oscilatoare.

În experiențele efectuate, numărul măsurărilor într-un experiment este mare $8 \div 12$, iar evaporarea și exfolierea materialului din zona contactului duce la oscilația cantităților depuse de material.

Astfel, pentru experiențele noastre este preferabilă regresia datelor experimentale [86].

Regresia constă în determinarea unei astfel de funcție $\gamma(t)$, care într-un anumit sens minimizează abaterile $\gamma(t_i) - \gamma_i(t_i)$. Succesul unei astfel de aproximări depinde în mare măsură de alegerea corectă a claselor de funcții cercetate [87].

Cele mai frecvente clase de funcții folosite sunt:

1. Polinomiale – $\gamma(t, A, B, C, \dots) = A + B \cdot t + C \cdot t^2 + \dots$.
2. Exponențiale – $\gamma(t, A, B, C) = A \cdot e^{B \cdot t} + C$.
3. Logistice – $\gamma(t, A, B, C) = \frac{A}{1 + B \cdot e^{-C \cdot t}}$.
4. Sinusoidale – $\gamma(t, A, B, C) = A \cdot \sin(t + B) + C$.
5. Funcții cu puteri – $\gamma(t, A, B, C) = A \cdot t^B + C$.
6. Logaritmice – $\gamma(t, A, B, C) = A \cdot \ln(t + B) + C$.

Analiza datelor experimentale obținute și a literaturii consacrate tehnologiilor de aliere prin scânteii electrice ne arată că dependența cantității de material depusă într-un anumit timp este o funcție monotonă, suficient de netedă, cu valori pozitive. Acest fapt ne permite să presupunem că poate fi aleasă clasa funcțiilor polinomiale, iar gradul polinomului va fi mic (2 sau 3).

Scopul regresiei este calculul parametrilor $A, B, C \dots$ și se determină din condiția că media sumei abaterilor pătrăte să fie minimă. Deci, se minimizează funcția.

Astfel, problema se reduce la determinarea valorii minime a funcției de una sau mai multe variabile.

Forma generală a unui polinom de gradul m este:

$$\gamma(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + \dots + a_m \cdot t^m, \quad (2.5)$$

Problema poate fi soluționată dacă vom cunoaște coeficienții $a_0, a_1, a_2 \dots a_m$. În total avem $m+1$ coeficienți.

În calitate de măsură a abaterilor vom folosi suma pătratelor diferențelor dintre valorile discrete γ_i și valorile funcției continue $\gamma(t_i)$.

$$\theta = [\gamma_1 - \gamma(t_1)]^2 + [\gamma_2 - \gamma(t_2)]^2 + [\gamma_3 - \gamma(t_3)]^2 + \dots + [\gamma_n - \gamma(t_n)]^2 \rightarrow \text{minim}. \quad (2.6)$$

Sau explicit:

$$\begin{aligned} \theta(a_0, a_1, a_2, \dots a_m) = & [\gamma_1 - (a_0 + a_1 \cdot t_1 + a_2 \cdot t_1^2 + \dots + a_m \cdot t_1^m)^2] + \\ & + [\gamma_2 - (a_0 + a_1 \cdot t_2 + a_2 \cdot t_2^2 + \dots + a_m \cdot t_2^m)^2] + \dots + \\ & + [\gamma_n - (a_0 + a_1 \cdot t_n + a_2 \cdot t_n^2 + \dots + a_m \cdot t_n^m)^2] \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\theta(a_0, a_1, a_2, \dots a_m) = \sum_{i=1}^n [\gamma_i - (a_0 + a_1 \cdot t_i + a_2 \cdot t_i^2 + \dots + a_m \cdot t_i^m)^2]. \quad (2.8)$$

Este evident că coeficienții $a_0, a_1, a_2, \dots a_m$ trebuie aleși așa încât această funcție să aibă valoare minimală.

O funcție de mai multe variabile are valoare extremă doar dacă derivatele parțiale în raport cu argumentii $a_0, a_1, a_2, \dots a_m$ să fie zero.

$$\frac{\partial \theta}{\partial a_0} = 0, \frac{\partial \theta}{\partial a_1} = 0, \frac{\partial \theta}{\partial a_2} = 0, \dots \frac{\partial \theta}{\partial a_m} = 0. \quad (2.9)$$

Astfel, obținem un sistem de $m+1$ ecuații în raport cu necunoscutele $a_0, a_1, a_2, \dots a_m$.

Calculăm derivatele parțiale:

$$\frac{\partial \theta}{\partial a_k} = \frac{\partial}{\partial a_k} [\gamma_i - (a_0 + a_1 \cdot t_i + a_2 \cdot t_i^2 + \dots + a_m \cdot t_i^m)^2]. \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial a_k} = 2 \cdot \sum_{i=1}^n [(-\gamma_i + a_0 + a_1 \cdot t_i + a_2 \cdot t_i^2 + \dots + a_m \cdot t_i^m) \cdot t_i^k], k=0,1,2,\dots m. \quad (2.11)$$

Dacă egalăm cu zero, obținem:

$$a_0 \cdot \sum_{i=1}^n t_i^k + a_1 \cdot \sum_{i=1}^n (t_i \cdot t_i^k) + a_2 \cdot \sum_{i=1}^n (t_i^2 \cdot t_i^k) + \dots + a_m \cdot \sum_{i=1}^n (t_i^m \cdot t_i^k) = \sum_{i=1}^n (\gamma_i \cdot t_i^k). \quad (2.12)$$

Sau

$$a_0 \cdot \sum_{i=1}^n t_i^k + a_1 \cdot \sum_{i=1}^n t_i^{k+1} + a_2 \cdot \sum_{i=1}^n t_i^{k+2} + \dots + a_m \cdot \sum_{i=1}^n t_i^{k+m} = \sum_{i=1}^n (\gamma_i \cdot t_i^k). \quad (2.13)$$

Dacă notăm:

$$C_{k,j} = \sum_{i=1}^n t_i^{k+j}, D_k = \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot t_i^k. \quad (2.14)$$

Sistemul de ecuații va avea forma:

$$C_{k,0} \cdot a_0 + C_{k,1} \cdot a_1 + C_{k,2} \cdot a_2 + \dots + C_{k,m} \cdot a_m = D_k. \quad (2.15)$$

$k=0,1,2,\dots m.$

Sistemul de ecuații în raport cu necunoscutele $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ este unul de ecuații algebrice liniare neomogene. Dacă determinantul matricei $C_{k,j}$ nu este egal cu zero, sistemul are o singură soluție.

Algoritmul de calcul al acestui sistem de ecuații este realizat în softuri moderne (MATHCAD, Microsoft office EXCELL 2016, MATLAB ...) [87].

Pentru o funcție parabolică $\gamma(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2$ forma explicită a sistemului de ecuații este:

$$\begin{cases} n \cdot a_0 + \sum_{i=1}^n t_i \cdot a_1 + \sum_{i=1}^n t_i^2 \cdot a_2 = \sum_{i=1}^n (\gamma_i \cdot t_i^0) \\ \sum_{i=1}^n t_i \cdot a_0 + \sum_{i=1}^n t_i^2 \cdot a_1 + \sum_{i=1}^n t_i^3 \cdot a_2 = \sum_{i=1}^n (\gamma_i \cdot t_i) \\ \sum_{i=1}^n t_i^2 \cdot a_0 + \sum_{i=1}^n t_i^3 \cdot a_1 + \sum_{i=1}^n t_i^4 \cdot a_2 = \sum_{i=1}^n (\gamma_i \cdot t_i^2) \end{cases} \quad (2.16)$$

Calculul conform algoritmului ales este realizat în mediul MATHCAD.

Prelucrarea datelor experimentale și analiza rezultatelor alierii prin scânteii electrice cu aplicator vibrator se efectuează cu electrozi compacți din TiC, WC sau TaC pe instalația industrială ЭФН-10М. Se măsoară cantitatea de metal depus pe probă (γ , mg) într-un anumit interval de timp (t, min.).

1. *Introducerea vectorilor datelor experimentale:*

$$T := (0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10 \ 11 \ 12 \ 13)^T$$

$$\Gamma := (0 \ 1.5 \ 3.2 \ 4.5 \ 5.2 \ 6 \ 6.5 \ 7.5 \ 7.2 \ 7 \ 6.9 \ 6.8 \ 6.5 \ 6)^T,$$

unde:

T – vectorul timpului alierii în ordine crescătoare (min.);

Γ - vectorul cantității de material depus, corespunzător vectorului T, (mg).

2. *Se alege gradul polinomului:*

Aproximăm dependența depunerii în timp cu polinoame de gradul 2 ($a \cdot x^2 + b \cdot x + c$).

K := 2.

3. *Utilizarea funcției REGRESS:*

Funcția REGRESS are trei parametri: 1) vectorul timpului, T; 2) vectorul cantității depuse, Γ ; 3) gradul polinomului ales, k.

$$r := \text{regress}(T, \Gamma, k)$$

Unde:

r – vectorul datelor de ieșire,

$$r^T = (3 \ 3 \ 2 \ 0.149 \ 1.629 \ -0.092)$$

În formula 2.16 ultimele trei valori reprezintă coeficienții polinomului de gradul 2, începând cu termenul liber.

4. Afișarea funcției obținute:

$$\gamma(\tau) := 0.149 + 1.629 \cdot \tau - 0.092 \cdot \tau^2.$$

5. Determinăm viteza procesului de depunere prin derivarea funcției $\gamma(\tau)$:

$$V_\gamma(\tau) := 1.629 - 0.184 \cdot \tau.$$

6. Calculăm timpul depunerii maxime, $T_{\max}$, min.:

$$T_{\max} := \frac{1.629}{0.184} = 8.853 \text{ min.}$$

Rezultatele obținute sunt reprezentate grafic (figura 2.3):

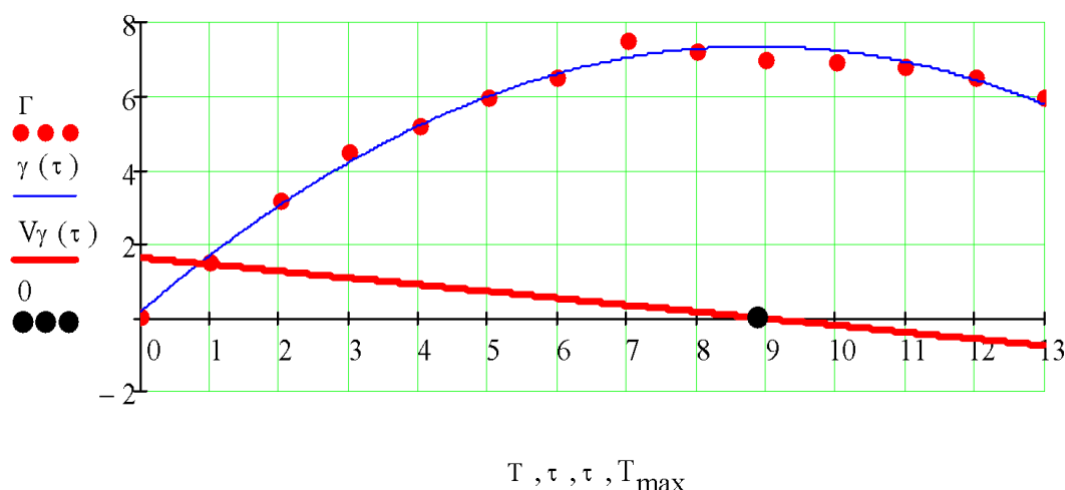


Fig. 2.3. Graficul aproximării dependenței discrete cu polinom de gradul 2

Utilizarea acestui algoritm de calcul ne va permite să determinăm timpul necesar pentru a depune o anumită cantitate de material la alierea prin scânteii electrice.

2.4. Metode și tehnici de investigare a proprietăților fizico-mecanice

2.4.1. Determinarea durității acoperirilor straturilor depuse

Microduritatea acoperirilor obținute s-a efectuat pe șlifurile transversale ale probelor prelucrate, folosind microdurimetrele PMT-3 și HWMMT-X7 (Elveția) la sarcini de 50 și 100g.

Principiul de lucru al aparatului se bazează pe măsurarea valorii liniare a diagonalei amprente, obținută la indentarea piramidei de diamant în materialul de investigare cu o forță impusă.

Se știe [3] că acoperirile obținute prin depunere cu scânteii electrice au o structură eterogenă. În legătură cu aceasta, măsurarea durității va indica o valoare medie a acesteia. Pentru a măsura duritatea unei faze structurale aparte, este nevoie de a localiza strict indentorul microdurimetrului pe zona aleasă. Pentru aceasta există aparate speciale (microdurimetre).

În cazul nostru concret a apărut necesitatea măsurării durității acoperirilor subțiri de circa $(0,05 \div 1,0)$ mm. Pentru măsurarea durității acoperirilor subțiri, proba acoperită se taie transversal, după care pe baza ei se confecționează șliful. Ulterior, aceasta se șlefuieste și se lustruiește până se obține o suprafață de înaltă calitate.

Pe suprafața lustruită și atacată cu reactiv chimic pe bază de acizi, săruri sau baze, este evidențiată microstructura specifică. Măsurările durității s-au efectuat cu ajutorul durimetrului standardizat PMT-3.

Încercările privind valorile durității acoperirilor constă în imprimarea piramidei tetraedrice diamantate cu unghiul la vârf de 136° în materialul ce este supus încercărilor. Duritatea Vickers simbolizează HV se determină cu relația (2.17):

$$HV = \frac{F}{A} = 1854 \frac{F}{d^2}, \quad (2.17)$$

Unde: F – este sarcina normală aplicată vârfului de diamant;

A – aria suprafeței amprenteii indentorului;

d – media aritmetică a lungimii diagonalelor amprenteii după scoaterea sarcinii.

Încercările pot fi efectuate la sarcinile de 50; 100; 200; 300; 500; 1000 N. Utilizarea sarcinilor mici este recomandată pentru determinarea durității pieselor de grosimi mici și a straturilor superficiale subțiri.

2.4.2. Analiza morfologică și structurală a suprafețelor durificate

Morfologia acoperirilor a fost studiată cu ajutorul microscopului cu scanare electronică MIRA-3 TESCAN cu rezoluții de până la 3000 de ori. Imediat după depunerea acoperirilor și după încercările la uzură și coroziune, analiza structurală a constituției fazice a fost efectuată prin difracție de raze X. Spectrele de difracție a suprafeței probelor din inox după ASE au fost obținute cu difractometrul DPOH – YM1 cu radiație Fek_α , filtru Mn, metoda $\theta/2$. La analiza cu raze X s-a folosit cartoteca ASTM.

2.4.3. Rezistența la uzură

Pentru determinarea rezistenței la uzură a acoperirilor obținute pe oțelurile C45, X18H10T, 40X13, aliajele de titan BT6 și BT14, s-au efectuat încercări cu două tipuri de echipamente

specializate care asigură o mișcare: 1) rectilinie alternativă cu viteză medie de alunecare de 0,0675 m/s și 2) o mișcare de rotație.

La mașina cu mișcare rectilinie alternativă, în calitate de lubrifiant s-a folosit uleiul de vaselină, iar în calitate de contrapiesă s-au folosit probe dreptunghiulare din oțel călit C45 (HRC58). Contactul între contrapiesă și suprafața de frecare s-a efectuat pe o suprafață de 9 mm², asigurând permanent o poziție perpendiculară a contracorpului în raport cu această suprafață. Testarea s-a efectuat în două etape. În prima etapă s-a efectuat rodajul între suprafața contra piesei cu suprafața probei acoperite timp de 10 ore la sarcini de la 2 până la 9 kg. În etapa a doua s-au efectuat testări la sarcini de 9 kg timp de 20 de ore. Uzura se măsoară prin cântărire la balanță analitică cu precizia de 0,1 mg.

Așadar, încercările la mașina de frecare cu mișcare rectilinie alternativă s-au efectuat pentru 5 tipuri de cuple de fricțiune: C45 / X18H10T-X18H10T, C45 / X18H10T+Mo+grafit, C45 / X18H10T+W+grafit, 45 / X18H10T + Ti + Al + grafit.

Încercări tribologice pe uscat la mașina cu rotații de tip FT-2 s-au efectuat după schema „bolț-disc”. Pentru testare s-au folosit probe cu suprafață sferică cu diametrul de 1,5 din titan tehnic BT1 și inox 40X13, pe care s-au aplicat 5 tipuri de acoperiri: TiC, WC, precum și compozițiile TiAlC, TiSiC, TiAlN și grafitul. Probele acoperite alunecau pe o suprafață plată a contracorpului din oțel C45 cu diametrul de 40 mm și grosimea de 2,0 mm, călit și rectificat până la $R_a=(0,1\div0,3) \mu$. Încercările s-au efectuat la sarcini normale de la 50 N și viteza de alunecare 0,06 m/s.

Testările tribologice ale acoperirilor obținute la alierea succesivă prin electroeroziune s-au efectuat la o sarcină specifică de 2 MPa în condiții de frecare fără ungere. Testările s-au efectuat în patru perioade: primele 30 de minute (2250 de cicluri - distanța de alunecare 135 m); a doua perioadă – 45 minute (3375 cicluri – distanță de alunecare 202,5 m); a treia perioadă – 75 minute (5625 cicluri – distanță de alunecare 337,5 m) a patra perioadă – 75 minute, contracorpul a efectuat o mișcare alternativă cu amplitudinea de 30 mm viteză medie a mișcării contracorpului, în timpul testărilor a constituit 0,075 m/s sau 75 de cicluri pe minut.

Determinarea uzurii probelor prismatice s-au efectuat prin metoda gravimetrică, utilizând balanța analitică ADV-200M. Eroarea de cântărire a fost de 0,05 mg. Înainte de cântărire, produsele uzurii se înlăturau de pe suprafața probelor, după care probele se spălau, se ștergeau cu spirt și se uscau în dulapul de uscare la o temperatură de 100°C. După uscare, probele se cântăreau cu balanța analitică. Fiecare probă se cântărea de două-trei ori.

Forța de frecare F ce apărea în timpul deplasării reciproce a suprafețelor de contact se înregistra cu ajutorul dinamometrului – senzor de presiune. Deformarea elastică a elementului dinamometrului cu senzori de presiune era transformată în semnal electric, care era introdus în

computer printr-un bloc special. După fiecare minut de încercări, forța de frecare se înregistrează de 3000 de ori în cursul a 3 secunde. Cu ajutorul unei plăci de achiziție speciale, valoarea forței de frecare era transformată în coeficient de frecare. Valorile coeficientului de frecare erau supuse prelucrării statice și valoarea medie a forței (**F**) era determinată după fiecare minut de testare.

Calitatea de suprafață a suprafețelor probelor investigate a fost apreciată ca urmare a măsurării rugozității. Rugozitatea probelor înainte și după testare s-a măsurat cu ajutorul profilometrului SURTRONIC 25, utilizând un palpator cu raza la vârf de 2 μm .

2.4.4. Rezistența la coroziune

Investigarea procesului coroziunii acoperirilor obținute la alierea prin electroziune s-a efectuat folosind potențiostatul-galvanostatul Multi Autolab M204 (Metrohm AG (Elveția)). În calitate de mediu coroziv s-a folosit soluția de 3% de NaCl în apă distilată. Studiul rezistenței la coroziune s-a efectuat pe probe din oțel inoxidabil 40X13, aliaj și aliaj pe bază de titan BT6 cu acoperiri obținute la ASE succesivă cu Ti+grafit, W+grafit, Ti+Al+grafit, Ti+AlN, Ti+SiC.

Multi Autolab M204 este un potențiostat-galvanostat multicanal bazat pe Autolab PGSTAT204 compact. Acesta constă dintr-un dulap Multi Autolab care poate fi echipat cu până la 12 module M204. Fiecare modul M204 este un potențiostat - galvanostat complet independent, care permite efectuarea măsurărilor separate pe fiecare canal în același timp. MultiAutolab poate fi controlat simultan de la unu până la trei calculatoare diferite, permițând partajarea canalelor disponibile între diferiți utilizatori. Instrumentele Multi Autolab pot fi completate de o selecție de module opționale. Fiecare modul M204 poate fi cuplat la un modul opțional din instrument. Numărul maxim de module opționale este de 6. În orice moment pot fi instalate module opționale sau module M204 suplimentare.

2.5. Concluzii la capitolul 2

În urma selectării și aplicării a diverse metode și metodologii de cercetare putem concluda ca:

- aplicarea în cercetare tehnologică a echipamentelor industriale, apropiere și mai mult rezultatele obținute de utilizatorii lor;
- metodele de evidențiere a structurii, compoziției chimice și celei de fază permit argumentarea rezultatelor obținute;
- exactitatea și veridicitatea rezultatelor obținute este asigurată de precizia echipamentelor aplicate în cercetare.

3. LEGITĂȚILE DE BAZĂ ALE PROCESULUI SINTETIZĂRII CARBURILOR ȘI FAZELOR NANOSTRUCTURATE PE SUPRAFETELE METALICE LA ALIEREA PRIN SCÂNTEI ELECTRICE

3.1. Parametrii de bază ai procesului de aliere prin scântei electrice

Procesul alierii prin scântei electrice decurge în câteva stadii: în prima fază are loc străpungerea interstițiului, după care urmează eroziunea electrozilor și depunerea materialului îndepărtat pe suprafața catodului, adică transferul materialului anodului. Procesul transferului de material este însoțit de o serie de efecte. Conform rezultatelor obținute de L. Palatnik [41], pentru un număr mare de metale au fost stabilite următoarele forme de transfer și interacțiune a materialelor electrozilor:

1. Formarea depunerilor (straturilor) pe suprafața catodului din materialul anodului.
2. Formarea aliajelor (amestecului mecanic, soluțiilor solide sau a compuşilor intermetalici) în straturile superficiale ale catodului în urma amestecului convectiv și difuziei reciproce a elementelor provenite din materialul anodului și catodului în baia comună pe suprafața prelucrată.

3. Lipsa transferului pe suprafața catodului [41] a determinat valoarea timpului încălzirii locale a electrozilor: $\tau > 10^{-2} \text{s} > \tau_0$, unde $\tau_0 = 10^{-4} \text{s}$ – timpul descărcării prin scântei. A fost stabilit că τ depinde de constantele fizice ale materialului electrozilor și pe baza aceasta pentru criteriul a trei forme de interacțiune între anumite două forme ale electrozilor (1.5):

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{c_1 \cdot \rho_1 \cdot \alpha_1 \cdot (T_1 - T_0)^2}{c_2 \cdot \rho_2 \cdot \alpha_2 \cdot (T_1 - T_0)^2}, \quad (1.5)$$

unde: τ_1 și τ_2 – perioade ce corespund stadiilor inițiale de apariție a focarelor de topire și evaporare în „interstițiul electrozilor” 2 și 1;

c – capacitatea termică a mater materialului electrozilor;

ρ – densitatea specifică a materialului electrozilor;

α – coeficientul de transmitere a căldurii;

T – câmpul termic;

T_0 – temperatura inițială a electrozilor.

O astfel de interacțiune are loc când $\tau_1 < \tau_2$, vaporii primului electrod se condensează, formând acoperirea pe suprafața solidă a electrozilor al doilea, deoarece evaporarea intensă a primului electrod începe cu mult mai înainte decât topirea electrozilor al doilea.

Formarea aliajelor are loc când $\tau_1 \approx \tau_2$, deoarece procesele de evaporare intensă a electrozilor au loc simultan.

Lipsa transferului de material pe suprafața catodului sau transferul materialului pe anod are loc în cazul când $\tau_1 \gg \tau_2$. Probabilitatea formării aliajelor în depunere crește în cazul diminuării inegalității $\tau_1 \ll \tau_2$, $\tau_1 \gg \tau_2$. Componenta stratului superficial pe electrodul 2 va fi aproape de componenta stratului pe electrodul 1 când $\tau_1/\tau_2 > 1$ și la componenta materialului electrodului 2 pentru coraportul $1 > \tau_1/\tau_2 > 1$. De menționat că criteriul Palatnik nu s-a confirmat experimental în totalitate.

În lucrarea [42] s-a stabilit că asupra efectului de prelevare și transfer al materialului influențează substanțele chimice care determină gradul de oxidare a suprafeței, umectarea ei cu metal topit, formarea legăturilor stabile cu acesta, posibilitatea formării pernei de vapori pe suprafață, ceea ce împiedică transferul și mărește capacitatea de reflectare.

3.2. Sintetizarea carburilor la alierea succesivă prin scânteii electrice cu electrozi din titan, tantal, wolfram și grafit

În arsenalul tehnologiilor neconvenționale de durificare a suprafețelor lucrătoare ale organelor de mașini și ale sculelor, alierea prin scânteii electrice (ASE) ocupă un loc deosebit datorită simplității utilajului și a procesului de realizare, consumului mic de energie și materiale. Pentru durificarea suprafețelor prin metoda ASE se folosesc preponderent electrozi standardizați pe bază de carburi metalice, în special carbura de titan (TiC) și carbura de wolfram (WC). Cele mai răspândite și mai frecvent folosite sunt aliajele T15K6 (79%WC+15%TiC+6%Co), BK6 (94%WC+6%Co), TT7K12 (81%WC+4%TiC+ +3%TaC+12%Co) și BK8 (92%WC+8%Co) [73, 90, 91, 92, 93]. Producătorii de electrozi sunt țările mari ce dețin resurse de metale și industrii specializate (metalurgii ale pulberilor).

În Republica Moldova, electrozii standardizați se importă din Ucraina și Rusia, însă în ultimii ani acești electrozi practic nu mai pot fi procurați, dată fiind suspendarea activității fabricilor respective din aceste țări ca urmare a crizei economice. Ceea ce a afectat mult utilizatorii tehnologiei de durificare a suprafețelor metalice prin scânteii electrice ne-a demonstrat că nu există cercetări dedicate înlocuirii electrozilor pe bază de carburi cu alte materiale în scopul durificării suprafețelor metalice prin scânteii electrice [88]. Pornind de la faptul că elementul de bază al carburilor metalice este carbonul, iar al doilea element este unul din metalele tranzitorii – Ti, Ta sau W, ne-am propus să studiem legăturile procesului ASE, folosind aceste metale și grafitul (conține peste 98% de carbon) în calitate de electrozi – prelucrare într-o anumită succesiune.

Ținând cont de faptul că interacțiunea materialelor electrozilor în procesul ASE se identifică cu un proces micrometalurgic cu formarea diferitor compuși conform diagramei de echilibru, ne putem aștepta la același rezultat, dacă în calitate de anodi vom folosi elementele

(constituenții) electrozilor standardizați, adică titanul, tantalul, wolframul și grafitul. Rezultatele cercetărilor preliminare, inclusiv analiza cu raze X și Raman – spectroscopia straturilor obținute în urma prelucrării succesive cu grafit, Ti, Ta și W ne-au demonstrat formarea preponderent a carburilor de wolfram (WC), tantal (TaC) și titan (TiC). Încercările tribologice prealabil au arătat o rezistență înaltă la uzură. Investigații sistematice în acest sens permit elaborarea unor tehnologii concrete de modificare a structurii suprafețelor metalice la alierea succesivă cu electrozi din Ti, Ta, W și grafit.

Astfel, putem afirma că cercetările noastre privind utilizarea grafitului, titanului, tantalului și wolframului în calitate de electrozi de prelucrare se efectuează în premieră, fapt care denotă caracterul inovativ al lucrării.

Pentru a stabili legăturile procesului de formare a carburilor metalice, folosind elementele electrozilor standardizați, sunt necesare studii intense asupra procesului, stabilirea influenței diferitor factori energetici și tehnologici ai procesului de formare a carburilor, care, în final, ne vor permite să acumulăm cunoștințe noi despre procesele fizice și chimice ce au loc sub influența plamei descărcărilor electrice în impuls. Aceste cunoștințe vor favoriza substanțial elaborarea unor variante ale procesului ASE și, implicit, aplicarea acestuia în practică. Astfel, deficitul de electrozi pentru ASE este unul din motivele de bază ce ne-a inspirat ideea de a efectua investigații complexe privind stabilirea legăturilor formării straturilor cu duritate înaltă, ca alternativă a variantei inițiale de utilizare a electrozilor standardizați.

3.3. Influența valorii energiei descărcării în impuls asupra transferului de masă a anodului și formării acoperirii pe catod

3.3.1. Determinarea timpului specific de prelucrare (min./cm²)

Cinetica transferului de masă al anodului (electrodului de prelucrare) pe suprafața catodului – piesă din C45 s-a stabilit utilizând balanța analitică electronică ESJ-210-4A, determinându-se dependența dintre variația de masă a catodului (γ) în funcție de valoarea energiei și a timpului specific de prelucrare (t_{1sp} și t_{2sp}): $\gamma=f(t)$ (figura 3.1, curba 1, 2) [89, 90]. Pe baza acestei dependențe s-au determinat timpii specifici (min./cm²) pentru fiecare din materialele folosite în calitate de anod.

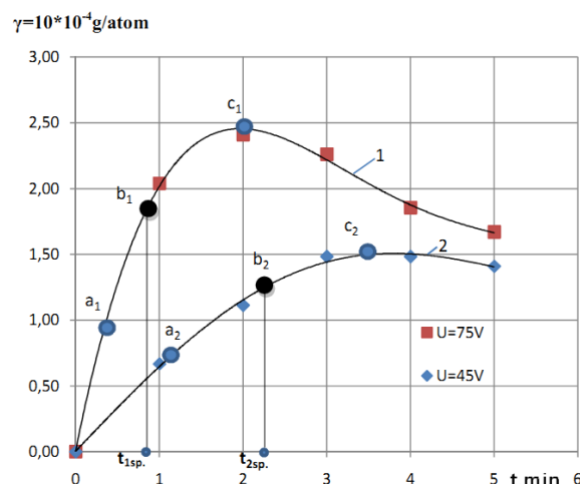


Fig. 3.1. Dinamica creșterii masei catodului în timp la ASE la diferite valori ale energiei descărcării în impuls (1) $W = 0,9 \text{ J}$, $U=75\text{V}$; (2) $W = 0,3 \text{ J}$, $U=45\text{V}$ [90]

Sensul fizic al acestui parametru exprimă timpul care este necesar pentru a forma pe o unitate de suprafață metalică (de exemplu, pe 1 cm^2) o acoperire cu continuitate maximă. Depășirea acestui timp specific duce la apariția unor defecte în formă de arsuri, fisuri, micropori. Pe cale experimentală s-a stabilit că timpul specific poate fi determinat pe baza relației din analiza funcției $\gamma=f(t)$ (figura 3.1).

Astfel, vom împărți segmentul curbei creșterii masei catodului de la 0 până la punctul c_1 (max) în trei părți egale: $0-a_1$; a_1-b_1 și b_1-c_1 ; punctul b_1 se va afla mai jos la o distanță de $1/3$ din lungimea segmentului $0-c_1$. Coborând perpendiculara din punctul b_1 pe axa (t) – punctul de intersecție al acestora va corespunde timpului specific de prelucrare $[\text{min./cm}^2]$. În mod similar se va determina timpul specific de prelucrare (t_{2sp}) și pentru alt regim de lucru (figura 3.1, curba 2).

3.2.2. Cinetica transferului de masă a anodului și formarea straturilor pe suprafața catodului la alierea succesivă cu electrozi compacți

Pentru investigații au fost selectați electrozi din titan, tantal, wolfram și grafit în formă de bare dreptunghiulare cu dimensiuni de $5 \times 5 \times 40 \text{ mm}$, $4 \times 4 \times 40 \text{ mm}$, precum și bare cilindrice cu diametrul de $(4 \div 5) \text{ mm}$ și lungimea $(35 \div 40) \text{ mm}$. Ca electrozi din grafit s-au folosit mărcile MII-6 și ЭГ-2.

Procesul alierii prin scânteii electrice s-a efectuat în mai multe variante (succesiuni), reieșind din numărul de elemente ce se conțin în aliajele standardizate. De exemplu, aliajul electrodului standard T15K6 ($79\% \text{WC} + 15\% \text{TiC} + 6\% \text{Co}$) conține ca elemente chimice: grafit, W, Ti și Co. În acest caz, prelucrarea se va efectua în următoarele succesiuni posibile: Ti+grafit+W, Ti+W+grafit, W+grafit+Ti, grafit+W+Ti, grafit+Ti+W.

Experimentele s-au efectuat la regimuri cu diferite valori ale energiei descărcărilor electrice $E_d = (0,3; 0,9; 3,0)$ J. În figurile 3.2÷3.4 este prezentată cinetica transferului de masă al anodului pe suprafața catodului din oțel carbon C45 în funcție de valoarea energiei descărcării în impuls.

Din figura 3.2 se constată că, odată cu creșterea energiei descărcării, se mărește și cantitatea de material erodat al anodului din titan transferat pe suprafața catodului. Aceasta corespunde cu rezultatele obținute anterior de către autorii metodei alierii prin scânteii electrice: cantitatea de material transferat de la anod pe suprafața catodului ca rezultat al acțiunii descărcării electrice în impuls este direct proporțională cu energia descărcării: $\gamma \sim E_d$ [3].

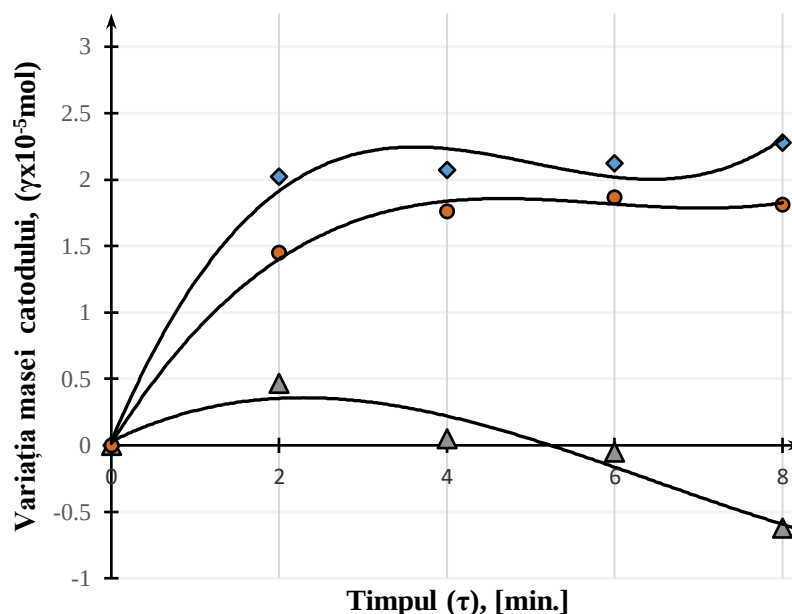


Fig. 3.2. Influența duratei de prelucrare asupra creșterii de masă a catodului pentru diferite valori ale energiei descărcărilor electrice în impuls, cu electrozi din titan și grafit.

Catod: oțel carbon C45

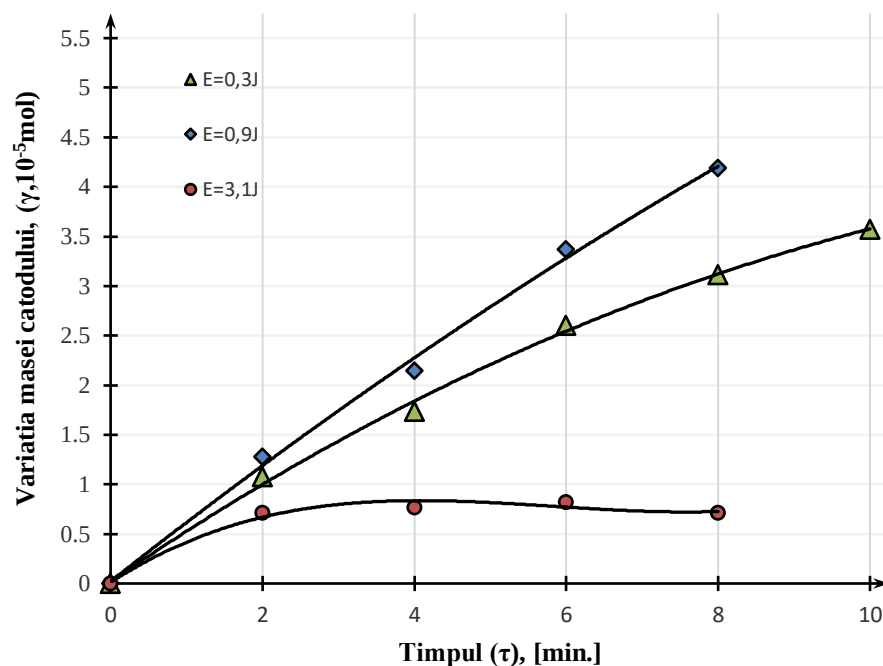


Fig. 3.3. Influența duratei de prelucrarea asupra creșterii de masă a catodului pentru diferite valori ale energiei descărcărilor electrice în impuls, cu electrozi din wolfram și grafit. Catod: oțel carbon C45

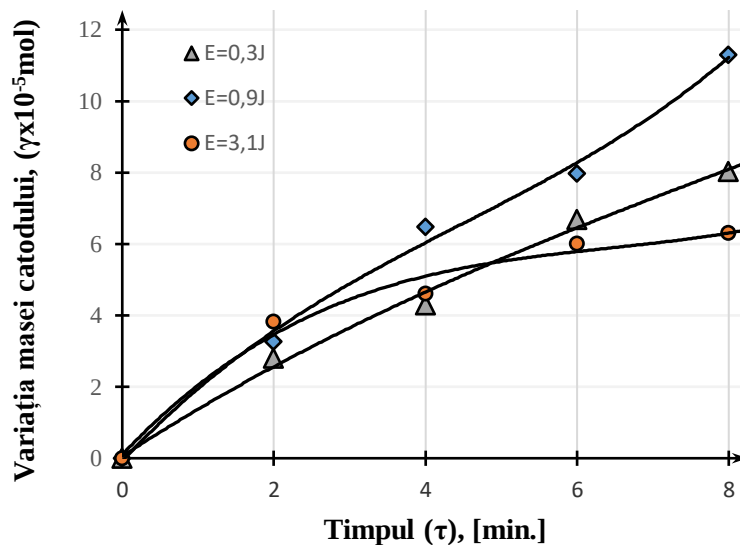


Fig. 3.4. Influența duratei de prelucrarea asupra creșterii de masă a catodului pentru diferite valori ale energiei descărcărilor electrice în impuls, cu electrozi din tantal și grafit. Catod: oțel carbon C45

Tendința creșterii masei catodului este rezultatul acțiunii descărcărilor în impuls și ea se manifestă și pentru perechile de electrozi W+grafit și Ta+grafit (figurile 3.3 și 3.4).

Din figurile 3.2÷3.4 se vede că forma curbelor obținute la aceeași valoare a energiei descărcării în impuls este diferită. Adică, la aceleași condiții de prelucrare, intensitatea transferului de masă al materialului anodului pe catod este diferită. Aceasta se explică prin dependența transferului materialului de masă al anodului de proprietățile fizico-chimice ale acestuia: temperatura de topire, de duritatea și plasticitatea lui [3, 41, 94].

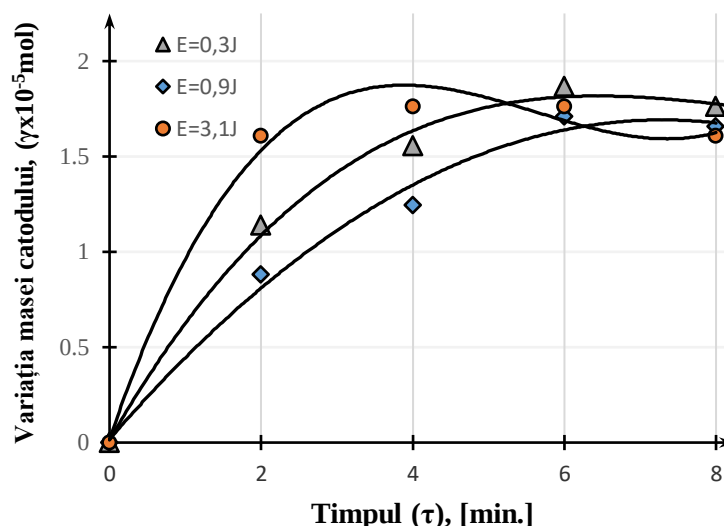


Fig. 3.5. Influența duratei de prelucrare asupra creșterii de masă a catodului pentru diferite valori ale energiei descărcărilor electrice în impuls, cu electrozi din titan și grafit. Catod: titan tehnic BT1

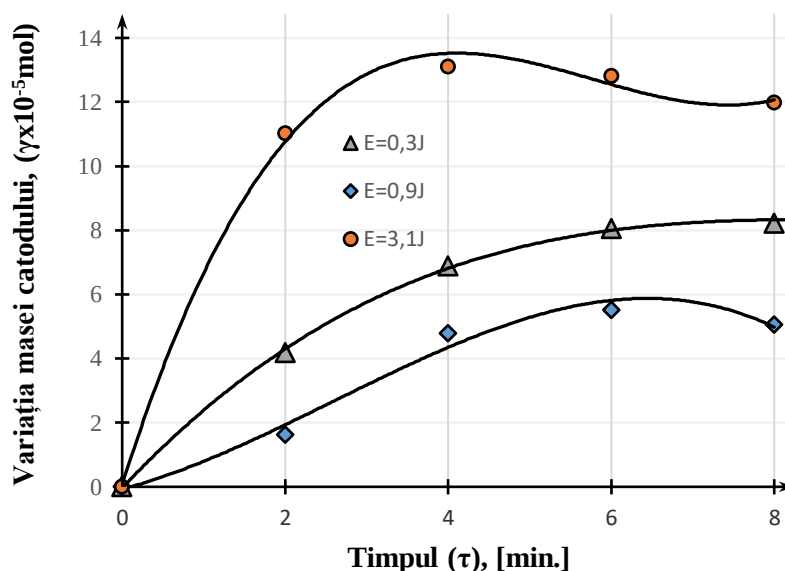


Fig. 3.6. Influența duratei de prelucrare asupra creșterii de masă a catodului pentru diferite valori ale energiei descărcărilor electrice în impuls, cu anod executat din W și grafit. Catod: titan tehnic BT1

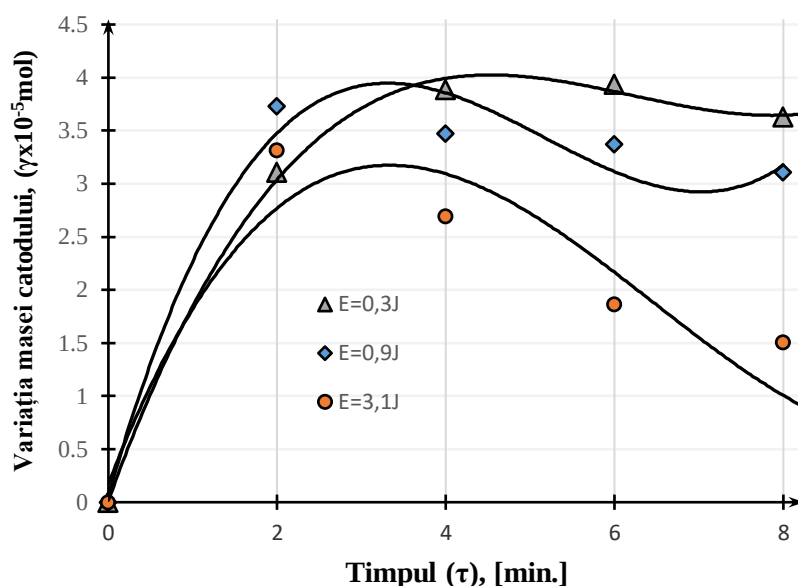


Fig. 3.7 Influența duratei de prelucrarea asupra creșterii de masă a catodului pentru diferite valori ale energiei descărcărilor electrice în impuls, cu catod executat din Ta și grafit. Catod: titan tehnic BT1

În cazul alierii succesive cu electrozi din wolfram și grafit a catodului din oțel carbon C45 (figura 3.3), observăm o situație ieșită din comun. La valori mai mari ale energiei descărcării electrice în impuls, are o intensitate mai mică a creșterii adaosului catodului, însă aceasta e la prima vedere. Dacă revenim la criteriile Zolotîh și Palatnik [18, 41], atunci totul are explicație. Conform criteriilor menționate, dacă temperatura de topire a anodului este mai mare decât temperatura de topire a catodului ($T_a > T_c$), atunci acoperirea nu se formează. Dacă ne referim la anodul de wolfram, a cărui temperatură este de două ori mai mare decât a oțelului carbon; plus la aceasta, dacă vom lua în calcul și faptul că rezistența erozională a wolframului este mult mai mare decât a oțelului carbon, atunci vom observa următorul fenomen. La un act unitar al descărcării de la anod se desprinde o cantitate foarte mică de wolfram. Această cantitate mică de wolfram în stare lichidă și vaporizată având temperaturi mai mari decât a fierului, ajungând pe suprafața catodului de oțel carbon, dispersează parțial straturile subțiri superficiale ale acestuia, fiind aruncate în afara zonei de prelucrare. Astfel, pe suprafața catodului se transferă și se întărește o mică parte de material al anodului. Cu cât mai mare este valoarea energiei descărcării, cu atât mai puternic este efectul dispersării materialului catodului. Ceea ce și se observă pe graficul din figura 3.3.

Iar atunci când în calitate de catod s-a utilizat titanul de puritate tehnică BT1, caracterul curbelor se modifică nesemnificativ (figurile 3.5÷3.7). Se constată că se menține dependența creșterii în timp a masei catodului, proporțional cu valoarea energiei descărcărilor electrice. Însă trebuie menționat faptul că această proporționalitate $\gamma \sim E_d$ se menține până la o anumită durată a

prelucrării, după care ritmul depunerii materialului anodului pe catod începe să descrească. Ca rezultat al acestora apar defecte în formă de arsuri, fisuri, micropori și altele. Pentru a depăși aceste deficiențe de prelucrare, după cum s-a menționat mai sus, la modul practic, pentru fiecare material nou se determină timpul specific de prelucrare, min./cm² (figura 3.1), ceea ce înseamnă timpul de prelucrare a unei unități de suprafață până la obținerea continuității depline a stratului format [95, 96]. Chiar și după optimizarea parametrilor energetici ai procesului ASE (energiei descărcărilor electrice în impuls, curentului mediu) și celor tehnologici (optimizarea timpului specific de prelucrare) în varianta tradițională cu electrod vibrator este imposibil de depus acoperiri mai groase de 0,15 mm. Cu atât mai mult, când apare necesitatea depunerii acoperirilor cu electrozi refractari – efectul eroziunii și al transferului polar este neînsemnat, iar uneori lipsește cu desăvârșire.

3.4. Modernizarea procesului ASE prin introducerea în interstițiu a materialelor pulverulente și utilizarea electrozilor de prelucrare cu mișcare rotativă

Pentru a studia influența procedeele de prelucrare prin scânteii electrice asupra transferului de masă de la anod la catod, au fost luate în considerație următoarele variante tehnologice: alierea succesivă cu electrozi compacți și materiale pulverulente și cinetica formării straturilor de acoperire pe suprafața catodului utilizând tehnica anozilor multipli (rotații în plan perpendicular pe suprafața de lucru).

3.4.1. Procedeele de aliere prin scânteii electrice cu pulberi metalice

Investigațiile prealabile detaliate ne-au permis să stabilim rolul substanțial al formei mișcării anodului (electrodului de prelucrare) și utilizarea elementelor de aliere în formă de pulberi. Dacă în cazul utilizării anodului compact o mare parte a energiei se consumă pentru prelevarea materialului (ruperea lui de la anod), apoi în cazul introducerii în interstițiu a pulberii din același material cum și efectivă a interstițiului rămânând constantă. Drept Drept urmare are loc o redistribuire a energiei descărcării: cea mai mare parte a ei se degajează în interstițiu [97].

Pulberile din interstițiu interacționează cu plasma descărcării în impuls și sub acțiunea forțelor electrice se îndreaptă spre catod, unde are loc interacțiunea și cu materialul catodului. Ca rezultat se formează un strat care după proprietăți se deosebește atât de anod, cât și de catod.

Introducerea pulberii în interstițiu între anod și catod s-a efectuat în două variante (figura 3.8). În prima variantă, pulberi s-au introdus în zona acțiunii plamei descărcării printr-un electrod tubular și ce se instala pe ancora aplicatorului de prelucrare (Figura 3.8, a). Iar în a doua variantă, pulberi se introduceau în zona descărcării dintr-o parte (figura 3.8, b). În urma vibrațiilor ancorei (100 Hz), pulberea, prin electrodul tubular, se transporta în zona descărcărilor în impuls, unde avea

loc interacțiunea cu plasma descărcării și transferul materialului în formă lichidă și vaporizată pe suprafața catodului.

Varianța a doua (figura 3.8, b) s-a dovedit a fi mai eficientă, deoarece permitea reglarea mai fină a cantității de pulberi transportată în zona acțiunii plasmei descărcării cu ajutorul unui jiclor instalat în buncăr.

În scopul determinării regimului optim la care cantitatea maximă de pulbere putea să ajungă în zona acțiunii descărcării, frecvența vibrațiilor electrodului de prelucrare varia lent de la 100 Hz (frecvența standard a vibrațiilor electrodului de prelucrare în instalațiile industriale pentru ASE) până la 30 Hz. În calitate de surse ale descărcărilor în impuls s-au folosit atât instalații industriale, cât și experimentale. Procesul ASE s-a efectuat în limita valorilor energiei descărcării de la 0,3 până la 10,0 J.

În figurile 3.9, 3.10 și 3.11 sunt prezentate rezultatele studiului cineticii transferului de masă și formării straturilor durificate pe catod din oțel carbon de construcție C45 la introducerea în interstițiu a pulberii de Ti, Ta, W și grafit, conform schemei din figura 3.8.

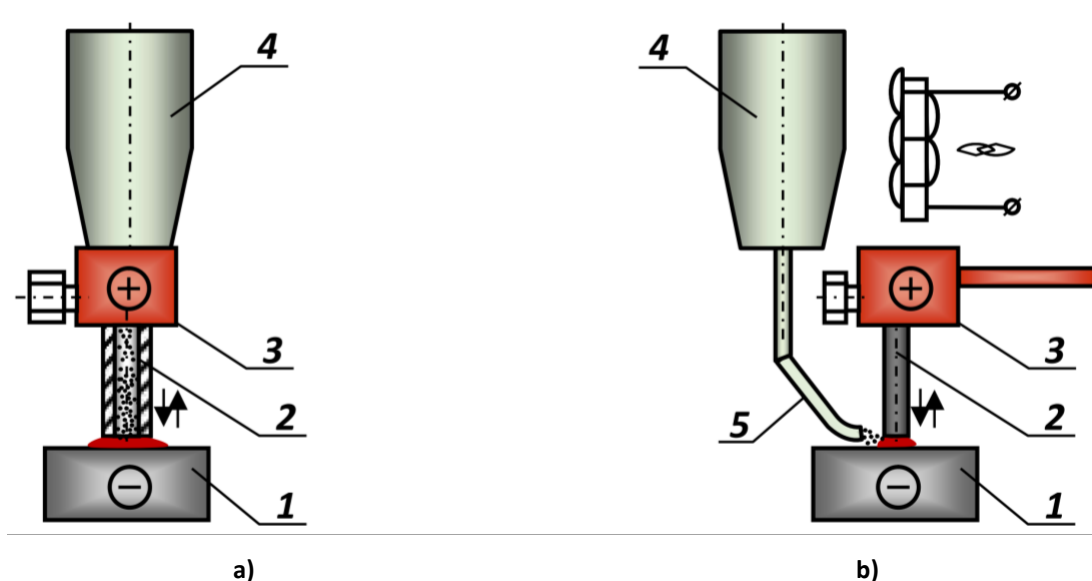


Fig. 2. Procedee de aliere prin utilizarea pulberii

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

După cum se vede din figura 3.9, la toate valorile energiei descărcării pe catod s-au depus practic aceleași cantități de material, ceea ce nu se încadrează în relația cunoscută $\gamma=f(E)$, în care se stabilește că transferul de masă al anodului pe suprafața catodului este direct proporțional cu valoarea energiei descărcării în impuls. În viziunea noastră, acest rezultat poate avea două

explicații. Introducerea în interstițiu a pulberii din carbură de wolfram în timpul realizării procesului modifică semnificativ mecanismul formării stratului durificat pe catod. Anodul nu mai are rolul principal de furnizare a materialului erodat pe suprafața catodului. Acest rol îi aparține preponderent pulberii. Introducerea pulberii din carbură de wolfram în interstițiu determină modificarea substanțială a mecanismului de formare a acoperirii și ne demonstrează criteriile stabilite anterior, care sunt valabile doar pentru cazul anodului compact. Ele nu pot fi aplicate în cazul ASE cu materiale pulverulente introduse în interstițiu. Aceste rezultate ne-au motivat să studiem mai minuțios diferite procedee de prelucrare, inclusiv folosirea numai a pulberii în calitate de elemente de aliere introduse în interstițiu între anod și catod; la amorsarea impulsurilor electrice între electrozi se produce interacțiunea dintre particulele de pulberi și suprafața metalică a probelor, având ca rezultat formarea stratului de acoperire aliat propriu-zis.

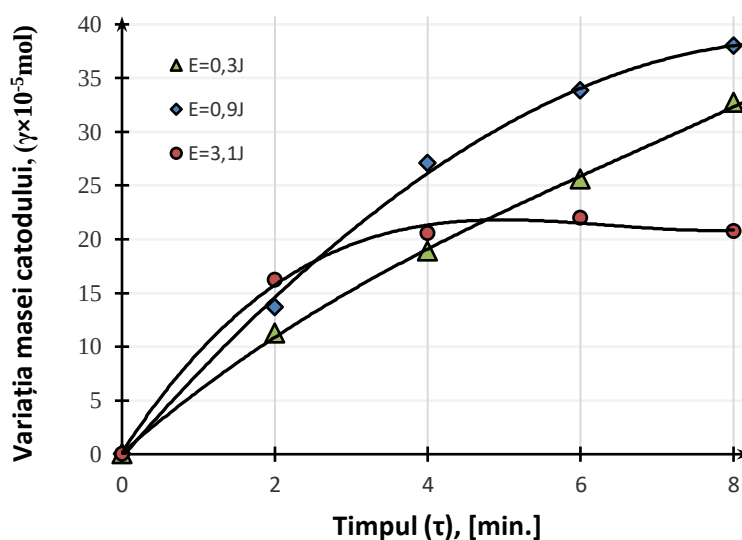


Fig. 3.9. Influența duratei de prelucrare asupra creșterii de masă a catodului pentru diferite valori ale energiei descărcărilor electrice în impuls, pentru catod executat din oțel carbon C45 la ASE cu electrod compact din W și pulbere din WC

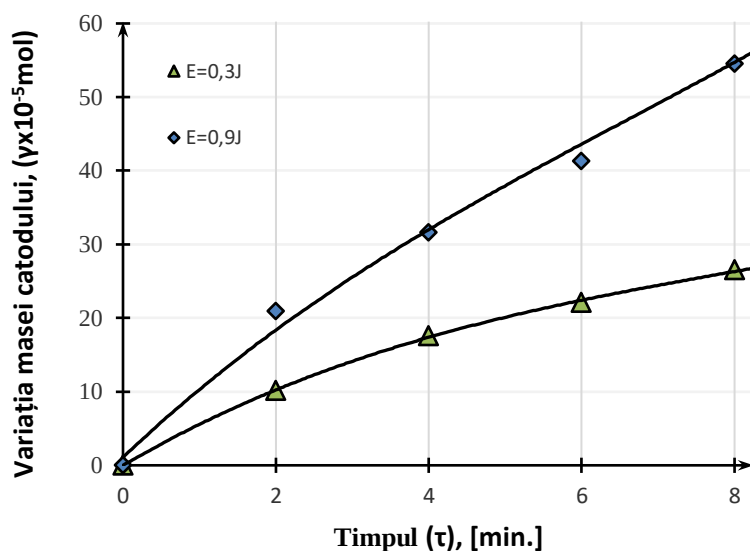


Fig. 3.10. Influența duratei de prelucrarea asupra creșterii de masă a catodului pentru diferite valori ale energiei descărcărilor electrice în impuls, pentru catod executat din oțel carbon C45 la ASE cu electrod compact din Ti și pulbere din TiC

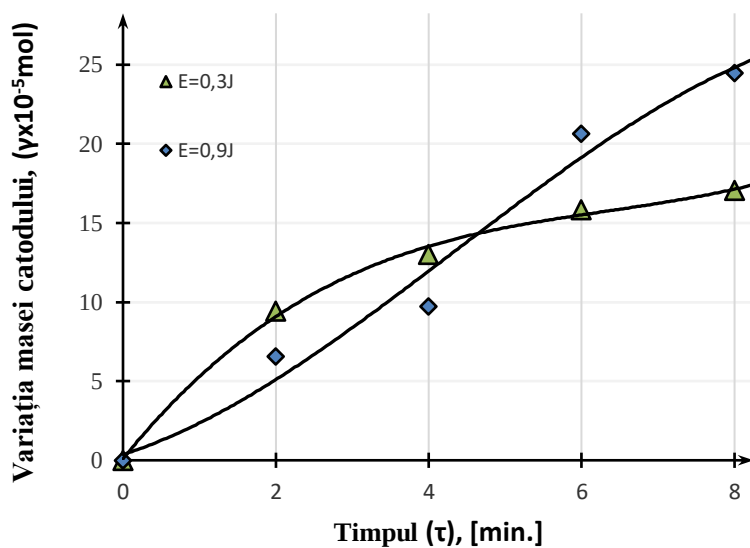


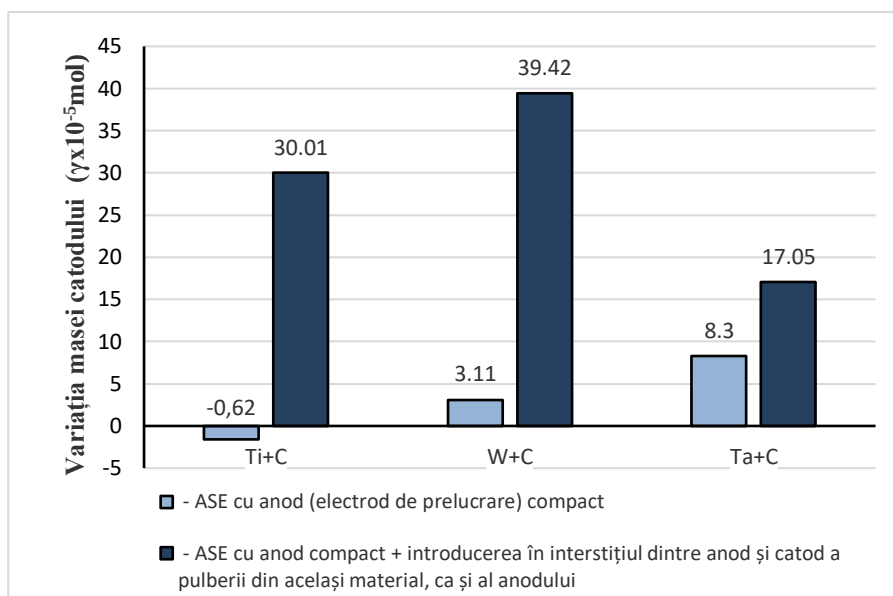
Fig. 3.11. Influența duratei de prelucrarea asupra creșterii de masă a catodului pentru diferite valori ale energiei descărcărilor electrice în impuls, pentru catod executat din oțel carbon C45 la ASE cu electrod compact din Ta și pulbere din TaC

Pe măsura folosirii în calitate de materiale de aliere pulberilor, temperatura de topire a acestora trebuie să fie comensurabilă cu temperatura catodului. În acest mod, procesul formării acoperirilor pe catod se apropie de procesul tradițional, observându-se o dependență strictă între cantitatea de material transferat și energia electrică a descărcării. De exemplu, la introducerea în interstițiu a pulberii din carbură de titan (TiC) se constată că la un regim de lucru cu o valoare mai

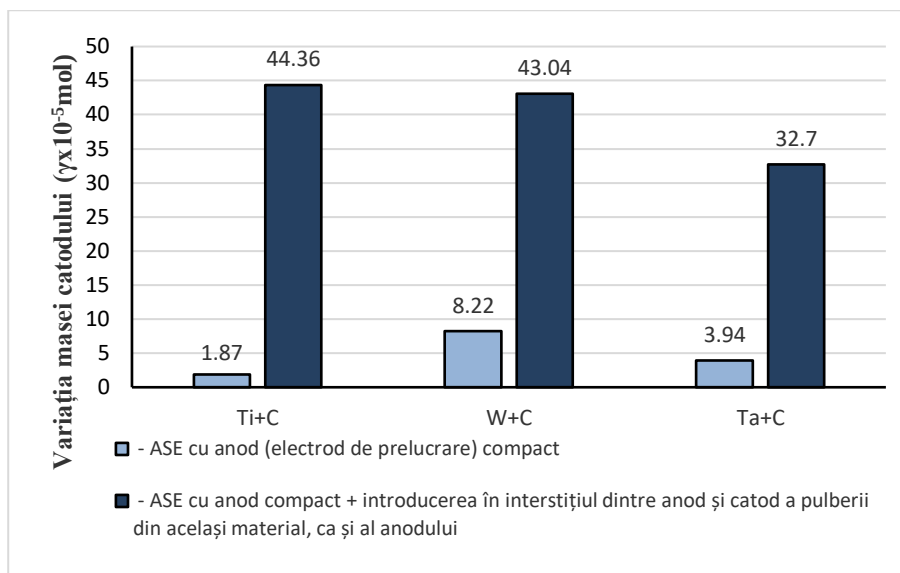
mare a energiei i corespunde o cantitate mai mare de material depus pe suprafața catodului, și invers, la un regim de lucru cu valoarea mai mică a energiei electrice a descărcărilor în timp corespunde o cantitate mai mică de material depus (figura 3.10).

Rezultate analogice s-au obținut și la prelucrarea cu anod compact de tantal și pulberi din carbură de tantal (TaC) (figura 3.11).

Pentru a vedea mai clar deosebirea dintre procedeele aplicate: procedeul tradițional al ASE cu electrod – anod compact și procedeul cu introducerea în interstițiu a pulberii din același material ca și al anodului, vom prezenta rezultatele în formă de histograme (figurile 3.12, 3.13). Procesul s-a efectuat cu durata de prelucrare 1 min./cm², iar valoare energiei descărcării electrice în impuls 0,3 J și 0,9 J. Din figurile 3.12, 3.13 se vede că introducerea în interstițiu a pulberii contribuie la îmbunătățirea substanțială a condițiilor pentru formarea acoperirilor și, mai important, a grosimii stratului depus.

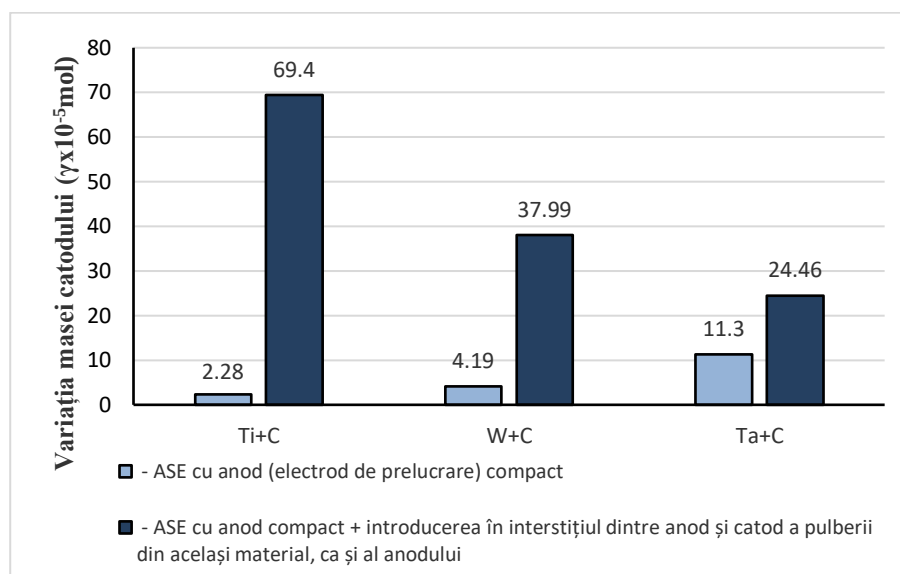


a) catod din oțel carbon de construcții C45

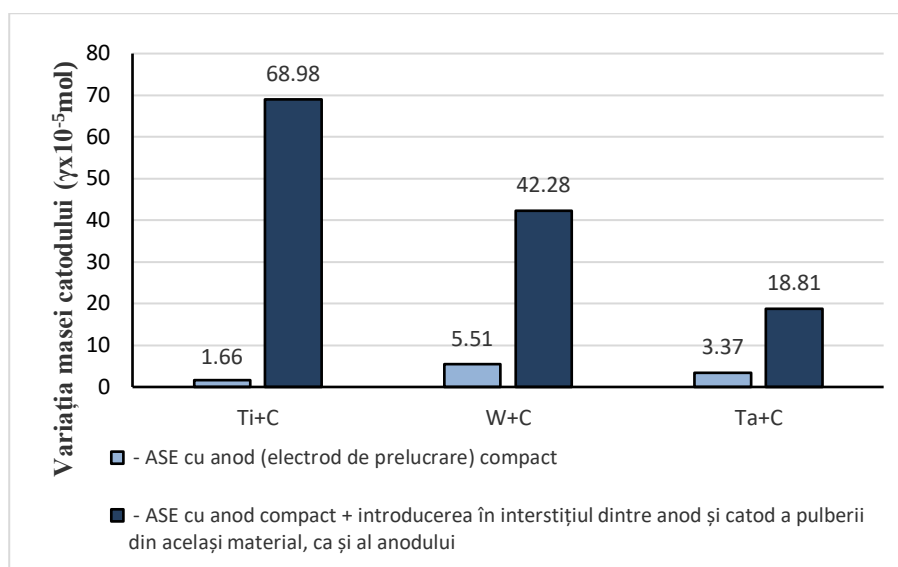


b) catod din titan de puritate tehnică BT1

Fig. 3.12. Reprezentarea comparativă a valorilor procentuale ale adaosului de masă catodului la formarea acoperirilor prin cele două procedee tehnologice ASE, $E_d=0,3$ J



a) catod din oțel carbon de construcții C45



b) catod din titan de puritate tehnică BT1

Fig. 3.13. Reprezentarea comparativă a valorilor procentuale ale adaosului de masă catodului la formarea acoperirilor prin cele două procedee tehnologice ASE, $E_d=0,9$ J

Studiul asupra influenței valorilor energiei impulsurilor electrice, frecvenței producerii acestora și a duratei de prelucrare ne-a permis să stabilim cele mai favorabile condiții pentru a obține în straturile superficiale o cantitate maximă de carburi. La alierea cu electrozi compacți, cele mai favorabile valori ale parametrilor tehnologici sunt: energia descărcării în impuls ($1,0 \div 3,0$) J, frecvența descărcărilor ($100 \div 200$) Hz și intensitatea curentului de lucru ($1,5 \div 3,0$) A.

Comparând aceste două procedee tehnologice ale ASE – cu electrod compact și cu electrod compact și cu introducerea în interstițiu a pulberilor, putem să concluzionăm faptul că: la regimuri electrice similare ale procesului ASE la introducerea în interstițiu a pulberii se formează acoperiri mult mai uniforme și mai groase decât la utilizarea numai a electrodului compact.

În lucrarea [98], la alierea prin scânteii electrice cu anod compact și introducerea simultană a pulberii din compuși refractari, se precizează că au fost obținute acoperiri de înaltă calitate pe suport din aliaje fuzibile (aluminiiu și magneziu), a căror temperatură de topire este cu mult mai mică decât a pulberilor. În acest caz, este greu de explicat transferul de masă și formarea acoperirii pe catod (3.1) dacă se aplică criteriul polarității eroziunii al lui Palatnik [41] și Zolotîh [18, 99]:

$$K_t = \frac{\gamma_k}{\gamma_a}, \quad (3.1)$$

unde: K_t – coeficientul de transfer de masă, între electrozi;

γ_k , – adaosul catodului;

γ_a – eroziunea anodului.

Acest criteriu comportă următoarele condiții: dacă $K_t < 1$, atunci polaritatea este pozitivă și transferul de material pe catod va avea loc; dacă $K_t > 1$, atunci polaritatea este negativă și transferul nu va avea loc.

Astfel, din punct de vedere teoretic, în procesul ASE a unui catod din aluminiu ($T_{top}=670^{\circ}\text{C}$), conform criteriului lui Palatnik $K_t > 1$, nu se poate forma un strat de depunere utilizând, un electrod-anod, de exemplu, din BK20 ($T_{top} = 2850^{\circ}\text{C}$), temperatura căruia este preponderent mai mare decât temperatura catodului de aluminiu. Însa, în cazul utilizării în calitate de material de aliere a aliajului BK20 în formă de pulberi, acest lucru este posibil.

Deși în procesul ASE cu pulberi introduși în spațiul dintre electrozi fenomenul polarizării eroziunii totuși se manifestă, dar mecanismul formării stratului depus pe suprafața catodului este diferit de cel ce caracterizează procesul ASE cu anod compact – în prezența particulelor de pulbere în spațiul dintre cei doi electrozi. În primul rând, descărcările electrice se amorsează la distanțe (interstiții) cu mult mai mari decât cele de străpungere. În al doilea rând, în cazul descărcărilor electrice la distanțe mai mari decât cele de străpungere, are loc o redistribuire a energiei termice degajată ca urmare a descărcărilor electrice în sistemul anod – interstițiu – catod ce se află sub potențial, iar inițierea descărcării are loc la distanțe mai mari decât cele de străpungere. În acest caz, are loc redistribuirea energiei termice în sistemul anod – interstițiu catod: cantitatea de căldură degajată pe electrozi se micșorează, iar în interstițiu – se mărește. Ca urmare, o mare parte a energiei termice degajată în urma descărcării se elimină în interstițiu și cu atât mai puțin se elimină pe electrozi.

Particulele pulberii, nimerind în canalul plasmei descărcării, se topesc și, sub acțiunea forțelor electrice, se transferă pe catod, interacționează cu aceasta, formând stratul durificat. În urma transferului materialului topit, se mișcă electrodul – anod care, ajungând la suprafața catodului, tasează materialul înmuiat. În acest moment, prin contactul anodului cu materialul transferat, trece curentul de scurtcircuit, iar ca rezultat se degajă suplimentar o cantitate de căldură, care contribuie și mai mult la intensificarea interacțiunii materialului transferat cu materialul suportului și la formarea acoperirii pe acesta.

Obținerea acoperirilor de calitate, cu aplicarea variantelor noi al procesului ASE prin introducerea în interstițiu a materialelor pulverulente, precum și utilizarea aplicatoarelor cu electrozi rotativi în plan perpendicular pe suprafața de prelucrare, ne-au demonstrat o eficacitate înaltă a acestei variante a ASE.

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

3.4.2. Cinetica formării acoperirilor pe catod cu electrozi rotativi în plan perpendicular pe suprafața de prelucrare

După cum s-a menționat mai sus, pentru intensificarea procesului de formare a acoperirii s-au aplicat câteva procedee tehnologice elaborate în procesul investigațiilor. Astfel, în unele cazuri pentru obținerea straturilor mai groase de titan, tantal și wolfram, s-a aplicat procedeul tehnologic de aliere cu electrozi din sârmă cu diametrul de $(1,5 \div 2,0)$ mm, care se roteau într-un plan perpendicular pe suprafața catodului (figura 3.14). Aplicatorul rotativ prezintă în sine o „morișcă”, a cărei electrozi de sârmă se rotesc în plan perpendicular pe suprafața de prelucrare. Mișcându-se tangențial către această suprafață, în momentul amorsării descărcării, are loc aruncarea materialului erodat de pe vârful anodului – sârmă pe suprafața de prelucrare. Într-o scurtă perioadă de timp, electrodul – anod de sârmă vine în contact cu suprafața catodului, netezind topitura de metal depusă. În același timp, prin contactul electrodului de prelucrare cu suprafața catodului trece un curent de scurtcircuit, care, încălzește porțiunea de metal depusă, ceea ce contribuie la încălzirea suplimentară a topiturii și, respectiv, la intensificarea procesului micrometalurgic dintre materialele anodului și ale catodului [40].

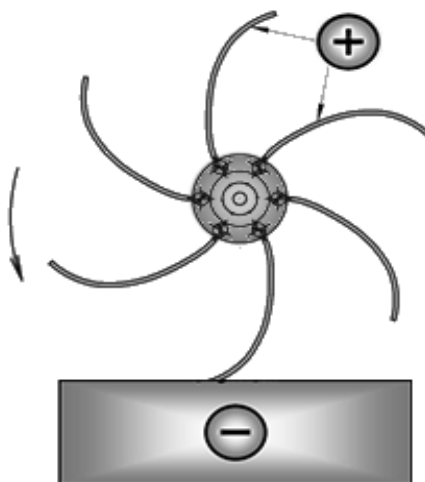


Fig. 3.14. Aplicator cu electrozi din sârmă

La producerea unui nou impuls de curent de scurtcircuit, căldura degajată va determina topirea unei cantități suplimentare de material al anodului pe suprafața catodului. În acest mod se vor forma straturi depuse cu grosime mai mare în comparație cu alte metode descrise.

Diversificarea parametrilor electrice și tehnologici specifici, precum și a valorilor care pot fi adoptate, va asigura condițiile experimentale necesare diversificării și îmbunătățirii continue a metodei ASE. Perfectarea unor noi variante de prelucrare tehnologică va fi determinată de condițiile impuse de implementarea practică a acestei metode de microaliere a stratului superficial al pieselor metalice.

La prelucrarea ulterioară cu electrodul din grafit, ca rezultat al interacțiunii cu materialele acoperirii formate și cu plasma descărcării în impuls, se formează faze cu conținut de carburi,

depistate pe probele din oțel prin analiza cu raze X în radiația $K\alpha$ de cobalt, iar pe probe din titan – în radiația $K\alpha$ de cupru.

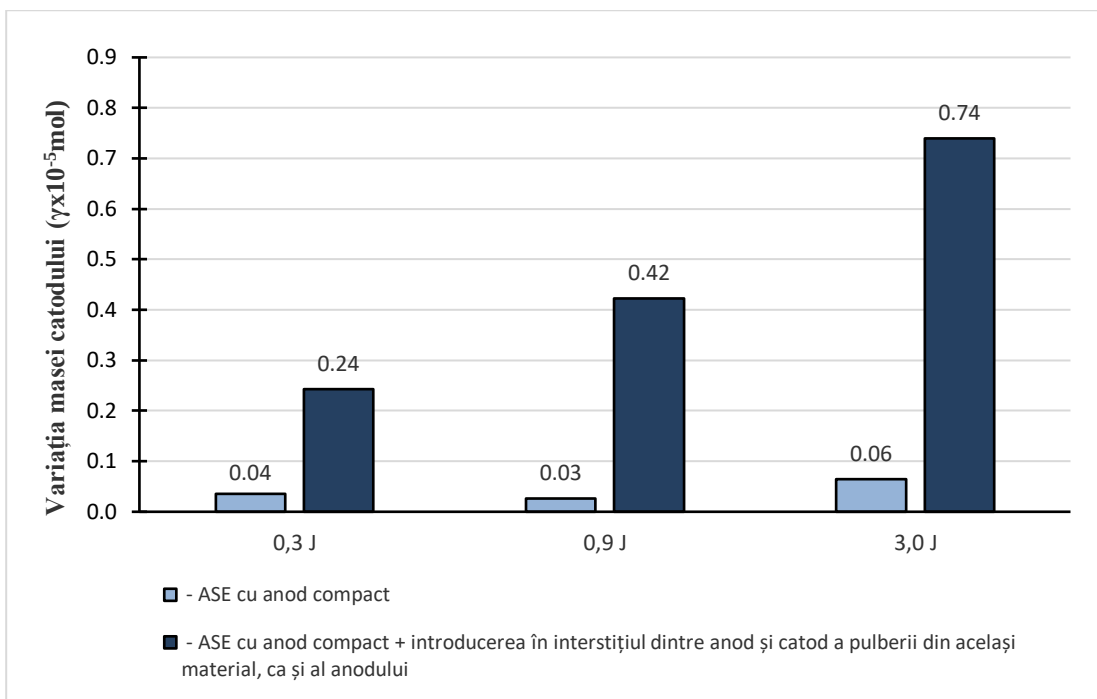
3.5. Sintetizarea compușilor ternari (MAX-faze)

Compușii ternari reprezintă o familie de compuși stratiformi cu stoechiometrie formală $M_{n+1}AX_n$ ($n=1, 2, 3 \dots$), unde $M-d$ – metal tranzitoriu; $A-p$ – element (de exemplu, Si, Gt, Al, S, Sn ș. a.); X -carbon sau azot [12, 13, 100-105].

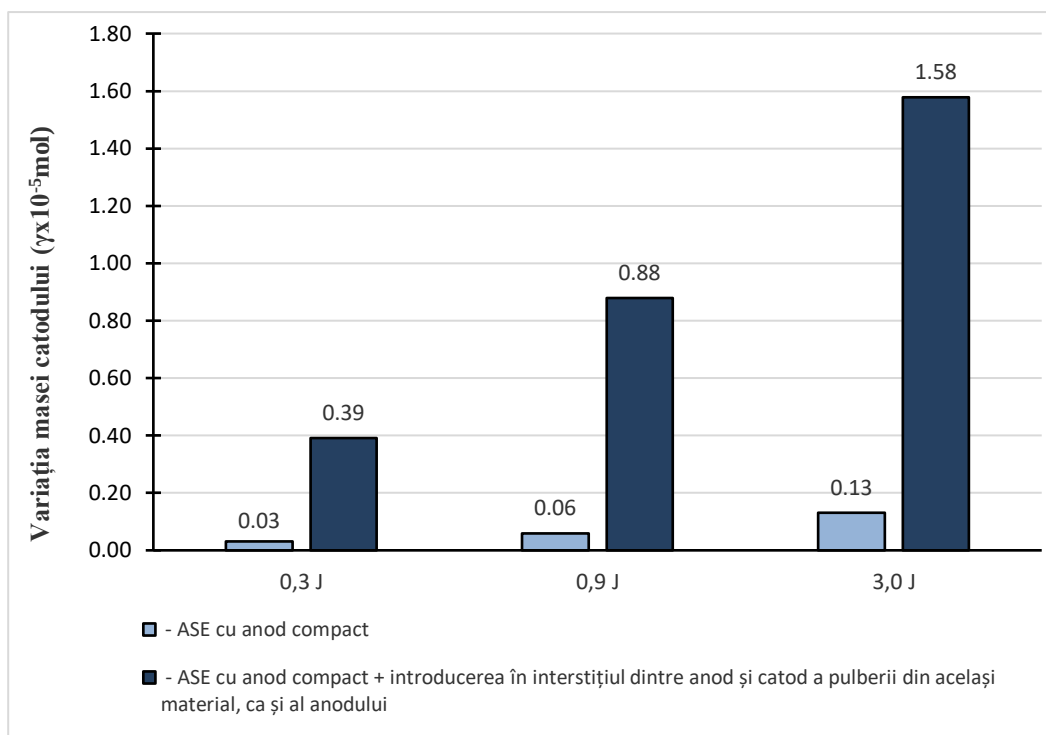
Carburile și nitrurile ternare stratiforme ale elementelor d și p (MAX-fazele) manifestă o îmbinare unică a proprietăților caracteristice atât pentru metale, cât și pentru ceramică. Astfel de materiale posedă o densitate mică, valori înalte ale termo- și electroconductivității, rezistență, modul ale elasticității scăzut, rezistență înaltă la coroziune în medii lichide agresive, rezistență la temperaturi înalte și la șocuri mecanice; sunt supuse ușor prelucrării mecanice, posedă temperaturi de topire înalte și sunt stabile la temperaturi de până la 1000 °C și mai mult [13, 102].

În multitudinea de MAX-faze, sintetizate la moment, un interes deosebit din punct de vedere al nivelului proprietăților îl prezintă MAX-fazele pe bază de titan – Ti_2AlC , Ti_2AlN , Ti_3AlC_2 , Ti_3SiC_2 . Aceste procese industriale sunt legate de utilizarea utilajului complex cu mari cheltuieli energetice. Pentru noi prezintă interes sintetizarea MAX-fazelor prin metoda ASE care este ușor de realizat, totodată fiind și mic consum de energie. Astfel, am putea sintetiza MAX-faze în formă de acoperiri nemijlocit pe suprafețele lucrătoare ale organelor de mașini sau pe alte suprafețe ce necesită protecție contra coroziunii, uzurii etc.

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

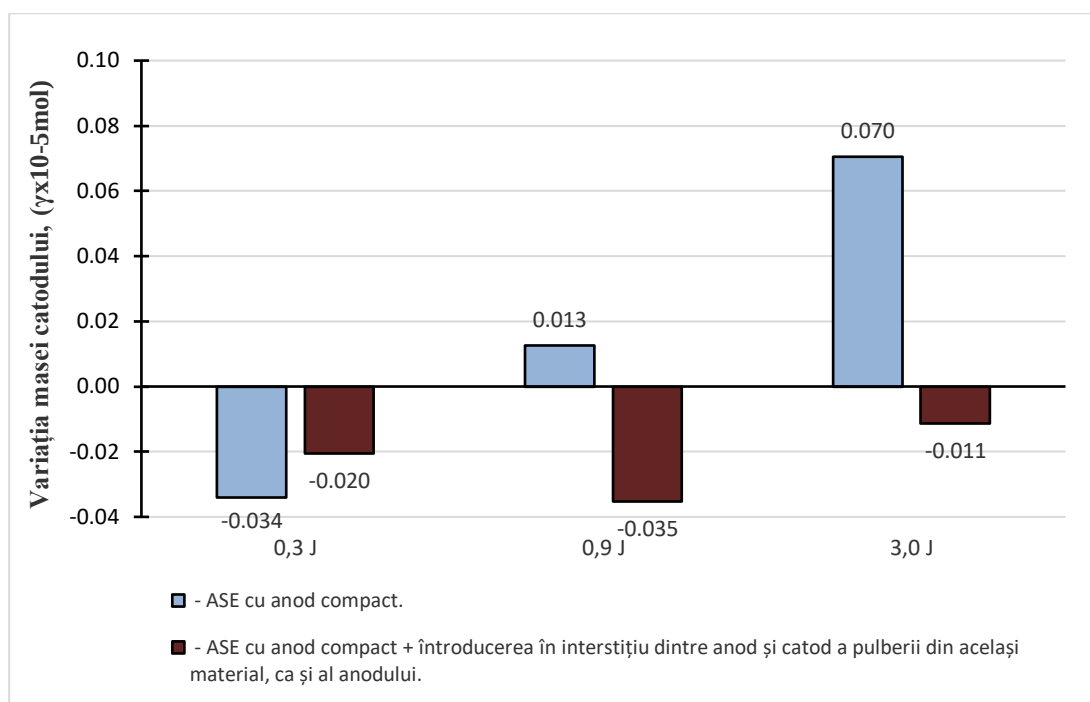


a) Ti+Al+C /C45

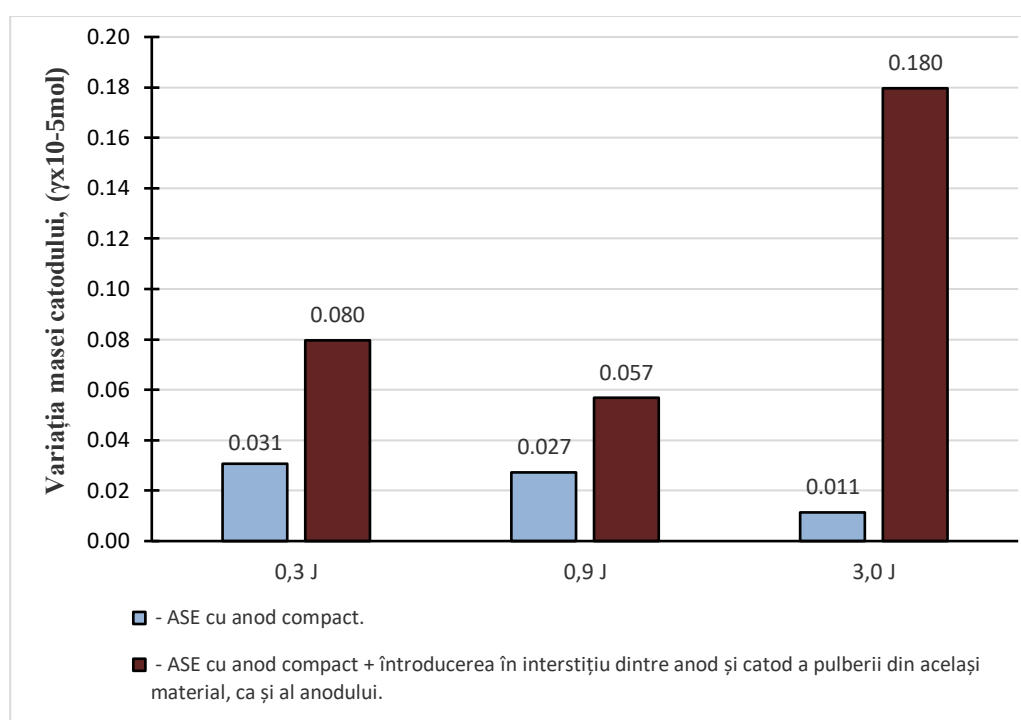


b) Ti+Al+C /BT1

Fig. 3.15. Raportul dintre intensitățile formării acoperirilor pe catod din oțel C45 (a) și pe aliaj de titan BT1 (b), în funcție de procedeele tehnologice aplicate și diferite valori ale energiei descărcării



a) Ti+SiC / C45



b) Ti+SiC / BT1

Fig. 3.16. Raportul dintre intensitățile formării acoperirilor pe catod din oțel C45 (a) și pe aliaj de titan BT1 (b), în funcție de procedeele tehnologice aplicate și diferite valori ale energiei descărcării

În altă schemă de prelucrare în calitate de elemente de aliere s-au utilizat pulberi din aceleași materiale (grafit, Ti, Al, TiN, SiC), care erau introduse în interstițiul dintre anod și catod în procesul ASE (figura 3.15). În acest caz, s-au folosit amestecuri stoechiometrice din pulberii respectivi.

În cazul utilizării în calitate de electrozi de prelucrare a metalelor cu plasticitate înaltă, cum ar fi titanul, aluminiul și altele, acestea se confecționează din sârmă cu diametrul de $(1,5 \div 2,0)$ mm. Acestea li se atribuia mișcare de rotație în plan perpendicular pe suprafața de prelucrare a suportului. Astfel, în prima fază, se depun acoperiri groase, folosind electrozi din sârmă de Al și Ti, după care, în a doua fază, peste acestea se depun acoperiri din pulberi de AlN sau SiC.

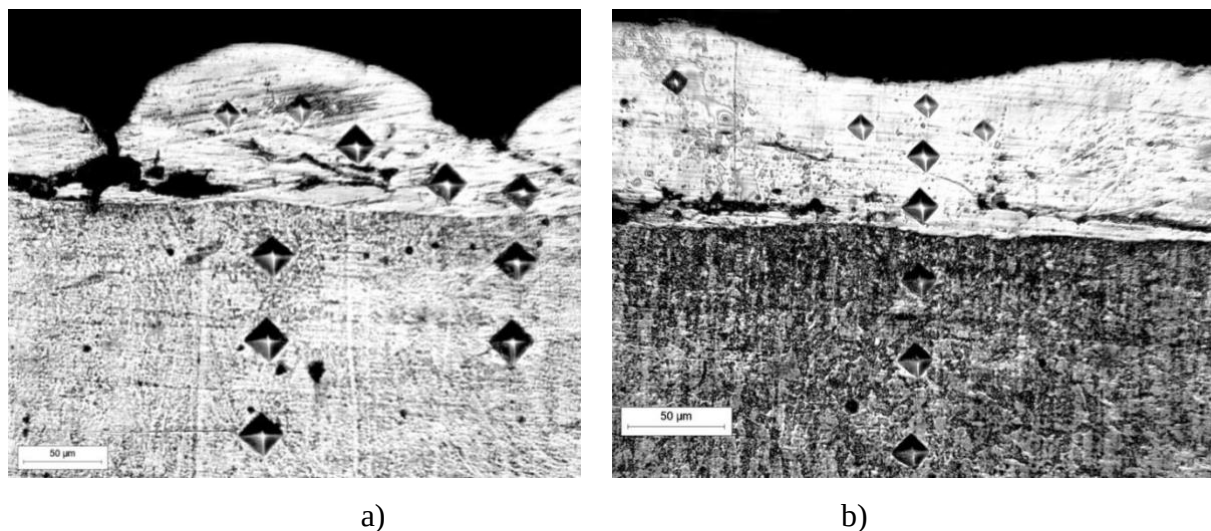


Fig. 3.17. Microstructura probelor din C45 cu acoperiri din TiAlC obținută la prelucrarea succesivă cu electrozi din Ti, Al și grafit în regim de vibrații ale electrodului (a) și la rotația electrozilor din sârmă în plan perpendicular pe suprafața catodului (b)

Analiza metalografică a șlifurilor cu acoperiri obținute la prelucrarea succesivă a oțelului C45 cu electrozi din Ti, Al și grafit în regim de vibrații ale electrozilor și varieri ale valorii energiei descărcării în limita $(0,3 \div 3,0)$ J a demonstrat că, indiferent de valoarea impulsurilor electrice cu care s-a efectuat prelucrarea, straturile formate se deosebesc prin continuitate și uniformitate joasă (figura 3.17, a), în timp ce la prelucrarea în același regim energetic cu aplicator în formă de „morișcă”, au fost obținute acoperiri uniforme după grosime și continuitate înaltă (figura 3.17, b).

La formarea acoperirilor din trei componente TiAlN, în care era prezentă nitrura de aluminiu (dielectric), am recurs la înlocuirea acestora cu pulberi din nitrură de titan care conduc curentul electric și astfel se asigură compoziția TiAlN. În același fel a fost obținut compusul ternar TiSiC.

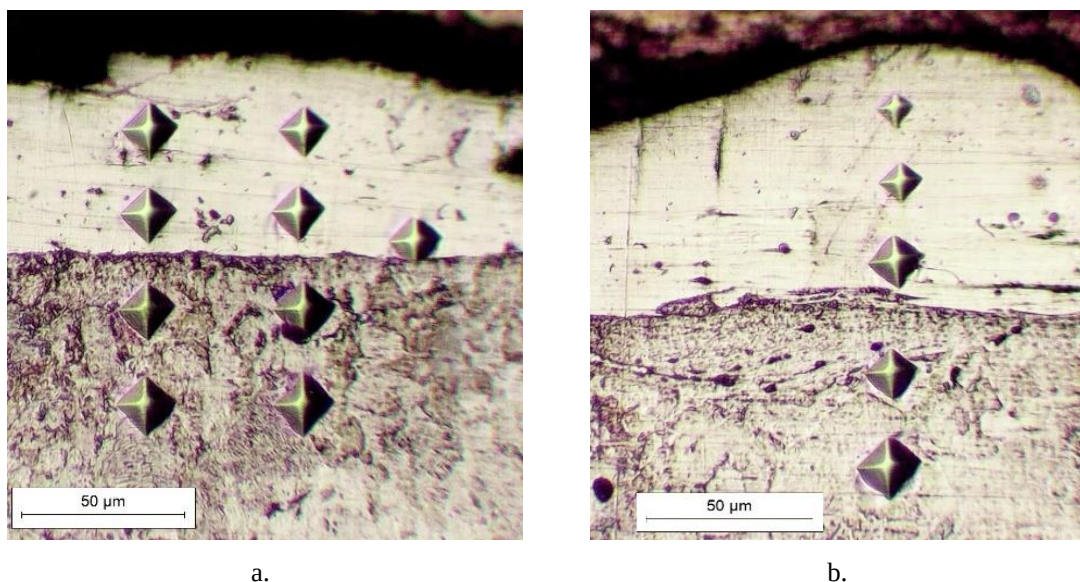


Fig. 3.18. Microstructura probelor din C45 acoperite cu MAX-faze TiAlN (a) și TiSiC (b)

Titanul a fost depus cu electrod compact iar carbura de siliciu din pulbere, deoarece aceasta, are o rezistență electrică mai mare se depune mai greu. În figura 3.18 sunt prezentate microstructurile probelor C45 cu acoperiri din TiAlN (a) și TiSiC (b) din care se observă o calitate înaltă a acoperirilor obținute. Din figura 3.18 se vede o anomalie a tenacității acoperirilor din TiAlN și TiSiC în comparație cu carbura de titan (TiC), duritatea cărora se caracterizează printr-o anizotropie puternică, ceea ce este în concordanță cu concluziile lucrării [13].

3.6. Analiza microstructurii acoperirilor sintetizate utilizând microscopia optică

Valoarea energiei descărcării în impuls joacă un rol important vizând uniformitatea acoperirilor depuse prin ASE cu electrozi compacți. La valori mai mici de 1,0 J ale energiei descărcării se obțin acoperiri de mai mare calitate, cu continuitate și uniformitate maximă (figura 3.19, a). Însă la energii mai mari decât 1,0 J calitatea acoperirilor formate scade brusc și prezintă niște straturi intermitente cu multe defecte (figura 3.19, b).

În figura 3.19, a sunt prezentate microstructurile probelor din oțel carbon C45 obținute la ASE succesiv cu electrozi compacți din titan, iar apoi cu grafit la regimul cu energia descărcării 1,0 J, curentul de lucru 1,5 A și frecvența trecerii impulsurilor 100 Hz, iar în figura 3.21, b – la regimul cu energia descărcării 2,0 J, curentul de lucru 2,5 A la aceeași și frecvență de 100 Hz și cu durata de prelucrare 1,5 min./cm². După cum se vede, la regimuri cu valori mari ale energiei descărcării au loc procese intense de oxidare și fragilizare a straturilor formate și, în final, se micșorează continuitatea, apar microfisuri și pori (figura 3.21, b).

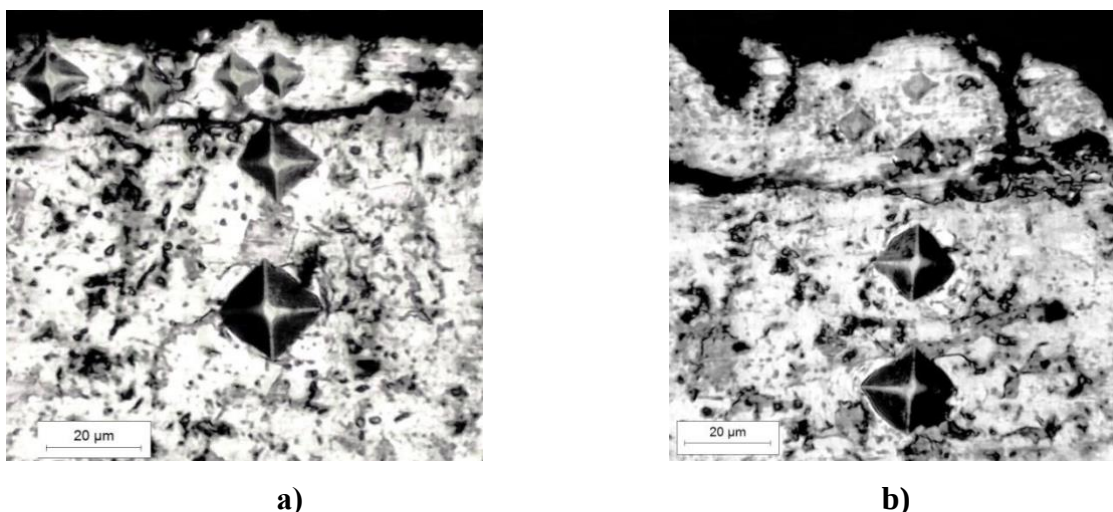


Fig. 3.19. Microstructura probelor din oțel carbon C45 cu acoperiri obținute la ASE cu electrozi din titan și grafit la valoarea energiei descărcării (a) $E_d=1,0$ J; (b) $E_d=2,0$ J

În cazul procesului ASE cu electrod compact și introducerii în interstițiu între anod și catod a pulberii din aceleași elemente ca și ale anodului sau ale catodului (pulberi din titan, wolfram sau grafit), tabloul formării stratului superficial diferă.

În primul rând, descărcarea ce apare între anod (electrodul de prelucrare) și suport (catod) prin stratul de pulberi, acesta întrucâtva ecranează acțiunea descărcării care se distribuie simultan pe mai multe particule a pulberii, ce se află în zona de lucru. Din această cauză pentru prelucrarea lor este nevoie de valori mai mari ale energiei.

S-a stabilit experimental că, pentru obținerea straturilor de calitate, cu conținut de faze de carburi similare cu cele ce se obțin la ASE cu electrozi compacți standardizați, energia descărcării urmează a fi mărită de (1,3÷1,5) ori. Adică, dacă la ASE cu electrozi compacți din titan și grafit straturi, de calitate au fost obținute la valoarea energiei descărcării de 1,0 J, apoi la introducerea pulberii în interstițiu energia urmează a fi mărită până la (2,5÷3,0) J. Prelucrarea la regimuri optimizate ne-a permis să obținem acoperiri omogene, duritatea cărora a crescut de la 3,5 până la 4,5 ori în comparație cu duritatea suportului.

În figura 3.20 este prezentată microstructura probei din oțel C45 cu acoperire formată la ASE cu introducerea în interstițiu a pulberii de titan și grafit, din care se vede că atât grosimea stratului, cât și continuitatea acestuia au crescut substanțial. La fel, a crescut și uniformitatea durității pe toată întinderea acoperirii. Straturi similare pe probe din oțel C45 au fost obținute la ASE cu amestec de pulberi de tantal și grafit (figura 3.21).

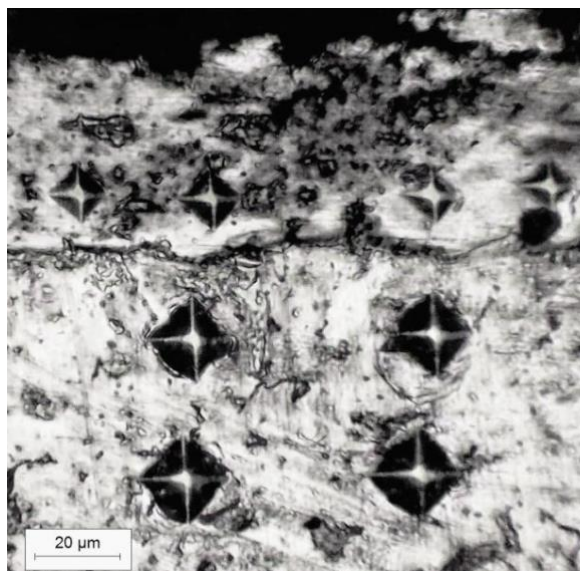


Fig. 3.20. Microstructura acoperirii pe oțel C45 obținută în procesul ASE cu introducerea în interstițiu a amestecului de pulberi de titan și grafit

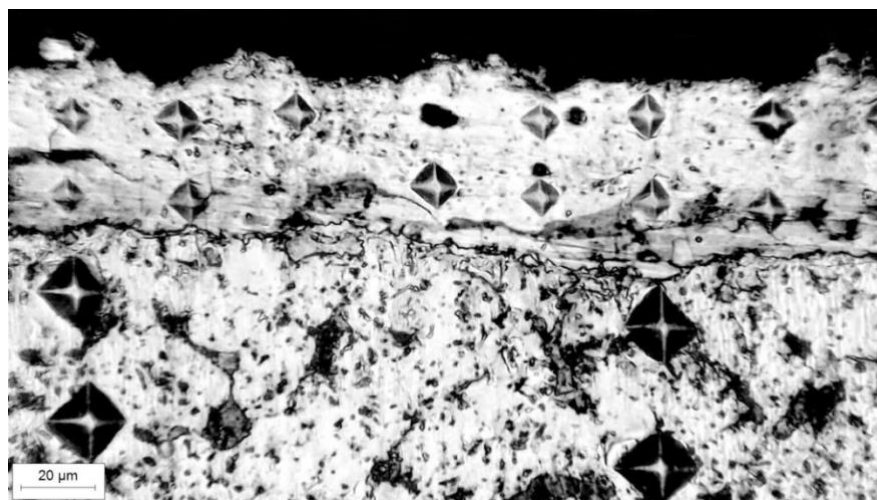


Fig. 3.21. Microstructura stratului format pe suprafața probei din oțel C45 la ASE cu amestec de pulberi din tantal și grafit

Anterior [40] s-a stabilit că, la ASE al catodului din titan cu electrozi compacți din orice metale, dar, în special, cu cele din grupa fierului: Fe, Co, Ni, în primele minute se observă o eroziune intensă a catodului, legată de acțiunea chimică a titanului. Însă, cu trecerea timpului, în urma interacțiunii plasmăi descărcărilor în impuls cu elementele aerului (azotul și oxigenul), are loc o "pasivizare" a suprafeței, după care începe formarea acoperirii pe catod și creșterea masei catodului.

În cazul introducerii în interstițiu a pulberii, acest fenomen de eroziune al catodului se micșorează substanțial și formarea acoperirii pe catod începe chiar din primele momente. Aceasta se observă în mod evident pe secțiunea transversală a probei din titan OT4 cu acoperire formată la introducerea în interstițiu a pulberii din wolfram și grafit, precum și a pulberii din molibden și grafit (figura 3.22).

Trebuie menționat încă un factor important care influențează asupra calității stratului depus, și anume granulația pulberii. Experimentele s-au efectuat utilizând pulberi cu granulație între $(5\div 200)$ μm . Utilizarea pulberii cu granulație mică, cca $(70\div 80)$ μm îngreunează formarea acoperirii pe catod. Se observă o fiabilitate scăzută și o cocoloșire a pulberii. Însă, pe măsura creșterii granulației, aceste fenomene negative se diminuează și, la granulația de $(100\div 200)$ μm procesul se stabilizează, deoarece se creează condiții de dozare fină a fluxului de pulberi introdus în interstițiu între anod și catod.

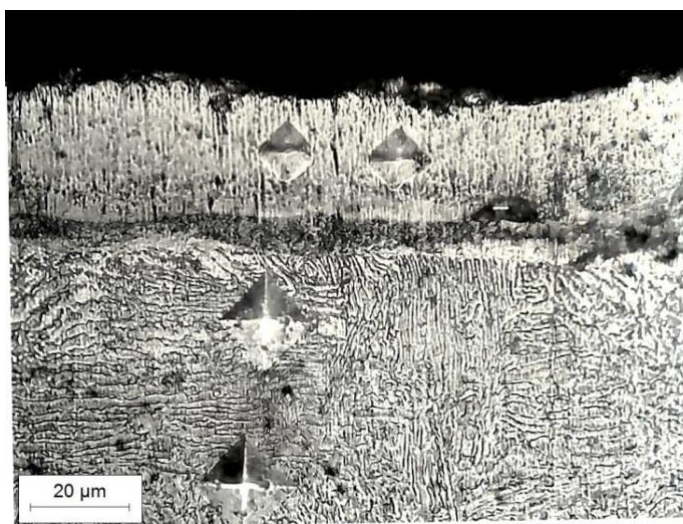


Fig. 3.22. Microstructura probei din aliajul de titan OT4 supus ASE cu amestec de pulberi din wolfram și grafit [106]

Cu toate că s-a reușit reglarea fină a introducerii pulberii în zona de lucru, nu toată cantitatea acestora interacționează cu plasma scânteii, dat fiind caracterul exploziv al descărcării în impuls, în urma căreia apar unde de șoc care împrășteie o mare parte a pulberii din zona acțiunii descărcării [3, 12, 96, 106]. Aceasta din urmă nicidecum nu diminuează eficiența procesului. Pulberea ce nu interacționează cu plasma descărcării se depozitează într-un buncăr de acumulare și poate fi utilizată de multiple ori.

Anterior au fost obținute acoperiri mai groase, în special la folosirea în calitate de materiale de aliere a metalelor cu plasticitate înaltă, precum Ti, Al și altele, și utilizarea mai multor procedee tehnologice, unul dintre care este folosirea aplicatoarelor cu rotație a electrozilor în plan perpendicular pe suprafața de lucru. Acest procedeu tehnologic a asigurat creșterea rapidă a stratului format cu continuitate și uniformitate înaltă. Iar în cazul utilizării în calitate de materiale de aliere a metalelor refractare și fragile s-au folosit pulberi acestora, care au fost introduși în interstițiul dintre anod și catod.

Analiza cu raze X a acoperirilor au fost efectuată cu DRON-3.0, folosind radiația luminii $K\alpha$ de la tubul cu anticatod filtrat, cu lungimea de undă de $\lambda=16541$ Å [107].

ASE au fost supuse probele din oțel C45 și oțel alimentar Cr18Ni10Ti, precum și din aliaje de titan BT6 și OT4, iar în calitate de elemente de aliere s-au utilizat Ti, Ta, W și grafit, în combinații variate, pentru obținerea carburilor și altor compuși cu caracteristici fizico-mecanice înalte [108].

Tabelul 3.1. Componenta fazică a acoperirilor obținută pe oțelul Cr18Ni10Ti la prelucrarea succesivă prin ASE cu diferite materiale [108]

Nr.	Materialul anodului	Componenta fazică a acoperirii
1.	W, grafit	α -Fe; γ -Fe; Fe ₃ N; Fe ₄ N; (Fe, Cr, W) ₂ C ₆ $\approx$ [Cr-Fe-(W, Mo)]-C
2.	Ti, Al, grafit	α -Fe; γ -Fe; TiN; Fe ₅ C ₂ or χ -Fe ₂ C; Fe ₃ Al or AlFe; (Ni ₃ (Al, Ti) C); FeTi
3.	Cr18Ni10Ti fără acoperire	α -Fe; γ -Fe

În tabelul 3.1 este prezentată componenta fazică a acoperirilor obținute pe oțelul inoxidabil Cr18Ni10Ti prelucrat cu electrozii menționați mai sus.

După cum se vede din descifrarea radiogramelor, a fost detectată o gamă largă de compuși formați drept urmare a interacțiunii materialelor electrozilor și a suportului cu plasma descărcării în impuls. Important este de menționat că în acoperiri au fost detectate fazele Fe₃N, Fe₄N și TiN, deși nici în suport și nici în electrodul de prelucrare nu a fost prezent azotul. Apariția acestor faze se datorează faptului că, la efectuarea procesului ASE în aer în condițiile dezvoltării temperaturilor și presiunilor înalte în plasma descărcării în impuls, azotul din aer interacționează cu elementele electrozilor, formând nitruri.

Investigații similare ale componenței fazice s-au efectuat și pentru acoperirile obținute pe oțelul C45 (tabelul 3.2). În acest caz, a fost lărgită gama materialelor prin folosirea pulberilor din Ti+Al+C și Ti+Si+C.

Tabelul 3.2. Componenta fazică a acoperirilor obținută pe oțelului C45 la prelucrarea succesivă prin ASE cu diferite materiale

Nr.	Materialul anodului	Componenta fazică a acoperirii
1.	C45 fără acoperire	α -Fe, Fe ₃ C
3.	Ti, Al, grafit	TiO ₂ , FeO, TiN, γ -Fe, Fe ₃ C, AlFe ₃ , α -Fe
4.	Ti, AlN	TiO ₂ , AlN, TiN, FeO, α -Fe, γ -Fe
5.	Ti, SiC	SiO ₂ , TiO ₂ , Fe ₃ C, TiC, FeO, α -Fe, γ -Fe

Compușii Ti+Al+C, Ti+AlN și Ti+SiC au fost selectați în calitate de materiale de aliere cu scopul obținerii MAX-fazelor care posedă proprietăți unice [78, 100-105].

Rezultatele analizei radiografice au demonstrat că MAX-fazele se formează în acoperiri la regimurile cu energia descărcării în impuls în limita (0,9÷3,0) J. Radiograma din figura 3.23 confirmă formarea MAX-fazei Ti₃AlC₂.

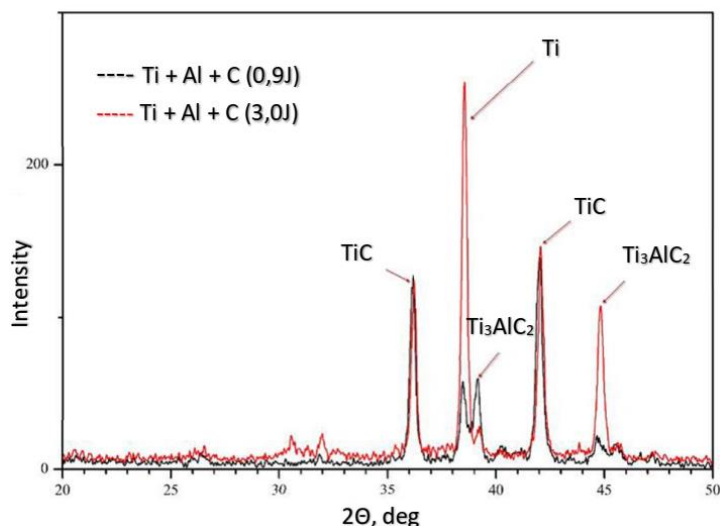
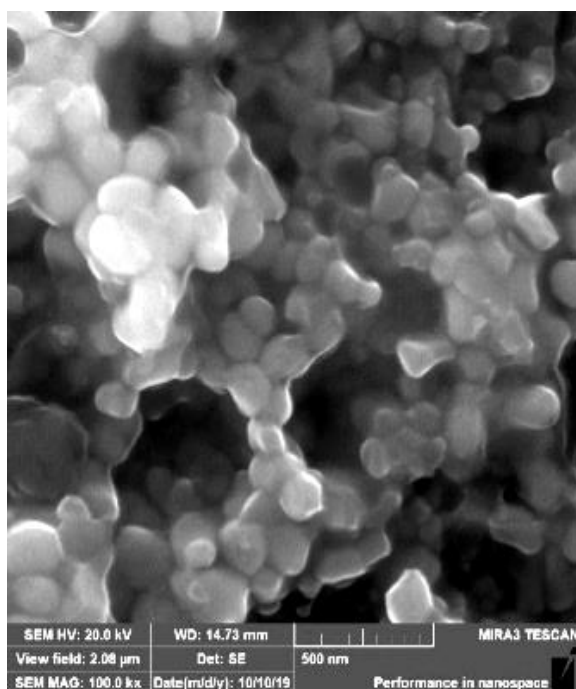


Fig. 3.23. Difractograma acoperii pe oțel Cr18Ni10Ti obținută la prelucrarea succesivă cu electrozi din titan, aluminiu și grafit

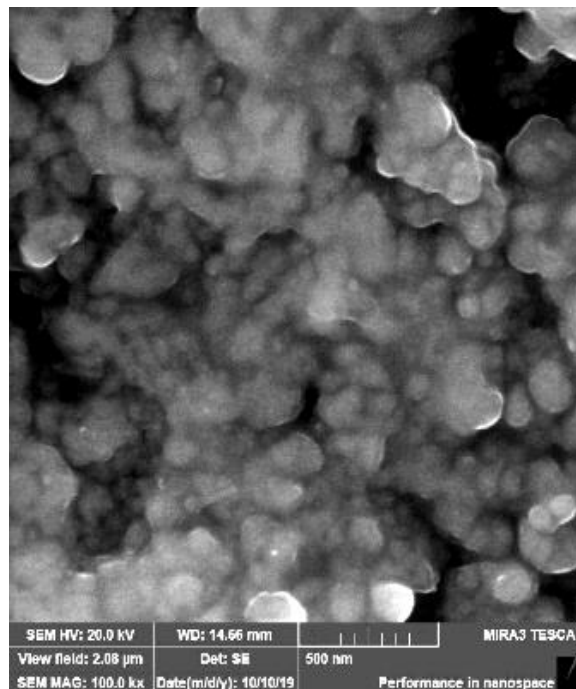
Conform datelor obținute (tabelul 3.3), formațiunile cristaline în materialele investigate se află în limita $(50 \div 61) \text{ \AA}$ [6, 7, 10, 108, 109], ceea ce ne permite să presupunem formarea nanoparticulelor și nanofazelor în acoperirile apărute la ASE. S-a stabilit că componența chimică a acoperirilor și regimurile de formare a acestora au o influență substanțială asupra dimensiunilor geometrice ale fazelor cristaline obținute în acoperirile ASE.

Tabelul 3.3. Dimensiunile formațiunilor cristaline obținute în urma ASE

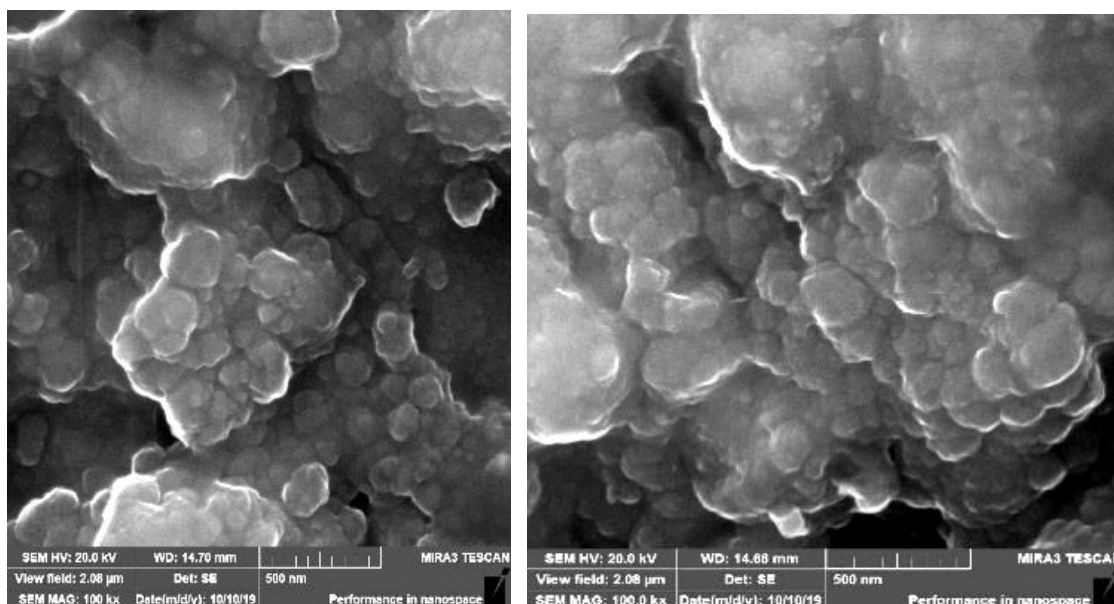
Dimensiunea medie a cristalitelor	BT 6	Ti + Al + C $E_d = 0,9 \text{ J}$	Ti + Al + C $E_d = 3,0 \text{ J}$	Ti + SiC $E_d = 0,9 \text{ J}$	Ti + SiC $E_d = 3,0 \text{ J}$
$L, \text{ \AA}$	61	58,5	58	50,8	60,5



Ti+Al+C ($E_d = 0,9 \text{ J}$)



Ti+Al+C ($E_d = 3,0 \text{ J}$)



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

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

Fig. 3.24. Morfologia acoperirilor obținute prin ASE

Ca rezultat al proceselor accelerate, în zona acțiunii descărcărilor în impuls este probabilă formarea fazei amorse în structurile acoperirii. Studiul morfologiei acoperirilor ASE prin metoda scanării electronice, de asemenea, a arătat că, la anumite regimuri cu valoarea energiei descărcării de $(0,8 \div 3,0)$ J, indiferent de componența chimică a acoperirii, au fost depistate faze nano dispersate (figura 3.24).

Se presupune că modificările structurii și ale morfologiei structurii se pot răsfrânge asupra caracteristicilor fizico-mecanice.

3.7. Transformări structurale în acoperirile formate la alierea prin scânteii electrice

În procesul ASE, în zona de lucru se dezvoltă temperaturi de ordinul 10^4 °C și mai mari, precum și presiuni de mii de atmosfere [3].

În aceste condiții are loc o interacțiune intensă a materialelor anodului și ale catodului cu plasma descărcărilor electrice în impuls în urma căreia în straturile superficiale se formează diferiți compuși conform diagramei de echilibru. În anumite condiții, în special la valori ale energiei descărcării mai mari de 3,0 J s-a observat formarea în straturile superficiale a fazelor amorse [3, 5, 9].

La acest capitol s-au efectuat investigații radiologice a acoperirilor formate pe suprafețe de oțel inoxidabil (40Cr13) și titan (BT6) la alierea prin electroeroziune succesivă cu Ti, Al, grafit și carbură de siliciu (SiC). Radiografia s-a efectuat utilizând difractometrul ДРОН-3.0 cu radiație K_α de la tubul cu anticatod din cupru, filtrat la lungimea de undă $\lambda = 1,541$ Å. Distanța interplanară a zonelor cristaline s-a determinat conform formulei Wolf-Bragg (3.2):

$$2d \sin \Theta = n\lambda, \quad (3.2)$$

unde: d – distanța interplanară, μm ;

θ – unghiul de împrăștiere Bragg;

λ – lungimea de undă, μm ;

$n=1, 2, 3 \dots$

Distanța medie a cristalitelor L a fost calculată după formula Scherrer (3.3):

$$L = \frac{\lambda}{\Delta \cos Q}, \quad (3.3)$$

unde:

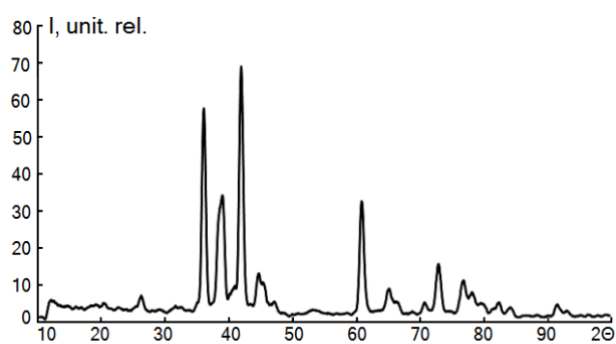
Δ – semilățimea maximului;

Q – poziția unghiulară a maximului.

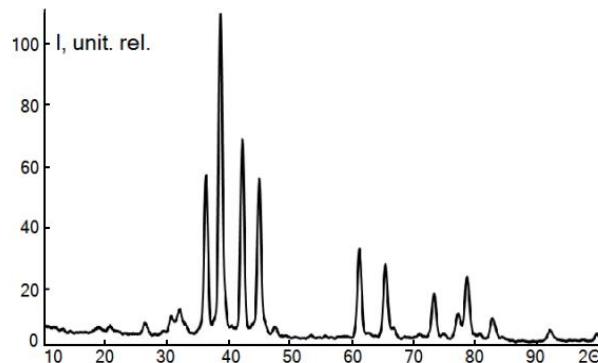
În tabelul 3.4 sunt prezentate probele și, respectiv, componența materialelor cu care s-a efectuat prelucrarea cu două valori ale energiei descărcării electrice.

Tabelul 3.4. Componența acoperirilor pe probe din aliajul de titan BT6

Energia descărcării, J	BT6 (catod)			
	Proba 1	Proba 2	Proba 3	Proba 4
0,9	Ti+Al+C	-	Ti+Si+C	-
3,0	-	Ti+Al+C	-	Ti+Si+C



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



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

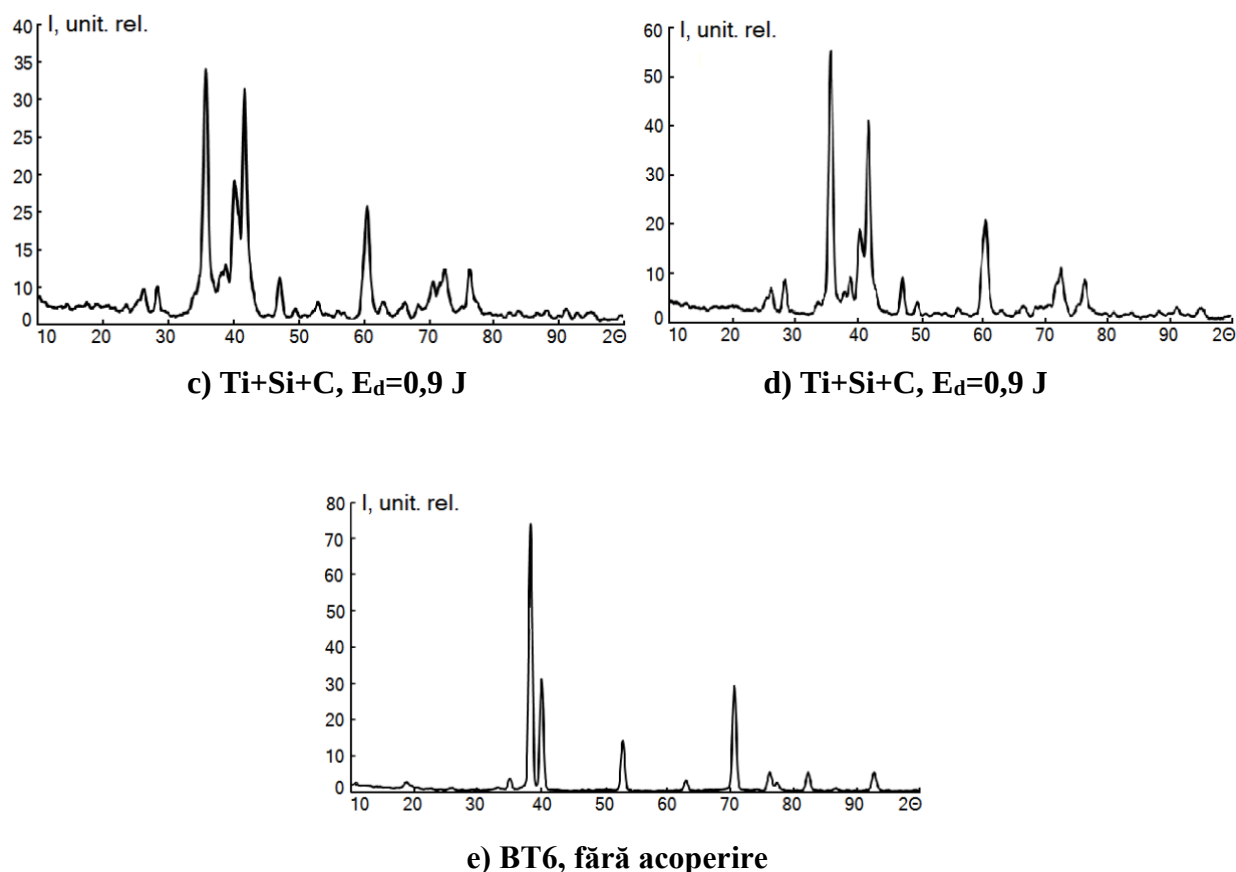


Fig. 3.25. Radiogramele suprafețelor probelor din BT6 cu acoperire (a – d) și fără acoperire (e)

În figura 3.25 sunt prezentate radiogramele acoperirilor probelor enumerate în tabelul 3.4. Rezultatele calculelor radiogramelor obținute de pe acoperirile formate prin ASE cu Ti, Al, grafit și SiC au demonstrat că în procesul ASE au loc modificări esențiale, se formează acoperiri multicomponente. Mai mult ca atât, regimul energetic (valoarea energiei electrice) influențează substanțial asupra transformărilor structurale în acoperirile formate [10].

În tabelul 3.5 sunt prezentate calculele distanțelor interplanare pentru acoperirile formate la prelucrarea ASE succesivă cu electrozi din Ti, Al, grafit și SiC. Concomitent, pentru acoperirile multicomponente obținute în procesul ASE cu acești electrozi s-au efectuat calculele formațiunilor cristaline (tabelul 3.6).

Ca rezultat al proceselor rapide de formare a acoperirilor este posibilă apariția fazei amorse în structura acoperirilor (tabelul 3.7). Calculul gradului cristalinității acoperirilor formate a demonstrat că acesta depinde de condițiile tehnologice ale procesului (energia descărcărilor în impuls, durata prelucrării, forma mișcării electrozilor de prelucrare, natura materialului anodului etc.). Studiul morfologiei acoperirilor prin metoda scanării electronice a demonstrat existența fazelor nanodispersate, indiferent de regimul energetic al procesului și componența chimică a acoperirii.

Deși în sursele bibliografice [3, 6, 10, 110] s-a reflectat pe larg faptul că în procesul ASE formarea acoperirilor se efectuează drept rezultat al procesului micrometalurgic și amestecului hidrodinamic al materialelor anodului și catodului, trebuie să menționăm că, în cazul aplicării procedeele complexe, cu introducerea în interstițiu a pulberii, mecanismul formării acoperirilor diferă de cel de la procesul tradițional. În legătură cu aceasta, prezintă interes să urmărim redistribuirea elementelor în acest caz, inclusiv în stratul superficial. Aceste investigații s-au efectuat prin metoda radiației fluorescente secundare cu raze X. Razele X primare generate de tubul de raze X iradiază proba analizată și provoacă raze X secundare, al căror spectru depinde de compoziția probei. Un tub cu raze X este utilizat ca sursă de excitație. Calculul fracțiunii de masă a elementelor analizate se bazează pe dependența intensității radiației de funcția sa de masă din eșantion. La calculare se utilizează o versiune nestandardizată a metodei parametrilor fundamentali. Eșantionul studiat este iradiat cu un tub cu raze X. Ca urmare a interacțiunii radiațiilor cu raze X cu substanța din proba utilizată, apare radiația fluorescentă secundară, în spectrul căreia există linii caracteristice ale acelor elemente care alcătuiesc proba. Prezența liniilor acestui element în spectru indică existența sa în eșantion, iar intensitatea acestor linii permite judecarea concentrației elementelor cu dispozitiv de analiză a fluorescenței cu raze X. Spectrometrele XRF constau dintr-o unitate de control, un dispozitiv de înregistrare, un detector și un tub fluorescent cu raze X. Detectoarele sunt adaptate pentru un mod de funcționare în stare solidă și, prin urmare, sunt foarte des utilizate în puncte mari de colectare pentru metale feroase și neferoase, precum și pentru testarea materialelor compozite.

Tabelul 3.5. Rezultatele calculelor distanțelor interplanare pentru acoperirile multicomponente formate în procesul ASE

Nr.	Catodul, BT 6		Proba nr. 1		Proba nr. 2		Proba nr. 3		Proba nr. 4	
	d/n	I	d/n	I	d/n	I	d/n	I	d/n	I
1	4,702	2,61	4,665	4,90	5,031	5,05	3,76	2,7	3,76	4,86
2	2,559	3,69	4,352	5,22	4,627	5,49	3,39	4,75	3,39	6,86
3	2,344	74,75	3,956	3,83	4,344	5,31	3,13	5,14	3,13	8,4
4	2,245	31,39	3,393	7,24	4,058	4,56	2,51	33,59	2,51	4,13
5	1,727	14,26	2,831	4,18	3,371	7,47	2,35	7,00	2,35	54,68
6	1,474	3,16	2,758	4,23	2,810	5,18	2,31	7,85	2,31	6,13
7	1,332	29,50	2,487	57,45	2,488	64,84	2,24	19,16	2,24	9,11
8	1,247	5,36	2,308	34,18	2,332	37,06	2,16	31,45	2,16	18,77
9	1,232	2,59	2,152	68,71	2,236	8,15	1,92	6,09	1,92	40,16
10	1,170	5,44	2,029	13,19	2,154	77,11	1,83	2,21	1,83	9,13
11	1,122	1,08	1,994	10,34	2,027	17,11	1,72	3,10	1,72	4,01
12	1,103	0,53	1,927	5,6	1,994	11,24	1,63	1,90	1,63	2,82
13	1,064	5,39	1,720	3,39	1,928	7,07	1,60	1,68	1,60	20,59
14			1,521	32,62	1,725	3,10	1,52	15,86	1,52	2,46
15			1,516	26,13	1,703	3,15	1,47	3,03	1,47	2,18

16			1,432	8,98	1,668	3,44	1,42	2,32	1,42	3,46
17			1,408	5,59	1,521	35,03	1,41	3,02	1,41	3,14
18			1,361	2,98	1,472	3,27	1,37	2,71	1,37	3,31
19			1,331	5,42	1,431	10,34	1,33	5,75	1,33	8,04
20			1,297	15,75	1,405	6,21	1,30	7,42	1,30	10,98
21			1,239	11,06	1,381	2,88	1,26	2,54	1,26	3,72
22			1,222	8,06	1,363	3,37	1,25	7,26	1,25	8,41
23			1,202	5,16	1,329	5,03	1,17	1,66	1,17	2,09
24			1,168	5,06	1,298	18,11	1,15	1,83	1,15	2,04
25			1,148	3,86	1,242	12,06	1,12	1,65	1,12	1,51
26			1,075	4,86	1,223	9,04	1,10	1,91	1,10	2,27
27			1,062	92,98	1,204	5,13	1,09	1,31	1,09	1,81
28					1,171	5,86	1,07	2,18	1,07	3,03
29					1,180	4,13	1,06	1,66	1,06	1,66
30					1,070	4,90	1,04	1,79	1,04	2,93
31					1,060	2,72				

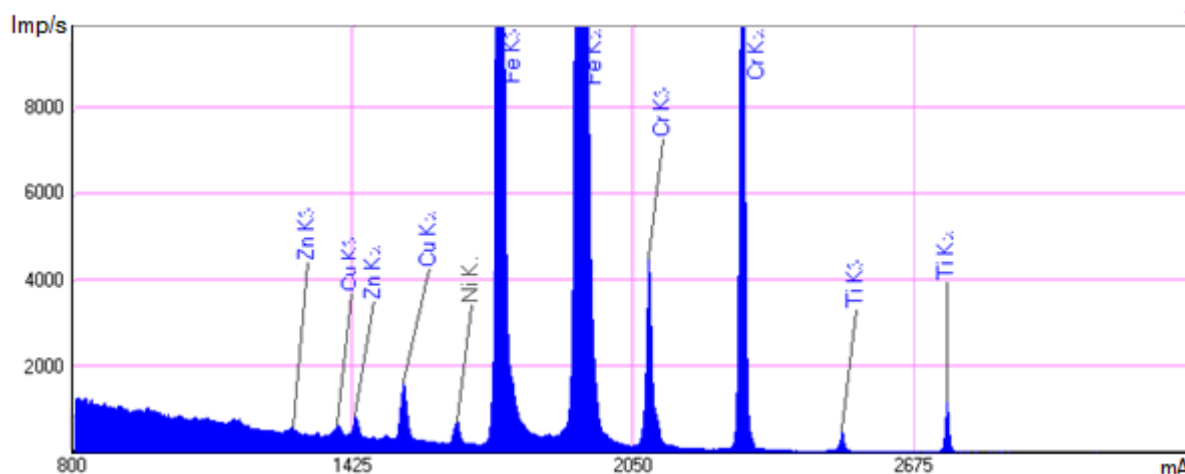
Tabelul 3.6. Dimensiunile fracțiunilor cristaline

Dimensiunea medie a cristalitelor	BT 6	Proba nr. 1	Proba nr. 2	Proba nr. 3	Proba nr. 4
$L, \text{\AA}$	61	58,5	58	50,8	60,5

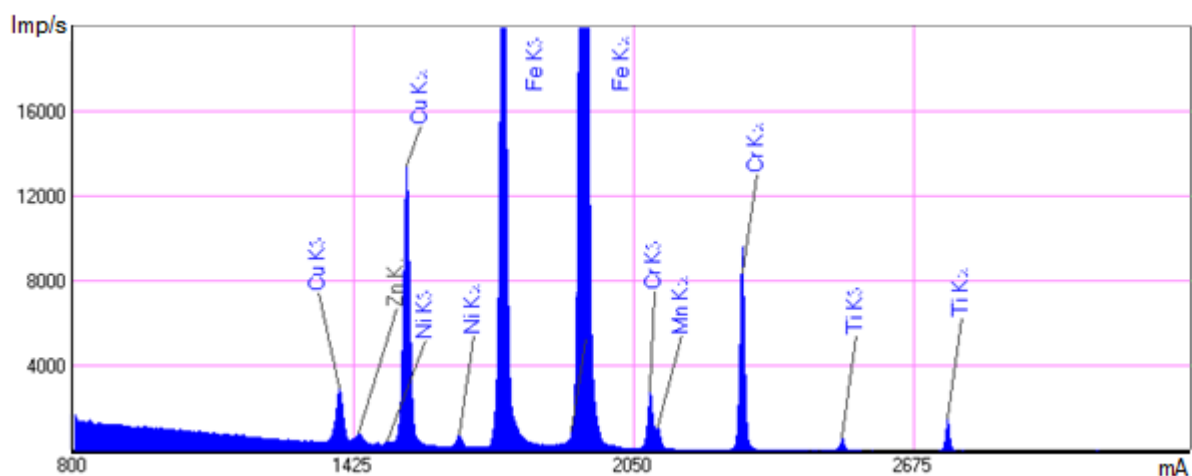
Tabelul 3.7. Gradul de cristalinitate a acoperirilor

Gradul de cristalinitate	BT 6	Proba nr. 1 TiAlC	Proba nr. 2 TiAlC	Proba nr. 3 TiSiC	Proba nr. 4 TiSiC
		Energia descărcării, 0,9 J	Energia descărcării, 0,3 J	Energia descărcării, 0,9 J	Energia descărcării, 3,0 J
$\omega, \%$	95	87	90	88	92

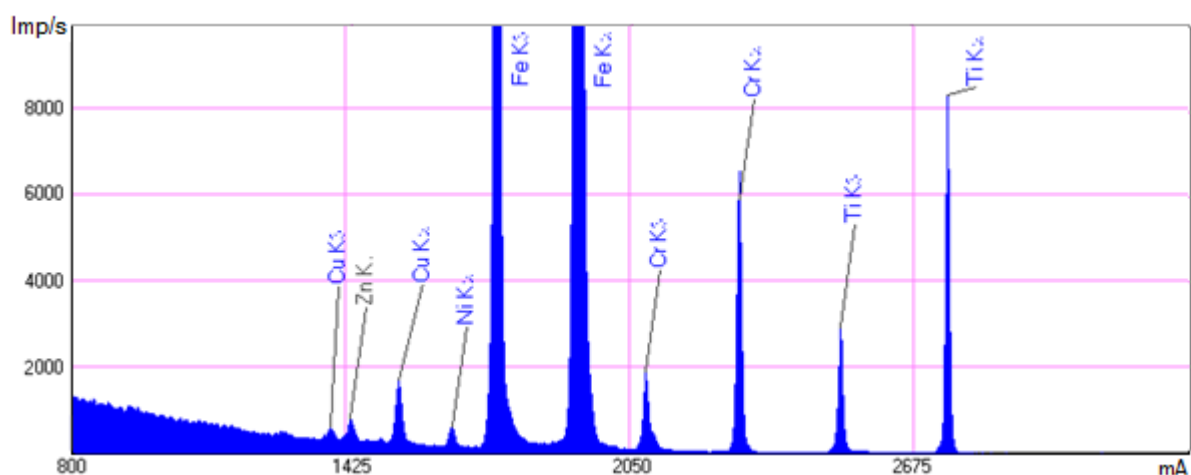
În figura 3.26 sunt prezentate spectrele radiației secundare obținute de pe acoperirile compozite Ti+Al+C, Ti+AlN, Ti+C și Ti+SiC pe probele din oțel inoxidabil 40X13 la regimul cu valoarea energiei descărcării de 0,9 J.



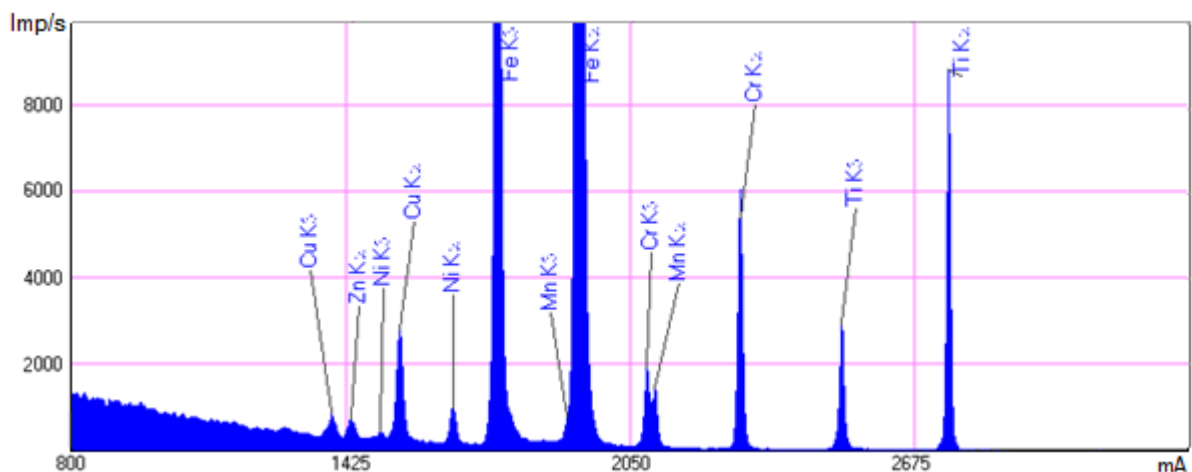
a)



b)



c)



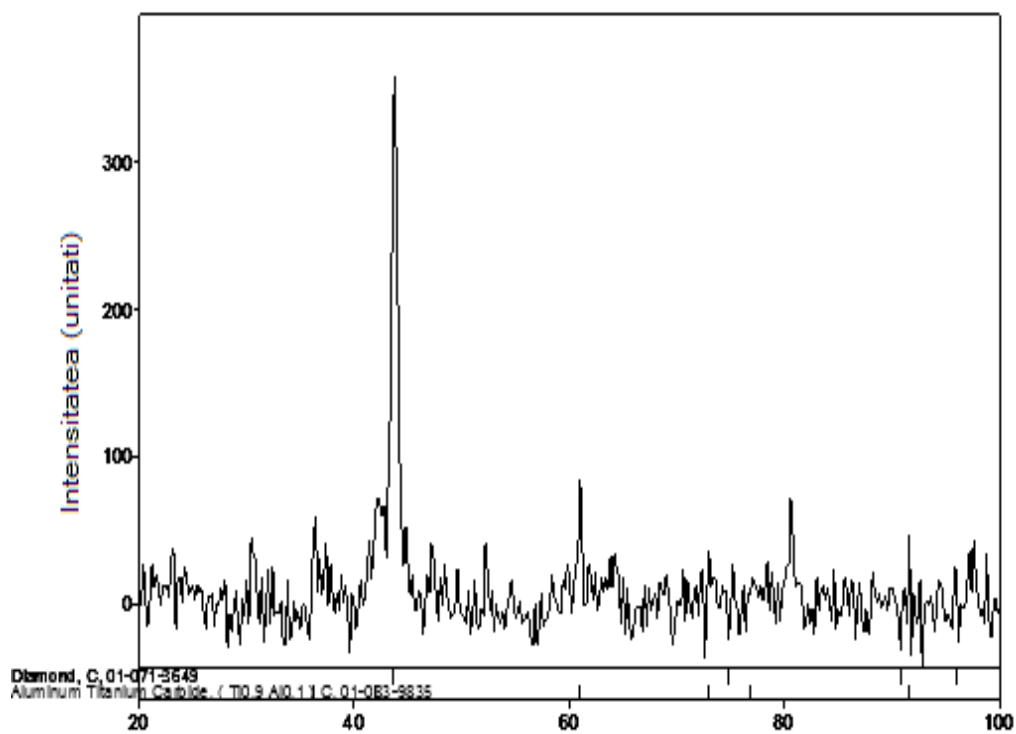
d)

Fig. 3.26. Spectrele acoperirilor din Ti+Al+C, Ti+AlN, Ti+C și Ti+SiC obținute prin metoda radiației fluorescente secundare cu raze X [6, 10]

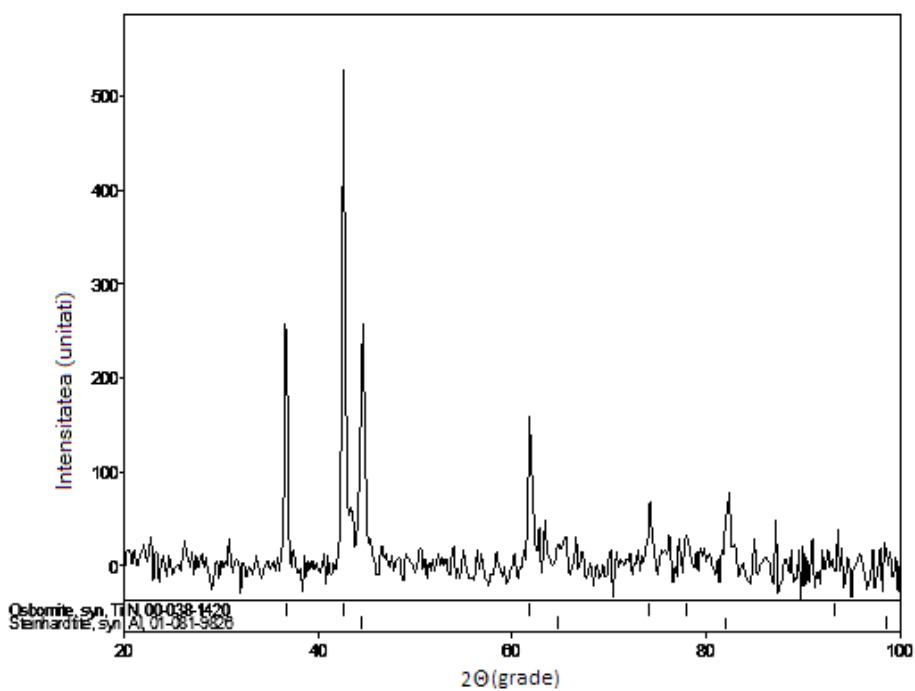
Rezultatele obținute ne permit să presupunem [6] că acoperirile Ti+AlN și Ti+C care conțin o cantitate mai mare de titan vor manifesta cea mai mare rezistență și adeziune. Restul elementelor chimice prezentate pe spectru aparțin materialului catodului (40X13). Concentrația de titan în

straturile superficiale constituie aproximativ 15% în raport cu cantitatea de fier a substratului catodului din oțel aliat 40X13. Rezultatele investigațiilor prin metoda cu raze X a acoperirilor formate pe oțelul aliat 40X13 sunt prezentate în figura 3.27.

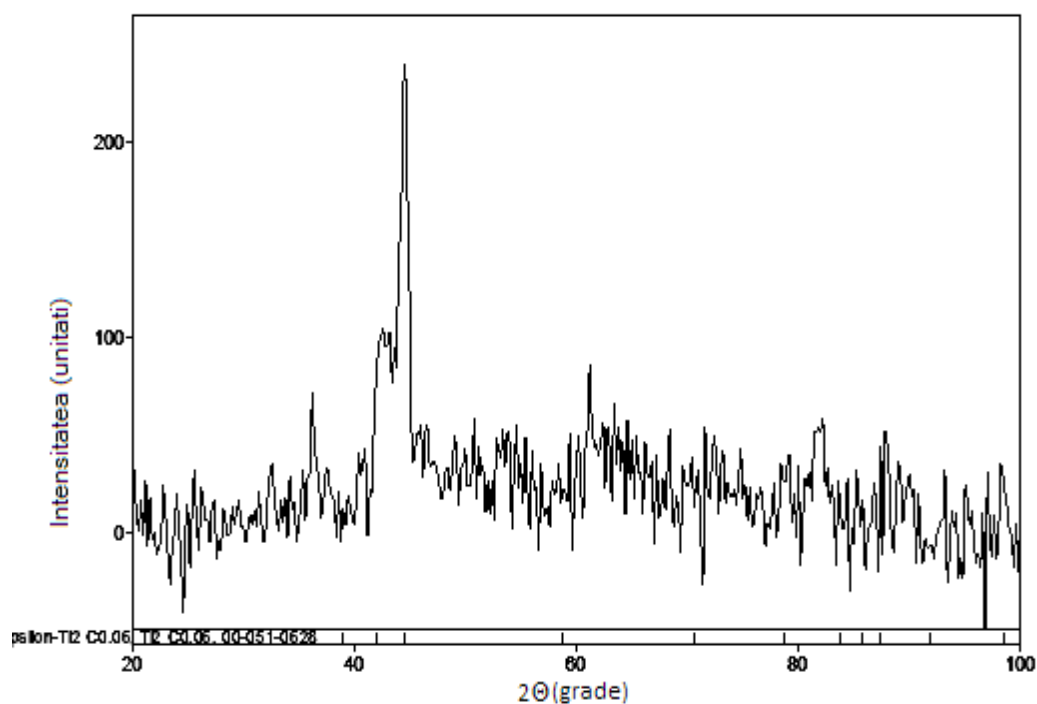
Conform analizei cu raze X, acoperirile obținute prin ASE prezintă niște formațiuni cristaline. O amortizare mai avansată se observă la acoperirile obținute la ASE cu Ti+C și Ti+SiC, fapt care ne confirmă modularea intensă a fondului radiogramelor [10].



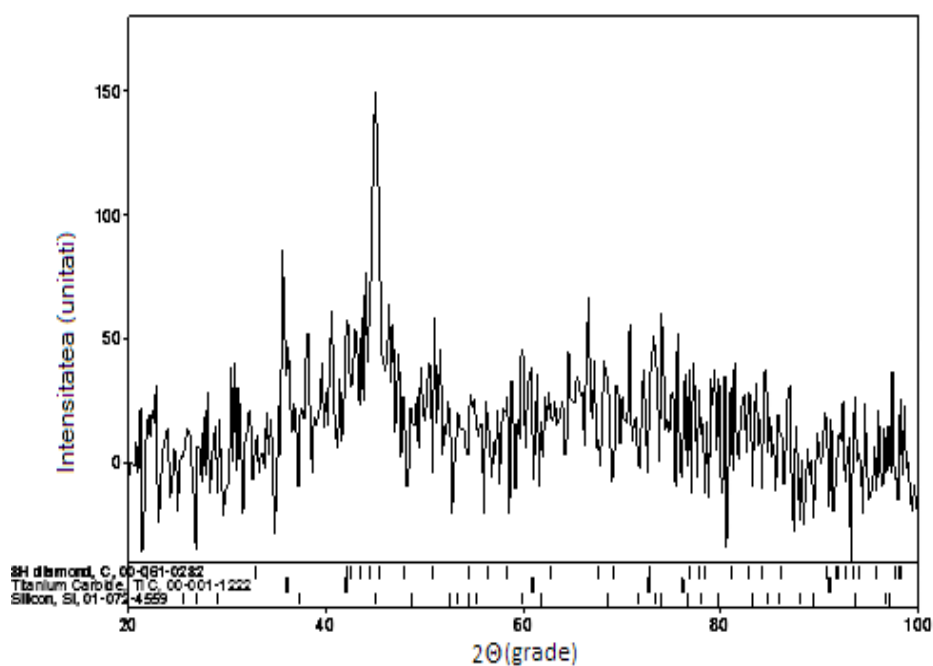
a.



b.



c.



d.

Fig. 3.27. Radiogramele acoperirilor formate pe suport din oțelul aliat 40X13 [10]

Componența amortizată a acoperirii a fost studiată utilizându-se ecuația Zernike-Princ. S-a stabilit că structura în partea amorfizată a acoperirilor din Ti+C și Ti+SiC posedă un grad mai înalt al ordinii în comparație cu celelalte acoperiri. Astfel, putem presupune că acoperirile menționate vor manifesta proprietăți fizico-mecanice mai înalte.

Concomitent, au fost studiate și morfologiile acoperirilor, aplicându-se microscopia cu scanare electronică. Aceasta ne-a demonstrat că, în funcție de materialul electrozilor utilizați, se schimbă și relieful suprafeței stratului depus (figura 3.28).

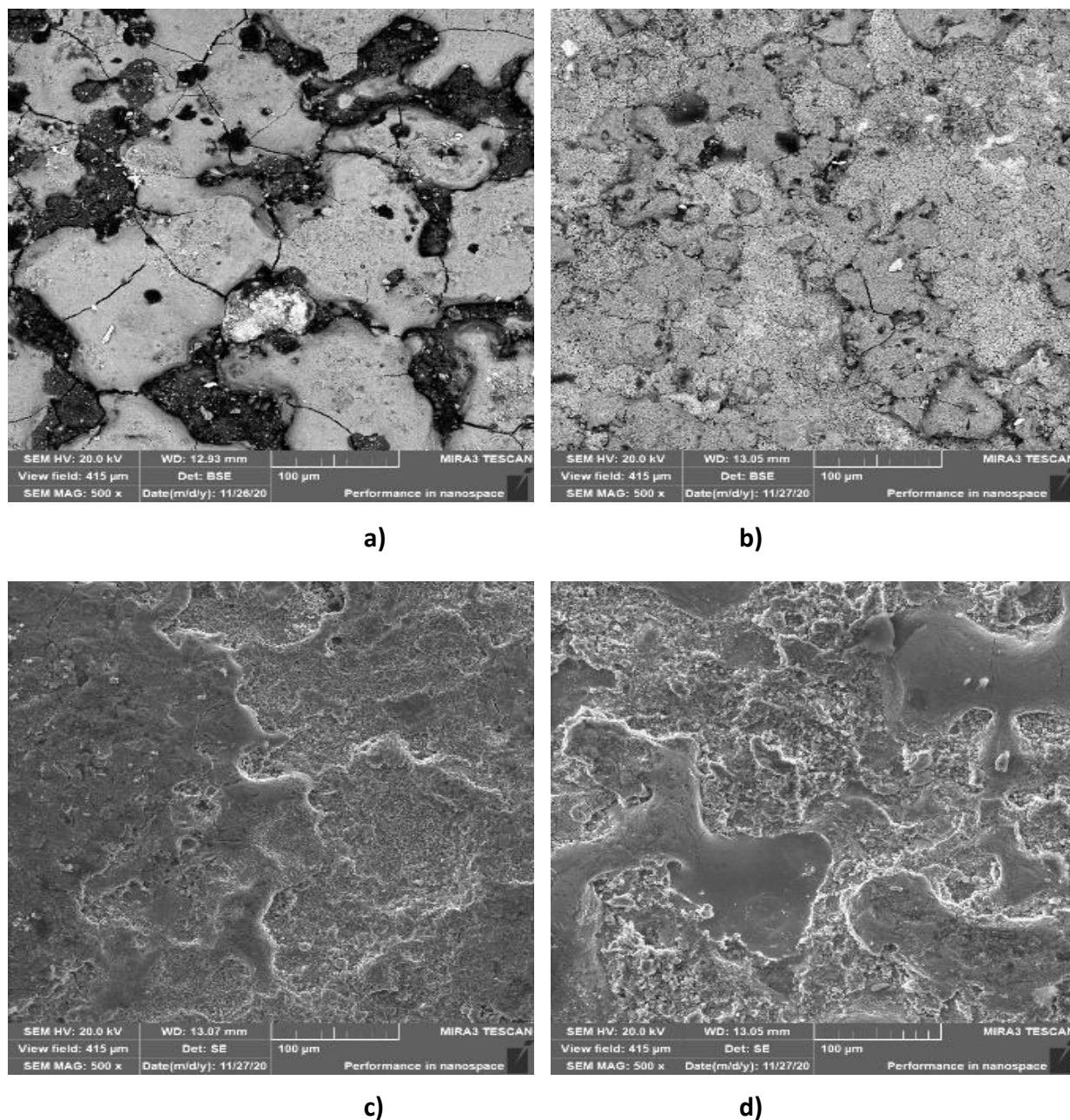


Fig. 3.28. Morfologia acoperirilor formate la ASE cu electrozi din Ti+Al+C (a), Ti+AlN (b), Ti+C (c) și Ti+SiC (d) [111]

Analiza imaginilor morfologiei acoperirilor ne prezintă informații despre structura acoperirii respective, în baza căreia putem judeca despre proprietățile fizico-mecanice ale acestora. De exemplu, analizând imaginea din figura 3.30, a, putem observa că aceasta conține mai multe defecte în formă de fisuri, ceea ce ne vorbește despre caracterul fragil al acoperirii. În afară de aceasta, se observă o continuitate scăzută a acoperirii.

Formarea acoperirii în urma prelucrării cu compusul Ti+AlN se caracterizează printr-o dispersare fină a structurii la același regim de prelucrare. În același timp, la ASE cu compuşii Ti+grafit, Ti+SiC se formează straturi cu continuitate mai înaltă în comparație cu cele obținute în urma prelucrării cu Ti+Al+C și Ti+AlN.

Mărirea rezoluției imaginilor suprafețelor studiate ne-a demonstrat formarea fazelor ce se află în limita diapazonului nanometric, ceea ce ne confirmă obținerea acoperirilor nanocompozite (figura 3.29).

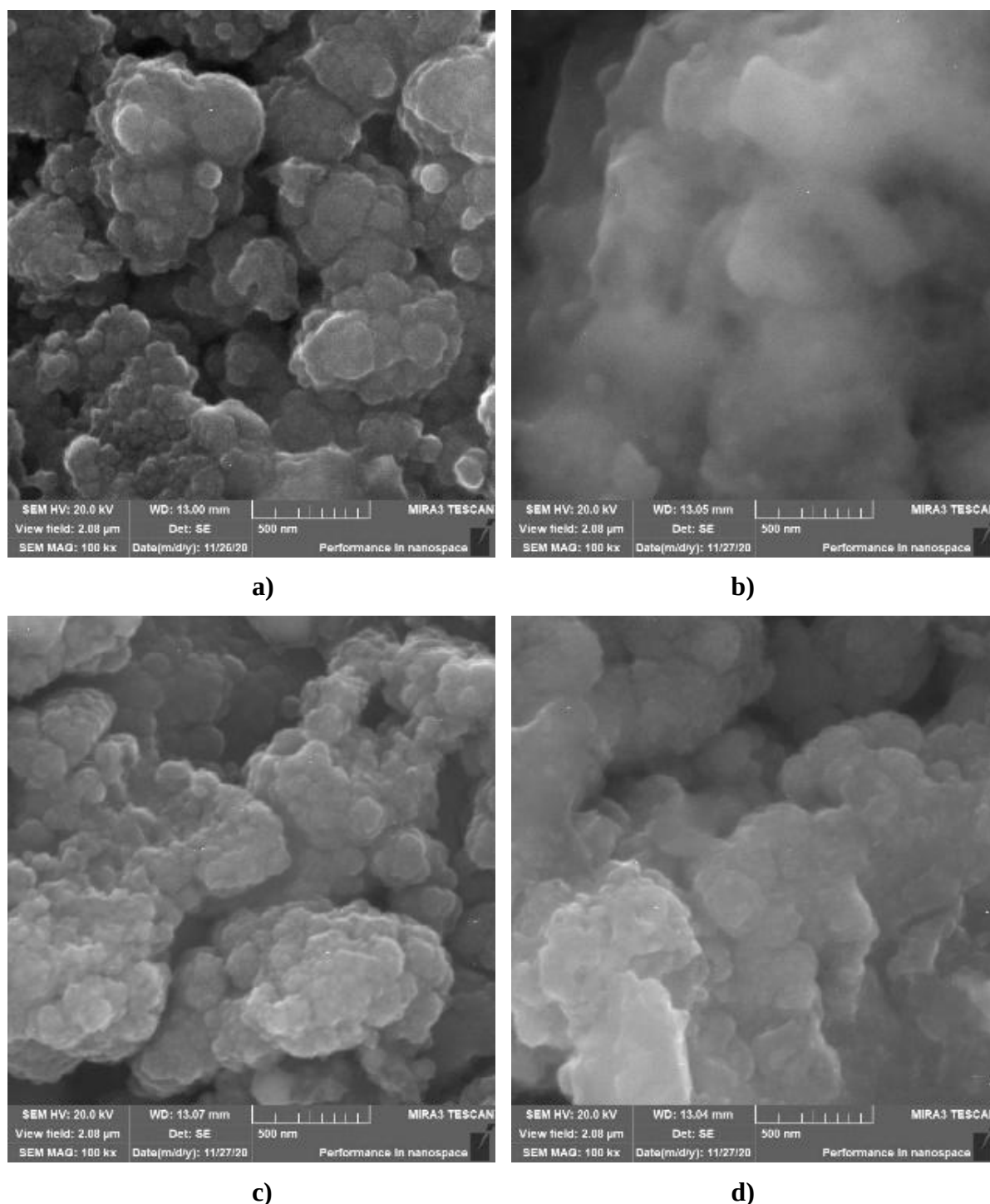


Fig. 3.29. Morfologia acoperirilor nanocompozite formate la ASE cu Ti+Al+C (a); Ti+AlN (b); Ti+C (c) și Ti+SiC (d); x3100 [111]

Măsurarea microdurității acoperirilor pe oțelul 40X13 a confirmat presupunerea privind creșterea caracteristicilor fizico-mecanice. Aceasta a crescut de la 1,8 până la 3,5 ori în raport cu microduratea suportului.

Prezența în zona descărcării a Ti, Si, Al, N și a grafitului contribuie la formarea structurilor amorfe cristaline. Compoziția amorfo - cristalină prezintă în sine un material trifazat compus dintr-o treaptă metalică amorfă din cristale de nanodimensiuni și ale fazei cristaline cu dimensiuni micrometrice.

Acoperirile formate ce conțin zone metalice amorfe în care lipsesc simetria translației pe termen lung și defecte cristaline posedă o limită mare a elasticității, rezistență înaltă la uzură și la coroziune [100-103].

Existența fazei nanocristaline în structura acoperirii, de asemenea, contribuie la obținerea unor proprietăți unice – îmbunătățirea caracteristicilor mecanice, chimice, fizice. Prezența în structura cristalină a acoperirilor compușilor ternari, de asemenea, comportă modificări substanțiale ale caracteristicilor de exploatare.

Astfel, interacțiunea sinergetică a celor trei faze induce la creșterea substanțială a caracteristicilor fizico-mecanice și de exploatare a acoperirilor obținute la alierea succesivă prin scânteii electrice cu electrozi din grafit, titan, aluminiu, carburi de siliciu (SiC) și nitruri de aluminiu (AlN).

3.8. Concluzii la capitolul 3

În urma realizării cercetărilor experimentale privind procesului de sintetizare a carburilor metalice la alierea succesivă prin scânteii electrice cu electrozi din metale tranzitorii din grupele IV – VI a sistemului periodic Ti, Ta, W, precum și din grafit, ca sursă de carbon, se pot trage următoarele concluzii:

În premieră, au fost efectuate cercetări sistematice privind sintetizarea carburilor metalice la alierea succesivă prin scânteii electrice cu electrozi din grafit și metale tranzitorii Ti, Ta, W și au fost stabilite legăturile de bază ale procesului de formare a acoperirilor cu înalte proprietăți fizico-mecanice.

1. A fost stabilit ca, este posibilă formarea depunerilor din Ti, Ta, W și grafit în vederea sinterizării aliajelor binare și ternare în straturile de suprafață cu proprietăți prescrise.

2. Prin îmbinarea într-un proces tehnologic unic a alierii prin scânteii electrice cu electrozi compacți (proces tradițional) și a procedeele de introducere în interstițiul a materialelor pulverulente, precum și prin utilizarea electrozilor cu rotații în plan perpendicular la suprafața de prelucrare, s-a reușit formarea straturilor de grosime, continuitate și uniformitate înalte.

3. S-au optimizat regimurile energetice și tehnologice de prelucrare, astfel încât valorile energiei de descărcare în impulsuri la care s-a obținut cea mai înaltă calitate a acoperirilor se încadrează în limita $(1,3 \div 3,0)$ J, iar ale curentului mediu – de $(1,5 \div 2,0)$ A la frecvența trecerii impulsurilor de la 100 la 200 Hz. Dintre parametrii tehnologici s-au evidențiat, în primul rând, forma mișcării electrozilor de prelucrare – rotația acestora în plan perpendicular la suprafața de prelucrare, la frecvența contactului cu suportul de aproximativ 100 Hz. Iar în al doilea rând, utilizarea în calitate de elemente de aliere a pulberii metalice și a compușilor metalici care contribuie la creșterea productivității procesului și a grosimii acoperirilor depuse (anexă).

4. S-a stabilit că, la prelucrarea complexă cu electrozi compacți și pulberi metalice, se pot obține acoperiri nano structurate, precum și componente în stare amorfă în aceste acoperiri.

5. Aplicând prelucrarea succesivă cu electrozi compacți și pulberi metalice, au fost sintetizați compușii ternari MAX-faze de tip Ti_2AlC , Ti_2AlN și Ti_3SiC_2 cu înalte proprietăți fizico-mecanice și de exploatare.

6. A fost stabilit ca caracterul straturilor formate este unul amorfo-cristalin, fapt demonstrat prin analize X și scanarea prin metoda microscopiei electronice.

7. Elaborarea variantei noi a alierii prin scânteii electrice utilizând prelucrarea succesivă cu electrozi din grafit, titan, tantal și wolfram a creat premise de înlocuire a electrozilor standardizați de tip „BK” și „TK” dispăruți de pe piață.

4. INVESTIGAȚII PRIVIND PROPRIETĂȚILE FIZICO-CHIMICE ALE ACOPERIRILOR OBTINUTE LA ALIEREA PRIN SCÂNTEI ELECTRICE CU ELECTROZI DIN GRAFIT, Ti, Ta, W ȘI COMPUȘII ACESTORA

Soluționarea problemei legate de creșterea duratei de viață a mașinilor depinde direct de creșterea rezistenței la uzură și a fiabilității unităților de frecare. În marea varietate a condițiilor de lucru ale pieselor, cel mai încărcat dintre ele este stratul superficial. Prin urmare, durata reală de viață a mașinii depinde direct de capacitatea portantă a straturilor superficiale.

În acest capitol s-au studiat proprietățile tribologice ale acoperirilor formate pe suprafața oțelului carbon C45, oțelului inoxidabil Cr18Ni10Ti, oțelului aliat 40X13 și a aliajului de titan BT6. Acoperirile pe aceste aliaje au fost formate ca în rezultat al alierii succesive prin scântei electrice, utilizându-se electrozi din grafit, titan, tantal, wolfram și unele elemente cum ar fi aluminiu, nitrura de aluminiu (AlN), carbura de siliciu (SiC). Electrozii din metalele și compușii respectivi au fost selectați din perspectiva obținerii fazelor cu conținut de carbon (carburi metalice), precum și MAX-faze care de asemenea, reprezintă niște carburi complexe cu proprietăți fizico-chimice înalte [67–70, 76, 81, 85, 86], iar molibdenul (Mo) a fost selectat în calitate de element model ce posedă proprietăți antifricționale deosebite și se utilizează pentru depunerea acoperirilor pe suprafețele de lucru ale pieselor motoarelor cu ardere internă [19].

4.1. Evaluarea proprietăților tribologice ale oțelului C45 supus alierii prin scântei electrice cu electrozi din molibden și compuși ternari (TiAlC, TiAlN și TiSiC)

Încercările tribologice ale probelor durificate cu materialele indicate mai sus au fost efectuate pe un tribometru automat cu piston, echipat cu un dispozitiv special conceput pentru înregistrarea forței de frecare. Acoperirile au fost depuse pe probe din oțel C45 cu dimensiuni de 5x8x6 mm, mai ales pe suprafața cu dimensiuni de 5x8 mm. Au fost determinate proprietățile tribologice ale acoperirilor din grafit, Mo, Ti+Al+C, Ti+AlN și din Ti+SiC, iar în calitate de contracorp a fost utilizat oțelul de scule OSC8 (HV = 7800÷8000 MPa) cu dimensiuni de 2x40x90 mm, suprafața căruia în prealabil a fost rectificată și lustruită [72].

Testarea tribologică a acoperirilor a fost efectuată la o sarcină specifică de 2 MPa în condiții de frecare uscată. Tot timpul de testare a fost împărțit în 4 perioade: primele 30 de minute (2250 de cicluri – distanță de alunecare de 135 m); a doua – 45 de minute (3375 de cicluri – distanță de alunecare de 202,5 m); a treia – 75 de minute (5625 de cicluri – distanța de alunecare de 337,5 m),

iar în a patra perioadă – 75 de minute. Contracorpul a realizat mișcări alternative cu o amplitudine de 30 mm. Viteza medie de mișcare a contracorpului în timpul testării a fost de 0,075 m/s, sau 75 de cicluri pe minut.

Măsurările uzurii probelor prismatice au fost efectuate prin metoda gravimetrică, folosind balanța analitică ADV-200M. Eroarea la măsurarea masei probei a constituit 0,05 mg. Înainte de cântărire, produsele uzurii au fost îndepărtate cu atenție de pe suprafața probelor și apoi probele au fost spălate cu alcool și uscate într-un cuptor special la o temperatură de 100 °C. După uscare, probele au fost cântărite cu ajutorul cântarului analitic. Fiecare probă a fost cântărită de cel puțin de 2÷3 ori.

Forța de frecare (F), ce rezultă din deplasarea reciprocă a suprafețelor de contact, a fost înregistrată cu ajutorul unui dinamometru. Deformarea elementului elastic al dinamometrului a fost transformată, folosind un amplificator de tensiune standard, într-un semnal electric, care a fost introdus într-un computer printr-un dispozitiv special. După fiecare minut al testării, forța de frecare a fost înregistrată de 3000 de ori în 3 secunde. Cu ajutorul unui program special, valorile forței de frecare au fost transformate în valori ale coeficienților de frecare. Valorile măsurate ale coeficienților de frecare au fost supuse procesării statistice, iar capacitatea medie a F a fost determinată după fiecare minut de testare.

Cauza principală a uzurii materialelor este setarea aderenței suprafețelor de contact, însoțită de o gripare a unităților de frecare. Astfel de procese sunt, de obicei, implementate cu funcționarea dispozitivelor de frecare în condiții de presiuni mari de contact, frecare fără ungere sau cu ungere insuficientă, precum și atunci când se lucrează în zona temperaturilor ridicate. În acest sens, pentru a evalua rezistența de distrugere în contact a acoperirilor, acestea au fost măsurate în condiții de frecare fără vreun lubrifiant (frecare uscată).

Măsurarea rugozității eșantioanelor înainte și după testele tribologice a fost efectuată cu ajutorul unui profilograf Surtronic 25. Microduritatea inițială a eșantioanelor acoperite cu diferite materiale a fost măsurată cu microdurimetrul PMT-3. Suprafața de frecare a eșantioanelor a fost studiată cu ajutorul microscopului optic NEOPHOT-30.

Pentru o mai bună comparație a rezistenței la uzură a acoperirilor, a fost determinat volumul real de uzură (V_u) al fiecărui tip de acoperiri în, mm^3 (ținându-se cont de densitatea fiecărui tip de acoperiri), și apoi uzura lor liniară h (μm) a fost determinată, ținându-se cont de suprafața fiecărui tip de acoperiri. Ulterior au fost determinate atât intensitatea de uzură a acoperirilor în $\mu\text{m}/\text{min}$, pentru fiecare perioadă de uzură, cât și intensitatea de uzură medie pentru întreaga perioadă de uzură.

În tabelul 4.1 este prezentată intensitatea de uzură (I_h) a acoperirilor în perioadele de încercare 1 – 4 și intensitatea medie de uzură I_h după un timp total de încercare de 225 minute (sau după o distanță de alunecare de 1012,5 m).

Din analiza tabelului 4.1 se poate vedea că cea mai mică intensitate a uzurii de 0,0031 $\mu\text{m}/\text{min}$. a manifestat-o acoperirea Ti+AlN (în a doua perioadă de încercare), iar cea mai mare intensitate de uzură a oțelului neacoperit a constituit 0,178 $\mu\text{m}/\text{m}$ și s-a stabilit în prima perioadă de încercare. Acoperirea de Mo a avut cea mai mică intensitate de uzură în prima, a treia și a patra perioadă – 0,0143, 0,0039 și, respectiv, 0,0089 $\mu\text{m}/\text{min}$.

În prima perioadă de testare, intensitatea uzurii a crescut pe direcția Mo→Ti+Al+grafit→Ti+SiC→Ti+AlN→C45;

în a doua perioadă de testare – Ti+AlN→ Mo → Ti+SiC→Ti+Al + grafit→C45;

în a treia perioadă de testare – Mo→ Ti+SiC→Ti+Al+grafit→Ti+AlN→C45;

în a patra perioadă de testare – Mo→Ti+SiC→Ti+AlN→Ti+Al+grafit→C45.

Din tabelul 4.1 se vede că cea mai mică intensitate medie de uzură pe întreaga perioadă de testare a manifestat-o acoperirea din Mo. Intensitatea medie de uzură a crescut pe direcția Mo→Ti+SiC→Ti+AlN→Ti+Al+grafit→oțel C45. Prin urmare, după calcularea intensității de uzură medie a acoperirilor, s-a demonstrat că cea mai mare rezistență la uzură a manifestat-o acoperirea de Mo, după care a urmat acoperirea Ti+SiC [96].

Tabelul 4.1. Intensitatea uzurii acoperirilor pentru fiecare perioadă de testare și intensitatea medie de uzură I_h pentru toate perioadele tribologice studiate

Nr.	Material de acoperire	Intensitatea uzurii I_h acoperirii pentru fiecare perioadă de încercare ($\mu\text{m}/\text{min}$.)				Intensitatea medie de uzură $I_{h\text{medie}}$ ($\mu\text{m}/\text{min}$.)
		În prima perioadă	În a doua perioadă	În a treia perioadă	În a patra perioadă	
1.	C45 neacoperit	0.1290	0.1780	0.14100	0.1240	0.14800
2.	Mo	0.0143	0.0060	0.00390	0.0089	0.00749
3.	Ti + Al + C	0.0147	0.0570	0.01100	0.1110	0.03800
4.	Ti + AlN	0.0330	0.0031	0.01267	0.0283	0.02280
5.	Ti + SiC	0.0168	0.0064	0.00800	0.0100	0.01000

În figura 4.1 este prezentat graficul uzurii acoperirilor după fiecare perioadă de testare și după patru perioade de testare (225 minute), în care contracorpul a efectuat 16 875 de cicluri și a parcurs distanța de alunecare de 1 012,5 m. Trebuie de menționat că acestea sunt rezultatele obținute imediat după cântărirea probelor. S-a constatat că toate acoperirile reduc uzura probelor de oțel – de la 8,2 până la 32,8 ori (după patru perioade de testare tribologică). Se vede clar că acoperirea Ti+SiC a manifestat cea mai mare rezistență la uzură. De asemenea, vom remarca faptul că acoperirile sunt diferite după densitate, astfel încât pentru o comparație mai precisă a rezistenței

la uzură a acestora, a fost determinată intensitatea uzurii (I_h) pentru fiecare tip de acoperire, așa cum s-a menționat în partea experimentală.

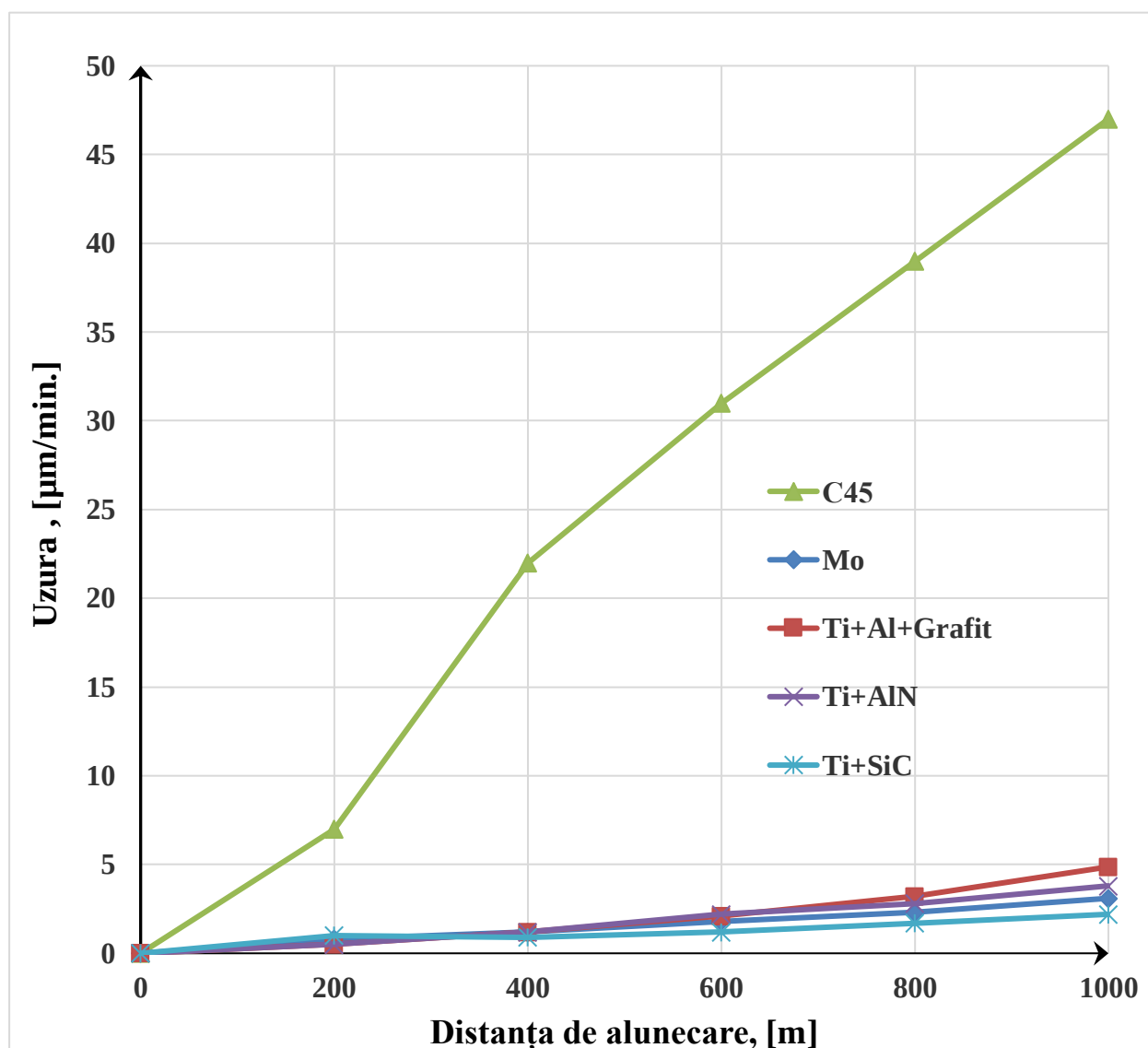


Fig. 4.1. Uzura liniară a acoperirilor după patru perioade de teste tribologice cu o sarcină specifică de 2 Mpa [115]

În figurile 4.2–4.5 este prezentată intensitatea uzurii în perioadele de testare 1–4, iar figura 4.6 prezintă intensitatea medie de uzură a acoperirilor după o perioadă de testare de 225 minute, sau după o distanță de alunecare de 1 012,5 m. Analizând figurile 4.2–4.5, se poate observa că cea mai mică intensitate de uzură de $3,15 \times 10^{-3} \mu\text{m/min.}$ au manifestat-o acoperirile din Ti+AlN în a doua perioadă de testare.

În figurile 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 și 4.6 sunt prezentate histogramele intensității uzurii acoperirilor în raport cu proba din oțel C45 neacoperită, pentru toate perioadelor de încercări tribologice.

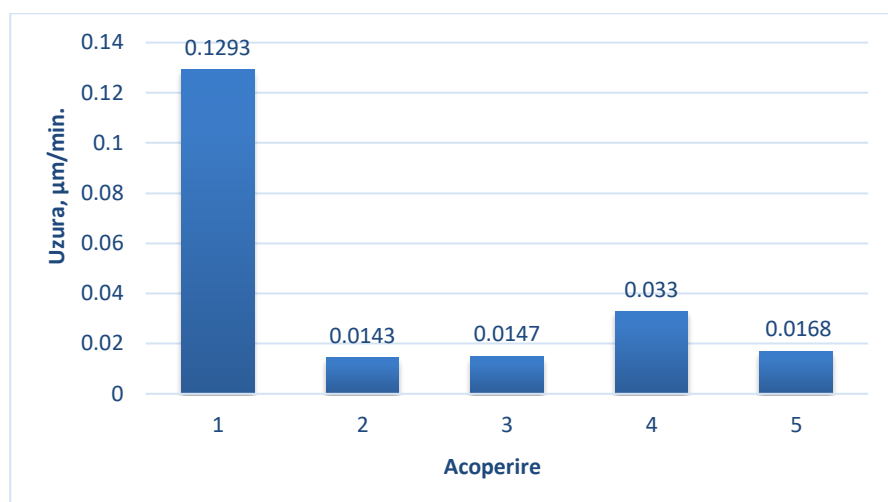


Fig. 4.2. Intensitatea uzurii (I_h) acoperirilor în prima perioadă cu o durată de 30 de minute: 1 – C45; 2 – Mo; 3 – Ti+Al+C; 4 – Ti+AlN; 5 – Ti+SiC [115]

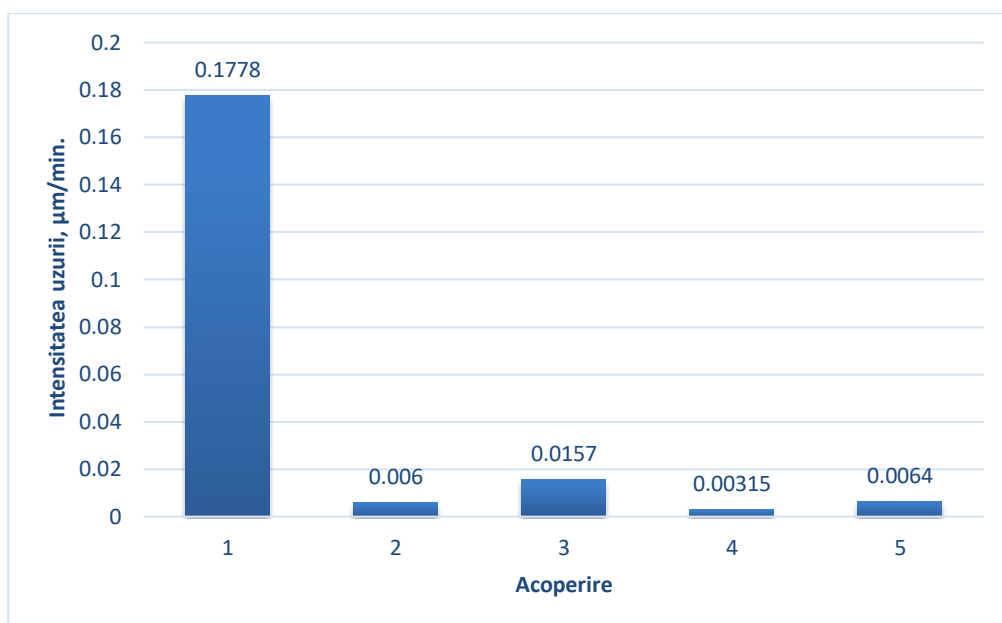


Fig. 4.3. Intensitatea uzurii (I_h) acoperirilor în a doua perioadă cu o durată de 45 de minute: 1 – C45; 2 – Mo; 3 – Ti+Al+C; 4 – Ti+AlN; 5 – Ti+SiC [115]

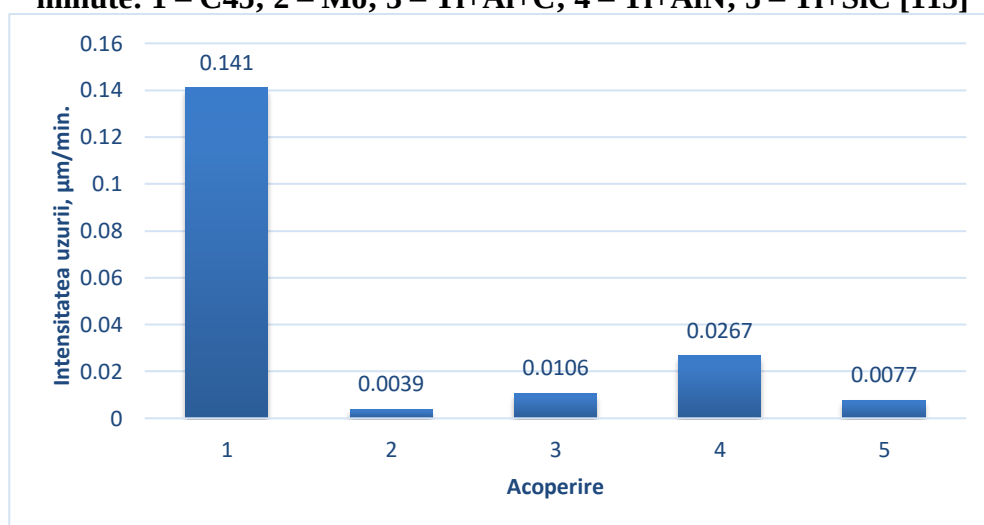


Fig. 4.4. Intensitatea uzurii (I_h) acoperirilor în a treia perioadă cu o durată de 75 de minute: 1 – C45; 2 – Mo; 3 – Ti+Al+C; 4 – Ti+AlN; 5 – Ti+SiC [115]

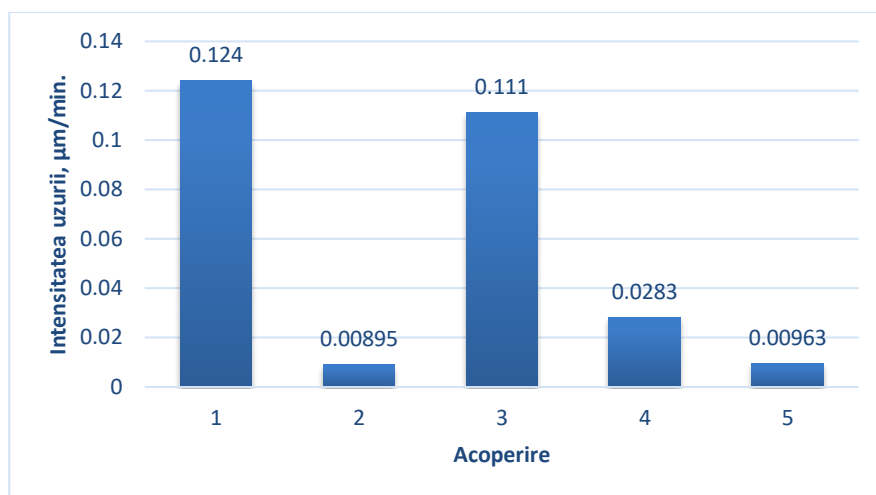


Fig. 4.5. Intensitatea uzurii (I_h) acoperirilor în a patra perioadă cu o durată de 75 de minute: 1 – C45; 2 – Mo; 3 – Ti+Al+C; 4 – Ti+AlN; 5 – Ti+SiC [115]

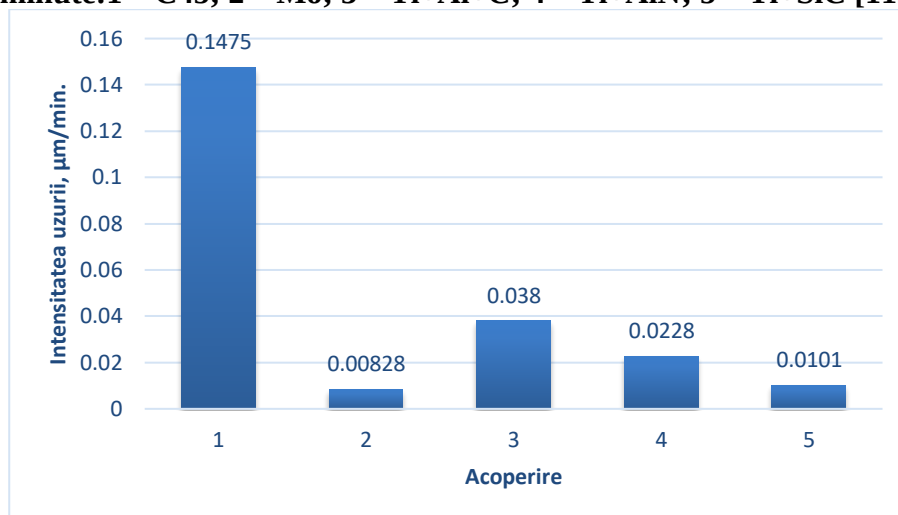


Fig. 4.6. Intensitatea medie a uzurii (I_h) straturilor de acoperire pentru toată perioada studiilor tribologice: 1 – C45; 2 – Mo; 3 – Ti+Al+C; 4 – Ti+AlN; 5 – Ti+SiC [115]

Analiza intensității uzurii acoperirilor a demonstrat că acoperirile cu Mo și Ti+SiC pot fi utilizate mai eficient în condițiile de frecare descrise mai sus. Astfel, intensitatea medie a uzurii acoperirii cu molibden a fost de 2,75 ori mai mică decât a acoperirii din Ti+AlN și de 4,6 ori mai mică decât a acoperirii din Ti+Al+C. Trebuie remarcat faptul că rezistența sporită a uzurii acoperirii din Mo se datorează nu numai microdurității acesteia (tabelul 4.1), ci și aderenței ridicate a molibdenului la materialul de bază. Este evident că microduritatea acoperirii din Ti+SiC este mai mare (tabelul 4.1) decât cea a acoperirii cu molibden. Cu toate acestea, acoperirea din Ti+SiC are o intensitate de uzură de 1,2 ori mai mare decât cea a acoperirii cu molibden. Considerăm că, în primul rând, carbura de siliciu are o aderență mai mică la materialul de bază, la oțelul C45, decât molibdenul. Dar, pe de altă parte, SiC posedă o fragilitate cu mult mai mare decât a molibdenului și, în consecință, acoperirea formată este mai fragilă și mai puțin omogenă, fapt care denotă că în

procesul frecării are loc o desprindere a unor porțiuni ale materialului stratului format. Prin urmare, intensitatea medie a uzurii stratului depus este mai mare.

Astfel, intensitatea medie de uzură a stratului format la ASE cu electrod din molibden a fost de 3,0 ori mai mică decât cea a acoperirii din Ti+AlN, de 5,07 ori mai mică decât cea a acoperirii din Ti+Al+C și de 20 de ori mai mică decât cea a oțelului C45 neacoperit. De menționat că rezistența înaltă la uzură a acoperirii Mo este cauzată nu numai de duritatea înaltă a acesteia, dar și de rugozitatea inițială scăzută (tabelul 4.2) și de cea mai mică rugozitate inițială (tabelul 4.3), dar și de o aderență sporită a molibdenului la materialul de bază, formând compuși intermetalici (Fe_2Mo_3 și Fe_7Mo_3) (tabelul 4.4) [115].

Tabelul 4.2. Microduritatea inițială a acoperirilor obținute de ASE pe C45 [115]

Nr.	Materialul acoperirii	Microduritatea H_{μ} determinată la sarcina de 0,98 N, (MPa)		
		Microduritatea maximă	Microduritatea medie	Microduritatea minimă
1.	Mo	10000	7920	4740
2.	Ti + Al + C	7350	3990	2450
3.	Ti + AlN	6800	3920	3100
4.	Ti + SiC	13810	9650	6800
5.	C45 neacoperit	2160	-	-

Tabelul 4.3. Variația parametrilor rugozității (R_a , R_z) acoperirilor ASE înainte și după testele tribologice [115]

Nr.	Materialul acoperirii	Rugozitate inițială, (μm)		Ruperea acoperirilor după teste tribologice, (μm)	
		R_a	R_z	R_a	R_z
1.	Mo	2.90	15.46	2.70	13.94
2.	Ti + Al + C	4.42	23.88	4.93	28.58
3.	Ti + AlN	3.29	18.30	2.19	7.51
4.	Ti + SiC	4.51	21.32	3.55	19.72
5.	C45 neacoperit	0.63	2.96	4.03	20.54

Cât privește acoperirea din Ti+SiC, aceasta a avut o intensitate de uzură de 1,35 ori mai mare decât cea a acoperirii cu Mo și se explică prin rugozitatea mai sporită în raport cu cea a molibdenului (tabelul 4.3).

Tabelul 4.4. Componenta fazică a acoperirilor formate prin ASE pe oțelului C45 [115]

Nr.	Materialul acoperirii	Compoziția fazelor
1.	C45	α -Fe
2.	Mo	Fe_2Mo_3 , Fe_7Mo_3 , α -Fe
3.	Ti, Al, C	TiO_2 , FeO, TiN, γ -Fe, Fe_3C , AlFe ₃ , α -Fe
4.	Ti, AlN	TiO_2 , AlN, TiN, FeO, α -Fe, γ -Fe
5.	Ti, SiC	SiO_2 , TiO_2 , Fe_3C , TiC, FeO, α -Fe, γ -Fe

Figurile 4.7 și 4.8 ne demonstrează variațiile valorilor medii ale coeficienților de frecare ai acoperirilor în timpul testelor tribologice în prima perioadă de testare (perioada de rulare) pe o perioadă de 30 de minute (2 250 de cicluri) și în a patra perioadă de testare pe o perioadă de 75 de minute (5 625 de cicluri). Din figura 4.7 se vede că, chiar și de la începutul testelor, valorile medii ale coeficienților de frecare cresc continuu, iar după 12 minute ating valoarea de 1,1 (pentru acoperirea din Ti + SiC). Cu toate acestea, în primele 10 minute, valorile medii ale coeficienților de frecare cresc la straturile din Ti+Al+C și Ti+AlN. S-a observat că, din minutul opt al încercărilor, coeficienții de frecare a stratului din Ti+AlN s-au stabilizat între valorile 0,75 – 0,8, iar cei ai acoperirii din Ti+Al+C – între 0,79 – 0,84. Trebuie menționat că valorile medii ale coeficienților de frecare atât ale acoperirilor din Mo și Ti+SiC după al doisprezecelea minut până la sfârșitul perioadei de testare au fost cele mai mari – între 0,89 – 1,12. Suprafețele de contact ale acoperirilor în procesul de frecare au fost mult mai mici decât suprafețele nominale. Acest lucru se datorează faptului că proeminențele rugozității acoperirilor sunt foarte dure și, în procesul de frecare, are loc o creștere a presiunii și a coeficientului de frecare. Cu toate acestea, din tabelul 4.1 și figura 4.7 se poate observa o corelație clară: cu cât duritatea acoperirii este mai mare, inclusiv a oțelului C45 neacoperit, cu atât este mai mare coeficientul de frecare (după stabilizare peste 8-12 minute), și invers.

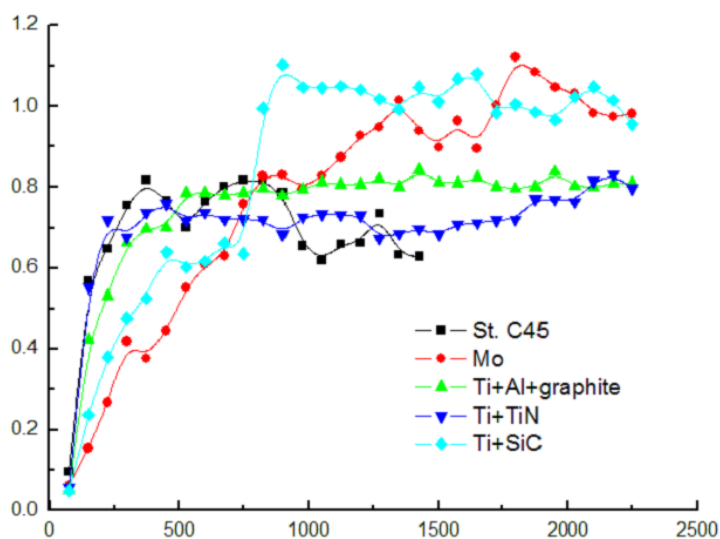


Fig. 4.7. Variațiile valorilor medii ale coeficienților de frecare ai acoperirilor în timpul testelor tribologice din prima perioadă de testare [115]

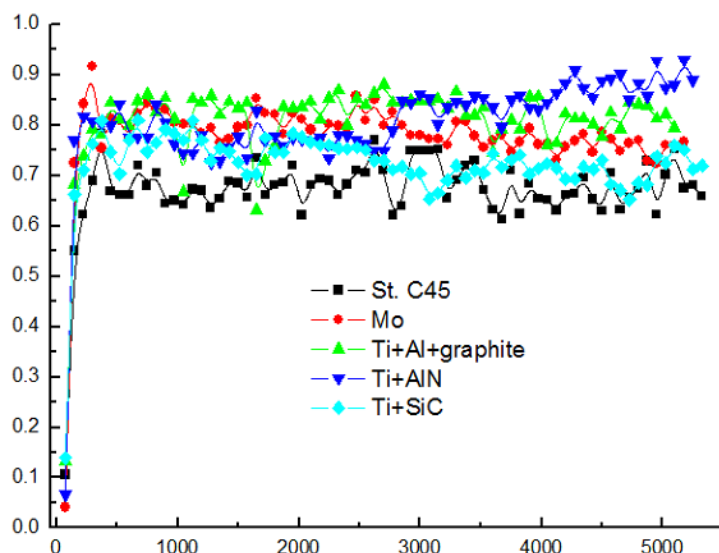
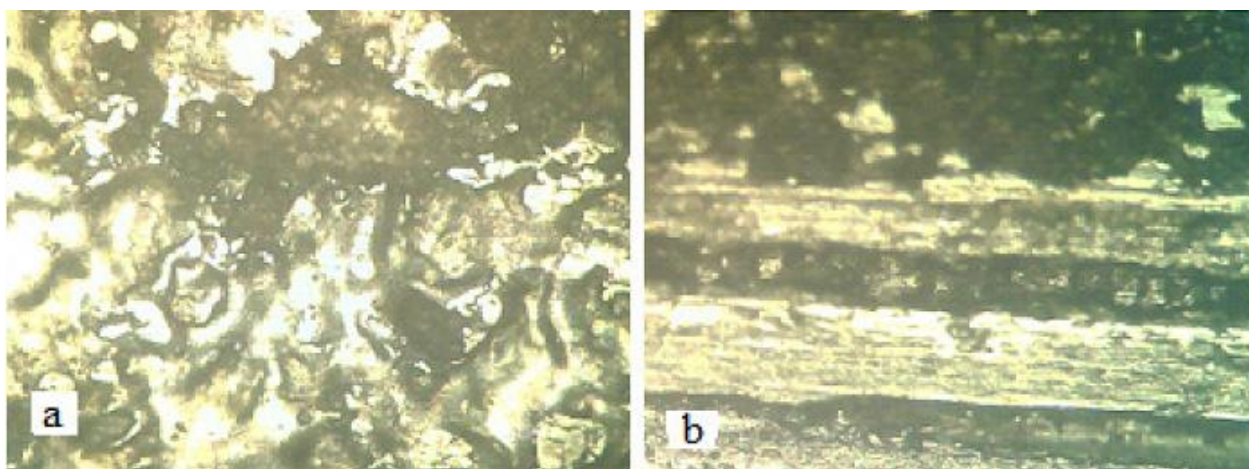


Fig. 4.8. Variațiile valorilor medii ale coeficienților de frecare ai acoperirilor în timpul testelor tribologice în a patra perioadă de testare [115]

După cum se vede în figura 4.8, coeficienții de frecare ai acoperirilor au variat pe întreaga perioadă de testare. Valoarea coeficienților de frecare a avut o tendință de creștere în direcția oțelului C45→Ti+SiC→Mo→Ti+Al+C→Ti+AlN. Trebuie menționat că, dacă în prima perioadă de testare tribologică a acoperirilor (figura 4.7) cele mai mari valori ale coeficienților de frecare au fost stabilite atât pentru acoperirile din Ti+SiC, cât și pentru Mo, apoi în a patra perioadă aceleași acoperiri au manifestat cele mai mici valori ale coeficienților de frecare (figura 4.8). Acest rezultat ne demonstrează că și în procesul interacțiunii mecanice a materialelor se evidențiază natura acestora (legătura atomică, tipul rețelei cristaline, structura ș. a.). Astfel, în funcție de acești parametri se manifestă și aderența materialelor acoperirilor respective la materialul contracorpului din oțel C45. Aceasta a fost mai scăzută decât a altor materiale [116].



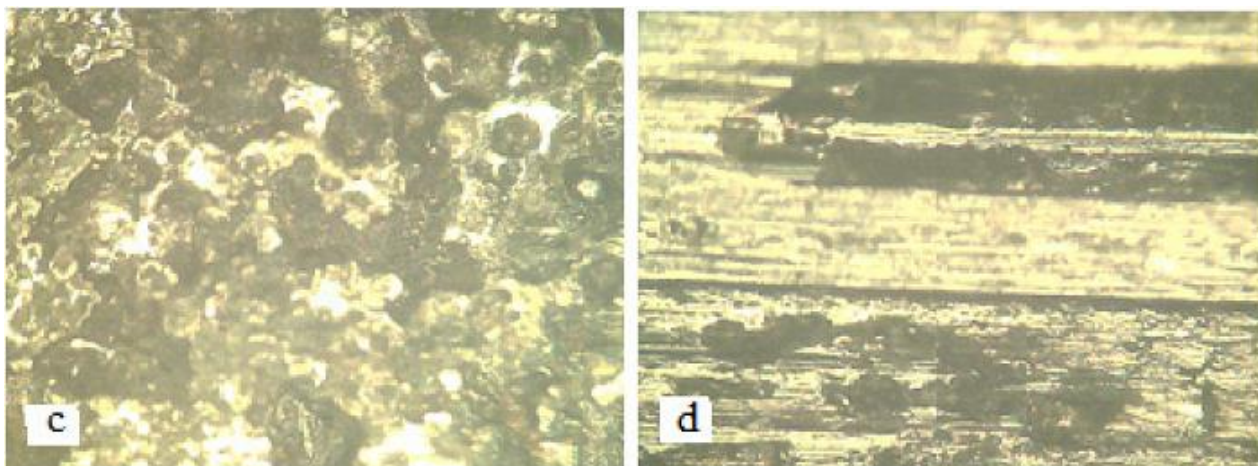


Fig. 4.9. Microstructura suprafețelor acoperirilor uzate după 225 minute (16 875 cicluri) de teste tribologice: a – Mo; b – Ti+Al+grafit; c – Ti+SiC; d – C45 neacoperit. x125 [115]

În figura 4.9 sunt prezentate microstructurile suprafețelor de frecare ale straturilor depuse (a, b, c) și a oțelului C45 (d) neacoperit, după întreaga perioadă de testare tribologică. Aceste microfotografii demonstrează clar că stratul de Mo (figura 4.9, a) a suferit cea mai mică schimbare în procesul frecării, urmată de acoperirea Ti+SiC (figura 4.9, c). În același timp, vedem că suprafața de frecare a stratului din Ti+Al+C (figura 4.9, b) a suferit cele mai mari modificări. Suprafața de frecare prezintă urme de uzură de $(48 \div 60) \mu\text{m}$, formate de-a lungul eșantionului în direcția mișcării de alunecare, demonstrând că produsele uzurii s-au manifestat ca material abraziv ce a contribuit la uzura abrazivă a acoperirii. Prin urmare, cea mai deteriorată suprafață de frecare corelează foarte clar cu cea mai mare intensitate medie de uzură a unei acoperiri pe întreaga perioadă de testare. Analizând suprafața de frecare a eșantionului neacoperit al oțelului C45 (figura 4.9, d), se poate concluziona că această suprafață a fost deteriorată prin mai multe mecanisme, respectiv și prin uzura abrazivă.

4.2. Caracteristicile tribologice ale oțelului inoxidabil Cr18Ni10Ti supus ASE succesive cu W+grafit, Ti+grafit, Mo+grafit, Ti+Al+grafit

Procesul ASE s-a desfășurat conform următoarei scheme: W+grafit, Ti+grafit, Mo+grafit, Ti+Al+grafit, adică prelucrarea s-a efectuat cu materialele respective în diferită succesiune, pentru a stabili cea mai optimă variantă care ar duce la rezultatul scontat, adică la sintetizarea compuşilor ternari (MAX-fazelor).

În urma cercetărilor s-a stabilit că toate probele prelucrate cu grafit și ulterior cu un metal tranzitoriu au manifestat rezistență înaltă la uzură în comparație cu oțelul neprelucrat. Rezistența la uzură a crescut în direcția (Mo+grafit)→(W+grafit)→(Ti+Al+grafit). Analiza cu raze X a eșantioanelor pentru încercări, supuse prelucrării succesive mai întâi cu un metal tranzitoriu, apoi

cu grafit, a demonstrat că în straturile superficiale se formează carburi de molibden, de titan, de wolfram și de crom. Încercările de durată au demonstrat că rezistența la uzură a acestor acoperiri crește de la 1,7 până la 69 de ori.

Studiile cu raze X ale acoperirilor după prelucrarea prin ASE au demonstrat prezența în ele a carburilor la toate regimurile de prelucrare, în limita valorilor energiei descărcărilor ($1,0 \div 3,0$) J. De exemplu, la ASE mai întâi cu electrod din wolfram și apoi, cu grafit s-au depistat în stratul format carburi de wolfram WC și W_2C , precum și carbon în stare liberă. Este interesant să menționăm, că atunci când matricea este din titan și este prelucrată cu unul dintre metalele tranzitorii, apoi, cu electrozi din grafit, în straturile depuse se obține carbură de titan (TiC) și carbura metalului electrod cu care a fost efectuat procesul ASE. De exemplu, dacă electrodul de prelucrare este din wolfram, vom obține în acoperirea formată carbură de wolfram (WC) [97, 108, 117].

Rezultatele preliminare au arătat că o calitate mai bună a straturilor cu grosimi de $\sim (0,04 \div 0,055)$ mm și continuitate de până la 98% pot fi obținute la prelucrarea cu energia descărcărilor electrice în limita ($0,3 \div 1,0$) J, frecvența impulsurilor 250 Hz și forma de mișcare a electrodului de prelucrare: vibrații+rotații.

Evaluarea rezistenței la uzură a acoperirilor pe ambele materiale (titan și oțel) s-a efectuat cu ajutorul mașinii speciale pentru încercări tribologice de tip rectiliniu alternativ la viteza de alunecare de cca 0,0675 m/s [104]. În calitate de lubrifiant s-a utilizat uleiul de vaselină, iar în calitate de contracorp – eșantioane dreptunghiulare din oțel C45 cu dimensiuni de 3x25x30 mm, călite până la (HRC58). Suprafața de contact a contracorpului cu proba acoperită a constituit 9 mm² și era orientată astfel încât contracorpul să cuprindă complet această suprafață. Încercările s-au efectuat în două etape. În prima etapă s-a efectuat rodajul probei acoperite cu contracorpul timp de 10 ore sub o sarcină variabilă de la 2 până la 9 kgf. În a doua etapă s-au efectuat testările propriu-zise la sarcina de 9 kgf timp de 20 ore. Gradul de uzură s-a determinat după pierderea greutateii prin cântărirea probelor cu balanța analitică cu precizia 0,1 g. Microduritatea a fost măsurată cu ajutorul microdurimetrului IIMT-3 la sarcina de 50 g. Rezultatele sunt prezentate în tabelul 4.5 [115].

Tabelul 4.5. Duritatea inițială $H\mu$ a acoperirilor obținute pe proba de oțel Cr18Ni10Ti

Nr.	Materialul acoperirii	Microduritatea la sarcina de 50 g, kgf/mm ²		
		Microduritatea minimă	Microduritatea medie	Microduritatea maximă
1.	Ti+Al+grafit	1086	1596	2443
2.	W+grafit	782	998	1520
3.	Mo+grafit	402	839	1438
4.	Cr18Ni10Ti	323	323	323

Analiza rezultatelor a demonstrat că pe tot întinsul acoperirii duritatea nu este constantă; s-a observat un decalaj între duritățile minime și maxime. Din tabelul 4.5 se vede că duritatea crește în direcția: (Mo+grafit)→(W+grafit)→(Ti+Al+grafit).

În figura 4.10 este prezentată histograma uzurii acoperirilor după 30 de ore de încercări tribologice la sarcina de 9 kgf, din care se vede că toate acoperirile au avut ca rezultat mărirea rezistenței la uzură, în unele cazuri – de până la 29 ori. Astfel, acoperirea formată la alierea prin scânteii electrice cu Ti+Al+grafit s-a dovedit a fi cea mai rezistentă la uzură. S-a mai observat că uzura acoperirilor corelează cu microduritatea medie a acestora: cu cât este mai mare microduritatea medie, cu atât este mai mică uzura, și invers, cu cât este mai mică microduritatea medie, cu atât este mai mare uzura.

În tabelul 4.6 sunt prezentate rezultatele analizei cu raze X a unor acoperiri supuse încercărilor la uzură.

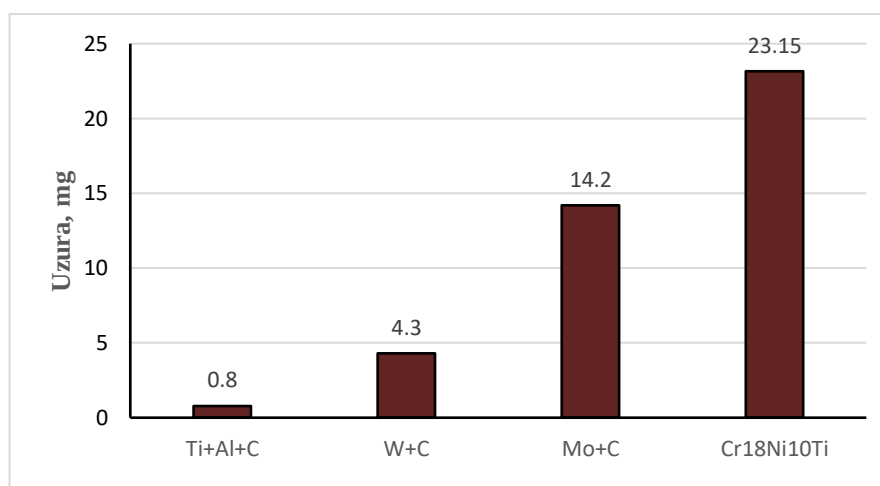


Fig. 4.10. Gradul de uzură al diferitor acoperiri depuse pe probele din oțel Cr18Ni10Ti [115]

Din tabelul 4.6 se vede bine că la alierea prin scânteii electrice a oțelului Cr18Ni10Ti în succesiunea Ti→Al→grafit se obțin acoperiri cu cea mai mare duritate: 1 596 kgf/mm², ceea ce explică și cel mai mic grad de uzură a probelor cu astfel de acoperire. La durificarea cu electrozi din molibden și wolfram în succesiunea (Mo+grafit) și (W+ grafite) în straturile superficiale se formează, respectiv, carburile de molibden (Mo₂C) și wolfram (WC). Prezintă interes fenomenul apariției în stratul durificat al titanului a nitrurii de titan TiN, deși atât în electrodul de prelucrare, cât și în suportul de oțel acest element lipsește. Se știe [3] că la efectuarea procesului ASE în aer, unde concentrația de azot constituie cca 78%, în condițiile descărcării în impuls cu temperaturi și presiuni înalte, au loc procese de ionizare a materialelor și a gazului din zona descărcărilor, cu interacțiunea acestora și formarea diferitor compuși, inclusiv nitruri și oxizi. Faptul că prin metoda cu raze X se pot depista nitrurile și oxizii metalelor electrozilor ne confirmă că concentrația

acestora depășește 2%. Prezența în acoperirile formate a nitrurilor și a oxizilor nu întotdeauna este benefică. De exemplu, o cantitate mai mare de 2% de oxizi în acoperire cauzează fragilizarea acestora. Pe de altă parte, prezența nitrurii de aluminiu în acoperiri sporește rezistența la uzură. Astfel, fenomenul apariției azotului, care interacționează cu titanul formând nitrura de titan, este un factor benefic, dat fiind că acesta posedă proprietăți fizico-mecanice înalte.

Tabelul 4.6. Fazele depistate în acoperirile depuse pe oțelul Cr18Ni10Ti la alierea acestuia cu toată gama de electrozi selectați [115]

Nr.	Compoziția acoperirii	Fazele obținute după ASE
1.	Mo, grafit	α -Fe; γ -Fe; Grafit, χ -Fe ₂ C; (Fe ₂ MoC)
2.	W, grafit	α -Fe; γ -Fe; Fe ₃ N; Fe ₄ N; (Fe,Cr,W) ₂ C ₆ ≈[Cr,-Fe-(W,Mo)]-C
3.	Ti, Al, grafit	α -Fe; γ -Fe; TiN; Fe ₃ C ₂ or χ -Fe ₂ C; Fe ₃ Al or AlFe; (Ni ₃ (Al,Ti)C); FeTi
4.	Otel inoxidabil Cr18Ni10Ti	α -Fe; γ -Fe

4.3. Caracteristicile tribologice ale oțelului aliat 40X13 și ale aliajului de titan BT6

În calitate de obiecte de investigații s-au utilizat probe din oțel aliat 40X13 și aliaj din titan BT6, cu dimensiuni de 10x30x2 mm, 30x30x10 mm, precum și probe cilindrice cu diametrul de 40 mm. Caracteristicile tribologice ale oțelurilor inoxidabile 40X13 și ale aliajului de titan BT6 supuse alierii succesive prin scânteii electrice, s-a efectuat la o serie de instalații industriale și experimentale, asigurându-se regimuri cu valori ale energiei de la 0,3 la 6,0 J. În calitate de obiecte ale cercetării s-au utilizat probe din oțel 40X13 și aliaje de titan BT6 cu dimensiuni de 10x30x2 mm, 30x30x10 mm, precum și probe cilindrice cu diametrul de 40 mm. Pentru durificare s-au folosit electrozi din titan, grafit, tantal, wolfram, aluminiu, nitrură de aluminiu (AlN) și carbură de siliciu (SiC). Această selectare a electrozilor de prelucrare se explică prin tendința de obținere a acoperirilor din compuși ternari cu caracteristici unice, cum ar fi TiAlC, TiAlN și TiSiC [105, 118].

Testarea tribologică s-a efectuat cu ajutorul mașinii de frecare FT-2, aplicând schema de frecare „deget disc” în condiții de frecare pe uscat a trei probe sferice cu diametrul de 1,5mm. Probele acoperite erau supuse pregătirii preliminare prin șlefuire până la rugozitatea Ra=0,1÷0,3 μm.

Încercările s-au efectuat la sarcina 50 H și viteza de alunecare 0,06 m/s. Morfologia acoperirilor s-a studiat cu ajutorul microscopului cu scanare electronică „MIRAZ TESCAN”, iar topografia acoperirilor s-a făcut cu ajutorul profilometrului „Surftest SI-210”.

În figura 4.11 sunt prezentate profilogramele acoperirilor Ti+C, Ti+Al+C, Ti+AlN, Ti+SiC și ale suportului din oțel 40X13 și BT6 neacoperite, din care se vede clar că probele acoperite au

rugozitatea mai pronunțată, fapt care în procesul frecării a demonstrat un coeficient mai mare la frecare. Pe măsura rodajului, procesul se ameliorează și coeficientul de frecare se micșorează [7].

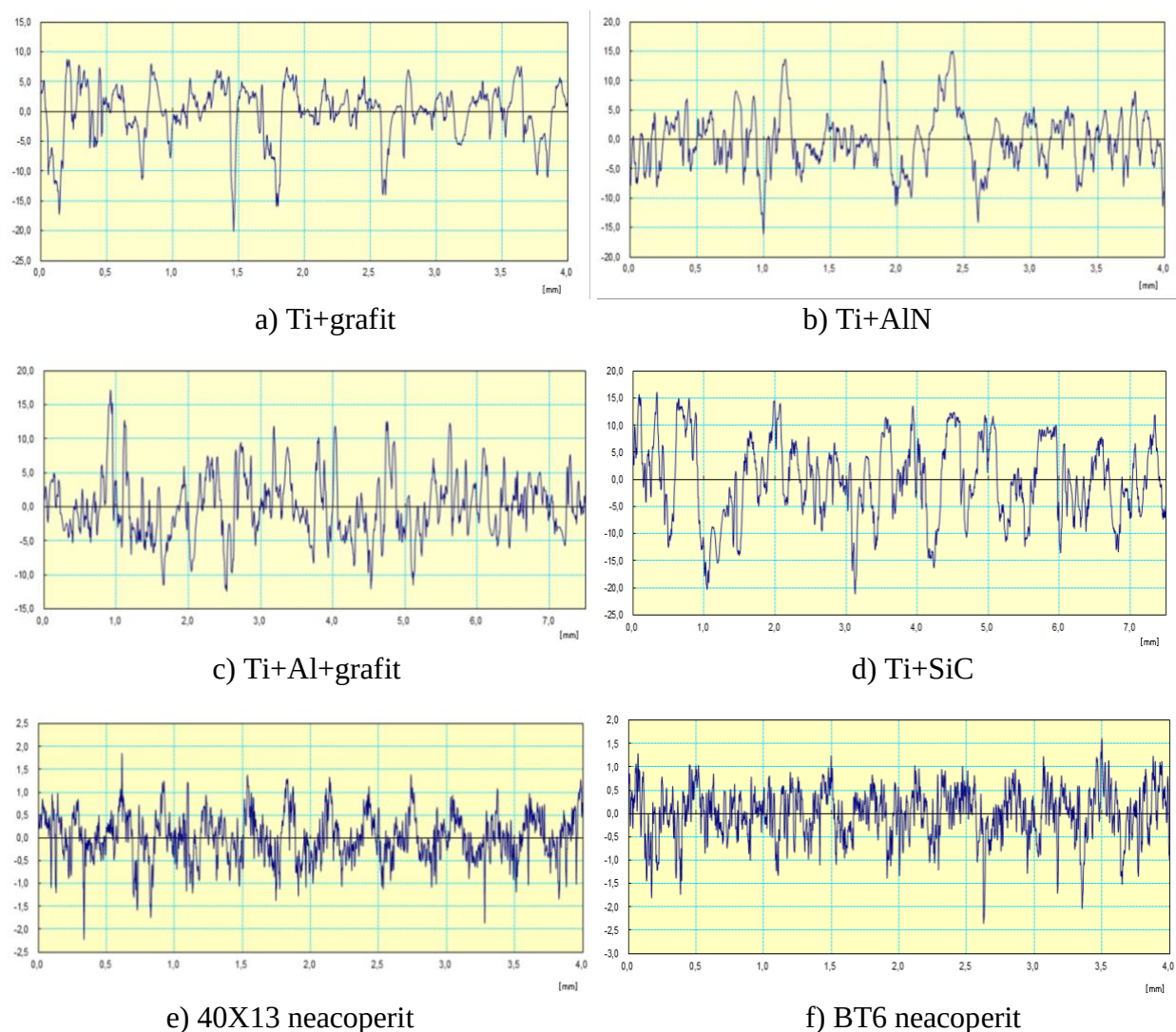


Fig. 4.11. Topografia suprafețelor probelor de oțel 40X13 și aliaj de titan BT6 supuse ASE cu diferite materiale [7]

Rezultatele testării tribologice au demonstrat că acoperirile Ti+AlN și Ti+SiC în condițiile frecării pe uscat posedă o rezistență la uzură mai mare în raport cu probele neacoperite (oțel 40X13 și titan BT6), tabelul 4.7 și 4.8.

Tabelul 4.7. Coeficientul de frecare a acoperirilor

Structura acoperirii	Ti+C	Ti+AlN	Ti+Al+C	Ti+SiC	40X13	BT6
μm	0,33	0,27	0,4	0,34	0,45	0,31

Tabelul 4.8. Uzura liniară a acoperirilor

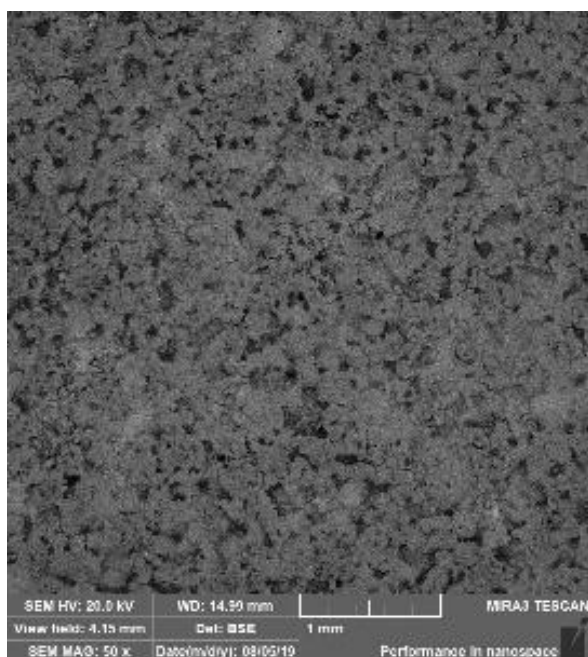
Structura acoperirii	Ti+C	Ti+AlN	Ti+Al+C	Ti+SiC	40X13	BT6
$\Delta h, \mu m$	0,44	0,47	0,42	0,06	0,17	0,14

Creșterea rezistenței la uzură a probelor acoperite se explică prin duritatea înaltă în raport cu probele de oțel și titan neacoperite (tabelul 4.9).

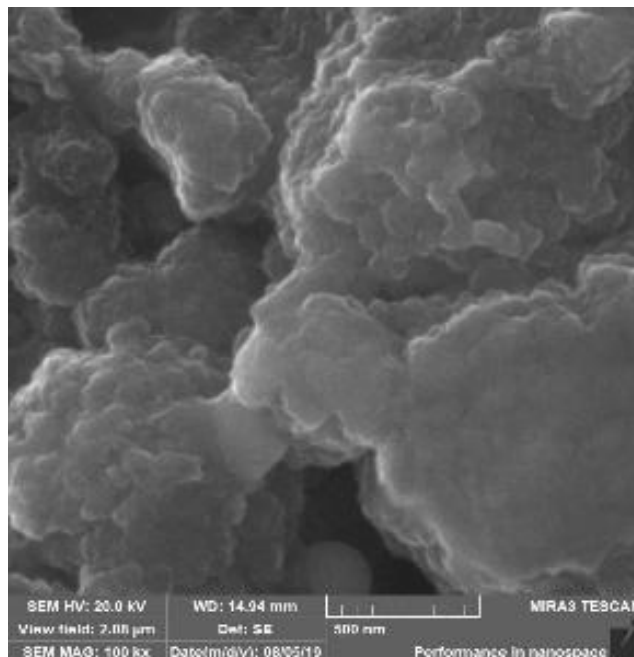
Tabelul 4.9. Microduritatea acoperirilor

Structura acoperirii	Ti+C	Ti+AlN	Ti+Al+C	Ti+SiC	40X13	BT6
H, MPa	10300	8873	9120	10450	2150	3940

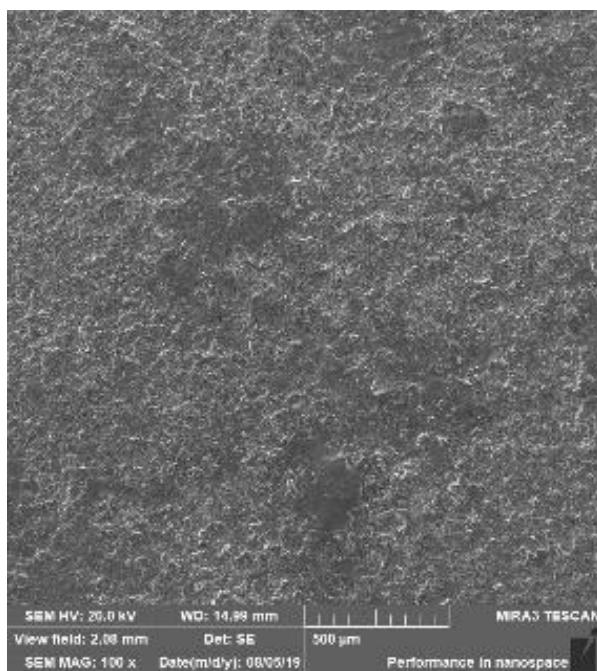
Rezultatele testărilor ne-au demonstrat că asupra caracteristicilor tribologice o influență mare o are morfologia acoperirilor formate (figura 4.12). Conform rezultatelor obținute cu ajutorul microscopului cu scanare electronică acoperirile depuse formează o morfologie dezvoltată (figura 4.12. a, c, e, g). În structura acoperirilor sunt prezente nanofaze care determină rezistența înaltă a straturilor (figura 4.12, b, d). În timpul formării acoperirilor în acestea apar tensiuni remanente de natură termică sau ca rezultat al transformărilor alotropice care contribuie la formarea microfisurilor, microporilor (figura 4.12, f, h). Existența acestor defecte în unele cazuri poartă un rol pozitiv. De exemplu, în cuplurile tribologice cu lubrifiant, acestea au un rol de rezervor în care se acumulează lubrifiantul ce contribuie la ungerea suprafețelor de lucru.



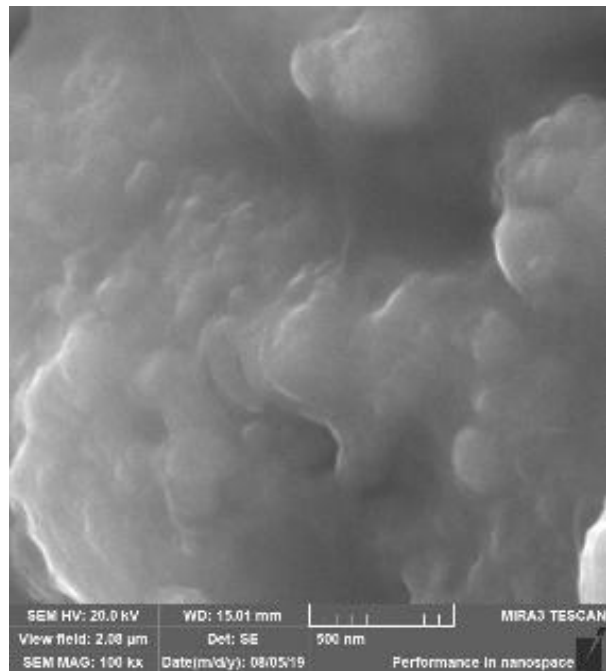
a)



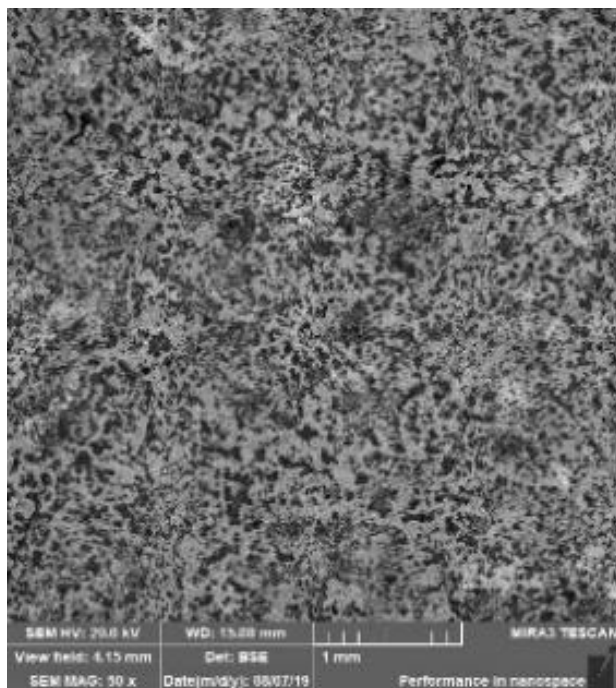
b)



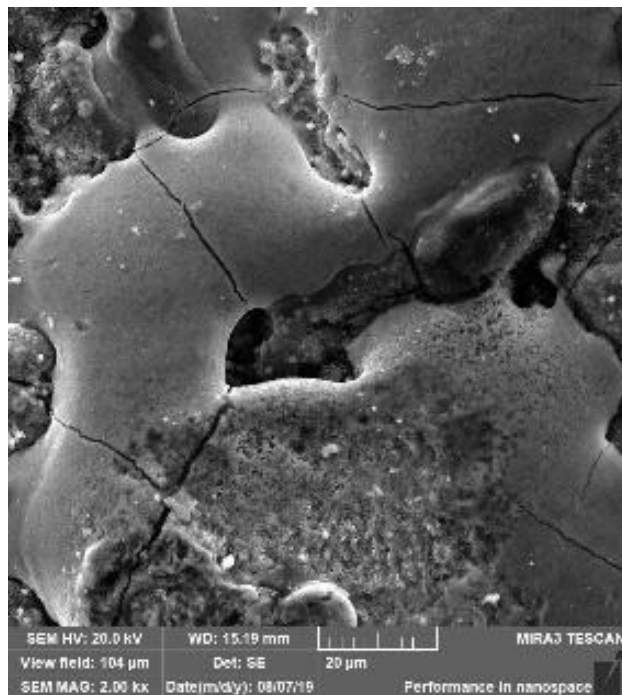
c)



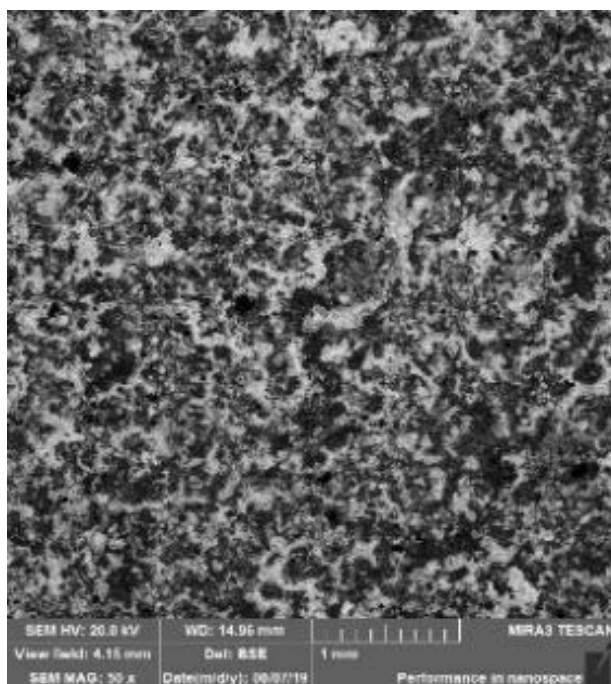
d)



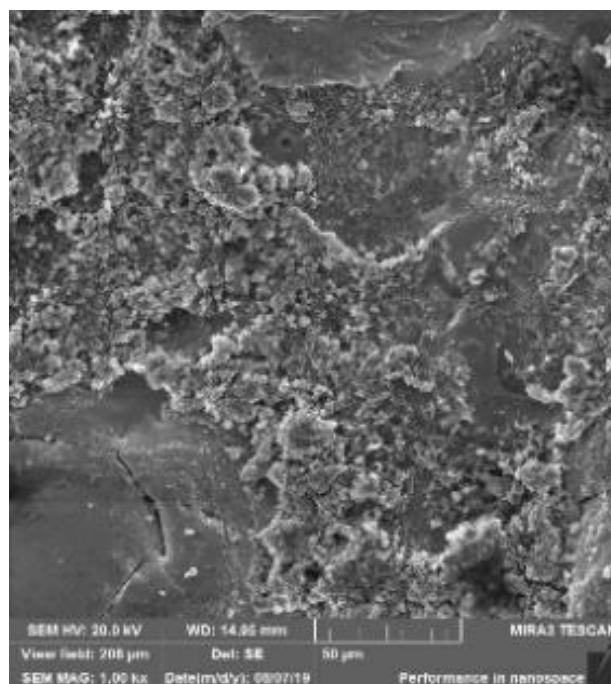
e)



f)



g)

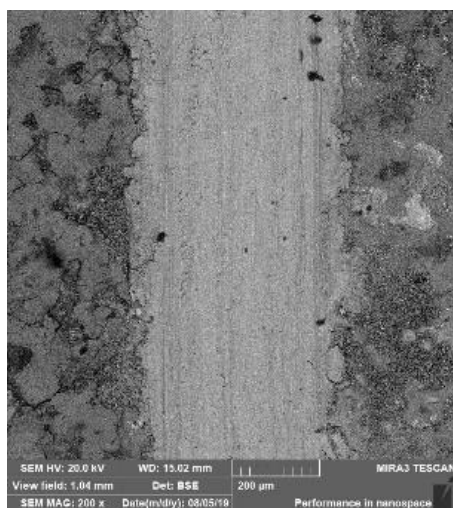


h)

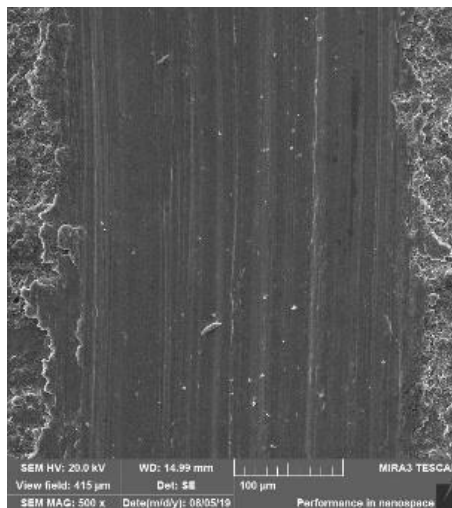
Fig. 4.12. Morfologia acoperirilor la ASE cu: a, b–Ti+C; c, d–Ti+AlN; e, f–Ti+Al+C; g, h–Ti+SiC [7, 118]

Rezultatele încercărilor tribologice au demonstrat, de asemenea, că în primul rând are loc uzura proeminențelor, după care urmează netezirea suprafeței. În unele cazuri, din cauza durității înalte uzura proeminențelor este foarte mică (figura 4.13, d).

Așadar, acoperirile depuse pe oțel 40X13 și pe aliajul de titan BT6 posedă proprietăți antifricție înalte, (acoperirea din Ti+SiC), dată fiind duritatea înaltă a acestora.



(a)



(b)

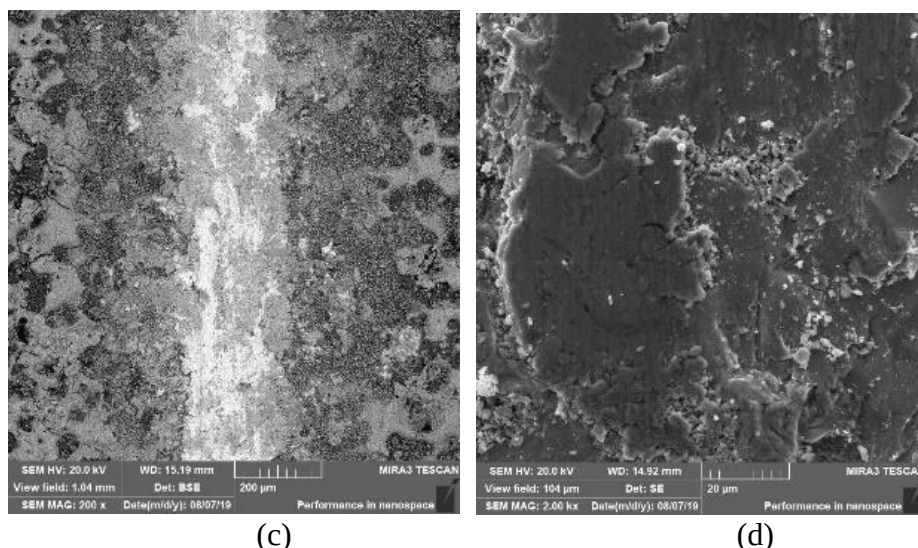


Fig. 4.13. Morfologia suprafeței de frecare a acoperirilor formate la ASE cu: a – Ti+C; b – Ti+AlN; c – Ti+Al+C; d – Ti+SiC [7,118]

Acoperirile depuse posedă o morfologie dezvoltată care determină o uzură aparent intensă, dată fiind uzarea, în primul rând, a proeminențelor ca urmare a sarcinilor imense apărute în tribocontacte. În structura acoperirilor se formează nanofaze, ce contribuie la creșterea caracteristicilor tribologice ale acoperirilor.

4.4. Rezistența la coroziune a acoperirilor sintetizate prin metoda ASE

Pentru investigații s-a selectat oțelul aliat 40X13, care se utilizează pe larg la confecționarea instrumentelor medicale. Probele folosite erau cu dimensiuni de 15x15x5 mm, care au fost finisate, folosind hârtie abrazivă M14, M10, M7 și paste diamantate cu granulația de 5.3, 3.2, 2.1 și 1.0 μm . În calitate de anodi (electrozi de prelucrare) s-au folosit bare din grafit, titan, tantal, wolfram, aluminiu, nitrură de aluminiu (AlN) sub formă de pulbere și carbură de siliciu (SiC). În calitate de electrozi compacți s-au utilizat bare cu dimensiuni de 40x5x5 mm.

Acoperirile s-au depus cu electrozi compacți și pulberi care s-au introdus în zona descărcării. granulația pulberii varia între 80 și 120 μm [10].

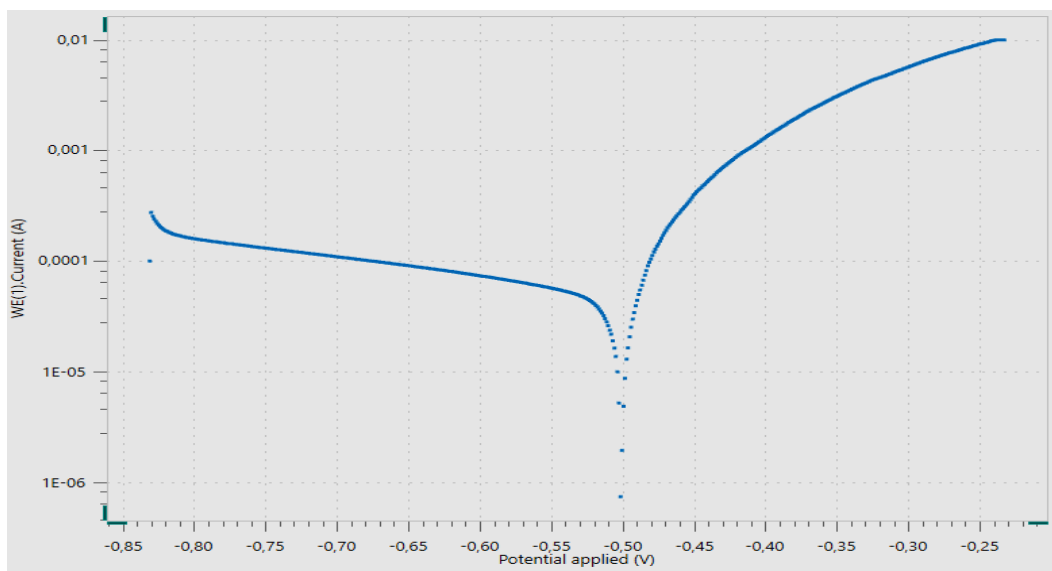
Prelucrarea succesivă cu elementele compuşilor Ti+Al+grafit, Ti+SiC, Ti+grafit și W+grafit (tabelul 4.10) s-a efectuat la regimuri optime, determinate anterior în capitolul 3.

Tabelul 4.10. Compoziția acoperirilor depuse pe probele din oțel aliat 40X13

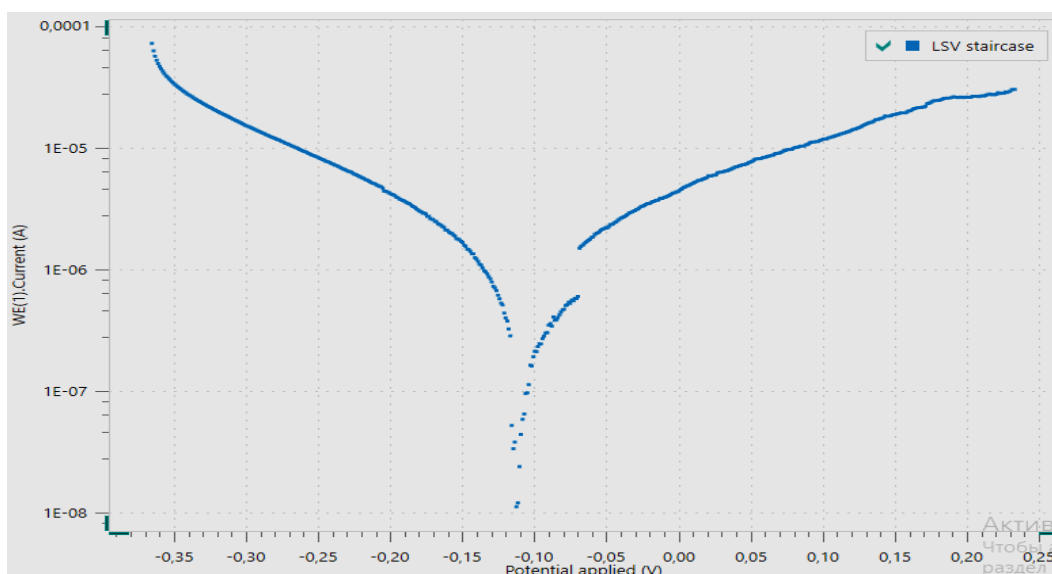
Materialul probei	Oțel 40X13				
Numărul probei	1	2	3	4	5
Compoziția acoperirii	Ti+Al+C	Ti+Si+C	Ti+Al+N	Ti+grafit	W+grafit

Proprietățile anticorozive ale acoperirilor au fost studiate cu ajutorul potențostatului-galvanostat Multi Autolab M204 (Metrohm AG, Elveția). Pentru efectuarea testărilor anticorozive,

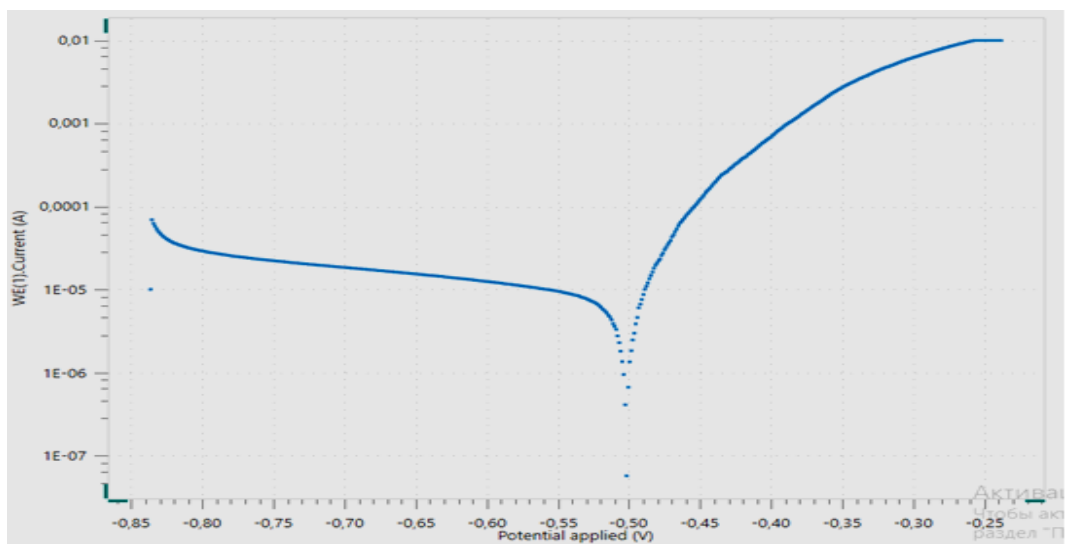
în calitate de agent coroziv a fost utilizată soluția de 3% de NaCl în apă distilată. Înainte de efectuarea testărilor anticorozive s-au studiat unele caracteristici ale straturilor superficiale, precum morfologia suprafeței, continuitatea acoperirii, uniformitatea grosimii straturilor și microdurețea. Microdurețea a fost măsurată cu ajutorul durimetrului HWMMT-X7. Morfologia straturilor formate s-a studiat cu ajutorul microscopului metalografic „MDS 1600T”. În figura 4.14 sunt prezentate curbele tipice de polarizare pentru probe studiate [10].



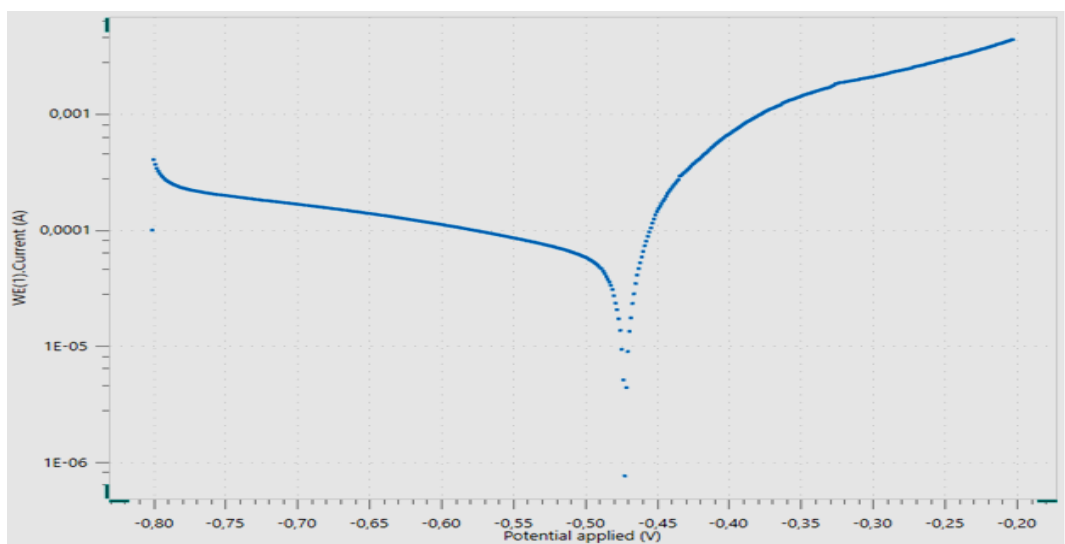
(a) Ti+Al+C



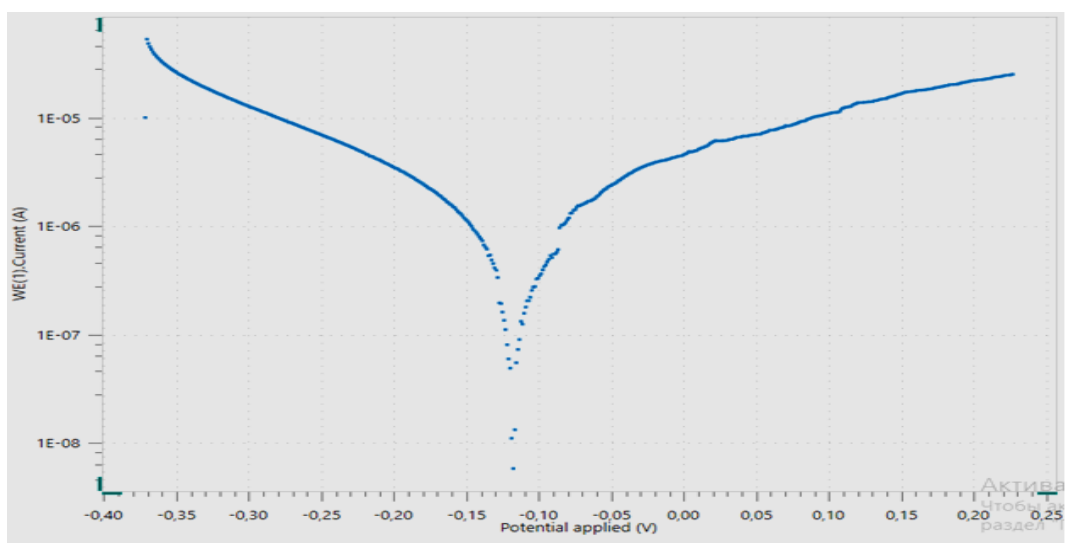
(b) Ti+SiC



(c) Ti+AlN



(d) Ti+grafit



(e) W+grafit

Fig. 4.14. Curbele de polarizare a acoperirilor formate la prelucrarea prin electroeroziune

[10]

În baza studiului efectuat s-a stabilit că o rezistență maximă la coroziune în raport cu celelalte acoperiri formate a manifestat-o acoperirea sintetizată la alierea succesivă cu electrozi din grafit și titan, precum și grafit plus wolfram (figura 4.15, tabelul 4.11). Aceste straturi își păstrează morfologia inițială după acțiunea mediului coroziv.

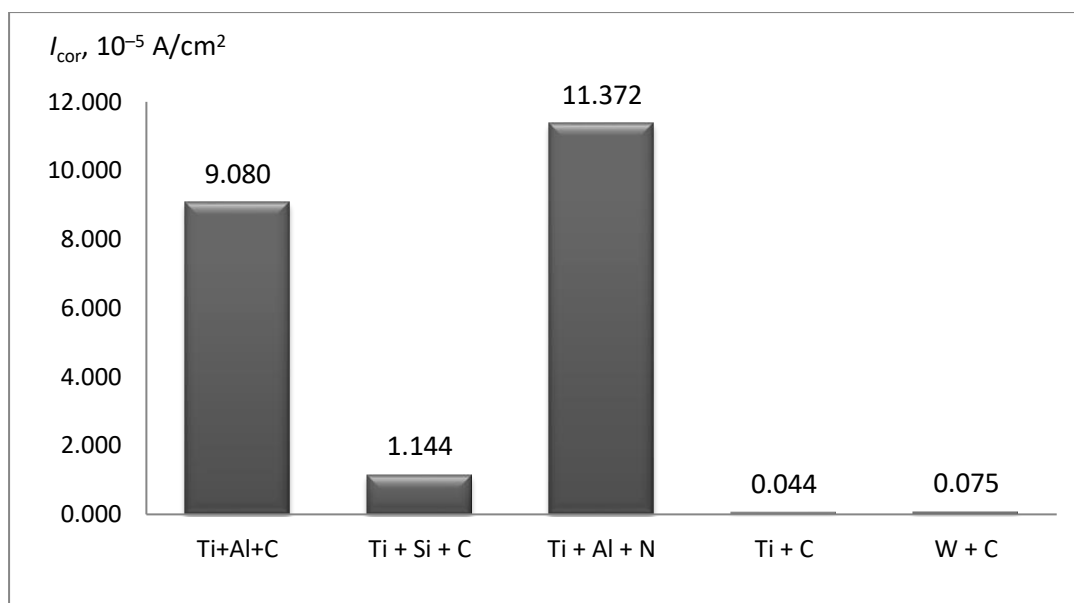


Fig. 4.15. Valoarea curentului de coroziune pentru diferite acoperiri

Conform cercetărilor [49], acoperirile obținute la ASE se formează în rezultatul interacțiunii intense a plasmelor descărcărilor în impuls cu materialele anodului și catodului cu formarea aliajelor, soluțiilor solide, nitrurilor și oxizilor, dacă prelucrarea se efectuează în aer.

În studiul [34] se menționează că, la prelucrarea succesivă cu electrod din grafit și unul din metalele tranzitorii din grupele IV–VI ale sistemului periodic, în straturile superficiale se formează carburile metalelor respective. În rezultatul acestei prelucrări duritatea straturilor superficiale crește semnificativ.

Tabelul 4.11. Dependența densității curentului de coroziune în funcție de componența electrozilor și regimurile de depunere a acoperirilor

Densitatea curentului	Numărul probei				
	1	2	3	4	5
I_{cor} , 10^{-5} A/cm ²	9,080	1,144	11,372	0,044	0,075

Morfologia stratului superficial prezintă în sine o structură insulară, defectele căreia depind de regimurile tehnologice de prelucrare și de componența chimică a electrozilor. În urma difuziunii elementelor chimice a materialului anodului topit se formează un strat cu proprietăți fizico-mecanice înalte, așa – numita „zonă de difuzie”.

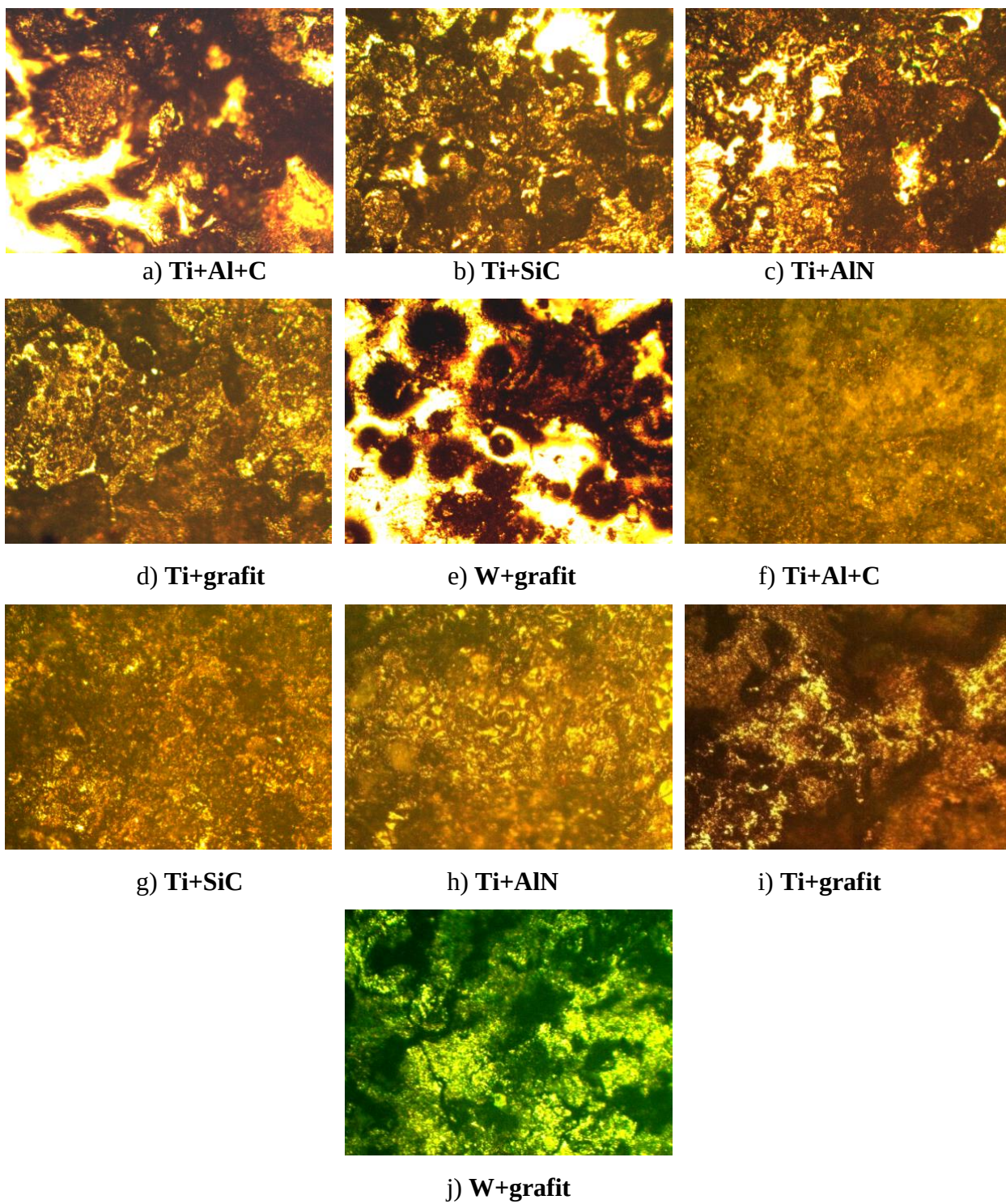


Fig. 4.16. Morfologia acoperirilor formate pe suportul (catodul) din oțel 40X13: a-e – suprafața inițială a acoperiri, f-j – după acțiunea agentului coroziv x175 [10]

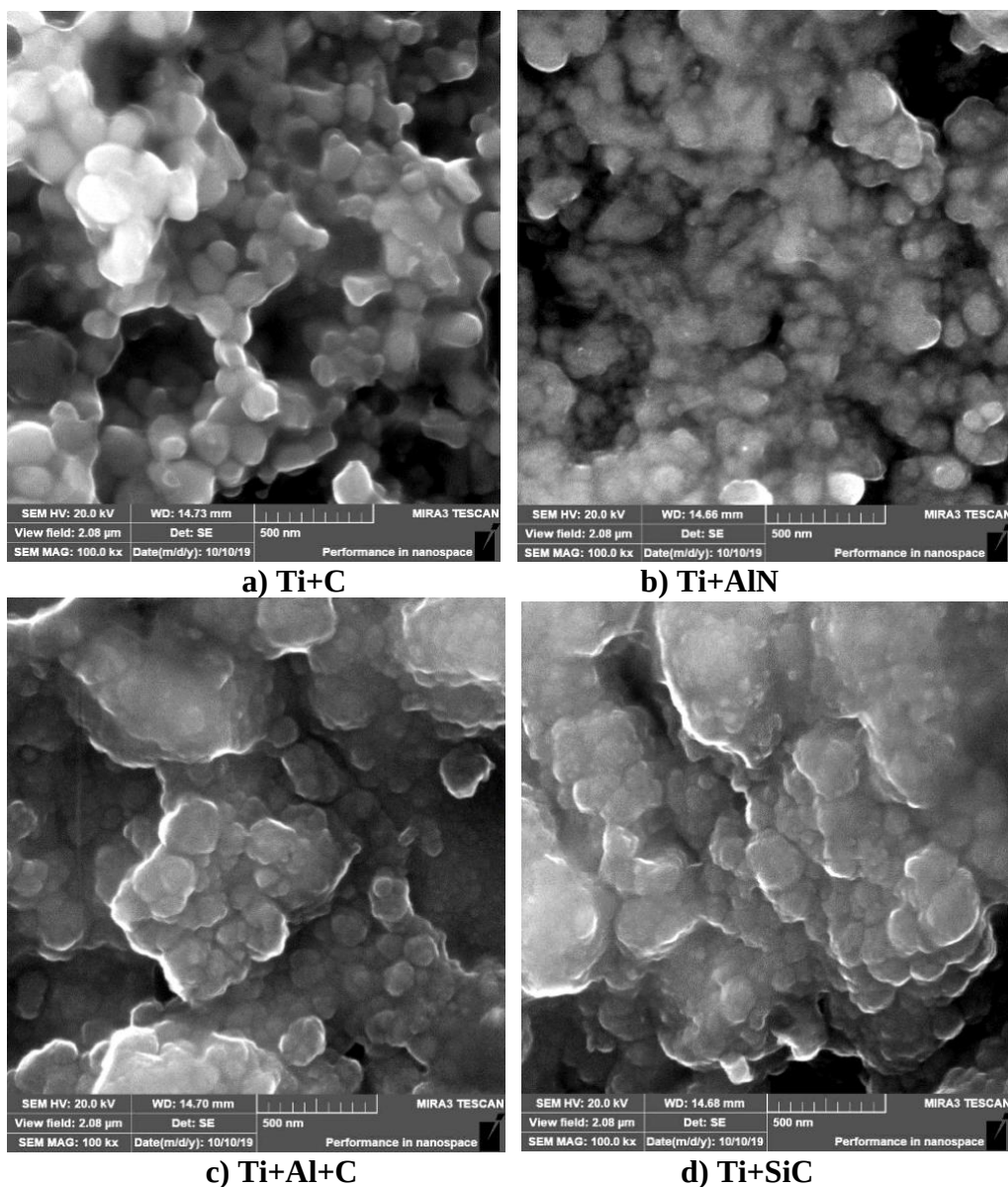


Fig. 4.17. Morfologia acoperirilor formate la ASE [10]

Investigațiile morfologiei acoperirilor obținute prin ASE cu ajutorul microscopului cu scanare electronică au demonstrat tendința de formare a fazelor nanocristaline în structura acoperirilor. Prin metoda microscopiei optice s-a stabilit că straturile depuse la prelucrarea succesivă cu electrozi din grafit și titan, grafit și wolfram formează un relief mai neted, cu mai puține incluziuni în comparație cu straturile din Ti+Al+C, Ti+SiC și Ti+AlN. Creșterea rezistenței la coroziune a compușilor formați din electrozi, ce au în componență titan și carbon, precum și wolfram și carbon, poate fi explicată prin faptul că aceștia formează straturi mai dense, cu mai puține defecte.

De menționat o particularitate deosebită în procesul formării acoperirilor la ASE succesivă cu grafit și unul dintre metalele tranzitorii ale sistemului periodic. În pofida faptului că procesul are un caracter discontinuu, adică straturile se formează prin transferarea pe suport (catod) a porțiunilor mici de materiale, ceea ce nu permite obținerea straturilor cu continuitate de 100%; cu

toate acestea, rezistența la coroziune a oțelului 40X13 supus alierii cu Ti+grafit și W+grafit s-a dovedit a fi destul de mare în raport cu oțelul neacoperit. Aceasta se explică prin faptul că transferul particulelor de grafit continuă și după finalizarea descărcării [7, 11] la suprafața catodului; în special, la începutul procesului de prelucrare se formează un strat de particule mici de grafit, care se înglobează în topitura ce se răcește, precum și umple adânciturile din acoperirea formată. Astfel, în urma acestei prelucrări se formează un strat dens, nepenetrabil pentru lichidul agresiv.

Acoperirile ternare Ti+Al+C, Ti+SiC și Ti+AlN au fost mai puțin rezistente în mediul agresiv. Aceasta poate fi explicat prin faptul că, la prelucrarea cu trei componente, unele dintre ele se transferă în stare solidă și stratul format nu are o continuitate completă, ceea ce permite agentului coroziv să pătrundă până la materialul suportului din oțel 40X13.

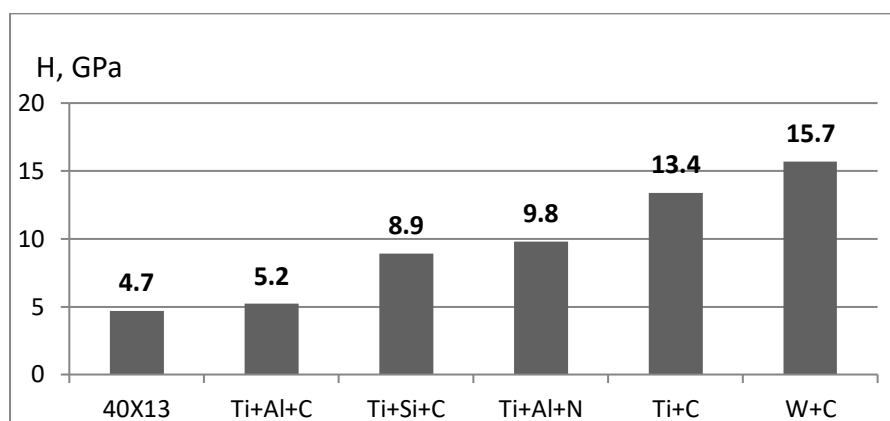


Fig. 4.18. Valoarea microdureții acoperirii după testările anticorozive

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

Studiul privind energia superficială a acoperirilor au demonstrat o valoare mai mare a probelor acoperite cu Ti+C, iar rezistența la coroziune este în concordanță cu ГОСТ 9.311-87 (tabelul 4.13) [84].

Tabelul 4.12. Dependența energiei specifice superficiale de condițiile formării acoperirilor după testarea anticorozivă

Specificare	Componenta acoperirii				
	Ti+Al+C	Ti+Si+C	Ti+Al+N	Ti+C	W+C
Lucrul adeziunii uleiului de vaselină, mJ	63,02	62,91	62,66	56,51	55,80
Lucrul adeziunii apei, mJ	46,84	67,91	62,84	102,69	78,09
Componenta dispersivă a energiei suprafeței	29,04	6,65	10,26	10,26	0,01
Componenta polară a energiei suprafeței	0,06	9,41	5,31	86,21	30,45
Energia suprafeței, mJ/m ²	29,10	16,06	15,57	96,47	30,46

Tabelul 4.13. Rezistența la coroziune a acoperirilor depuse prin ASE

Componenta acoperirilor	Forma deteriorării corozive	Notă de estimare
Ti+Al+C	B	8
Ti+Si+C	B	7
Ti+Al+N	B	8
Ti+C	A	9
W+C	-	10

În urma studierii morfologiei s-a stabilit că condițiile de formare a acoperirilor influențează semnificativ asupra structurii straturilor depuse. Se presupune că creșterea rezistenței la coroziune a acoperirilor este legată de formarea în acestea a MAX-fazelor [119].

4.5. Concluzii la capitolul 4

În urma efectuării cercetărilor experimentale ale procesului de sintetizare a carburilor metalice la alierea succesivă prin scânteii electrice cu electrozi din metale tranzitorii din grupele IV–VI a sistemului periodic – Ti, Ta, W, precum și din grafit, putem trage următoarele concluzii:

1. În cazul depunerii din Mo, si grafit în suprafața se obțin noi faze (Grafit, χ -Fe₂C; (Fe₂MoC), pentru W si grafit- Fe₃N; Fe₄N; (Fe,Cr,W)₂C₆≈[Cr,-Fe-(W,Mo)]-C, pentru depuneri succesive de Ti, Al, grafit- TiN; Fe₅C₂ or χ -Fe₂C; Fe₃Al or AlFe; (Ni₃(Al,Ti)C); FeTi , spre deosebire de cele inițiale α -Fe și γ -Fe caracteristice materialului de execuție al probei Oțel inoxidabil de marca Cr18Ni10Ti;

2. Încercările experimentale la uzura a pieselor executate din Oțel 45, au demonstrat, că atât straturile din compoziția succesivă Ti+Al+C, precum și cele din cea Ti+AlN au redus uzura piesei de 3.9 și, respectiv, de 6.5 ori [108, 118].

3. Microdurețea specifică a straturilor superficiale formate crește până la 1596 MPa pentru Ti+Al+grafit, 998 MPa- W+grafit, 839 MPa- Mo+grafit, plecând de la cea inițială a materialului de execuție a piesei 323MPa- Cr18Ni10Ti iar în cazul probelor executate din titan 10300 Pa pentru depuneri din Ti+C, 8873 pentru Ti+AlN, 9120 - Ti+Al+C, 10450 - Ti+SiC, 2150 - 40X13 și 3940 pentru BT6;

4. Rezultatele testării tribologice au demonstrat că acoperirile Ti+AlN și Ti+SiC în condițiile frecării uscate posedă o rezistență la uzură mai mare în raport cu probele neacoperite (oțel 40X13 și titan BT6);

5. S-a stabilit că o rezistență maximă la coroziune în raport cu celelalte acoperiri formate a manifestat-o acoperirea sintetizată la alierea succesivă cu electrozi din grafit și titan, precum și grafit plus wolfram. E de menționat, că aceste straturi își păstrează morfologia inițială după acțiunea mediului coroziv;

6. Creșterea rezistenței la coroziune a compușilor formați prin aplicarea electrozilor executați din materiale ce conțin titan și carbon, precum și wolfram și carbon, poate fi explicată prin faptul că, în rezultat se formează compusi ceramici;.

7. Cercetarea morfologiei suprafețelor prelucrate a permis să se stabilească condițiile de formare a acoperirilor influențând semnificativ asupra structurii straturilor depuse. Se presupune că creșterea rezistenței la coroziune a acoperirilor este legată de formarea în acestea a MAX-fazelor.

CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI

În urma analizei literaturii de specialitate, cercetarilor teoretice si experimentale proprii privind sintetizarea carburilor metalice la alierea succesivă prin electroeroziune cu electrozi din metale tranzitorii Ti, Ta si W, precum și din grafit, s-au stabilit următoarele concluzii:

1. În rezultatul analizei stadiului actual în domeniul durificării suprafețelor metalice prin scânteii electrice, în ultimii 20 de ani nu s-au depistat lucrări științifice dedicate în mod special cercetări sistematice ale procesului ASE prin prelucrarea succesivă cu electrozi din Ti, Ta, W, C – constituenți ai electrozilor standardizați – WC+TiC+Co și WC+TiC+TaC+Co. **[117]**.

2. metodele de evidentiere a structurii, compoziției chimice si celei de faza permit a argumenta rezultatele obținute, exactitatea si veridicitatea rezultatelor obținute este asigurata de precizia echipamentelor aplicate în cercetare iar aplicarea în cercetare tehnologica a echipamentelor industriale ,apropie si mai mult rezultatele obtinute de utilizatorii lor **[120]**.

3. S-a stabilit că factorii de bază ce influențează substanțial asupra procesului sintetizării carburilor în straturile superficiale ale metalelor supuse alierii prin scânteii electrice, a grosimii și calității acestora sunt:

- a) valoarea energiei descărcării electrice în impuls;
- b) parametrii tehnologici – forma mișcării electrozilor compacți de prelucrare (vibrații, rotații) în raport cu suprafața de prelucrare;
- c) starea de agregare a materialelor de aliere – compactă sau pulverulentă **[96, 97, 109, 118]**.

4. S-a optimizat regimul energetic de prelucrare, astfel încât valorile energiei de descărcare în impulsuri la care s-a obținut cea mai înaltă calitate a acoperirilor se încadrează în limita $(1,3 \div 3,0)$ J, iar al curentului mediu – $(1,5 \div 2,0)$ A cu frecvența trecerii impulsurilor în limita 100 - 200 Hz **[96, 108, 109]**.

5. S-a demonstrat sporirea productivității formării acoperirilor concomitent cu creșterea grosimii și calității acestora la:

- a) îmbinarea într-un proces tehnologic unic a alierii prin scânteii electrice cu electrozi compacți și introducerea în interstițiul dintre anod și catod a materialelor pulverulente;
- b) utilizarea electrozilor cu rotație în plan perpendicular pe suprafața de prelucrare, fapt ce a dus la creșterea duratei de funcționare a acoperirilor astfel formate **[108, 111]**.

6. Pentru cazul depunerii din Mo, si grafit în suprafata se obtin noi faze (Grafite, χ -Fe₂C; (Fe₂MoC), pentru W si grafit- Fe₃N; Fe₄N; (Fe,Cr,W)₂C₆≈[Cr,-Fe-(W,Mo)]-C, pentru depuneri succesive de Ti, Al, grafit- TiN; Fe₅C₂or χ -Fe₂C; Fe₃Al or AlFe; (Ni₃(Al,Ti)C); FeTi ,

spre deosebire de cele initiale α -Fe și γ -Fe caracteristice materialului de executie al probei Otel inoxidabil de marca Cr18Ni10Ti;

7. Incercările experimentale la uzura a pieselor executate din Otel 45, au demonstrat, că atât straturile din compozitia succesivă Ti+Al+C, precum și cele din cea Ti+AlN au redus uzura piesei de 3.9 și, respectiv, de 6.5 ori [108, 118].

8. Micro duritatea specifica a straturilor superficiale formate crește până la 1596MPa pentru Ti+Al+grafit, 998MPa- W+grafit, 839MPa- Mo+grafit, plecând de la cea inițială a materialului de executie a piesei 323MPa- Cr18Ni10Ti iar în cazul probelor executate din titan 10300 Pa pentru depuneri din Ti+C, 8873 pentru Ti+AlN, 9120- Ti+Al+C, 10450- Ti+SiC, 2150- 40X13 și 3940 pentru BT6;

9. Rezultatele testării tribologice au demonstrat că acoperirile Ti+AlN și Ti+SiC în condițiile frecării uscate posedă o rezistență la uzură mai mare în raport cu probele neacoperite (oțel 40X13 și titan BT6);

10. S-a stabilit că o rezistență maximă la coroziune în raport cu celelalte acoperiri formate a manifestat-o acoperirea sintetizată la aliere succesivă cu electrozi din grafit și titan, precum și grafit plus wolfram . Este de menționat, ca aceste straturi își păstrează morfologia inițială după acțiunea mediului coroziv;

11. Creșterea rezistenței la coroziune a compușilor formați prin aplicarea electrozilor executati din materiale ce contin titan și carbon, precum și wolfram și carbon, poate fi explicată prin faptul că , în rezultat se formează compusi ceramici;

12. Cercetarea morfologiei suprafețelor prelucrate a permis a stabili, că condițiile de formare a acoperirilor influențează semnificativ asupra structurii straturilor depuse. Se presupune că creșterea rezistenței la coroziune a acoperirilor este legată de formarea în acestea a MAX-fazelor.

13. La prelucrarea complexă cu electrozi compacți și pulberi metalice, au fost sintetizați compuși ternari MAX-faze, de tip Ti_2AlC , Ti_2AlN și Ti_3SiC_2 cu înalte proprietăți fizico-mecanice [100-102].

14. Cercetările cu aplicarea razelor X și a microscopiei cu scanare electronică au demonstrat caracterul amorfo-cristalin al acoperirilor formate, ceea ce confirmă performanța proprietăților fizico-mecanice ale acestora [5, 6, 10].

15. Încercările tribologice au demonstrat posibilitatea obținerii acoperirilor cu o rezistență înaltă la uzură. Prelucrarea oțelului și al titanului în succesiunea: Ti+C, W+C, Mo+C, Cr+C a permis creșterea rezistenței la uzură de până la 29 de ori [97, 108, 109, 115].

16. S-a stabilit că frecarea în lipsa lubrifierii la o presiune specifică de 2 Mpa acoperirile de Mo și Ti+SiC au manifestat cea mai mică intensitate medie de uzură. Aceasta a fost de circa 15 ori mai mică decât a oțelului C45 neacoperit.

17. A fost stabilită o corelație strictă între duritatea straturilor superficiale formate și coeficientul de frecare: cu cât microduritatea acoperirii este mai mare, cu atât este mai mare coeficientul de frecare (după 8-12 min de stabilizare) și invers [115].

18. Incercările experimentale la uzura a pieselor executate din Otel 45, au demonstrat, că atât straturile din compozitia succesivă Ti+Al+C, precum și cele din cea Ti+AlN au redus uzura piesei de 3.9 și, respectiv, de 6.5 ori [108, 118].

19. Elaborarea variantei noi a alierii prin electroeroziune utilizând prelucrarea succesivă cu electrozi din grafit, titan, tantal și wolfram a demonstrat în practica posibilitatea de înlocuire a electrozilor standardizați de tip „BK” și „TK”, care actualmente au dispărut de pe piață [108, 118].

RECOMANDĂRI

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

La îmbinarea într-un proces tehnologic unic a alierii prin scânteii electrice cu electrozi compacți și introducerea în interstițiul dintre anod și catod a materialelor pulverulente au fost obținute acoperiri semnificativ mai groase, decât în procesul tradițional de ASE. În aspect teoretic, se impune analiza și sinteza a rezultatelor obținute de diferiți autori la nivel internațional pentru înțelegerea profundă a fenomenelor de natură fizică și chimică care însoțesc acest proces. Pentru dezvoltarea acestei noi variante ale procesului, este nevoie de elaborarea unui model fizic, care ar permite înțelegerea mecanismului de transfer al materialelor de aliere pe catod-piesă, care, după cum au demonstrat rezultatele experimentale, nu se încadrează în criteriile Palatnik – Zolotîh [15, 95, 99].

PROPUNERI DE PERSPECTIVĂ

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

a nemetalelor (materialelor dielectrice), ceea ce deschide de asemenea perspective de obținere a acoperirilor cu înalte proprietăți fizico-mecanice și de exploatare.

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

MULȚUMIRI

La finalul acestor cercetări sunt onorată să adresez cuvinte de mulțumire sinceră și sentimente de considerație conducătorului științific, **Dlui Dr. Mihailov Valentin** pentru permanenta îndrumare, sprijinire, pentru răbdare, generozitate, înțelegere și încurajare de-a lungul perioadei de pregătire a doctoratului și de elaborare a acestei lucrări, precum și pentru întreaga contribuție la formarea mea ca cercetător. Mulțumesc că mi-a oferit libertatea de a exploata și aborda această temă de doctorat într-un mod personal, acordându-mi oportunitatea de a descoperi acea „nișă de cercetare” pe care îmi doresc să o aprofundez în viitor.

Mulțumesc colegilor **Dr. Ivascu Sergiu, Ianachevici Anatoli** și întreg colectivului laboratorului ”Metode electrofizice și electrochimice de prelucrare a materialelor” Bolis Lazarenco al Institutului de Fizică Aplicată, discuțiile fructuoase și recomandări constructive asupra tematicii tezei de doctor.

Mulțumesc **coautorilor publicațiilor mele științifice**, aportul cărora a contribuit esențial la publicarea acestora și realizarea tezei de doctor.

Nu în ultimul rând, mulțumesc **familiei și prietenilor** pentru înțelegere și sprijinul moral pe care mi le-au oferit în această perioadă.

Mulțumesc pentru suport:

Proiect Institucional:

1. ANCD 20.80009.5007.18 (2020 - 2023) *Obținerea de noi materiale micro-și nano-structurate prin metode fizico-chimice și elaborarea tehnologiilor pe baza acestora*, conducător - Alexandr Dicusar, dr.hab., prof., mem.-cor. AȘM

Proiecte bilaterale:

1. CSSDT 14.820.18.02.02/U (2014 - 2015) *Elaborarea generatoarelor de impulsuri electrice - generație nouă - pe bază de invertori de tensiune și a aplicatoarelor cu mișcare complexă a electrozului de prelucrare : vibrații- rotații- oscilații și studierea legităților procesului mecanizat de durificare și recondiționare prin scânteii electrice a organelor de mașini și a sculelor*, conducător - dr. Valentin Mihailov

2. ANCD 19.80013.50.07.06A/BL (2019 - 2020) *Tehnologie de sintetizare a carburilor și a nanostructurilor la aliere prin scânteii electrice cu electrozi din grafit, Ti și W și studierea influenței lor asupra proprietăților suprafețelor metalice*, conducător - Valentin Mihailov, dr.

3. ANCD 22.80013.5007.7BL (2022 - 2023) *Tehnologie și utilaje de depunere a acoperirilor multicomponente și multifuncționale pe suprafețele metalice la interacțiunea plasmei descărcărilor în impuls de tensiune joasă cu materiale pulverulente*, conducător - Valentin Mihailov, dr.

Proiecte internaționale:

1. H2020-MSCA-RISE-2017-778357 (2018 - 2022) *Electrozi metalici și semiconductori inteligenți pentru procesarea electrochimică și dispozitivele electrochimice*, conducător - Natalia Țințaru, dr.

BIBLIOGRAFIE

1. Нанокompозитные покрытия на основе нитридов переходных металлов / А.А. Дробышевская [и др.] // Физическая инженерия поверхности. – 2008. – № 1-2, Т. 6. – С. 81-88.
2. МИХАЙЛЮК, А.Ж., ГИТЛЕВИЧ, А.Е. *Применения графита в электроискровых технологиях.* // Электронная обработка материалов, 2010, №5-с. 37-44
3. ГИТЛЕВИЧ, А.Е., МИХАЙЛОВ, В.В., ПАРКАНСКИЙ, Н.Я., РЕВУЦКИЙ, В.М. *Электроискровое легирование металлических поверхностей.* Изд-во „Штиинца”, 1985, 195с.
4. ЛАЗАРЕНКО, Б.Р., ЛАЗАРЕНКО, Н.И. В кн.: *Проблемы электрической обработки материалов*, Изд-во АН СССР, 1962, с. 44-51.
5. ОВЧИННИКОВ, Е.В., МИХАЙЛОВ, В.В., ЧЕКАН, Н.М. *Структурные особенности нанокompозитных покрытий, получаемых методом электроискрового легирования.* Горная механика и машиностроение №1 2020, УДК 621.793.16-022.532 (476) с.93-100.
6. ОВЧИННИКОВ, Е.В., ЧЕКАН, Н.М., ХАСИЕВИЧ, В.М., ВЕРЕМЕЙЧИК, А.И., МИХАЙЛОВ, В.В., **КАЗАК, Н.Н.** *Структура электроискровых композиционных покрытий на металлической матрице.* 2021, 1(124), с.49-53.
7. МИХАЙЛОВ, В.В.; ОВЧИННИКОВ, Е.В.; ЭЙСЫМОНТ, Е.И.; **КАЗАК, Н.Н.**; ПИНЧУК, Т.И.; ХОВАТОВ, П.А. Физико-механические характеристики нанокompозитных покрытий, формируемых методом электроискрового легирования. *Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка.* 2019, 9(2), 45-53. ISSN 1810-0198
8. MIKHAILOV, V.V., **KAZAK, N.N.**, AGAFII, V.I., YANAKEVICH, A.I. Synthesis of Carbide Phases in Surface Metal Layers Under Electrosark Alloying with Graphite and Transition Metals in Groups IV–VI. *Powder Metall Met C.* 2019, 58(5-6), p.307-311. ISSN 1068-1302. Doi 10.1007/s11106-019-00079-8 (IF: 0,381)
9. RUKANSKIS, M.; PADGURSKAS, J.; SABALIUS, A.; MICHAILOV, V.; **KAZAK, N.**; ZUNDA, A. Friction and Wear of Electrosark Coatings Made of Molybdenum, Bronze, and Combined (Ti + Al + C) Composition on Steel 45 in a Lubricant Medium. *J Frict Wear.* 2021, **42(1)**, 56—62. Doi: [10.3103/S1068366621010086](https://doi.org/10.3103/S1068366621010086) (IF: 0,606).
10. **КАЗАК, Н.Н.**; МИХАЙЛОВ, В.В.; ЧЕКАН, Н.М.; ОВЧИННИКОВ, Е.В.; ЭЙСЫМОНТ, Е.И.; КОВШ, А.А. Коррозионная стойкость и прочностные характеристики наноструктурированных покрытий, полученных методом электроискрового легирования.

Іп: *Актуальные проблемы прочности. Материалы международной научной конференции (Витебск, 25–29 мая 2020 года)*, р. 320—322. ISBN: 978-985-6967-44-6.

11. **КАЗАК, Н.Н., ОВЧИННИКОВ, Е.В.; МИХАЙЛОВ, В.В.; ЧЕКАН, Н.М.** Электрохимическое поведение композиционных покрытий, получаемые методом электроискрового легирования. Горная механика и машиностроение. 2020 (2), 1—7. ISSN 1728-3841.
12. ЛАЗАРЕНКО, Н.И. в кн.: *Проблемы электрической обработки материалов*. Изд-во, АН СССР, М., 1962, с. 81-85.
13. ЛАЗАРЕНКО, Н.И. *Электронная обработка материалов*, номер 5, 1967, с. 46-58.
14. ЛАЗАРЕНКО, Н.И. *Электронная обработка материалов*, номер 1, 1965.
15. ЗОЛОТЫХ, Б.Н. *Физические основы электроискровой обработки металлов*. Изд-во технико-теоретической литературы, М., 1953.
16. ЗОЛОТЫХ, Б.Н. *Физика и химия обработки материалов*, №1, 1967, с. 7-17
17. ЗОЛОТЫХ Б.Н., КРУГЛОВ, А.И. *Тепловые процессы на поверхности электронов при электроискровой обработки металлов*. В кн.: Проблемы электрической обработки металлов. Изд-во АН СССР, 1960, с. 65-67.
18. ЗОЛОТЫХ, Б.Н., ГИОЕВ, К.Х. *О роли механических факторов в процессе эрозии в импульсном разряде*. В сб.: Физические основы электроискровой обработки материалов, Изд-во, Наука, М., 1966, с. 16-31
19. *Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей*. Под ред. проф.САУШКИНА, Б.П.М.: Москва, 2002. 655 с.
20. ЯЩЕРИЦИН, П.И., РЫЖОВ, Э.В., АВЕРЧЕНКОВ, В.И. *Технологическая наследственность в машиностроении*. Минск.: Наука и техника, 1977. 285 с.
21. КУДИНОВ, В.В., ИВАНОВ, В.М. *Нанесение плазмой тугоплавких покрытий*. М.: Машиностроение, 1991. 320 с.
22. МОРГУНОВ, А.П., РЕВИНА, И.В. *Современные проблемы отрасли и пути их решения*. Омск, 2017. 167 с.
23. РЫКАЛИН, Н.Н., УГЛОВ, А.А., ЗУЕВ, И.В., КОКОРА, А.И. *Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов*. Справочник. М.: Машиностроение, 1991.
24. ГРИГОРЬЯНЦ, Ф.Г. *Основы лазерной обработки материалов*. М.: Машиностроение, 1989.
25. ВЕДЕНОВ, А.А., ГЛАДУШ, Г.Г. *Физические процессы при лазерной обработке материалов*. М.: Энергоатомиздат, 1985.

26. *Tratat de știință și ingineria materialelor metalice*. vol. 1, Academia de științe tehnice din România. București, 2006. 1321p.
27. ZECHERU, Gh., DRAGHICI, Gh. *Elemente de știința și ingineria materialelor*. Vol.1, editura ILEX. 2001. 351p.
28. ЛАЗАРЕНКО, Б.Р., ЛАЗАРЕНКО, Н.И. *Электроэрозионные металлы*, вып. I, НКЭП СССР. Центр. бюро техн. информации. - Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1944г.
29. <https://www.technocoat.co.jp/english/products/depo-series/>
30. Topala P., Stoicev P., *Tehnologii de prelucrare a materialelor conductibile cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls.*, Chișinău, TEHNICA – INFO, 2008, p.265 CZU 621.7.04 621.983 (075.8) T76
31. СОКОЛЬСКАЯ, И.Л., ФУРСЕЙ, Г.Н. *Радиотехника и электроника*, 7, № 9, 1962, 1474с.
32. КРАСЮК, Б.А. *Электрические методы обработки металлов*. Махиз, М., 1951, с. 48-82.
33. СТЕКОЛИНИКОВ, И.С. *Известия АН СССР*, отделение техн. наук, вып. 7, 1950, 985с.
34. КАССИРОВ, Г.М., МЕСЯЦ, Г.Н., *ЖТФ*, том XXXIV, 1964, с. 1476-1481.
35. ЛАЗАРЕНКО, Б.Р., ГОРОДЕЦКИЙ, Д.И., КРАСНОЛОБ, К.Я. *Электроискровая обработка материалов*, №2, 1969, с. 18-23.
36. ЗОЛОТЫХ, Б.Н. *Физические основы электроискровой обработки металлов*. Изд-во технико-теоретической литературы, М., 1953.
37. НЕКРАШЕВИЧ, И.Г., БАКУТО, И. А. *Сборник научных трудов*. ФТИ АН БССР, вып. 2, 1955, с. 167-175.
38. ЛАЗАРЕНКО, Н.И., ЛАЗАРЕНКО, Б.Р. *Способ нанесения покрытий на металлы сплавы и другие токопроводящие материалы включением в искровой разряд*. Авт. свид. номер 70651, 1946.
39. ВЕРХОТУРОВ, А.Д. *Исследование процесса электроискрового упрочнения поверхностей тугоплавкими металлами и соединенными*. Кандидатская диссертация, Киев, 1971.
40. МИХАЙЛОВ, В.В. *Особенности электроискрового легирования титана и его сплавов*. Дисс. на соиск уч. степени канд. техн. наук, Киев, 1977.
41. ПАЛАТНИК, А.С. *ДАН СССР*, Т. LXXXIX, номер 3, 1953, с. 455-458.
42. НАМИТОВ, К.К. *Український фізичний журнал*. Т. 7, номер 10, 1962, с. 1141-1143.

43. TAREL'NIK, V.B., PAUSTOVSKII, A.V., TKACHENKO, Y.G. et al. *Electrospark Graphite Alloying of Steel Surfaces: Technology, Properties, and Application*. Surf. Engin. Appl. Electrochem. 54, 147–156 (2018). <https://doi.org/10.3103/S106837551802014X>
44. НИКОЛЕНКО, С. В. *Электродные материалы для электроискрового легирования с минеральными и самофлюсующимися добавками* / С.В. Николенко, Хосен Ри – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. – 305 с. ISBN 978-5-7389-1638-0
45. САФРОНОВ, И.И. *Исследование возможности применения карбидных и боридных соединений титана, ниобия, циркония и хрома в качестве электродов для электроискрового легирования*. Автореф. дисс. канд. техн. наук, 1967, 179с.
46. Месяц Г. А. «Взрывная электронная эмиссия», Издательство "Физматлит" 2016, с. 273
47. <http://www.rs.ugal.ro/Elnav/raport3.pdf>
48. БЕЛОПИТОВ, Н.Р. *Способ электрического нанесения покрытий благородными и твердыми металлами и устройство для его осуществления*. Авт. свид. НРБ, номер 11036. Заявлено 8.X.1964. Опубликовано 28.XI.1966.
49. *Электроискровой метод упрочнения контактов*. АТС. М., Связьиздат, 1958.
50. ХИМУХИН, С.Н., ВЕРХОТУРОВ, А.Д. *Формирование структуры слоя неметаллах и силовых при электроискровой обработки*. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС. 2010, 240с.
51. ВОРОБЬЕВ, С.В., ГЛЕЗЕР, А. М., СИЗОВ, В.В., ГРОМОВ, В.Е., ИВНОВ, Ю.Ф. *Формирование и эволюция структуры и фазового состава нержавеющей стали при электронно-пучковой обработке и многоциклового усталости*, Материаловедение, Номер:11, Год: 2016, с. 28-34. ISSN:1684-579X
52. ГРОМОВ, В.Е., ИВНОВ, Ю.Ф., ГЛЕЗЕР, А.М. и др. *Эволюция структуры силуминия, поверхностного обработке высокоинтенсивный импульсным электронным пучком и последующему усталостному нагружению до разрушения*. //Известия Российской Академии Наук. Серия физическая. 2015, т.79, вып. 9, с. 1318-1321.
53. БАРАНОВА, Л.В., ДЕМИНА, Э.Л. *Металлографическая травление металлов и сплавов*. Металлургия, 1986, 256с.
54. XIE, Y.J. *Comparative study of microstructural characteristics of electrospark and Nd:YAG. Laser epitaxially growing coatings*// Surface Science, 2007. Vol. 253, pp. 6149-6156.
55. МОРОЗЕНКО, В.Н., НАЗАРЕЦ, В.С., ТИМОШЕНКО, Б.И. и др. //Электронная обработка материалов. 1973. номер 4, стр. 24-26.

56. ЕКМЕКСИ В. *White layer composition, heat treatment and crack formation electric discharge machining process.* // Metallurgical and Materials. Transactions B. 2009. Vol. 40, Iss. 1. pp. 70-81.
57. СТАВИЦКАЯ, Н.Б., СТАВИЦКИЙ, Б.И. *Исследование форм и разломов эрозионных лунок, образованных на различных материалах искровыми разрядами.* // Электронная обработка материалов. 1980. номер 1, с. 9-13.
58. ЗОЛОТЫХ, Б.Н., КОРОБОВА, И.П., СТРИЧИН, Э.М. В сб.: *Физические основы электроискровой обработки.* М.: Наука 1966, с. 63-73.
59. БАБЕЙ, Ю.Н., РЯБОВ, В.Ф., ГОЛУБЕЦ, В.М. *О природе белых слоев, возникающих в процессе некоторых видов обработки.* Физико-химическая механика материалов. – 1973. номер 4, с. 33-38.
60. КОРОБЕЙНИК, В.Ф., РУДЮК, С.И., КОРОБЕЙНИК, С.В. *Особенности формирования микрофотографии, структуры и субструктуры поверхностного слоя при электроискровом легировании.* Электронная обработка материалов. 1989. номер 1, с. 15-17.
61. ЛАРИКОВ, Л.Н., ДУБРОВСКАЯ, Н.В., ЗАХАРОВ, С.М., СНЕЖКОВ, В.А. *Структурные изменения в приповерхностных слоях стали 45 при ЭИЛ.* Электронная обработка материалов. 1981. номер 6, с. 22-24.
62. *Диаграммы состояния двойных металлических систем* /Справочник: в 3-х - Т.2. Под об. ред. Н. П. Лякишева. Машиностроение, 1997, 1024с.
63. БАГДАСАРОВ, Х. С. *Высокотемпературная кристаллизация из расплава.* М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004, 160с.
64. ДУБОВИЦКАЯ, Н.В., КОЛЕНЧЕНКО, Л.Д., СНЕЖКОВ, В.А. *Изменение фазового состава в поверхностных слоях стали 45 при электроискровом легировании хромом.* Электронная обработка материалов. 1987. номер 3, с. 21-25.
65. ЛАЗАРЕНКО, Б.Р., МИХАЙЛОВ, В.В., ГИТЛЕВИЧ, А.Е. *Лазерное воздействие на покрытие полученные методом электроискрового легирования.* Электронная обработка материалов. 1978. номер 3, с. 24-25.
66. ДУБРОВСКАЯ, Н.В., КОЛЕНЧЕНКО, Л.Д., СНЕЖКОВ, С.А. *Изменение фазового состава поверхностных слоев стали 45 при ЭИЛ хромом.* Электронная обработка материалов. 1987. номер 3, с. 21-25.
67. ГЕЛЕР, М.А., ГОРЕЛИК, Г.Е., ПАЛЮКЕВИЧ, Н.В., ПАРНАС, А.Л. *Физика и химия обработки материалов.* 1986. номер 4, с. 31-35.
68. АБЕЛЬСШИТОВ, Г.А., КОКОРА, А.Н., СОБОЛЬ, Э.Н. *Изменение структуры и фазового состава под действием лазерного излучения.* Известия Академии Наук СССР. Сер. физическая. 1989. Т.53, номер 3, с. 410-415.

69. РИСКИН, И.В., ГИТЛЕВИЧ, А.Е., МИХАЙЛОВ, В.В., ТИМОНИН, В.А. *Коррозионное и электрохимическое поведение титана с покрытиями, полученными методом электроискрового легирования, в растворах NaCl, насыщенных хлором. Электронная обработка материалов.* 1978, (6), с. 25–28.
70. ВЕРХОТУРОВ, А.Д., АНФИМОВ, И.С. *ФХОМ.* 1978. № 3. с. 93-98.
71. МИРОНОВ, В.М. *Исследования фазового состава зоны взаимодействия молибдена с железом и сталями при электроискровой обработке. Перспективные материалы.* 2003, №5. с. 84-88.
72. ЛИБЕНСОН, М.Н., САРНАКОВ, С.М., ЧУЙКО, В.А., ЛАЗЕРНОЕ, В.А. *Индукцированные неустойчивости непрерывного следа воздействия на поверхность. ЖТФ.* 2000. Т. 70, Вып. 4. с. 82-87.
73. O'NEIL, W., GABZDY, J. *New developments in laser – assisted oxygen cutting.* Opt. Lasers Eng. 2000. V.34. pp.356 – 367.
74. ERMOLAEV, G.V., KOVALEV, O.B., ORISHICH, A.M. FOMIN, V.M. *Journal of physics D: Applied Physics.* 2006. V.39. pp. 4236-4244.
75. BOLOBOV, V.I. *Conditions for ignition of iron and carbon steel in oxygen.* Combust. Explos. Shock Waves. 2001. V.37. pp. 292 – 298.
76. SYED, A.A., DENOIRJEAN, A.T., FANCHAIS, P. *On the oxidation of stainless steel particle in the plasma jet I. Abbe.* Surf. Coat. Technology. 2006. V. pp. 4368-4382.
77. НИКОЛЕНКО, С.В., ВЕРХОТУРОВ, А.Д. *Новые электродные материалы для электроискрового легирования.* Владивосток: Дальнаука. 2005, 219с.
78. ZAMULAEVA, E.I., LEVASOV, E.A., KUDREASOV, A.E., VACAIEV, P.V., PETRZHNIK, M.I. *Electrospark coatings deposited onto an Armco iron substrate microstructured WC-Co electrodes: Deposition process, structure, and properties.* Surface and Coatings Technology. 2008, V. 202. 249 p.
79. FINCKE, J.R. *Comparison of the Characteristic of HVOF and Plasma Thermal Spray.* Thermal Spray Industrial Application Edited by S. Berndt, C.C. Sampath - ASM International, Ohio, USA, Boston, 1994. pp. 325- 330.
80. VINAYO, M.E., KASSABJI, F., GUYONNET, J., FANCHAIS, P., *Plasma Sprayed WC-Co Coatings: Influence of Spray Conditions (Atmospheric and Low Pressure Spraying) Porosity and Hardness.* J. Vac. Sci. Technology A. 1985. V. A3, №6. pp. 2483-2489.
81. ПОДЧЕРНЯЕВА, И.А., ПАНАСЮК, А.Д., ЛАВРЕНКО, В.А., КОРОЛЬ, А.А., УМАНСКИЙ, И.И. ЮГА, А.П., *Порошковая металлургия.* 2000, №5/6. с. 21-28.
82. НИКОЛЕНКО, С.В. *Повышение эффективности применения функциональных электроискровых на сталях и титановых сплавах путем создания*

электродных материалов с минеральными и самофлюсующимися добавками. Автореферат диссертация на соискание уч. степени доктора техн. наук. Комсомольск-на-Амуре-2013.

83. KAZAK, N., **MIHAILOV, V.**, PERETEATCU, P., CRACAN, C. Tehnologie de durificare a suprafețelor metalice prin sintetizarea în plasma descărcărilor electrice a compușilor cu înalte proprietăți fizico-mecanice și de exploatare. În: *Perspectivile și Problemele Integrării în Spațiul European al Cercetării și Educației. Volumul VII, Partea 2. Cahul: USC, 2020. Conferința științifică internațională „Perspectivile și Problemele Integrării în Spațiul European al Cercetării și Educației”, ed. a VIII-a, 05 iunie 2020, Cahul, Republica Moldova, p. 309-314. ISBN: 978-9975-88-060-2*

84 САМОХОЦКИЙ А.И., КУНЯВСКИЙ М.Н. *Лабораторные работы по металловедению и термической обработке металлов*. Москва. Машиностроение 1981 г.]

85. Structure Analysis by Small-Angle X-Ray and Neutron Scattering, De L.A. Feigin, D.I. Svergun Springer Science & Business Media, 11 nov. 2013 - 335 pagini

86. PISKUNOV, N.S, Calcul diferențial și integral, V.I: Chișinău, Lumina, 1991, p.430 ISBN 5-372-00937-3.

87. КИРЬЯНОВ, Д., *Самоучитель MathCAD 2001*, БХВ-Петербург, 2001 544с. ISBN 5-91457-062-7.

88. V. BESLIU, Research on thermal and thermo-chemical surface treatment of parts by applying electrical discharges in impulse, Summary of PhD thesis, Galati, 2008, 53 p.

89. Panzaru N. cercetări privind conceperea, proiectarea și elaborarea „electrozilor-scule” pentru formarea straturilor de suprafață cu aplicarea descărcărilor electrice în impuls, Teza de doctor, Chisinau 2018, 151 p.

90. **KAZAK, N.** Sintetizarea prin electroeroziune a carburilor pe suprafețele metalice. *Akademios*. 2019, 2(53), pp.31-34. ISSN 1857-0461. Doi: 10.5281/zenodo.3364304.

91. KATINAS, E., JANKAUSKAS, V., **KAZAK, N.**, MICHAILOV, V. Improving Abrasive Wear Resistance for Steel Hardox 400 by Electro-Spark Deposition. *J Frict Wear*. 2019, 40(1), p. 100—106. ISSN 1068-3666. Doi 10.3103/S1068366619010070 (IF: 0,489)

92. KROITORU, D.M.; SILKIN, S.A.; **KAZAK, N.N.**; IVASHKU, S.KH.; PETRENKO, V.I.; POSHTARU, G.I.; YURCHENKO, V.I.; YURCHENKO, E.V. Physico-Mechanical and Tribological Properties of Carbon-Containing Surface Nanocomposites Produced by Electrosark Alloying. *Surf Eng Appl Elect*. 2021, **57(6)**, 617—626. Doi: [10.3103/S1068375521060077](https://doi.org/10.3103/S1068375521060077).

93. КРОЙТОРУ, Д.М.; СИЛКИН, С.А.; **КАЗАК, Н.Н.**; ИВАШКУ, С.Х.; ПЕТРЕНКО, В.И.; ПОШТАРУ, Г.И.; ЮРЧЕНКО, В.И.; ЮРЧЕНКО, Е.В. Физико-механические и трибологические свойства углеродсодержащих поверхностных

нанокompозитов, полученных электроискровым легированием. *Электронная обработка материалов*. 2020, **56(6)**, 12-23. ISSN 0013-5739. Doi: 10.5281/zenodo.4299860.

94. MIHAILOV, V., ȘCURPELO, A., **KAZAK, N.**, IANACHEVICI, A. Structural changes in the surface layers' titanium, electro-spark alloying electrodes made of graphite. În: *8th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics MSCMP-2016, September 12-16, 2016. Chișinău, Moldova Republic. ABSTRACTS*, p. 344. ISBN: 978-9975-71-819-6.

95. ПАЛАТНИК, А.С. //Известия АНССР,сер. физ. 1951 г., Т15, №1, 80 с.

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

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

98. МИХАЙЛОВ, В.В., АБРАМЧУК, А.П. *Особенности электроискрового легирования алюминия и его сплавов. Электронная обработка материалов*. 1986. номер 2, с. 36-41.

99. ЗОЛОТЫХ, Б. Н.. *ЖТФ*, стр. XXIX, № 12, 1959, стр. 1484-1986

100. СМЕТКИН А.А., МАЙОРОВА Ю.К. *Свойства материалов на основе MAX-фаз*. Вестник ПНИПУ, Машиностроение, материаловедение, 2015 г., Т17, №4.

101. ZHANG Z.F., SUN Z.M., HASHIMOTO H. *Deformation and fracture behavior of ternary compound Ti3SiC2 at 25-1300 C*. Journal Materials letters, 2003, no.57, pp.1295-1299.

102. BARSOUM M.W., EL-RAGHY T. *Processing and mechanical properties of Ti3SiC2:1. Reaction path and microstructure evaluation*. Journal American Ceramics Society. 1999 г. №82. pp. 2849-2854.

103. BARSOUM M.W. ALI M. EL-RAGHY T. *Processing and Characterization of Ti2AlC, Ti2AlN, Ti2AlC// J. Metallurgical and Materials Transactions*. 2000. №31. pp. 1857-1865.

104. YAN, M., [et al.] *Synthesis of high-purity bulk TiAl2N by spark plasma sintering (SPS)*. Ceramic Int.-2008 №34-P.1439-1442.

105. NAGNB, M. [et.al]. *Dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti3AlC2*. Advanced materials, 2011, vol.23, ISS.37, pp. 4248-4253.
106. AGAFII, V.I., PADGURSKAS, J., MIHAILOV, V.V., ANDRIUSIS, A., KREIVAITIS, R.; **KAZAK, N.** Improvement of wear resistance of OT4 titanium alloy by electrospark alloying. În: *8th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics MSCMP-2016, September 12-16, 2016. Chişinău, Moldova Republic. ABSTRACTS*, p. 320. ISBN: 978-9975-71-819-6.
107. СЫЧЁВ, В.С. *Исследование электроискрового легирования переходных металлов IV-VI групп тугоплавкими боридами*. Автореф. дис. канд. техн. наук, Киев, 1973, с. 17.
108. V. AGAFII, V. MIHAILOV, N. **KAZAK**, G. VOLODINA, C. CRACAN “Increase of wear resistance of Cr₁₈Ni₁₀Ti stainless steel by method of electric-spark alloying with electrodes of refractory metals and graphite” The 9th International Conference BALTTTRIB'2017 16-17 November 2017, Aleksandras Stulginskis University, Kaunas district, Lithuania, p. 53-56. ISBN: 978-609-449-127-6. Doi 10.15544/balttrib.2017.11
109. MIKHAILOV V.V., OVCHINNIKOV E.V., EISYMONT E.I., **KAZAK N.N.**, PINCHUK T.I., KHOVATOV P.A. (Moldova-Belarus). Physical and mechanical characteristics of nanocomposite coatings formed by electrospark alloying. ”*Vernik Hrodzenskaha Dziarhaunaha Universiteta Imia Ianki Kupaly. Seryia 6. Tekhnika*” vol. 9, no.2, 2019, ISSN 2223-5396, p. 45-53.
110. КАНСКИС МИНДАУГАС, ПАДГУРСКАС ЮОЗАС, САБАЛЮС АРВИДАС, МИХАЙЛОВ ВАЛЕНТИН, **КАЗАК НАТАЛЬЯ**, ЖУНДА АУДРЮС Трение и износ электроискровых покрытий из молибдена, бронзы и комбинированного (Ti + Al + C) состава по стали 45 в среде смазки. *Трение и износ*. 2021. Т. 42, № 1. с. 89-97. DOI: 10.21122/2220-9506-2021-42-1-89-97.
111. AUCHYNNIKAU, Y., PINCHHUC, T., EISYMONT, Y., MIHAILOV, V. **KAZAK, N.** BAGANOVICH, L. Morphological and structural features of electrospark coatings În: *7th International Scientific Conference Material Science “Nonequilibrium phase transformations” September 06, 2021. Varna, Bulgaria*. pp. 67-69. ISSN: 2535-0218.
112. AGAFII, V.I., PADGURSKAS, J., MIHAILOV, V.V.; ANDRIUSIS, A., KREIVAITIS, R., **KAZAK, N.** Influence of sliding distance and load on wear of electrospark coatings. În: *8th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics MSCMP-2016, September 12-16, 2016. Chişinău, Moldova Republic. ABSTRACTS*. p. 322. ISBN: 978-9975-71-819-6.

113. MIKHAILOV, V.V., SHKURPELO, A.I., **KAZAK, N.N.**, POGRELYUK, I.N., TRUSH, V.S., LUKYANENKO, A.G. Modification of the surface of titanium during complex treatment with nitriding, oxidation and electroerosion alloying. În: *Abstracts MSCMP 2018*. 9th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics, September 25-28, 2018, Chisinau, Moldova, p. 267. ISBN: 978-9975-142-35-9
114. AGAFII, V., MIHAILOV, V., IANACHEVICI, A., **KAZAK, N.** Improvement of the reliability of the friction pairs by electrospark alloying. *Buletin AGIR*. 2015, XX(3), p.43-46. ISSN 1224-7928.
115. KUKAREKO, V.; AGAFII, V., MIHAILOV, V., **KAZAK, N.** Evaluation of Tribological Properties of Hard Coatings Obtained on Steel C45 by Electro-Spark Alloying. În: *The 33th International Conference on Surface Modification Technologies*, 26-28.06.2019, Naples, Italia, p. 381-386
116. **KAZAK, N.**, MIHAILOV, V., IANACHEVICI, A., AGAFII, V. Surface modification of structural steels and titanium alloys by synthesizing carbide phases with electro-spark alloying electrodes of transition metals IV - VI groups and graphite. În: *8th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics MSCMP-2016, September 12-16, 2016. Chişinău, Moldova Republic. ABSTRACTS*, p. 340. ISBN: 978-9975-71-819-6
117. KAZAK, N., **MIHAILOV, V.**, PERETEATCU, P., CRACAN, C. Tehnologie de durificare a suprafeţelor metalice prin sintetizarea în plasma descărcărilor electrice a compuşilor cu înalte proprietăţi fizico-mecanice şi de exploatare. În: *Perspectivile şi Problemele Integrării în Spaţiul European al Cercetării şi Educaţiei. Volumul VII, Partea 2. Cahul: USC, 2020. Conferinţa ştiinţifică internaţională „Perspectivile şi Problemele Integrării în Spaţiul European al Cercetării şi Educaţiei”, ed. a VIII-a, 05 iunie 2020, Cahul, Republica Moldova*, p. 309-314. ISBN: 978-9975-88-060-2
118. AUCHYNNIKAU, E.; **KAZAK, N.**; MIKHAILOV, V.; IVASHCU, S.; SHKURPELO, A. Tribotechnical characteristics of nanostructured coatings formed by electrospark alloying method. În: *Proceedings BALTTTRIB'2019*. The 10th International Conference BALTTTRIB'2019, 14–17 November 2019, Kaunas, Lithuania, p. 193-197.
119. PER Eklund, MANFRED Beckers, ULF Jansson, HANS Högberg, Lars Hultman, *The $M_{n+1}AX_n$ phases: Materials science and thin-film processing*, 2010, Thin Solid Films, (518), 8, 1851-1878. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2009.07.184>
120. AUCHYNNIKAU, Y., PINCHHUC, T., EISYMONT, Y., MIHAILOV, V. **KAZAK, N.** BAGANOVICH, L. Morphological and structural features of electrospark coatings În: *7th International Scientific Conference Material Science “Nonequilibrium phase transformations”* September 06, 2021. Varna, Bulgaria. pp. 67-69. ISSN: 2535-0218.

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

ANEXE

«УТВЕРЖДАЮ»

Зам. директора по техническому
развитию ОАО «Белкард»

Г.А.Костюкович

« 23 » 12 2021г.



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор

Института Прикладной Физики

М. Маковей

« 13 » 12 2021г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Мы, нижеподписавшиеся, начальник ИШО И.А.Симан от ОАО «Белкард» (г.Гродно, Беларусь) и ведущий научный сотрудник В.В. Михайлов и аспирант Н.Н.Казак от Института Прикладной Физики (г. Кишинев, Республика Молдова) составили настоящий акт в том, что технология электроискрового легирования путем последовательной обработки электродами из графита, титана и вольфрама применена для упрочнения рабочих поверхностей металлообрабатывающего инструмента и экспериментальной технологической оснастки.

По предварительным данным, применение указанных покрытий наносимых электроискровым способом, позволит повысить стойкость крупного металлообрабатывающего инструмента и оснастки в 1,7-2,3 раза.

В настоящее время партия упрочненного электроискровым методом инструмента проходит испытания, после чего станет возможной оценка экономического эффекта, предложенного Институт Прикладной Физики метода.

От ОАО «Белкард»
г.Гродно

От Института Прикладной Физики

Начальник ИШО

ОАО «Белкард»

г.Гродно

И.А.Симан

Ведущий научный сотрудник

В.В.Михайлов

Аспирант

Н.Н.Казак

Дубл.																				
Взам.																				
Подп.																				

ИЗДЕЛИЯ С ЭЛЕКТРОИСКРОВЫМ ПОКРЫТИЕМ

О

Министерство промышленности Республики Беларусь

Открытое акционерное общество «Белкард»



УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора
по техническому развитию
ОАО «Белкард»

_____ Г.А. Костюкови
«__» _____ 20__ г.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЯХ

Проверил

[Signature]

_____ Е.В. Овчинников
«__» _____ 2022г.

Разработал

[Signature]

_____ Н.Н. Казак
«__» _____ 20__ г.

ТЛ

[illegible][illegible]

[illegible][illegible]

А	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код, наименов. операции	Обозначение документа							
Б	Код, наименование оборудования					Куп	Проф	СМ	УТ	Р		УТ	КР.
М	Вспомогательный материал					Код		Конц.	Вязкость		Фракция		Плотность
Р						Давление	t	ОПА/К		Дтока	U	Время	

A01	050 Укладывание
02	Уложить изделие с покрытием в тару для транспортирования
03	
04	055 Транспортирование
05	Транспортировать долота в место складирования
06	
07	
08	
09	
10	
11	
12	
13	
14	
15	
16	
17	
18	

КТП	
-----	--

Lista publicațiilor la tema tezei de doctor, ale d-nei Natalia KAZAK

1. Articole în reviste științifice

1.1. în reviste din bazele de date Web of Science și SCOPUS

1. KATINAS, E., JANKAUSKAS, V., **KAZAK, N.**, MICHAILOV, V. Improving Abrasive Wear Resistance for Steel Hardox 400 by Electro-Spark Deposition. *J Frict Wear*. 2019, 40(1), p. 100—106. ISSN 1068-3666. Doi 10.3103/S1068366619010070 (IF: 0,489).

2. MIKHAILOV, V.V., **KAZAK, N.N.**, AGAFII, V.I., YANAKEVICH, A.I. Synthesis of Carbide Phases in Surface Metal Layers Under Electrospark Alloying with Graphite and Transition Metals in Groups IV–VI. *Powder Metall Met C*. 2019, 58(5-6), p.307-311. ISSN 1068-1302. Doi 10.1007/s11106-019-00079-8 (IF: 0,381).

3. RUKANSKIS, M.; PADGURSKAS, J.; SABALIUS, A.; MICHAILOV, V.; **KAZAK, N.**; ZUNDA, A. Friction and Wear of Electrospark Coatings Made of Molybdenum, Bronze, and Combined (Ti + Al + C) Composition on Steel 45 in a Lubricant Medium. *J Frict Wear*. 2021, 42(1), 56—62. Doi: [10.3103/S1068366621010086](https://doi.org/10.3103/S1068366621010086) (IF: 0,606).

1.2. în reviste din străinătate recunoscute

4. AGAFII, V., MIHAILOV, V., IANACHEVICI, A., **KAZAK, N.** Improvement of the reliability of the friction pairs by electrospark alloying. *Buletin AGIR*. 2015, XX(3), p.43-46. ISSN 1224-7928.

5. AGAFII, V.I., PADGURSKAS, J., MIHAILOV, V.V., ANDRIUSIS, A., KREIVAITIS, R., **KAZAK, N.** The wear resistance of electrospark coatings on steel c45 when operating with counter bodies of different steels. *Agricultural Engineering, Research Papers*, 2015, Vol. 47, p.1-5, ISSN 1392-1134/ eISSN 2345-0371

6. KUKAREKO, V.; AGAFII, V.; MIHAILOV, V.; GRIGORCHIC, A.; **KAZAK, N.** Evaluation of Tribological Properties of Hard Coatings Obtained on Steel C45 by Electro-spark Alloying. *Key Engineering Materials*. 2019, p.813, pp.381—386. ISSN 1662-9795. Doi 10.4028/www.scientific.net/KEM.813.381.

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

8. МИХАЙЛОВ, В.В.; ОВЧИННИКОВ, Е.В.; ЭЙСЫМОНТ, Е.И.; **КАЗАК, Н.Н.**; ПИНЧУК, Т.И.; ХОВАТОВ, П.А. Физико-механические характеристики нанокompозитных покрытий, формируемых методом электроискрового легирования. *Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка*. 2019, **9(2)**, 45-53. ISSN 1810-0198

9. **КАЗАК, Н.Н.**; ОВЧИННИКОВ, Е.В.; МИХАЙЛОВ, В.В.; ЧЕКАН, Н.М. Электрохимическое поведение композиционных покрытий, получаемые методом электроискрового легирования. *Горная механика и машиностроение*. **2020(2)**, 1—7. ISSN 1728-3841.

10. УКАНСКИС МИНДАУГАС, ПАДГУРСКАС ЮОЗАС, САБАЛЮС АРВИДАС, МИХАЙЛОВ ВАЛЕНТИН, **КАЗАК НАТАЛЬЯ**, ЖУНДА АУДРЮС Трение и износ электроискровых покрытий из молибдена, бронзы и комбинированного (Ti + Al + C) состава по стали 45 в среде смазки. *Трение и износ*. 2021. Т. 42, № 1. с. 89-97. DOI: 10.21122/2220-9506-2021-42-1-89-97.

11. KROITORU, D.M.; SILKIN, S.A.; **KAZAK, N.N.**; IVASHKU, S.KH.; PETRENKO, V.I.; POSHTARU, G.I.; YURCHENKO, V.I.; YURCHENKO, E.V. Physico-Mechanical and Tribological Properties of Carbon-Containing Surface Nanocomposites Produced by Electrospark Alloying. *Surf Eng Appl Elect*. 2021, **57(6)**, 617—626. Doi: [10.3103/S1068375521060077](https://doi.org/10.3103/S1068375521060077).

1.3. în reviste din Registrul Național al revistelor de profil, cu indicarea categoriei (B)

12. **KAZAK, N.** Sintetizarea prin electroeroziune a carburilor pe suprafețele metalice. *Akados*. 2019, 2(53), pp.31-34. ISSN 1857-0461. Doi: 10.5281/zenodo.3364304.

1.4. în reviste din Registrul Național al revistelor de profil, cu indicarea categoriei (A)

13. КРОЙТОРУ, Д.М.; СИЛКИН, С.А.; **КАЗАК, Н.Н.**; ИВАШКУ, С.Х.; ПЕТРЕНКО, В.И.; ПОШТАРУ, Г.И.; ЮРЧЕНКО, В.И.; ЮРЧЕНКО, Е.В. Физико-механические и трибологические свойства углеродсодержащих поверхностных нанокompозитов, полученных электроискровым легированием. *Электронная обработка материалов*. 2020, **56(6)**, 12-23. ISSN 0013-5739. Doi: 10.5281/zenodo.4299860.

2. Articole în culegeri științifice

2.1. în lucrările conferințelor științifice internaționale (peste hotare)

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

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

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

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

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

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

2.2. în lucrările conferințelor științifice internaționale (Republica Moldova)

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

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

22. **KAZAK, N.**, MIHAILOV, V., PERETEATCU, P., CRACAN, C. Tehnologie de durificare a suprafețelor metalice prin sintetizarea în plasma descărcărilor electrice a compușilor cu înalte proprietăți fizico-mecanice și de exploatare. În: *Perspectivile și Problemele Integrării în Spațiul European al Cercetării și Educației. Volumul VII, Partea 2. Cahul: USC, 2020. Conferința științifică internațională „Perspectivile și Problemele Integrării în Spațiul European al Cercetării și Educației”, ed. a VIII-a, 05 iunie 2020, Cahul, Republica Moldova*, p. 309-314. ISBN: 978-9975-88-060-2

3. Teze în culegeri științifice

3.1. în lucrările conferințelor științifice internaționale (Republica Moldova)

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

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

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

26. MIHAILOV, V., ȘCURPELO, A., **KAZAK, N.**, IANACHEVICI, A. Structural changes in the surface layers' titanium, electro-spark alloying electrodes made of graphite. În: *8th International*

Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics MSCMP-2016, September 12-16, 2016. Chişinău, Moldova Republic. ABSTRACTS, p. 344. ISBN: 978-9975-71-819-6.

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

28. MIKHAILOV, V.V., SHKURPELO, A.I., **KAZAK, N.N.**, POGRELYUK, I.N., TRUSH, V.S., LUKYANENKO, A.G. Modification of the surface of titanium during complex treatment with nitriding, oxidation and electroerosive alloying. În: *Abstracts MSCMP 2018. 9th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics*, September 25-28, 2018, Chisinau, Moldova, p. 267. ISBN: 978-9975-142-35-9

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

CURRICULUM VITAE

Numele și prenumele: KAZAK Natalia

Data nașterii: 05.09.1983

Cetățenia: Republica Moldova

Adresa, telefoane de contact, e-mail:

Republica Moldova

2060, municipiu Chișinău

Str. Cuza-Vodă – 13/3, ap. 34

+ 373 22-62-51-64

+373 69-15-83-27

natalia.kazak@bpm.utm.md

kazaknatalia@mail.ru

natalia.kazak@ifa.md

kazak.natalia.nikolaevna@gmail.com



Gradul științific și titlul științific / științifico-didactic:

Gradul științific de master în tehnică, specialitatea „Tehnologia Construcțiilor de Mașini”, (diploma seria AM, nr. 011482, eliberată la 10 octombrie 2007.

Studii superioare: (Licență, Masterat, Doctorat, Formarea psihopedagogica)

Instituția (data de la – până la)	Diploma sau gradul obținut:
Colegiu Tehnic din Chișinău, 2002	Diploma de bacalaureat, seria AB nr. 0056577, eliberată la 29 iunie 2002.
Universitatea Tehnică a Moldovei, Facultatea de Inginerie și Management în Construcții de Mașini, Chișinău, 2002 – 2006	Diploma de Licență învățământ superior universitar. Titlul de Inginer licențiat. Profil Mecanică. Specialitatea: Mașini unelte și scule. Seria AL, nr. 0115020, eliberat la 1 iulie 2006.
Universitatea Tehnică a Moldovei, Facultatea de Inginerie și Management în Construcții de Mașini specialitatea Tehnologia Construcțiilor de Mașini, Chișinău, 2006-2007	Diploma de Master. Titlul de master în Tehnologia Construcțiilor de Mașini. Diploma seria AM, nr. 011482, eliberată la 10 octombrie 2007.

Experiență profesională, stagii:

Funcția ocupată în prezent: Lector universitar, Catedra/Departamentul Bazele Proiectării Mașinilor, Facultatea Inginerie Mecanică Industrială și Transporturi, Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău.

Stagiul de muncă: Universitatea Tehnică a Moldovei – 15 ani

Instituția (data de la – până la)	Perioada	Postul
Universitatea Tehnică a Moldovei, Facultatea de Inginerie și Management în Construcții de Mașini, catedra Studiul și Tehnologia Materialelor	01.09.2006 – 31.10.2006	Laborant Superior
Universitatea Tehnică a Moldovei, Facultatea de Inginerie și Management în Construcții de Mașini, catedra Tehnologia Constructoare de Mașini, catedra Studiul și Tehnologia Materialelor	01.11.2006 – 31.10.2007	Masterand, Laborant Superior (cumul)

Universitatea Tehnică a Moldovei, Facultatea de Inginerie și Management în Construcții de Mașini, catedra Studiul și Tehnologia Materialelor	01.09.2007 – 31.08.2009	Asistent Universitar
Universitatea Tehnică a Moldovei, Facultatea de Inginerie și Management în Construcții de Mașini, catedra Studiul și Tehnologia Materialelor	01.09.2009 – 31.10.2014	Lector Universitar (titular)
Universitatea Academiei de Științe a Moldovei,	01.11.2014 – 2017,	Doctorand,
Institutul de Fizică Aplicată, Laboratorul Metode Electrofizice și Electrochimice de Prelucrare a Materialelor”Boris Lazarenko”	01.01.2015 – 2017	Cercetător Științific (0,5 un cumul)
Universitatea Tehnică a Moldovei, Facultatea de Inginerie și Management în Construcții de Mașini, departamentul Bazele Proiectării Mașinilor	01.11.2014 - 2020	Lector Universitar (cumul)
Institutul de Fizică Aplicată, Laboratorul Metode Electrofizice și Electrochimice de Prelucrare a Materialelor”Boris Lazarenko”	2017 - prezent	Cercetător Științific

Domeniul de activitate științifică:

Tehnologia construcțiilor de mașini

Participarea la proiecte, granturi de cercetare sau transfer tehnologic:

Perioada: de la până la	Locul	Compania	Poziția	Tipul și denumirea proiectului
2014-2018	Chișinău	ASM, IFA	Executor	Proiecte instituționale: CSSDT 15.817.02.05A <i>Metode fizico-chimice și aspectele ingineresti ale obținerii materialelor și suprafețelor noi pentru tehnologiile de multiscară, conducător - m. cor. Alexandr Dicusar</i>
01.03.2014-31.07.2016	Chișinău	ASM, IFA S.A. „TOPAZ”	Executor	Proiect de transfer tehnologic: <i>Elaborarea documentației tehnice și confecționarea modelelor pilot a patru tipuri de aplicatoare pentru instalația “TOPAZ-ЭИЛ” de aliere cu scânteii electrice. “Elaborarea schiței de proiect a 4 tipuri de aplicatoare pentru instalația de aliere cu scânteii electrice” Etapa I.</i>
01.08.2016-30.11.2016	Chișinău	ASM, IFA S.A. „TOPAZ”	Executor	Proiect de transfer tehnologic: <i>Elaborarea documentației tehnice și confecționarea modelelor pilot a patru tipuri de aplicatoare pentru instalația “TOPAZ-ЭИЛ” de aliere cu scânteii electrice. “Fabricarea modelelor pilot a patru tipuri de aplicatoare cu vibrații, cu rotații și vibrații+rotații, aplicatoare manuale cu vibrație pentru instalația de aliere cu scânteii electrice”. Etapa II.</i>
2018-2022	Chișinău	IFA	Executor	H2020-MSCA-RISE-2017-778357 (2018 - 2022) „Electrozi metalici și semiconductori inteligenți pentru procesarea electrochimică

				și dispozitivele electrochimice, <i>conducător - Natalia Țințaru, dr.</i>
01.01.2019-31.12.2020	Chișinău	IFA	Executor	Proiectului bilateral Moldova-Belarus 19.80013.58.07.06A/BL „ <i>Tehnologie de sintetizare a carburilor și a nanostructurilor la alierea prin scânteii electrice cu electrozi din grafit, Ti, și W și studierea influenței lor asupra proprietăților suprafețelor metalice</i> ”.
01.01.2020-31.12.2023	Chișinău	IFA	Executor	Proiecte Programe de Stat: ANCD 20.80009.5007.18 (2020 - 2023) „ <i>Obținerea de noi materiale micro-și nano-structurate prin metode fizico-chimice și elaborarea tehnologiilor pe baza acestora</i> ”, conducător - Alexandr Dicusar, dr.hab., prof., mem.-cor. AȘM

Date statistice privind numărul total de publicații științifice și metodicodidactice publicate:

Am publicat 29 de publicații științifice și metodicodidactice, inclusiv:

Articole în reviste recenzate – 3

Materiale ale comunicărilor științifice – 12

Lucrări metodice - 3

Medalie de argint (INVENTICA 2021) – 1

Premiului a trei Academii: Academia Națională a Ucrainei, Academia Națională a R. Belarus și Academia R. Moldova (2021)

Participări la conferințe naționale și internaționale:

1. Conferința Științifică a Doctoranzilor. Ediția a V-a. Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: Viziuni ale tinerilor cercetători. UnAȘM, 2016, Chișinău, Moldova.
2. The 8th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics MSCMP-2016, September 12-16, 2016. Chișinău, Moldova Republic.
3. Conferința Științifică a Doctoranzilor (cu participare internațională). Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: Viziuni ale tinerilor cercetători. Chișinău, 2017. Ediția a VI-a. 15 iunie 2017, Chișinău, Republica Moldova.
4. The 9th International Conference BALTTTRIB'2017 16-17 November 2017, Aleksandras Stulginskis University, Kaunas district, Lithuania.
5. The 9th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics, September 25-28, 2018, Chisinau, Moldova,
6. The 10th International Conference BALTTTRIB'2019, 14–17 November 2019, Kaunas, Lithuania,
7. The 33th International Conference on Surface Modification Technologies, 26-28.06.2019, Naples, Italia.
8. *Международной научной конференции, Актуальные проблемы прочности (Витебск, 25–29 мая 2020 года).*
9. Conferința științifică internațională „Perspectivele și Problemele Integrării în Spațiul European al Cercetării și Educației”, Cahul: USC, 2020., ed. a VIII-a, 05 iunie 2020, Cahul, Republica Moldova.

Antrenarea în managementul cercetării și educației:

Membru al Senatului Universitatea Academiei de Științe a Moldovei 2014-2017.

Abilități de analiză și prognozare economico-financiară, prezentare a informației, de instruire, de cercetare științifică, de lucru în echipă.

DECLARAȚIE

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

Natalia KAZAK



Data: 29.05.2023