



MINISTERUL EDUCAȚIEI  
Universitatea Națională de Știință  
și Tehnologie POLITEHNICA din  
București  
Școala Doctorală de Inginerie  
Industrială și Robotică



Cornel-Cristian G. ENCIU

TEZĂ DE DOCTORAT

CERCETĂRI PRIVIND PRELUCRAREA DE  
FINISARE HIBRIDĂ,  
ELECTROCHIMICĂ-ULTRASONICĂ

*Conducător științific,*

Prof. univ. dr. ing. Liviu-Daniel GHICULESCU

## Cuprins

	Nr. Pag. Rezumat	Nr. Pag. Teză
CUVÂNT ÎNAINTE		5
INTRODUCERE		7
PARTEA ÎNTÂI		
ANALIZA STADIULUI ACTUAL PRIVIND PROCEDEELE DE PRELUCRARE NECONVENȚIONALE HIBRID - PRELUCRAREA ELECTROCHIMICĂ COMBINATĂ CU ULTRASUNETE		9
<b>CAPITOLUL 1</b>		
TIPURI DE PROCEDEE DE PRELUCRARE NECONVENȚIONALE HIBRIDE	4	10
1.1 Clasificarea tehnologiilor neconvenționale simple și hibride	4	10
1.2 Prelucrări neconvenționale hibride cu vibrații	4	15
1.3 Prelucrări neconvenționale hibride cu laser	4	20
1.4 Prelucrări neconvenționale hibride asistate de fluide	5	27
1.5 Prelucrări neconvenționale hibride asistate de câmp magnetic	5	30
1.6 Alte tipuri de prelucrări neconvenționale hibride	5	32
1.7 Concluzii	5	39
<b>CAPITOLUL 2</b>		
LANȚURI ULTRASONICE PENTRU PROCEDEE NECONVENȚIONALE HIBRIDE	6	40
2.1 Structura lanțurilor ultrasonice	6	40
2.2 Moduri de asamblare	6	49
2.3 Concluzii	6	51
<b>CAPITOLUL 3</b>		
ANALIZA FUNCȚIONĂRII LANȚURILOR ULTRASONICE	7	52
3.1 Dimensiunile lanțurilor ultrasonice și frecvențele proprii	7	52
3.2 Tipuri de unde ultrasonice	7	53
3.3 Parametrii undelor ultrasonice	7	53
3.4 Lanțuri ultrasonice integrate în echipamente de prelucrare	7	54
3.5 Concluzii	7	55
<b>CAPITOLUL 4</b>		
ANALIZA PRELUCRĂRII HIBRIDE, ELECTROCHIMICĂ- ULTRASONICĂ	8	56
4.1 Prelucrarea electrochimică uzuală	8	56
4.2 Metode de depasivizare	8	58
4.3 Prelucrarea hibridă electrochimică-ultrasonică	8	59
4.4 Fenomene specifice prelucrării electrochimice combinată cu ultrasunete	8	61
4.5 Camere de contrapresiune	8	62
4.6 Avantaje și dezavantaje ale prelucrării electrochimice combinată cu ultrasunete	8	62
4.7 Concluzii	8	63
PARTEA A DOUA		
CONTRIBUȚII PRIVIND PROCESELE ȘI ECHIPAMENTELE DE FINISARE ELECTROCHIMICĂ-ULTRASONICĂ		64
<b>CAPITOLUL 5</b>		
OBIECTIVELE, DIRECȚIILE DE CERCETARE ȘI METODOLOGIA ABORDATE ÎN TEZA DE DOCTORAT	9	65
5.1 Sinteza aspectelor critice privind stadiul actual al tehnologiilor neconvenționale hibrid	9	65
5.2 Obiectivele tezei de doctorat	9	66

UNSTPB	Teză de doctorat	Cercetări privind prelucrarea de finisare hibridă, electrochimică-ultrasonică	Cornel-Cristian G. ENCIU
	5.3 Direcții de cercetare și metodologia de cercetare din cadrul tezei de doctorat		10 67
	<b>CAPITOLUL 6</b>		
	PROIECTAREA CONCEPTUALĂ A ECHIPAMENTULUI DE FINISARE HIBRIDĂ ELECTROCHIMICĂ-ULTRASONICĂ		11 69
	6.1 Date generale		11 69
	6.2 Formularea funcțiilor echipamentului de finisare electrochimică-ultrasonică		11 70
	6.3 Stabilirea structurii funcțiilor principale		11 72
	6.4 Identificarea soluțiilor		11 74
	6.5 Concluzii		11 75
	<b>CAPITOLUL 7</b>		
	MODELAREA, SIMULAREA NUMERICĂ A FUNCȚIONĂRII LANȚURILOR ULTRASONICE UTILIZATE LA PROCESUL DE FINISARE HIBRIDĂ, PRELUCRARE ELECTROCHIMICĂ - ULTRASONICĂ		12 76
	7.1 Alegerea bușei radiante și dimensionarea concentratorului		12 76
	7.2 Modelarea cu elemente finite a funcționării diverselor variante de concentratoare și scule integrate		13 79
	7.3 Graficele de variație ale amplificării și elongației		16 96
	7.4 Concluzii		16 98
	<b>CAPITOLUL 8</b>		
	MODELAREA ȘI SIMULAREA NUMERICĂ A INFLUENȚEI MATERIALELOR IZOLATOARE ASUPRA CARACTERISTICILOR LANȚULUI ULTRASONIC		17 99
	8.1 Influența policlorurii de vinil		17 99
	8.2 Influența poliamidei		17 103
	8.3 Influența polietilenei		18 104
	8.4 Influența vopselei epoxidice		18 105
	8.5 Concluzii		18 109
	<b>CAPITOLUL 9</b>		
	SIMULAREA NUMERICĂ A UNOR COMPONENTE ALE PROCESULUI DE FINISARE HIBRIDĂ ELECTROCHIMICĂ-ULTRASONICĂ		19 110
	9.1 Soluții tehnologice pentru depasivizare		19 110
	9.2 Simularea numerică a efectului componentei ultrasonice în procesul de prelucrare hibridă electrochimică-ultrasonică		19 110
	9.2.1 Simularea numerică a depasivizării ultrasonice		19 111
	9.2.2 Simularea numerică a reducerii rugozității suprafeței prelucrate prin cavitație ultrasonică		22 120
	9.3 Simularea numerică a procesului de prelevare a materialului în cazul oțelurilor cu constituenți de carburi de Cr și W		22 123
	9.4 Simularea numerică a curgerii electrolitului		23 128
	9.5 Concluzii		24 134
	<b>CAPITOLUL 10</b>		
	TESTAREA PRELIMINARĂ A PROCESULUI DE FINISARE HIBRIDĂ ELECTROCHIMICĂ - ULTRASONICĂ PE STAND EXPERIMENTAL DE LABORATOR		25 135
	10.1 Realizarea standului experimental		25 135
	10.2 Rezultatele prelucrărilor preliminare pe standul experimental		25 141
	10.3 Concluzii		26 143

<b>CAPITOLUL 11</b>			
PROIECTAREA DETALIATĂ A ECHIPAMENTULUI DE FINISARE HIBRIDĂ ELECTROCHIMICĂ-ULTRASONICĂ	27	144	
11.1 Date generale	27	144	
11.2 Dezvoltarea conceptelor și elementele componente ale echipamentului de prelucrare electrochimică-ultrasonică	27	144	
11.3 Concluzii	28	152	
<b>CAPITOLUL 12</b>			
REALIZAREA ECHIPAMENTULUI DE FINISARE HIBRIDĂ, MODEL EXPERIMENTAL	29	153	
12.1 Realizarea propriu-zisă a echipamentului	29	153	
12.2 Asamblarea echipamentului de prelucrare electrochimică-ultrasonică	29	159	
12.3 Concluzii	29	160	
<b>CAPITOLUL 13</b>			
TESTAREA ECHIPAMENTULUI DE FINISARE HIBRIDĂ ELECTROCHIMICĂ-ULTRASONICĂ ÎN CONDIȚII DE LABORATOR	30	161	
13.1 Metodologia de testare	30	161	
13.2 Măsurarea frecvențelor proprii ale lanțurilor ultrasonice, reglarea și monitorizarea generatorului ultrasonic	30	163	
13.3 Realizarea testelor în laborator	32	171	
13.3.1 Prelucrarea electrochimică	33	173	
13.3.2 Prelucrarea cu ultrasunete	33	179	
13.3.3 Prelucrarea electrochimică-ultrasonică simultană și succesivă	34	182	
13.4 Analiza cu ajutorul microscopului cu scanare electronică a suprafețelor prelucrate	36	189	
13.5 Analiza 2D și scanarea 3D a suprafețelor prelucrate	40	209	
13.6 Stabilirea cauzelor neconformităților și soluțiilor pentru creșterea performanțelor tehnologice ale echipamentului de finisare hibridă, electrochimică-ultrasonică	40	216	
13.7 Concluzii	41	220	
<b>CAPITOLUL 14</b>			
CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE	42	221	
14.1 Concluzii finale	42	221	
14.2 Contribuții originale	43	222	
14.3 Direcții viitoare de cercetare	45	224	
BIBLIOGRAFIE	46	225	
ANEXA 1. LISTĂ ABREVIERI		240	
ANEXA 2. LISTĂ FIGURI		242	
ANEXA 3. LISTĂ TABELE		251	
ANEXA 4. LUCRĂRI PUBLICATE ÎN VOLUMELE UNOR CONFERINȚE, REVISTE INDEXATE ISI		253	
ANEXA 5. LUCRĂRI PUBLICATE ÎN VOLUMELE UNOR CONFERINȚE, REVISTE INDEXATE BDI		253	
ANEXA 6. PREMII		254	

**Cuvinte cheie:** prelucrare electrochimică-ultrasonică, hibrid, simulare, modelare, simultan, succesiv.

## CAPITOLUL 1. TIPURI DE PROCEDEE DE PRELUCRARE NECONVENȚIONALE HIBRIDE

### 1.1 Clasificarea tehnologiilor neconvenționale simple și hibride

Conform literaturii de specialitate, tehnologiile neconvenționale (TN) pot îndepărta materialul de pe suprafețele pieselor, la nivel micrometric sau nanometric, aplicând diverse tipuri de energie. Aceste tehnologii realizează prelucrările pieselor printr-un transfer concentrat de energie, de la sculă la semifabricat, iar în general, între sculă și piesă nu există contact, distanța dintre acestea fiind numită interstițiu de lucru, valorile acestuia fiind foarte mici, de obicei la majoritatea prelucrărilor fiind până la maxim 1 mm [1,85].

Plecând de la tehnologiile menționate în tabelele de mai sus, se pot dezvolta procedeele de prelucrare de tip **hibrid**, două sau mai multe dintre acestea fiind combinate, putând fi aplicate **simultan sau succesiv**. Prelucrarea hibridă înseamnă combinația de procese pentru prelevarea materialului într-un mod mai eficient și mai productiv.

Un obiectiv general al fabricației hibride este efectul “1 + 1 = 3” [185], ceea ce înseamnă că efectul pozitiv al procesului hibrid este amplificarea efectelor proceselor individuale [138,139].

În literatura din domeniul tehnologiilor neconvenționale se pot identifica mai multe interpretări ale termenului de hibrid după cum urmează [5,187]:

- combinație de surse de energie active diferite care acționează în același timp în zona de prelucrare;
- procese care combină etape efectuate de obicei în două sau mai multe faze (succesiv).

De asemenea, procesele de fabricare hibride mai pot fi grupate în două categorii majore [5,137]:

**A)** procese **combinat**e sau mixte în care toate procesele constitutive sunt implicate direct în îndepărtarea materialului;

**B)** procese de tip **asistat** în care doar unul dintre procesele participante îndepărtează direct materialul, în timp ce celălalt are un efect pozitiv asupra condițiilor de prelucrare.

Prin prisma acestei clasificări, prelucrarea de finisare hibridă electrochimică în câmp ultrasonic se încadrează în categoria de tehnologie combinată sau mixtă întrucât atât componenta electrochimică cât și cea ultrasonică prelevează materialul, cu ponderi diferite: prima prin dizolvare anodică și a doua prin prelevare mecano-hidraulică.

### 1.2 Prelucrări neconvenționale hibride cu vibrații

În urma unei analize privind aplicarea vibrațiilor în domeniul tehnologiilor neconvenționale, în continuare vor fi prezentate câteva aspecte teoretice, dar și principalele scheme de principiu dezvoltate în literatura de specialitate, privind aplicarea vibrațiilor asupra elementelor din mediul de lucru (piesa prelucrată, electrodul-sculă sau fluidul de lucru).

### 1.3 Prelucrări neconvenționale hibride cu laser

Prelucrarea cu laser (Laser Beam Machining - LBM) a diferitelor materiale metalice sau nemetalice constituie aplicații energetice care cuprind: tăierea, găurirea, sudarea, marcarea și inscripționarea etc. Laserul se folosește de asemenea la realizarea unei game variate de

tratamente termice și termochimice. Aplicabilitatea pe scară largă a LBM, se justifică prin aceea că laserul creează una dintre cele mai mari densități de putere (intensitate a radiației) din domeniul tehnologic și recent, asistăm la o reducere a costurilor acestor instalații.

O simulare numerică a tehnologiei hibrid laser - EDM într-o abordare succesivă este prezentată într-o lucrare dezvoltată de cercetătorii Marinescu N., Ghiculescu D., respectiv Nanu S. [157].

#### 1.4 Prelucrări neconvenționale hibride asistate de fluide

- **Prelucrări ultrasonice asistate de fluide electrorheologice**

Una dintre soluții pentru a restrânge generarea defectelor este utilizarea fluidului electrorheologic (fluid care-și poate modifica vâscozitatea prin acțiunea unui câmp electric extern). Odată cu creșterea intensității câmpului electric vâscozitatea fluidului crește. Uleiul de siliciu și dielectricul formează ingredientele unui fluid *electrorheologic*. În absența câmpului electric, particulele dielectrice rămân dispersate în uleiul de siliciu. Forța de atragere între particulele dielectrice produce o vâscozitate crescută a fluidului *electrorheologic*.

#### 1.5 Prelucrări neconvenționale hibride asistate de câmp magnetic

Acumularea de particule în zona de prelucrare care afectează negativ performanța și eficiența procesului a fost întotdeauna o problemă pentru EDM. Introducerea câmpului magnetic exercită o forță perpendiculară pe mișcarea electrodului. Ca rezultat, particulele de material sunt supuse atât unei forțe magnetice, cât și unei forțe centrifuge.

Procesul EDM cu activare magnetică cu rezultate privind creșterea productivității și stabilității acestuia este descris și în lucrările realizate de către cercetători precum A. M. Țițu, respectiv D. Nanu, L. Slătineanu, D. Ghiculescu, și alți colaboratori într-un tratat de tehnologii neconvenționale [158,159].

#### 1.6 Alte tipuri de prelucrări neconvenționale hibride

- **Prelucrare prin reacții electrochimice și descărcări electrice (ECDM)**

Metode de prelucrare a metalelor dure, care sunt greu de uzinat cu metode convenționale, continuă să atragă atenția. Prelucrarea electrochimică și electroeroziunea, au fost combinate în cadrul unui proces hibrid, ECDM.

#### 1.7 Concluzii

- Procesele de prelucrare hibride sunt în faza de dezvoltare a ciclului de viață, iar unele sunt chiar emergente, lăsând posibilități ample pentru investigații viitoare. Mecanismele procesului, metodele de simulare, mașinile unelte de ultra precizie pentru micro prelucrarea hibridă, tehnicile de monitorizare a proceselor și metrologie, eficiența costurilor și implementarea industrială sunt elemente care trebuie explorate.

## **CAPITOLUL 2.**

### **LANȚURI ULTRASONICE PENTRU PROCEDEE NECONVENȚIONALE HIBRIDE**

#### **2.1 Structura lanțurilor ultrasonice**

Sistemele ultrasonice sunt cunoscute prin faptul că produc și transmit oscilațiile ultrasonice. Domeniul de frecvență al ultrasunetelor se consideră a fi mai mare de 20 kHz ajungând până la 1 GHz [2].

În continuare, în cadrul acestui capitol vor fi descrise la modul general toate elementele componente ale unui proces tehnologic ce utilizează ultrasunete.

#### **2.2 Moduri de asamblare**

La asamblarea transducoarelor piezoceramice, o atenție deosebită trebuie acordată modului de realizare a îmbinării elementelor piezoceramice cu suprafața radiantă, îmbinare care se poate realiza prin lipire tare, sudare sau șuruburi (cele mai utilizate).

Asamblarea concentratorului de generatorul de vibrații, în vederea alcătuirii ansamblului transductorului, se poate face fie prin lipire, fie prin filet.

Realizarea concentratoarelor ultrasonice, care integrează scula presupune obținerea condiției de rezonanță (cu consum mare de timp). Frecvența proprie a transductorului este considerată frecvența țintă, valoarea acesteia fiind dată de furnizor. În cazul aplicațiilor, tehnologiilor hibride care folosesc ultrasunete, sarcina tehnologului este să suprapună frecvența concentratorului, care integrează scula peste frecvența transductorului. Aceasta este facilitată de modelarea și simularea concentratoarelor. În final, se obține frecvența de rezonanță prin ajustări minime ale dimensiunilor concentratoarelor.

#### **2.3 Concluzii**

- Structura lanțului ultrasonic trebuie să fie bine definită și cunoscută, iar generatorul de ultrasunete, sursa de energie, transductorul ultrasonic necesită să fie reglate astfel încât să transmită frecvența dorită sau intensitatea de curent stabilită prin calcule.

## CAPITOLUL 3.

### ANALIZA FUNCȚIONĂRII LANȚURILOR ULTRASONICE

#### 3.1 Dimensiunile lanțurilor ultrasonice și frecvențele proprii

Mai multe tipuri de unde ultrasonice se pot propaga în medii solide, acestea diferențiindu-se prin [2]: forma și direcția traiectoriilor pe care le transmit particulelor materialului în care sunt propagate, viteza de propagare, distanța la care sunt susceptibile să se propage în material.

Pentru realizarea condiției de rezonanță, este necesară determinarea frecvenței proprii a lanțurilor US, care este facilitată de modelarea și simularea numerică cu elemente finite, premergător realizării fizice.

#### 3.2 Tipuri de unde ultrasonice

Există patru tipuri de unde ultrasonice: unde longitudinale sau compressive, unde transversale sau de forfecare, unde de suprafață sau RAYLEIGH și unde LAMB sau de placă.

#### 3.3 Parametrii undelor ultrasonice

Parametrii oscilațiilor ultrasonice sunt: perioada, frecvența, amplitudinea oscilației, etc. (conform tabelului 3.1 din cadrul tezei complete).

#### 3.4 Lanțuri ultrasonice integrate în echipamente de prelucrare

Pe lângă îmbunătățirea spectaculoasă a parametrilor tehnologici ai electroeroziunii ultrasonice (EDM+US) comparativ cu tehnologia EDM clasică, totuși, tehnologia EDM+US are un dezavantaj important cauzat de lipsa de flexibilitate. Acest lucru este derivat din condiția tehnologică critică ce trebuie îndeplinită atunci când lanțul ultrasonic funcționează la rezonanță, ceea ce presupune egalitatea între frecvențele proprii ale principalelor componente ale lanțului ultrasonic, transductorul ultrasonic și concentratorul ultrasonic, care include și electrodul-sculă ca parte integrantă sau similar, piesa de prelucrat [2].

#### 3.5 Concluzii

- Există o tendință în creștere de utilizare a vibrațiilor ultrasonice la diferite procese convenționale sau neconvenționale, cu scopul de a îmbunătăți parametrii tehnologici prezentați anterior, la costuri reduse. Hibridizarea tehnologiilor clasice reprezintă un element esențial în dezvoltarea noilor tehnologii neconvenționale și de asemenea un pas important pentru Industria 4.0 prin capacitatea acestora de a concentra energia pe spații foarte mici.



## **CAPITOLUL 4.**

# **ANALIZA PRELUCRĂRII HIBRIDE, ELECTROCHIMICĂ- ULTRASONICĂ**

### **4.1 Prelucrarea electrochimică uzuală**

Prelucrarea electrochimică (Electrochemical Machining - ECM) a unei suprafețe are loc într-o celulă electrolică, iar fenomenul ce stă la baza acesteia este de dizolvare anodică și prelevarea contralată a materialului conductiv electric. În cazul acestei prelucrări, scula reprezintă catodul, iar suprafața de prelucrat anodul, acestea fiind imersate într-o soluție electrolică de tip bază, acid sau sare.

### **4.2 Metode de depasivizare**

Există mai multe metode de depasivizare: depasivizarea chimică, depasivizarea electrică, depasivizarea mecanică, depasivizarea hidrodinamică, depasivizarea hibridă.

### **4.3 Prelucrarea hibridă electrochimică-ultrasonică**

Procedeul hibrid de prelucrare electrochimică-ultrasonică poate fi aplicată la prelucrarea materialelor conductiv electrice, pentru geometrii complexe (micro-găuri, găuri adânci, cavități ce nu pot fi prelucrate prin tehnologii convenționale), dar și domenii diverse (industria auto, industria aerospațială, industria chimică, medicală, MEMS [169], etc.) [2,166].

### **4.4 Fenomene specifice prelucrării electrochimice combinată cu ultrasunete**

În interstițiul de prelucrare, fenomenele se bazează pe legile electrolizei [170], având în vedere tensiunea interelectrozi de valoare redusă (mai mică de 24 V). În urma reacțiilor chimice, apare un strat pasivizat (neutru electric), ce necesită a fi îndepărtat.

### **4.5 Camere de contrapresiune**

Camerele de contrapresiune sunt elemente utilizate pentru a menține sub control presiunea și viteza de curgere în zona de lucru.

### **4.6 Avantaje și dezavantaje ale prelucrării electrochimice combinată cu ultrasunete**

Toate tehnologiile de prelucrare atât cele convenționale, cât și cele neconvenționale, prezintă o serie de avantaje, respectiv dezavantaje. Pentru tehnologia electrochimică combinată cu ultrasunete, acestea sunt prezentate în tabelul 4.4, detaliat în cadrul tezei [2,85].

### **4.7 Concluzii**

- În cazul prelucrării hibride electrochimică-ultrasonică, eliminarea stratului pasivizat se poate realiza cu ajutorul ultrasunetelor, având avantajul unor presiuni mai mici ale lichidului electrolic.

## CAPITOLUL 5.

### OBIECTIVELE, DIRECȚIILE DE CERCETARE ȘI METODOLOGIA ABORDATE ÎN TEZA DE DOCTORAT

#### 5.1 Sinteza aspectelor critice privind stadiul actual al tehnologiilor neconvenționale hibrid

Din analiza critică a stadiului actual al tehnologiilor neconvenționale hibrid, s-au dezvoltat anumite concluzii care au facilitat formularea obiectivelor și direcțiile de cercetare din cadrul tezei.

#### 5.2 Obiectivele tezei de doctorat

Din analiza critică a stadiului actual, au rezultat obiectivul principal al tezei și obiective secundare subordonate, formulate într-o succesiune cronologică și graduală.

**Obiectivul principal** al tezei de doctorat este următorul:

**Proiectarea, simularea funcționării, realizarea și experimentarea unui echipament de finisare hibridă electrochimică - ultrasonică (ECM+US)**

La realizarea obiectivului principal, s-a urmărit trecerea de la nivelul de concept, gradul de maturitate tehnologică TRL 2 (technology readiness level), la acela de TRL 4 [162,163,164], model funcțional, **echipament de finisare hibridă electrochimică - ultrasonică (ECM+US)** în condiții de laborator.

Astfel, s-au stabilit mai multe obiective specifice, subordonate obiectivului principal, după cum urmează:

**Os1:** Formularea funcțiilor echipamentului de finisare hibridă ECM+US, principală și secundare și a structurii corespunzătoare acestuia.

**Os2:** Dezvoltarea unui circuit de lucru / funcționare a echipamentului de finisare hibridă electrochimică-ultrasonică, ținând cont de toate componentele necesare : camera de contrapresiune sau celula electrochimică, sursa de curent, generator de ultrasunete, rezervor de lichid electrolitic cu elemente de filtrare, pompa de transfer a lichidului.

**Os3:** Stabilirea formei și dimensiunilor lanțului ultrasonic în concordanță cu frecvența de rezonanță - țintă prin modelare și simulare numerică.

**Os4:** Analiza aplicării prin modelare și simulare numerică a diferitelor materiale polimerice pe suprafața concentratorului pentru izolare electrică și evitarea prelucrării electrochimice accidentale.

**Os5:** Proiectarea detaliată a echipamentului de finisare electrochimică simplă și hibridă, electrochimică - ultrasonică.

**Os6:** Realizarea echipamentului de finisare hibridă ECM+US.

**Os7:** Testarea echipamentului de finisare hibridă ECM+US.

**Os8:** Identificarea neconformităților și a cauzelor posibile ale acestora la proiectarea, realizarea și testarea în condiții de laborator a echipamentului de finisare ECM+US - TRL 4.

**Os9:** Stabilirea unor regimuri de prelucrare optime, luând în considerare mai mulți parametri de lucru, la finisarea hibridă ECM+US în condiții de laborator - TRL 4.

### **5.3 Direcții de cercetare și metodologia de cercetare din cadrul tezei de doctorat**

Direcțiile de cercetare majore pe care se va acționa în cadrul tezei de doctorat, după cum s-au prefigurat după analiza critică a stadiului actual al tehnologiilor hibride neconvenționale în general și al tehnologiei hibride de prelucrare de finisare electrochimică-ultrasonică (ECM+US).

## CAPITOLUL 6.

# PROIECTAREA CONCEPTUALĂ A ECHIPAMENTULUI DE FINISARE HIBRIDĂ ELECTROCHIMICĂ-ULTRASONICĂ

### 6.1 Date generale

Plecând de la nevoia exprimată prin prezenta teză de doctorat, dezvoltarea unui echipament de prelucrare electrochimică-ultrasonică, ținând seama de etapele procesului de proiectare conceptuală, s-a definit funcția generală, după care s-au dezvoltat și funcțiile principale, respectiv secundare.

### 6.2 Formularea funcțiilor echipamentului de finisare electrochimică-ultrasonică

Echipamentul de prelucrare a cărui proiectare și dezvoltare reprezintă unul dintre obiectivele tezei de doctorat, are ca **funcție generală** finisarea suprafețelor pieselor prin tehnologia hibridă, prelucrare electrochimică combinată cu ultrasunete.

### 6.3 Stabilirea structurii funcțiilor principale

Structura fiecărei funcții principale este elaborată în cadrul tezei conform tabelului 6.3.

### 6.4 Identificarea soluțiilor

În cadrul tezei, în tabelul 6.4 sunt precizate soluțiile alese pentru fiecare funcție principală în parte.

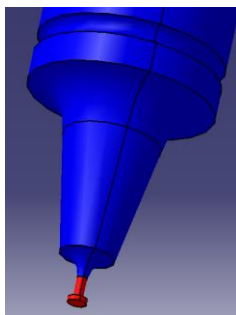
În acest capitol, a fost îndeplinit obiectivul secundar, Os1: Formularea funcțiilor echipamentului de finisare hibridă ECM+US, principală și secundare și a structurii corespunzătoare acestuia.

### 6.5 Concluzii

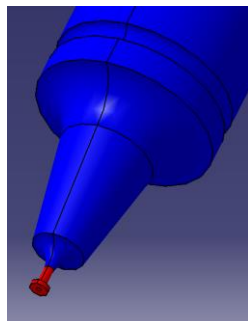
- S-au definit etapele de proiectare conceptuală a unui echipament de prelucrare electrochimică-ultrasonică, prin formularea funcțiilor principale, secundare și stabilirea structurii acestora, după ce a fost prezentată funcția generală.

**CAPITOLUL 7.****MODELAREA, SIMULAREA NUMERICĂ A FUNCȚIONĂRII  
LANȚURILOR ULTRASONICE UTILIZATE LA PROCESUL DE  
FINISARE HIBRIDĂ, PRELUCRARE ELECTROCHIMICĂ -  
ULTRASONICĂ****7.1 Alegerea bușei radiante și dimensionarea concentratorului**

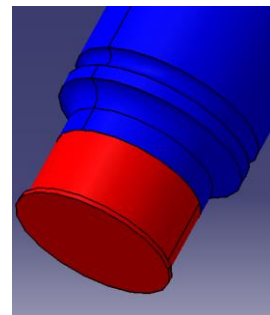
Aplicând principiile și relațiile de calcul menționate în cadrul tezei, s-au dezvoltat cinci modele de concentratoare (figura 7.2) cu diferite caracteristici geometrice și de formă pentru a vedea cum se comportă din punct de vedere al frecvenței de rezonanță.



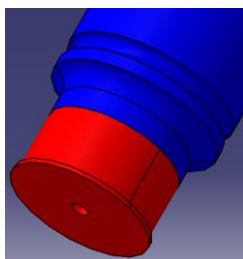
Lanț US cu concentrator conic,  
 $\varnothing 4$  mm



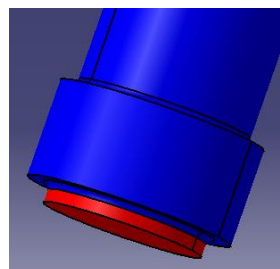
Lanț US cu concentrator conic,  
 $\varnothing 4$  mm cu o gaură de  $\varnothing 1 \times 0,5$   
mm



Lanț US cu concentrator  
cilindric în trepte,  $\varnothing 32$  mm



Lanț US cu concentrator  
cilindric în trepte,  $\varnothing 32$  mm cu o  
gaură de  $\varnothing 4 \times 2$  mm



Lanț US cu concentrator cilindric în trepte - pastilă cupru de  $\varnothing 25$   
mm

**Fig. 7.2 Suprafețe active lanțuri US proiectate, modelate**

## 7.2 Modelarea cu elemente finite a funcționării diverselor variante de concentratoare și scule integrate

În această etapă, au fost modelate mai multe forme de concentratoare (figurile 7.17, 7.19, 7.31, 7.33, 7.36, 7.37, 7.40) cu scule de forme variate, integrate.

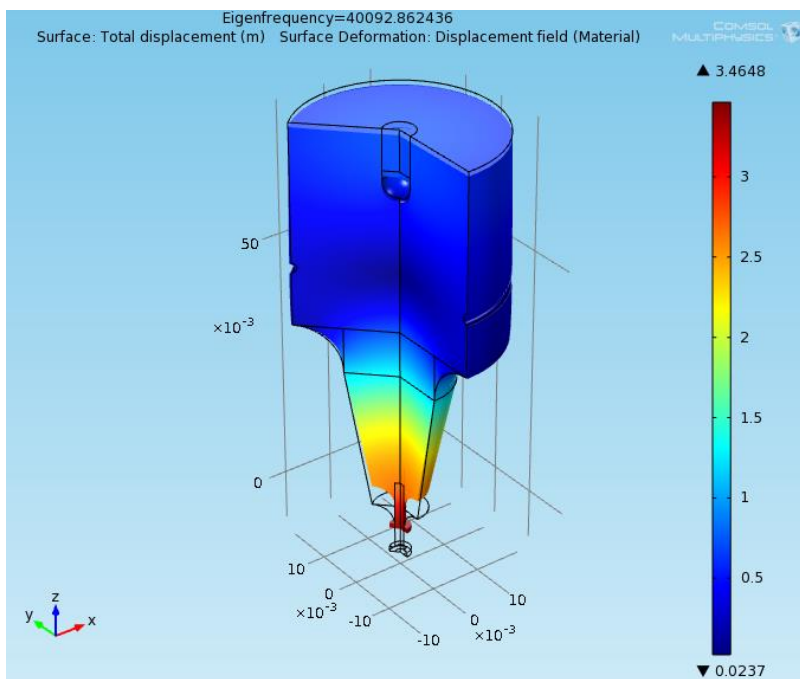


Fig. 7.17 Modelul 3D al concentratorului cu deformațiile din timpul vibrațiilor US - Model 1

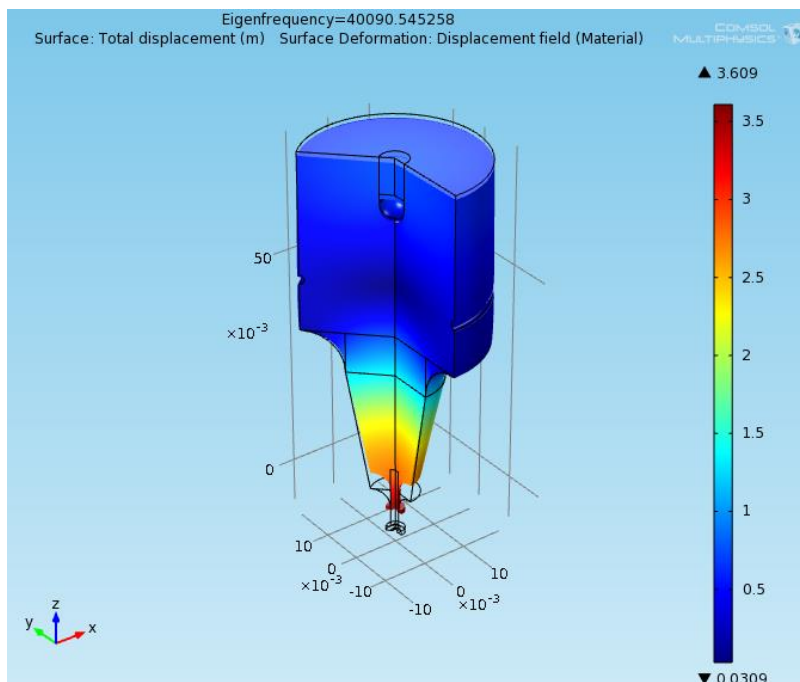
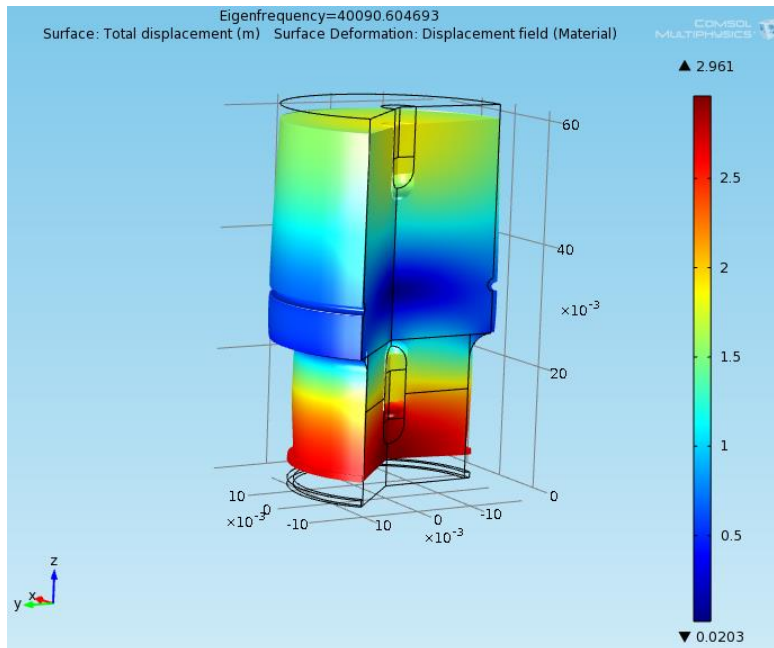
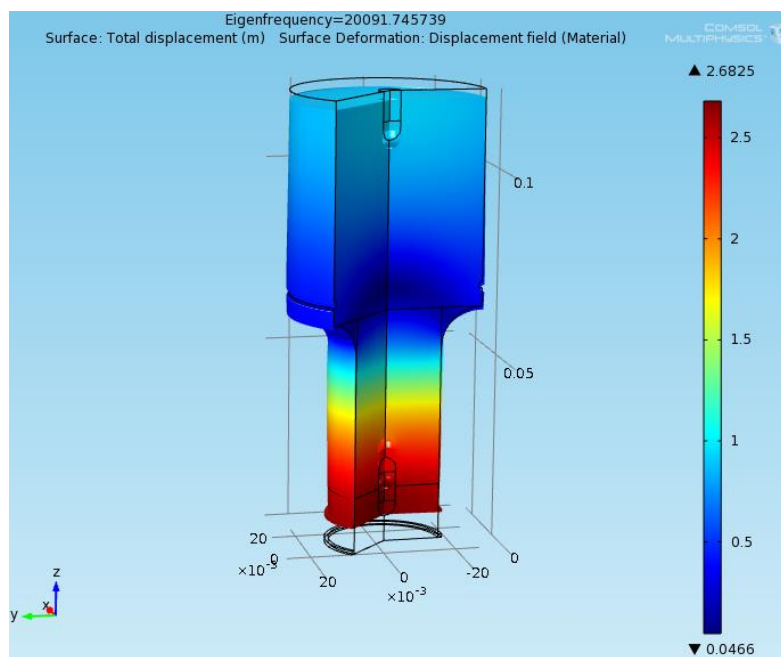


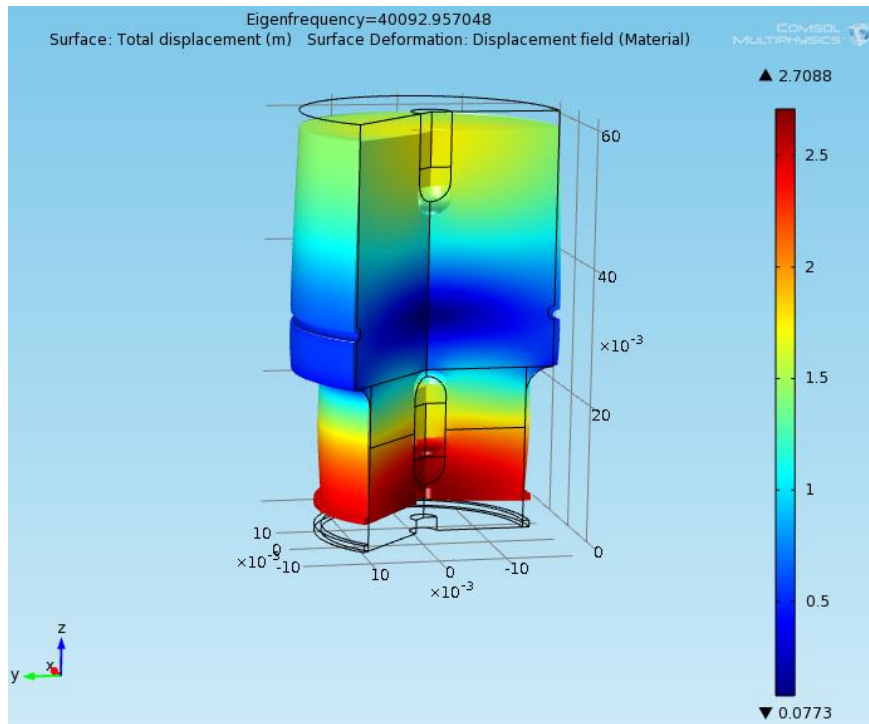
Fig. 7.19 Modelul 3D al concentratorului cu deformațiile din timpul vibrațiilor US - Model 2



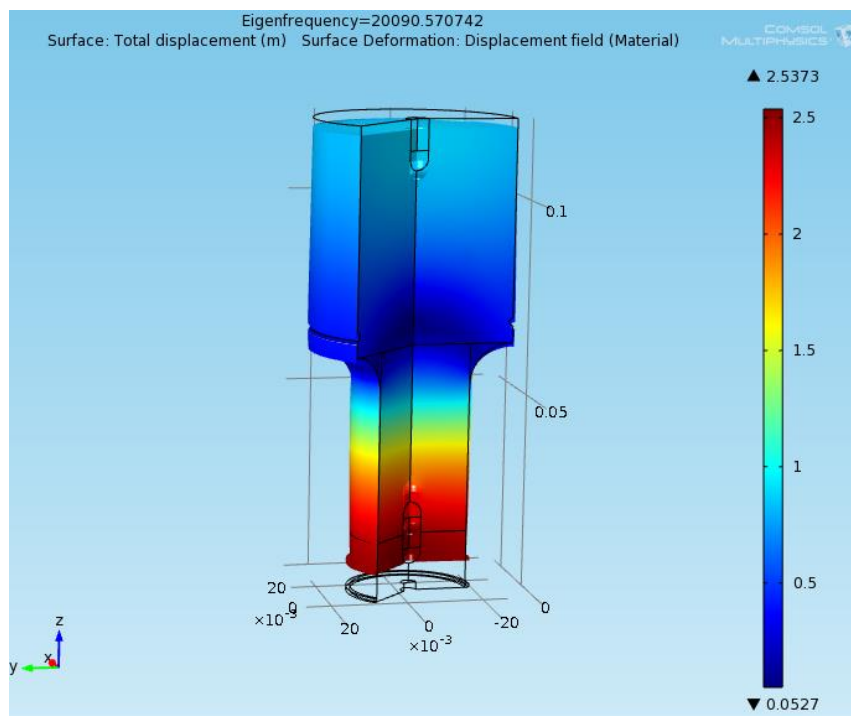
**Fig. 7.31** Modelul 3D al concentratorului cu deformațiile din timpul vibrațiilor US - Model 3,  
fus = 40 kHz



**Fig. 7.33** Modelul 3D al concentratorului cu deformațiile din timpul vibrațiilor US - Model 3,  
fus = 20 kHz



**Fig. 7.36 Modelul 3D al concentratorului cu deformațiile din timpul vibrațiilor US - Model 4, fus = 40 kHz**



**Fig. 7.37 Modelul 3D al concentratorului cu deformațiile din timpul vibrațiilor US - Model 4, fus = 20 kHz**



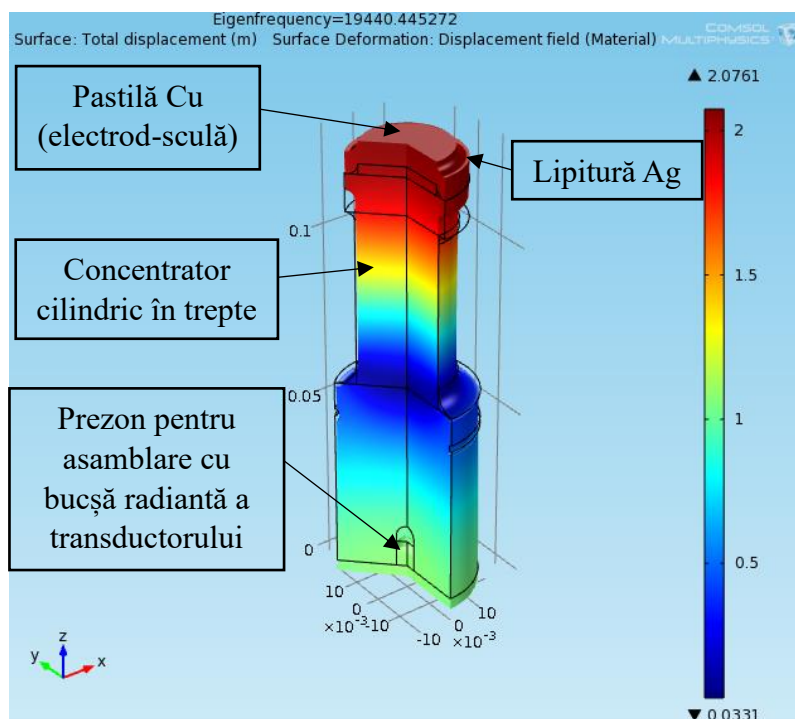


Fig. 7.40 Modelul 3D al concentratorului cu deformațiile din timpul vibrațiilor US - Model 5,  $f_{us} = 19440$  Hz

### 7.3 Graficele de variație ale amplificării și elongației

În urma unei analize efectuate în programul Comsol, s-au extras datele necesare pentru realizarea graficelor de variație ale amplificării și elongației..

În planul nodal, determinat conform metodologiei prezentate anterior, se practică un canal circular de rază de 1 mm, care servește la prinderea cu șuruburi radiale a lanțului US, care sunt asamblate în flanșa nodală.

### 7.4 Concluzii

Analizând rezultatele modelării concentratoarelor și simulării numerice a funcționării acestora, s-au formulat unele concluzii, prezentate complet în cadrul tezei:

- Pentru finisarea hibridă electrochimică-ultrasonică, a fost ales modelul de concentrator cu scula sub formă de pastilă de Cu, asamblată prin lipire cu Ag, având în vedere, uzura nulă a sculei la ECM.

A fost îndeplinit obiectivul Os3: Stabilirea formei și dimensiunilor lanțului ultrasonic utilizat în cadrul proiectării modelului experimental de finisare hibridă, electrochimică-ultrasonică și în continuare la testarea acestuia.

## CAPITOLUL 8.

# MODELAREA ȘI SIMULAREA NUMERICĂ A INFLUENȚEI MATERIALELOR IZOLATOARE ASUPRA CARACTERISTICILOR LANȚULUI ULTRASONIC

### 8.1 Influența policlorurii de vinil

Conform schemei de lucru, rezultate după proiectarea conceptuală, finisarea hibridă electrochimică-ultrasonică a concentratorului US, având în capăt electrodul-sculă, este imersat în lichidul electrolitic. Întrucât materialele din care sunt realizate aceste două elemente ale sistemului tehnologic sunt conductive electric, acestea trebuie izolate pentru a preveni prelucrarea accidentală a acestora, deoarece în timpul procesului de finisare ECM+US, se creează câmp electric între suprafața prelucrată (conectată la anod) și elementele menționate (conectate la catod).

Zona de aplicare a stratului PVC este evidențiată în figura 8.3.

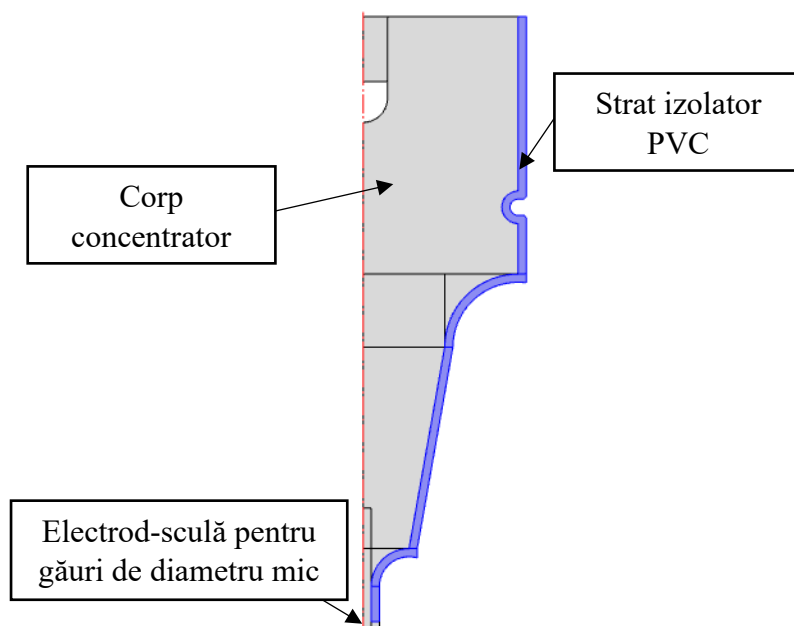


Fig. 8.3 Zona de aplicare a stratului de PVC

### 8.2 Influența poliamidei

Un alt material ce poate fi folosit ca element de izolare electrică este poliamida.

În cazul adăugării stratului de poliamidă, pentru primele două modele are loc o scădere a frecvenței cu 780 Hz, respectiv 634 Hz. În schimb, pentru celelalte două scăderea este de aproximativ 288-289 Hz.

### 8.3 Influența polietilenei

Al treilea material aplicat asupra ansamblului, a cărui influență asupra frecvenței proprii a concentratorului a fost analizată în programul Comsol, este polietilena.

În cazul polietilenei, valorile scot în evidență o scădere a frecvenței cu 690 Hz, respectiv 696 Hz, pentru primele două modele, iar pentru modele trei și patru, scăderea este de 266-268 Hz.

### 8.4 Influența vopselei epoxidice

Vopseaua sau rășina epoxidică este considerată utilă pentru protejarea elementelor componente ale unui lanț ultrasonic (figura 8.9), aplicându-se mai ușor decât celelalte materiale, de aceea s-a realizat analiza acesteia în Comsol.

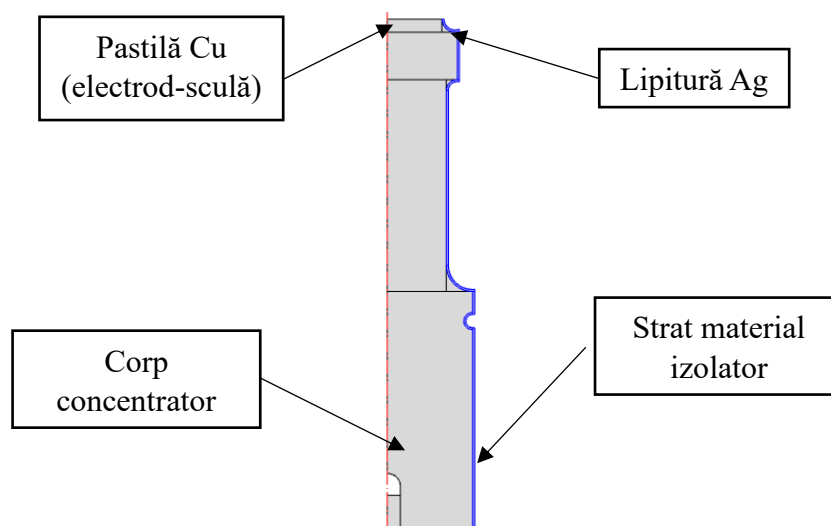


Fig. 8.9 Aplicare stratului de material izolator

### 8.5 Concluzii

- Aplicarea policlorurii de vinil (PVC-ul) duce la o scădere considerabilă a frecvenței cu aproximativ 1235 Hz pentru modelele de concentratoare conice, respectiv cu 472 Hz pentru modelele de concentratoare cilindrice în trepte cu o frecvență proprie țintă de 40100 Hz și o scădere cu 215 Hz pentru cele care funcționează la o frecvență proprie țintă de 20100 Hz, calculele fiind realizate la o valoare a grosimii stratului izolator de 1 mm.

A fost atins obiectivul secundar Os4: Analiza aplicării prin modelare și simulare numerică a diferitelor materiale polimerice pe suprafața concentratorului pentru izolare electrică și evitarea prelucrării electrochimice accidentale.

## CAPITOLUL 9.

# SIMULAREA NUMERICĂ A UNOR COMPONENTE ALE PROCESULUI DE FINISARE HIBRIDĂ ELECTROCHIMICĂ- ULTRASONICĂ

### 9.1 Soluții tehnologice pentru depasivizare

Sunt prezentate mai multe soluții pentru îndepărtarea stratului neutru, pasivizat, care se formează pe suprafața prelucrată la ECM.

### 9.2 Simularea numerică a efectului componentei ultrasonice în procesul de prelucrare hibridă electrochimică-ultrasonică

Această etapă se concentrează pe modelarea și simularea numerică a efectului componentei ultrasonice în cadrul procesului de prelucrare hibrid, electrochimic-ultrasonic.

Pornind de la analiza mecanismului formării stratului pasivizat pe suprafața prelucrată a unui oțel C120 (cu elemente principale, 2% C și 12% Cr), s-au avut în vedere două fenomene:

- depasivizarea ultrasonică, specifică procesului hibrid ECM+US, respectiv îndepărtarea stratului pasivizat de oxid de fier prin acțiunea cavitației ultrasonice induse în interstițiul de prelucrare;

- îndepărtarea vârfurilor microgeometriei suprafeței prelucrate de sub stratul pasivizat, respectiv mecanismul de netezire a suprafeței.

#### 9.2.1 Simularea numerică a depasivizării ultrasonice

În figurile 9.16-9.19 sunt prezentate variațiile zonelor din care este îndepărtat stratul de material și dispunerea stratului pasivizat în funcție de presiunea ultrasonică cavitațională aplicată.

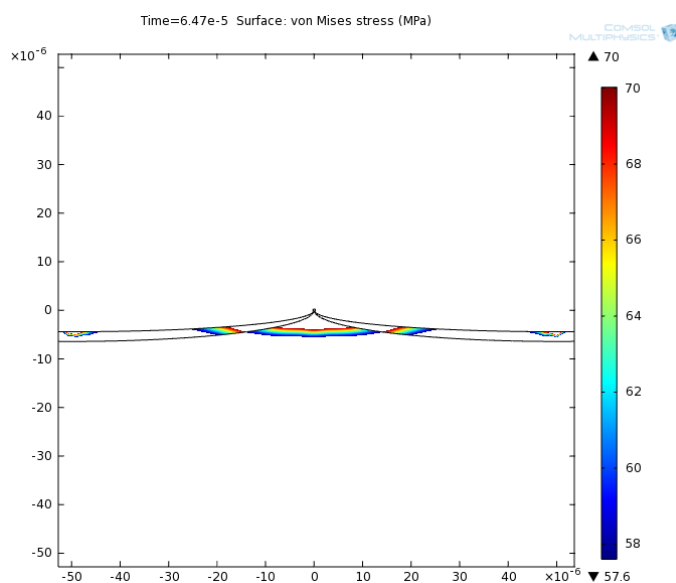
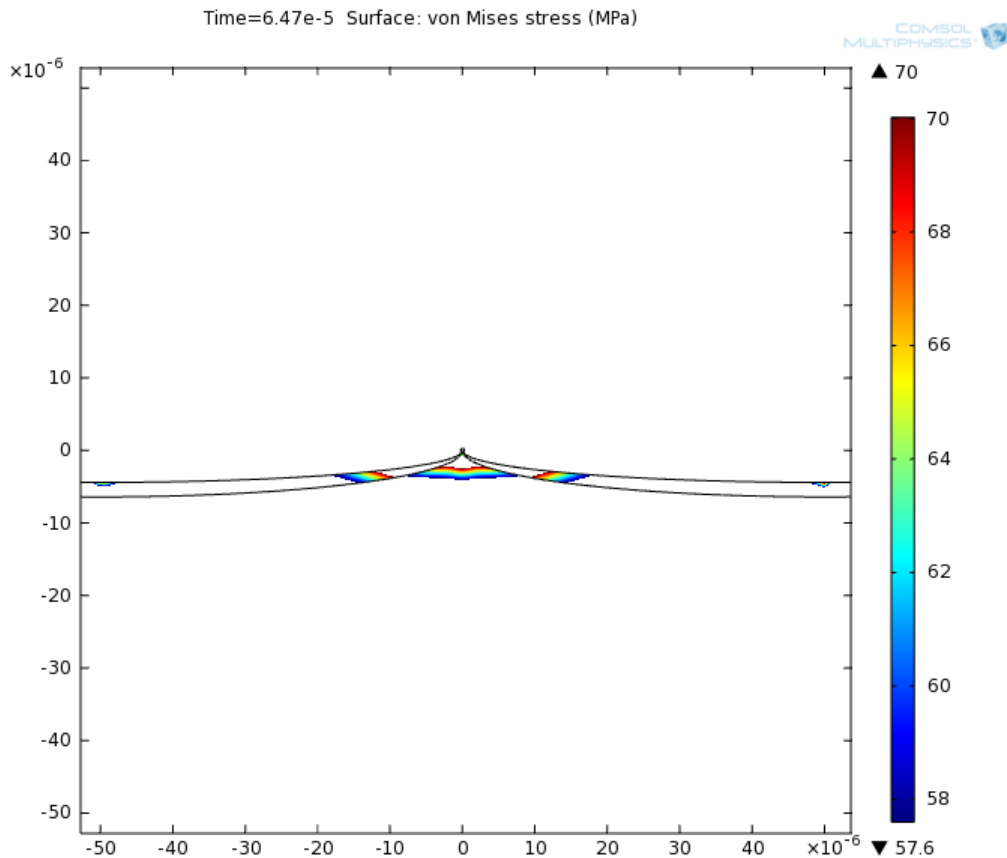
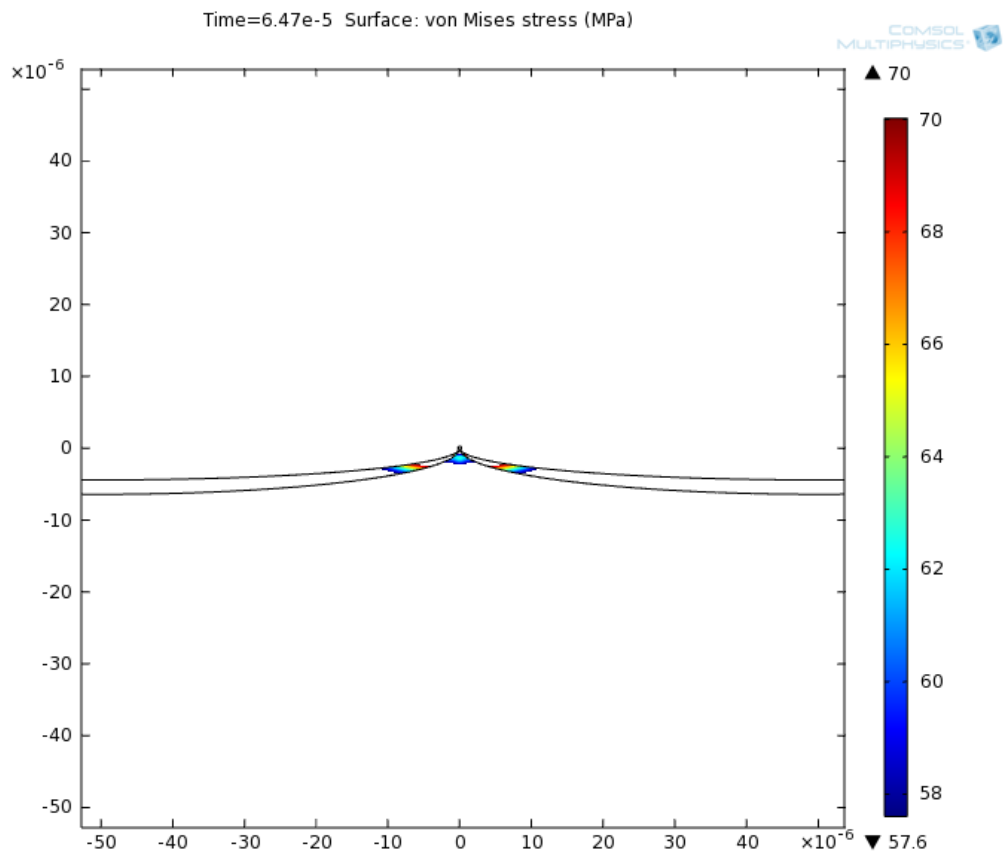


Fig. 9.16 Dispunerea stratului pasivizat și a stratului de material prelevat,  $p_{us}=30$  MPa



**Fig. 9.17** Dispunerea stratului pasivizat și a stratului de material prelevat, pus=25 MPa



**Fig. 9.18** Dispunerea stratului pasivizat și a stratului de material prelevat, pus=20 MPa

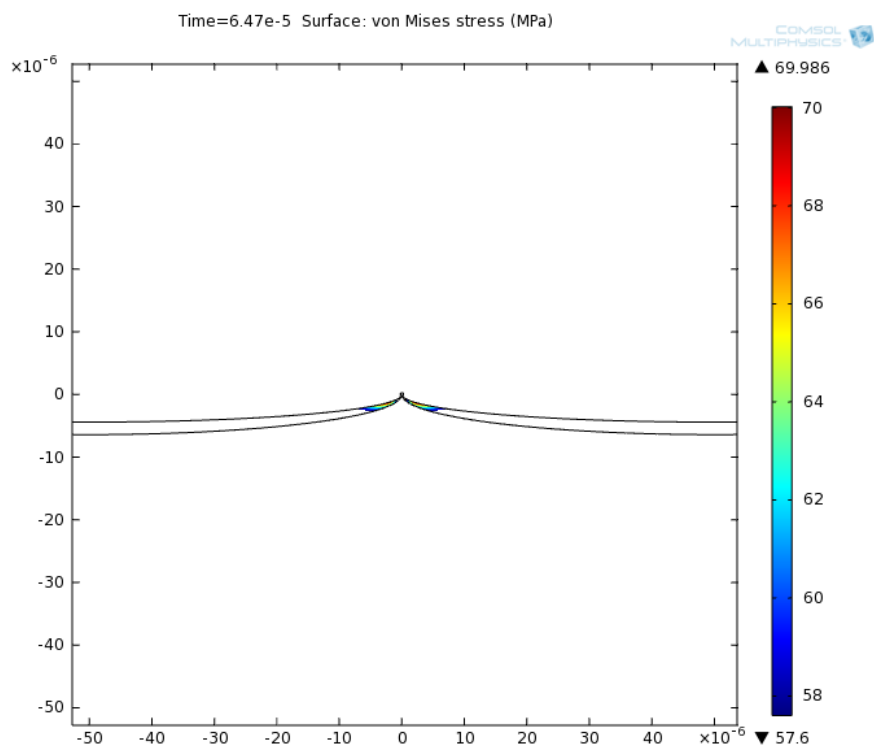


Fig. 9.19 Dispunerea stratului pasivizat și a stratului de material prelevat,  $p_{us}=17$  MPa

Reprezentarea 2D detaliată a materialului eliminat prin acțiunea cavitațională ultrasonică combinată cu prelucrarea electrochimică este prezentată în figura 9.20.

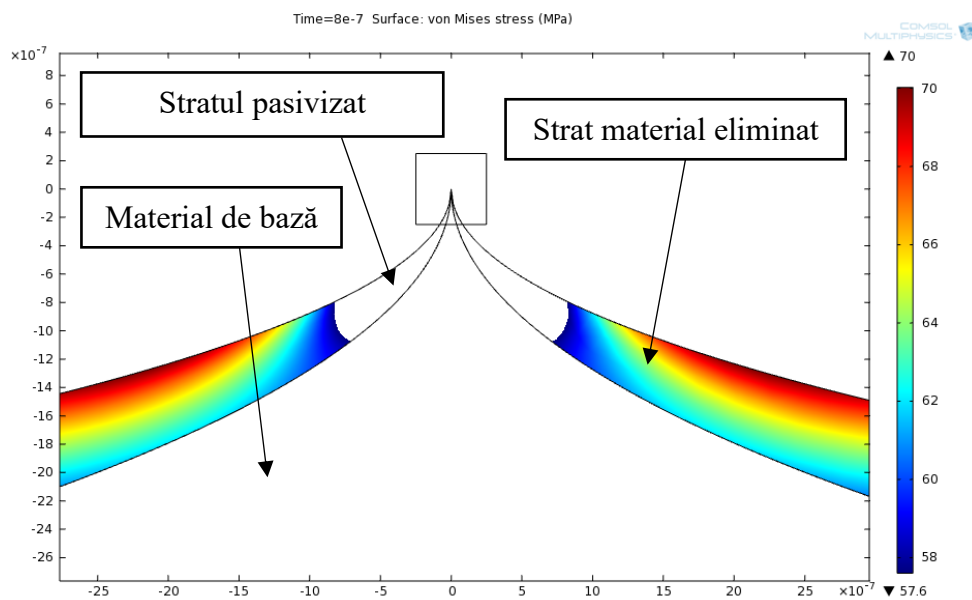


Fig. 9.20 Repartizarea efortului unitar la depasivizare cu presiune pus

### 9.2.2 Simularea numerică a reducerii rugozității suprafeței prelucrate prin cavitație ultrasonică

În figura 9.24, sunt scoase în evidență zonele de material îndepărtat atât din vârfurile microgeometriei și din părțile laterale ale craterului rezultat în urma prelucrării prin ECM+US.

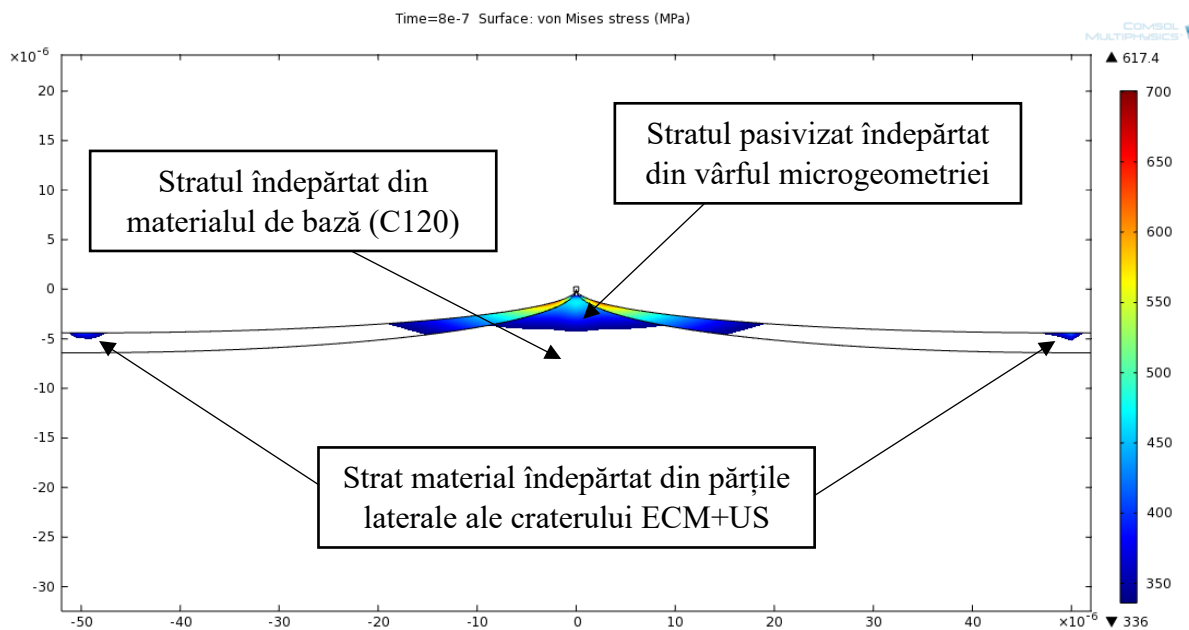


Fig. 9.24 Definirea zonelor materialului îndepărtat

### 9.3 Simularea numerică a procesului de prelevare a materialului în cazul oțelurilor cu constituenți de carburi de Cr și W

În vederea studierii influenței în cadrul mecanismului de prelevare a materialului a componentelor particulelor de carburi de Cr și W, constituenți ai oțelului C120 din care s-au realizat piesele de probă, au fost elaborate noi modele cu ajutorul metodei elementelor finite, prin soft-ul, specializat Comsol Multiphysics (figurile 9.32, 9.33).

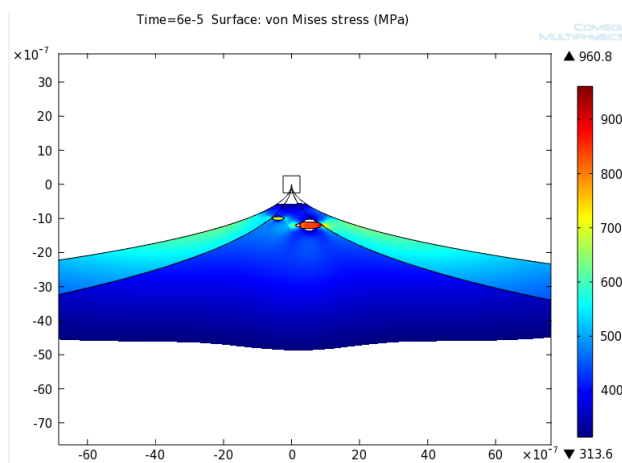


Fig. 9.32 Eforturile unitare von Mises în cazul poziției particulelor de carburi relativ aproape de zona microvârfurilor

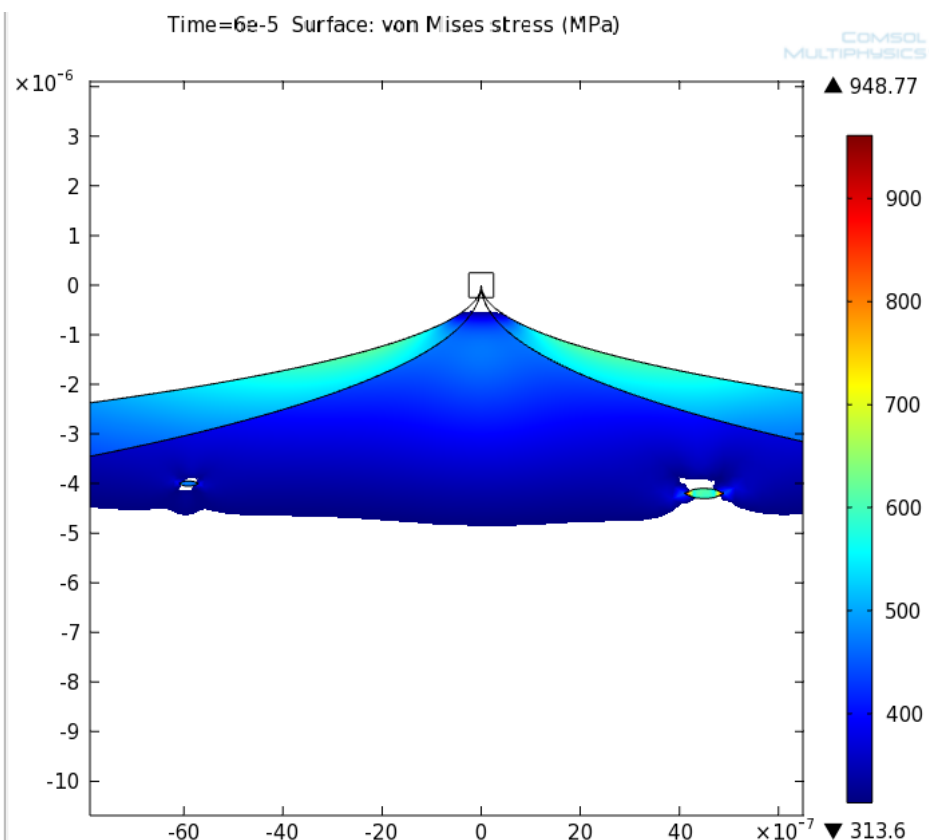


Fig. 9.33 Eforturile unitare von Mises în cazul poziției particulei de carbuni la limita de prelevare a materialului

#### 9.4 Simularea numerică a curgerii electrolitului

A fost modelată cu metoda elementelor finite, curgerea lichidului electrolitic în interstițiul de prelucrare în cazul curgerii tangențiale, adoptată în construcția sistemului tehnologic de finisare, model experimental, deoarece piesele de probă și cu atât mai puțin electrodul-sculă integrat în lanțul ultrasonic, nu sunt prevăzute orificii de curgere (figura 9.39).

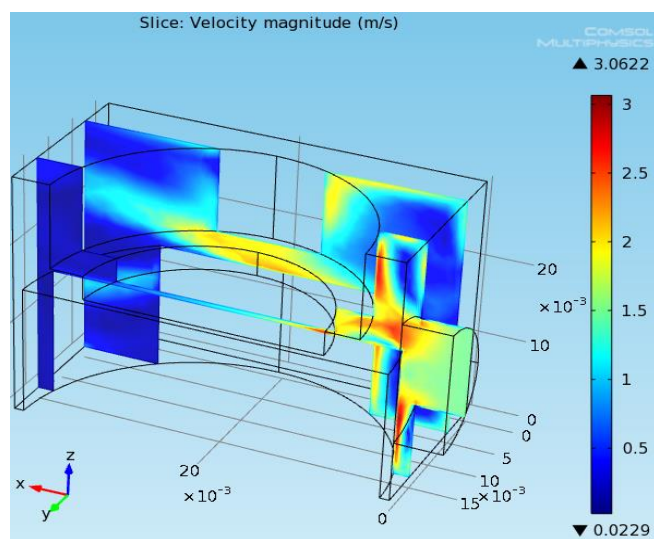


Fig. 9.39 Viteza de curgere a lichidului electrolitic în zona de lucru



Rezultatele obținute la finalul timpului de pauză a curgerii sunt prezentate în fig. 9.43.

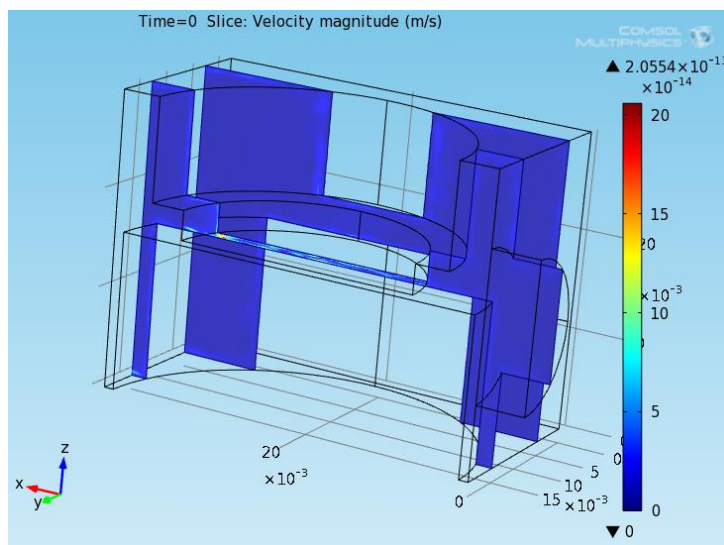


Fig. 9.43 Distribuția vitezei de curgere după timpul de pauză

## 9.5 Concluzii

- S-a efectuat un studiu pe mai multe modele în care s-a variat valoarea presiunii ultrasonice cavitațională pentru a determina dispunerea și volumul stratului de material îndepărtat având ca structură de bază un oțel C120.
- La modelarea structurii oțelurilor înalt aliate cu Cr și W, s-a analizat influența particulelor de carburi metalice în cadrul mecanismului de îndepărtare a materialului. S-a constatat că acestea creează condiții pentru o prelevare neuniformă a materialului și producerea unor cavități cu dimensiuni comparabile cu acelea ale particulelor de carburi.
- La modelarea curgerii tangențiale a soluției de electrolit în interstițiul frontal de prelucrare, rezultă o viteză de curgere foarte redusă la ieșirea electrolitului, ceea ce creează dificultăți de evacuare a produselor rezultate din procesul ECM+US și implicit, defavorizează netezirea suprafeței. Fenomenele cavitaționale induse ultrasonic în interstițiul de prelucrare pot compensa această spălare dificilă a interstițiului de prelucrare.

## CAPITOLUL 10.

### TESTAREA PRELIMINARĂ A PROCESULUI DE FINISARE HIBRIDĂ ELECTROCHIMICĂ - ULTRASONICĂ PE STAND EXPERIMENTAL DE LABORATOR

#### 10.1 Realizarea standului experimental

Pentru a aplica preliminar tehnologia de prelucrare electrochimică combinată cu ultrasunete, s-a dezvoltat un stand experimental (figura 10.8).

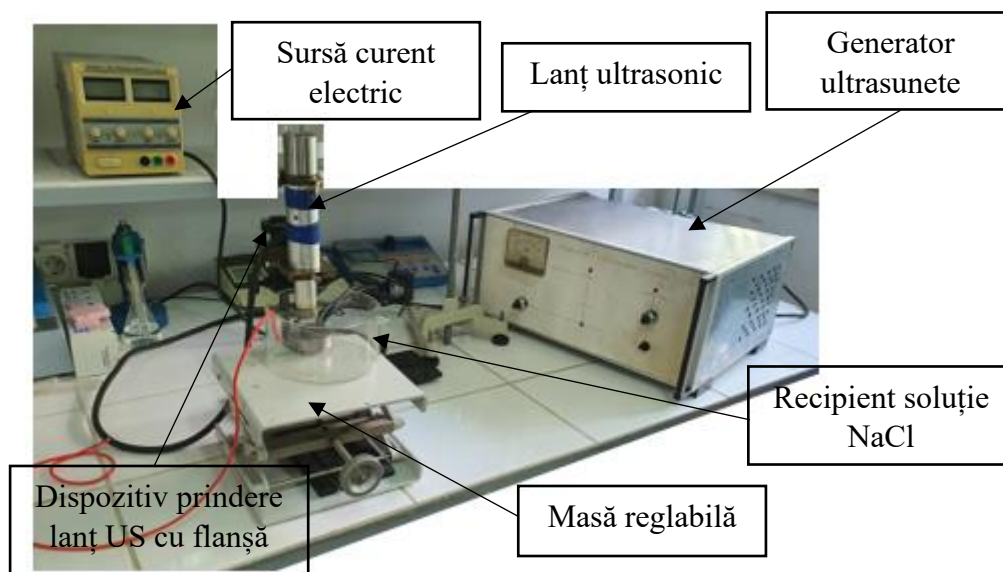


Fig. 10.8 Stand experimental ECM+US

#### 10.2 Rezultatele prelucrărilor preliminare pe standul experimental

A fost variată densitatea de curent pe suprafața prelucrată. Rezultatele grafice pentru prelucrarea electrochimică și prelucrarea electrochimică combinată cu ultrasunete sunt prezentate în figurile 10.17 și 10.18.

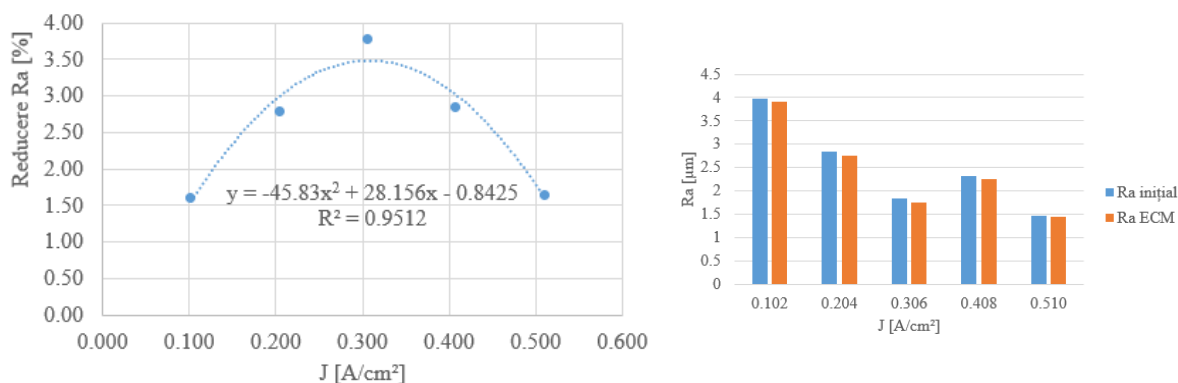
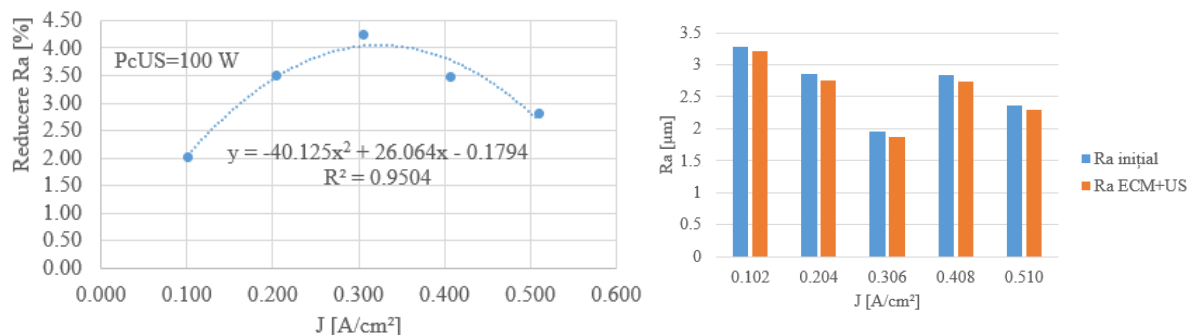


Fig. 10.17 Variația rugozității suprafeței prelucrate la finisarea electrochimică simplă, interstițiul frontal  $s_F = 0,5$  mm, soluție 5%NaCl, C120



**Fig. 10.18 Variația rugozității suprafeței prelucrate la finisarea electrochimică combinată cu ultrasunete, interstițiul frontal  $s_F = 0,5$  mm, soluție 5%NaCl, C120**

### 10.3 Concluzii

- Testarea preliminară a procesului de finisare hibridă electrochimică-ultrasonică pe stand experimental de laborator a arătat că influența ultrasunetelor poate fi benefică, dar este necesară proiectarea și dezvoltarea unui sistem tehnologic, care să asigure recircularea și filtrarea lichidului electrolitic.
- Recircularea și filtrarea lichidului electrolitic sunt factori importanți ce pot duce la îmbunătățirea calității suprafețelor pieselor de probă prelucrate, iar din punct de vedere al construcției echipamentului subansamblul ce are rolul de a fixa și orienta scula în raport cu piesa de probă trebuie să asigure paralelismul dintre acestea, astfel încât să se realizeze o finisare uniformă pe întreaga suprafață prelucrată și să nu existe momente de scurtcircuit între cele două elemente, în interstițiul frontal, unde apare stratul pasivizat pe suprafața prelucrată, care este necesar să fie îndepărtat.

## CAPITOLUL 11.

### PROIECTAREA DETALIATĂ A ECHIPAMENTULUI DE FINISARE HIBRIDĂ ELECTROCHIMICĂ-ULTRASONICĂ

#### 11.1 Date generale

Dezvoltarea unui echipament de prelucrare electrochimică combinată cu ultrasunete și anume o celulă ECM, presupune proiectarea în 3D a acesteia punând în evidență toate componentele ce urmează să fie fabricate sau achiziționate din comerț de la producători. Apoi, este necesar să se prezinte funcțiile și structurile componentelor ce alcătuiesc echipamentul.

S-a utilizat programul Catia V5 R21 pentru proiectarea și asamblarea în 3D a tuturor componentelor.

#### 11.2 Dezvoltarea conceptelor și elementele componente ale echipamentului de prelucrare electrochimică-ultrasonică

În figura 11.1 se poate observa primul concept dezvoltat, iar în figura 11.3 se poate vedea al doilea concept.

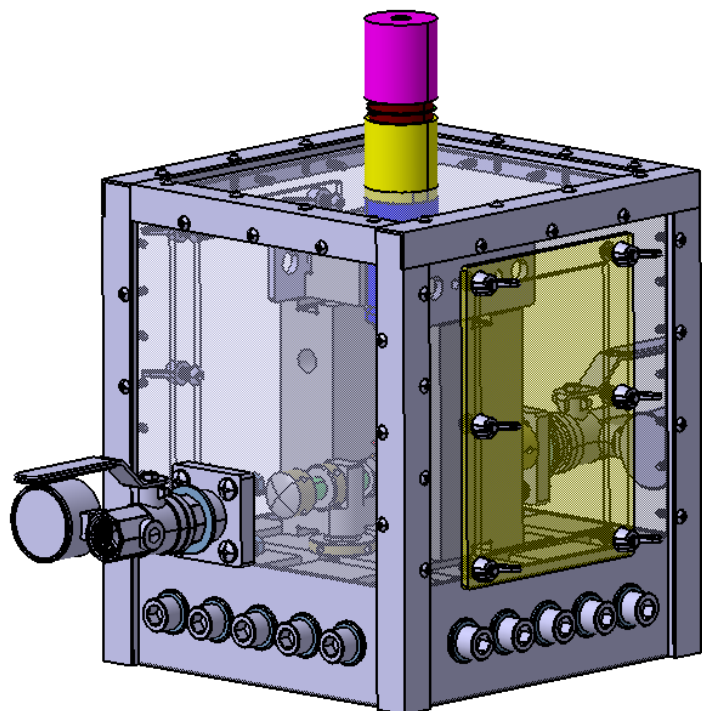
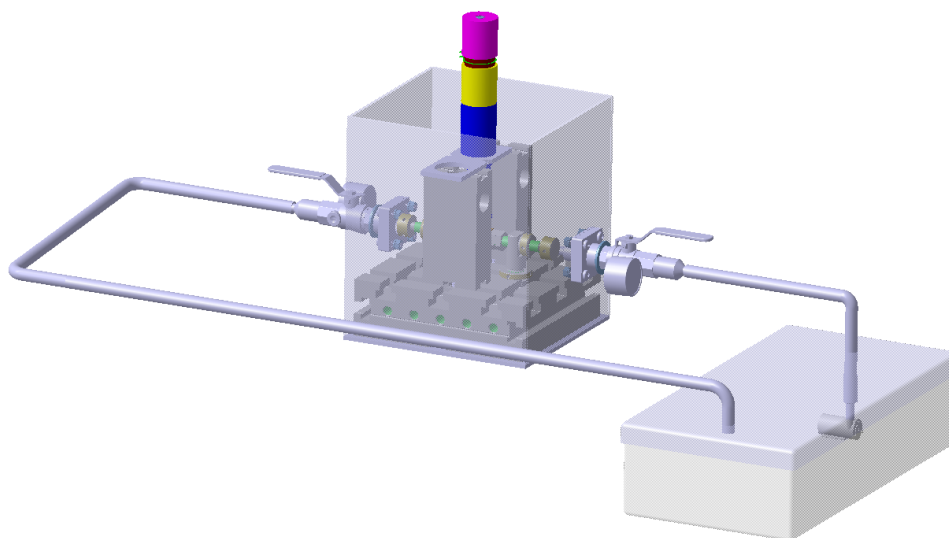


Fig. 11.1 Concept 1 - echipament de finisare electrochimică-ultrasonică



**Fig. 11.3 Concept 2 - echipament de finisare electrochimică-ultrasonică**

### 11.3 Concluzii

- S-au dezvoltat două concepte de echipamente de prelucrare hibridă, electrochimică-ultrasonică, cel de-al doilea având și sistemul de alimentare cu lichid electrochimic definit, pentru a analiza care sunt cele mai eficiente soluții în vederea fabricării echipamentului și finisării suprafețelor după ce toate condițiile de punere în funcțiune sunt îndeplinite.
- S-a ales conceptul doi pentru realizarea fizică, deoarece este asigurată mai bine etanșeitarea fiind o construcție a incintei monobloc, prinderea lanțului US este mai rapidă și permite orientarea acestuia pe mai multe poziții (putând să fie chiar prins cu șuruburi de corpurile suport pe care se așează flanșa), prinderea lanțului US cu flanșă conduce la o obținere a condiției de rezonanță mai precisă, având în vedere că prinderea cu prisme făcea ca frecvența proprie să varieze semnificativ.

A fost îndeplinit obiectivul Os2: Dezvoltarea, respectiv partea de proiectare a unui echipament de finisare hibridă electrochimică-ultrasonică, cu componentele necesare: camera de contrapresiune / celula electrochimică, sursa de curent, generator de ultrasunete, rezervor de lichid electrochimic cu elemente de filtrare, pompa de transfer a lichidului. Acest obiectiv a fost atins și cu ajutorul parcurgerii etapei de testare preliminară a procesului de finisare hibridă, ECM+US, precum și cu simulările numerice anterioare cu privire la funcționarea lanțurilor ultrasonice și a unor componente ale procesului de prelevare a materialului.

A fost îndeplinit de asemenea și obiectivul secundar, Os5: Proiectarea detaliată a echipamentului de finisare electrochimică simplă și hibridă, electrochimică - ultrasonică. Pe același echipament, model experimental, se poate realiza comparativ și finisarea electrochimică simplă.

## **CAPITOLUL 12.**

### **REALIZAREA ECHIPAMENTULUI DE FINISARE HIBRIDĂ, MODEL EXPERIMENTAL**

#### **12.1 Realizarea propriu-zisă a echipamentului**

După realizarea studiului pe baza modelului din 3D, s-a fabricat celula ECM ce va fi utilizată la prelucrarea prin electrochimie simplă, prelucrare cu ultrasunete sau finisare electrochimică-ultrasonică.

#### **12.2 Asamblarea echipamentului de prelucrare electrochimică-ultrasonică**

Asamblarea echipamentului de prelucrare electrochimică-ultrasonică a presupus o serie de etape prezentate detaliat în cadrul tezei.

După realizarea acestor etape necesare pentru a pune în funcțiune întregul sistem tehnologic, model experimental se poate realiza un prim test de verificare, apoi se poate începe în condiții de siguranță procesul de prelucrare electrochimică simplă, prelucrare cu ultrasunete sau finisare electrochimică-ultrasonică a pieselor de probă.

#### **12.3 Concluzii**

- Dezvoltarea unui echipament de prelucrare electrochimică-ultrasonică presupune realizarea unui circuit de lucru format din celula electrolitică, rezervorul electrolitic, sursă de curent, generator de ultrasunete cuplate prin elemente de legătură acordate și testate înainte de începerea propriu-zisă a prelucrării.
- Un echipament de prelucrare electrochimică-ultrasonică, în care piesa și scula sunt imersate în lichid electrolitic necesită asigurarea etanșeității și curgerii lichidului în zona interstițiului frontal dintre piesă și sculă.

A fost atins obiectivul secundar Os6: Realizarea echipamentului de finisare hibridă ECM+US. A fost realizat un model experimental în construcție modulară, care a fost testat ulterior în condiții de laborator.

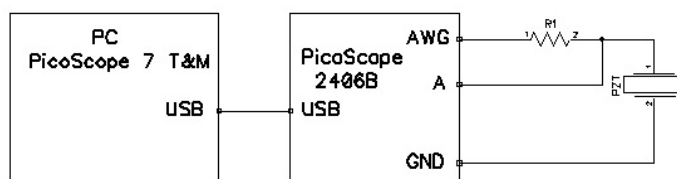
Prin această etapă de realizare fizică a echipamentului s-a îndeplinit și obiectivul secundar, Os2: Dezvoltarea unui echipament de finisare hibridă electrochimică-ultrasonică, cu componentele: celula electrochimică, sursa de curent, generator de ultrasunete, rezervor de lichid electrolitic cu elemente de filtrare, pompa de transfer a lichidului.

**CAPITOLUL 13.****TESTAREA ECHIPAMENTULUI DE FINISARE HIBRIDĂ  
ELECTROCHIMICĂ-ULTRASONICĂ ÎN CONDIȚII DE LABORATOR****13.1 Metodologia de testare**

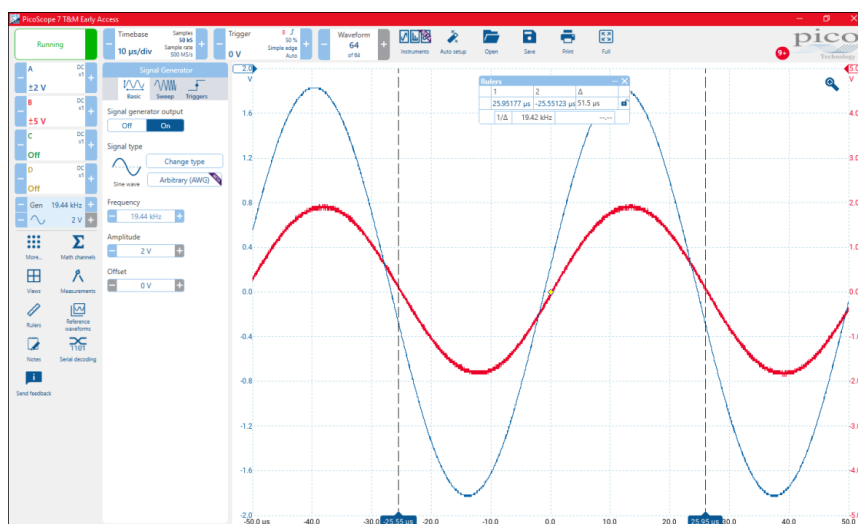
Metodologia de testare a fost stabilită după mai multe încercări, astfel încât toți pașii să fie clari, ușor de înțeles și în același timp eficienți, astfel încât toți parametrii care caracterizează funcționarea modelului experimental ECM+US, în condiții de laborator, să fie evaluați.

**13.2 Măsurarea frecvențelor proprii ale lanțurilor ultrasonice, reglarea și monitorizarea generatorului ultrasonic**

Următoarele etape presupun aplicarea ultrasunetelor, de aceea generatorul și lanțul ultrasonic au fost verificate pentru a avea siguranța că funcționează în condiții de rezonanță (figurile 13.4, 13.7, 13.8, 13.9).



**Fig. 13.4 Controlul de rezonanță al lanțului ultrasonic - Schemă bloc**



**Fig. 13.7 Determinarea frecvenței proprii a standului experimental de măsurare acustic**



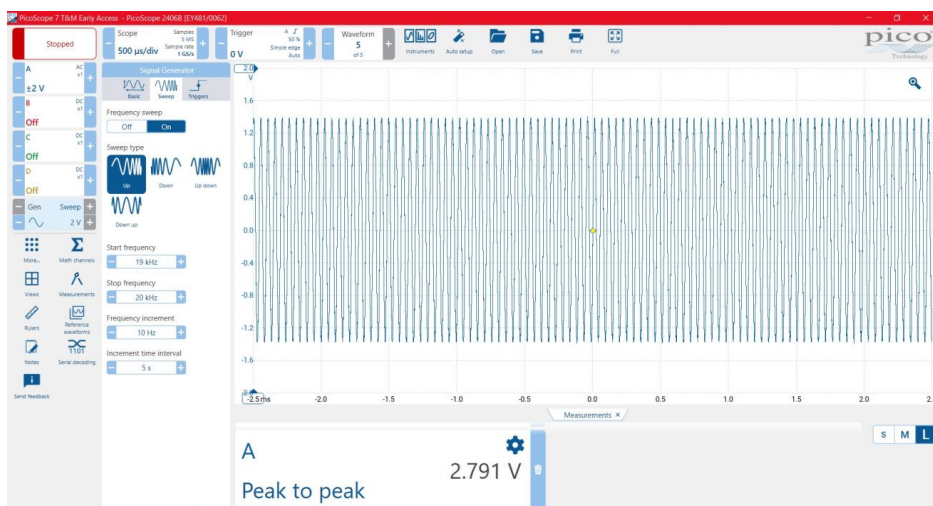


Fig. 13.8 Baleiaj frecvență proprie generator US

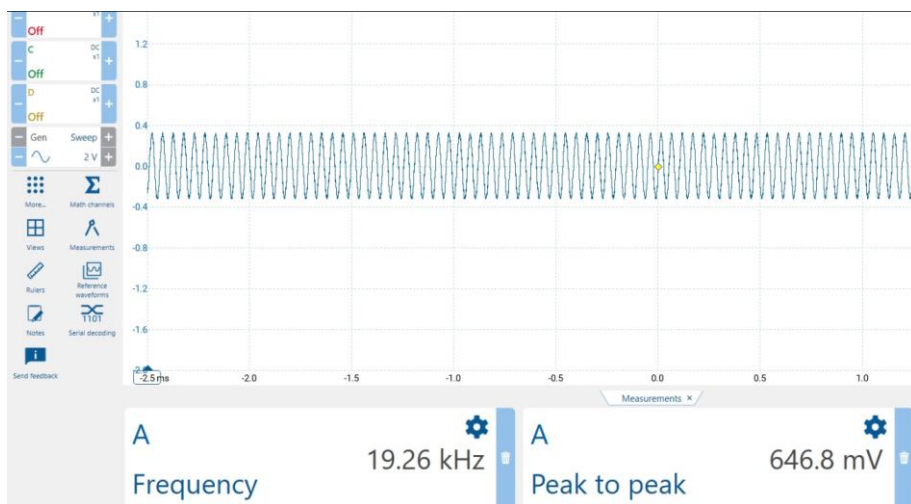


Fig. 13.9 Frecvența proprie după aplicarea stratului de vopsea

În figura 13.10 este prezentată diagrama zgomotului de fond.

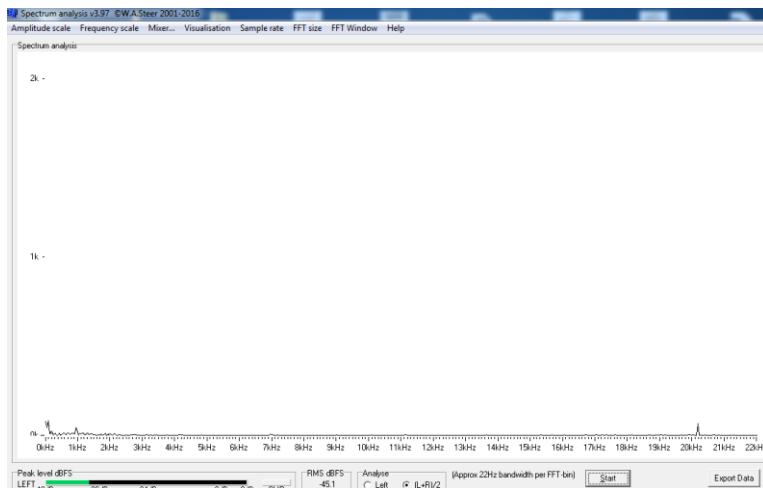
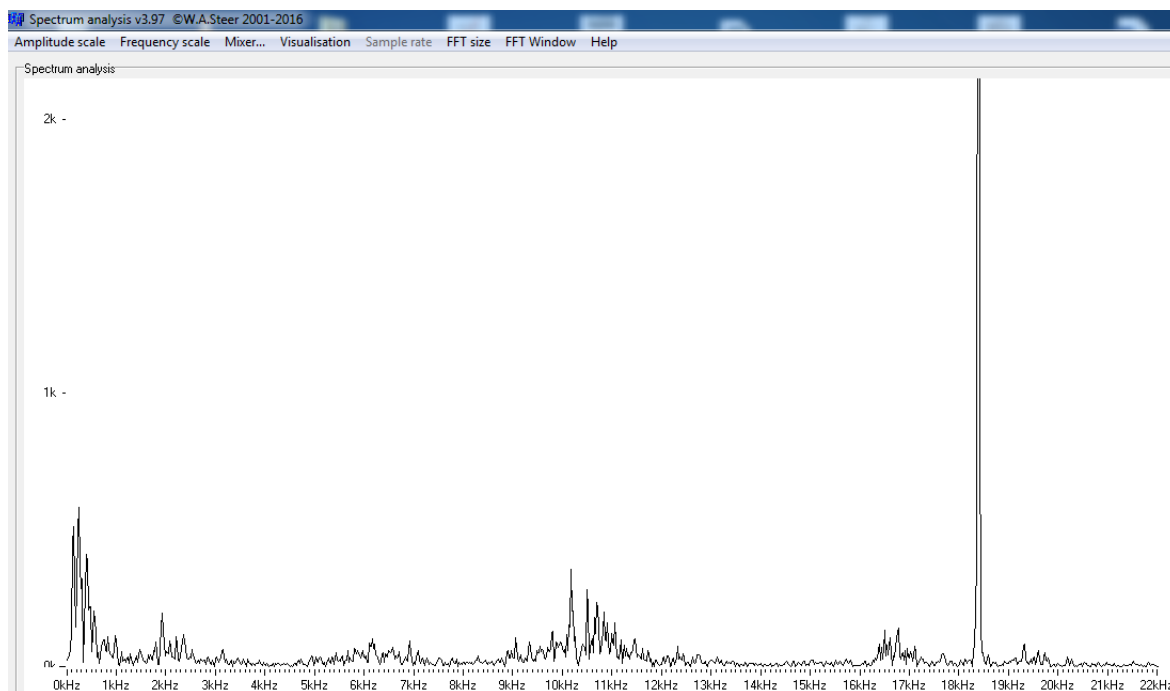


Fig. 13.10 Analiza zgomotului de fond



În figura 13.11 este prezentată o diagramă obținută cu ajutorul programului Spectrum Analyser.



**Fig. 13.11 Analiza frecvenței și amplitudinii, P=94.8 W**

### 13.3 Realizarea testelor în laborator

După testarea preliminară a funcționării modelului experimental, s-au aplicat următoarele procedee de prelucrare, în condiții de laborator:

- prelucrare electrochimică (pentru comparație);
- prelucrarea cu ultrasunete (pentru comparație);
- prelucrarea electrochimică-ultrasonică simultan și succesiv.

Aceste variante tehnologice urmează a fi descrise în cadrul acestui capitol, obiectivul fiind reprezentat de finisarea suprafețelor pieselor de probă din diferite materiale cu ajutorul unor regimuri de prelucrare distincte, evidențiind avantajele și dezavantajele în fiecare caz.

### 13.3.1 Prelucrarea electrochimică

În figura 13.20 se poate observa influența densității de curent  $J$  asupra  $Ra$ , la prelucrarea electrochimică.

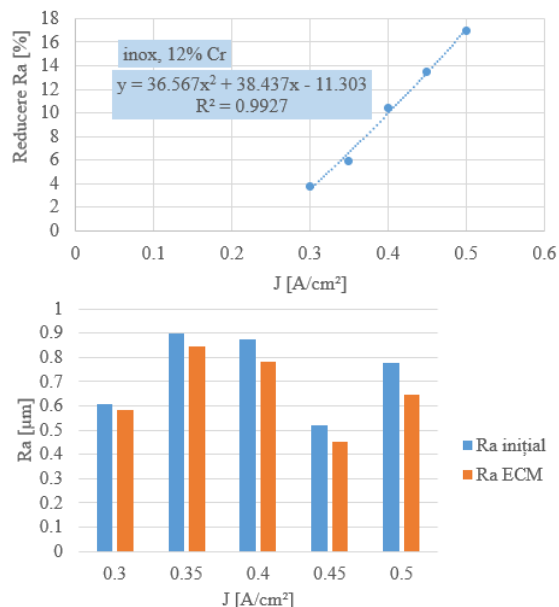


Fig. 13.20 Influența densității de curent,  $J$  asupra  $Ra$ ,  $s_F = 0,5$  mm, soluție 5%NaCl, oțel inox 12% Cr

### 13.3.2 Prelucrarea cu ultrasunete

A fost abordată prelucrarea ultrasonică separat pentru a studia contribuția componentei ultrasonice în cadrul mecanismului de prelevare a materialului (figura 13.25).

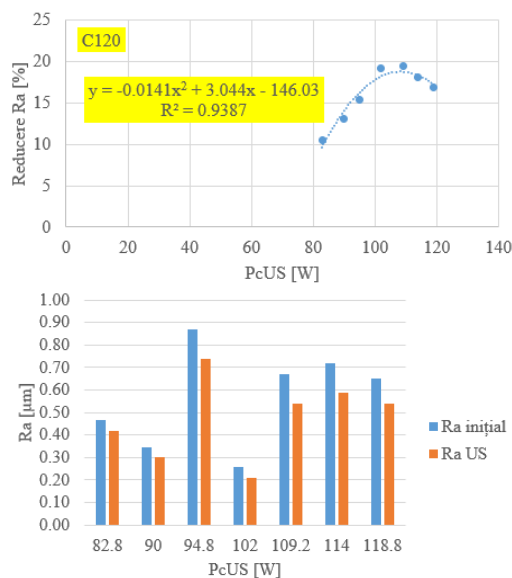


Fig. 13.25 Influența puterii consumate ultrasonice,  $PcUS$  asupra  $Ra$ ,  $s_F = 0,5$  mm, soluție 5%NaCl, C120

### 13.3.3 Prelucrarea electrochimică-ultrasonică simultană și succesivă

#### • Finisare hibridă simultană electrochimică-ultrasonică - metoda 1

Această metodă de prelucrare propune aplicarea tehnologiei hibrid, electrochimică-ultrasonică *simultană* (figura 13.27), urmând următoarele etape de lucru:

- alimentarea celulei ECM cu electrolit 5%NaCl.
- timp de pauză 30 de secunde.
- prelucrare electrochimică-ultrasonică 2 minute.
- timp de spălare 30 de secunde.
- timp de pauză 30 de secunde.
- reluarea ciclului de 3 ori.

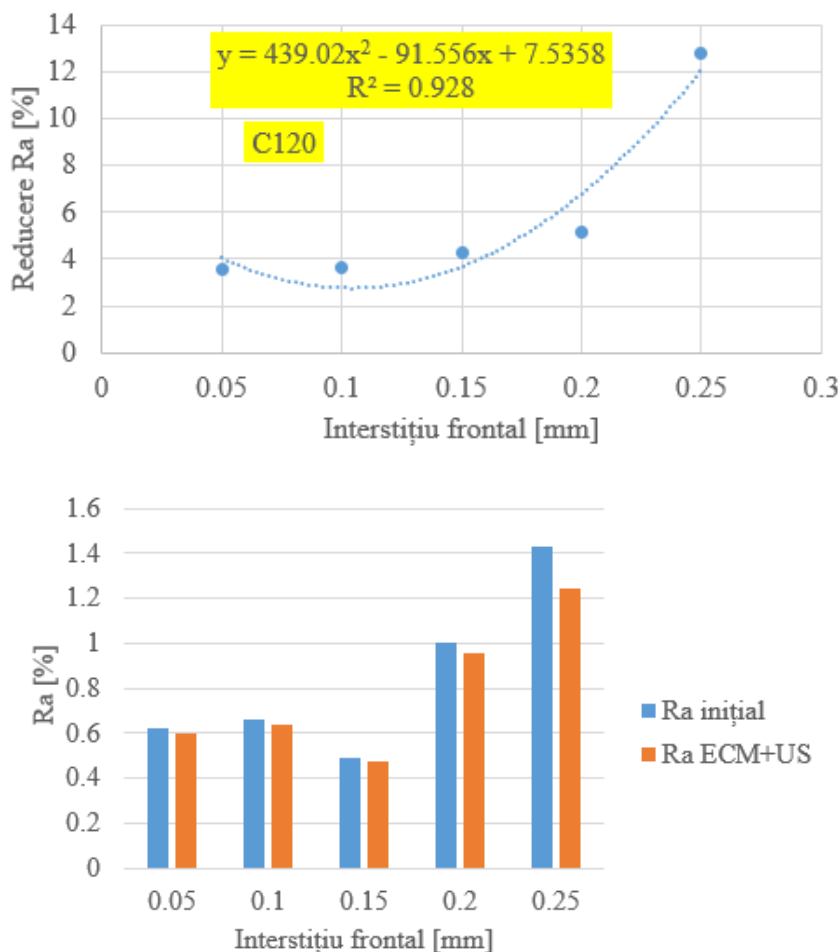


Fig. 13.27 Influența interstițiului frontal asupra Ra, soluție 5%NaCl, C120

- **Finisare hibridă succesivă electrochimică-ultrasonică - metoda 2**

În figura 13.28 se poate observa influența densității de curent  $J$  asupra  $Ra$ , la prelucrarea electrochimică-ultrasonică succesivă.

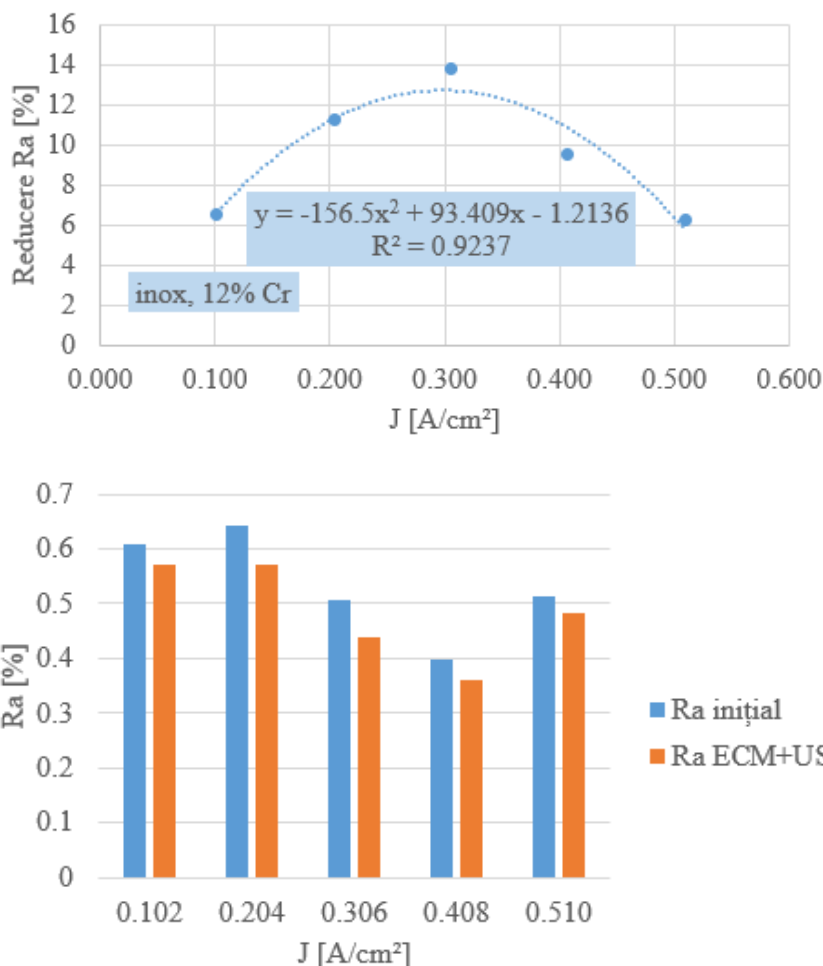


Fig. 13.28 Influența densității de curent,  $J$  asupra  $Ra$ ,  $s_F = 0,3$  mm, soluție 5%NaCl, oțel inox 12% Cr

- **Finisare hibridă succesivă electrochimică-ultrasonică - metoda 3**

S-a stabilit o nouă metodă de lucru de prelucrare electrochimică-ultrasonică *succesivă* (figura 13.29) care se desfășoară după cum urmează:

- alimentarea celulei ECM cu electrolit 5%NaCl.
- timp de pauză 30 de secunde.
- prelucrare cu ultrasunete timp de 1 minut și 30 de secunde.
- pornirea spălării cu lichid electrolitic 30 de secunde.
- timp de pauză 30 de secunde.
- prelucrare electrochimică timp de 1 minut și 30.
- reluarea ciclului de trei ori.

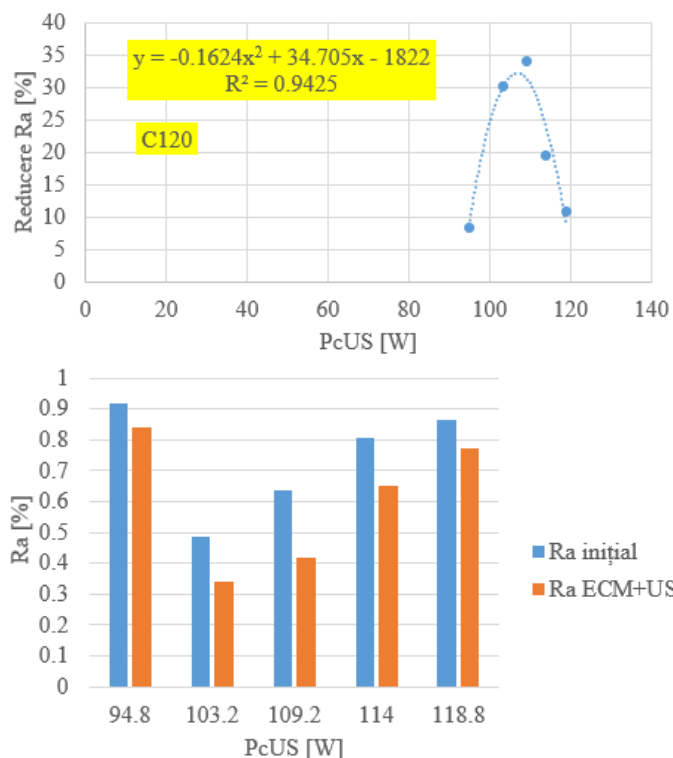


Fig. 13.29 Influența puterii consumate ultrasonice, PcUS asupra Ra,  $s_F = 0,7$  mm, soluție 5%NaCl, C120

#### 13.4 Analiza cu ajutorul microscopului cu scanare electronică a suprafețelor prelucrate

S-a utilizat un microscop cu scanare electronică, SEM QUANTA INSPECT F50 (figura 13.32), pentru a scoate în evidență structura morfologică a suprafețelor prelucrate în funcție de parametrii regimului de prelucrare utilizat.



Fig. 13.32 SEM QUANTA INSPECT F50

În figurile 13.35, 13.36, 13.54, 13.55 sunt prezentate o parte dintre rezultatele obținute la SEM.

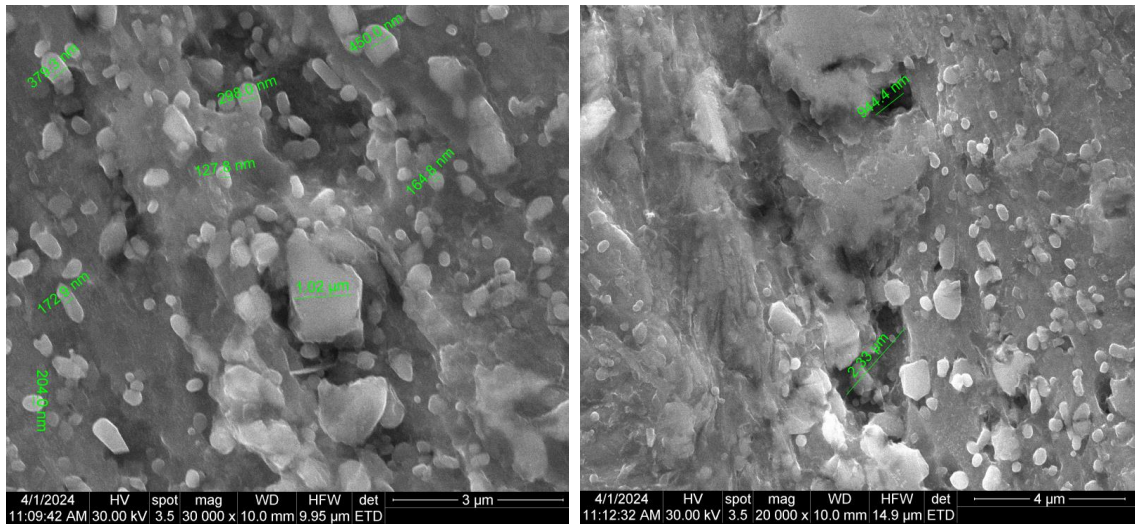


Fig. 13.35 Imagini SEM ECM

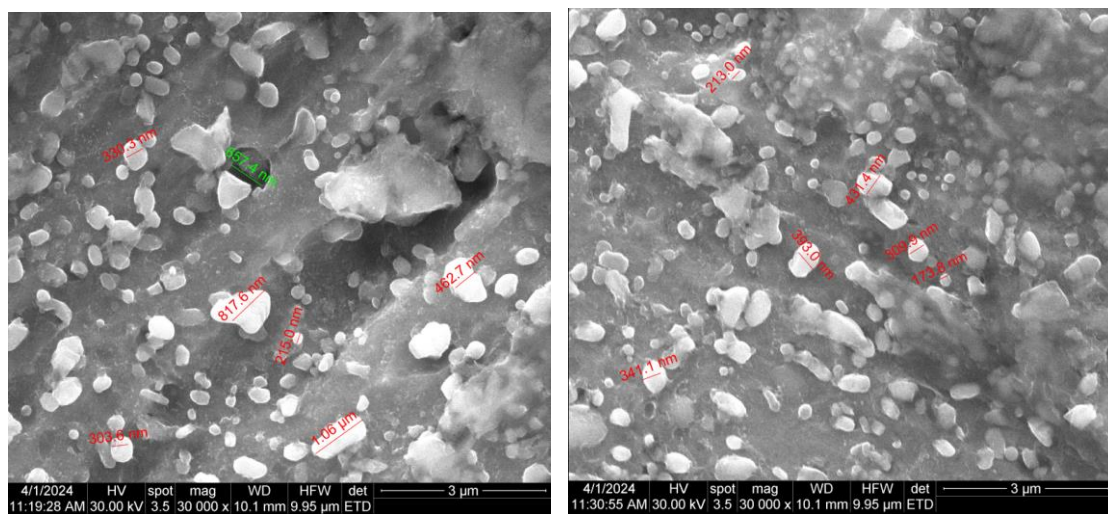
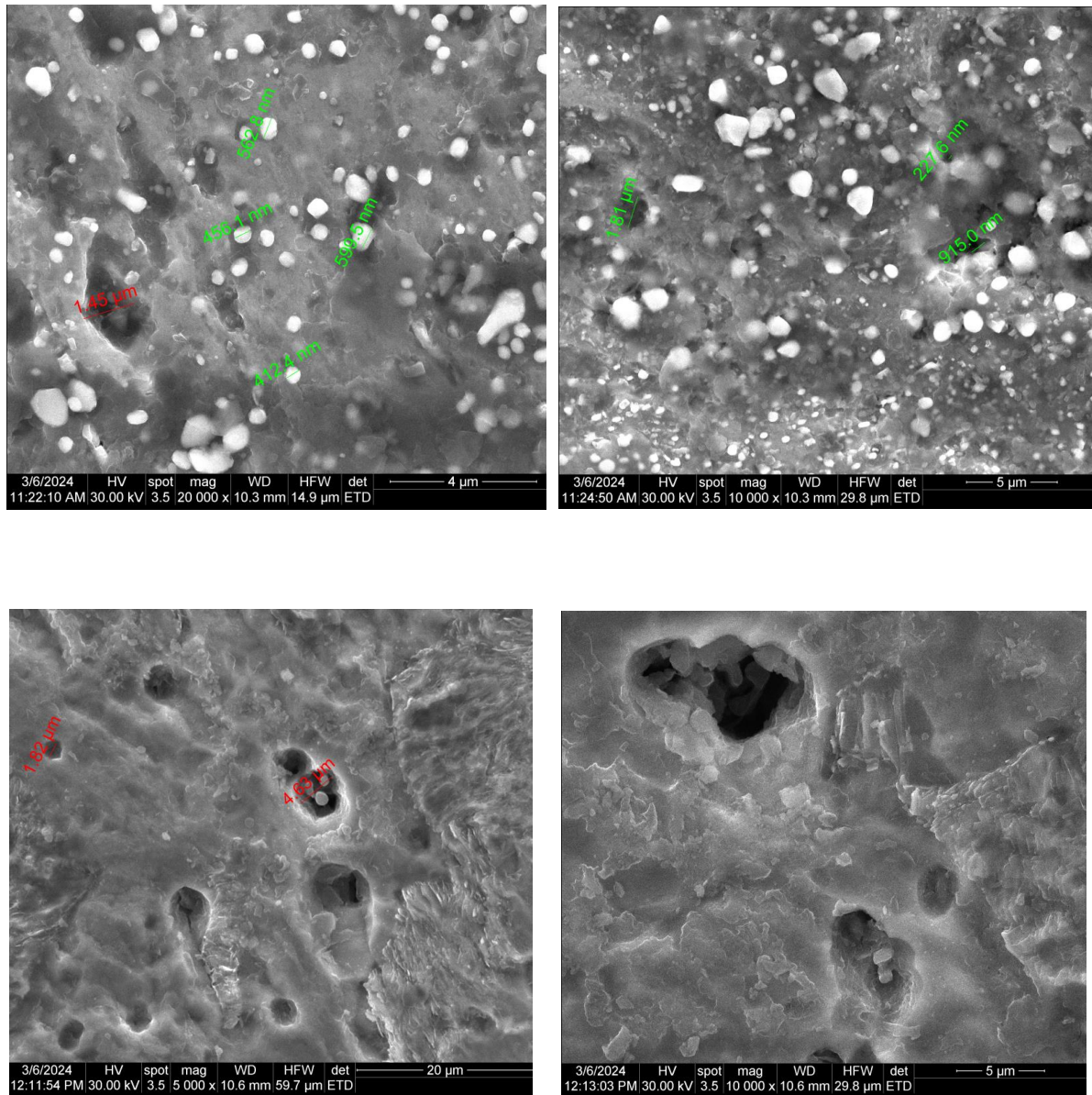


Fig. 13.36 Imagini SEM ECM



**Fig. 13.54** Imagini SEM ECM+US

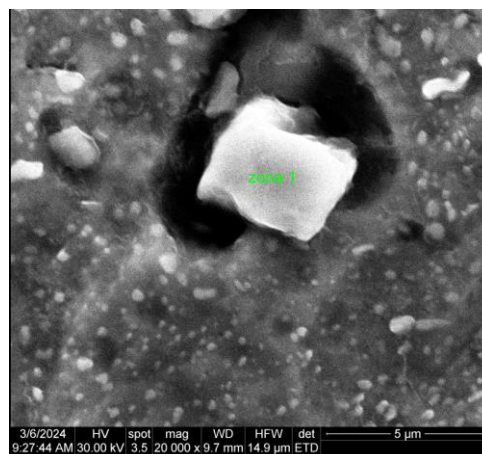
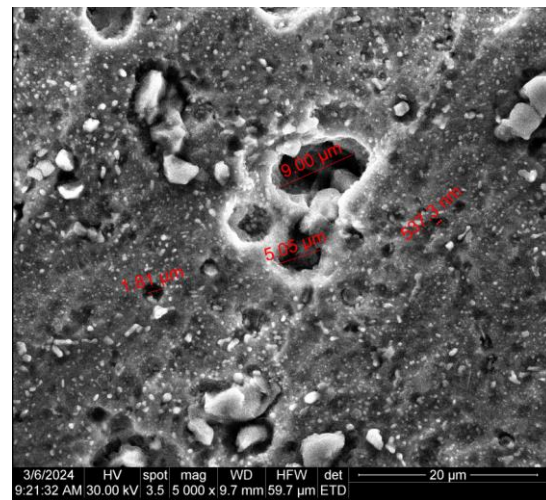
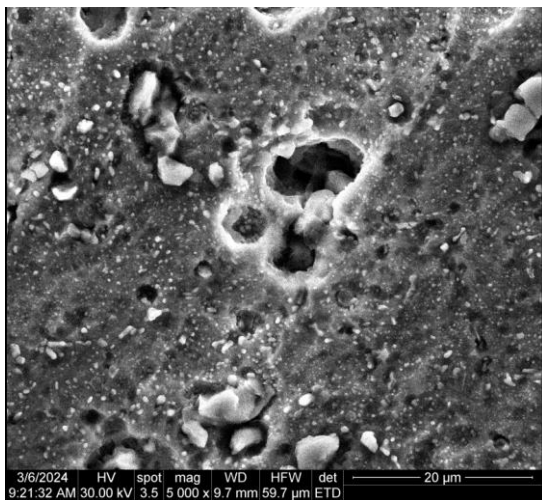
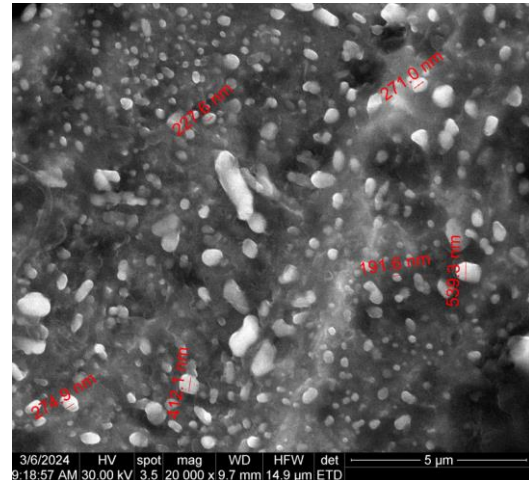
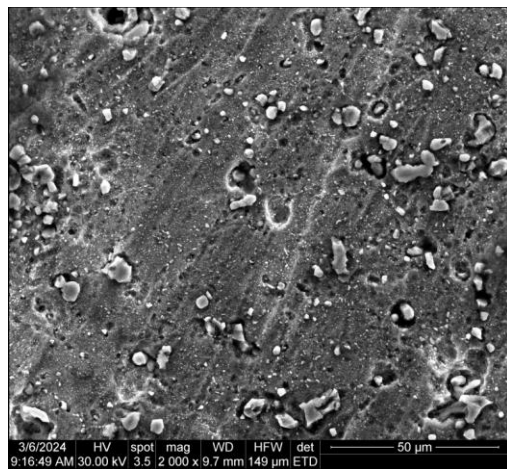


Fig. 13.55 Imagini SEM ECM+US



### 13.5 Analiza 2D și scanarea 3D a suprafețelor prelucrate

După prezentarea datelor obținute în funcție de fiecare metodă și regim de prelucrare, analiza realizată la microscopul cu scanare electronică și interpretarea imaginilor, înainte de a formula concluziile finale ale cercetării, s-au realizat măsurători 2D și 3D ale rugozității cu ajutorul aparatului MarSurf GD140 (schema bloc în figura 13.66).

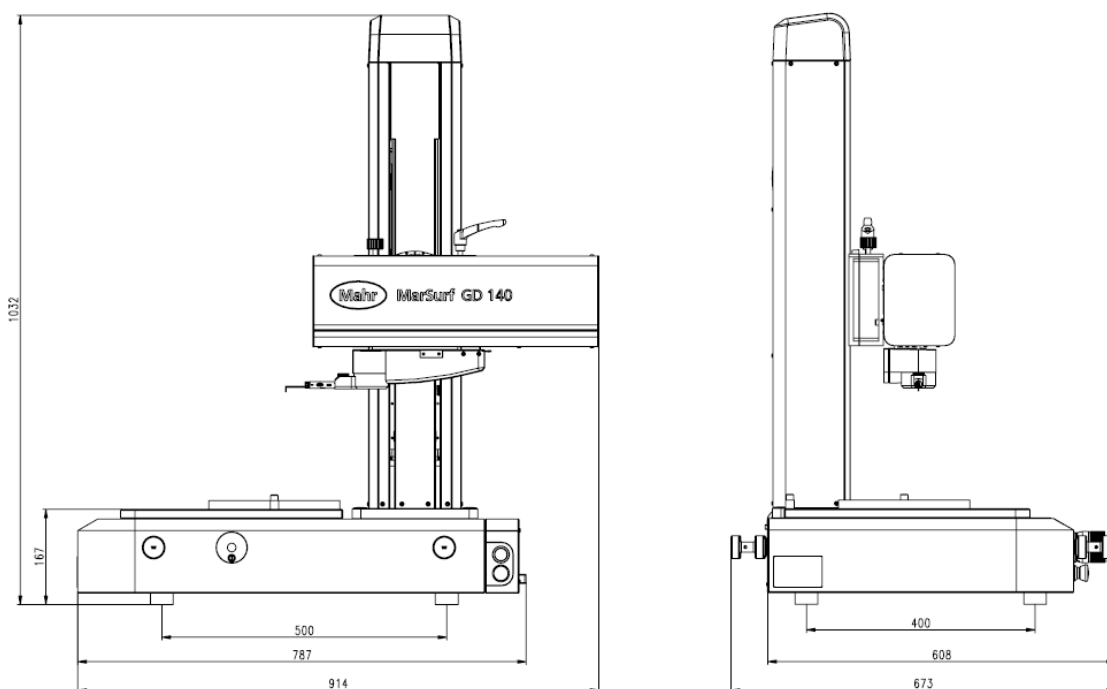


Fig. 13.66 Schema bloc și dimensiunile MarSurf GD140 [150]

### 13.6 Stabilirea cauzelor neconformităților și soluțiilor pentru creșterea performanțelor tehnologice ale echipamentului de finisare hibridă, electrochimică-ultrasonică

- **Analiza performanțelor componente electrochimice**

*Soluții tehnologice pentru creșterea performanțelor procesului de finisare în conexiune cu densitatea de curent constau în determinarea unor valori optime, în condițiile de testare în laborator, pentru oțelurile înalt aliate, care conțin carburi de Cr și W având ca funcție obiectiv reducerea procentuală a rugozității inițiale a suprafeței prelucrate. Valorile optime ale densității de curent se situează în intervalul 0,3-0,4 A/cm<sup>2</sup> și au condus la reduceri procentuale ale Ra, de maxim 23%.*

*Soluția tehnologică care ar conduce la înlăturarea neconformității privind creșterea rugozității suprafeței prelucrate, legată de timpul de prelucrare este ca acesta să nu se depășească valoarea critică de 2-3 min, după care rugozitatea obținută începe să crească ca urmare a unei prelevări suplimentare de material, din zona microdepresiunilor suprafeței prelucrate.*

*Pentru înlăturarea cauzelor care stau la baza producerii acestor neconformități, se poate apela la următoarele soluții tehnologice:*

- creșterea valorii interstițiului frontal de prelucrare,  $s_F$ , în vederea reducerii rezistenței hidraulice în interstițiul de prelucrare;
- creșterea debitului și implicit caracteristicilor de viteză de curgere și presiune asigurate de o pompă cu caracteristici superioare, adecvată pentru acțiunea corozivă a soluției de electrolit.

*Pentru înlăturarea cauzelor care au condus la aceste tipuri de neconformități, s-a adoptat următoarea soluție, pentru asigurarea curgerii uniforme și stabilizarea cinetică a lichidului electrolitic la aplicarea componentei electrochimice: **prelucrarea succesivă ECM și US, cu introducerea unui timp de pauză suficient**, pe durata căruia curgerea a fost oprită - viteza de intrare a electrolitului fiind nulă.*

Această soluție care a asigurat rezultate superioare ale procedurii de finisare hibridă **succesivă**, ECM+US față de cel în varianta **simultană**, validează modelarea cu elemente finite a curgerii în interstițiul de prelucrare prezentată anterior, abordată în două etape: curgere turbulentă staționară și curgere dependentă de timp laminară cu anularea vitezei de intrare a electrolitului în celula electrochimică.

### 13.7 Concluzii

- Prelucrarea electrochimică sau electrochimică-ultrasonică presupune monitorizarea și ținerea sub control a următorilor parametrii: intensitatea de curent, timpul de prelucrare, interstițiul de lucru, temperatura, rezistivitatea electrică, respectiv concentrația electrolitului, frecvența transmisă de generatorul de ultrasunete, asigurarea frecvenței de rezonanță dintre transductor și concentrator.
- S-a constatat că prelucrarea electrochimică-ultrasonică succesivă este superioară din punctul de vedere al calității suprafeței prelucrate față de prelucrarea electrochimică simultană; curgerea turbulentă în condițiile tangențiale nu favorizează procesul de netezire a suprafeței; de aceea, s-a adoptat varianta succesivă, la care intervine un timp de pauză după prelucrarea cu ultrasunete, în care se obține anularea vitezei de curgere (lichidul electrolitic este staționar) și apoi se prelucrează electrochimic - se dizolvă anodic vârfulurile microgeometriei.

Prin realizarea obiectivelor secundare enunțate în capitolul 5, se poate afirma că a fost îndeplinit și obiectivul principal al tezei, Op: Proiectarea, simularea funcționării, realizarea și experimentarea unui echipament de finisare hibridă electrochimică - ultrasonică (ECM+US).

## CAPITOLUL 14.

### CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

#### 14.1 Concluzii finale

Conform analizei critice a domeniului abordat prezentată în stadiul actual din prima parte a tezei și a efectuării activităților de cercetare din partea a doua privind realizarea, testarea echipamentului de finisare hibridă, electrochimică-ultrasonică, model experimental, s-au formulat următoarele concluzii finale:

1. A fost realizat și testat echipamentul de finisare hibridă, electrochimică-ultrasonică, model experimental. Pentru aceasta, au fost parcurse etapele necesare trecerii de la faza de concept, proiectare conceptuală, nivelul 2 de maturitate tehnologică – *technology readiness level 2*, **TRL2**, la faza de testare în condiții de laborator, **TRL 4**.

2. Saltul de la nivelul TRL 2 la acela de TRL 4 a presupus parcurgerea unor etape intermediare, care au constat în:

2.1) modelarea și simularea numerică a concentratoarelor ultrasonice pentru realizarea condiției de rezonanță, care contribuie la reducerea timpului de pregătire a fabricației și ameliorarea dezavantajului privind lipsa flexibilității tehnologiei hibride ECM+US;

2.2) modelarea și simularea numerică a concentratoarelor acoperite cu materiale plastice, izolatoare electric pentru a preveni prelucrarea electrochimică accidentală, în condițiile prelucrării ECM cu imersarea concentratoarelor în lichidul electrolitic;

2.3) modelarea și simularea numerică a procesului de depasivizare și prelevare a vârfurilor microgeometriei suprafeței prelucrate, contribuția componentei ultrasonice în cadrul mecanismului de prelevare a materialului al procedeuului hibrid de finisare, electrochimică-ultrasonică;

2.4) modelarea și simularea numerică a curgerii lichidului electrolitic în interstițiul frontal de prelucrare, ceea ce permis utilizarea regimului de curgere turbulentă, tangențială precum și adoptarea unei metode de prelucrare cu introducerea unei pauze de oprirea curgerii pentru a crea condiții de uniformizare cinetică a lichidului electrolitic înainte de aplicarea componentei electrochimice a procesului de finisare hibridă;

2.5) modelarea și simularea numerică a prelevării carburilor metalice de Cr și W, constituenți ai oțelurilor înalt aliate, din care s-au realizat piese de probă prelucrate în vederea testării echipamentului de finisare hibridă, electrochimică-ultrasonică;

2.6) proiectarea detaliată a echipamentului de finisare, pornind de la proiectarea conceptuală a echipamentului de finisare hibridă, electrochimică-ultrasonic, care a inclus, celula de prelucrare electrochimică, lanțul ultrasonic, care a integrat electrodul-sculă, dispozitivele de prindere a lanțului-ultrasonic și pieselor de probă, circuitul de recirculare a soluției de electrolit, bazinul de lichid electrolitic, pompa de recirculare și elemente de filtrare;

2.7) execuția echipamentului de finisare hibridă electrochimică-ultrasonică, realizarea unor componente nestandardizate și achiziția unor componente, ajustarea și montarea acestora;

2.8) testarea echipamentului de finisare hibridă electrochimică-ultrasonică în condiții de laborator, care a cuprins mai multe etape; testarea generatorului cuplat cu lanțul ultrasonic pentru realizarea condiției de rezonanță, testarea componentei electrochimice simple, testarea componentei ultrasonice separat; prelucrări de finisare hibridă, electrochimică-ultrasonică în modul simultan și succesiv;

3. La testarea echipamentului s-au stabilit metode de prelucrare folosind procesul de finisare hibrid, electrochimic-ultrasonic. În condițiile de experimentare în laborator existente, cele mai bune rezultate au fost obținute cu metode succesive, care au presupus un ciclu format din depasivizare ultrasonică, curgerea lichidului electrolitic pe suprafața prelucrată, timp de pauză a curgerii, aplicarea netezirii electrochimice, prelucrare ultrasonică, depasivizare și netezirea suprafeței prin cavitație indusă ultrasonic în interstițiul de prelucrare și reluarea ciclului;

4. Au fost stabilite valori optime ale unor parametri-cheie ai regimului de prelucrare ECM+US, respectiv densitatea de curent  $J$  pe suprafața prelucrată, precum și puterea consumată pe lanțul ultrasonic, având ca funcție obiectiv reducerea procentuală a rugozității suprafeței prelucrate în raport cu rugozitatea inițială;

5. Au fost identificate cauzele care pot conduce la neconformități aferente modelului experimental de finisare hibridă, electrochimică ultrasonică, precum și soluții de îmbunătățire în vederea creșterea performanțelor tehnologice.

## 14.2 Contribuții originale

Analizând rezultatele cercetărilor desfășurate în cadrul tezei de doctorat “Cercetări privind prelucrarea de finisare hibridă, electrochimică-ultrasonică”, s-au stabilit o serie de contribuții originale atât teoretice, cât și aplicative.

### • Contribuții teoretice

1. Clasificarea tehnologiilor hibride neconvenționale în următoarele categorii, după cum urmează:
  - după contribuția adusă de componenta sau componentele secundară / secundare: tehnologii hibride combinate, la care componenta secundară contribuie direct la prelevarea materialului; tehnologii hibride asistate, la care componenta sau componentele secundare creează doar condițiile pentru creșterea performanțelor tehnologice;
  - după mijlocul sau elementul de asistare a tehnologiilor hibride: cu vibrații, laser, fluide și câmp magnetic;
  - încadrarea tehnologiei ECM+US în categoria prelucrărilor combinate hibride prin faptul că ultrasunetele contribuie direct la îndepărtarea materialului nu numai prin prelevarea stratului pasivizat de pe suprafața prelucrată (depasivizare), dar și a vârfurilor microgeometriei, reducând rugozitatea;
  - prelucrarea hibridă combinată, electroerozivă-ultrasonică a fost încadrată în aceeași categorie deoarece s-a demonstrat că ultrasunetele prin efectul ținut sub control al cavitației induse în interstițiul de prelucrare contribuie în mod direct la prelevarea materialului, în principal prin reducerea rugozității suprafeței prelucrate;
  - după numărul de componente combinate; două sau mai multe componente;
  - după modul de asistare; *simultan* - acțiunea concomitentă a componentelor asupra materialului prelucrat sau *succesiv* - acțiunea consecutivă a componentelor asupra materialului prelucrat.
2. S-a realizat trecerea de la faza de concept, a unui echipament de finisare electrochimică combinată cu ultrasunete - gradul de maturitate (Technology Readiness Level) TRL 2,

la aceea de model experimental a echipamentului de finisare electrochimică combinată cu ultrasunete - testat în condiții de laborator, respectiv TRL 4.

3. Formularea funcției generale, funcțiilor principale și secundare ale echipamentului de finisare electrochimică-ultrasonică și conceperea arhitecturii acestuia.

- **Contribuții aplicative**

- Simularea numerică a efectului componentei ultrasonice în procesul de finisare electrochimică, depasivizare și reducerea rugozității suprafeței prelucrate și validarea modelului computerizat în condiții de laborator;
- Simularea numerică a procesului de prelevare a materialului în cazul oțelurilor înalt aliate, care conțin carburi de Cr și W și explicarea formării microcavităților pe suprafața prelucrată la creșterea puterii ultrasonice, precum și validarea modelului computerizat în condiții de laborator;
- Simularea numerică a curgerii electrolitului în interstițiul frontal de prelucrare, abordată în două etape, care au condus și la stabilirea metodei succesive de finisare hibridă, electrochimică-ultrasonică;
- Cele două etape de simulare numerică au constat în: curgere turbulentă staționară aferentă spălării interstițiului de prelucrare; curgere laminară dependentă de timp, aferentă timpului de pauză pentru crearea condițiilor de uniformizare cinetică a soluției de electrolit pe suprafața prelucrată la aplicarea componente electrochimice;
- Modelarea și simularea numerică a lanțurilor ultrasonice în scopul obținerii condiției de rezonanță și reducerii substanțiale a ciclului de pregătire a fabricației, precum și ameliorarea dezavantajului tehnologiei ECM+US cu privire la flexibilitatea redusă;
- Modelarea și simularea numerică a concentratoarelor în condițiile aplicării pe suprafața acestora a diferitelor materiale polimerice în scopul evitării coroziunii la imersarea în lichidul electrolitic;
- Evaluarea influenței exercitate la aplicarea fiecărui material izolator asupra frecvenței proprii a concentratoarelor;
- Modelarea unui concentrator cilindric în trepte cu capăt evazat, care permite utilizarea unor electrozi-sculă de diverse dimensiuni, realizarea lanțului ultrasonic care include acest tip de concentrator și validarea experimentală a modelului computerizat;
- Proiectarea din elemente modulare a echipamentului de finisare electrochimică combinată cu ultrasunete, model experimental, astfel încât să permită flexibilitate ridicată, adaptare ușoară și la alte forme și dimensiuni ale pieselor de prelucrat;
- Realizarea echipamentului de finisare electrochimică combinată cu ultrasunete – de tip stand experimental pentru experimentări preliminare;
- Experimentarea preliminară a echipamentului de finisare electrochimică combinată cu ultrasunete – stand experimental;
- Proiectarea construcției modulare a echipamentului de finisare electrochimică combinată cu ultrasunete – model experimental, care include lanțul ultrasonic, dispozitivele de prindere a lanțului ultrasonic și a pieselor de prelucrat, celula electrochimică, circuitul de alimentare cu lichid electrolitic;
- Realizarea echipamentului în construcție modulară de finisare electrochimică combinată cu ultrasunete – model experimental;

- Experimentarea echipamentului de finisare electrochimică combinată cu ultrasunete - model experimental, identificarea cauzelor neconformităților și găsirea unor soluții pentru creșterea performanțelor tehnologice ale procedurii de finisare hibridă, ECM+US;
- Obținerea nivelului de maturitate, TRL 4, a echipamentului de finisare electrochimică-ultrasonică în construcție modulară care a presupus testarea funcționării acestuia în condiții de laborator;
- Stabilirea cauzelor care au condus la producerea unor neconformități la funcționarea modelului experimental de finisare hibridă electrochimică-ultrasonică și formularea unor soluții care să contribuie la înlăturarea acestor cauze și creșterea performanțelor tehnologice ale finisării ECM+US.

### **14.3 Direcții viitoare de cercetare**

Analizând rezultatele obținute în cadrul tezei de doctorat, s-au stabilit o serie de direcții viitoare de cercetare care integrează soluții tehnologice actuale, prezentate detaliat în cadrul tezei.

Toate acestea pot contribui la ținerea sub control a sistemului tehnologic, precum și implementarea unor bucle de reacție care să mențină procesul în parametrii optimi în timp real, pe baza unor algoritmi de inteligență artificială, în acord cu nivelul tehnologic actual atins de dezvoltarea Internet of Things (IoT).

**BIBLIOGRAFIE**

- [1]. Ghiculescu, D., Contributions to Development and Innovation of Ultrasonically Aided Nonconventional Machining, Teză de abilitare, UPB 2016.
- [2]. Marinescu, N.I., Ghiculescu, D., Popa, L., Pîrnău, C., Marinescu, R., Ene, G.M., Procese tehnologice cu fascicule, oscilații și jeturi, Volumul 3, TEHNOLOGII CU UNDE ULTRASONICE, ISBN 978-606-23-0984-8, Editura Printech, Cod CNC SIS 54, București, 2019.
- [3]. Ghiculescu, D., Chapter 5 - Ultrasonically Aided Electrical Discharge Machining, Manufacturing Technology Research, Electrical Discharge Machining - Types, Technologies and Applications, M.P. Jahan Editor, Nova Science Publishers, ISBN:978-1-63483-598-5, p. 151, 2015.
- [4]. Jain, V.K., Advanced machining processes, Allied Publishers Pvt Ltd., New Delhi, ISBN 81-7764-294-4, 2002.
- [5]. Kapil, G., Neelesh, K.J., Laubscher, R.F., Hybrid Machining Processes Perspectives on Machining and Finishing, ISBN 978-3-319-25922-2, Editura Springer, p. 4-6, 2016, DOI 10.1007/978-3-319-25922-2.
- [6]. Sumit, B., Divya, Z., Hybrid Micro-Machining Processes, Editura Springer, India, ISBN 978-3-030-13039-8, 2019, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-13039-8>.
- [7]. Coteață, M., Slătineanu, L., Dodun, O., Ciofu, C., Electrochemical discharge machining of small diameter holes, International Journal of Material Forming, Volume 1, p. 1327 –1330, Springer, DOI 10.1007/s12289-008-0148-3, 2008.
- [8]. Slătineanu, L., et. al., Behaviour of conical surfaces during the electrochemical machining process, Nonconventional Technologies Review, Romania, March, 2016.
- [9]. Slătineanu, L., et. al., Modelling of the electrochemical machining process, The 4th International Federation of Automatic Control Conference on Management and Control of Production and Logistics, September 27-30, Sibiu – Romania, IFAC MCPL, 2007.
- [10]. Van der Velden, T., Rommes, B., Klink, A., et. al., A novel approach for the efficient modeling of material dissolution in electrochemical machining, Elsevier, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2021.111106>.
- [11]. Mehrvar, A., Motamedi, M., Jamalpour, A., Modeling of Jet Electrochemical Machining Using Numerical and Design of Experiments Methods, Scientia Iranica, 2023, doi: 10.24200/sci.2023.60185.6650.
- [12]. Mukhopadhyay, P., Sarkar, B.R., Advancement in ultrasonic vibration and magnetic field assisted micro-EDM process: An overview, International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET), ISSN Print: 0976-6480 and ISSN Online: 0976-6499, Vol. 10, pp. 362-373, 2019.
- [13]. Bharat, C.K., Pravin, R., Janak, B.V., Ultrasonic vibration-assisted electric discharge machining: A research review, Journal of Engineering Manufacture, Proceedings of the

Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Volume 230, Issue 2, 2015, DOI: 10.1177/0954405415573061.

[14]. Gao, C., Liu, Z., A study of ultrasonically aided microelectrical-discharge machining by the application of workpiece vibration, Elsevier, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 139, p. 226–228, 2003, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00224-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00224-3).

[15]. Shrivastava, P.K., Dubey, A.K., Electrical discharge machining-based hybrid machining processes: A review, Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, Volume 228, Issue 6, p. 799-825, 2014.

[16]. Yu, Z.Y., Zhang, Y., Li, J., et. al., High aspect ratio microhole drilling aided with ultrasonic vibration and planetary movement of electrode by micro-EDM, Elsevier, CIRP Annals Manufacturing Technology, Volume 58, Issue 1, p. 213–216, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.111>.

[17]. Saeed, Z.C., Xichuan, L., Hybrid micro-machining processes: A review, Published by Elsevier, Precision Engineering, Vol. 41, p. 1–23, 2015. DOI:10.1016/j.precisioneng.2015.03.001

[18]. Koshimizu, S., Aoki, S., Micro-grooving of glass using small-diameter diamond grindstone with ultrasonic vibration, Advanced Material Research, Chapter 8: EDM, Ultrasonic Machining, and Laser Machining, Trans Tech Publications, ISBN 978 3 03785 825 7, Vol. 797, p. 368–374, 2013.

[19]. Sundaram, M.M., Pavalarajan, G.B., Rajurkar, K.P., A study on process parameters of ultrasonic assisted micro EDM based on Taguchi method, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 17, p. 210–215, 2008, DOI: 10.1007/s11665-007-9128-x.

[20]. Tong, H., Li, Y., Wang, Y., Experimental research on vibration assisted EDM of micro-structures with non-circular cross-section, Elsevier, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 208, p. 289–298, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.126>.

[21]. Ghiculescu, D., Marinescu, N.I., Nanu, S., Ghiculescu, D., Kakarelidis, G., FEM study of synchronization between pulses and tool oscillations at ultrasonic aided micro electro-discharge machining. Nonconventional Technologies Review, No. 3, p. 19–25, 2010.

[22]. Ichikawa, T., Natsu, W., Realization of micro-EDM under ultra-small discharge energy by applying ultrasonic vibration to machining fluid, Elsevier, Procedia CIRP, Vol. 6, p. 326–331, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.094>.

[23]. Mahardika, M., Prihandana, G.S., Endo, T., et. al., The parameters evaluation and optimization of polycrystalline diamond micro-electrodischarge machining assisted by electrode tool vibration, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 60, p. 985–993, 2012, <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3674-y>.

[24]. Huang, H., Zhang, H., Zhou, L., Zheng, H.Y., Ultrasonic vibration assisted electro-discharge machining of microholes in Nitinol, Journal of Micromechanics and Microengineering, Volume 13, Number 5, p. 693–700, 2003, DOI 10.1088/0960-1317/13/5/322.



- [25]. Endo, T., Tsujimoto, T., Mitsui, K., Study of vibration-assisted micro-EDM - the effect of vibration on machining time and stability of discharge, Elsevier, Precision Engineering, Volume 32, Issue 4, p. 269-277 32:269–77, 2008.  
<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2007.09.003>
- [26]. Tong, H., Wang, Y., Li, Y., Vibration-assisted servo scanning 3D micro EDM, Journal of Micromechanics and Microengineering, Volume 18, Number 2, 2008, DOI 10.1088/0960-1317/18/2/025011.
- [27]. Hoang, K.T., Yang, S.H., A study on the effect of different vibration-assisted methods in micro-WEDM, Elsevier, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 213, p. 1616–1622, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.03.025>.
- [28]. Hsue, A.W.J., Wang, J.J., Chang, C.H., Milling tool of micro-EDM by ultrasonic assisted multi-axial wire electrical discharge grinding processes, ASME 2012 International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the 40th North American Manufacturing Research Conference and in participation with the International Conference on Tribology Materials and Processing, Paper No: MSEC2012-7415, p. 473-479, DOI:10.1115/MSEC2012-7415.
- [29]. Bhattacharyya, B., Malapati, M., Munda, J., Sarkar, A., Influence of tool vibration on machining performance in electrochemical micro-machining of copper, Elsevier, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 47, Issue 2, p. 335-342, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.03.005>.
- [30]. Ghoshal, B., Bhattacharyya, B., Influence of vibration on micro-tool fabrication by electrochemical machining, Elsevier, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 64, p. 49-59, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.07.014>.
- [31]. Ruszaj, A., Zybura, M., Żurek, R., Skrabalak, G., Some aspects of the electrochemical machining process supported by electrode ultrasonic vibrations optimization, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 217(10), p. 1365-1371, 2003, doi:10.1243/095440503322617135.
- [32]. Liu, Z., Zhang, H., Chen, H., Zeng, Y., Investigation of material removal rate in micro-electrochemical machining with lower frequency vibration on workpiece, International Journal of Machining and Machinability of Materials, Vol. 14(1), p. 91–104, 2013.
- [33]. Kang, B., Kim, G.W., Yang, M., Cho, S.H., Park, J.K., A study on the effect of ultrasonic vibration in nanosecond laser machining, Optics and Lasers in Engineering, Vol. 50(12), p. 1817-1822, 2012, DOI:10.1016/j.optlaseng.2012.06.013.
- [34]. Zheng, H.Y., Huang, H., Ultrasonic vibration-assisted femtosecond laser machining of microholes, Journal of Micromechanics and Microengineering, Volume 17, Number 8, 2007, DOI 10.1088/0960-1317/17/8/N03.
- [35]. Park, J.K., Yoon, J.W., Cho, S.H., Vibration assisted femtosecond laser machining on metal, Optics and Lasers in Engineering, Vol. 50, No. 6, p. 833–837, 2012.  
DOI:10.1016/j.optlaseng.2012.01.017

- [36]. Kaakkunen, J.J.J., Silvennoinen, M., Paivasaari, K., Vahimaa, P., Water-assisted femtosecond laser pulse ablation of high aspect ratio holes, Elsevier, Physics Procedia, Volume 12, Part B, p. 89-93, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.110>.
- [37]. Jang, D., Kim, D., Liquid-assisted excimer laser micromachining for ablation enhancement and debris reduction, Journal of Laser Micro/Nanoengineering, Vol. 1(3), p. 221-225, 2006, DOI:10.2961/jlmn.2006.03.0014.
- [38]. Chu, W.S., Kim, C.S., Lee, H.T., Choi, J.O., Park, J.I., Song, J.H., et. al., Hybrid manufacturing in micro/nano scale: a review, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, Vol. 1(1), p. 75-92, 2014, DOI:10.1007/s40684-014-0012-5.
- [39]. De Silva, A.K.M., Pajak, P.T., McGeough, J.A., Harrison, D.K., Thermal effects in laser assisted jet electrochemical machining, Elsevier, CIRP Annals, Volume 60, Issue 1, p. 243-246, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.132>.
- [40]. Sanha, K., et. al., Hybrid micromachining using a nanosecond pulsed laser and micro EDM, Journal of Micromechanics and Microengineering, Volume 20, Number 1, 2009, DOI 10.1088/0960-1317/20/1/015037.
- [41]. Singh, R., Alberts, M.J., Melkote, S.N., Characterization and prediction of the heat-affected zone in a laser-assisted mechanical micromachining process, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 48(9), p. 994-1004, 2008. DOI:10.1016/j.ijmachtools.2008.01.004
- [42]. Kumar, M., Melkote, S.N., Process capability study of laser assisted micro milling of a hard-to-machine material, Elsevier, Journal of Manufacturing Processes Volume 14, Issue 1, p. 41-51, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2011.09.003>.
- [43]. Mohid, Z., Warap, N.M., Rahim, E.A., Ibrahim, M.R., Ismail, M.I.S., Study on laser assisted micro milling (LMM) processing characteristic of titanium alloy(Ti6Al4V) using TiAlN coated carbide micro ball mill, International conference on micromanufacturing (ICOMM), No. 31, 2014, <http://digital.library.wisc.edu/1793/68579>.
- [44]. Ding, H., Shen, N., Shin, Y.C., Thermal and mechanical modeling analysis of laser-assisted micro-milling of difficult-to-machine alloys, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 212(3), 2012, DOI:10.1016/j.jmatprotec.2011.07.016.
- [45]. Tangwarodomnukun, V., Wanga, J., Huang, C.Z., Zhu, H.T., An investigation of hybrid laser-waterjet ablation of silicon substrates, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 56, p. 39-49, 2012, DOI:10.1016/j.ijmachtools.2012.01.002.
- [46]. Sezer, H.K., Li, L., Leigh, S., Twin gas jet-assisted laser drilling through thermal barrier-coated nickel alloy substrates, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 49(14), p. 1126-1135, 2009, DOI:10.1016/j.ijmachtools.2009.07.002.
- [47]. Sabyrov, N., Jahan, M.P., Bilal, A., Perveen, A., Ultrasonic Vibration Assisted Electro-Discharge Machining (EDM) - An Overview, Materials Journal, Volume 12, Issue 3, Published by MDPI AG, Basel, Switzerland, February 2019, doi: 10.3390/ma12030522.

- [48]. Lin, Y.C., Hung, J.C., Lee, H.M., Wang, A.C., Chen, J.T., Machining characteristics of a hybrid process of EDM in gas combined with ultrasonic vibration, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 92(6), 2017, DOI:10.1007/s00170-017-0369-z.
- [49]. Lin, Y.C., et. al., Machining Performances of Electrical Discharge Machining Combined with Abrasive Jet Machining, Elsevier, *Procedia CIRP*, Vol. 68, p. 162-167, 2018, DOI:10.1016/j.procir.2017.12.040.
- [50]. Tsai, C.H., Li, C.C., Investigation of underwater laser drilling for brittle substrates, Elsevier, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, Issue 6 p. 2838–2846, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.06.057>.
- [51]. Dongsik, K., Joochul, L., On the physical mechanisms of liquid-assisted laser cleaning, *Journal of Applied Physics*, Vol. 93, p. 762–764, 2003, <https://doi.org/10.1063/1.1527207>.
- [52]. Choi, J.P., Jeon, B.H., Kim, B.H., Chemical-assisted ultrasonic machining of glass, Elsevier, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 191, Issues 1–3, p. 153-156, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.03.017>.
- [53]. Skoczypiec, S., Grabowski, M., Spychalski, M., Experimental Research on Electrochemically Assisted Microturning Process, Material Forming ESAFORM, In *Key Engineering Materials*, Vol. 611–612, p. 701–707, Trans Tech Publications, Ltd., 2014 <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.611-612.701>.
- [54]. Tateishi, T., Shimada, K., Yoshihara, N., Yan, J.W., Kuriyagawa, T., Effect of Electrorheological Fluid Assistance on Micro Ultrasonic Machining, In *Advanced Materials Research*, Vol. 69–70, p. 148–152, Trans Tech Publications, Ltd., 2009, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.69-70.148>.
- [55]. Lin, Y.C., Lee, H.S., Machining characteristics of magnetic force-assisted EDM, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48(11), p. 1179-1186, 2008, DOI:10.1016/j.ijmachtools.2008.04.004.
- [56]. Heinz, K., Kapoor, S.G., Devor, R.E., Surla, V., An investigation of magnetic-field-assisted material removal in micro-EDM for nonmagnetic materials, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 133, 2011, DOI:10.1115/1.4003488.
- [57]. Guo, Y., Ling, Z., A magnetic suspension spindle system for micro-EDM, 18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XVIII), vol.42, pp543-546, 2016, DOI:10.1016/j.procir.2016.02.248.
- [58]. Yeo, S.H., Murali, M., Cheah, H.T., Magnetic field assisted micro electro-discharge machining, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Volume 14, Number 11, 2004, DOI 10.1088/0960-1317/14/11/013.
- [59]. Jain, V.K., Magnetic field assisted abrasive based micro-nano-finishing, Elsevier, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 209, Issue 20, p. 6022-6038, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.08.015>

- [60]. Teimouri, R., Baseri, H., Experimental study of rotary magnetic field-assisted dry EDM with ultrasonic vibration of workpiece, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Vol. 67(5-8), 2012, DOI:10.1007/s00170-012-4573-6.
- [61]. Hassan, E.H., McGraw-Hill Companies, *Advanced Machining Processes, Nontraditional and hybrid machining processes*, Production Engineering Department Alexandria University, Egypt, ISBN 0-07-145334-2, 2005, DOI: 10.1036/0071466940.
- [62]. Gupta, P.K., Dvivedi, A., Kumar, P., Developments on electrochemical discharge machining: a review of experimental investigations on tool electrode process parameters, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2015, <http://dx.doi.org/10.1177/0954405414534834>.
- [63]. Tsai, Y.Y., Tseng, C.H., Chang, C.K., Development of a combined machining method using electrorheological fluids for EDM, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 201, Issues 1–3, p. 565-569, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.150>.
- [64]. Ravinder, K., Kumar, J., *Ultrasonic machining: A review*, *Advanced Materials Research*, Vol. 1137, p. 61-78, ISSN: 1662-8985, 2016.  
doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1137.61
- [65]. Kumar, J., *Ultrasonic Machining - A Comprehensive Review*, *Machining Science and Technology*, An International Journal, ISSN 1091-0344, Volume 17, Issue 3, pp. 325-379, July 2013.
- [66]. Lambert, P., *Capillary Forces in Microassembly, Modeling, Simulation, Experiments and Case Study*, ISBN 978-0-387-71088-4., Springer Science + Business Media, LLC, 2007.
- [67]. Liao, S., Gerhardy, C., Sackmann, J., et. al., Tools for ultrasonic hot embossing, *Microsystem Technologies*, Vol. 21, p. 1533–1541, 2015, <https://doi.org/10.1007/s00542-014-2232-6>.
- [68]. Tangwarodomnukun, V., [PhD thesis], *Towards damage-free micro-fabrication of silicon substrates using a hybrid laser-waterjet technology*, The University of New South Wales, 2012.
- [69]. Kumar, S., Wu, C.S., et., al., Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: A status review, *Journal of Manufacturing Processes* 26, pp. 295-322, (2017).
- [70]. Gallego, J.J., Rodriguez, G., Acosta, V., Power ultrasonic transducers with extensive radiators for industrial processing, *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 17, p. 953–964, 2010.  
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2009.11.006>
- [71]. Habiba, L., Lowe, P.S., et. al., Investigation of Ultrasonic Sonotrode Design to Improve the Performance of Ultrasonic Fouling Removal, *IEEE Access*, 2019.  
DOI:10.1109/ACCESS.2019.2946702
- [72]. Kozak, J., et. al., Development of advanced Abrasive Electrical Discharge Grinding (AEDG) system for machining difficult-to-cut materials, *Procedia CIRP* 42, p. 872-877, 2016, DOI:10.1016/j.procir.2016.03.011.

- [73]. Moles, M., Roy, A., Silberschmidt, V., Ultrasonically-assisted polymer molding: an evaluation, Proceedings of the 45th Annual Symposium of the Ultrasonic Industry Association, 4-6 April 2016, Seattle, WA, USA. Published by Elsevier, 2016.
- [74]. Rai, P.K., Patel, R.K., Modal Analysis of Horns Used in Rotary Ultrasonic Machining, Nano World Journal 9(S1), p. 144-147, 2023, <https://doi.org/10.17756/nwj.2023-s1-029>.
- [75]. Nad, M., Ultrasonic horn design for ultrasonic machining technologies, Applied and Computational Mechanics, Volume 4, p. 79-88, June 2010.
- [76]. Rai, P.K., Patel, R.K., Yadava, V., Modal Analysis of Horns used in Ultrasonic Machine, ELK Asia Pacific Journals - 978-93-85537-06-6, ARIMPIE 2017.
- [77]. Shu, K., Hsieh, W., Yen, H., Design and analysis of acoustic horns for ultrasonic machining, Applied Mechanics and Materials, Vol. 284-287(3), p. 662-666, 2013. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.284-287.662
- [78]. Brecher, C., Advances in Production Technology, Springer, ISBN 978-3-319-12304-2, Germany, 2015.
- [79]. Alupei-Cojocariu, O., Ghiculescu, D., Computer aided machining of an acoustic horn for ultrasonically aided EDM, Nonconventional Technologies Review, ISSN: ISSN 2359 – 8646; ISSN-L 2359 – 8646, Vol. XVIII, no. 4, p. 21-26, 2014.
- [80]. Ghiculescu, D., Marinescu N.I., Varga, G., Nanu, S., Determination by FEM of ultrasonic horn profile for vibrating the workpiece at EDM assisted by ultrasonics, Nonconventional Technologies Review, ISSN: ISSN 2359 – 8646; ISSN-L 2359 – 8646, Vol. XVIII, no. 4, p. 61-66, 2014.
- [81]. Ghiculescu, D., Marinescu, N.I., Nanu, S., Equipment for ultrasonically aided electrical discharge machining of microslots, Patent no. RO-126191 / 30.05.2012.
- [82]. Mohammadi, A., Tehrani, A., Abdullah, A., Introducing a new technique in wire electrical discharge turning and evaluating ultrasonic vibration on material removal rate, Procedia CIRP, Vol. 6, p. 583–588, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.005>.
- [83]. Ghiculescu, D., Marinescu, N.I., Nanu, S., Ghiculescu, D., Equipment for ultrasonic aiding of wire electrodischarge machining, Academic Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, p. 18–23, 2011.
- [84]. Nanu, A.S., Marinescu, N.I., Ghiculescu, L.D., Constructive solutions of an equipment for ultrasonically aided electrodischarge machining of micro-slots, Nonconventional Technologies Review, Vol. 16, p. 54–59, 2012.
- [85]. Ghiculescu, D., Tehnologii neconvenționale, Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București, Disponibil la: <https://my.upb.ro/>, accesat la: 20.07.2024.
- [86]. Ghiculescu, D., Tehnologii de fabricare cu fascicule și oscilații, Facultatea de Inginerie Industrială și Robotică, Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București, disponibil la: <https://fiir.curs.pub.ro/2023/>, accesat la: 20.07.2024.

- [87]. Ghiculescu, D., Inginerie și fabricare asistată de calculator în domeniul prelucrărilor neconvenționale. Îndrumar de laborator, Editura Printech, ISBN 978-606-521-971-7, 2013.
- [88]. \*\*\* Material Properties, disponibil la: <https://material-properties.org/polyamide-nylon-density-strength-melting-point-thermal-conductivity/>, accesat la: noiembrie 2022.
- [89]. \*\*\* PolymerDatabase, disponibil la: <https://polymerdatabase.com/polymer%20physics/Poisson%20Table.html>, accesat la: noiembrie 2022.
- [90]. \*\*\* Dielectric Manufacturing, disponibil la: <https://dielectricmfg.com/knowledge-base/polyethylene/>, accesat la: noiembrie 2022.
- [91]. \*\*\* MatWeb, disponibil la: [https://www.matweb.com/search/datasheet\\_print.aspx?matguid=956da5edc80f4c62a72c15ca2b923494](https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=956da5edc80f4c62a72c15ca2b923494), accesat la: noiembrie 2022.
- [92]. Kharche, W.G., Bilgi, D.S., Surekar, S.H., Bhatwadekar, S.G., Depassivation Method of Hard Passive Alloys by Electrochemical Machining, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), ISSN(e) : 2278-1684, ISSN(p) : 2320-334X, PP : 42-45, 2012.
- [93]. Nicoara, D., Hedes, A., Sora, I., Ultrasonic Enhancement of an Electrochemical Machining Process, Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Applications of Electrical Engineering, Prague, Czech Republic, Vol. 5, p. 213-218 March 12-14, 2006.
- [94]. Zhang, Y., Investigation Into Current Efficiency For Pulse Electrochemical Machining Of Nickel Alloy, Industrial and Management Systems Engineering, M.S. Thesis, University of Nebraska – Lincoln, 2010, <https://digitalcommons.unl.edu/imsediss/2>.
- [95]. Zhou et.al., Electrochemical Machining Using Modulated Reverse Electric Fields, US Patent 6402931B1, Jun 11, 2002.
- [96]. Sun, J.J., Larry, E.G., Robert, P.R., Taylor, E.J., Maria, E.I., The Applications of CM-ECM Technology to Metal Surface Finishing, Faraday Technology, Inc. Transactions of NAMRI/SME Volume XXVIII, 2000.
- [97]. Guangxi, L., Wenbo, B., et. al., Ultrasonic assisted machining of gears with enhanced fatigue resistance: A comprehensive review, Advances in Mechanical Engineering, Vol. 14(4), p. 1–31, 2022, DOI: 10.1177/16878132221082849.
- [98]. Hassan, E.H., Vibration-assisted electrochemical machining: a review, Springer-Verlag London Ltd., The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04209-9>.
- [99]. Skoczypiec, S., Research on ultrasonically assisted electrochemical machining process, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 52, p. 565–574, 2011, <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2774-4>.
- [100]. Liu, Z., Kang, M., Fu, X., Rotary Combined Ultrasonic and Electrochemical Machining Device of Small holes and Its Test Study, Key Engineering Materials, Vol. 584, p. 54-59, Trans Tech Publications, Switzerland, 2014, doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.584.54.

- [101]. Zhu, Y.W., Wang, Z.H., Yun, N.Z., An ECM Combined Ultrasonic Vibrating Micromachining Device and Its Test Study, *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, Vol. 27(8), p. 986-991, 2008.
- [102]. Zhao, Y., Zhu, Y.W., et. al., The Technology Research of Combined Ultrasonic and ECM of Fine Structure, *Journal of Xuzhou Institute of Technology*, Vol. 23(2), p. 37-40, 2008.
- [103]. Xu, J.W., Yun, N.Z., Wang, J.Y., et. al., *Electrochemical Machining Technique*, Beijing, National Defense Industry Press, 2008.
- [104]. Ma, X., Jiao, F., Bie, W., Niu, Y., Chu, S., Hu, Z., Yang, X., Structural Design of a Special Machine Tool for Internal Cylindrical Ultrasonic-Assisted Electrochemical Grinding, *Micromachines*, Vol. 14, p. 222, 2023, <https://doi.org/10.3390/mi14010222>.
- [105]. Jiao, F., Li, C.L., Niu, Y., Ma, X.S., Review and prospect of grinding wheel dressing technique, *Zhongguo Jixie Gongcheng/China Mechanical Engineering*, Vol. 32(20), p. 2435-2448, 2021, DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2021.20.006.
- [106]. Qiao, J.P., Wu, H.Q., Sun, L.H., Feng, M., Zeng, J., Wu, Y.B., Experimental investigation on ultrasonic-assisted truing/dressing of diamond grinding wheel with cup-shaped GC wheel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 121(5), 2022, DOI:10.1007/s00170-022-09397-5.
- [107]. Jiao, F., Zhao, B., Zhu, X.S., Fan, Q.T., Ultrasonic Dressing of Grinding Wheel and Its Influence on Grinding Quality, In *Key Engineering Materials (Vols. 304–305, p. 62–65)*. Trans Tech Publications, Ltd., 2006, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.304-305.62>
- [108]. Shen, Z.Y., Tsui, H.P., An Investigation of Ultrasonic-Assisted Electrochemical Machining of Micro-Hole Array, *Processes*, 9, 1615, 2021, <https://doi.org/10.3390/pr9091615>.
- [109]. Jin, W., Wei, C., Feng, G., Fuzhu, H., Ultrasonically assisted electrochemical micro drilling with sidewall-insulated electrode, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 230(3), p. 466–474, 2016, DOI: 10.1177/0954405414555740.
- [110]. Singh, T., Akshay, D., Anurag, S., Pradeep, D., Experimental investigations of energy channelization behavior in ultrasonic assisted electrochemical discharge machining, *Elsevier, Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 293, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117084>.
- [111]. Singh, T., Dvivedi, A., On performance evaluation of textured tools during micro channeling with ECDM, *Elsevier, Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 32, p. 699–713, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.03.033>.
- [112]. Singh, H., Jain, P.K., Influence of ultrasonic vibrations on process performance of electrochemical honing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 87, p. 1057–1066, 2016, <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8560-1>.
- [113]. Paschotta, R., YLF Lasers, *RP Photonics Encyclopedia*, retrieved 2024-07-08, 10.61835/ark.

- [114]. O'Connor, J.R., Unusual crystal-field energy levels and efficient laser properties of YVO<sub>4</sub>:Nd, *Applied Physics Letter*, Volume 9, p. 407-409, 1966.  
<https://doi.org/10.1063/1.1754631>.
- [115]. Saxena, K.K., Qian, J., Reynaerts, D., A review on process capabilities of electrochemical micromachining and its hybrid variants, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2018, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2018.01.004.
- [116]. Joshi, S.S., Marla, D., Electrochemical Micromachining, In *Comprehensive Materials Processing*, Rahman, M., Ed., Elsevier Ltd., Vol. 11, p. 373–403, ISBN: 9780080965321, 2014.
- [117]. Klocke, F., Harst, S., Ehle, L., Zeis, M., Klink, A., Material Loadings during Electrochemical Machining (ECM) - A First Step for Process Signatures, *Key Eng. Mater.*, Vol. 651–653, no. 1, p. 695–700, 2015.
- [118]. Klink, A., Process Signatures of EDM and ECM Processes - Overview from Part Functionality and Surface Modification Point of View, *Procedia CIRP*, Vol. 42, p. 240–245, 2016.
- [119]. Elhami, S., Razfar, M.R., Effect of ultrasonic vibration on the single discharge of electrochemical discharge machining, *Materials and Manufacturing Processes*, ISSN: 1042-6914 (Print) 1532-2475 (Online), 2017, DOI: 10.1080/10426914.2017.1328113.
- [120]. Gali, C.N., Dharma, R.K., Ramaiah, P.V., Experimental Evaluation of Electrolyte Flow Pattern in ECM Tool Using CFD Analysis, *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*, Vol. 3, Issue 10, 2016, ISSN: 2349-6495(P) | 2456-1908(O), <https://dx.doi.org/10.22161/ijaers/3.10.22>.
- [121]. Lauwers, B., Surface integrity in hybrid machining processes, *Procedia Engineering* Vol. 19(2), p. 241–251, 2011, DOI:10.1016/j.proeng.2011.11.107.
- [122]. Brehl, D.E., Dow, T.A., Review of vibration-assisted machining, *Precision Engineering* Vol. 32(3), p. 153-172, 2008, DOI:10.1016/j.precisioneng.2007.08.003.
- [123]. Kremer, D., Lebrun, J.L., Hosari, B., et. al., Effects of ultrasonic vibrations on the performances in EDM, *CIRP Annals, Manufacturing Technology*, Vol. 38, Issue 1, p. 199-202, 1989.
- [124]. Guo, Z.N., Lee, T.C., Yue, T.M., et. al., A study of ultrasonic-aided wire electrical discharge machining, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 63, p. 823-828, 1997.
- [125]. Prihandana, G.S., Mahardika, M., Hamdi, M., et. al., Effect of micro-powder suspension and ultrasonic vibration of dielectric fluid in micro-EDM processes - Taguchi approach, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 49, Issues 12-13, p. 1035–1041, 2009.
- [126]. Kim, D.J., Yi, S.M., Lee, Y.S., Chu, C.N., Straight hole micro EDM with a cylindrical tool using a variable capacitance method accompanied by ultrasonic vibration, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 16, 2006, DOI:10.1088/0960-1317/16/5/031.



- [127]. Park, J.K., Yoon, J.W., Kang, M.C., Cho, S.H., Surface effects of hybrid vibration-assisted femtosecond laser system for micro-hole drilling of copper substrate, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 22, p. 801–807, 2012.
- [128]. Meijer, J., Laser beam machining (LBM), state of the art and new opportunities, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 149(1-3), p. 2-17, 2004.
- [129]. Kuo, C.L., Huang, J.D., Liang, H.Y., et. al., Fabrication of 3D Metal Microstructures Using a Hybrid Process of Micro-EDM and Laser Assembly, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 21, p. 796-800, 2003. <https://doi.org/10.1007/s00170-002-1395-y>.
- [130]. Li, L., Diver, C., Atkinson, J., Wagner, R.G., Helml, H.J., Sequential laser and EDM micro-drilling for next generation fuel injection nozzle manufacture, Elsevier, CIRP Annals, Volume 55, Issue 1, p. 179-182, 2006, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60393-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60393-X).
- [131]. Zheng, H.Y., Jiang, Z.W., Femtosecond laser micro-machining of silicon with an external electric field, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 20, 2009, DOI:10.1088/0960-1317/20/1/017001.
- [132]. Kaku, T., Kuriyagawa, T., Yoshihara, N., Electrorheological fluid-assisted polishing of WC micro aspherical glass moulding dies, International Journal of Manufacturing Technology and Management Vol. 9, p. 109-119, 2006, DOI:10.1504/IJMTM.2006.009989.
- [133]. Kuriyagawa, T., Saeki, M., Syoji, K., Electrorheological fluid-assisted ultra-precision polishing for small three-dimensional parts, Elsevier, Precision Engineering, Volume 26, Issue 4, p. 370-380, 2002, [https://doi.org/10.1016/S0141-6359\(02\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0141-6359(02)00112-5).
- [134]. Haines, M.G., Lebedev, S.V., Chittenden, J.P., Beg, F.N., Bland, S.N., Dangor, A.E., The past, present and future of Z pinches, Physics of Plasma, Vol. 7(5), p. 1672-1680, 2000, DOI:10.1063/1.874047.
- [135]. **Enciu, C.C.**, Ghiculescu, L.D., Determination of eigenfrequencies for some ultrasonic horns specific to hybrid electrochemical machining, ACTA TECHNICA NAPOCENSIS, ImanEE 2023.
- [136]. **Enciu, C.C.**, Ghiculescu, L.D., The influence of different isolating materials applied to ultrasonic horns specific to hybrid electrochemical machining, Nonconventional Technologies Review, Romania, November, 2023.
- [137]. **Enciu, C.C.**, Pârvu, G.M., Ghiculescu, L.D., Hybrid micro-machining processes with ultrasonic assistance: a review, ICNCT 2021 - Volum 25, Number 4, December, Romania. Available: <http://www.revtn.ro/index.php/revtn/article/view/359>.
- [138]. Grzesik, W., Hybrid machining processes. Definitions, generation rules and real industrial importance, Mechanik, Vol. 91, No. 5-6, p. 338-342, 2018. DOI:10.17814/mechanik.2018.5-6.50
- [139]. Lauwers, B., Klocke, F., Klink, A., Tekkaya, A.E., Neugebauer, R., Mc Intosh, D., Hybrid processes in manufacturing, Annals of the CIRP Manufacturing Technology, Vol. 2, p. 561-583, 2014, DOI:10.1016/J.CIRP.2014.05.003.

- [140]. Marko, J., Andrej, L., Izidor, S., Pavel, D., Josko, V., Ice jet technology, MM Science Journal, p. 2379-2384, 2018, DOI: 10.17973/MMSJ.2018\_06\_201772.
- [141]. \*\*\* ecomet, disponibil la: <http://www.ecomet.pub.ro/infrastructura/expertize-mecano-metalurgice/microscop-electronic-cu-baleiaj-tip-quanta-inspect-f-producator-fei-philips-olanda/>, accesat la: 15 iulie 2024.
- [142]. \*\*\* RO-MEGA TRADE, disponibil la: <https://romegatrade.ro/produse/sisteme-de-masurare/echipamente-de-masurare-a-formei-si-suprafetei/rugozitate/marsurf-gd-140-280/>, accesat la: 16 iulie 2024.
- [143]. \*\*\* Introduction to Surface Roughness Measurement, ISO 25178 Surface Texture, <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:25178:-2:ed-2:v1:en>, accesat la 16 iulie 2024.
- [144]. Michael, K., A fast gauss filtering algorithm for roughness measurements, Precision Engineering, Volume 19, Issues 2–3, p. 198-200, ISSN 0141-6359, 1996, [https://doi.org/10.1016/S0141-6359\(96\)00025-6](https://doi.org/10.1016/S0141-6359(96)00025-6).
- [145]. Yang, L., Masahide, O., Reiko, K., Sadegh, N., Quantitative evaluation of surface roughness for granular materials using Gaussian filter method, Powder Technology, Vol. 388, p. 251-260, ISSN 0032-5910, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.04.068>.
- [146]. Yuan, Y.B., Vorburger, T.V., Song, J.F., Renegar, T.B., A Simplified Realization for the Gaussian Filter in Surface Metrology, In X. International Colloquium on Surfaces, Chemnitz (Germany), M. Dietzsch, H. Trumpold, eds. (Shaker Verlag GmbH, Aachen, 2000), p. 133, 2000.
- [147]. Arsalan, J., Jörg, S., Model of rough surfaces with Gaussian processes, Surface Topography Metrology and Properties, Vol. 11, 2022, DOI:10.1088/2051-672X/acbe55.
- [148]. \*\*\* Italia instruments disponibil la: <https://italiainstruments.com/rugozimetru-portabil/>, accesat la: 17 iulie 2024.
- [149]. \*\*\* Insize, disponibil la: <https://www.insz.ro/rugozimetre/rugozimetru-universal-isr-c002-insize/>, accesat la: 17 iulie 2024.
- [150]. \*\*\* Catalog MarSurf CD/ GD / VD, 3764953 | 11.2019, [www.mahr.com](http://www.mahr.com).
- [151]. Vișan, A., Ionescu, N., Toleranțe - Bazele proiectării și prescieri preciziei produselor, ISBN 973-648-280-4, Editura Bren, 2004.
- [152]. \*\*\* pico Technology: <https://www.picotech.com/oscilloscope/2000/picoscope-2000-specifications>, accesat la: 19 iulie 2024.
- [153]. Brüel & Kjaer, Digital Signal Analysis, Editura Tehnical Review, 1981.
- [154]. Enciu, C.C., Tarbă, C., Bărbulescu, C., Acoustic Analysis of Cylindrical, Conical and Worm Gears, ICAMAT International Conference 2019, Published by [www.scientific.net](http://www.scientific.net).
- [155]. D. Kremer, C. Lhiaubet, A. Moisan, A Study of the Effect of Synchronizing Ultrasonic Vibrations with Pulses in EDM, CIRP Annals, Volume 40, Issue 1, p. 211-214, ISSN 0007-8506, 1991.

- [156]. Marinescu, N.I., Ghiculescu, D., Popa, L., Pîrnău, C., Marinescu, R., Grumezescu, M., *Procese tehnologice cu fascicule, oscilații și jeturi*, Vol. 1 Tehnologii cu fascicul laser, ISBN 978-606-521-104-9, Editura Printech, Cod CNC SIS 54, București, 2017.
- [157]. Marinescu, N.I., Ghiculescu, D., Nanu, S., FEM modelling of microholes laser beam and electrodischarge machining aided by ultrasonics, *Proceedings of the 7th International Conference of Daam Baltic Industrial Engineering*, Edited by: Kyttner, R., Vols. 1 and 2, ISBN: 978-9985-59-982-2, pag. 19-24, 2010.
- [158]. Țîțu, A.M., “Contribuții cu privire la modificarea transferului substanțial la prelucrarea prin eroziune electrică cu câmpuri coercitive”, Teză de doctorat, ULBS, 1999.
- [159]. Nanu, D., Deneș, C., Diaconescu, C., Dodun, O., Ghiculescu, D., Herman, R., Mărcușanu, A., Marinescu, N.I., Nani, V. M., Nanu, A., Obaciu, Gh., Olariu, M., Oprean, C., Pisarciuc, C., Purcar, C., Revitzky-Levay, A., Slătineanu, L., Slavici, T., Țîțu, M., *Tratat de tehnologii neconvenționale*, Vol. II, *Prelucrarea prin eroziune electrică*, 602 p. Editura ULBS, 973-651-361-0, Sibiu, 2004.
- [160]. Lan, S.L., *Research on reinforcement mechanism and experiment of super gear root by ultrasonic rolling* [Dissertation, Henan Polytechnic University], 2021.
- [161]. Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K., *Engineering Design - A Systematic Approach*, Springer (2007), ISBN: 978-1-84628-319-2.
- [162] \*\*\* U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, *Technology Readiness Assessment Guide*, disponibil la: <https://www.directives.doe.gov/directives-documents/400-series/0413.3-EGuide-04a>, accesat la: 26.07.2024.
- [163] \*\*\* *Technology readiness levels (TRL)*, disponibil la: [https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014\\_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf), accesat la: 26.07.2024.
- [164] \*\*\* *Definiții TRL*, disponibil la: [https://uefiscdi.gov.ro/resource-868770-definitii\\_trl.pdf](https://uefiscdi.gov.ro/resource-868770-definitii_trl.pdf), accesat la: 26.07.2024.
- [165]. Mitchell-Smith, J., Clare, A.T., *ElectroChemical Jet Machining of Titanium: Overcoming Passivation Layers with Ultrasonic Assistance*, Elsevier, *Procedia CIRP* 42, p. 379 - 383, 2016.
- [166]. Insoon, Y., et. al., *Micro ECM with Ultrasonic Vibrations Using a Semi-cylindrical Tool*, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 10, No. 2, p. 5-10, 2009, DOI 10.1007/s12541-009-0020-5.
- [167]. Laurent, C., et. al., *Electrochemical Micromachining of Stainless Steel by Ultrashort Voltage Pulses*, *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, Vol. 217, p. 299-313, 2003.
- [168]. Liu, J., Wang, Z., Xu, Z., *Electrochemical Polishing of Ti6Al4V Alloy Assisted by High-Speed Flow of Micro-Abrasive Particles in NaNO<sub>3</sub> Electrolyte*, *Materials*, Vol. 15, 2022, <https://doi.org/10.3390/ma15228148>.

- [169]. **Enciu, C.C.**, Pârvu, G.M., Ghiculescu, L.D., Opran, C.G., Application of Micro Electrical Discharge Machining and Electrochemical Machining in Manufacturing of Micro-Electrochemical Systems: A Review, Macromolecular Symposia, Vol. 404, 6 pagini, ISSN:1022-1360,eISSN:1521-3900. <https://doi.org/10.1002/masy.202100449>.
- [170]. Pârvu, G.M., **Enciu, C.C.**, Ghiculescu, L.D., A review on electrochemical machining and micro-machining, ACTA TECHNICA NAPOCENSIS Series-Applied Mathematics Mechanics and Engineering, Vol. 64, pag. 745-754, Decembrie 2021, ISSN: 1221-5872.
- [171]. Ghiculescu, L.D. Pîrnău, **ENCIU, C.C.**, Pârvu, G.M., Search for keywords in a hybrid technologies field, based on ultrasonically aided EDM-ECM using the online environment, ICNCT 2021 – Volum 25, Number 3, September, Romania.  
Available: <http://www.revtn.ro/index.php/revtn/article/view/347>
- [172]. **Enciu, C.C.**, Pârvu, G.M., Ghiculescu, L.D., Specific equipment and improved parameters in ultrasonically hybrid assisted processes, ICNCT 2021 – Volum 25, Number 3, September,Romania,Available:<http://www.revtn.ro/index.php/revtn/article/view/349>
- [173]. Pîrnău, C., Ghiculescu, L.D., **Enciu, C.**, et. al., Study regarding the knowledge networks in the educational system, 14th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence ECAI-2022.
- [174]. \*\*\* McMaster-Carr, disponibil la: <https://www.mcmaster.com/>, accesat la: 7 ianuarie 2024.
- [175]. Coteață, M., Ciofu, C., Slătineanu, L., Munteanu, A., Dodun, O., Establishing the electrical discharges weight in electrochemical discharge drilling, International Journal of Material Forming 2, p. 673-676, 2009, DOI:10.1007/s12289-009-0612-8.
- [176]. Drobotă, V., Rezistenta materialelor, Editura tehnica, 1982.
- [177]. \*\*\* GrabCAD, disponibil la: <https://grabcad.com/library/mini-micro-submersible-motor-pump-1>, accesat la: 7 ianuarie 2024.
- [178]. Ghiculescu, D., Tehnologii de fabricare electrochimice, Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București, p. 416, Disponibil la: <https://my.upb.ro/>, accesat la: 30.07.2024.
- [179]. Kraichman, M.B., The resistivity of aqueous solutions of sodium chloride, Physics Research Department U.S. Naval Ordnance Laboratory White Oak, Maryland, 1964.
- [180]. Kumar, S., Modeling and Simulation of Material Removal on Glass While Machining Through ECDM, International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 6, Issue 10, October 2016, ISSN 2250-3153.
- [181]. \*\*\* MatWeb, Your Source for Materials Information, disponibil la: <https://www.matweb.com/search/DataSheet>, accesat la: 1.07.2024
- [182]. Upadhyay, R.K., Kumar, A., Srivastava, P.K., High Rate Anodic Dissolution of Stainless Steel 316 (SS316) Using Nano Zero Valent Iron as Reducing Agent, Journal of Applied Science and Engineering, Vol. 19, No. 1, p. 47-52, 2016, DOI: 10.6180/jase.2016.19.1.06

- [183]. \*\*\* eMAG, disponibil la: <https://www.emag.ro/aparat-de-masura-digital-deko-tools-termometru-laser-50-600-grade-celsius-afisaj-lcd-albastru-cwq04/pd/D9Y31RMBM/#description-section> , accesat la: 26.08.2024.
- [184]. Ghiculescu, D., et. al., On precision improvement by ultrasonics-aided electrodischarge machining, Estonian Journal of Engineering, p. 24-33, ISSN 1736-7522, 2009.
- [185]. Schuh, G., Kreysa, J., Orilski, S., Roadmap, Hybride Produktion, ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Hanser Verlag 104 (5), p. 385-391, 2009.
- [186]. Mohamed, Y.K., Sudhakar, R.P., Hybridization of Electrical Discharge Machining Process, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT) ISSN: 2249 - 8958, Vol. 9, October, 2019.
- [187]. Krishna, K.S., Mattia, B., Jun, Q., Dominiek, R., Bert, L., Xichun, L., Overview of Hybrid Machining Processes, Hybrid Machining, Chapter 2, p. 21-41, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813059-9.00002-6>, Elsevier Ltd, 2018.
- [188]. Katiyar, P.K., Randhawa, N. S., Hait, J., Jana, R.K., Singh, K.K., Mankhand, T.R., Anodic Dissolution Behaviour of Tungsten Carbide Scraps in Ammoniacal Media, In Advanced Materials Research, Vol. 828, p. 11–20, Trans Tech Publications, Ltd., 2013, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.828.11>.
- [189]. Reza, R.H., Mohammadreza, S., Machining of 304 stainless steel Using Electrochemical Machining (ECM) Process: Response Surface Methodology Approach, International Journal of Industrial Engineering & Production Research, Vol. 31, p. 397-407, 2020. DOI: 10.22068/ijiepr.31.3.397.
- [190]. Liu, G., et. al., Selection and Optimization of Electrolyte for Micro Electrochemical Machining on Stainless Steel 304, 18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining, Elsevier, p. 412-417, 2016.
- [191]. Hernas, A., et. al., Properties and microstructure of 12% Cr-W steels after long-term service, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 17, 2006.
- [192]. Viveksheel, R., et. al., Study on effective process parameters: toward the better comprehension of ECDM process, International Journal of Modern Manufacturing Technologies, ISSN 2067–3604, Vol. XI, No. 2, 2019.