

# CERCETĂRI PRIVIND PRELUCRABILITATEA PRIN ELECTROEROZIUNE CU ELECTROD MASIV

BULĂU<sup>1</sup> Oliviu Ștefan<sup>1</sup>, ENE<sup>2</sup> Gabriela-Marina<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Facultatea:Ingineria și Managementul Sistemelor Tehnologice , Specializarea:Nanotehnologii și  
Sisteme Neconvenționale, Anul de studii:4 , e-mail: bulau.stefan@gmail.com

Conducător științific: Prof. Dr. Ing. IONESCU Nicolae, Prof. Dr. Ing. VISAN Aurelian

*REZUMAT: Lucrarea tratează procesul de prelucrarea a unor aluminuri de titan prin electroeroziune utilizând electrozi tubulari confecționați din alamă destinați găuririi EDM. Proprietățile excelente ale acestui aliaj și utilizare lui în domenii din ce în ce mai variate au determinat această cercetare datorată și dificultății de prelucrare a materialului prin procedee convenționale. Experimentele au fost realizate pe utilajul ELER-01 din cadrul facultății IMST unde s-a urmărit productivitate și uzura volumică relativă a electrodului. Bazându-ne pe datele experimentale obținute, s-a determinat faptul că productivitățile obținute sunt, mici uzura sculei fiind ridicată. Mai mult decât atât, au fost evidențiate productivitatea și uzura volumică relativă,cu ajutorul unor grafice 2D, în funcție de timpul de impuls, pentru a determina varianta optimă de procesare.*

*CUVINTE CHEIE: electroeroziune, aluminură de titan, uzură, productivitate*

## 1. Introducere

O tendință importantă în industria aerospațială, dar nu numai, este utilizarea materialelor din gama aluminuri de titan. Această clasă de materiale prezintă anumite proprietăți remarcabile precum densitate scăzută, duritatea ridicată și rezistența la temperaturi înalte, fiind un substituent pentru aliajele bazate pe nichel utilizate la fabricarea turbinelor. Însă, aceste proprietăți afectează de asemenea prelucrabilitatea prin metode convenționale.

Conform literaturii de specialitate [1], cele mai importante procedee de prelucrare a aluminurilor de titan sunt prelucrarea cu jet de apă,frezarea de mare viteză, electroeroziunea cu electrod masiv și electroeroziunea cu electrod filiform.

Electroeroziunea cu electrod masiv este unul dintre cele mai utilizate procedee neconvenționale de îndepărtare a materialului, fiind independentă de proprietățile mecanice ale acestuia. Electroeroziunea cu electrod masiv este un proces care utilizează descărcări electrice pentru a îndepărta materialul prin vaporizare și topire. Este o metodă fără contact care nu exercită forțe semnificative asupra pieselor de prelucrat și astfel, nu produce deformații.

Mai mult decât atât, în cazul acestor materiale se utilizează și  $\mu$ -EDM, o variantă la scală redusă a procesului EDM. La prelucrările  $\mu$ -EDM electrozi sunt utilizați la un nivel scăzut a energiei de descărcare cu durate de impuls scurte. Prin urmare, productivitatea este de 0,6-6 mm mm<sup>3</sup>/oră , mult mai mică comparativ cu EDM-ul clasic.[4]

Utilizând aceste procedee putem, de exemplu, să executăm micro-canale cu o lățime minimă de 0,15 mm și micro găuri cu diametre de 20-50  $\mu$ m cu lungimi de până la 10 ori mai mari decât cealaltă dimensiune, cu o acuratețe de 3  $\mu$ m[2].

Mai mult decât atât, majoritatea cercetărilor [5] s-au axat pe parametrii de intrare a procesului , precum timpul de impuls, intensitatea, timpul de pauză și influența acestore asupra rugozității, productivității și a uzurii electrodului sculă dar și pe determinări statistice pentru a optimiza acest proces.

## 2. Stadiul actual al cercetărilor privind prelucrarea aluminurilor de titan

### Prelucrarea aluminurilor de titan utilizând EDM

În cazul utilizării EDM, rezultatele sunt influențate de dotarea mașinilor și totodată de parametrii acesteia. Astfel, pentru a stabili parametrii optimi pentru prelucrarea aluminurilor de titan în Facultatea IMST s-au efectuat teste [1] pe trei tipuri de mașini respectiv, Sodick AQ55L, ONA COMPACT și ELER 01. Ca și dielectric s-a utilizat Mentro 28 (ESSO-standard). Electrozii utilizați au fost confecționați din cupru electrolitic (99% cupru), cu o secțiune circulară de 7,7 mm [1].

Compoziția chimică a materialului de probe se regăsește în tabelul de mai jos:

**Tabelul 1. Compoziția chimică a Ti-40Al-5Nb-3V [1]**

Elemente	Al K $\alpha$	Ti K $\alpha$	V K $\alpha$	Nb K $\alpha$
Greutate (%)	18.9	69.3	2.5	9.59
Atomic (%)	30.48	63.09	1.93	4.5

Rezultatele experimentale obținute au fost centralizate în trei tebe, având drept scop analiza parametrilor de ieșire respectiv, productivitatea, timpul de procesare, uzura relativă/absolută, interstițiul lateral și adâncimea găurii, în funcție de intensitate, durată de impuls, durată de pauză și polaritate.

**Tabelul 2. Parametrii și caracteristici tehnologice pentru EDM utilizând Sodick AQ55L [1]**

Material probă/electrod	Nr. exp.	Intensitatea curentului [A]	Polaritate [-/+]	Durată impuls t <sub>i</sub> [μs]	Durată pauză impuls t <sub>p</sub> [μs]	Timp de procesare/ Productivitate [min]/[mm <sup>3</sup> /min]	Uzură relativă/ absolută [mm]/[%]	Adâncime gaură [mm]	Interstițiul lateral [mm]
Ti-40Al-5Nb-3V/Cu	1	36	-	12	12	39,55/3,15	1,069/39,93	2,48	0,15
Ti-40Al-5Nb-3V/Cu	2	36	-	12	12	41/2,83	1,45/58,15	2,31	0,15
Ti-40Al-5Nb-3V/Cu	3	24	-	48	12	15/1	0,11/34,13	0,30	0,14
Ti-40Al-5Nb-3V/Cu	4	24	+	48	12	5/1,46	0,033/21,04	0,146	0,14
Ti-40Al-5Nb-3V/Cu	5	24	+	48	12	15/1,36	0,054/12,56	0,41	0,14
C120/Cu	6	24	-	48	12	15/0,56	0,015/8,22	0,17	0,14
C120/Cu	7	24	+	48	12	5/21,90	0,005/0,21	2,19	0,14

**Tabelul 3. Parametrii și caracteristici tehnologice pentru EDM utilizând ONA Compact 2 [1]**

Material probă/electrod	Nr. exp.	Intensitatea curentului [A]	Polaritate [-/+]	Durată impuls t <sub>i</sub> [μs]	Durată pauză impuls t <sub>p</sub> [μs]	Timp de procesare/ Productivitate [min]/[mm <sup>3</sup> /min]	Uzură relativă/ absolută [mm]/[%]	Adâncime gaură [mm]	Interstițiul lateral [mm]
Ti-40Al-5Nb-3V/Cu	8	24	+	48	12	15/0,55	0,00/0,00	0,165	0,14
Ti-40Al-5Nb-3V/Cu	9	16	+	48	12	150/0,056	0,005/3,14	0,17	0,13

**Tabelul 4. Parametrii și caracteristici tehnologice pentru EDM utilizând ELER 02[1]**

Material probă/electrod	Nr.exp.	Intensitatea curentului [A]	Polaritate [-/+]	Durată impuls $t_i$ [ $\mu$ s]	Durată pauză impuls $t_p$ [ $\mu$ s]	Timp de procesare/ Productivitate [min]/[mm <sup>3</sup> /min]	Uzură relativă/ absolută [mm]/[%]	Adâncime gaură [mm]	Interstițiul lateral [mm]
Ti-40Al-5Nb-3V/Cu	10	12,5	+	420	95	270/0,460	0,024/0,90	2,5	0,13
Ti-6Al-4V/Cu	11	12,5	+	420	95	220/0,70	0,018/0,70	2,5	0,13
Ti-6Al-4V/Cu	12	12,5	-	420	95	155/0,802	0,016/0,60	2,5	0,13

Bazându-ne pe detele experimentale de mai sus, putem aprecia că cele mai bune rezultate s-au obținut utilizând mașina Sodick însă cu o uzură mare a electrodului sculă. În general, s-au obținut productivități foarte mici, prelucrarea acestui material prin EDM este foarte scăzută. Mai mult decât atât, este evident faptul că există o diferență mare între productivitatea obținută pentru materialul Ti-40Al-5Nb-3V/Cu (3,15 mm<sup>3</sup>/min) și C120 (21,90 mm<sup>3</sup>/min), acesta din urmă fiind materialul de referință.

În altă ordine de idei, putem evidenția cercetarea “Statistical Modeling and Optimization of Micro Electro Discharge Machining of Ti Alloy” [4] în care s-au efectuat micro găuri cu dimensiuni cuprinse între 300 și 400 de  $\mu$ m, materialul fiind tot o aluminură de titan, Ti-6Al-4V. Experimentele s-au desfășurat pe două nivele, utilizând trei variabile, pentru a determina influența acestora pentru prelucrarea micro-EDM.

În total s-au desfășurat 8 seturi de experimente, la care s-a urmărit timpul de prelucrare, interstițiul și uzura sculei, și influența acestora pentru rata de eliminare a materialului, precizia micro-găurilor și dimensiunea caracteristicilor suprafeței.

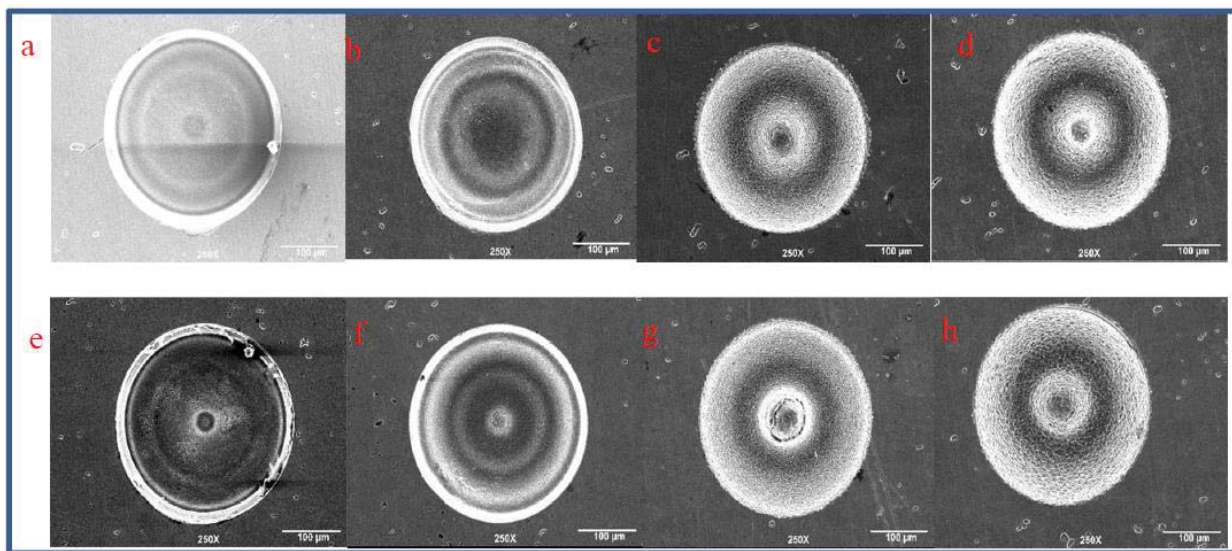


Figura 2.1 Găuri nestrăpunse pe aluminură de titan pentru diferite condiții experimentale [2]

Un alt parametru important, pentru a atinge o productivitate maxim, este factorul de umplere, care reprezintă raportul dintre timpul de impuls și suma timpului de impuls cu cea a timpului de pauză. Astfel este important să menținem acest factor constant.

### 3. Abordarea sistemică în studiul procesului de electroeroziune cu electrod masiv

#### 3.1 Aplicarea conceptelor de sistem și de abordare sistemică în studiul procesului de electroeroziune cu electrod masiv

Pentru o bună înțelegere a parametrilor și caracteristicilor prelucrării prin electroeroziune, și pentru stabilirea valorilor optime ale acestora, analiza procesului se va face pe baza abordării sistemice. Acest lucru presupune în prealabil lămurirea conceptelor de sistem și de abordare sistemică. [3]

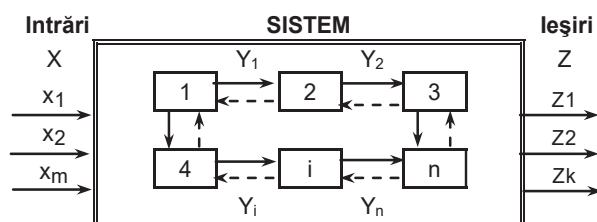


Figura 3.1 Reprezentarea abordării sistemice a unei entități [3]

**Tratarea sistemică** a unei entități are rolul de a determina interacțiunea dintre toate elementele componente ale acesteia în vederea realizării scopului final.

**Sistemul** poate fi definit ca “o reuniune de elemente care interacționează între ele și au ca scop realizarea unui obiectiv comun”.

**Conceptul de “sistem”** este o realizare a gândirii anilor '60-'80. În general, prin sistem se înțelege “un ansamblu de elemente aflate într-o relație structurală de interdependență și interacțiune reciprocă, formând un tot organizat, funcțional”.

**Abordarea sistemică** sau “teoria sistemelor” reprezintă o metodologie generală de gândire comună tuturor științelor.

**Esența abordării** sistemice constă în faptul că întregului i se acordă prioritate față de elementele sale componente, aceste elemente studiindu-se în condiții dinamice.

#### Caracteristicile oricărui sistem sunt (fig 3.1):

1. Elementele componente 1, 2, 3, ..., n, care formează un ansamblu;
2. Relațiile dintre elementele componente,  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ , directe și inverse;
3. Relațiile dintre sistem și mediu, care se numesc *intrări*,  $X_i$  și, respectiv, *ieșiri*,  $Z_i$ ;
4. Intrările,  $X_1, X_2, \dots, X_m$ , care reprezintă *acțiunile mediului asupra sistemului*;
5. Ieșirile,  $Z_1, Z_2, \dots, Z_k$ , care sunt *acțiunile sistemului asupra mediului*;
6. Funcțiunile sistemului. Acestea sunt descrise de *relațiile dintre intrările și ieșirile sistemului*.
7. Funcția sistemului este de a *transforma intrările  $X_i$  în ieșirile  $Z_k$* ;
8. Structura sistemului, definită de *natura elementelor care îl compun și de relațiile stabilite între acestea*.

#### Proprietățile unui sistem sunt:

1. Interconectarea elementelor componente, ca o condiție de existență a sistemului;

2. Valoarea unui sistem,  $V_S$ , este mai mare decât suma valorilor elementelor sale componente,  $V_i$ , respectiv:

$$V_S > \sum_{i=1}^n V_i \quad (3.1)$$

Cei mai importanți factori care impun abordarea sistematică a procesului de prelucrare prin electroeroziune sunt:

1. **Prioritatea concepției de ansamblu.** Aceasta este impusă de convingerea că în cadrul cercetării proceselor de prelucrare trebuie acordată prioritate concepției de ansamblu a sistemului destinat să producă, fiecare procedeu de lucru aplicat integrându-se în mod armonios.
2. **Complexitatea procesului de prelucrare prin electroeroziune.** Aceasta este determinată de sporirea și diversificarea parametrilor de care depinde desfășurarea acestuia.

### 3.2 Analiza sistemică a factorilor care determină procesul de prelucrare prin electroeroziune

Abordarea sistemică a procesului de EDM se realizează pe mai multe nivele de analiză, primul nivel, care include factorii primari, intermediari și finali, fiind reprezentați în figura 3.2

#### Procesul de prelucrare prin electroeroziune = Sistem

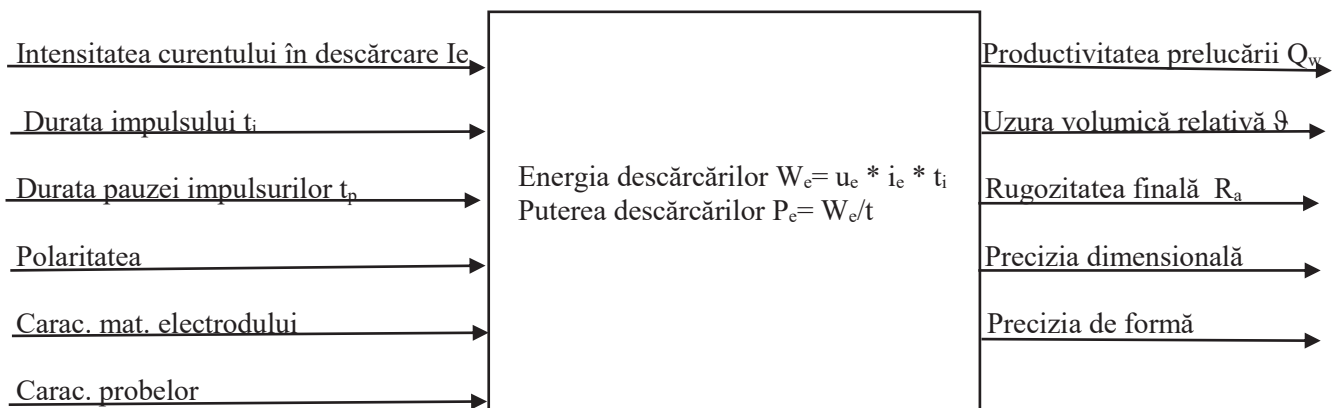


Figura 3.2 Analiza sistemică a procesului EDM[2]

Dintre aceste caracteristici, în cadrul lucrării noastre, am ales ca și factori de intrare, intensitatea curentului de descărcare, durata impulsului și durata pauzei impulsurilor, iar ca parametri de ieșire productivitatea prelucrării și uzura volumică relativă.

Celelalte două nivele putând fi exprimate astfel:

Nivelul 2. În funcție de locul în care se identifică, există:

- Parametri de intrare, respectiv parametri de lucru comandați de operator;
- Parametri de sistem, respectiv de proces, acei parametri electrotehnologici care apar și sunt determinați de procesul de prelucrare prin electroeroziune;
- Parametri de ieșire, adică caracteristicile tehnologice ale procesului de prelucrare prin electroeroziune

Nivelul 3. Din punct de vedere al variabilității și dependenței acestora, parametri care determină prelucrarea prin electroeroziune pot fi:

- Variabile independente  $X_i$ , adică parametri de intrare
- Variabile semidependente,  $Y_i$ , respectiv parametri de sistem sau de proces
- Variabilele dependente,  $Z_i$ , adică caracteristicile sistemului

1. Variabilele independente ale procesului sunt parametri electrotehnologici de intrare. Aceștia sunt considerați independenți deoarece au mărimi prestabilite de operator. Exemple:



- Intensitatea curentului  $I_e$
- Durata impulsului  $t_i$
- Durata pauzei impulsurilor  $t_p$

2. Variabilele semidependente ale procesului sunt parametrii de proces deoarece valorile acestora depind de variabilele independente. Exemple:

- Energia descărcărilor  $W_e = u_e * i_e * t_i$
- Puterea descărcărilor  $P_e = W_e/t$
- Densitatea de curent  $J = I/A_{sa}$


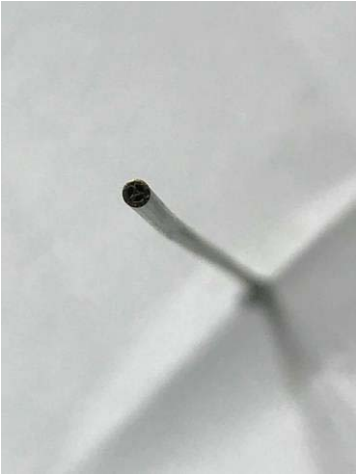

3. Variabilele dependente ale procesului sunt constituite din caracteristicile tehnologice ale procesului, ale căror valori depind atât de variabilele independente cât și de variabilele semidependente. Exemple:

- Volumul de material prelucrat  $V_w$
- Volumul de material uzat  $V_E$
- Productivitatea prelucrării  $Q_w$
- Uzura volumică relativă  $\vartheta$

#### 4. Plan experimental

Experimentele s-au realizat pe probe din aluminură de titan ce s-au prelucrat pe utilajul ELER-01 cu electrozi-fir din alamă. Probele au fost cântărite înainte și după fiecare prelucrare pentru a determina productivitatea și uzura volumică a electrodului-sculă.

**Tabelul 4. Echipament și probe utilizate în cadrul experimentului**

Aluminură de titan	Electrozi-fir din alamă	ELER-01
		
Figura 4.a Aluminură de titan	Figura 4.b Electrode-fir din alamă	Figura.4.c ELER-01

#### 4.1 Rezultate experimentale

S-au efectuat 9 seturi de experimente pe trei niveluri modificând doi parametri, diametrul electrodului și timpul de impuls, păstrând constante intensitatea și timpul de pauză, timpul de prelucrare fiind de 30 minute, precum în tabelul 5.1:

**Tabelul 4.1 Valorile parametrilor de intrare**

Nr.exp.	Mat, probă/electrod	Diametrul [mm]		Timpul de impuls [ $\mu$ s]		Intensitate [A]	Timpul de pauză $\mu$ s	Timp de prelucrare
		Nivel	Valoare	Nivel	Valoare			
1	Ti-40Al-5Nb-3V/Alamă	-1	1,4	-1	24	3,13	48	30
2	Ti-40Al-5Nb-3V/Alamă	-1	1,4	0	48	3,13	48	30
3	Ti-40Al-5Nb-3V/Alamă	-1	1,4	1	95	3,13	48	30
4	Ti-40Al-5Nb-3V/Alamă	0	1,58	-1	24	3,13	48	30
5	Ti-40Al-5Nb-3V/Alamă	0	1,58	0	48	3,13	48	30
6	Ti-40Al-5Nb-3V/Alamă	0	1,58	1	95	3,13	48	30
7	Ti-40Al-5Nb-3V/Alamă	1	1,71	-1	24	3,13	48	30
8	Ti-40Al-5Nb-3V/Alamă	1	1,71	0	48	3,13	48	30
9	Ti-40Al-5Nb-3V/Alamă	1	1,71	1	95	3,13	48	30

**Tabel 4.2 Valori experimentale obținute după prelucrare**

Nr.exp	Mat. probă /electrod	Masă electrod înainte de prelucrare [g]	Masă electrod după prelucrare [g]	$\Delta m_{\text{electrod}}$ [g]	Masă piesă înainte de prelucrare [g]	Masă piesă înainte de prelucrare [g]	$\Delta m_{\text{piesă}}$ [g]
1	Ti-40Al-5Nb-3V/Alamă	0,6536	0,6289	0,0247	5,4399	5,4379	0,002
2	Ti-40Al-5Nb-3V/Alamă	0,6370	0,6132	0,0238	5,4370	5,4357	0,0013
3	Ti-40Al-5Nb-3V/Alamă	0,6280	0,6013	0,0267	5,4379	5,4370	0,0009
4	Ti-40Al-5Nb-3V/Alamă	0,8760	0,8563	0,0197	5,4343	5,4339	0,0004
5	Ti-40Al-5Nb-3V/Alamă	0,8431	0,8222	0,0209	5,4339	5,4326	0,0013
6	Ti-40Al-5Nb-3V/Alamă	0,8876	0,8626	0,025	5,4357	5,4343	0,0014
7	Ti-40Al-5Nb-3V/Alamă	0,9492	0,9238	0,0254	5,4326	5,4318	0,0008
8	Ti-40Al-5Nb-3V/Alamă	0,9345	0,9164	0,0181	5,4318	5,4308	0,0010
9	Ti-40Al-5Nb-3V/Alamă	0,9595	0,9343	0,0252	5,4308	5,4302	0,0006

**Tabel 4.3 Rezultate experimentale obținute în urma prelucrării datelor obținute**

Nr exp.	$\Delta V_{\text{piesă}}$ [mm <sup>3</sup> ]	$\Delta V_{\text{electrod}}$ [mm <sup>3</sup> ]	$Q_{\text{piesă}}$ [mm <sup>3</sup> /min]	$Q_{\text{mpiesă}}$ [g/min]	Uzură absolută <sub>elec.</sub> [mm <sup>3</sup> /min]	Uzură absolută <sub>melec.</sub> [g/min]	$\eta$ [%]	Interstițiul [mm]	Ra [μm]
1	0,39503	2,90588	0,01316	$6,67 \cdot 10^{-5}$	0,096862	0,000823	735,5950	0,099	4,4625
2	0,25677	2,8	0,00855	$4,33 \cdot 10^{-5}$	0,093333	0,000793	1090,449	0,098	4,4624
3	0,17776	3,14117	0,00592	0,00003	0,104705	0,00089	1767,016	0,101	4,4625
4	0,07900	2,31764	0,00263	$1,33 \cdot 10^{-5}$	0,077254	0,000656	2933,445	0,198	4,4631
5	0,25677	2,45882	0,00855	$4,33 \cdot 10^{-5}$	0,081960	0,000696	957,5793	0,199	4,4629
6	0,27652	2,94117	0,00921	$4,67 \cdot 10^{-5}$	0,098039	0,000833	1063,613	0,201	4,4632
7	0,15801	2,98823	0,00526	$2,67 \cdot 10^{-5}$	0,099607	0,000846	1891,104	0,229	4,4637
8	0,19751	2,12941	0,00658	$3,33 \cdot 10^{-5}$	0,070980	0,000603	1078,078	0,227	4,4624
9	0,11851	2,96470	0,00395	0,00002	0,098823	0,00084	2501,618	0,228	4,4629

Interstițiul și rugozitatea au fost determinate cu ajutorul a unui microscop universal și cu microscopul dublu Linnik-Schmaltz.

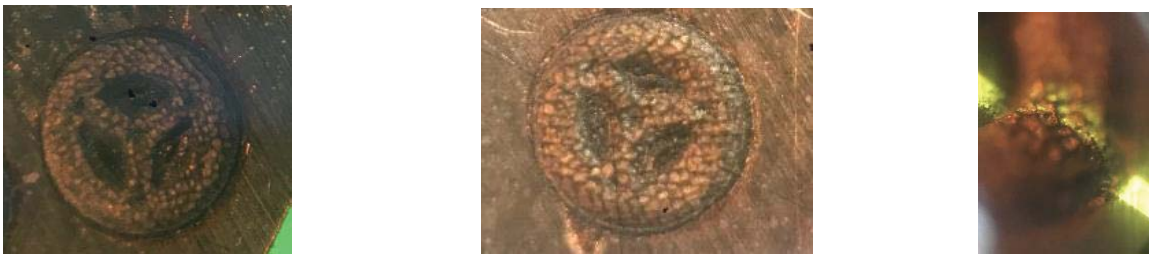


Figura 4.1 Amprente ale prelucrărilor



Figura 4.2 Prelucrare EDM pe aluminură de titan



În urma valorilor experimentale obținute s-au realizat două grafice, productivitatea în funcție de timpul de impuls, respectiv uzura volumică relativă în funcție de timpul de impuls.

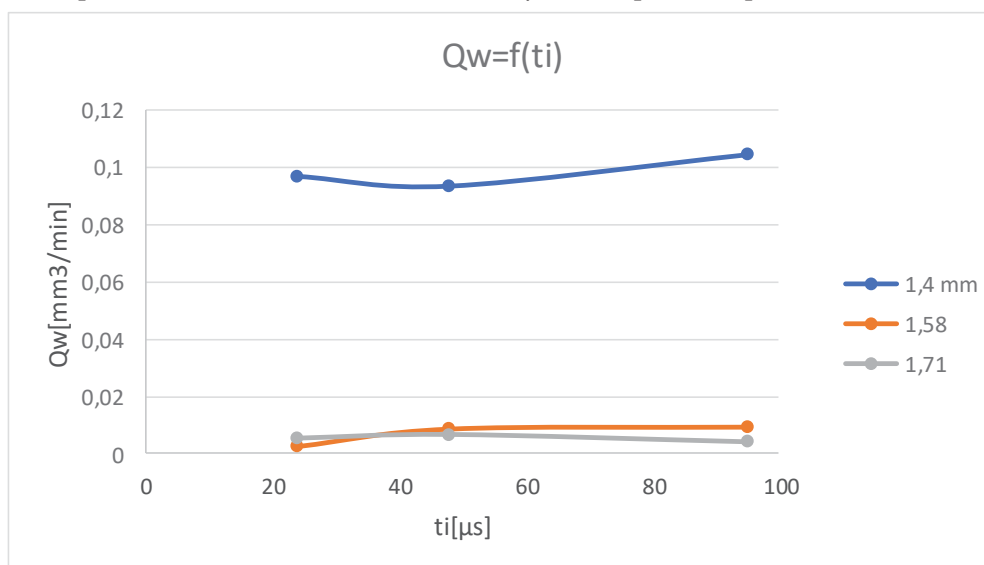


Figura.4.4 Productivitatea în funcție de timpul de impuls

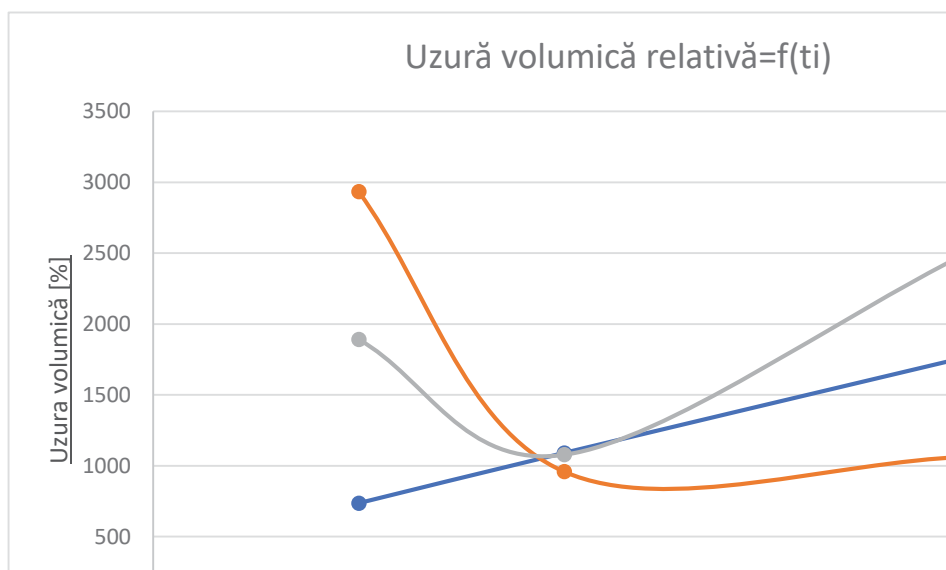


Figura 4.5 Uzura volumică relativă în funcție de timpul de impuls

Analizând cele două grafice, rezultatul optim a fost obținut în cazul electrodului cu diametrul de 1,4 mm, timpul de impuls fiind 95 μs, productivitatea fiind elementul determinant în cadrul acestui experiment.

## 5. Concluzii

În urma rezultatelor obținute s-a determinat că productivitatea este puternic influențată de timpul de impuls, fiind direct proporțională cu acesta. Mai mult decât atât, s-au constatat productivități mici și uzuri volumice mari ale electrozilor-sculă, însă acest lucru nu reprezintă un dezavantaj imens, deoarece

electrozii tubulari utilizați sunt speciali concepuți pentru mașinile EDM de găurit, uzura volumică mare fiind un lucru anticipat.

În cadrul cercărilor viitoare, prelucrarea datelor va continua cu stabilirea funcțiilor de regresie și dependența acestora în funcție de pramaetrii precum intensitatea curentului, timpul de impuls și timpul de pauză.

## 8. Bibliografie

- [1]. Trifănescu, M., Banu, Alexandra, Vișan, A., Ionescu, N., Paraschiv, A., Savin, A., *Study on Processing of Titanium Aluminide Alloy using Electrical Discharge Machining*, Source: Engineering Solutions and Technologies in Manufacturing, Applied Mechanics and Materials, Volume: 657, Pages: 311-315.
- [2]. Asma Perveen, M.P. Jahan, Syrymbet Zhumagulov, “Statistical Modeling and Optimization of Micro Electro Discharge Machining of Ti Alloy”, IPCMPC-2017;
- [3]. A., Vișan, N., Ionescu, *Tehnologii de Prelucrare prin Electroeroziune 2-TPEz 2, Note de curs-Pentru uzul studenților*, București, Universitatea Politehnica din București, Departamentul Tehnologia Construcțiilor de Mașini, Ediția 2017-2018, <http://www.imst.pub.ro>.
- [4]. S. Mitral, G. Paul, S. Sarkar, and Nagahanunaiah, Micro electro discharge machining of  $\gamma$ -titanium aluminide alloy, *Machines, Technologies, Materials virtual journal* , available at <http://mech-ing.com/journal/Archive/2012>
- [5] Hascalik, A. , U. Caydas, A comparative study of surface integrity of Ti-6Al-4V alloy machined by EDM and AECG, *J. Mater. Process. Tech.*, 2007. 190(1-3):pp. 173-180