

MODELAREA PROCESULUI ELECTROEROZIV ASISTAT DE ULTRASUNETE AL UNUI ALIAJ COCR

JIGANIE Mircea Constantin¹, LULEA Alexandra Vincentia¹,

Conducător științific: Prof.dr.ing. Daniel GHICULESCU

REZUMAT: Lucrarea tratează modelarea procesului de prelucrare prin electroeroziune asistată de ultrasunete (EDM+US) a unui aliaj CoCr. Au fost prezentate caracteristicile acestui material avansat și utilizările sale specifice. Au fost modelate cu metoda elementelor finite cele două componente ale EDM+US, termică și cavitațional ultrasonică. Rezultatele obținute au fost comparate cu date experimentale de referință obținute în laboratorul din facultatea IMST, validând modelul computerizat Aceasta a condus la creșterea performanțelor procesului EDM+US aplicat pe aliajul CoCr.

CUVINTE CHEIE: cobalt crom, electroeroziune, ultrasunete, modelare.

1 INTRODUCERE

Asistarea cu ultrasunete prin electroeroziune (Electrical Discharge Machining – EDM) asigură creșterea spectaculoasă a performanțelor tehnologice: productivitate, uzură volumetrică relativă și rugozitate. (Hitoshi, 2001).

Asistarea cu ultrasunete prin cavitația indusă în interstițiul de prelucrare ameliorează evacuarea materialului prelevat din piesă asigurând stabilitatea procesului și implicit creșterea performanțelor tehnologice (Ghiculescu, 2013).

Creșterea de productivitate se datorează în principal, reducerii duratei de viață a bulei de gaz care se formează în jurul canalului de plasmă a prelucrării ca urmare a cavitației induse ultrasonic (Van Dijk & Snoeys, 1975).

Aplicarea predominantă a aliajelor pe bază de metal, a devenit mai populară începând cu anii 1980, din cauza costurilor tot mai mare de metale nobile, mai ales după criza financiară globală din 2008. Aliajele Cobalt-Crom (Co-Cr) sunt printre cele mai cunoscute aliaje de metale comune în domeniul medicinei dentare și aplicații clinice. Aliaje Co-Cr pot fi descrise, în general ca aliaje care au rezistență ridicată, sunt rezistente la căldură și non-magnetice și au o rezistență favorabilă la uzură și coroziune. Proprietățile mecanice ale aliajelor CoCr, uzura extremă, rezistența la coroziune precum și compatibilitatea cu organismul sunt recomandate pentru uz medical, componentele unei matrițe și componente de motor (Jabbari, 2014).

2 STADIUL ACTUAL

La finisarea EDM, se produce fenomenul de instabilitate a prelucrării. Datorită interstițiului de lucru frontal foarte mic, $sF < 10 \mu m$, au loc multe fenomene de scurt-circuit, cauzând dificultăți la evacuarea particulelor prelevate prin EDM și reducând calitatea suprafeței prelucrate. Prin EDM+US, evacuarea particulelor devine mai ușoară.

Mecanismul de prelevare a materialului la EDM+US are două componente principale:

1. Fenomene termice (EDM): v. modelul Van Dick și Snoeys și efectul de polaritate.
2. Fenomene cavitaționale induse ultrasonic în interstițiul frontal de prelucrare.

Fenomenele termice din cadrul EDM au ca obiect probleme care implică combinații ale conducției, convecției și radiației; în ceea ce privește modelarea procesului de prelevare a materialului ne interesează cu precădere fenomenul de conducție (Van Dijk & Snoeys, 1975).

La prelucrarea EDM, prelevarea materialului are loc în urma topirii, vaporizării și fierberii metalului. Vaporii rezultați conduc la formarea bulelor de gaz în jurul canalului de plasmă. Bula de gaz se dezvoltă pe toată durata descărcării, asimilând și gazele rezultate din vaporizarea dielectricului cu precădere.

După încheierea descărcării EDM, masa de metal supraîncălzită cu 200...300 °C, fierbe ca urmare a scăderii bruște a presiunii în zona adiacentă spotului anodic, respectiv catodic.

Descărcările produse în condițiile unui mediu de lucru de omogenitate maximă datorită dizolvării bulelor de gaz aflate în interstițiu, determină densități mari de curent datorită

¹ Specializarea Nanotehnologii și Sisteme Neconventionale, Facultatea IMST;
E-mail: f4.mircea@yahoo.com;

dezvoltării mai dificile a secțiunii canalului de plasmă.

2.1 Moduri de aplicare a vibrațiilor ultrasonice la EDM

Cercetătorii au experimentat diferite moduri de utilizare a vibrațiilor ultrasonice în sistemul EDM, cum ar fi: vibrațiile aplicate piesei de prelucrat, vibrații aplicate electrodului masiv și a celui filiform și vibrații aplicate lichidului dielectric.

2.1.1 Vibrația cu ultrasunete aplicată piesei de prelucrat

Autorii din lucrarea 5 au proiectat și fabricat un dispozitiv de fixare ultrasonică cu traductor magnetostrictiv funcționând la o frecvență de rezonanță de 22 kHz cu 3 mm amplitudine.

Aceștia au observat că influența vibrațiilor ultrasonice îmbunătățește simțitor performanța EDM, datorită stabilității scânteilor (lipsei scânteilor anormale).

Autorii au raportat că influența vibrațiilor ultrasonice asupra vitezei de prelucrare a găurilor și a cavităților este remarcabilă în ceea ce privește performanța EDM, datorită stabilității îmbunătățite a descărcărilor din cauza forțelor de câmp ultrasonice (Murthi & Philip, 1987).

Autorii din lucrarea 5 au dezvoltat un sistem micro EDM cu ultrasunete, unde piesa de prelucrat a fost atașată direct la un traductor piezoelectric pentru a asigura vibrațiile, așa cum se arată în figura 1. (Gao & Liu, 2003).

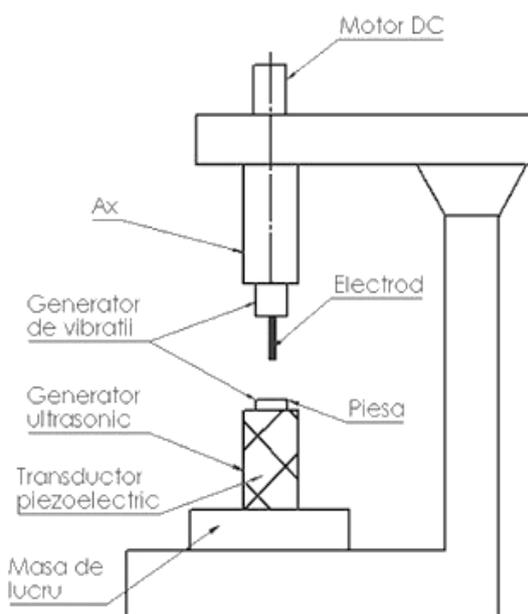


Fig. 1 Sistem micro EDM cu ultrasunete

În lucrarea 7 s-a experimentat utilizarea unui dispozitiv de acționare piezoelectric în prelucrarea cu descărcare electrică cu electrod filiform (WEDM) pentru metoda excizată a piesei prelucrate așa cum se arată în figura 2.

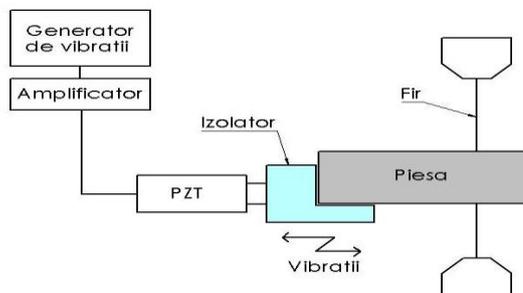


Fig. 2 Vibrația cu ultrasunete aplicată piesei de prelucrat

Rezultatele experimentale comparative au arătat că, atunci când vibrația este aplicată piesei de prelucrat, viteza de tăiere este de 1,5 ori mai mare decât atunci când vibrația este aplicată pe fir și de 2,5 ori mai mare decât în WEDM convențional.

O suprafață mai mare a piesei este implicată în circulația dielectricului și spală materialul topit în cazul vibrației piesei, rezultând o eficiență mai mare decât în vibrația firului. (Hoang & Yang, 2013).

2.1.2 Vibrația cu ultrasunete aplicată pe electrodul masiv și filiform

Autorii lucrării 8 au folosit un sistem de vibrații pentru investigare, așa cum se arată în figura 3, unde unul dintre capete a fost conectat direct la capul EDM și celălalt capăt la electrod. S-a observat că instrumentul vibrator are ca rezultat o performanță îmbunătățită a procesului în comparație cu EDM cu electrozi care nu vibrează (Kremer s.a, 1989).

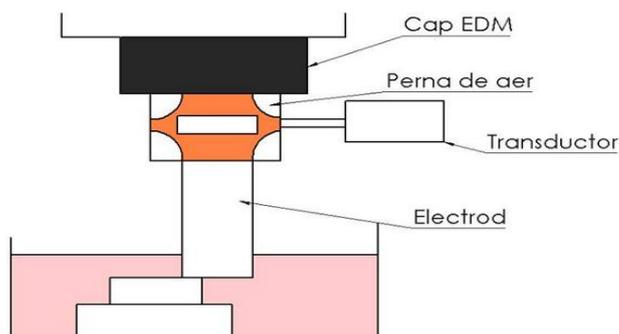


Fig. 3 Sistem de vibrații pentru investigare

Autorul lucrării 9 a raportat despre suprapunerea vibrațiilor cu ultrasunete în electrodul filiform (Kavtaradze s.a, 1989).

Lipchanskii a investigat experimental WEDM cu ultrasunete cu vibrații și a constatat o îmbunătățire a performanței (Lipchanskii, 1991).

În lucrarea 11 s-a dezvoltat un dispozitiv constând dintr-un traductor, un suport pentru electrodul filiform și un generator ultrasonic montat pe un WEDM așa cum se arată în figura 4 pentru a studia vibrația firului.

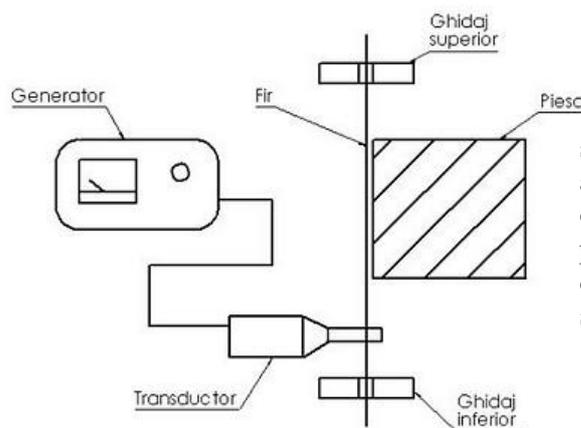


Fig. 4 Dispozitiv

Firul a fost vibrat la o amplitudine de 12 μm , la o frecvență de 35 kHz pentru a investiga mecanismul de prelucrare al WEDM asistat de vibrațiile ultrasonice ale electrodului filiform.

S-a observat că vibrațiile cu ultrasunete măresc eficiența tăierii WEDM cu 30% și reduc în mod remarcabil rugozitatea suprafeței prelucrate (Guo s.a , 1997).

Yu a prezentat o nouă metodă de a combina vibrațiile ultrasonice cu mișcarea planteră a unui electrodul pentru a executa microgăuri cu un raport de aspect mare folosind microeroziunea pentru a îmbunătăți rata de îndepărtare a materialului (Yu s.a ,2009).

2.1.3 Vibrația cu ultrasunete furnizată lichidului dielectric

Prihandana a introdus conceptul de aplicare a vibrațiilor cu ultrasunete asupra fluidului dielectric pentru procesele micro-EDM , așa cum se arată în figura 5, în care vibrația cu ultrasunete cu frecvența de 43 kHz a fost utilizată pentru a crește energia cinetică a resturilor de descărcare în baia activată cu ultrasunete.

Rezultatele au arătat o creștere semnificativă a ratei de îndepărtare a materialului și îmbunătățirea calității suprafeței (Prihandana s.a, 2009).

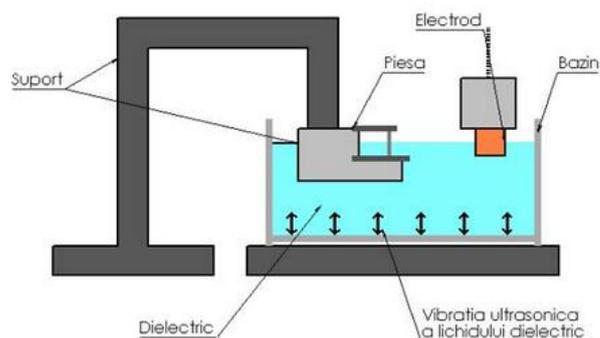


Fig.5 Aplicare a vibrațiilor cu ultrasunete asupra fluidului dielectric pentru procesele micro-EDM

Schubert a raportat despre scufundarea sonotrodei vibratoare în dielectric și a aranjat-o astfel încât intensitatea ridicată în apropierea câmpului ultrasonic să fie aliniată la zona de prelucrare așa cum se arată în figura 6, care în cele din urmă mărește procesul de viteză. (Schubert s.a, 2013)



Fig 6. Scufundarea sonotrodei vibratoare în dielectric

Ghiculescu a realizat vibrația ultrasonică a lichidului dielectric într-o pâlnie aflată în proximitatea zonei de lucru la WEDM care a crescut productivitatea prin efectul de cavitație produs prin oscilații longitudinale ale unui lanț acustic imersat în lichid dielectric. Lichidul dielectric ținut în bazin își menține poziția relativă constantă între piesă și electrodul fără să scadă precizia.(Ghiculescu s.a, 2011)

Autorii din lucrarea 15 au investigat experimental efectul aplicării vibrațiilor cu ultrasunete asupra fluidului de prelucrare în micro EDM. S-a raportat că o creștere semnificativă a vitezei de prelucrare care a fost realizată prin aplicarea vibrațiilor cu ultrasunete.(Ichikawa & Natsu, 2013), (Bharat & Pravin & Janak, 2015)

3 DATE EXPERIMENTALE

A fost creată o instalație experimentală pentru studierea preliminară a procesului micro-EDM + US pe aliaj CoCr, prezentată în fig. 7. Aceasta cuprinde în principiu un lanț ultrasonic, care integrează electrodul la capătul său, conectat la un generator ultrasonic de 20 kHz, producând o amplitudine a sculei de aproximativ 2 μm în timpul procesului EDM. Probe de dimensiunea 30 x 50mm din aliajul CoCr au fost prelucrate comparativ cu vibrații ultrasonice a electrodului (EDM+US) și fără vibrații ultrasonice a electrodului (EDM classic) pe mașina românească EDM ELER 01 aparținând laboratorului de electroeroziune al facultății IMST.

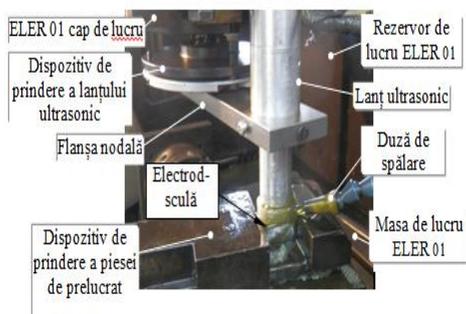


Fig. 7. Elemente ale sistemului tehnologic pentru eșantioanele de aliaje CoCr EDM+US

Atât impulsurile comandate cât și cele de relaxare au fost generate de un generator pentru finisare și pentru micro prelucrare. Parametrii de lucru pentru impulsurile comandate au fost: treapta de curent, $I = 1.5 \text{ A}$, pozitiv (electrod); timp de impuls $t_i = 48 \mu\text{s}$, timp de pauză, $t_0 = 24 \mu\text{s}$; $t_i = 8 \mu\text{s}$, $t_0 = 8 \mu\text{s}$. La impulsuri de relaxare, parametrii de lucru specifici au fost: polaritate negativă, treapta de capacitate, $C = 10 \text{ nF}$, treaptă de rezistență, $R = 0,74 \text{ k}\Omega$ (pentru reglarea curentului de alimentare). Pentru spălare, cea laterală a fost aleasă cu presiunea de $p_{hl} = 0.04 \text{ MPa}$. Valorile pentru puterile consummate în lanțul ultrasonic au fost: 90 și 120 W.

Variația presiunii hidraulice totale (P_{ht}) se calculează cu următoarea relație și este prezentată în fig. 8:

$$P_{ht} = 2\pi c \rho f_{US} z + p_{hl} \text{ [Pa]} \quad (1)$$

unde f_{US} – frecvența ultrasonică [Hz]; z – elongație; $z = A \sin \omega t$; $\omega = 2\pi f_{US} \text{ [s}^{-1}\text{]}$; A – amplitudine [m]; c -este viteza sunetului în lichidul dielectric [m/s]; ρ - densitatea lichidului dielectric, $\rho = 840 \text{ [kg/m}^3\text{]}$; $c = (K/\rho)^{1/2} = 1267.7 \text{ m/s}$; $K = 1.35 \times 10^9 \text{ Pa}$ (K –modulul de elasticitate în masă);

p_{hl} – presiune hidraulică locală [Pa], $p_{hl} = 0.04 \text{ MPa}$. La fiecare final al perioadei ultrasonice T_{US} , are loc faza microjeturilor cumulative (CMS), atunci când presiunea crește în interstițiu și se produce implozia colectivă a bulelor de gaz din interstițiu. Aceasta generează o presiune de ordinul a 100 MPa, orientată de-a lungul spațiului frontal în acest caz - fig. 8.

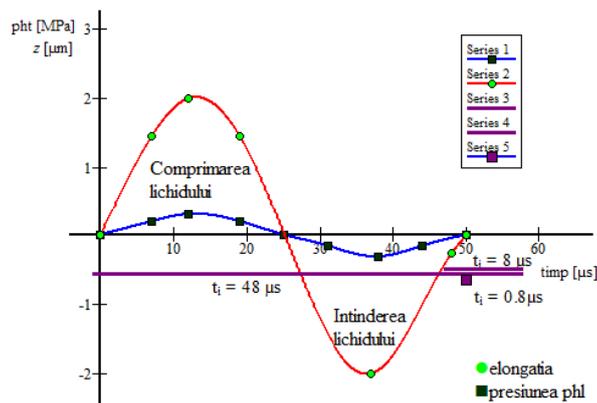


Fig 8 – Variația alungirii sculei și a presiunii totale în spațiul din T_{US} în timpul testelor EDM + US.

În timpul T_{US} , sunt generate implusuri comandate sau de relaxare. La suprapunerea impulsurilor în timpul CMS, a fost observat experimental că descărcarea electrică a fost oprită datorită presiunii înalte generată de implozia colectivă a bulelor de gaz. Apoi, lichidul dielectric poate pătrunde la materialul topit prin descărcare și, prin urmare, volumul crescut de material este îndepărtat.

Imaginile microtopografiilor au fost furnizate de microscopul electronic (SEM) QUANTA INSPECT F50 cu emisie de câmp și rezoluție de 1 nm .



Fig. 9 Sistemul de microscopie cu scanare electronica (SEM)

Profilurile corespunzătoare ale dimensiunilor medii ale craterelor, cu adâncimea dată de testerul de rugozitate SJ411, sunt prezentate în fig. 10 – 15.

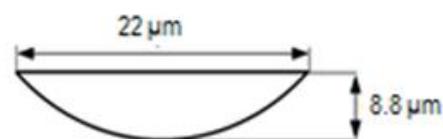
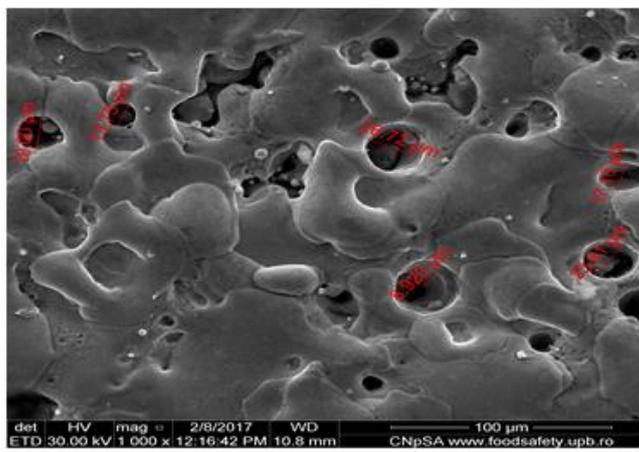


Fig 10.a) Microgeometria suprafeței la EDM cu impulsuri comandate, $I = 1,5 \text{ A}$ $t_i = 48 \mu\text{s}$, $t_0 = 24 \mu\text{s}$;
b) Dimensiunea medie a craterelor

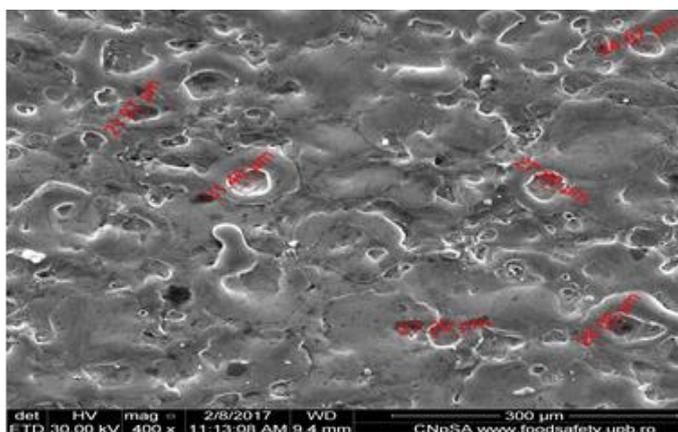


Fig 11.a) Microgeometria suprafeței la μEDM + US cu impulsuri comandate, $P_{cUS} = 120 \text{ W}$, $I = 1,5 \text{ A}$ $t_i = 48 \mu\text{s}$, $t_0 = 24 \mu\text{s}$;
b) Dimensiunea medie a craterelor

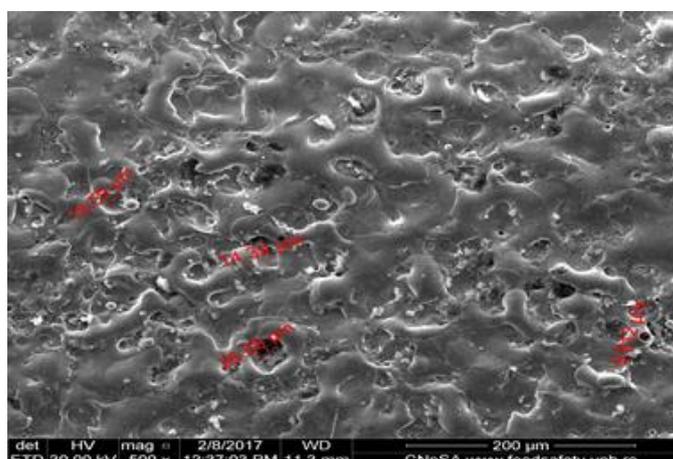


Fig 12.a) Microgeometria suprafeței la μEDM cu impulsuri comandate, $I = 1,5 \text{ A}$ $t_i = 8 \mu\text{s}$, $t_0 = 8 \mu\text{s}$;
b) Dimensiunea medie a craterelor

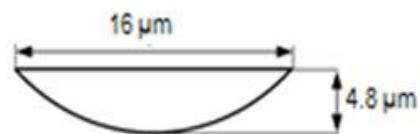
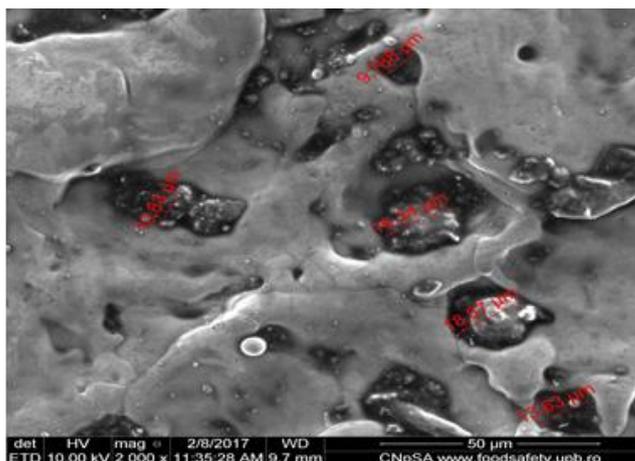


Fig 13.a) Microgeometria suprafeței la μ EDM + US cu impulsuri comandate, $P_{cUS} = 90$ W, $I = 1,5$ A $t_i = 8$ μ s, $t_0 = 8$ μ s; b) Dimensiunea medie a craterelor

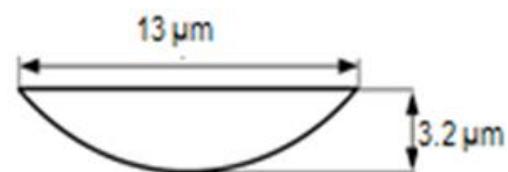
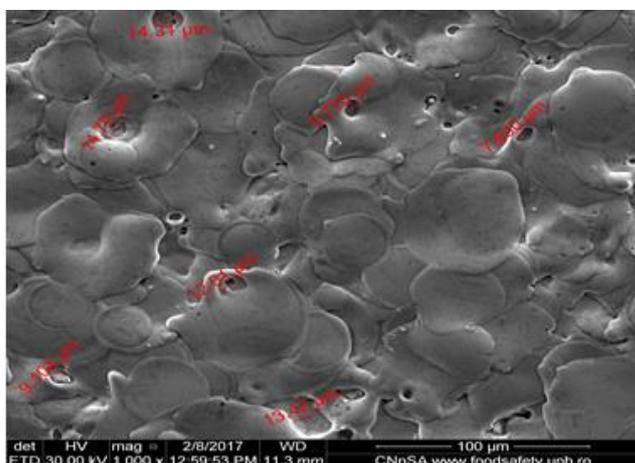


Fig 14.a) Microgeometria suprafeței la EDM cu impulsuri de relaxare, $I = 1,5$ A $t_i = 48$ μ s, $t_0 = 24$ μ s; b) Dimensiunea medie a craterelor

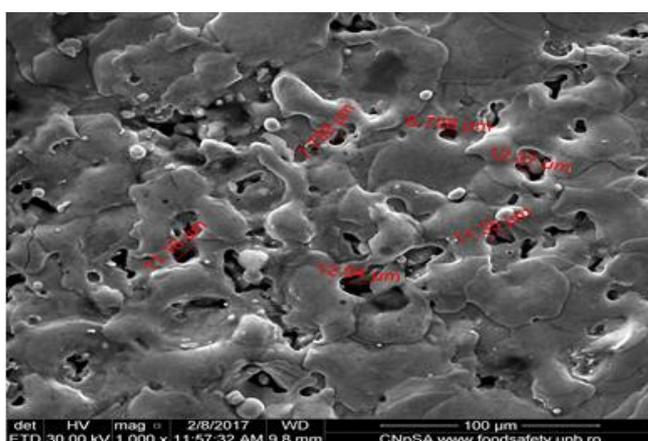


Fig 15.a) Microgeometria suprafeței la EDM cu impulsuri de relaxare, $I = 1,5$ A $t_i = 48$ μ s, $t_0 = 24$ μ s; b) Dimensiunea medie a craterelor

La puteri mari de acționare a lanțului ultrasonic pe $US=120\text{ V}$ se produce o prelevare suplimentară de material a craterului principal, crescând productivitatea dar crescând și rugozitatea suprafeței prelucrate (Fig. 15).

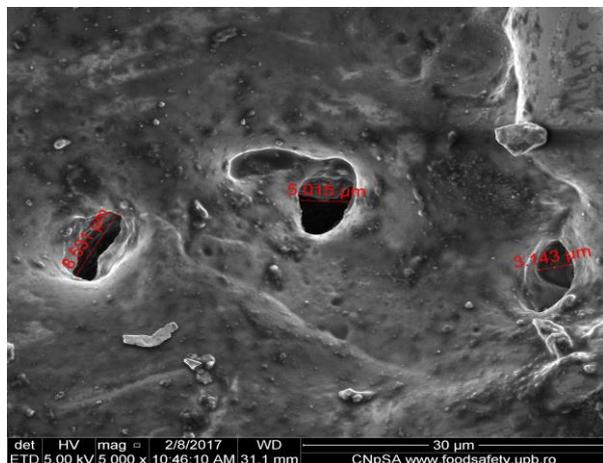


Fig. 15. Prelevare suplimentară de material la baza craterelor prin asistare cu US

4 MODELAREA CU ELEMENTE FINITE A PROCESULUI MICRO-EDM + US

Procesul de îndepărtare a materialului $\mu\text{EDM} + \text{US}$ pe aliajele CoCr a fost modelat prin metoda cu elemente finite folosind module Comsol Multiphysics, module dependente de timp ale transferului de căldură și ale mecanicii structurale în solid, corespunzătoare EDM și componentelor cu ultrasunete. Au fost create modele parametrizate pentru fiecare regim de prelucrare, conform exemplului din figura 16.

Name	Expression	Value	Description
lp	10[mm]	0.01 m	lungimea piesei
hp	1[mm]	0.001 m	inaltimea piesei
acr	11e-6	1.1E-5	raza craterului initial
bcr	4*2.2e-6	8.8E-6	adancimea craterului initial
rms	0.1e-6	1.0E-7	raza materialului solidificat
rgb	0.1[mm]	1.0E-4 m	raza bulei de gaz
ti	48e-6	4.8E-5	durata descarcarii
modulE	220[GPa]	2.2E11 Pa	modulul lui Young
PR	0.29	0.29	coeficientul lui Poisson
pus	110[MPa]	1.1E8 Pa	presiunea ultrasonica
tb	0.8e-6	8.0E-7	implozia bulei de gaz
Hc	370	370	capacitate calorica
Tc	390	390	conductivitate termica

Fig. 16. Exemplu de parametri desemnați pentru procesul de îndepărtare a materialului $\mu\text{EDM} + \text{US}$ pe aliajul CoCr

Modelul de supraîncălzire al lui Van Dijk și Snoeys a fost luat în considerare pentru modelarea componentelor EDM. În acest caz,

fierberea este principalul mijloc de a elimina materialul supraîncălzit după terminarea pulsului când presiunea scade brusc. Balonul de gaz format în jurul canalului de plasmă durează foarte mult după sfârșitul pulsului, astfel că materialul topit prin descărcare este deja solidificat (Qinjian s.a, 2013).

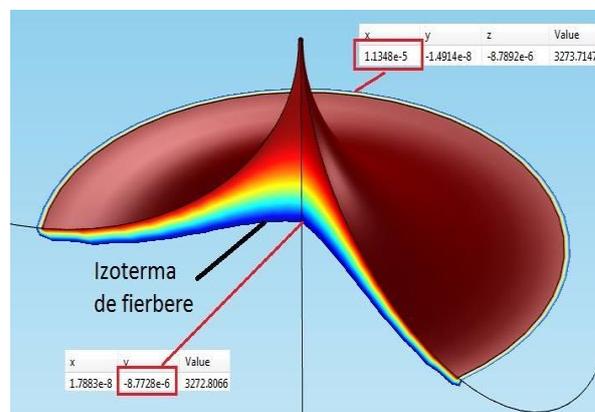


Fig.17 Materialul eliminat (distribuția temperaturii) μEDM după $t_i = 48\ \mu\text{s}$

Temperatura constantă 3473 K pe spotul EDM, izolarea termică pe suprafața acoperită de bule de gaz și răcirea prin convecție pe periferia piesei de prelucrat în contact cu lichidul dielectric cu 313 K au fost configurate ca și condiții limită. Distribuția temperaturii obținută în jurul spotului EDM cu $t_i = 48\ \mu\text{s}$ și $t_0 = 24\ \mu\text{s}$ este prezentată în fig. 10, indicând o valoare apropiată de cele experimentale (a se vedea figura 9.b), validarea modelului.

La asistarea ultrasonică, datorită duratei mai mari de impuls $t_i = 48\ \mu\text{s}$, comparabil cu T_{us} , este foarte probabil să se suprapună în CMS. Deci, topirea devine mecanismul principal de îndepărtare a materialului deoarece bula de gaz din jurul canalului de plasmă se sparge la CMS, iar lichidul dielectric ajunge la materialul topit. Distribuția temperaturii obținută în acest caz este prezentată în fig. 17.

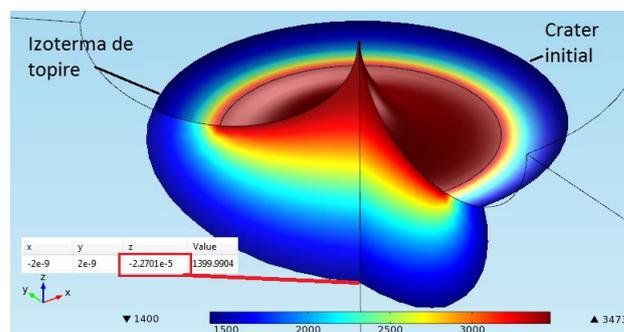


Fig 17 a) Eliminarea izotermică [K] prin topire după $t_i = 10\ \mu\text{s}$ de la pornirea pulsului, la CMS;

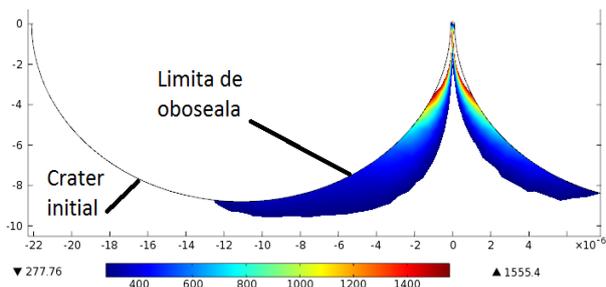


Fig 17 b) Distribuția eforturilor unitare (Von Mises) la o undă de șoc de presiune ultrasonică de 150 MPa

În timpul prelevării EDM, se produce un alt mecanism datorită cavității cu ultrasunete. Marginile craterelor sunt îndepărtate prin rupere de către undele de șoc orientate paralel cu suprafața prelucrată. Pentru a sublinia volumul de material îndepărtat prin efectul mecanic hidraulic al cavității cu ultrasunete, a fost calculată limita de oboseală la ruperea impulsului (τ_0) (3T RPD Ltd. UK, 2012):

$$\tau_0 = 1.12(40 + 0.16 \sigma_r) \text{ [MPa]} \quad (2)$$

unde σ_r este rezistența la tracțiune; în acest caz $\sigma_r = 1300$ MPa, și parametrul de interes este $\tau_0 = 277.76$ MPa. În fig. 11.b, se poate observa o îndepărtare masivă de la fundul craterului, care determină creșterea rugozității, adică adâncimea craterului. Acest lucru este confirmat de datele experimentale (a se vedea figura 11.b), explicate prin puterea relativ mare, $P_{cUS} = 120$ W utilizate pe lanțul ultrasonic. Ambele mecanisme de prelevare creează cratere cu dimensiuni mai mare în comparație cu micro-EDM pură (fara US), accentuat experimental în figura 10.

La $\mu\text{EDM} + \text{US}$ cu $t_i = 8 \mu\text{s}$, $t_0 = 8 \mu\text{s}$, probabilitatea de suprapunere a timpului de impuls la CMS scade foarte mult sub 20% [14]. Deci, îndepărtarea termică clasică ca în mediul clasic μEDM apare în mod dominant, iar distribuția temperaturii după terminarea pulsului este prezentată în fig. 18:

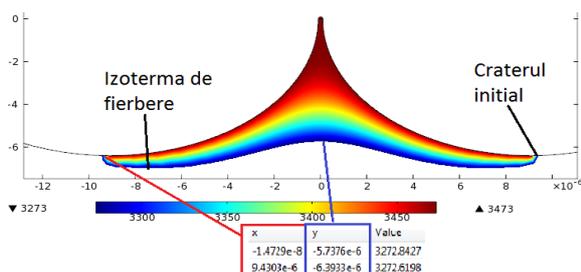


Fig 18 a) Izoterma de fierbere

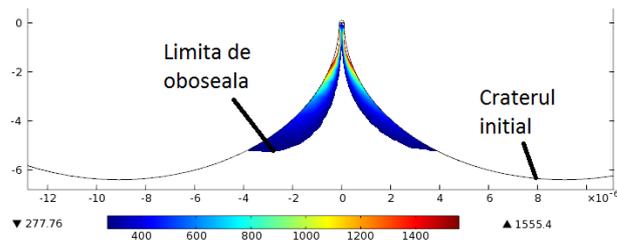


Fig 18 b) Distribuția eforturilor unitare (Von Mises) la cicluri de impulsuri la o undă de șoc de presiune ultrasonică de 110 MPa

Poziția izotermală de fierbere este în concordanță cu datele experimentale din fig 5, validând modelul. Peste mecanismul de prelevare termic este suprapusă prelevarea ultrasonică datorată șocului produs de CMS. În figura 18, b, este prezentată distribuția eforturilor unitare (Von Mises), mai mare decât rezistența la rupere, arătând volumul de material îndepărtat. La o putere mai mică, $P_{cUS} = 90$ se evidențiază scăderea adâncimii craterelor, implicit rugozitatea suprafeței prelucrate, fenomen confirmat de datele experimentale (Fig. 11.b).

La $\mu\text{EDM} + \text{US}$ cu impulsuri de relaxare, natura mecanismului de prelevare este similar cu cel anterior. Durata foarte scurtă de descărcare a impulsurilor de relaxare oferă o probabilitate foarte scăzută de a se suprapune pe CMS. Deci, îndepărtarea termică clasică este dominantă, așa cum se prezintă în fig. 19.a, asociat cu ruperea ultrasonică a marginilor craterelor, producând diminuarea dimensiunilor craterelor, confirmată experimental prin datele din fig. 8.

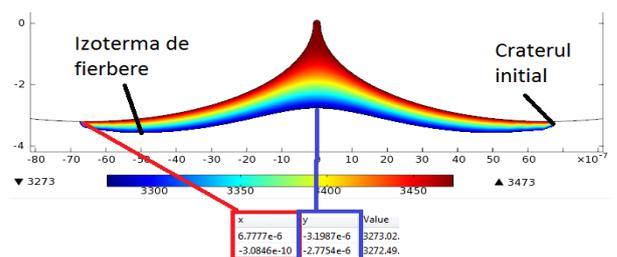


Fig 19. a) Izoterma de fierbere după sfârșitul impulsului

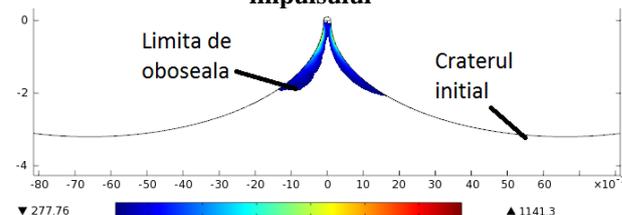


Fig. 19 b) Distribuția eforturilor unitare (Von Mises) la cicluri de impulsuri la o undă de șoc de presiune ultrasonică de 110 MPa

5 CONCLUZII

Studiul FEM al μ EDM + US asupra aliajului CoCr a subliniat existența a două tipuri de mecanisme de îndepărtare a materialelor, confirmate de datele experimentale. La un timp mai lung de impulsuri, comparabil cu perioada ultrasonică, mecanismul termic al îndepărtării este dominant, iar poziția izotermei de topire arată o creștere spectaculoasă a ratei de prelucrare. La un timp de impulsuri mai scurt, în special la utilizarea impulsurilor de relaxare, eliminarea hidraulică cu ultrasunete devine dominantă prin prelevarea marginilor craterelor. Așadar, găsirea unei valori optime a puterii consumate pe lanțul ultrasonic este de cea mai mare importanță pentru a reduce rugozitatea suprafeței în comparație cu μ EDM pur.

6 MULȚUMIRI

Mulțumim doamnei Roxana Trușcă pentru imaginile SEM ale probelor, infrastructură achiziționată din proiectul **POSCCE-A2-O2.2.1-2013-1**.

7 BIBLIOGRAFIE

[1]. Hitoshi, O. et al., (2001), Study of Micro Machining of Metals by EDM with High Frequency Vibration, Takushima Prefectural Industrial Technology Center.

[2]. Ghiculescu, D., Marinescu, N., Nanu, S., Ghiculescu, Daniela, (2013), Some aspects of finite element modelling of micro-EDM and ultrasonic EDM with time dependent radius of plasma channel, *Nonconventional Technologies Review*, p. 30-35.

[3]. Van Dijck, F., Snoeys, R., (1975), Theoretical and Experimental Study of the Main Parameters Governing the Electrodischarge Machining Process, *Mecanica*, Vol. 301-302, p. 9-16.

[4]. Y. S. Al Jabbari, J. *Adv. Prosthodont.* 6, 138-145 (2014)

[5]. Murthi VSR and Philip PK. A comparative analysis of machining characteristics in ultrasonic assisted EDM by the response surface methodology. *Int J Prod Res* 1987;25(2): 259–272.

[6]. Gao C and Liu Z. A study of ultrasonically aided microelectrical-discharge machining by the application of workpiece vibration. *J Mater Process Tech* 2003; 139:226–228.

[7] Hoang KT and Yang SH. A study on the effect of different vibration-assisted methods in micro-WEDM. *J Mater Process Tech* 2013; 213: 1616–1622.

[8] Kremer D, Lebrun JL, Hosari B, et al. Effects of ultrasonic vibrations on the performances in EDM. *CIRP Ann: Manuf Techn* 1989; 38(1): 199–202

[9] Kavtaradze ON, Lipchanskii AB and Nechaev GG. Vibration of wire electrode during electroerosion machining with the superposition of ultrasonic vibrations. *Sov Surf Eng Appl Electrochem* 1989; 4: 13–17.

[10] Lipchanskii AB. Experimental investigation of wire electrical discharge machining assisted with ultrasonic vibration. *Sov Surf Eng Appl Electrochem* 1991; 1: 5–9.

[11] Guo ZN, Lee TC, Yue TM, et al. A study of ultrasonic aided wire electrical discharge machining. *J Mater Process Tech* 1997; 63: 823–828.

[12] Yu ZY, Zhang Y, Li J, et al. High aspect ratio microhole drilling aided with ultrasonic vibration and planetary movement of electrode by micro-EDM. *CIRP Ann: Manuf Techn* 2009; 58: 213–216

[13] Prihandana GS, Mahardika M, Hamdi M, et al. Effect of micro-powder suspension and ultrasonic vibration of dielectric fluid in micro-EDM processes – Taguchi approach. *Int J Mach Tool Manu* 2009; 49(12–13): 1035–1041.

[14] Schubert A, Zeidler H, Hackert-Oschätzchen M, et al. Enhancing micro-EDM using ultrasonic vibration and approaches for machining of non-conducting ceramics. *J Mech Eng* 2013; 59(3): 156–164.

[15] Ghiculescu D, Marinescu NI and Nanu S. Equipment for ultrasonic aiding of wire electrodischarge machining. *Acad J Manuf Eng* 2011; 9(2): 18–23.

[16] Ichikawa T and Natsu W. Realization of micro-EDM under ultra-small discharge energy by applying ultrasonic vibration to machining fluid. *Procedia CIRP* 2013; 6: 326–331.

[17] Bharat C Khatri, Pravin Rathod and Janak B Valaki (2015) “Ultrasonic vibration-assisted electric discharge machining: A research review”, Institution of Mechanical Engineers

[18] Z. Qinjian, Z. Luming, L. Jianyong, et al., *Procedia CIRP*, 6, 589–593, (2013)

[19] Cobalt Chrome Alloy Co28Cr6Mo, Material specifications, 3T RPD Ltd. UK (2012) disponibil la: <https://www.3trpd.co.uk/wp-content/uploads/2015/05/Cobalt-Chrome-Alloy-Co28Cr6Mo.pdf> Accesat la data:20.02.2017