

MODELAREA ȘI EXPERIMENTAREA MICRO-EDM ASISTATĂ DE ULTRASUNETE PE NANOTUBURI TiO₂ CU SUBSTRAT DE Ti

LACZI¹ Nicolae¹, ROBU² Claudiu-Ștefan² și SILAGHI³ Claudiu-Mihai³

¹Facultatea: IMST, Specializarea: TCM, Anul de studii: IV, e-mail: r.claudiusstefan@gmail.com

Conducător științific: Prof.dr.ing **Daniel GHICULESCU**

REZUMAT: Lucrarea tratează modelarea cu metoda elementelor finite, utilizând software-ul specializat Comsol Multiphysics a procesului de prelucrare a materialului avansat cu strat superficial de nanotuburi de TiO₂ pe substrat de Ti prin procedeul hibrid neconvențional de micro-electroeroziune asistat de ultrasunete μ EDM+US. Sunt prezentate aspecte ale stadiului actual privind dezvoltarea și direcțiile de cercetare ale μ EDM+US. De asemenea sunt evidențiate multiplele aplicații ale acestui material avansat, în cele mai diverse domenii, cum sunt: energetic, medicină, chimie, alimentar etc. precum și structura și posibilitățile de obținere. Caracteristicile ridicate de rezistență ridică probleme de prelucrabilitate prin procedee convenționale. De aceea, s-a apelat la procedeul hibrid μ EDM+US. Modelarea în Comsol Multiphysics s-a realizat cu ajutorul a două module, ambele dependente de timp: termic, care s-a concentrat pe fenomenele termice specifice electroeroziunii și cel mecanic pentru efectul fenomenelor cavitaționale induse ultrasonic în interstițiul de prelucrare. Rezultatele obținute din modelarea computerizată a procesului μ EDM+US privind volumul de material prelevat au fost validate cu ajutorul imaginilor suprafețelor prelucrate de la microscopul cu scanare electronica și măsurătorile de rugozitate legate de dimensiunilor medii ale craterelor rezultate pe suprafața prelucrată la diverse regimuri de prelucrare. Acestea au arătat că μ EDM+US are capacitate ridicată să pătrundă prin stratul superficial de nanotuburi, spre deosebire de micro-electroeroziunea simplă care prezintă dificultăți de prelucrarea a acestui strat superficial. Microprelucrările acestui material avansat lărgesc aria de aplicabilitate ale materialului.

CUVINTE CHEIE: nanotuburi, TiO₂, micro-electroeroziune, ultrasunete.

1. Introducere

Micro-electroeroziunea este un proces asemănător cu electroeroziunea convențională. Potrivit lui Katz și Tibbles, în articolul *Analysis of micro-scale EDM process*, prelucrarea prin electroeroziune este un procedeu termic care utilizează descărcări electrice pentru a eroda materiale conductive din punct de vedere electric [1]. Diferența dintre cele două este aceea că la micro-EDM se folosește un electrod de dimensiuni mai mici și MRR este în domeniul micro-scalei.

Introducerea vibrațiilor la procesul EDM a fost studiat pe scară largă. Kremer a demonstrat că o vibrație a electrodului accelerează circulația particulele prelevate, oferind timpi de prelucrare mai mici (de până la 5 ori mai puțin pentru operațiile de finisare) [2]. Abdullah a concluzionat că folosirea vibrațiilor US în electrod a crescut MRR la prelucrarea carburii de wolfram (WC-Co) și a observat că uzura a fost redusă iar stabilitatea procesului a fost îmbunătățită [3]. Srivastava a combinat vibrațiile US și EDM cu electrod răcit criogenic (-150°C) și a observat că implementarea vibrațiilor US a contribuit la îmbunătățirea MRR și menținerea TWR și calitatea suprafeței [4,5]. Iwai a testat trei tipuri de moduri de vibrație cu ultrasunete și a obținut o îmbunătățire a MRR la prelucrarea diamantului compozit policristalin [6]. Shervani-Tabar a elaborat studii numerice pentru a analiza efectul decalajului și presiunea dinamică asupra bulelor mici produse în fluidul dielectric dintre sculă și piesa de prelucrat în EDM asistată de US [7,8]. Shabgard a redus impulsurile în timpul descărcării și a îmbunătățit stabilitatea procesului prin aplicarea vibrațiilor US în piesa de prelucra. În plus, a fost observat un nivel ridicat de MRR în regimul de finisare [9]. Ichikawa a investigat efectele vibrațiilor US aplicate asupra fluidului dielectric la prelucrarea găurilor și a demonstrat că timpul de prelucrare a fost cu mult redus [10]. Liew a realizat o îmbunătățire semnificativă a performanței micro-EDM în ceea ce privește MRR, adâncimea

maximă de prelucrare, calitatea suprafeței, geometria găurilor și stabilitatea procesului prin transmiterea vibrațiilor US către fluidul dielectric folosind un lanț ultrasonic auxiliar [11].

În prezent, grafitul și cuprul sunt cele mai comune materiale de electrozi în procesul EDM. Diferența de viteză a sunetului dintre grafit și aliaj de titan face ca materialul de grafit să fie incompatibil cu vibrațiile US, iar datorită structurii poroase a grafitului rezistența acestuia la vibrațiile US este scăzută ceea ce duce la uzură ridicată. Astfel, pentru a obține avantajele aplicării vibrațiilor US în procesul EDM, mulți cercetători au introdus vibrațiile US fie în piesa de prelucrat, fie în lichidul dielectric [12].

2. Stadiul actual

În domeniul prelucrărilor neconvenționale (EDM), utilizarea ultrasunetelor a avut o creștere continuă de la apariția lor, la mijlocul anilor 1980, până în prezent. Deși domeniul a evoluat, s-au înregistrat unele lacune în ceea ce privește prelucrarea cu ultrasunete, cum ar fi: EDM cu cinematică complexă, modelarea dinamică a fluidelor computerizate a formării canalului de plasmă și a spargerii pentru EDM cu ultrasunete [13].

Cercetătorii au experimentat diferite moduri de utilizare a vibrațiilor cu ultrasunete în sistemul EDM, cum ar fi vibrațiile aplicate piesei de prelucrat, sculei și fluidului dielectric. Gao și Liu au dezvoltat un sistem micro-EDM cu ultrasunete, unde piesa de lucru a fost atașată direct la un traductor piezoelectric pentru a asigura vibrațiile, așa cum se arată în Fig. 1. a. Rezultatele obținute arată că micro-EDM cu ultrasunete oferă o eficiență de opt ori mai mare comparativ cu microundele EDM convenționale [14]. Hoang și Yang au experimentat utilizarea unui dispozitiv de acționare piezoelectric în prelucrarea cu descărcare electrică cu micro-sârme (WEDM), așa cum se arată în Fig. 1. b. [15]. Rezultatele experimentale comparative au arătat că, atunci când vibrațiile sunt aplicate pe piesa 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 [13].

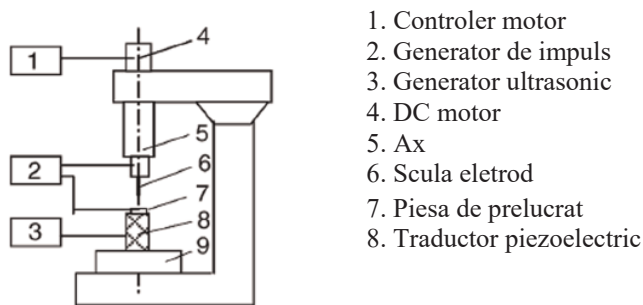


Fig. 1. a. Micro-EDM asistată ultrasonic [13]

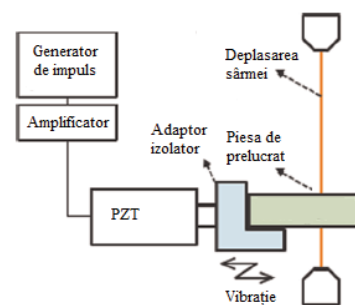


Fig. 1. b. Micro-WEDM asistată ultrasonic [13]

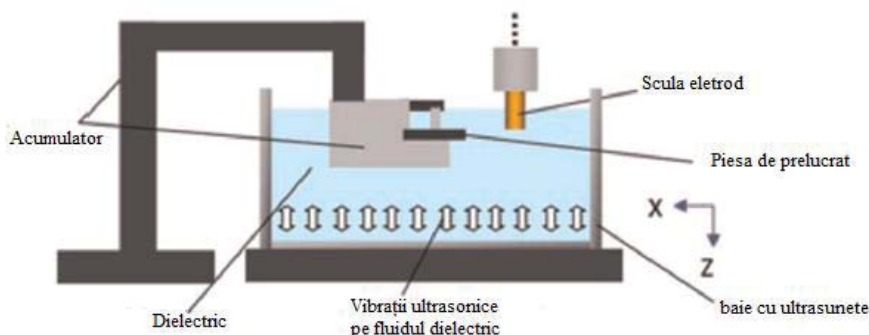


Fig. 2. a. Baie cu ultrasunete în micro-EDM [13]



Fig. 2. b. Sonotrode ultrasonice în micro-EDM [13]

Prihandana a introdus conceptul de aplicare a vibrațiilor cu ultrasunete pentru fluidul dielectric pentru procesele micro-EDM, așa cum se arată în Fig. 2. a, în care vibrația ultrasonică cu frecvența de 43 kHz a fost utilizată pentru a mări energia cinetică a resturilor de descărcare în baia activată ultrasonic.

Rezultatele au indicat o creștere semnificativă a MRR și îmbunătățirea calității suprafeței [16]. 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 Fig. 2. b, care în cele din urmă mărește viteza procesului [17].

Dioxidul de titan este unul dintre cei mai studiați oxizi metalici, având o varietate foarte largă de aplicații (construcții, alimentație, produse cosmetice, panouri solare, medicamente, materiale plastice, catalizatori și fotocatalizatori pentru depoluarea aerului și apei, etc. [18]), datorită proprietăților sale deosebite: stabilitate chimică, rezistență la coroziune/fotocoroziune, potențial fotocatalitic; constantă dielectrică mare ($\epsilon_r \approx 10-85$), conductivitate electrică ridicată, fiind un semiconductor de tip n; sensibilitate pentru domeniul UV, indice de refracție foarte ridicat (2,6-2,9), iar din punct de vedere economic are un preț scăzut al materiei prime din care se obține, ilmenit ($FeTiO_3$) sau TiO_2 rutil [19]. Caracteristicile de rezistență ridicată ale acestui material nanostructurat (duritate până la 10290 MPa, rezistența la compresiune maximă de 3600 MPa, iar modulul de elasticitate maxim 288 GPa) [20]

Nanotuburile pe bază de TiO_2 au atras interesul și cercetările intensive datorită meritelor de a avea o suprafață specifică superioară, capacitate de schimbare ionică și capacitate fotocatalitică. În ultimele decenii, materialele nanostructurate derivate din TiO_2 au fost investigate pe scară largă pentru multe aplicații promițătoare, cum ar fi celule solare, baterii, acoperiri autocurățare și fotocataliză [21]. În Fig. 3 se prezintă trei moduri de obținere a nanotuburilor și o vedere generală a morfologiilor tipice și a caracteristicilor distinctive ale acestora [22].

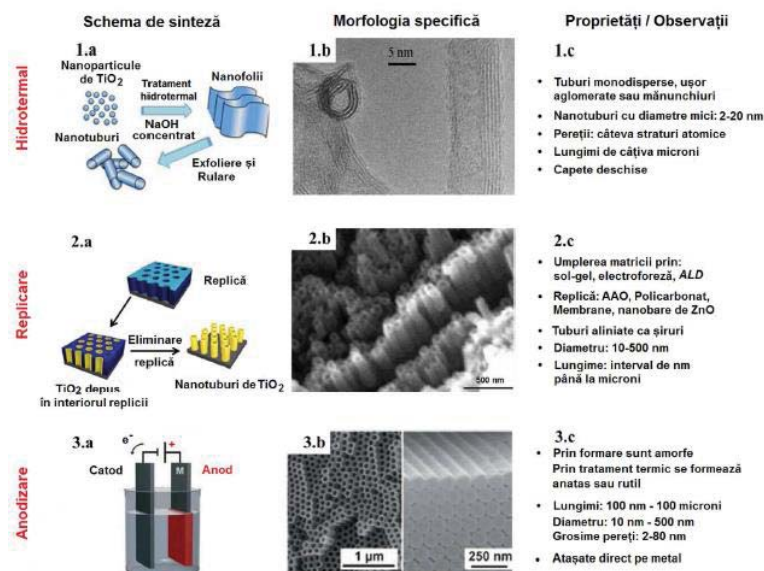


Fig. 3. Formarea nanotuburilor TiO_2 [22]

3. Partea experimentală

Pentru a studia procesul μEDM și $\mu EDM + US$, experimentele s-au realizat pe mașina ELER 01 cu dispozitivul prezentat în Fig. 4, din laboratorul de electroeroziune al facultății IMST cu regimurile din Tabelul. 1.

Tabelul. 1. Regimuri

Nr. Crt.	Regimuri de prelucrare
1	I=3 A; polaritate sculă (+); spălare laterală cu presiune, $p_{hl}=0,04$ MPa; timp de impuls $t_i=48$ μs ; timp de pauză, $t_0=24$ μs ; puterea consumată $P_{cUS}=90$ W
2	I=3 A; polaritate sculă (+); spălare laterală cu presiune, $p_{hl}=0,04$ MPa; timp de impuls $t_i=95$ μs ; timp de pauză, $t_0=24$ μs ; puterea consumată $P_{cUS}=90$ W
3	C=10 nF; polaritate sculă (-); rezistența $R=0,74$ k Ω ; timp de impuls $t_i=0,8$ μs ; puterea consumată $P_{cUS}=70$ W

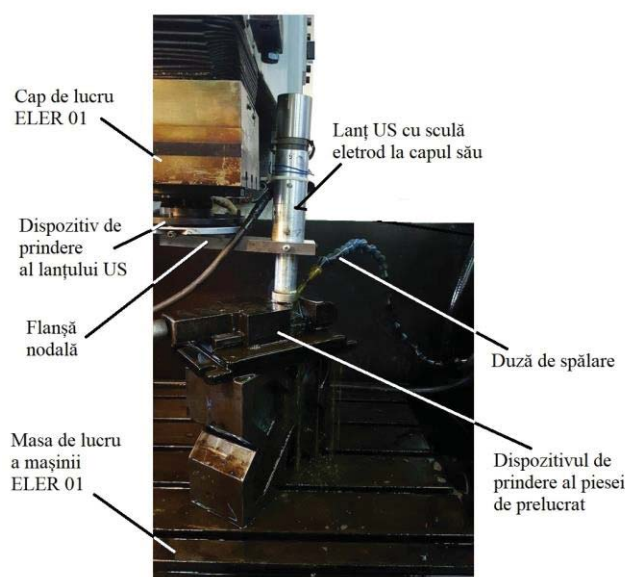


Fig. 4. Dispozitivul de prelucrat

Imaginile obținute prin μ EDM pentru regimul 1 sunt prezentate în Fig. 5 și 6. Se observă că dimensiunea craterelor transversale pe Ti (observate în centrul amprentei prelucrării, unde adâncimea de prelucrare este mare, stratul superficial de nanotuburi fiind penetrat) este de $D_{cr}=10 \mu\text{m}$, iar rugozitatea suprafeței prelucrate evaluată cu rugozimetrul este de $R_z = 4 \mu\text{m}$. Multe dintre cratere sunt suprapuse datorită descărcărilor apropiate. În acest caz, se consideră că stratul superficial al TiO_2 este mai mic decât adâncimea de prelucrat. În Fig. 6 se prezintă zona de nanotuburi de TiO_2 cu imagini preluate din zona periferică a amprentei de prelucrare, unde s-au produs puține descărcări EDM, care nu au permis pătrunderea prin stratul nanotuburi. Se observă dimensiunea craterelor transversale de ordinul nanometrilor.

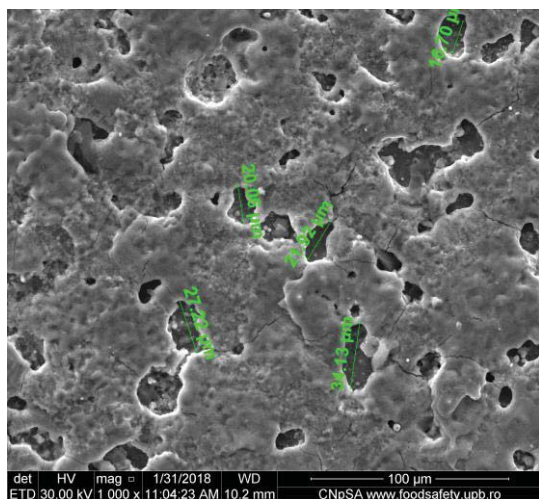


Fig. 5. Prelucrare μ EDM pe Ti, regimul 1

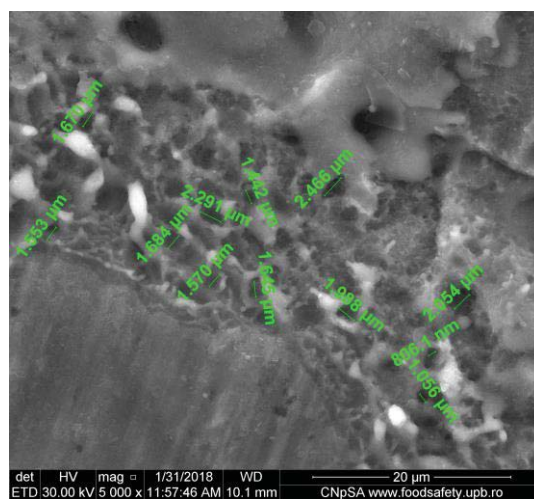


Fig. 6. Prelucrare μ EDM pe nanotuburi, regimul 1

Se observă în Fig. 7 și 8, o scădere a volumului craterelor și a adâncimii datorită asistenței cu US, prin care se prelevează marginile craterelor. Media dimensiunilor craterelor transversale a ajuns la $D_{cr}=6 \mu\text{m}$, iar rugozitatea eșantionului este de $R_z=2,8 \mu\text{m}$.

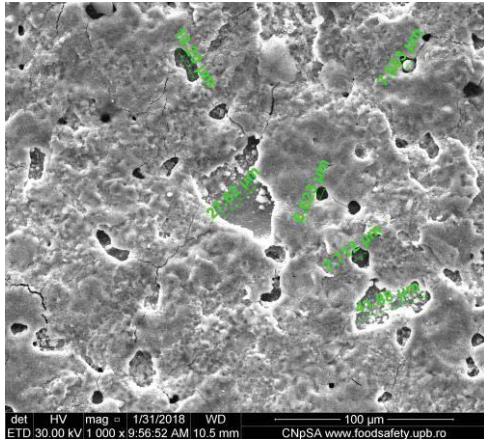


Fig. 7. Prelucrare μ EDM +US pe Ti, regimul 1

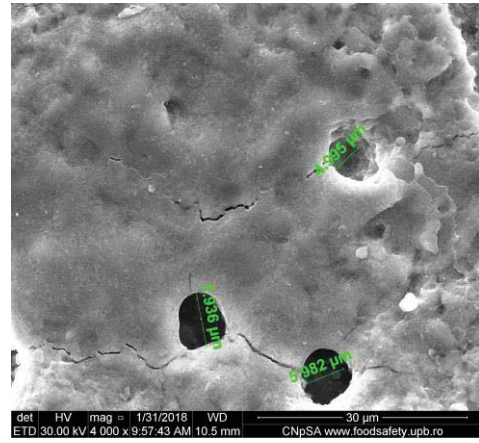


Fig. 8. Prelucrare μ EDM +US pe nanotuburi, regimul 1

Pentru regimul 2 rezultatele sunt prezentate în Fig. 9 și 10. Media dimensiunilor transversale ale craterelor ajunge la $D_{cr} = 15 \mu\text{m}$, iar rugozitatea eșantionului este $R_z = 6 \mu\text{m}$. Se poate observa aproape același aspect ca și la regimul de lucru anterior. La μ EDM + US și la același regimul de lucru, se poate observa în Fig. 11 și 12 diametrele mai mari ale craterelor și adâncimea lor decât în modul de lucru anterior. Diametrele medii ale craterelor sunt de $D_{cr} = 12 \mu\text{m}$, iar rugozitatea suprafeței $R_z = 5,2 \mu\text{m}$.

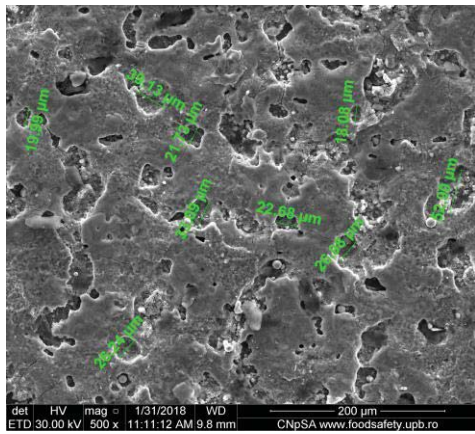


Fig. 9. Prelucrare μ EDM pe Ti, regimul 2

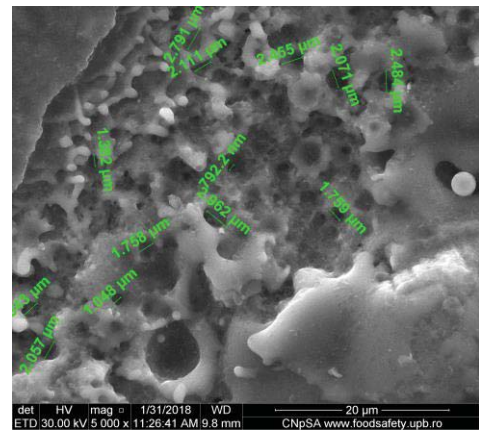


Fig. 10. Prelucrare μ EDM pe nanotuburi, regimul 2

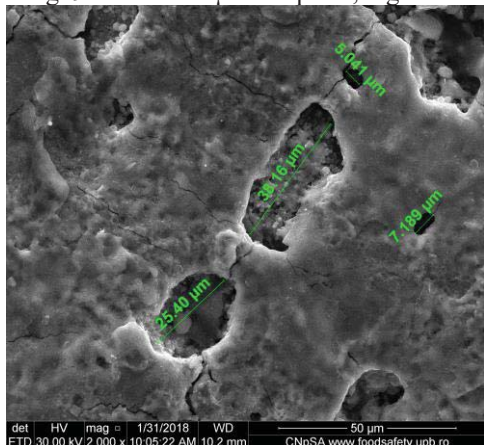


Fig. 11. Prelucrare μ EDM +US pe Ti, regimul 2

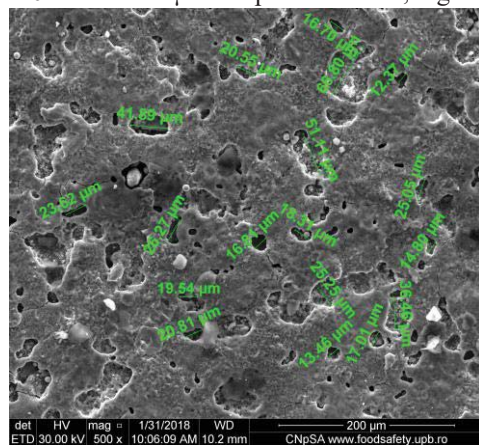


Fig. 12. Prelucrare μ EDM +US pe nanotuburi, regimul 2

La μ EDM cu impulsuri de relaxare, regimul 3 imaginea rezultată este prezentată în Fig. 13 și 14. Rugozitatea a fost $R_z=2\mu\text{m}$, media craterelor dimensiunile transversale a fost $D_{cr} = 13 \mu\text{m}$, cratere plate, specifice impulsurilor de relaxare.

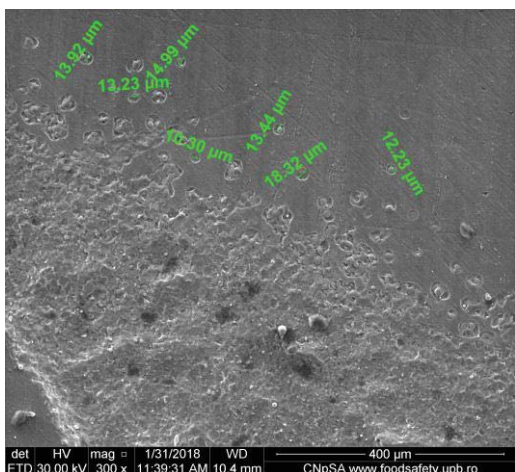


Fig. 13. Prelucrare μ EDM pe Ti, regimul 3

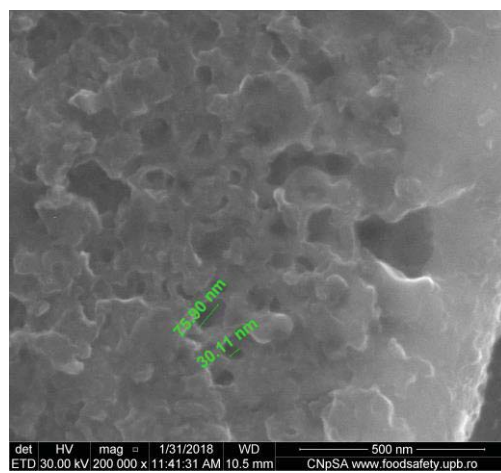


Fig. 14. Prelucrare μ EDM pe nanotuburi, regimul 3

La μ EDM + US cu impulsuri de relaxare, cu același regim de lucru și cu puterea consumată de $P_{cUS} = 70$ W - adecvată pentru craterele de relaxare - imaginile sunt prezentate în Fig. 15 și 16. Variația diametrelor este mai mare decât în cazurile anterioare datorită lipsei specifice de control a duratei impulsului. În acest ultim caz, rugozitatea a fost $Rz = 1,6$ μ m, iar media dimensiunilor transversale a craterelor a fost $D_{cr} = 10$ μ m.

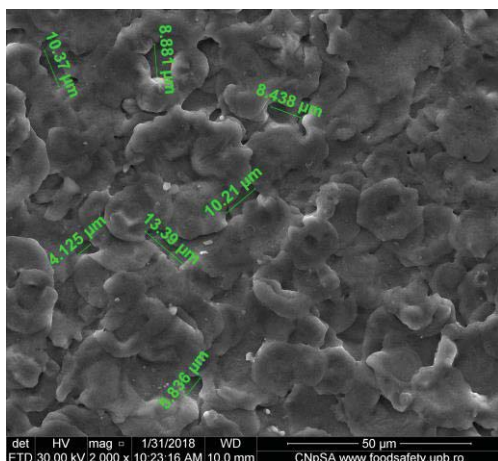


Fig. 15. Prelucrare μ EDM +US pe Ti, regimul 3

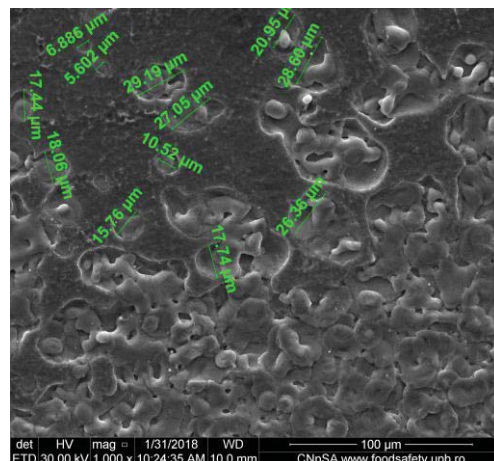


Fig. 16. Prelucrare μ EDM +US pe nanotuburi, regimul 3

4. Modelarea cu metoda elementelor finite

Modelarea se realizează în Comsol Multiphysics 4.2, folosind modulele Termic dependent de timp, aplicat la fenomenele de prelevare a materialului specifice EDM și Mecanic dependent de timp, aplicat la fenomenele de îndepărtare a materialului prin cavitație ultrasonică. Rezultatele modelării structurii materialului cu strat superficial de dioxid de titan pe substrat de titan, realizate de către Nedelcu Andrei și Nicolae Mihai [23] au constituit date de intrare pentru modelarea procesului de micro-electroeroziune asistat de ultrasunete pe nanotuburi.

Se definesc următorii parametri din Fig. 17. Spotul EDM este plasat pe axa de simetrie a geometriei create (Fig. 18) și are temperatura de 3760 K, conform modelului supraîncălzirii - Van Dijk și Snoeys. Aceasta arată că temperatura spotului electroeroziv este mai mare cu circa 200 K față de temperatura de fierbere a materialului. În jurul spotului, se formează bula de gaz cu raza r_{bg} , care constituie izolare termică (Fig. 19). Acestea reprezintă condiții la limită ale modelului, precum și cele prezentate în continuare.

Name	Expression	Value	Description
lp	0.2 [mm]	2.0E-4 m	Latura piesei
hp	0.005 [mm]	5.0E-6 m	Grosime piesa
acr	0.025 [mm]	2.5E-5 m	Raza microdepresiune
bcr	4*0.2e-6	8.0E-7	Adâncime microdepresiune
dtub	60e-9	6.0E-8	Diametru nanotub
htub	0.6e-6	6.0E-7	Înălțime nanotub
gtub	12e-9	1.2E-8	Grosime nanotub
ti	48e-6	4.8E-5	Timp de impuls regim 1
tus	0.8e-6	8.0E-7	Timpul actiune ultrasunete
rbg	0.05 [mm]	5.0E-5 m	Raza bulă gaz
pus	10 [MPa]	1.0E7 Pa	Presiune ultrasunete
dcr	10e-6	1.0E-5	Diametru crater
titaniumYM	250 [GPa]	2.5E11 Pa	Modulul lui Young

Fig. 17. Parametrii modelare μ EDM, regimul 1

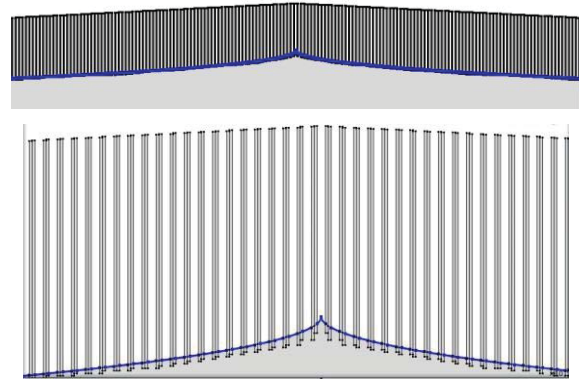


Fig. 18. Spotul EDM cu temperatură de 3760 K



Fig. 19. Izolarea termică datorată bulei de gaz

La periferia piesei temperatura este de 20°C , echivalent cu 293,15 K ca urmare a imersării piesei în lichidul dielectric (Fig. 20). Nanotuburile au o temperatură de 3445 K (Fig. 21).



Fig. 20. Suprafața periferică a piesei cu temperatura de 293,15 K și condițiile la limită în Model Builder

Discretizarea se realizează cu elemente triunghiulare și este prezentată în Fig. 22. Se observă că, aceasta este mult mai fină (elemente de dimensiuni foarte reduse comparativ cu restul suprafeței piesei) în zona de interes a spotului EDM datorită proprietății de conectivitate, astfel crescând precizia rezultatelor obținute.

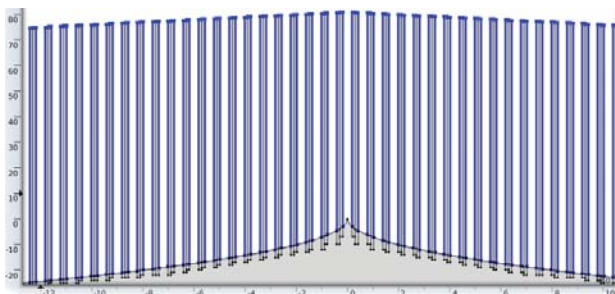


Fig. 21. Nanotuburile cu temperatură de 3445 K

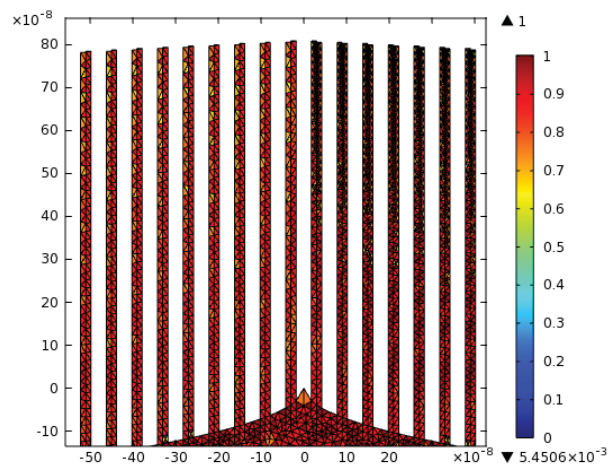


Fig. 22. Discretizarea cu elemente triunghiulare și calitatea acesteia

Distribuția de temperatură obținută după descărcarea electroerozivă este prezentată în Fig. 23, în stratul superficial de nanotuburi. Volumul materialului prelevat de descărcarea singulară produsă de impulsul comandat este delimitat de izoterma de fierbere a dioxidului de titan. Se observă că dimensiunile craterelor sunt mult mai mici decât cele obținute pe substratul de Ti, în acord cu datele experimentale prezentate în Fig. 6, ceea ce validează modelul computerizat.

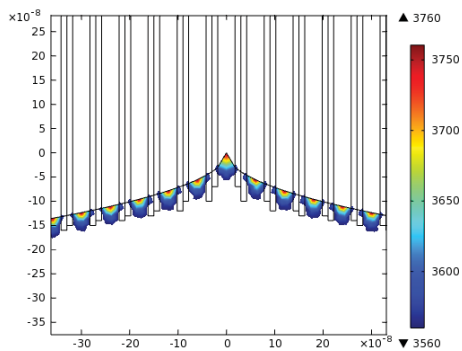


Fig. 23. Poziția izotermei de fierbere

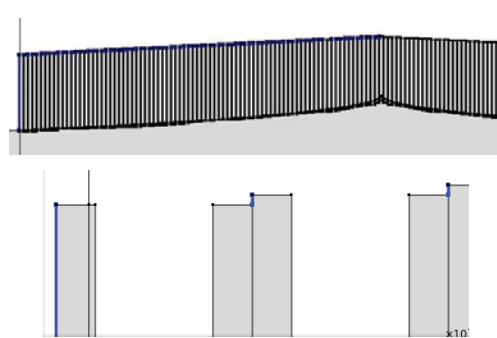


Fig. 24. Încărcarea de tip efort unitar pe contur pentru acțiunea microjeturilor cumulative

În a doua etapă, se realizează modelarea efectului produs de microjeturile cumulative, respectiv prelevarea mecano-hidraulică a materialului piesei prelucrate la nivel microgeometric folosind parametrii din Fig. 25. Aceasta este a doua componentă a mecanismului de prelevare a materialului la EDM+US care contribuie în special la reducerea rugozității prin prelevarea microvârfurilor. Acestea au rezistență la forfecare mai redusă în raport cu restul elementelor microgeometrice, fiind mai sensibile la orientarea microjeturilor cumulative, paralel cu suprafața prelucrată.

Modelul pentru studiul mecanismului de prelevare mecano-hidraulic se obține din modelul termic creat anterior prin apelarea Add Physics a modului Solid Mechanics în varianta Time Dependent.

Condițiile la limită corespunzătoare sunt prezentate în Fig. 24. Acțiunea microjeturilor cumulative a fost exprimată printr-o încărcare de tip condiții la limită de 10 MPa, exercitată pe profilul microgeometriei pe direcția axei x.

S-a ținut cont și de modul de orientare a piesei. De aceea, s-a apelat la o condiție de tip Fixed Constraint pe suprafețele laterale a piesei Fig. 25.

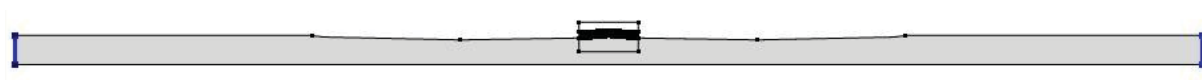


Fig. 25. Condiția de tip Fixed Constraint pe suprafața inferioară a piesei

Se accesează funcția Study din Model Builder pentru care s-au stabilit parametrii corespunzători pentru varianta Time Dependent a modului Solid Mechanics, valoarea finală a timpului fiind $t_{us}=8 \mu s$, intervalul aproximativ cât durează acțiunea microjeturilor cumulative.

Distribuția eforturilor unitare Von Mises în zona adiacentă spotului EDM este prezentată în Fig. 26 care arată îndepărtarea completă a stratului din nanotuburi de TiO_2 chiar și la o presiune relativ mică pus=10MPa. Se observă că acțiunea microjeturilor cumulative contribuie la reducerea rugozității suprafeței prelucrate, conform ipotezelor teoretice avansate și confirmate de date experimentale din Fig. 7 dacă sunt îndeplinite condițiile de optimizare a parametrilor de lucru privind optimizarea presiunii ultrasonice.

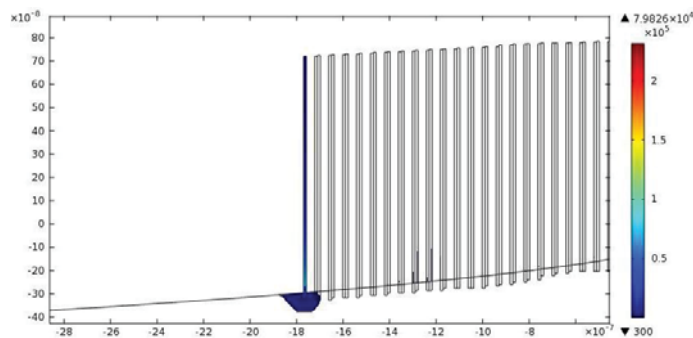


Fig. 26. Eforturi unitare Von Mises la acțiunea microjeturilor cumulative la μ EDM +US și volumul de material prelevat - încărcare pe contur de 10 MPa

Presiunea ultrasonică se calculează cu formula [24]:

$$p_{us} = 2\pi * \rho * c_s * A * f_{us} \quad (1)$$

unde: ρ - densitatea lichidului dielectric;
 c_s – viteza de propagare a US în lichidul dielectric;
 A – amplitudinea de oscilație US;
 f_{us} – frecvența US.

De unde rezultă că presiunea depinde de amplitudinea de oscilație care poate fi reglată practic modificând puterea consumată pe lanțul ultrasonic. Această facilitate este oferită de generatorul de ultrasunete utilizat în laboratorul de electroeroziune al facultății IMST.

Pentru regimul 2 și 3 se urmăresc aceiași pași modificându-se parametrii conform Fig. 27 și 28, iar rezultatele sunt prezentate în Fig. 29, 30, 31 și 32.

bcr	6*0.2e-6	1.2E-6
dcr	15e-6	1.5E-5
ti	95e-6	9.5E-5

Fig. 27. Parametrii modelare regimul 2

bcr	2*0.2e-6	4.0E-7
dcr	13e-6	1.3E-5
ti	0.8e-6	8.0E-7

Fig. 28. Parametrii modelare regimul 3

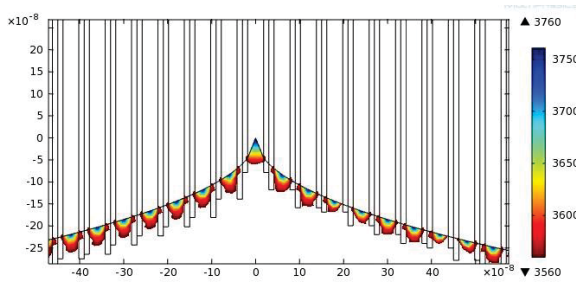


Fig. 29. Poziția izotermei de fierbere regimul 2

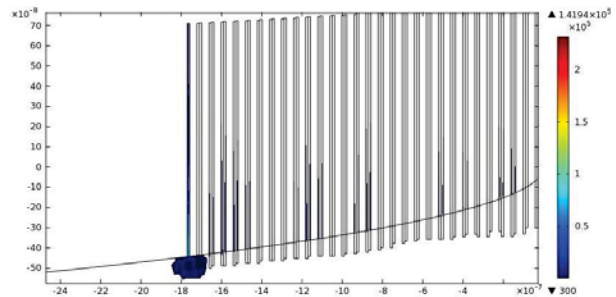


Fig. 30. Eforturi unitare Von Mises la acțiunea microjeturilor cumulative la μ EDM+US și volumul de material prelevat încărcare pe contur de 10 MPa

Se observă că dimensiunile craterelor din Fig. 29 sunt mult mai mici decât cele obținute pe substratul de Ti, în acord cu datele experimentale prezentate în Fig. 10, ceea ce validează modelul computerizat. În Fig. 30 se observă o reducere a rugozității suprafețelor prelucrate în conformitate cu datele experimentale obținute în Fig. 12, rezultând validarea modelului computerizat.

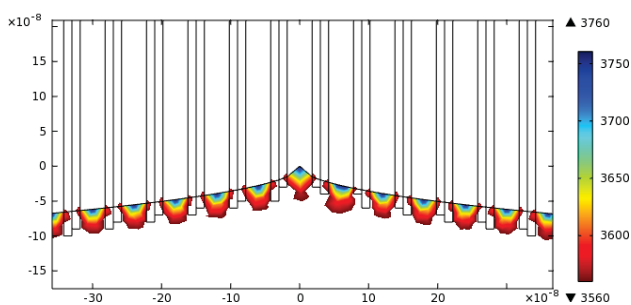


Fig. 31. Poziția izotermei de fierbere regimul 3

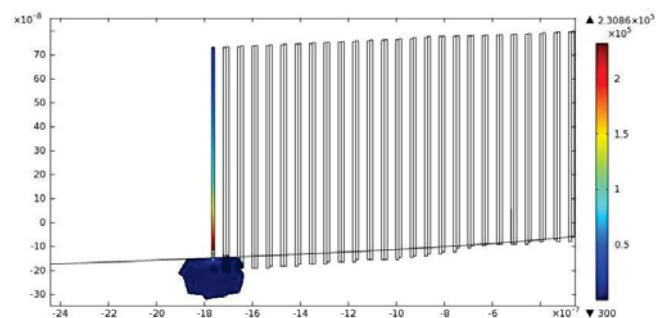


Fig. 32. Eforturi unitare Von Mises la acțiunea microjeturilor cumulative la μ EDM+US și volumul de material prelevat încărcare pe contur de 10 MPa

În Fig. 31 dimensiunile craterelor sunt apropiate ca cele obținute pe substratul de Ti în acord cu datele experimentale din Fig. 14. Efectele acționării microjeturilor cumulative din Fig. 32 contribuie la reducerea rugozității suprafeței prelucrate așa cum este prezentat și în Fig. 16.

În continuare se modelează prelucrarea μ EDM și μ EDM+US pe substratul de Ti. În Fig. 33 sunt prezentați parametrii pentru crearea condițiilor la limită.

Name	Expression	Value	Description
lp	10 [mm]	0.01 m	latura piesei
hp	1 [mm]	0.001 m	grosimea piesei
acr	5e-6	5.0E-6	raza crater initial
bcr	4e-6	4.0E-6	adancime crater initial
rbg	0.1 [mm]	1.0E-4 m	raza bulei de gaz
ti	48e-6	4.8E-5	timpul de impuls regim 1

Fig. 33. Parametrii modelare μ EDM, regimul 1

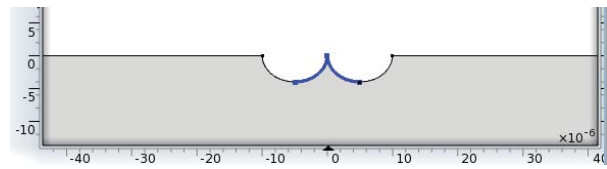


Fig. 34. Spotul EDM cu temperatură de 3760 K

Spotul EDM este plasat pe axa de simetrie a geometriei (Fig. 34) și are temperatura de 3760 K, conform modelului Van Dijck și Snoeys. În jurul spotului, se formează bula de gaz cu raza rbg, care constituie izolare termică (Fig. 35).

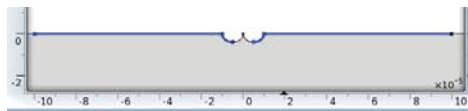


Fig. 35. Izolarea termică datorată bulei de gaz

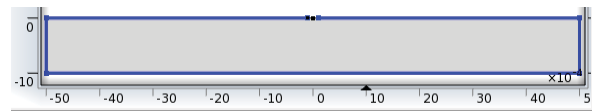


Fig. 36. Suprafața periferică a piesei cu temperatura de 293,15 K și condițiile la limită în Model Builder

La periferia piesei temperatura este de 20°C, echivalent cu 293,15 K ca urmare a imersării piesei în lichidul dielectric (Fig. 36).

Discretizarea se realizează cu elemente triunghiulare și este prezentată în Fig. 37. Se observă că, aceasta este mult mai fină (elemente de dimensiuni foarte reduse comparativ cu restul suprafeței piesei) în zona de interes a spotului EDM datorită proprietății de conectivitate, astfel crescând precizia rezultatelor obținute.

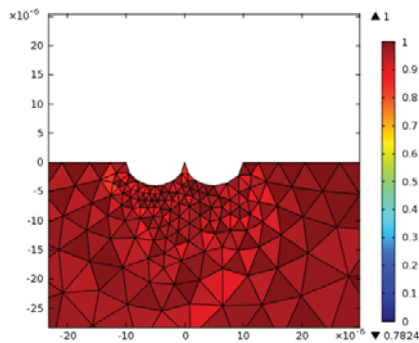


Fig. 37. Discretizarea cu elemente triunghiulare și calitatea acestora

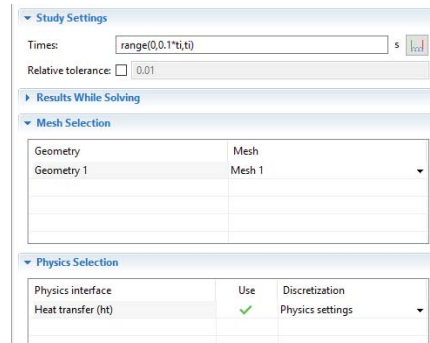


Fig. 38. Apelarea funcției Study și stabilirea parametrilor

Pentru obținerea distribuției de temperatură în cadrul piesei cu geometria creată anterior, produse de descărcare singulară ca urmare a unui impuls de relaxare cu durată de 48 μ s, se accesează funcția Study din Model Builder pentru care s-au stabilit parametrii din Fig. 38, conform variantei Time Dependent a modului Heat Transfer in solid.

Distribuția de temperatură obținută este prezentată în Fig. 39, unde se observă că descărcarea singulară produce efect numai în zona adiacentă spotului EDM și neglijabil în rest. În Fig. 40 au fost determinate dimensiunea craterelor corespunzătoare parametrilor x și y care sunt în acord cu datele experimentale privind diametrul și adâncimea medie din Fig. 5 precum și valorilor parametrilor de modelare din Fig. 33 se observă dimensiuni mai mari ale craterelor pe substratul de Ti în comparație cu cele obținute pe structura de nanotuburi.

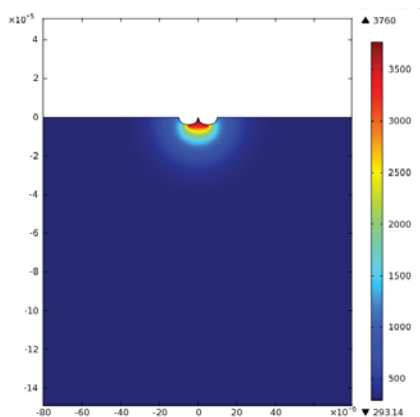


Fig. 39. Distribuția de temperatură după descărcarea singulară cu durată de 48 μ s produsă de un impuls de relaxare

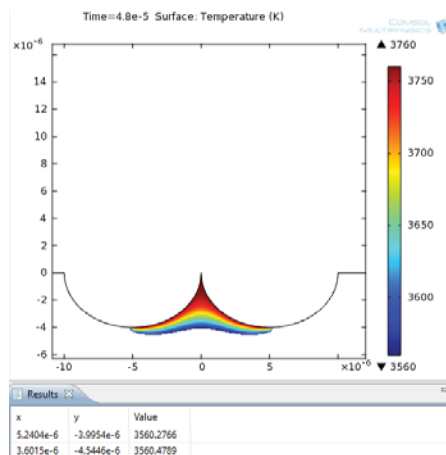


Fig. 40. Poziția izotermei de fierbere

Volumul materialului prelevat de descărcarea singulară modelată este delimitat de izoterma de fierbere cu temperatura de 3560 K la Ti conform modelului Van Dijk și Snoeys.

În a doua etapă, se realizează modelarea efectului produs de microjeturile cumulative, respectiv prelevarea mecano-hidraulică a materialului piesei prelucrate la nivel microgeometric.

Condițiile la limită corespunzătoare sunt prezentate în Fig. 41. Acțiunea microjeturilor cumulative a fost exprimată printr-o încărcare de tip Boundary Load de 103,1 MPa, exercitată pe profilul microgeometric pe direcția axei x.

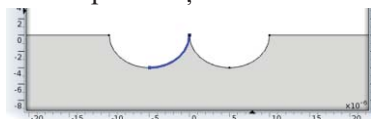


Fig. 41. Încărcarea de tip efort unitar pe contur pentru acțiunea microjeturilor cumulative

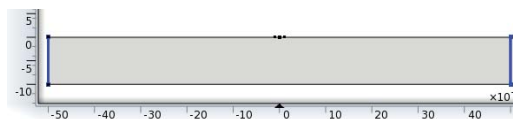


Fig. 42. Condiția de tip Fixed Constraint pe suprafața inferioară a piesei

S-a ținut cont și de modul de orientare a piesei. De aceea, s-a apelat la o condiție de tip Fixed Constraint pe suprafețele laterale ale piesei Fig. 42.

Se accesează funcția Study din Model Builder pentru care s-au stabilit parametrii corespunzători pentru varianta Time Dependent a modului Solid Mechanics, valoarea finală a timpului fiind $t_{us}=8 \mu$ s, intervalul aproximativ cât durează acțiunea microjeturilor cumulative (Fig. 43).

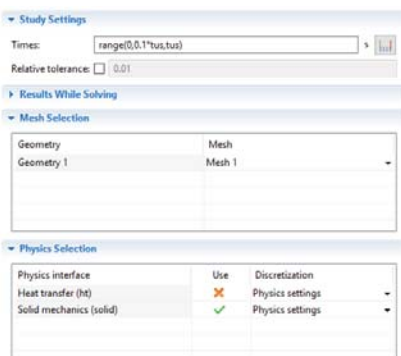


Fig. 43. Apelarea funcției Study și parametrilor pentru modelarea μ EDM+US

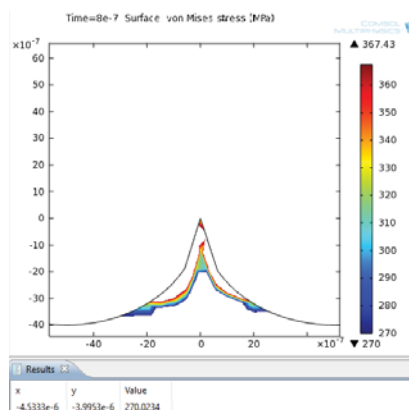


Fig. 44. Eforturi unitare Von Mises la acțiunea microjeturilor cumulative la μ EDM+US și volumul de material prelevat – încărcare pe contur de 111,5 MPa

Distribuția eforturilor unitare Von Mises în zona adiacentă spotului EDM este prezentată în Fig. 43. Acțiunea microjeturilor cumulative care apare la sfârșitul fiecărei perioade de oscilație ultrasonică este considerată solicitare la oboseală după ciclul pulsant. În cazul unei solicitări de forfecare a microvârfurilor ca urmare a orientării microjeturilor cumulative.

În Fig. 45 este reprezentată grafic adâncimea stratului prelevat în funcție de presiunea ultrasonică, reglabilă din generatorul de ultrasunete cu ajutorul puterii reglate pe lanțul US pentru primul regim de lucru. La valoarea de 130 MPa se observă în Fig. 46 că adâncimea volumului de material prelevat depășește adâncimea unui crater EDM, ceea ce conduce la reducerea calității suprafeței prelucrate (creșterea rugozității), de unde rezultă importanța condițiilor de optimizare a parametrilor de lucru, respectiv puterii de acționare a lanțului ultrasonic.

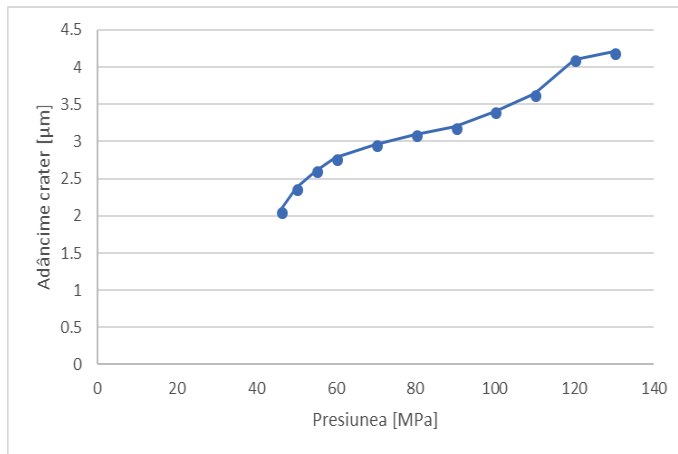


Fig. 45. Valorile obținute pentru adâncimea stratului de materil prelevat ultrasonic selectând diferite presiuni

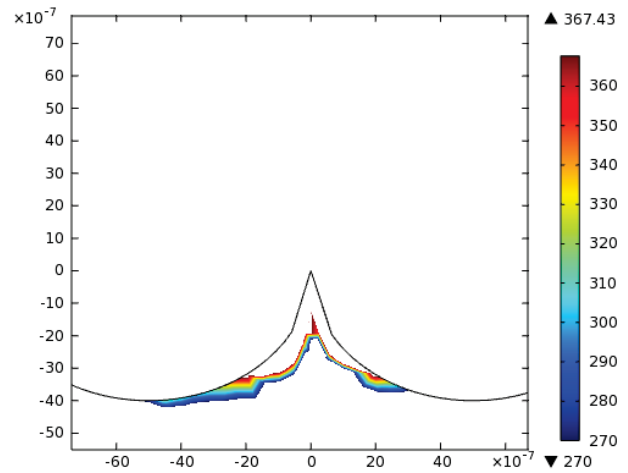


Fig. 46 Eforturi unitare Von Mises la acțiunea microjeturilor cumulative la μEDM+US și volumul de material prelevat – încărcare pe contur de 130 MPa

Din Fig. 44,50 și 52 se observă că acțiunea microjeturilor cumulative contribuie la reducerea rugozității suprafeței prelucrate, conform ipotezelor teoretice avansate și confirmate de date experimentale, dacă sunt îndeplinite condițiile de optimizare ale parametrilor de lucru. Se observă o prelucrabilitate mai mare a materialului prin folosirea ultrasunetelor rezultând din compararea modelului experimental cu modelarea realizată.

Pentru al doilea regim se urmăresc aceiași pași, dar se modifică următorii parametri: timpul de impuls, $t_i=95 \mu s$, raza craterului inițial, $acr=7,5 \mu m$ și adâncimea craterului inițial $bcr=6 \mu m$, așa cum este prezentat și în Fig. 47.

acr	7.5e-6	7.5E-6
bcr	6e-6	6.0E-6
ti	95e-6	9.5E-5
pus	113.5[MPa]	1.135E8 Pa

Fig. 47. Parametrii modelare regimul 2

acr	6.5e-6	6.5E-6
bcr	2e-6	2.0E-6
ti	0.8e-6	8.0E-7
pus	165[MPa]	1.65E8 Pa

Fig. 48. Parametrii modelare regimul 3

Distribuția de temperatură obținută este prezentată în Fig, 49. Volumul materialului prelevat de descărcarea singulară produsă de impulsul comandat este delimitat de izoterma de fierbere cu temperatura de 3560 K pentru Ti, conform modelului Van Dijck și Snoeys. Poziția acestei izoterme este definită de coordonatele din Fig. 49. Valorile coordonatelor punctelor care definesc poziția izotermei sunt apropiate de valorile experimentale obținute în Fig. 9.

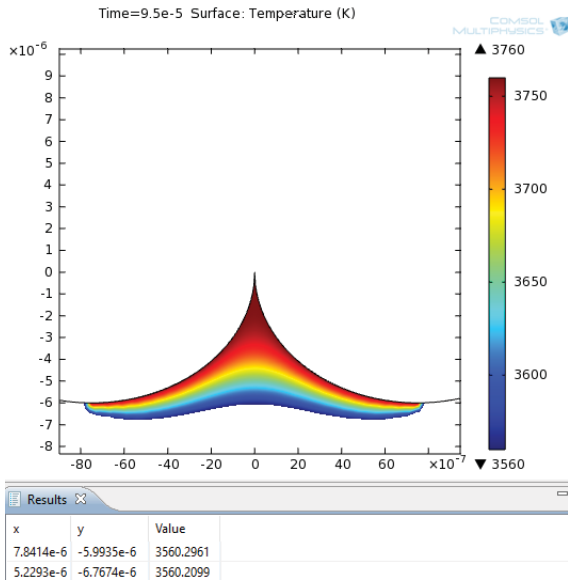


Fig. 49. Poziția izotermei de fierbere

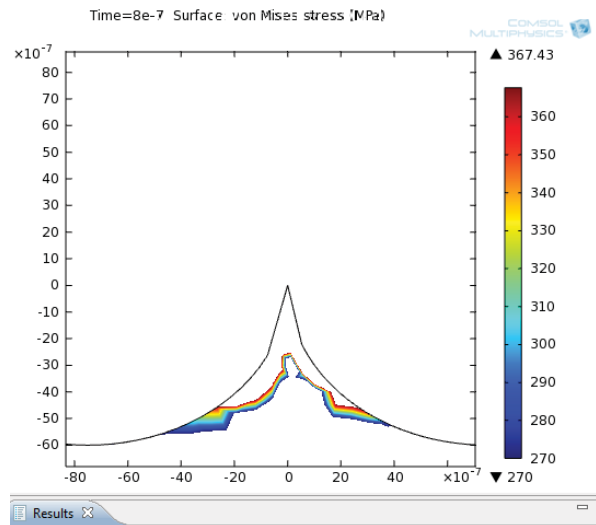


Fig. 50. Eforturi unitare von Mises la acțiunea microjeturilor cumulative la μ EDM+US și volumul de material prelevat – încărcare pe contur de 113,5 MPa

Pentru al treilea regim se urmăresc aceiași pași, dar se modifică următorii parametrii: timpul de impuls, $t_i=0,8 \mu s$, raza craterului inițial, $acr=6,5 \mu m$ și adâncimea craterului inițial $bcr=2 \mu m$, așa cum este prezentat și în Fig. 48.

Distribuția de temperatură obținută este prezentată în Fig. 48. Volumul materialului prelevat de descărcarea singulară produsă de impulsul comandat este delimitat de izoterma de fierbere cu temperatura de 3560 K pentru T_i , conform modelului Van Dijck și Snoeys. Poziția acestei izoterme este definită de coordonatele din Fig. 51. Valorile coordonatelor punctelor care definesc poziția izotermei sunt apropiate de valorile experimentale obținute în Fig.13.

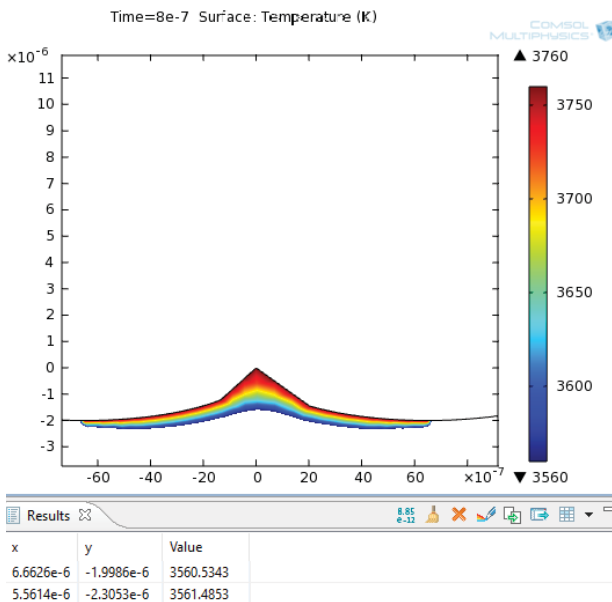


Fig. 51. Poziția izotermei de fierbere

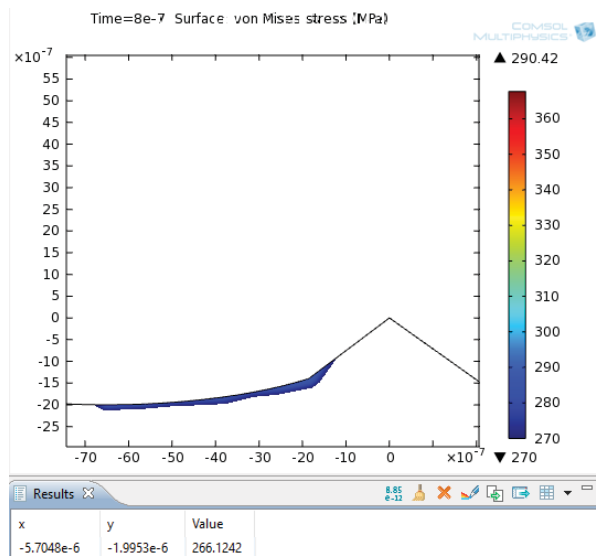


Fig. 52. Eforturi unitare von Mises la acțiunea microjeturilor cumulative la μ EDM+US și volumul de material prelevat – încărcare pe contur de 165 MPa

5. Concluzii

Modelarea computerizată a procesului de prelucrare a materialului avansat alcătuit dintr-un strat superficial de nanotuburi de dioxid de titan și substrat de titan prin micro-electroeroziune asistat de ultrasunete a fost validată de datele experimentale. Au rezultat următoarele concluzii:

1. La modelarea termică a procesului pe stratul superficial de nanotuburi de TiO_2 se observă dimensiuni foarte reduse ale craterelor rezultate din descărcările electroerozive ceea ce evidențiază dificultatea prelucrării stratului superficial chiar și prin micro-electroeroziune clasică.

2. La modelarea mecanică corespunzătoare efectului produs de cavitația ultrasonică se observă că se produce o îndepărtare ușoară a stratului superficial de TiO_2 chiar și la presiuni ultrasonice reduse, ceea ce demonstrează faptul că asistarea cu ultrasunete a micro-electroeroziunii crește substanțial prelucrabilitatea acestui material avansat.

3. La modelarea termică pe substratul de Ti, după ce a fost îndepărtat stratul superficial ca urmare a unui timp de prelucrare mai mare, se observă că se obțin cratere de dimensiuni mai mari, produse de către descărcările electroerozive, ceea ce demonstrează că prelucrabilitatea substratului este mult mai bună decât aceea a stratului superficial de nanotuburi de TiO_2 .

4. La modelarea mecanică corespunzătoare cavitației induse ultrasonic în interstițiul de prelucrare se observă că asistarea cu ultrasunete asigură prin prelevarea marginilor craterelor reducerea rugozității suprafeței prelucrate dacă presiunea ultrasonică este optimizată. Acest parametru este în corespondență cu puterea consumată pe lanțul ultrasonic, parametru reglat în timpul experimentărilor realizate în laboratorul de electroeroziune al facultății IMST.

5. Procedul hibrid, micro-electroeroziunea asistată cu ultrasunete își dovedește superioritatea față de electroeroziunea clasică la prelucrarea acestui material nanostructurat cu aplicații extrem de diverse, dar cu prelucrabilitate deficitară mai ales la utilizarea procedeelor de prelucrare convenționale.

Cu ajutorul microscopului pe bază de electroni achiziționat prin proiectul POSCCE-A2-O2.2.1-2013-1/Priority Axe 2, Project No. 638/12.03.2014, ID 1970, SMIS-CSNR code 48652 s-au obținut rezultatele experimentale prezentate în capitolul 2.

6. Bibliografie

- [1]. Katz Z., Tibbles C.J. (2005), „Analysis of micro-scale EDM process”, Volumul 25, pagina 923-924 ISSN: 0268-3768 (Print) 1433-3015 (Online);
- [2]. Kremer D., Lebrun J. L., Hosari B., Moisanv A. (1989), „Effects of Ultrasonic Vibrations on the Performances in EDM”, Volumul 38 (Issue 1), paginile 199-202;
- [3]. Abdullah A., Shabgard M. R. (2008), „Effect of ultrasonic vibration of tool on electrical discharge machining of cemented tungsten carbide (WC-Co)”, Volumul 38 (Issue 11-12), paginile 1137-1147;
- [4]. Srivastava V., Pandey P. M. (2012), „Effect of process parameters on the performance of EDM process with ultrasonic assisted cryogenically cooled electrode”, Volumul 14 (Issue 3), paginile 393-402;
- [5]. Srivastava V., Pandey P. M. (2013), „Study of ultrasonic assisted cryogenically cooled EDM process using sintered (Cu-TiC) tooltip”, Volumul 15 (Issue 1), paginile 158-166;
- [6]. Iwai M., Ninomiya S., Suzuki K. (2013), „Improvement of EDM Properties of PCD with Electrode Vibrated by Ultrasonic Transducer”, Volumul 6, paginile 146-150;

- [7]. Shervani-Tabar M. T., Mobadersany N. (2013), „Numerical study of the dielectric liquid around an electrical discharge generated vapor bubble in ultrasonic assisted EDM”, Volumul 53 (Issue 5), paginile 943-955;
- [8]. Shervani-Tabar M. T., Seyed-Sadjadi M. H., Shabgard M. R. (2013), „Numerical study on the splitting of a vapor bubble in the ultrasonic assisted EDM process with the curved tool and workpiece”, Volumul 53 (Issue 1), paginile 203-210;
- [9]. Shabgard M. R., Sadizadeh B., Kakoulvand H. (2009), „The effect of ultrasonic vibration of workpiece in electrical discharge machining of AISI H13 tool steel”, World Academy of Science, Engineering and Technology;
- [10]. Ichikawa T., Natsu W. (2013), „Realization of Micro-EDM under Ultra-Small Discharge Energy by Applying Ultrasonic Vibration to Machining Fluid”, Volumul 6, paginile 326-331;
- [11]. Liew P. J., Yan J., Kuriyagawa T. (2014), „Fabrication of deep micro-holes in reaction-bonded SiC by ultrasonic cavitation assisted micro-EDM”, Volumul 76, paginile 13-20;
- [12]. Goigogana M., Sarasua J.A., Ramos J.M., Echavarri L., Cascon I. (2016), „Pulsed ultrasonic assisted electrical discharge machining for finishing operations”, Volumul 109, paginile 87-93;
- [13]. Bharat C. Khatri, Pravin Rathod and Janak B. Valaki (2016), „Ultrasonic vibration-assisted electric discharge machining: A research review”, Volumul 230 (Issue 2) ;
- [14]. Gao C and Liu Z. (2003), „A study of ultrasonically aided micro-electrical-discharge machining by the application of workpiece vibration”, Volumul 139 (Issues 1-3), paginile 226-228
- [15]. Hoang KT and Yang SH. (2013) „A study on the effect of different vibration-assisted methods in micro-WEDM.” Volumul 213 (Issue 9), paginile 1616–1622;
- [16]. Prihandana GS, Mahardika M, Hamdi M, et al. (2009) „Effect of micro-powder suspension and ultrasonic vibration of dielectric fluid in micro-EDM processes” – Taguchi approach. Int J Mach Tool Manu; Volumul 49 (Issues 12–13), paginile 1035–1041;
- [17]. Schubert A, Zeidler H, Hackert-Oschä tzchen M, et al. (2013) „Enhancing micro-EDM using ultrasonic vibration and approaches for machining of non-conducting ceramics.” J Mech Eng; Volumul 59 (Issue 3), paginile 156–164;
- [18]. * * * *Titanium Dioxide - Material Information*, disponibil la <https://nanopartikel.info/en/nanoinfo/materials/titanium-dioxide#literatur>, accesat la 24.04.2018;
- [19]. Maria Corcoveanu (2017), TiO₂ – structură, proprietăți electronice și optice, „Colegiul Economic Petre S. Aurelian”, Slatina;
- [20]. [24]. Azom (2002), *Titanium Dioxide - Titania (TiO₂)*, disponibil la <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1179>, accesat la 25.04.2018;
- [21]. Jian-Ying Huang, Ke-Qin Zhang, Yue-Kun Lai (2013), „Fabrication, Modification, and Emerging Applications of TiO₂ Nanotube Arrays by Electrochemical Synthesis: A Review”, Volumul 2013;
- [22]. Preda S. (2017), „Nanostructuri oxidice ale unor metale tranziționale”, Teză de doctorat, Academia Română, Institutul de Chimie Fizică „Ilie Murgulescu”, București;
- [23]. Nedelcu A., Nicolae M. (2018), „Structura, caracteristicile și modelarea materialului avansat, nanotuburi de TiO₂ pe substrat de Ti”, Sesiunea de Comunicări Științifice Studentești I.M.S.T. ;
- [24]. Ghiculescu D. (2013), *Inginerie asistată de calculator în domeniul prelucrărilor neconvenționale. Indrumar de laborator*, Printech, București.

7. Notații

- EDM – Electric Discharge Machining (Prelucrări prin descărcări electrice);
MRR – Material Removal Rate (Rata de îndepărtare a materialului);
US – Ultrasonic;
TWR – Tool Wear Rate (Viteza de uzură a sculei);