

MODELAREA ȘI EXPERIMENTAREA UNUI LANȚ ULTRASONIC PENTRU MICROGĂURIREA PRIN EDM ASISTATĂ DE ULTRASUNETE

DRĂGAN Nicușor Bogdan¹, STAICU Alexandru George¹

Conducător științific: Prof.dr.ing. Daniel GHICULESCU

REZUMAT: Lucrarea tratează stadiul actual al prelucrării microgăurilor prin electroeroziune precum și a lanțurilor ultrasonice utilizate la asistarea prelucrărilor. A fost modelat cu metoda elementelor finite un concentrator ultrasonic care include scula pentru microgăurire integrată în lanțul ultrasonic. Au fost realizate prelucrări experimentale de microgăurire asistată de ultrasunete, în laboratorul de profil din facultatea IMST, pe un aliaj Co-Cr cu utilizări în domenii ca: medical, auto, aeronautic, tehnologic. Rezultatele experimentale au confirmat caracteristicile modelului de lanț ultrasonic obținut computerizat.

CUVINTE CHEIE: micro-electroeroziune, ultrasunete, modelare

1 INTRODUCERE

Prelucrarea prin electroeroziune (electrical discharge machining - EDM), una din cele mai răspândite tehnologii neconvenționale, se bazează pe descărcările electrice succesive amorțite între electrodul-sculă și semifabricat, care sunt din materiale electroconductive. Fiind un procedeu de natură termică - utilizează nemijlocit energia termică produsă de descărcare la prelevarea materialului - permite prelucrarea materialelor indiferent de duritatea acestora, dificil sau imposibil de prelucrat prin procedee convenționale (mecanice). La micro-EDM (suprafețe generate în intervalul dimensional 1...999 μm) (Bharat C Khatri ș.a. , 2015), evacuarea particulelor din interstițiul de prelucrare de 1-5 μm , creează instabilitatea procesului prin fenomene frecvente de scurt-circuit între sculă și semifabricat și reducerea performanțelor tehnologice (Saeed Zare Chavoshi, Xichun Luo, 2015).

Se dorește astfel, găsirea unei soluții de evacuare superioară a particulelor prelevate. O metodă, pe care o vom dezvolta în prezenta lucrare, o reprezintă aplicarea de vibrații ultrasonore (US) electrodului-sculă combinate cu prelucrarea de micro-găurire prin EDM, rezultând un proces hibrid ($\mu\text{EDM}+\text{US}$). Fenomenul care stă la baza acestui proces constă în modificarea dimensională a interstițiului de prelucrare, generând o variație de înaltă frecvență (US) a presiunii alternative în spațiul de lucru. Schimbarea continuă a presiunii ajută la evacuarea eficientă a reziduurilor și creșterea performanțelor tehnologice de productivitate și calitatea suprafeței prelucrate.

¹ Specializarea Tehnologia Construcțiilor de Mașini, Facultatea IMST;

E-mail: nicusorbogdandragan@yahoo.ro;

2 STADIUL ACTUAL AL MICROGĂURIRII PRIN EDM

Până în prezent, s-au dezvoltat tehnologii de prelucrare prin microgăurire EDM pentru obținerea de produse în diverse domenii. Asistarea cu ultrasunete este un concept mai nou, explorat de un anumit număr de cercetători în vederea îmbunătățirii procesului de obținere a microgăurilor.

2.1 Microgăurirea EDM

Procesul de microgăurire EDM se realizează pe o mașină de prelucrare electroerozivă, careia i se fac modificări în vederea obținerii unor găuri de diametru 0.00508 mm.

Cel mai utilizat material pentru electrodul-sculă îl reprezintă Wolfram-ul datorită rezistenței mari la uzură, măbind durata de viață a sculei. Se utilizează și electrozi din Wolfram-Crom (WC) în cazul obținerii unor diametre mici, între 5 și 10 micrometri. Electrocul este rotit în timpul tăierii, în vederea spălării reziduurilor.

Microgăurirea EDM necesită de la 1% până la 10% din curentul utilizat de o mașină EDM convențională. Setările de alimentare oferă o manevrabilitate bună a procedurii. Astfel, setările mari permit obținerea mai multor găuri, iar setările mai mici permit obținerea unor găuri cu precizie dimensională mai ridicată.

Procedeu este utilizat de compania Optimization Inc. Burr-Free Microhole Div. din Utah pentru realizarea de orificii foarte precise în foite de metal, utilizate ca standarde de către industria laser, optică și alte industrii. Orificiile variază în dimensiune: de la 10 micrometri (cea mai mică dimensiune) la 1000 de micrometri (cea mai mare dimensiune). Însă,

activitatea principală a companiei o reprezintă microgăurirea EDM a metalelor pentru industria aerospațială, medicală, informatică și alte industrii ce utilizează piese miniaturale (Leo Rakowski, 2002).

2.2 Aplicarea vibrațiilor ultrasonore pe EDM

Cercetătorii au experimentat diferite modalități de aplicare a ultrasunetelor pe EDM cum ar fi: vibrații aplicate pe piesă, sculă sau lichidul dielectric.

2.2.1 Vibrațiile ultrasonore aplicate piesei

Cercetătorii Murthi și Philip au dezvoltat și fabricat un accesoriu ultrasonor cu un traductor magnetostrictiv care operează la o frecvență de 22 kHz cu o amplitudine de 3 μm. Autorii au precizat că influența ultrasonoră din timpul procesului de găurire EDM a fost remarcată prin îmbunătățirea descărcării datorită forțelor de câmp ultrasonic.

Alți cercetători, Gao și Liu au dezvoltat un sistem micro EDM asistat de vibrații ultrasonore, unde piesa a fost atașată direct la un traductor piezoelectric pentru a asigura vibrațiile (figura 1). Rezultatele obținute au demonstrat faptul că microgăurirea EDM asistată de ultrasunete este de 8 ori mai eficientă decât microgăurirea EDM normală.

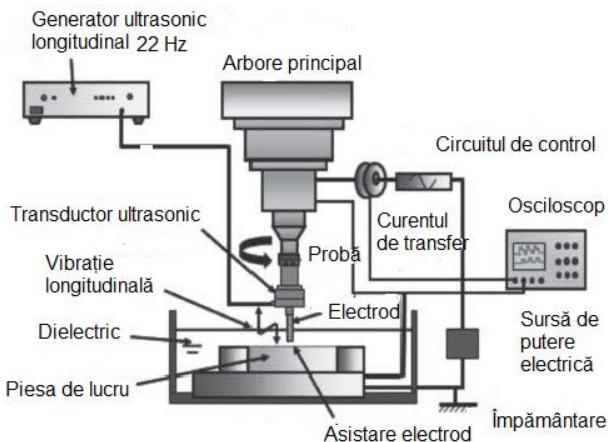


Fig. 1 Microgăurire EDM asistat de ultrasunete (J. Wamai, 2014)

2.2.2 Vibrațiile ultrasonore aplicate electrodului sculă

Kremer a folosit un sistem de investigare pentru vibrații (figura 2), unde o parte este legată direct la capul EDM iar cealaltă parte este legată la electrod. S-a observat că aplicarea vibrațiilor pe electrod duce la îmbunătățirea performanțelor procesului în comparație cu prelucrarea EDM normală.

2.2.3 Vibrațiile ultrasonore furnizate lichidului dielectric

Prihandana a introdus conceptul de aplicare a vibrațiilor ultrasonore lichidului dielectric pentru micro-EDM, (figura 3).

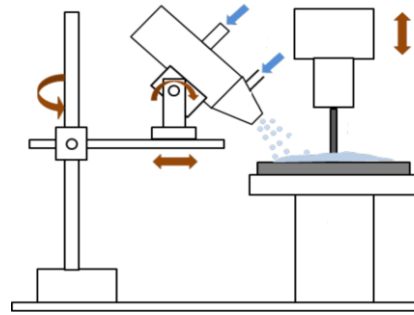


Fig.2 Vibrație ultrasonică EDM (V.S. Sreebalaji, Dr. R. Saravanan, 2010)

Procesul prezintă vibrații ultrasonore cu frecvență de 43 kHz utilizate pentru a mări energia cinetică a descărcării în baia activă ultrasonoră. Rezultatele arată o creștere semnificativă a ratei de îndepărtare a materialului și de îmbunătățire a suprafeței.

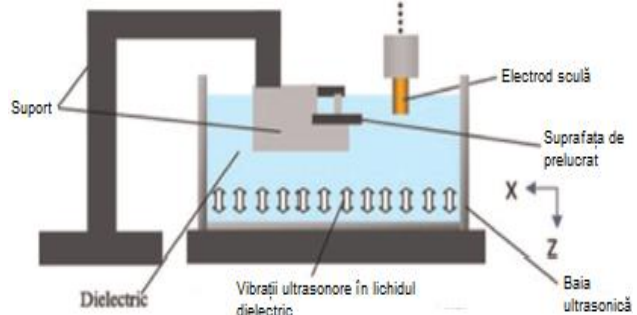


Fig.3 Baie ultrasonică în micro-EDM (Bharat C Khatri ș.a., 2015)

Schubert a raportat despre scufundarea vibrațiilor sonotrode în dielectric și aranjarea lor în așa fel încât intensitatea mare de lângă câmpul ultrasonic este aliniat cu zona de prelucrare (figura 4), care cresc viteza procesului.

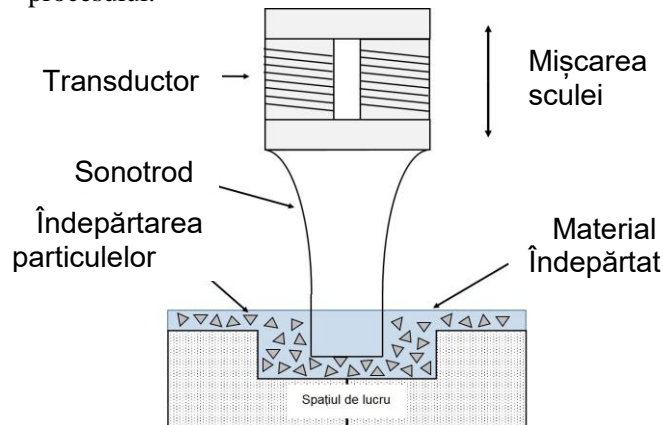


Fig.4 Sonotrod ultrasonic în micro-EDM (Hubert Heldner, 2016)

Prof. Daniel Ghiculescu a dezvoltat un echipament pentru WEDM care a crescut rata de prelucrare prin efectul de cavitație produs prin oscilațiile longitudinale ale unui lanț acustic imersat în lichid dielectric. Lichidul dielectric conținut într-un buncăr păstrează poziția relativă între piesa de lucru și electrodul constant fără a afecta precizia. Ichikawa și Natsu au experimentat efectele aplicării vibrațiilor ultrasonore asupra fluidului de prelucrare în micro-EDM. A

rezultat o creștere semnificativă a vitezei de prelucrare (Bharat C Khatri ș.a., 2015).

3 STRUCTURA LANȚURILOR ULTRASONICE PENTRU ASISTAREA MICRO-ELECTROEROZIUNII

3.1 Instalații de prelucrare cu ultrasunete (Ghiculescu Daniel, 2004)

Pentru înțelegerea integrării unui lanț ultrasonic în cadrul instalațiilor de prelucrare microEDM se va prezenta inițial schema constructivă a unei astfel de instalații.

Structura simplificată a unui asemenea lanț ultrasonic este prezentată în fig. 5 unde: 1 este bucușă reflectantă; 2 – transductor piezoceramic; 3– bucușă radiantă; 4 – concentrator în trepte; 5 – electrodul-șculă.

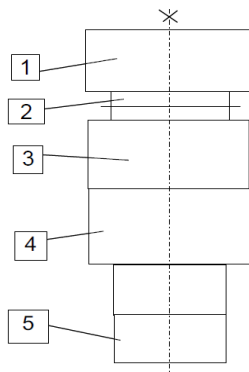


Fig. 5. Structura lanțului ultrasonic utilizat la EDM+US (Ghiculescu Daniel, 2004)

Generatorul de ultrasunete transformă frecvența industrială de 50 Hz a curentului alternativ de la rețea în frecvență ultrasonică ce este aplicată transductorului, element component al blocului ultrasonic. Blocul ultrasonic transformă energia electrică cu frecvență ultrasonică primită de la generatorul US în energie mecanică de oscilație cu frecvență ultrasonoră. Transductoarele folosite pentru realizarea conversiei energiei pot fi: electromecanice (electromagnetice, magnetostrictive, piezoelectrice), aerodinamice, hidrodinamice. Pentru prelucrări dimensionale sunt folosite transductoare ale căror dimensiuni vor varia sub acțiunea unui câmp magnetic variabil în cazul transductoarelor magnetostrictive, respectiv a unui câmp electric variabil în cazul transductoarelor piezoceramice.

Apariția transductoarelor de tip sandwich a condus la o utilizare cât mai largă a transductoarelor piezoceramice, oferind avantaje precum: consum mic de material piezoceramic, tensiune mai mică de alimentare pentru aceeași intensitate a câmpului creat, transfer rapid de căldură spre exterior.

Această construcție sandwich constă în integrarea unuia sau mai multor elemente din material

piezoelectric între două componente din materiale care nu sunt piezoelectrice. Construcția unor tipuri de transductoare sandwich este evidențiată în figura 6.

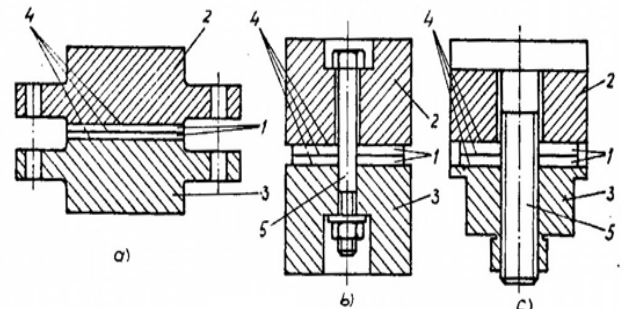


Fig. 6 Tipuri de transductoare sandwich (Ghiculescu Daniel, 2004)

- a) asamblare de tip flanșă;
- b) asamblare cu șurub central;
- c) asamblare cu șurub "T".

Semnificația numerelor de poziție din cadrul figurii 6 este următoarea:

- 1 - elemente piezoceramice;
- 2 - element reflectant din oțel;
- 3 - element radiant din duraluminiu;
- 4 - garnituri din cupru prin intermediul cărora se va conecta generatorul US;
- 5 - șurub de strângere.

Amplificarea vibrațiilor transductorului se poate obține prin realizarea elementelor reflectant și radiant din materiale cu densități și module de elasticitate E diferite, având în vedere faptul că acel element realizat din material caracterizat prin valoare mai mică a produsului ρE va oscila cu amplitudine mai mare.

Pentru a obține amplitudinea maximă a oscilațiilor la ieșirea din transductor, lungimile elementelor reflectant și radiant trebuie să fie egale cu un sfert din lungimea de undă.

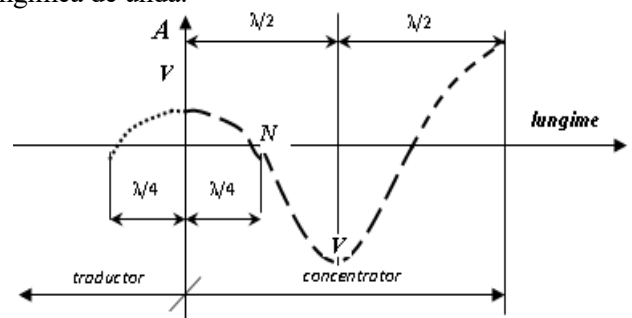


Fig. 7. Poziția nodurilor și venturilor în lanțul ultraacustic (Ghiculescu Daniel, 2004)

La montarea lanțului ultraacustic pe capul de lucru al mașinii se face ținând cont de poziția nodurilor în lanț. Fig.7. Se pot astfel aplica următoarele montaje (Fig.8):

- a) transductor susținut pe un suport tip cuțit poziționat într-un punct nodal;
- b) concentratorul este susținut de o placă, disc sau flanșă poziționată într-un punct nodal;

c) lanțul ultraacustic este susținut de un cilindru de lungime $\lambda/4$ poziționat într-un antinod (ventru).

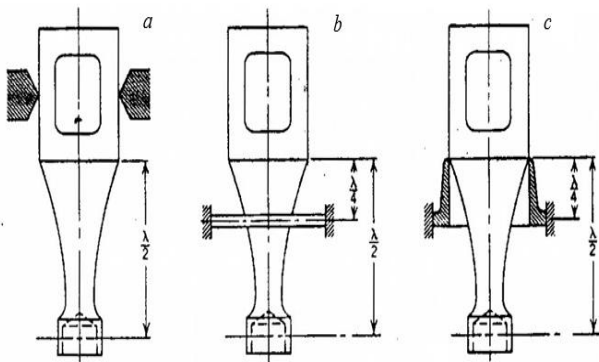


Fig. 8. Soluții pentru montarea lanțului ultraacustic pe capul de lucru (Ghiculescu Daniel, 2004)

Concentratoarele US au rolul de a concentra energia de oscilație și de a mări amplitudinea vibrațiilor la capătul lanțului ultraacustic. Astfel, se obține o amplitudine ridicată de oscilație a sculei, crescând randamentul prelucrării. Formulele de calcul pentru lungimea concentratoarelor variază, dar este impus ca pentru obținerea amplitudinii maxime la capătul lanțului ultrasonic, să se folosească lungimi obținute prin multiplicarea dimensiunii $\lambda/2$.

Funcționarea lanțului ultraacustic cu amplitudine maximă impune obținerea condiției de rezonanță. Această condiție impune ca frecvența proprie a lanțului ultraacustic să se încadreze în domeniul de frecvențe furnizat de generatorul US, astfel încât, în urma reglajului frecvenței f a acestuia, să se suprapună valorile celor două frecvențe f și f_0 . Parametrul f_0 depinde de lungimea, L , a concentratorului. După stabilirea teoretică a lungimii L , se vor realiza modificări succesive ale acesteia până la obținerea condiției de rezonanță $f = f_0$. Se urmărește ca frecvența proprie a concentratorului (f_{conc}) să coincidă cu frecvența proprie a transductorului (f_{tr}), acest lucru realizându-se prin ajustarea iterativă a lungimii L a concentratorului.

În practică sunt utilizate diverse forme și dimensiuni pentru modelarea concentratoarelor, (Fig.8.1), (Ghiculescu Daniel, 2004):

- (a) conic;
- (b) cilindric în trepte;
- (c) exponențial;
- (d) catenoidal;
- (e) în serie Fourier;
- (f) cilindric cu exponențial;
- (g), (h), (i), (j) cilindric-conic-exponențial;
- (k), (l) în trepte;
- (n) cu secțiune transversală dreptunghiulară variabilă axial după o lege exponențială;
- (m) cu suprafața exterioară cilindrică și cea interioară variabilă axial după o lege exponențială

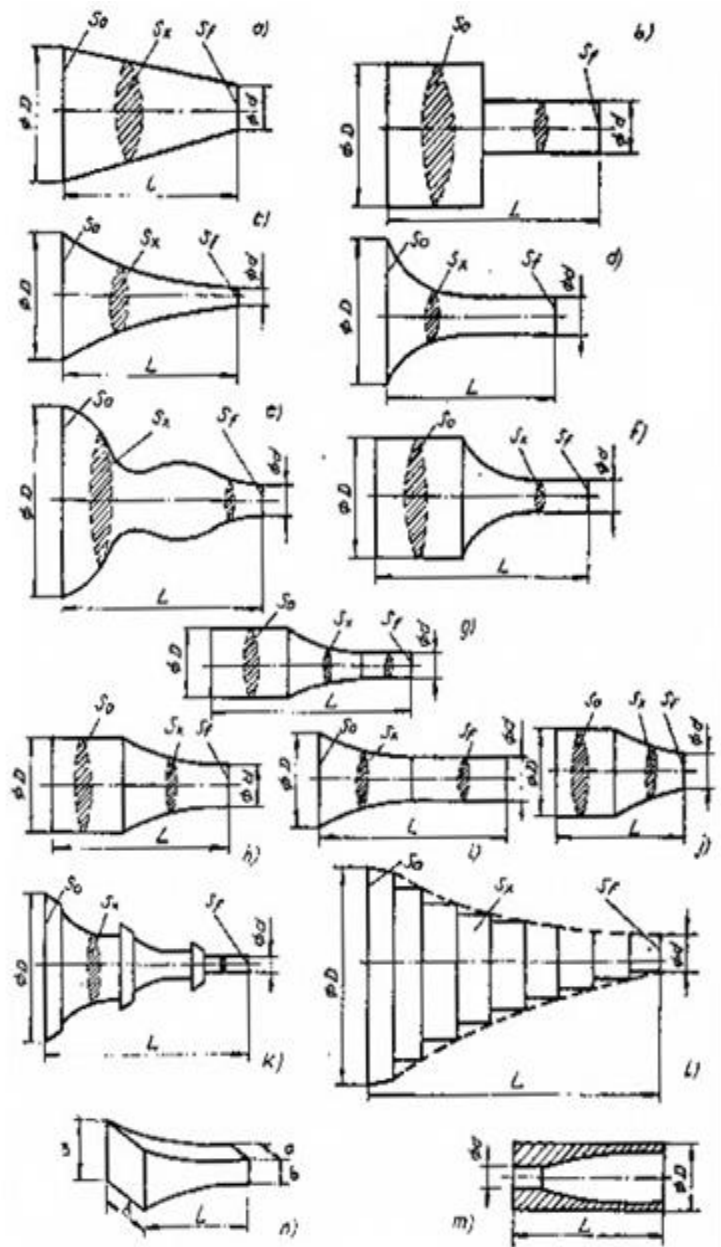


Fig.8.1. Tipuri de concentratoare: (Ghiculescu Daniel, 2004)

3.2 Date de intrare la modelarea cu MEF a unui lanț US pentru asistarea EDM (Ghiculescu Daniel, 2013)

Se va considera într-o fază inițială construcția concentratorului de tip cilindric în 2 trepte pentru care se cunosc și s-au calculat următoarele date:

- diametrul bușei radiante $\phi=35$ mm;
- Frecvența inițială a concentratorului $f_{concentrator}= 40000$ Hz;
- material concentrator OLC45 $\rho=7850$ g/dm³;
- Modul de elasticitate $E= 2.1 \cdot 10^{11}$;
- Viteza sunetului în oțel 5172.194153 m/s;
- Lungimea de undă $\lambda=0.129304854$ m;
- alpha $\alpha = 48.56739569$ m⁻¹;
- lungimea treptei inferioare $l_1= 30.88$ mm;
- Lungimea treptei superioare $l_2=32.94$ mm;
- Raza treptei inferioare $r_1=10$ mm;
- Raza treptei superioare $r_2= 17.5$ mm;

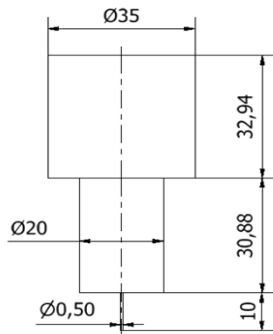


Fig. 9. Dimensiunile concentratorului pentru modelarea cu MEF

Scopul modelării concentratoarelor prin MEF este de a reduce timpul de pregătire a fabricației și de a anticipa modul de funcționare a lanțului ultrasonic la frecvența de rezonanță. Modelarea concentratorului se va realiza prin intermediul software-ului specializat COMSOL Multiphysics 4.2, accesând succesiv modulele: 2D, Structural Mechanics, Solid Mechanics, Eigenfrequency.

Se vor introduce inițial parametrii care vor defini profilul 2D al concentratorului Fig (11), în secțiunea Global Definitions (Fig.10).

Name	Expression	Value	Description
l1	30.88 [mm]	0.03088 m	lungime treapta inferioara
r1	10 [mm]	0.01 m	raza treapta inferioara
l2	32.94 [mm]	0.03294 m	lungime treapta superioara
r2	17.5 [mm]	0.0175 m	raza treapta superioara
rr	r2-r1	0.0075 m	raza racordare
modulE	2.1e11	2.1E11	modul elasticitate oțel OLC45
ro	7850	7850	densitate oțel OLC45

Fig. 10. Parametrii definiți în Global Definitions

Trecerea între cele două trepte ale concentratorului se va face prin intermediul unei raze de racordare pentru evitarea apariției unor concentratori de tensiuni. Sunt introduse condițiile la limită în Physics fără constrângeri mecanice, pentru calculul frecvenței proprii a concentratorului, (Fig.11)

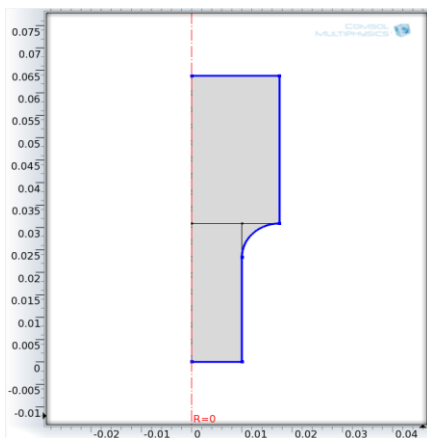
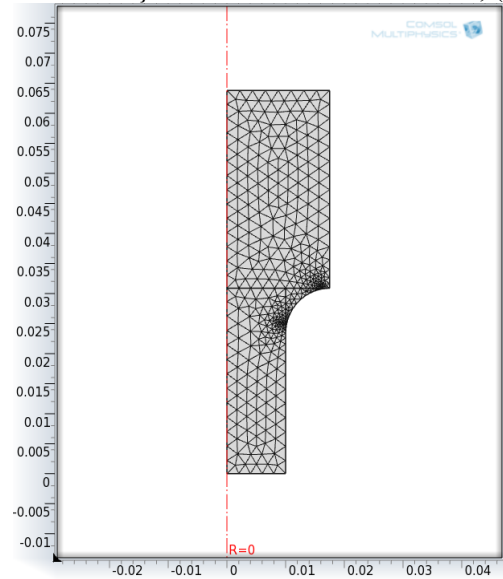


Fig. 11. Geometria concentratorului în trepte. Condițiile la limită pentru determinarea frecvenței proprii a concentratorului

Elementele triunghiulare vor fi elementele finite prin intermediul cărora se va realiza discretizarea, fiind prezentată și calitatea corespunzătoare obținută, accesând funcția Statistics din meniul Mesh, (Fig.12).



Statistics	
Complete mesh	
Element type:	All elements
Triangular elements:	759
Edge elements:	118
Vertex elements:	8
- Domain element statistics -	
Number of elements:	759
Minimum element quality:	0.06798
Average element quality:	0.9593
Element area ratio:	0.001777
Mesh area:	8.974E-4 m ²

Fig. 12. Discretizarea cu elemente triunghiulare și calitatea acestora (Ghiculescu Daniel, 2013)

Se va apela acum funcția Study din meniul Model Builder, pentru care s-a stabilit frecvența proprie de 40000 Hz, (Fig.13).

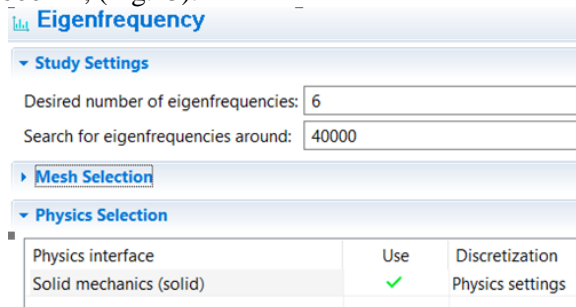


Fig. 13. Apelarea funcției Study și stabilirea parametrilor (Ghiculescu Daniel, 2013)

Într-un regim dinamic, cu două poziții limită ale deformațiilor (minime Fig. 14 și maxime Fig 15), este determinată frecvența proprie a concentratorului. În ambele poziții se poate observa existența unui punct cu deformații minime, punct ce constituie un punct nodal, care poate fi utilizat ca zonă de prindere a lanțului acustic cu șuruburi radiale.

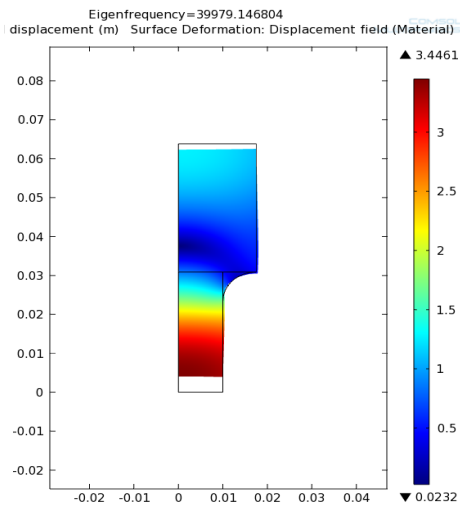


Fig. 14. Frecvența proprie și deformațiile minime

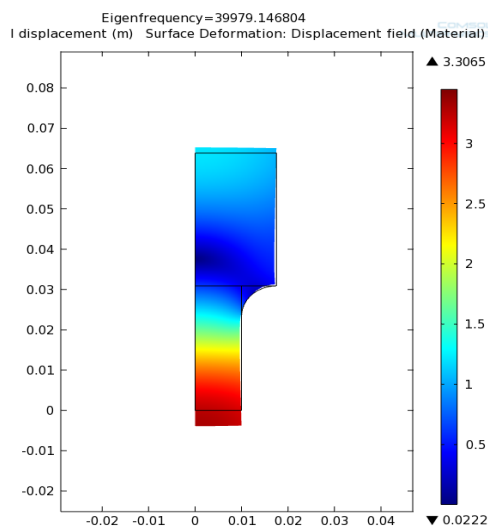


Fig. 15. Frecvența proprie și deformațiile maxime

Frecvența proprie a concentratorului obținută în Comsol este de 39979 Hz și este apropiată de cea inițială rezultată din măsurătorile vitezei sunetului în materialul concentratorului, ceea ce permite acceptarea modelului. Prin scurtarea iterativă a valorilor lungimilor celor două trepte ale concentratorului va rezulta o frecvență egală sau foarte apropiată de frecvența transductorului. Pe baza acestui algoritm de calcul se va modifica concentratorul actual și se va verifica obținerea condiției de rezonanță.

Se va încerca trecerea de la concentratorul cilindric în trepte la un concentrator conic, trecând prin mai multe schimbări de conicitate și adăugând alte elemente din cadrul lanțului, precum scula și prezonul de prindere (Fig.16), ale căror parametrii se vor introduce în lista Parameters.

Este de dorit ca diametrul secțiunii părții de ieșire să fie cât mai redus, în cazul studiat, să atingă valoarea de 4 mm, pentru reducerea concentratorului de tensiune la trecerea de la concentrator la scula. Pentru aceasta, conicitatea pe lungimea treptei de ieșire trebuie să fie de 17.5° . (Fig. 17)

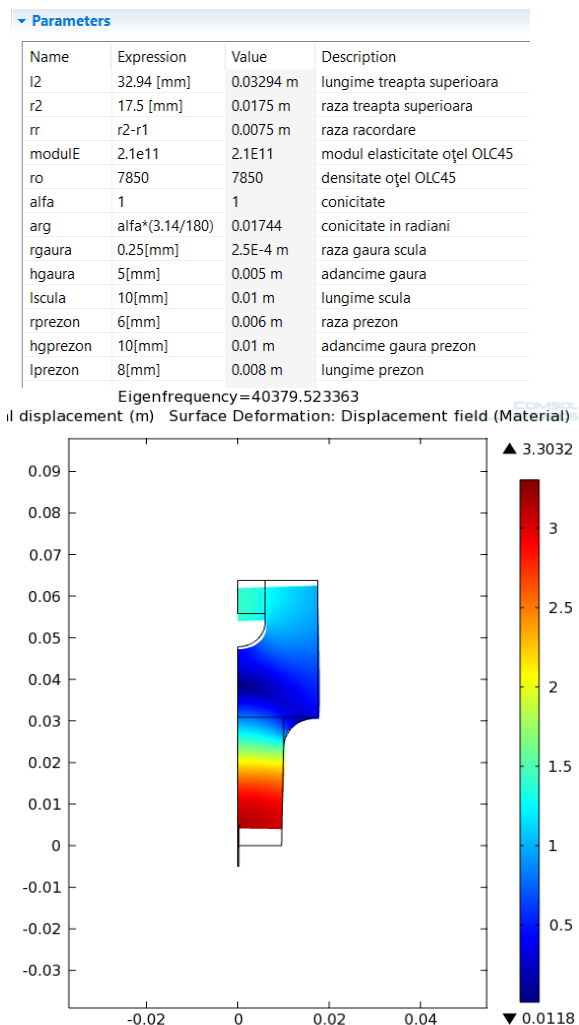


Fig. 16. Frecvența proprie și deformațiile minime, cu o conicitate de 1° , incluzând prezonul și scula.

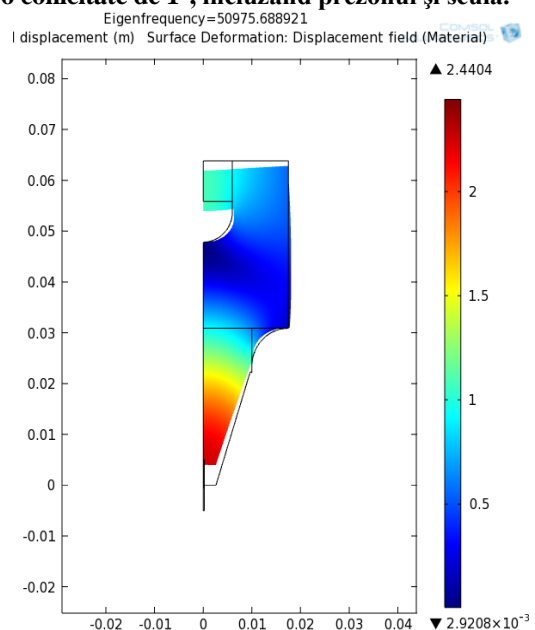


Fig.17. Frecvența proprie și deformațiile minime, cu o conicitate de 17.5° , incluzând prezonul și scula.

Se observă că în acest caz se obține o frecvență proprie a concentratorului mult mai mare decât cea dorită, fapt ce conduce la micșorarea conicității la 12.5°

și creșterea lungimii trepte inferioare cu valoarea de 10 mm. La această nouă lungime a trepte inferioare, pentru obținerea diametrului secțiunii de ieșire a concentratorului în jurul valorii de 4 mm, este necesară o conicitate de aproximativ 15°, fiind o valoare uzuală a conicității. Menținerea acestor valori impune însă creșterea lungimii trepte superioare cu 20 mm pentru a obține o frecvență proprie apropiată de valoarea țintă, (Fig. 18).

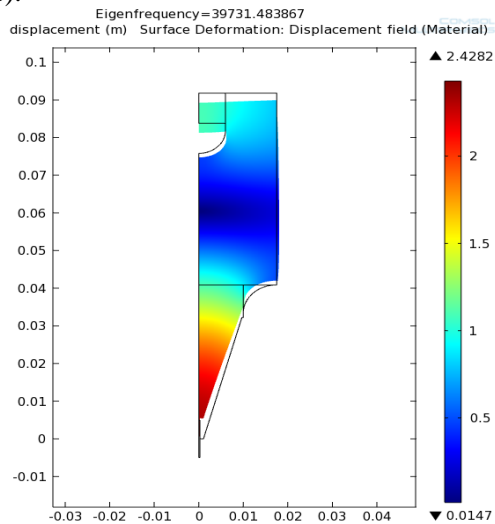


Fig.18. Frecvența proprie și deformațiile minime, cu o conicitate de 15°, incluzând prezonul și scula, cu creșterea lungimii trepte superioare cu 20 mm, (l_1+10 mm, l_2+20 mm).

Se vor realiza corectări prin reducerea iterativă a lungimii trepte superioare până se obține o frecvență cât mai apropiată de frecvența de referință, (Fig. 19)

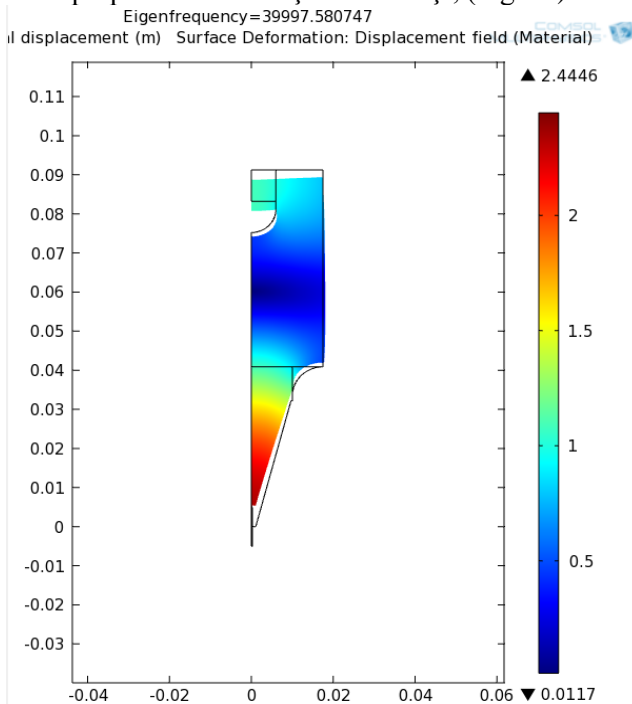


Fig.19. Frecvența proprie, cu o conicitate de 15°, incluzând prezonul și scula, cu creșterea lungimii trepte superioare cu 17.41 mm, față de valoarea inițială., (l_1+10 mm, $l_2+17.41$ mm).

Se va practica acum un canal nodal, (Fig.20), a cărei poziție pe axa Z să fie în punctul nodal, (valoare pe axa Z considerată $z_{\text{canal}} = 0.0605$ m).

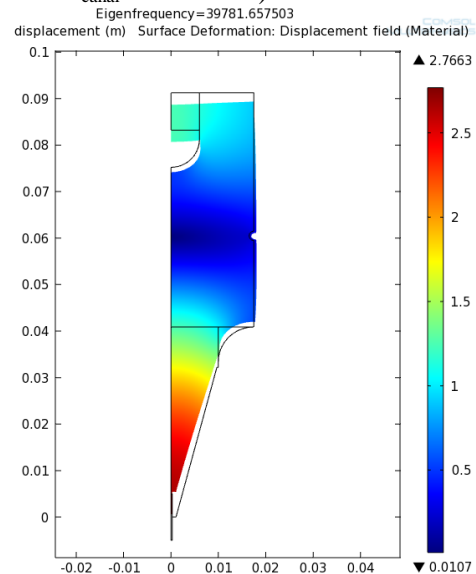


Fig.20. Frecvența proprie și deformațiile minime, cu o conicitate de 15°, incluzând prezonul,scula și canalul nodal, cu creșterea lungimii trepte superioare cu 17.41 mm, (l_1+10 mm, $l_2+17.41$ mm).

Se vor efectua scurtări iterative ale trepte superioare, până la obținerea frecvenței proprii a concentratorului la valoarea de referință, (Fig. 21).

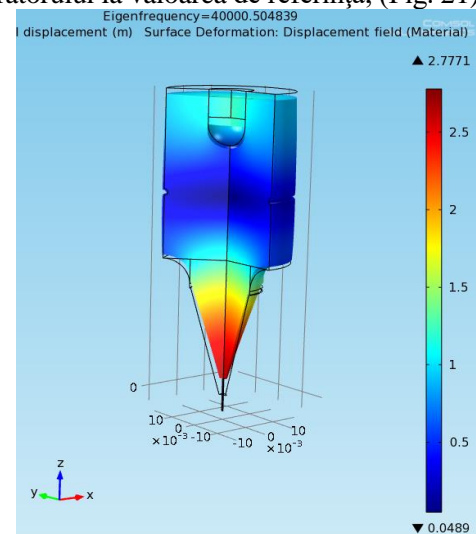


Fig.21. Frecvența proprie și deformațiile minime, cu o conicitate de 15°, incluzând prezonul, scula și canalul nodal, (l_1+10 mm, $l_2+16.925$ mm).

Se va avea în vedere și respectarea raportului dintre lungimile inițiale ale celor două trepte ale concentratorului, fapt ce implică o creștere sau o micșorare a acestora cu aceeași valoare. Astfel, pornind de la lungimile inițiale, se vor mări cu 14.12 mm rezultând $l_1=45$ mm și $l_2=47.06$. S-a obținut o conicitate de 12° pentru aceste lungimi. Prin scurtări iterative ale lungimii l_2 , a rezultat o valoare optimă pentru lungimea acesteia egală cu 42.78 mm.

Frecvența finală proprie a concentratorului, obținută pe baza valorilor variabilelor stabilite anterior, este de 40000.91 Hz, (Fig.22).

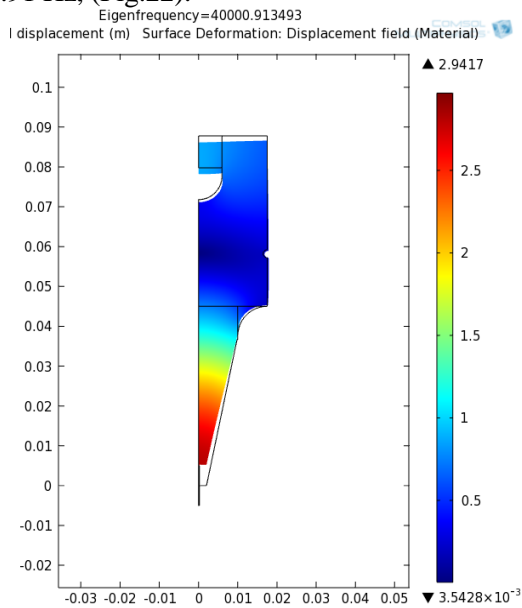


Fig.22. Frecvența proprie și deformațiile minime, cu o conicitate de 12°, incluzând prezonul și scula, cu $l_1=45$ mm, $l_2= 42.78$ mm, cu punct nodal la $z=0.0582$ m.

Valoarea z a punctului nodal este returnată de Software-ul Comsol, oferind coordonatele punctului în care deformațiile sunt minime, (Fig. 23)

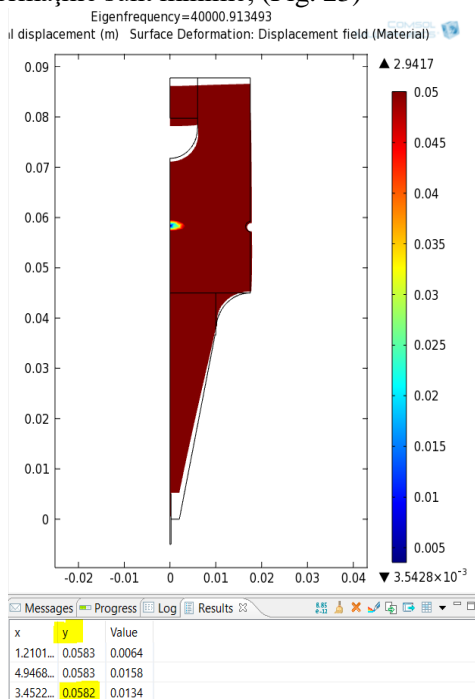


Fig. 23. Coordonatele punctului nodal

Legătura dintre sculă și concentrator se va face prin lipire cu argint depus pe suprafața frontală, conform instrucțiunilor realizate de Hubert Heldner, (Hubert Heldner, 2016) , (Fig. 24).

După stabilirea valorilor optime ale variabilelor, (Fig.25), se va executa concentratorul fizic, urmând a se monta lanțul ultrasonic, (Fig.26).

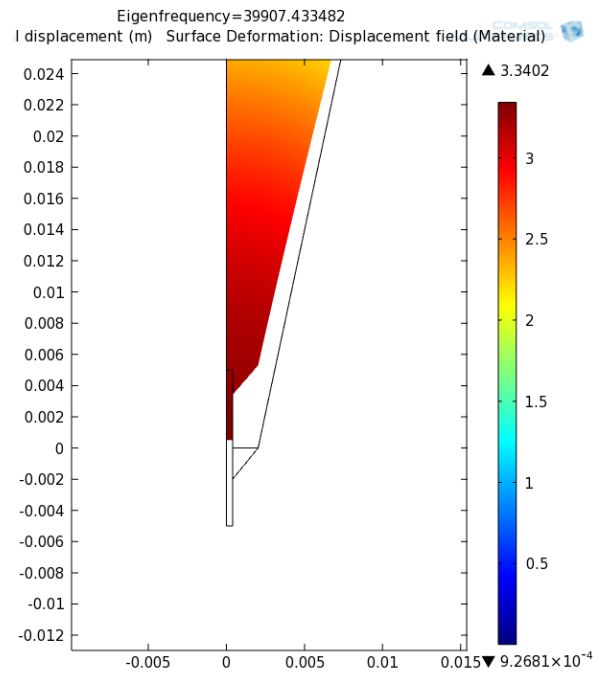


Fig. 24. Frecvența proprie după realizarea lipiturii cu argint.

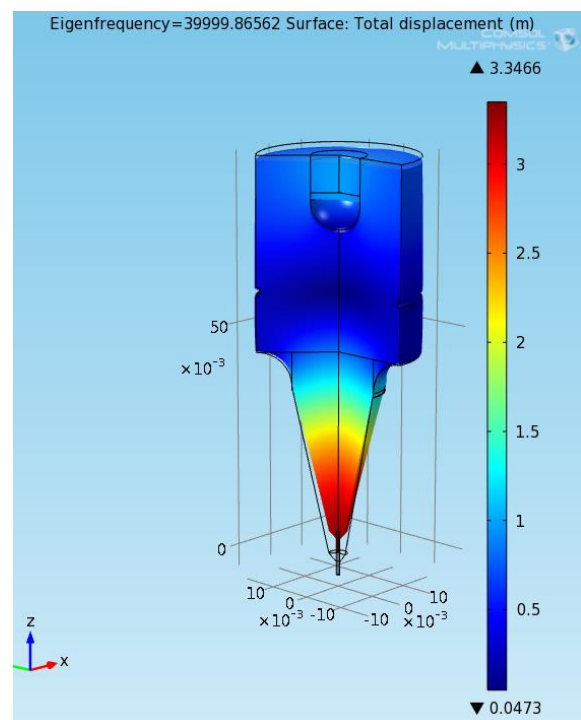


Fig.25. Frecvența proprie și deformațiile minime după corectarea iterativă în minus a lungimii treptei superioare a concentratorului., ($l_1=45$ mm, $l_2=42.495$ mm, conicitate 12°)

În figura 26 se poate observa și modul în care electrodul filiform a fost solidarizat de corpul concentratorului, prin depunere de argint pe suprafața frontală a acestuia.

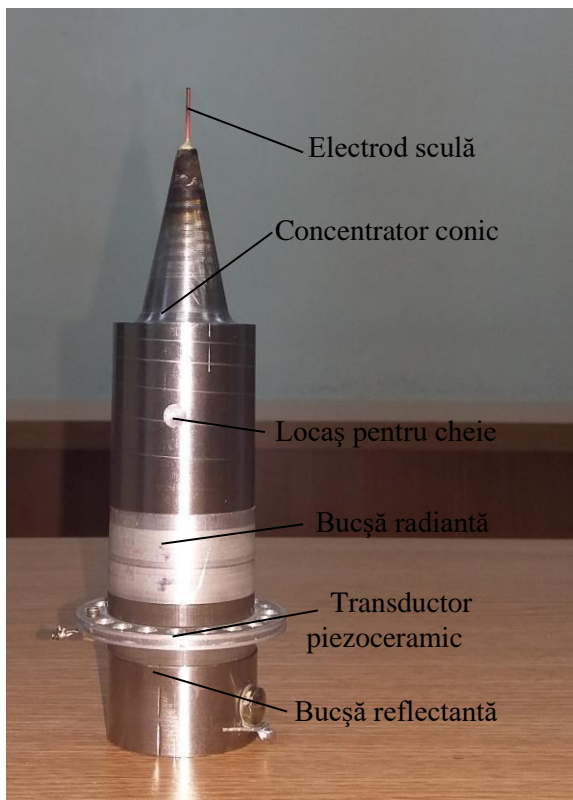


Fig.26. Construcția lanțului ultrasonic

Testarea efectivă a lanțului ultrasonic se va realiza prin legarea acestuia la un generator ultrasonic. Acesta furnizează un semnal sinusoidal cu amplitudinea de maximum 1 V și frecvență reglabilă în intervalul 1 Hz – 60 Mhz, frecvență afișată pe panoul frontal cu ajutorul unui circuit LCD. Cu ajutorul unui laptop la care se conectează un modul de achiziție Handyscope tip HS4 DIFF, se va stabili frecvența lanțului ultrasonic, (Fig.27).



Fig.27. Afișarea frecvenței lanțului ultrasonic

4 CONCLUZII

Cu ajutorul unui software specializat, se poate analiza frecvența proprie a concentratorului încă din stadiile inițiale ale modelării acestuia. Se analizează influența tuturor elementelor constructive asupra variației frecvenței proprii, în scopul atingerii condiției de rezonanță a lanțului US.

Rezultatele oferite de software-ul utilizat sunt foarte apropiate de rezultatele obținute în practică.

5 BIBLIOGRAFIE

[1]. Bharat C Khatri, Pravin Rathod și Janak B Valaki. (2015), *Ultrasonic vibration–assisted electric discharge machining: A research review*, Editură ImechE.

[2]. Saeed Zare Chavoshi, Xichun Luo. (9 Martie 2015), “Hybrid micro-machining processes: A review”, Centre for Precision Manufacturing, Department of Design, Manufacture and Engineering Management, University of Strathclyde, Glasgow G1 1XJ, UK.

[3]. Leo Rakowski (6/15/2002). *Non-Traditional Methods For Making Small Holes*, disponibil la: <http://www.mmsonline.com/articles/non-traditional-methods-for-making-small-holes> Accesat la data: 22.4.2017.

[4]. Ghiculescu Daniel,(2004), *Prelucrări neconvenționale*,Editura Printech, București, ISBN 973-652-975-4.

[5]. Ghiculescu Daniel, (2013), *Inginerie și fabricare asistată de calculator în domeniul prelucrărilor neconvenționale. Îndrumar de laborator*, Editura Printech, București, ISBN 978-606-521-971-7.

[6]. Hubert Heldner, (2016), *Ultrasonic drilling machine*, disponibil la adresa: www.freeform.ch/tools/manual-sonic-en.pdf, accesat la data: 25.04.2017.

[7]. J. Wamai (2014) Effect of Low Frequency Vibration in Electrical Discharge Machining of AlSiC Metal Matrix Composite https://www.researchgate.net/profile/James_Wamai/publication/282764484/figure/fig1/AS:391740885356547@1470409713146/Fig-2-EDM-set-up-with-ultrasonic-vibration-and-assisting-electrode.jpg, accesat la data: 05.05.2017.

[8]. Professor V.S. Sreebalaji and Dr. R. Saravanan (2010) TRIZ & UEDM <https://triz-journal.com/triz-ultrasonic-aided-electrical-discharge-machining/>, accesat la data: 05.05.2017.

[9]. Ultrasonic machining https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic_machining, accesat la data: 05.05.2017.