

Raportul științific și tehnic,

privind studiile și cercetările efectuate în etapa II/2017, în cadrul proiectului Bridge Grant:

„Dezvoltarea posibilităților de prelucrare a materialelor compozite avansate

prin tăiere de precizie cu jet de apă” – PreMCo

Contract nr. 99BG/01.10.2016

În cadrul Etapei II, conform obiectivelor propuse pentru faza actuală s-au realizat următoarele:

1. Soluționarea principalei probleme apărute în timpul prelucrării materialelor compozite cu jet de apă și anume delaminarea materialului în timpul găuririi:

- Simularea procesului de găurire utilizând Analiza cu Elemente Finite (FEA) pentru identificarea solicitărilor care apar în timpul procesului;
- Realizarea de studii experimentale pentru identificarea factorilor care generează fenomenul de delaminare;
- Dezvoltarea unor proceduri de lucru și propunerea unor seturi de parametri optimi;
- Proiectarea și fabricarea unui nou sistem de alimentare cu agent abraziv, capabil să elimine în proporție de 95% riscul de delaminare a materialului.

2. Soluționarea problemei de identificare a parametrilor optimi de proces pentru obținerea calității suprafeței și a preciziei de prelucrare cerute. Optimizarea parametrilor s-a realizat prin modelarea matematică a procesului:

- Identificarea metodei optime de planificare a experimentelor: alegerea principalilor parametri de intrare (viteza de avans, presiunea și grosimea materialului), alegerea parametrilor de ieșire (precizia dimensională și calitatea suprafeței), programarea experimentelor;
- Prelucrarea seturilor de epruvete, măsurarea rezultatelor și analiza microscopică;
- Realizarea de studii, privind influența parametrilor de proces asupra caracteristicilor de calitate;
- Dezvoltarea unor noi modele matematice pentru calculul parametrilor optimi de proces. Testarea și validarea modelelor. Pregătirea acestor modele matematice pentru aplicarea lor în mediul industrial.

3. Soluționarea problemelor generate de inerția jetului abraziv în timpul tăierii:

- Realizarea de studii experimentale privind optimizarea modului în care jetul abraziv abordează conturul de tăiat, în vederea eliminării erorilor de formă care apar în acel punct.
- Dezvoltarea unor strategii de prelucrare și propunerea unor seturi de parametrii optimi. Rezultatele acestei cercetări se continuă în etapa III a proiectului și vor fi prezentate în raportul acelei etape.

4. Realizarea a 5 lucrări științifice dintre care mai reprezentative:

- Ioan Alexandru POPAN, Nicolae BÂLC, Alina Ioana POPAN, *Preliminary study on occurrence of composite material delamination processed by abrasive water jet cutting*, MSE 2017;
- Ioan Alexandru Popan, Alina Popan, *Experimental study on manufacturing complex parts from composite materials using water jet cutting*, Acta Technica Napocensis 2017;
- Ioan Alexandru POPAN, Glad CONȚIU, Ian CAMPBELL, *Investigation on standoff distance influence on kerf characteristics in abrasive water jet cutting of composite materials*, MteM 2017;

5. Realizarea a trei lucrări de licență și una de disertație:

- *Cercetări privind optimizarea procesului de găurire cu jet de apă a materialelor compozite (Research regarding the optimization of drilling process of carbon fiber reinforced polymer processed with water jet)* Krisztian P. Martin, îndrumător S.L. Dr. Ing. Popan Alexandru;
- *Cercetări privind optimizarea strategiilor de intrare și ieșire din conturul pieselor din materiale compozite tăiate cu jet de apă (Research regarding the optimization of Lead in and Out strategies from the contour of parts made out of composite material cut with waterjet)* Lupse Paul Mihai, îndrumător S.L. Dr. Ing. Popan Alexandru;
- *Studiul experimental privind refabricarea pieselor din materiale compozite prin tăiere cu jet de apă (Experimental study on reverse engineering in case of composite materials cut by Water Jet Cutting)* Zeries Mihaela Alexandra, îndrumător S.L. Dr. Ing. Popan Alexandru;
- *Dezvoltarea și realizarea unui dispozitiv robotizat de debavurat*, Târziu Lucian îndrumător S.L. Dr. Ing. Popan Alexandru.

6. Propunerea a două teme de licență, cu finalizare în anul 2018.

7. În cadrul Etapei II, conform obiectivelor propuse pentru faza actuală s-a realizat un stagiul de practică pe durata a trei săptămâni după cum urmează:

- La acest stagiu de practică au participat un număr de trei studenți: Barb Alexandra; Bud Helen, Neag Sorin din anul II, specializarea TCM în limba Germană.
- Acest stagiu s-a desfășurat la sediul agentului economic partener în cadrul proiectului, S.C. Trambus S. R. L. din Cluj Napoca, în perioada 03.07- 24.07.2017.

Activitățile desfășurate pe durată acestui stagiu de practica au fost următoarele:

- În prima săptămână studenții s-au familiarizat cu activitatea și organizarea firmei, li s-a făcut protecția muncii și li s-au prezentat tehnologiile utilizate. Aceștia au învățat noțiunile de bază despre tehnologia de tăiere cu jet de apă, caracteristicile și particularitățile acestui proces.
- În a doua săptămână studenții au aprofundat programul de desenare *SolidWorks*, au învățat programul de optimizare a croiului de tăiere și pregătire a fabricației, *Tecnocam*. S-a făcut o prezentare a limbajului de programe CNC (G cod) utilizat pentru acest tip de echipament și a modului de calcul al parametrilor de proces.
- În ultimă săptămână s-a realizat o pregătire practică pe mașină Tecnocut Milestone 1740 din dotarea agentului economic. În prima parte li s-a prezentat modul de operare a echipamentului, modul de fixare a semifabricatelor, setarea originii și ajustarea parametrilor. Aceștia au fabricat câte o piesă de formă complexă din material compozit, analizând precizia de tăiere și calitatea suprafeței.

Toate obiectivele specifice și activitățile prevăzute pentru prezenta etapă au fost realizate integral.

1. Soluționarea problemei, de delaminare a materialului compozit, apărute în timpul găuririi cu jet de apă

Principală problemă identificată în tăierea materialelor compozite cu jet de apă și agent abraziv este delaminarea materialelor compozite MC. Acest fenomen constă în dezlipirea straturilor din care este compus MC, sub impactul cu jetul de apă de înaltă presiune. Firmele care prelucrează MC prin TJA au o reală problemă în a nu distruge materialul în timpul tăierii. Astfel marii utilizatori de MC din industria aeronautică cum ar fi Airbus și Boeing nu acceptă găurirea MC cu jet de apă, și impun pregaurire cu burghiu, iar din gaura realizată astfel trebuie începută TJA a pieselor.

1.1 Studii preliminare privind apariția fenomenului de delaminare în timpul TJA

Primul pas în această cercetare a fost realizarea unor studii experimentale privind TJA a MC. Pe baza studiului bibliografic realizat s-au identificat următoarele metode de prelucrare a pieselor complexe din MC prin acesta tehnologie: găurire și tăiere cu jet de apă cu înaltă presiune; găurire cu presiune scăzută și tăiere cu presiune înaltă, respectiv pregaurire cu burghiu și tăiere cu presiune înaltă. Pentru acest studiu s-a ales o piesă fabricată de firma parteneră în proiect, piesă care le creează probleme datorită delaminării. Piesa are dimensiune exterioară de 60 mm, grosime de 5 mm, și este realizată din material compozit armat cu fibră de carbon, figura 1.1.a.

I: Găurire și tăiere cu jet de apă cu înaltă presiune. Pentru acest experiment s-au utilizat următorii parametri: viteza de avans $V = 300$ mm/min; presiunea apei $P = 350$ MPa și un debit de abraziv de $Ma = 0.45$ Kg/min. În cazul acesta s-a obținut o delaminare a materialului de 60 mm, practic a distrus piesa așa cum se poate observa în figura 1.1.b.

II: Găurire cu presiune scăzută și tăiere cu presiune înaltă. În acest caz au fost utilizați următorii parametri: viteza de avans $V = 300$ mm/min; presiunea apei la găurire $P = 200$ MPa, presiunea apei la tăiere $P = 380$ MPa și un debit de abraziv de $Ma = 0.45$ Kg/min. În acest caz s-a măsurat o delaminare de 6 mm, figura 1.1.c.

III: Pregaurire cu burghiu și tăiere cu presiune înaltă. În acest experiment s-au realizat în punctele de începere a tăierii, găuri cu un burghiu. Astfel tăierea a început din acele găuri,

eliminând astfel găurirea cu jetul de apă. Parametrii utilizații sunt cei din primul experiment. În acest caz nu s-a observat apariția delaminării, figura 1.1.d.

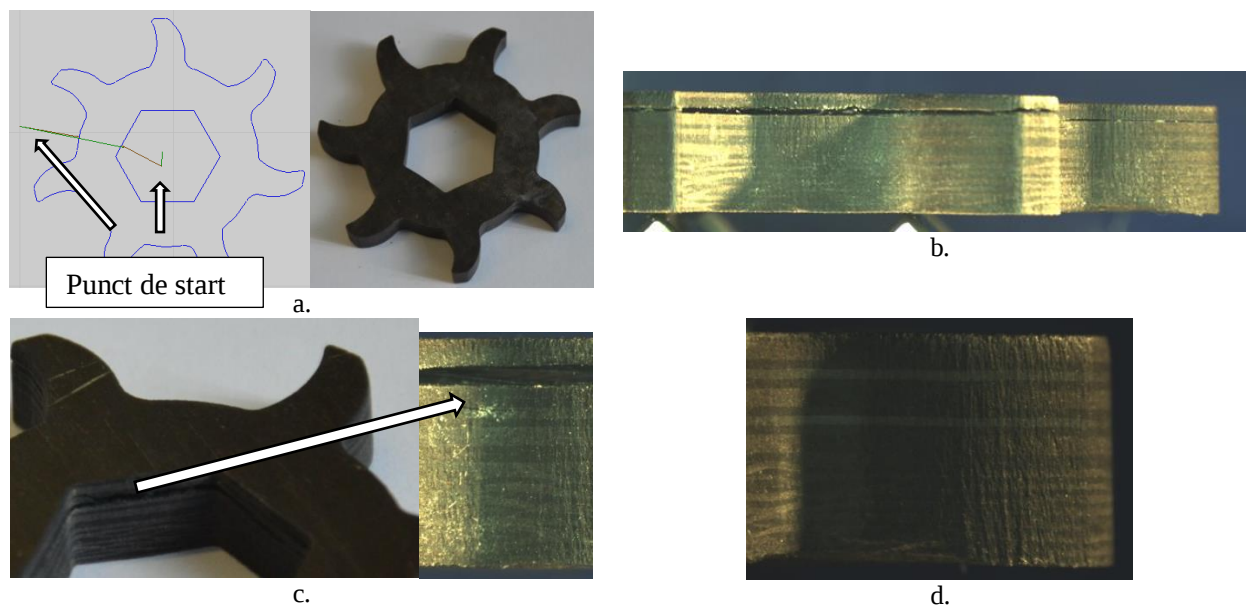


Fig. 1.1. Studiile preliminare privind apariția fenomenului de delaminare

Pornind de la acest studiu experimental putem concluziona următoarele:

- Găurire și tăiere cu jet de apă cu înaltă presiune ($P = 350 \text{ MPa}$) nu este o soluție pentru prelucrarea MC datorită delaminării puternice a materialului în timpul primului impact dintre material și jetul de apă.
- Soluția de tăiere perfect funcțională, pregaurire cu burghiu și tăiere cu presiune înaltă are dezavantajul introducerii operației de găurire cu burghiu. Acesta implică ca pe utilajul de TJA să existe un dispozitiv de găurire cu burghiu. Costurile suplimentare a acestui mod de prelucrare sunt generate de timpul de găurire (aproximativ 10-60 secunde/gaură), costul burghiilor și al dispozitivului de găurire. Prin eliminarea pregauririi cu burghiu s-ar putea reduce costurile de tăiere cu până la 10%.
- Tendința în acest domeniu este de eliminare a pregauririi și de realizare a întregii piese prin găurire și tăiere cu jet de apă. Astfel în studiul realizat s-a observat că delaminarea MC apare doar în momentul găuririi nu și în timpul tăierii conturului. Prin scăderea presiunii jetului de apă la găurire de la 380 la 200 MPa s-a obținut o scădere a lungimii delaminării de la peste 60 la 6 mm.

1.1 Simularea procesului de găurire cu jet de apă prin Analiza cu Elemente Finite

Prelucrările cu jet de apă și agent abraziv (tăiere, găurire, frezare și strunjire) sunt prezente în aplicațiile industriale uzuale de mai puțin de 20 ani, astfel nefiind o tehnologie pe deplin înțeleasă și stăpânită. Dificultatea înțelegerii fenomenelor fizice care apar în timpul procesului este dată de numărul mare de parametri ai procesului. Prelucrarea cu jet de apă se desfășoară în trei părți: pornirea jetului, prelucrarea efectivă și oprirea jetului. Principala problemă întâlnită la prelucrarea materialelor casante (sticlă, ceramică, marmură) sau a materialelor compozite stratificate, apare în timpul pornirii jetului de apă, care acționează cu o energie foarte mare asupra piesei de prelucrat, ducând la fisurarea materialelor casant, respectiv delaminarea materialelor în straturi.

Pentru analiza fenomenelor care apar în timpul impactului dintre materialul compozit și jetul de apă de înaltă presiune s-a realizat o simulare utilizând Analiza cu Elemente Finite (FEA). Simularea procesului s-a realizat utilizând programul ANSYS.

Modelarea

Pentru simularea impactului dintre jetul de apă și materialul compozit sunt parcurși următorii pași:

- Primul pas în această simulare este calculul vitezei cu care jetul de apă lovește MC. Pentru determinarea acestei viteze se utilizează ecuația lui Bernoulli, astfel pe bază presiunii jetului se obține viteza cu care fluidul iese din tubul de focalizare. Pentru validarea rezultatelor simulării, în simulare s-au utilizat aceleași parametri și aceleași condiții ca și cele din prelucrarea efectivă pe mașina de tăiere cu jet de apă. Astfel parametri utilizați sunt prezentați în tabelul 1.

Tab. 1. Parametrii utilizați în simulare

Parametru	Valoare
Presiune jetului de apă, MPa	100-350
Diametrul duzei, mm	0.33
Diametrul tubului de focalizare, mm	1.02
Distanța dintre capul de tăiere și semifabricat, mm	0.2
Viteza jetului, m/s	100, 150, 200, 250, 300, 350

- Aproximând viteza granulelor abrazive ca fiind aceeași cu viteza jetului de apă, s-a asimilat jetul de apă cu o sferă care se deplasează cu o anumită viteză ce lovește MC.
- Dimensiunea sferei este egală cu dimensiunea interioară a tubului de focalizare (1.02 mm), considerând că pe distanța dintre capul de tăiere și materialul de prelucrat (0.2 mm) jetul își păstrează forma. Caracteristicile jetului utilizate în simulare sunt a unei bile de nedeformabile.
- Materialul utilizat în cadrul acestei simulări este un material compozit armat cu fibre de carbon, caracteristicile materialului compozit sunt prezentate în tabelul 2.

Tab. 2. Caracteristicile mecanice ale materialului compozit

Material	Modulul lui Young [Pa]	Poisson ratio	Densitatea [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
CPRF	Directia X 1.21E+11	XY - 0.27	1490
	Directia Y 8.6E+09	YZ - 0.4	
	Directia Z 8.6E+09	XZ - 0.27	

Pentru realizarea simulării a fost utilizat programul ANSYS 16.0, respectiv modulul de simulare dinamică a impactului „Explicit Dynamics”. În figura 1.2 este ilustrat interfața aplicației de simulare.

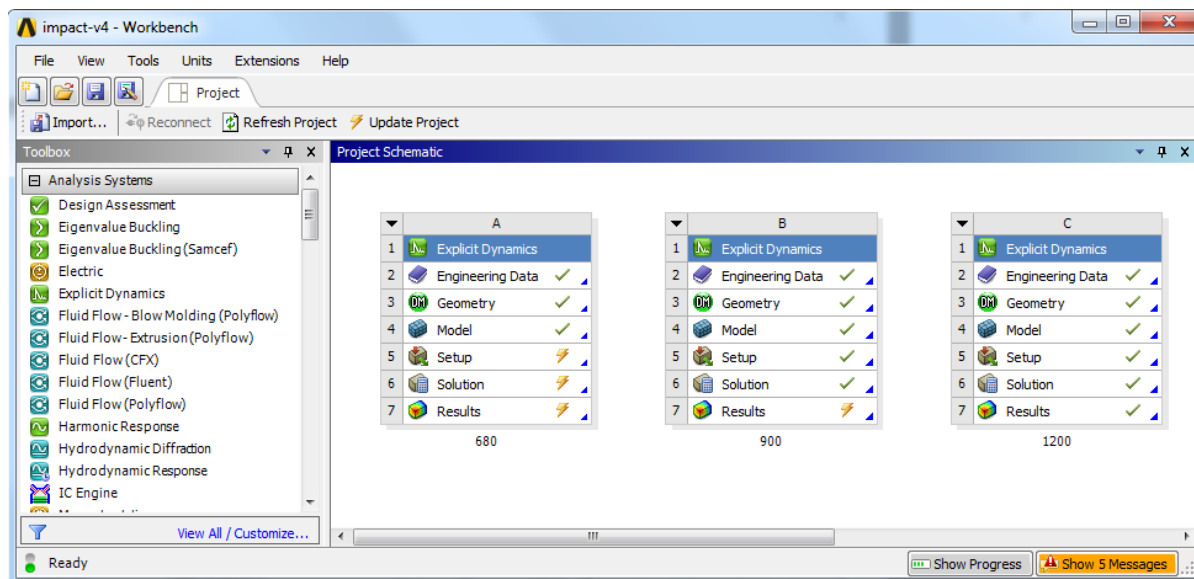


Fig. 1.2. Interfața programul ANSYS 16.0, modulul „Explicit Dynamics”

- Dimensiunea modelului din material compozit are dimensiunea de 20 x 20 x 3 mm, așa cum este ilustrată în figura 1.3.

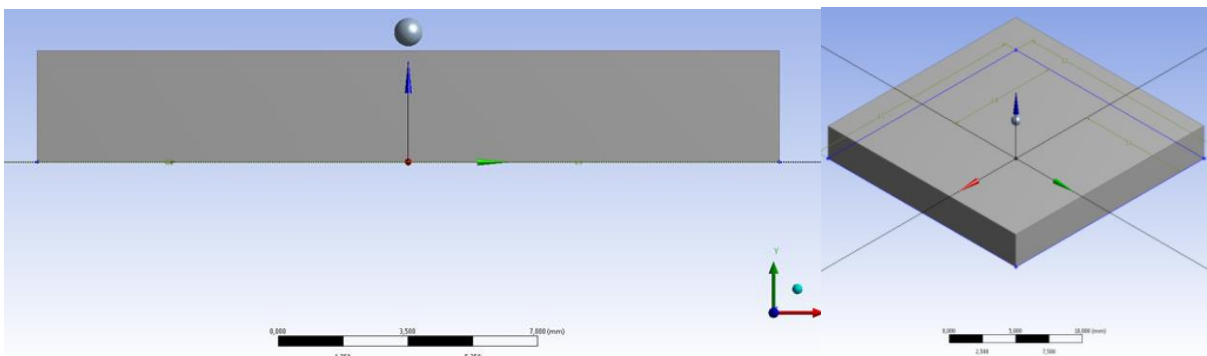


Fig. 1.3. Modelarea componentelor simulării (epruveta și bila)

- Pentru discretizarea modelului geometric, din biblioteca Ansys, a fost ales elementul finit Solid45. S-a utilizat atât discretizarea automată, cât și discretizarea manuală. În figura 1.4 este prezentat modelul discretizat.

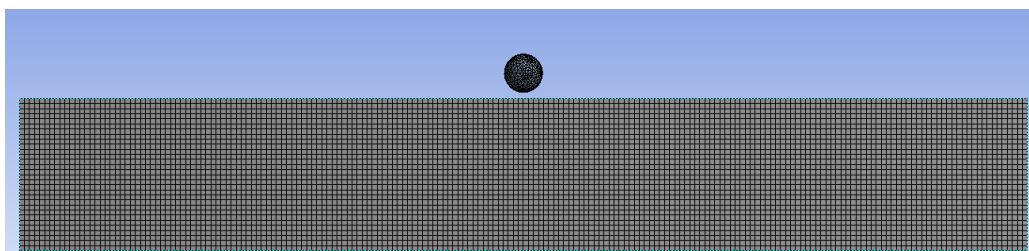
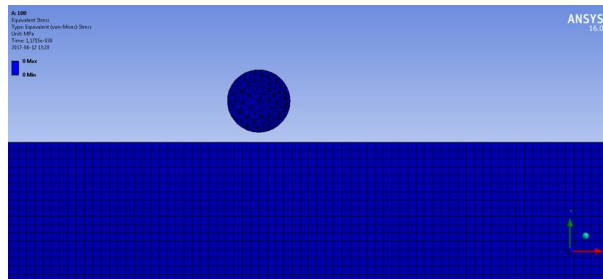


Fig. 1.4. Discretizarea modelului geometric

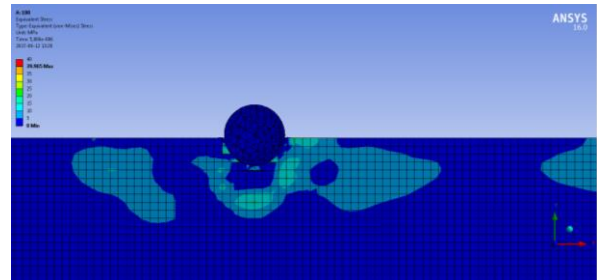
Rezultate obținute

Scopul analizelor dinamice efectuate la impactul dintre jetul de apă și materialul compozit este determinarea tensiunilor și deformațiilor care apar în material. În cazul tensiunilor s-a optat pentru prezentarea tensiunilor calculate potrivit criteriului von-Misses.

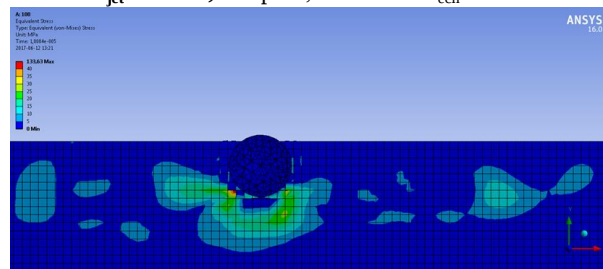
Distribuția și evoluția tensiunii echivalente von Misses σ_{ech} MPa pentru diferite viteze ale jetului V_{jet} : 100, 200 și 250 m/s sunt ilustrate în figura 1.5.



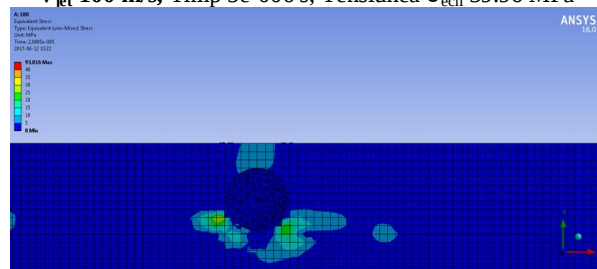
V_{jet} 100 m/s, Timp 0 s, Tensiunea σ_{ech} 0 MPa



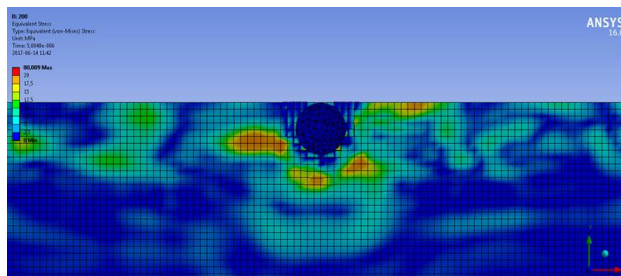
V_{jet} 100 m/s, Timp 5e-006 s, Tensiunea σ_{ech} 39.96 MPa



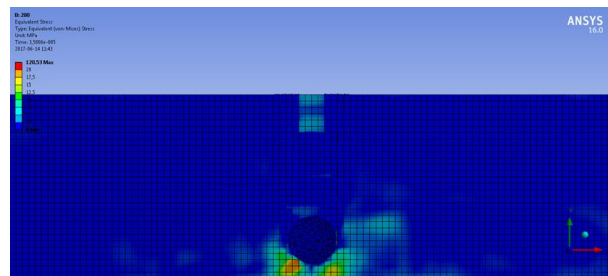
V_{jet} 100 m/s, Timp 1e-005 s, Tensiunea σ_{ech} 133.63 MPa



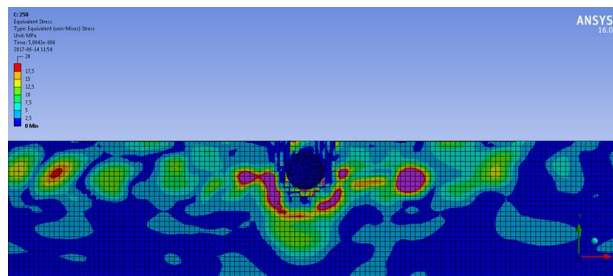
V_{jet} 100 m/s, Timp 2e-005 s, Tensiunea σ_{ech} 93.81 MPa



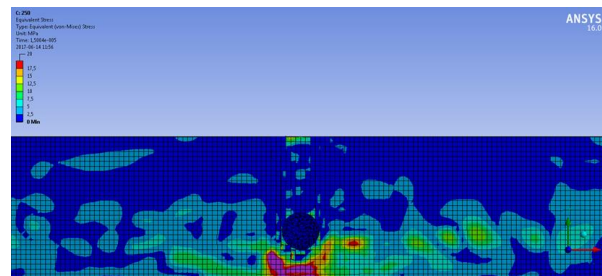
V_{jet} 200 m/s, Timp 5e-006 s, Tensiunea σ_{ech} 180 MPa



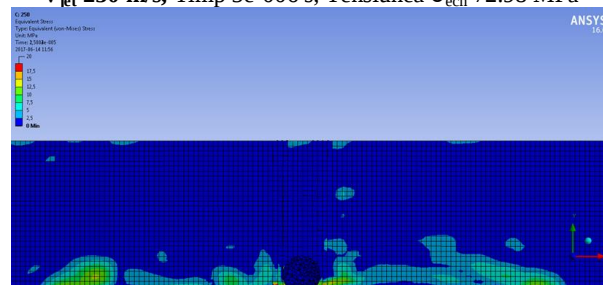
V_{jet} 200 m/s, Timp 3.5e-005 s, Tensiunea σ_{ech} 120 MPa



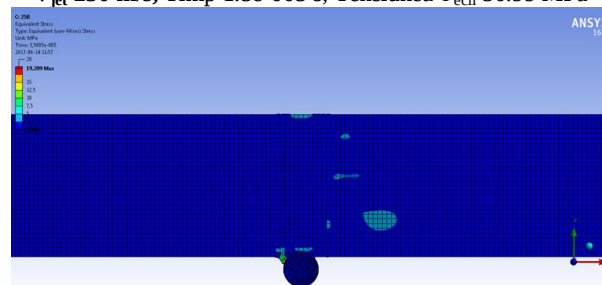
V_{jet} 250 m/s, Timp 5e-006 s, Tensiunea σ_{ech} 72.98 MPa



V_{jet} 250 m/s, Timp 1.5e-005 s, Tensiunea σ_{ech} 50.99 MPa



V_{jet} 250 m/s, Timp 2.5e-005 s, Tensiunea σ_{ech} 311.54 MPa



V_{jet} 250 m/s, Timp: 3.5e-005 s, Tensiunea σ_{ech} 19.28 MPa

Fig. 1.5. Distribuția tensiunii echivalente von Mises σ_{ech} MPa

Distribuția și evoluția deformațiilor elastice pentru diferite viteze ale jetului V_{jet} : 100, 200 și 250 m/s sunt ilustrate în figura 1.6.

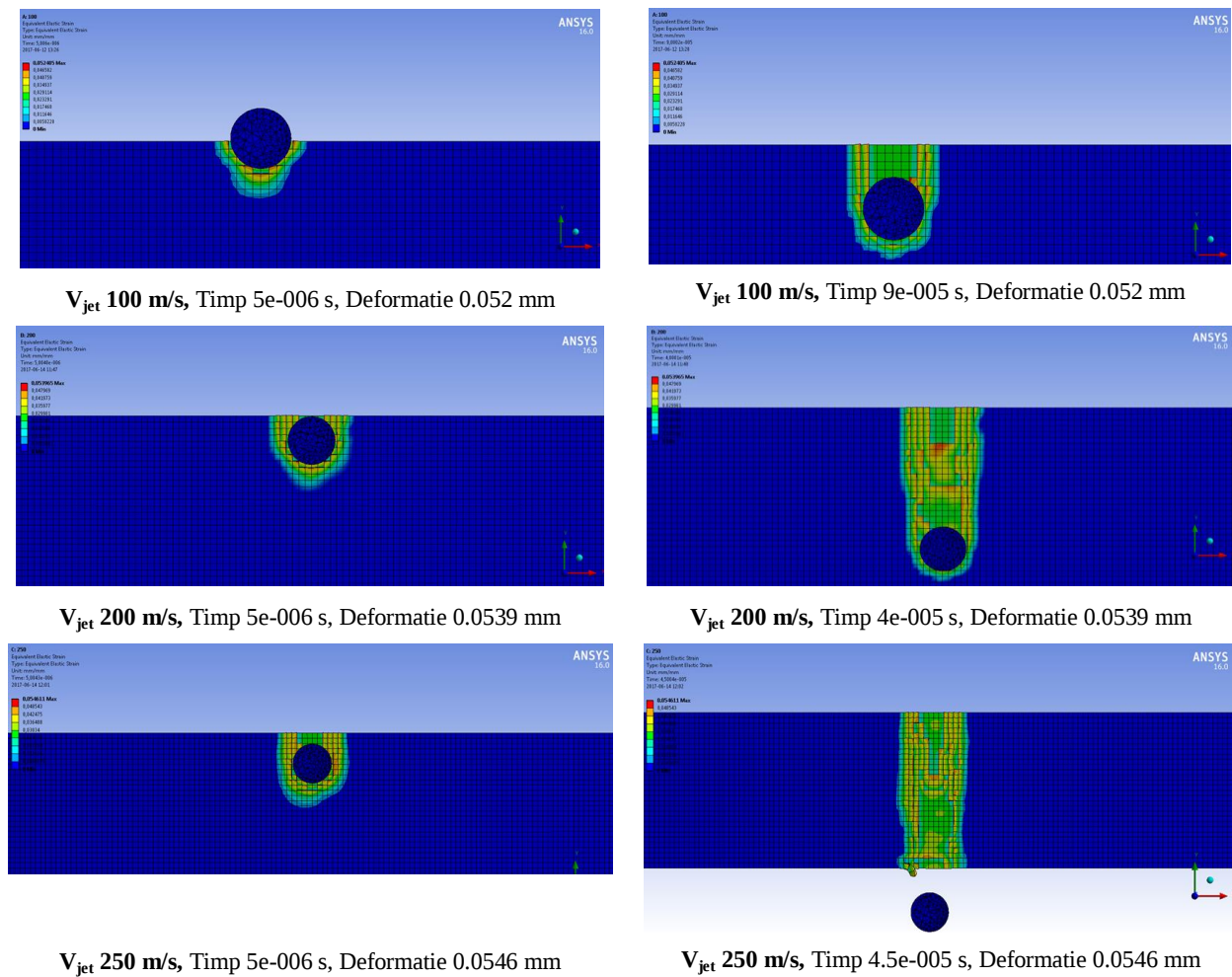


Fig. 1.6. Distribuția deformației elastice

Cazul 1 viteza jetului V_{jet} 100 m/s:

- Pentru o viteză a jetului de V_{jet} 100 m/s, jetul a penetrat materialul într-un procent de 60%.
- Tensiunea echivalentă von Mises maximă rezultată are valoare de 133 MPa.
- Deformația elastică maximă este de 0.052 mm.

Cazul 2 viteza jetului V_{jet} 200 m/s:

- Pentru o viteză a jetului de V_{jet} 200 m/s, jetul a penetrat materialul într-un procent de 90%.
- Tensiunea echivalentă von Mises maximă rezultată are valoare de 180 MPa.
- Deformația elastică maximă este de 0.0546 mm.

Cazul 3 viteza jetului V_{jet} 250 m/s:

- La o viteză a jetului de V_{jet} 250 m/s s-a observat penetrarea materialul pe toată grosimea.
- Tensiunea echivalentă von Mises maximă rezultată are valoare de 311 MPa.
- Deformația elastică maximă este de 0.0539 mm.

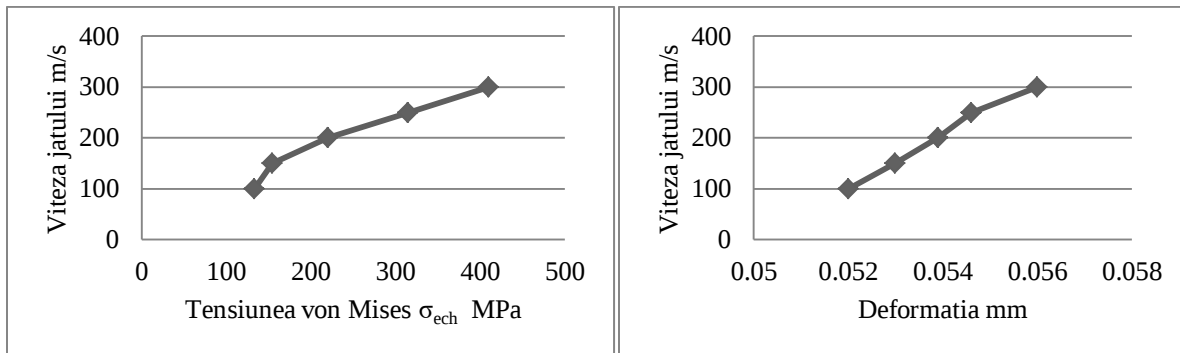


Fig. 1.7. Influența vitezei jetului asupra tensiunii și deformației elastice

Așa cum este ilustrat în figura 1.7 odată cu creșterea vitezei jetului de apă de la 100 la 300 m/s tensiunea echivalentă von Mises maximă rezultată crește de la 130 până la 410 MPa.

În cazul deformațiilor elastice apărute în materialul găurit, se poate concluziona că prin creșterea vitezei jetului de la 100 la 300 m/s, deformațiile cresc între 0.052 și 0.056 mm.

1.1 Analiza și optimizarea parametrilor procesului de găurire cu jet de apă

Pentru îmbunătățirea caracteristicilor de calitate a pieselor găurite cu jet de apă este importantă înțelegerea influenței parametrilor de proces asupra procesului și o modelare matematică a parametrilor.

Parametri de calitate ai procesului de găurire sunt gradul de delaminare și dimensiunile găurii, iar parametrii de proces analizați sunt: presiunea jetului, grosimea materialului prelucrat respectiv distanța dintre capul de prelucrare și semifabricat.

Scopul modelării matematice a procesului de găurire cu jet de apă a fost de a minimiza efectul de delaminare a materialului, respectiv calculul gradului de delaminare în funcție de parametrii de proces aleși.

Prin urmare s-a pornit de la forma generală a unor funcții pentru obținerea modelelor matematice:

$$D_{\text{extent}} = f(P, S_d)$$

unde:

D_{extent} - gradul de delaminare, mm; P – presiunea jetului de apă, MPa; S_d – distanța dintre capul de prelucrare și semifabricat, mm.

Modelele matematice se realizează cu ajutorul aplicațiilor software, care folosesc metode statistice. Pentru modelarea matematică a procesului de găurire cu jet de apă s-a optat pentru softul Design Expert.

Pentru obținerea, în urma experimentelor, a unor date cât mai precise și mai concludente, necesare optimizării procesului, s-a ales programarea central compozițională.

Variabilele independente au fost variate între:

- Presiunea: 100 - 350 MPa;
- Distanța dintre capul de prelucrare și semifabricat: 1 - 6 mm;
- Grosimea materialului prelucrat: 1 - 5 mm.

Prezentarea materialului compozit, utilizat în cadrul experimentelor

Materialul folosit pentru realizarea experimentelor este material compozit armat cu fibre de carbon pre-impregnate cu rășină epoxidică. Fibră de carbon unidirecțională, *Toray T700 SC* stratificat $\pm 45^\circ$ UD/s $\pm 45^\circ$ K s, 0.2 mm/strat, țesătura din fibră de carbon este de tip *Twill (Koper)* 2/2, 410 g/m² – 400 textură x 400 textură, grosime 0.6 mm/strat. Gradul de armare al matricei epoxidice este de 43%. Materialul a fost format prin vacuumare în autoclavă.

Efectuarea experimentelor

Primul pas în realizarea această cercetare a fost proiectare și fabricarea epruvetelor din material compozit. Astfel s-a proiectat o epruveta cu dimensiune de 50 x 50 mm, așa cum este ilustrată în figură 1.8. Pentru fixarea acesteia s-a proiectat dispozitivul de fixare din figura 1.9. Utilizând acest dispozitiv de fixare, epruvetele sunt așezate pe o suprafață plană, iar fixarea se face cu ajutorul unei asamblări cu filet.

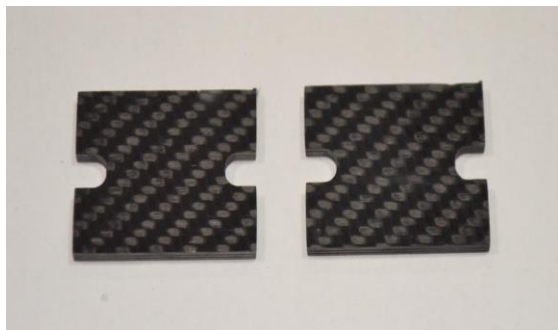


Fig. 1.8. Epruvetele utilizate



Fig. 1.9. Dispozitivul de fixare

Pentru realizarea cercetărilor experimentale s-au utilizat două echipamente de prelucrare cu jet de apă: unul este TECNOCUT Milestone din dotarea firmei partenere în proiect și unul este Omax 2626 din dotarea Universității Tehnice din Cluj Napoca (figura 1.10).



Datele tehnice ale echipamentului

TECNOCUT Milestone:

- Puterea instalată 45 kW;
- Presiunea maximă a fluidului – 410 MPa;
- Debitul maxim de apă – 5 l/min;
- Diametrul maxim - 0.4 mm;
- Dimensiunile mesei de lucru – 4000 x 1700 x 250 mm;



Datele tehnice ale echipamentului **Omax 2626:**

- Puterea instalată 31,5 kW;
- Presiunea maximă a fluidului – 410 MPa;
- Debitul maxim de apă – 4.54 l/min;
- Diametrul maxim - 0.41 mm;
- Dimensiunile mesei de lucru - 1168 x 787 mm;

Fig. 1.10. Echipamentele utilizate in cadrul cercetarilor

În cadrul acestui experiment s-au utilizat două tipuri de capuri de tăiere, principala diferență dintre ele este unghiul după care se introduce agentul abraziv în camera de amestec. Echipamentul TECNOCUT Milstone este echipat cu un cap de tăiere produs de Gardella S.r.l. de tip „Carat 3.0 diamond” cu unghiul de alimentare cu agent abraziv de 45° (figura 1.11), iar echipamentul Omax 2626 este echipat cu un cap de tăiere Omax „MAXJET 5”, având unghiul de alimentare cu agentul abraziv de 90° (figura 1.12). Acestea sunt principalele tipuri de capuri de tăiere utilizate în acest domeniu.

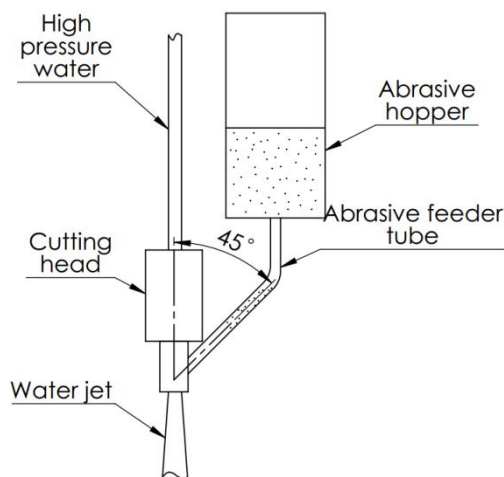


Fig. 1.11. Cap de tăiere cu alimentare cu agent abraziv la 45°

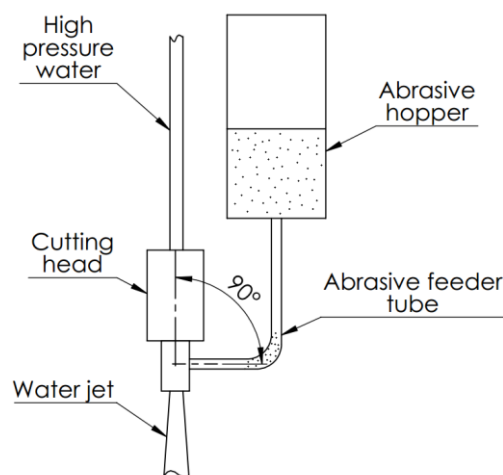


Fig. 1.12. Cap de tăiere cu alimentare cu agent abraziv la 90°

Ambele sisteme de tăiere utilizează duza din diamant, cu diametrul de 0.35 mm și un tub de focalizare din carbură Rotec 500, cu diametrul interior de 0.762 mm și lungime de 101 mm.

Epruvetele din material compozit au fost prelucrate conform cu planificarea experimentului. Fiecare experiment a fost repetat de 5 ori pentru a evita anumite erori. Pentru a fi siguri că eliminăm eventualele erori datorită uzurii elementelor sistemului de tăiere, au fost utilizate duze și tuburi de focalizare noi. Pentru verificarea sistemelor au fost tăiate piesele pentru testate și comparate cu piesele etalon livrate de producătorul mașinii.

În figura 1.13 și 1.14 sunt prezentate cele două sisteme de tăiere și modul de fixare al epruvetelor în timpul prelucrărilor.



Fig. 1.13. Capul de tăiere Omax MAXJET 5



Fig. 1.14. Capul de prelucrare Carat 3.0

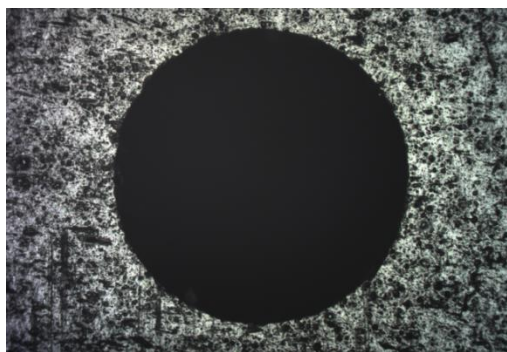


Fig. 1.15. Analiza microscopică a găurii

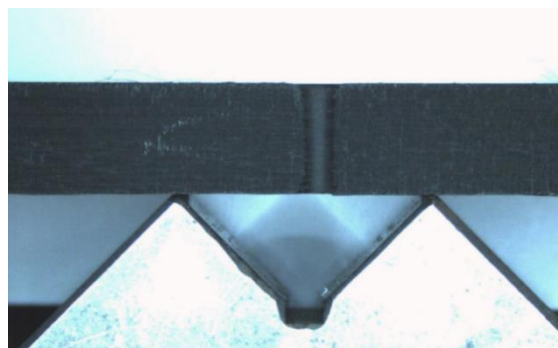


Fig. 1.16. Analiza gradului de delaminare

Pentru analiza și măsurarea rezultatelor obținute în cadrul acestor experimente au fost utilizate două microscopice optice. Microscopul optic Guhring PG 2000 (figura 1.17) a fost utilizat pentru măsurarea gradului de delaminare (figura 1.16). Prin utilizarea microscopului Optika IM-3MET (figura 1.18) din dotarea laboratorului TCM s-au măsurat dimensiunile și profilul găurilor, și s-au analizat suprafețele găurilor în vederea identificării defectelor survenite în timpul prelucrării (figura 1.15).



Fig. 1.17. Microscopul Guhring PG 2000



Fug. 1.18. Microscopul Optika IM-3MET

Analiza influenței parametrilor de proces asupra caracteristicilor de calitate a găurii jetului de apă și agentului abraziv

Pentru realizarea pieselor prin tăiere cu jet de apă și agent abraziv, la o calitate cât mai ridicată, este necesară înțelegerea influenței parametrilor de proces asupra caracteristicilor de calitate.

Pornind de la datele obținute experimental, s-a reprezentat grafic dependența dintre variabilele independente (presiune, distanță dintre capul de tăiere și semifabricat) și variabila dependentă: gradul de delaminare.

În figură 1.19 sunt prezentate câteva imagini obținute în urmă analizei microscopice, cu secțiunea epruvetelor. În cadrul acestor analize s-a observat că în anumite erpuvete, în fisură rezultată în urmă delaminării materialului a intrat agent abraziv.

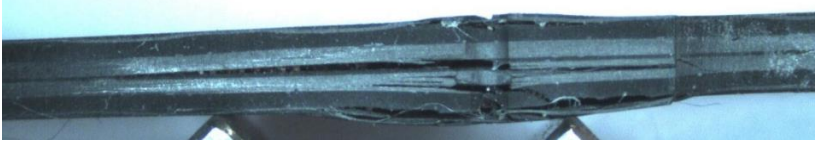
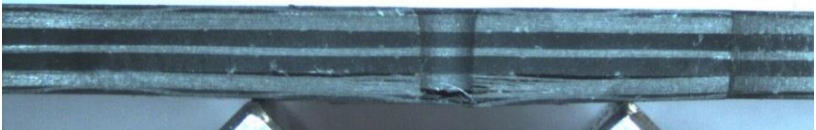
Parametri utilizati	Suprafetele analizate
P: 313 MPa S _d : 1.73 mm	
P: 100 MPa S _d : 3.5 mm	
P: 225 MPa S _d : 6 mm	

Fig. 1.19. Analiza microscopica a sectiunii

În figură 1.20 sunt prezentate imaginii microscopice cu găurile realizate. Astfel în zonă de intrare și de ieșire a jetului s-au observat mici ciupituri din suprafața materialului (0.1-1 mm). Prin reducerea presiunii jetului (100 MPa) și a distanței dintre capul de tăiere și semifabricat (0.5 mm) aceste defecte au fost minimizate.

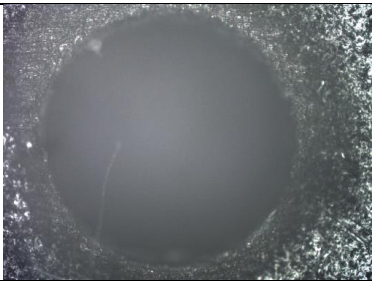
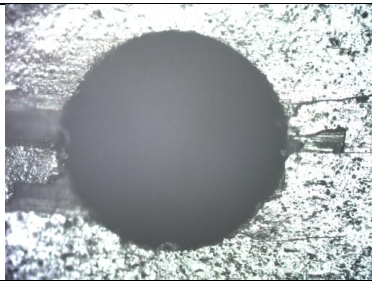
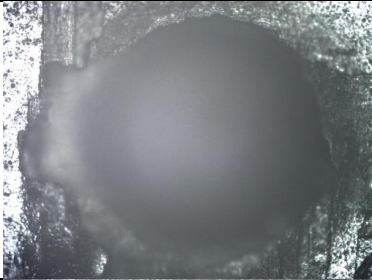
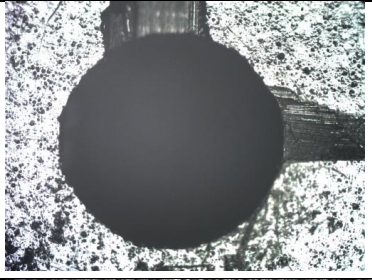
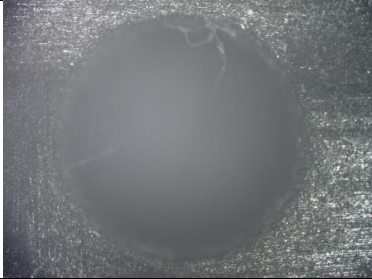
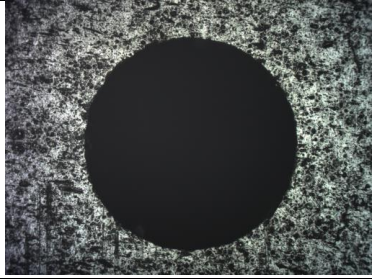
Parametri utilizati	Zona superioara	Zona inferioara
P: 136 MPa S _d : 5.27 mm		
P: 350 MPa S _d : 3.5 mm		
P: 100 MPa S _d : 3.5 mm		

Fig. 1.20. Analiza suprafețelor superioară / inferioară

În figură 1.22 este reprezentată dependența dintre gradul de delaminare (D_{extent} mm) și presiunea de lucru a jetului (P MPa). Intervalul de variație a presiunii este cuprins între 100 și 350 MPa, fiind utilizată o grosime a materialului de 3 mm și distanță dintre capul de prelucrare și semifabricat de 2 mm. Se observă că odată cu creșterea presiunii de lucru a jetului, gradul de delaminare D_{extent} crește de la 0 la 17.2 mm.

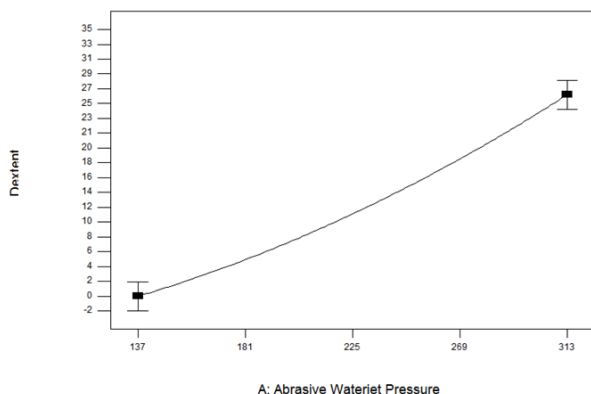


Fig. 1.21. Influența presiunii jetului de apă asupra gradului de delaminare D_{extent}

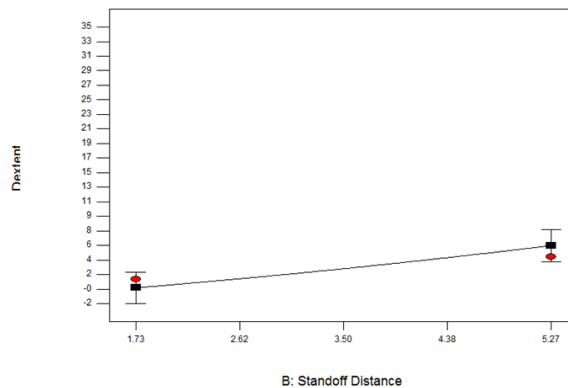


Fig. 1.22. Influența distanței dintre capul de tăiere și semifabricat asupra gradului de delaminare D_{extent}

Pentru a stabili relația de dependentă dintre gradul de delaminare (D_{extent} mm) și distanța dintre capul de tăiere și semifabricat (S_d mm), s-a utilizat o variație a parametrului distanță dintre capul de tăiere și semifabricat între 1 și 6 mm, grosimea materialului prelucrat de 3 mm, iar presiunea de lucru a jetului de 130 MPa. Figura 1.22 ilustrează că odată cu creșterea distanței dintre capul de tăiere și semifabricat, gradul de delaminare D_{extent} crește de la valoarea de 0.4 la 3.5 mm.

În urmă analizei influenței parametrilor de proces asupra parametrilor de calitate s-au constatat următoarele:

- Presiunea jetului:

- Creșterea valorii presiunii jetului de apă, gradul de delaminare crește. Presiunea jetului este parametrul care are influența cea mai puternică asupra delaminării materialului. Pentru minimizarea sau evitarea efectului de delaminare a materialului în timpul găuririi se recomandă utilizare unei presiuni cât mai scăzute, presiunea minimă care se poate regla pe echipament, aproximativ 100 MPa.

- Distanță dintre capul de prelucrare și semifabricat

- Prin creșterea distanței dintre capul de prelucrare și semifabricat s-a observat o creștere a gradului de delaminare. Distanță dintre capul de prelucrare și semifabricat are un efect mai scăzut în comparație cu presiunea jetului asupra delaminării materialului. Pentru minimizarea efectului de delaminare se recomandă o valoare cât mai scăzută a acestui parametru, 0.5-1 mm.

- Odată cu creșterea distanței dintre capul de prelucrare și semifabricat, diametrul și conicitatea găurii cresc, efect datorat pierderii formei jetului pe măsură ce se îndepărtează de duză.

Realizarea modelelor matematice de calcul a delaminării

Cu ajutorul metodei celor mai mici pătrate au fost stabilit ce tip de model matematic descrie cel mai bine relația dintre variabila dependentă (gradul de delaminare) și variabilele independente (presiunea jetului de apă, distanță dintre capul de tăiere și semifabricat). Astfel modelul matematic pentru calculul gradului de delaminare, în cazul echipamentelor dotate cu alientare cu abraziv la 90°, este unul de tip pătratic (2FI). Metodă ANOVA confirmă adecvanta modelului pătratic, iar valoarea Statisticii Fischer de 20.97 în cazul acestui model indică faptul că modelul este semnificativ.

Modelul matematic obținut pentru gradul de delaminare, pentru materialul compozit cu fibră de carbon, în funcție de parametrii procesului, este următorul:

$$D_{\text{extent}} = 12.68 + 12.63 \times P + 2.25 \times Sd - 0.6 \times P \times Sd + 2.39 \times P^2 + 0.27 \times Sd^2$$

Unde: D_{extent} gradul de delaminare, mm; P presiunea jetului de apă, MPa, Sd distanță dintre capul de tăiere și semifabricat, mm.

Pentru testarea modelului matematic elaborat au fost realizate alte epruvete similare cu cele utilizate în cercetările experimentale. Pentru această testare de validare s-au fabricat epruvete cu 1, 3 și 6 mm grosime din materiale compozite armate cu fibră de carbon cât și armate cu fibră de sticlă.

Comparând rezultatele obținute pe cale analitică utilizând modelul matematic dezvoltat cu valorile obținute pe cale experimentală s-a obținut o diferență acceptabilă. Astfel în cazul găuririi materialelor compozite armate cu fibră de carbon s-a obținut o diferență de maxim 13.5 %. În testele realizate pe material compozit armat cu fibră de sticlă s-a observat o diferență de 16%. Astfel modelul matematic dezvoltat poate fi aplicat și pe alte materiale compozite, deoarece delaminarea acestor materiale ține de rășină epoxidică, de capacitate ei de a lipi straturile de material de armare și mai puțin de caracteristicile materialului de armare.

1.4 Dezvoltarea unui sistem de alimentare cu agent abraziv capabil să elimine delaminarea

Din cercetările experimentale întreprinse în cadrul acestui proiect s-a observat că jetul de apă delaminează materialul compozit în timpul găuririi datorită energiei foarte mari cu care acționează. Prima încercare în soluționarea a problemei de delaminare a fost scăderea energiei jetului, prin scăderea presiunii. Această soluție, minimizează acest efect dar nu îl elimină în totalitate.

Pornind de la principiul de funcționare a procesului de tăiere cu jet de apă și agent abraziv, și anume: jetul de apă de înaltă presiune absoarbe granule abrazive și le imprimă o energie cinetică cu care atacă materialul de prelucrat, s-a observat că în primele sutimi de secundă avem un jet de apă fără agent abraziv și abia după formarea fenomenului venturi, abrazivul ajunge în jetul de apă. Astfel jetul la pornire nu conține granule abrazive.

În lucrările științifice publicate în acest domeniu, este relatat faptul că dacă jetul de apă conține suficient agent abraziv de la început, găurirea materialului se realizează într-un timp atât de scurt încât materialul compozit nu apucă să se delamineze.

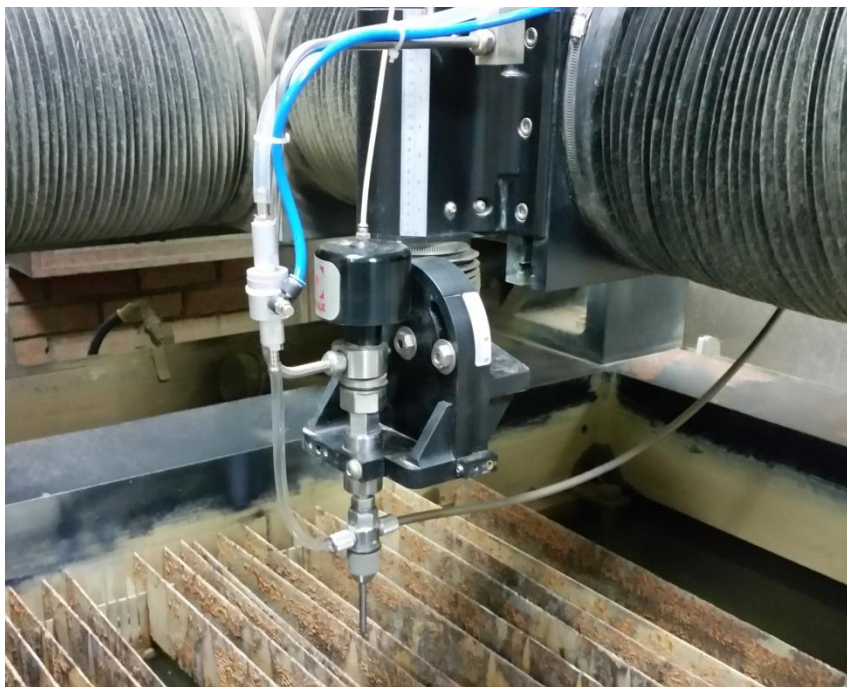


Fig. 1.23. Mașină de tăiere cu jet de apă Omax 2626 echipată cu sistemul de alimentare cu abraziv dezvoltat pentru evitarea delaminării

Pornind de la această teorie, s-a proiectat în dispozitiv care să realizeze în fața jetului de apă, un flux de agent abraziv. Astfel acest flux de abraziv realizat în camera de amestec, este antrenat de jetul de apă, formând un jet abraziv încă de la pornirea jetului.

În figură 1.23 este ilustrat sistemul de alimentare cu abraziv dezvoltat pentru evitarea delaminării montat pe mașină de tăiere cu jet de apă Omax 2626.

În figură 1.24 sunt prezentate principalele componente ale sistemului: sistemul electronic de dozarea a abrazivului, cap de tăiere cu două intrări în tubul de amestec și generator de vacuum.

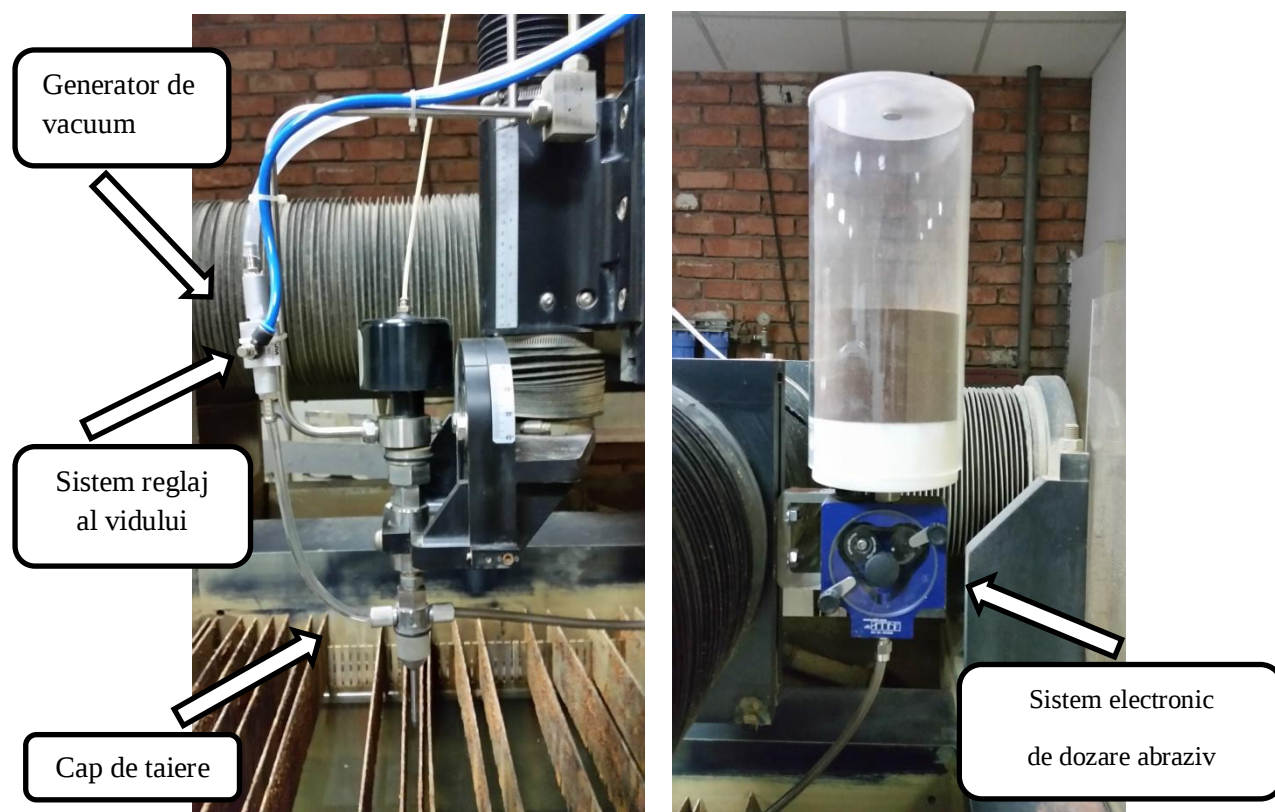


Fig. 1.24. Sistemul de alimentare cu abraziv dezvoltat pentru evitarea delaminării

Astfel generatorul de vacuum (ejetorul) creează un vid cu care absoarbe abrazivul din cameră de amestec a capului de tăiere. Concomitent cu pornirea vidului este pornit și sistemul de dozare a abrazivului, în acest mod se obține în cameră de amestec un flux de abraziv. Întreg sistemul este comandat cu ajutorul unui sistem de comandă programabil, inclusiv debitul de abraziv. Puterea vidului este ajustat prin reglarea debitului de aer care trece prin generatorul de

vacuum, astfel încât tot abrazivul furnizat de sistemul de dozare să fie absorbit din cameră de amestec.

Componentele utilizate în realizarea acestui sistem sunt prezentate în tabelul 3.

Tab. 3. Componentele sistemului de tăiere

Denumire componenta	Caracteristici	
1. Sistem electronic de alimentare cu abraziv: ALLFI Abrasive Delivery System 951200	- Sistem de reglaj electronic a abrazivului; - Plaja de reglaj: 0-600 g/min.	
2. Cap de taiere : Accustream Dialine .300 DiaLine 3/8"	- Doua intrari in camera de amestec (abraziv + vid); - Duza din safir 0.33 mm; - Tub de focalizare Rotec 500, 0.74 x 101 mm.	
3. Generator de vacuum FIPA 65.701	- Diametrul duzei 6.5 mm; - Presiunea de lucru 4-7 bar; - Dispozitiv de reglaj al debitului de aer; - Furtul Ø10 mm rezistent la abraziune.	
4. Automat programabil Mitsubishi FX3S	Realizaza comanda sistemului: -Actioneaza si regleaza sistemul de dozare cu abraziv; -Actioneaza sistemul de vaccumare.	

Testarea și validarea noului sistem dezvoltat s-a realizat pe parcursul a mai multe încercări experimentale. Astfel au fost găurite mai multe epruvete din material compozit armate cu fibră de carbon cu grosimii de 1, 3 și 5 mm. Pentru fixarea epruvetelor s-a utilizat același sistem de fixare utilizat în cercetările anterioare, o presiune de 100 MPa, distanță dintre capul de tăiere și semifabricat 1 mm, iar debitul de abraziv a fost 450 g/min.

Așa cum se observă în figură 1.25 efectul de delaminare al materialului în timpul găuririi nu a apărut, astfel validând soluția propusă.

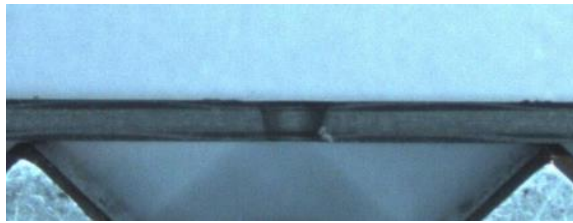
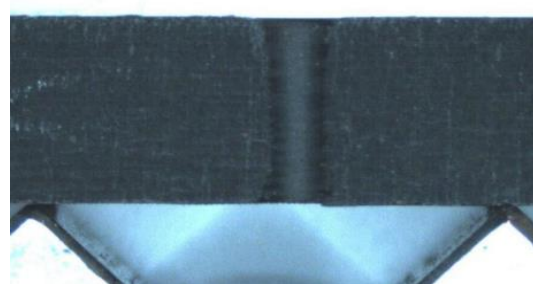


Fig. 1.25. Epruveta cu 1 mm grosime



Epruveta cu 5 mm grosime

II. Analiza, optimizarea și modelare matematică a procesului de tăiere cu jet de apă și agent abraziv a materialelor compozite

Meteorologia

Soluționarea problemei de identificare al parametrilor optimi de proces pentru obținerea calității suprafeței și a preciziei de prelucrare cerute este o problemă cu care firmele se întâlnesc frecvent. Această problemă se datorează faptului că producătorii de echipamente de tăiere cu jet de apă nu furnizează parametri optimi de proces pentru fiecare material. Astfel, pentru obținerea parametrilor optimi de proces se impune înțelegerea influenței parametrilor de proces asupra caracteristicilor de calitate și modelarea matematică a procesului.

Astfel s-a studiat influența asupra procesului, a următorilor parametri de intrare: presiunea jetului, viteza de avans, distanța dintre capul de prelucrare și semifabricat și grosimea materialului prelucrat. Parametri de ieșire care au fost analizați și îmbunătățiți sunt: precizia de prelucrare (conicitatea tăieturii, lățimea superioară și inferioară a tăieturii) și rugozitatea suprafeței prelucrate.

S-a utilizat softul Design Expert pentru planificarea experimentelor și procesarea datelor obținute în urma efectuării experimentelor.

Procesul de tăiere cu jet de apă și agent abraziv este un proces caracterizat printr-un număr mare de parametri care îl influențează și care determină eficiența și calitatea acestuia.

Dificultățile de cunoaștere și înțelegere în totalitate a procesului de tăiere cu jet de apă și agent abraziv, duc la o modelare matematică destul de dificil de realizat. Modelele matematice care au fost folosite până în acest moment, pentru studiul acestui proces s-au bazat pe modelul eroziunii Finne și modelele de regresie.

Datorită numărului mare de parametri de intrare ai procesului de tăiere cu jet de apă cu agent abraziv s-a optat ca modelarea matematică să se realizeze cu ajutorul metodei suprafeței de răspuns. Metodologia acestei metode este o combinație de matematică și de tehnici statistice pentru obținerea modelelor empirice.

Pentru modelarea matematică au ales următorii parametri dependenți ai procesului de tăiere cu jet de apă și agent abraziv: lățimea tăieturii, rugozitatea suprafeței prelucrate și conicitatea, iar parametrii de proces: viteza de avans, presiunea jetului, grosimea materialului prelucrat și distanța dintre capul de prelucrare și semifabricat, au fost cei independenți.

Prin urmare s-a pornit de la forma generală a unor funcții pentru obținerea modelelor matematice:

$$L = f(V, P, h, S_d); \quad R_a = f(V, P, h, S_d); \quad C = f(V, P, h, S_d)$$

unde: L – lățimea de tăiere, mm; R_a – rugozitatea suprafeței prelucrate, μm ; C – conicitatea tăieturii, °; V – viteza de avans, mm/min; P – presiunea, bar; h – grosimea materialului prelucrat, mm; S_d – distanța dintre capul de prelucrare și semifabricat, mm.

Pentru obținerea, în urma experimentelor, a unor date cât mai precise și mai concludente, necesare optimizării procesului de tăiere cu jet de apă și agent abraziv, s-a ales programarea central compozițională.

Variabilele independente au fost variate între:

- Presiunea: 200 - 350 MPa;
- Viteza de avans: 500 - 4500 mm/min;
- Distanța dintre capul de prelucrare și semifabricat: 0.5 - 5 mm;
- Grosimea materialului prelucrat: 2 - 5 mm.

Prezentarea materialului compozit, utilizat în cadrul experimentelor

Materialul folosit pentru realizarea experimentelor este material compozit armat cu fibre de carbon pre-impregnate cu rășină epoxidică. Fibră de carbon unidirecțională, Toray T700 SC 0.2 mm/strat. Gradul de armare al matricei epoxidice este de 43%. Materialul a fost format prin vacuumare în autoclava.

Efectuarea experimentelor

Schița 2D a epruvetelor a fost realizată în programul SolidWorks. Aceasta reprezintă traiectoria pe care jetul de apă cu agent abraziv o va parcurge în timpul prelucrării (figura 2.1).

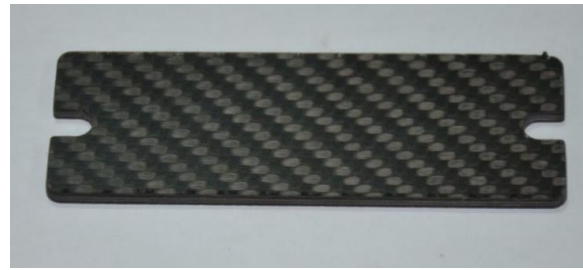
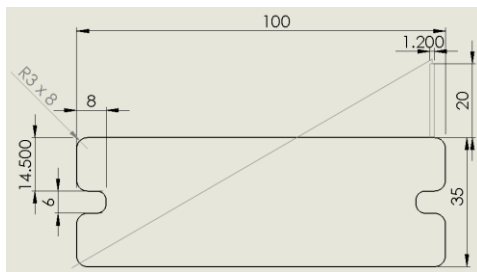


Fig. 2.1. Epruvetele utilizate

Forma epruvetelor a fost proiectată astfel încât să se poată realiza cat mai multe tăieturi în conformitate cu planificarea experimentelor și epruvetele să poată fi fixate, împreună cu dispozitivul realizat, pe masa mașinii.

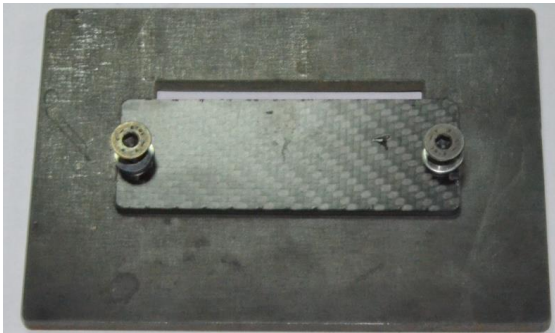


Fig. 2.2. Dispozitivul de fixare

Pentru realizarea acestor experimente practice s-a utilizat echipamentul de prelucrare cu jet de apă și agent abraziv OMAX 2626.

La prelucrarea epruvetelor s-a utilizat o duză nouă din diamant, cu diametrul de 0.35 mm și un tub de focalizare ROTEC 500, cu diametrul interior de 0.762 mm, pentru obținerea de date cât mai precise în urma experimentelor realizate.



Fig. 2.3. Standul experimental



Fig. 2.4. Prelucrarea epruvetelor



Fig. 2.5. Epruvete prelucrate

Fiecare prelucrare a fost repetată de câte 5 ori, pentru evitate erorilor. Astfel au fost realizate peste 150 de tăieturi.

Utilizând microscopul Mitutoyo Toolmaker TM505, figura 2.5, s-a măsurat lățimea inferioară și superioară, iar raza de racordare s-a măsurat cu ajutorul microscopului PG2000.

Pentru fiecare epruvetă realizată s-a măsurat rugozitatea suprafeței prelucrată în trei zone. Măsurarea rugozității suprafețelor s-a realizat cu ajutorul rugozimetrului Mitutoyo, model SJ-201, topografia suprafeței 2D/3D a fost analizată cu ajutorul sistemelor de scanare Alicona EdgeMasterX și Keyence.



Fig. 2.6. Măsurarea rugozității epruvetelor



Fig. 2.7. Microscopul Mitutoyo TM 505, utilizat pentru măsurarea lățimii de tăiere



Fig. 2.8 Sistem de scanat Alicona EdgeMasterX

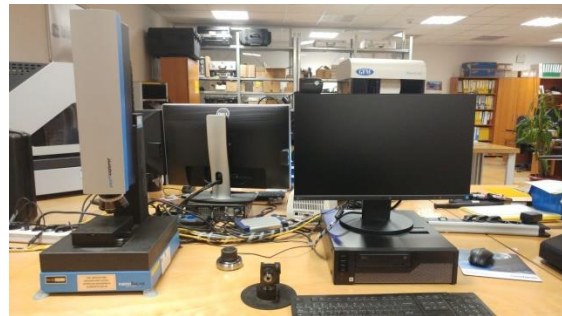


Fig. 2.9 Microscopul NanoFocus

2.1 Analiza influenței parametrilor de proces asupra calității procesului de tăiere cu jet de apă și agent abraziv

Pentru realizarea pieselor prin tăiere cu jet de apă și agent abraziv, la o calitate cât mai ridicată, este necesară înțelegerea influenței parametrilor de proces asupra caracteristicilor de calitate.

Pornind de la datele obținute experimental, s-a reprezentat grafic dependența dintre principalii parametri ai procesului (presiune, distanța dintre capul de tăiere și semifabricat, viteza de avans și grosimea materialului) și rugozitatea suprafeței, respectiv conicitatea tăieturii. S-a optat pentru analiza acestor doi parametri de calitate pentru că sunt importanți pentru mediul industrial.

Analiza influenței parametrilor de proces asupra calității suprafeței

Analiza calității suprafeței în cazul pieselor tăiate cu jet de apă și agent abraziv se realizează prin măsurarea caracteristicilor suprafeței în trei zone: zona afectată inițial, zona netedă și zona rugoasă, figura 2.10.

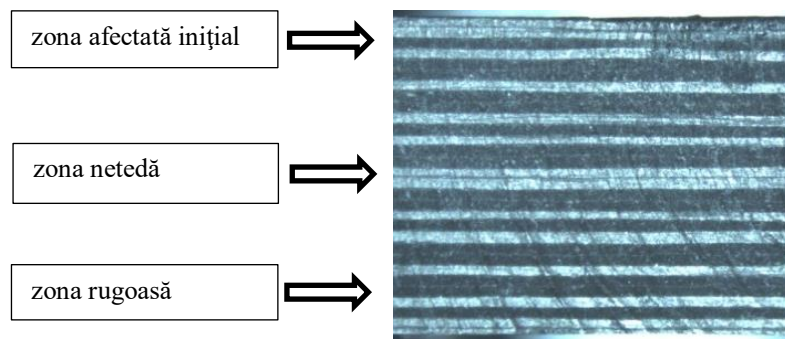


Fig. 2.10. Zonele suprafeței prelucrate prin tăiere cu jet de apă

În cadrul acestor cercetări au fost măsurati și analizați parametrii de rugozitate/vălurile în cele trei zone și topografia suprafeței.

În acest raport s-a ales prezentarea influenței parametrilor de proces asupra rugozității maxime (în zona rugoasă), obținute pentru fiecare epruvetă. În aplicațiile industriale când se vorbește de rugozitatea suprafețelor, această rugozitate nu este defalcată pe cele trei zone.

În figură 2.11 este reprezentată dependența dintre rugozitatea suprafeței prelucrate și presiunea de lucru a jetului. Intervalul de variație a presiunii este cuprins între 150 și 350 MPa, fiind utilizată o viteză de avans de 1500 mm/min, grosimea materialului de 4.21 mm și distanța dintre capul de prelucrare și semifabricat de 1.63 mm. Se observă că odată cu creșterea presiunii de lucru a jetului rugozitatea suprafeței prelucrate scade de la 6.9 la 5.2 μm

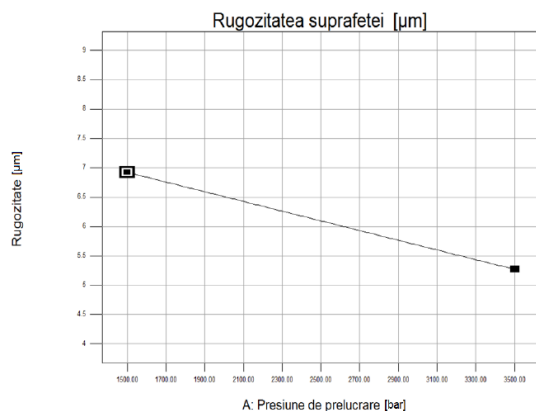


Fig. 2.11. Influența presiunii asupra rugozității suprafeței prelucrate

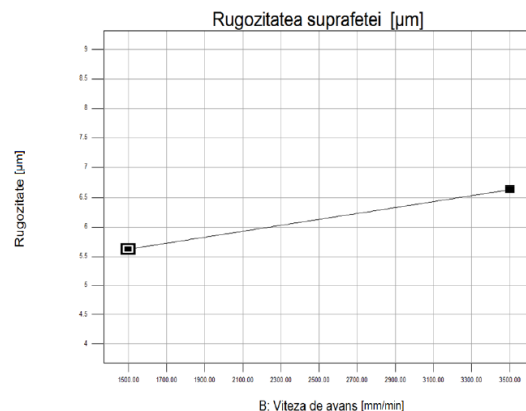


Fig. 2.12. Influența vitezei de avans asupra rugozității suprafeței prelucrate

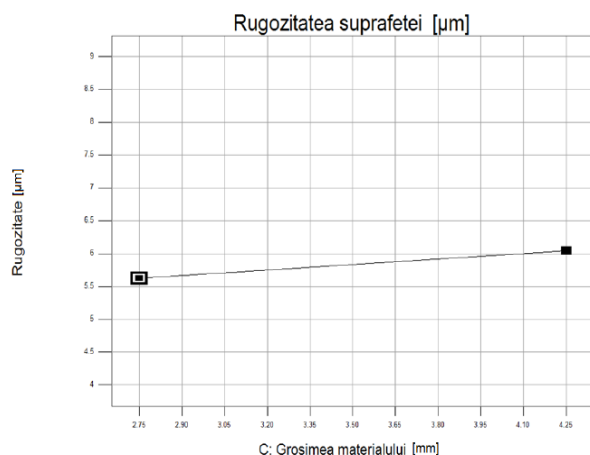


Fig. 2.13. Influența grosimii materialului asupra rugozității suprafeței prelucrate

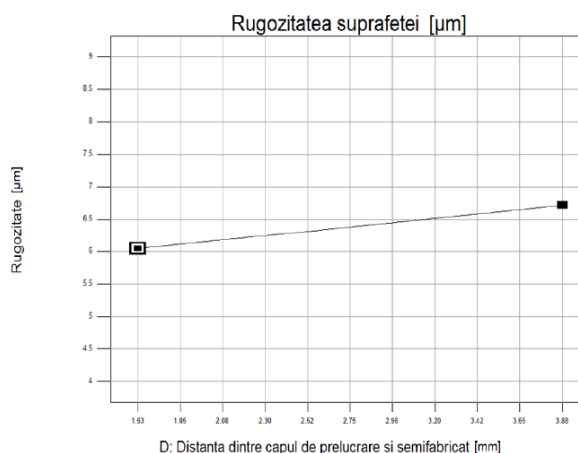


Fig. 2.14. Influența distanței dintre capul de tăiere și semifabricat asupra rugozității suprafeței prelucrate

Pentru a stabili relația de dependență dintre rugozitatea suprafeței prelucrate și viteza de avans, s-a utilizat o variație a parametrului viteză de avans cuprinsă între 1500 și 3500 mm/min, grosimea materialului prelucrat de 2.75 mm, distanța dintre capul de prelucrare și semifabricat de 1.63 mm și presiunea de lucru a jetului de 257.7 MPa. Figura 2.12 ilustrează că odată cu creșterea valorii vitezei de avans, rugozitatea suprafeței prelucrate crește de la valoarea de 5.62 μm la 6.62 μm .

Utilizând o presiune de 257.7 MPa, o viteză de avans de 1500 mm/min, distanța dintre capul de tăiere și semifabricat de 1.63 mm și variind grosimea materialului prelucrat în intervalul 2.75 – 4.25 mm a fost realizată reprezentarea grafică a variației rugozității suprafeței prelucrate în funcție de grosimea materialului prelucrat, așa cum se poate observa în figură 2.13. Din reprezentarea grafică se observă că odată cu creșterea grosimii materialului rugozitatea suprafeței prelucrate crește, de la 5.6 μm la 6.0 μm .

Influența distanței dintre capul de tăiere și semifabricat asupra rugozității suprafeței este prezentată în figura 2.14, la obținerea căreia s-au utilizat următoarele date: 312.5 MPa presiune de lucru, 2635.14 mm/min viteză de avans, 2.75 mm grosimea materialului, respectiv distanța dintre capul de tăiere și semifabricat cuprinsă între 1.63 – 3.88 mm. Rugozitatea suprafeței prelucrate crește (de la 6.0 μm la 6.7 μm) odată cu creșterea distanței dintre capul de tăiere și semifabricat.

Topografia suprafeței prelucrate (figura 2.15) este o distribuție aleatorie de cratere, văi și vârfuri. Aceasta este dominată de văi, generate de traiectoria curbă a particulelor de agent abraziv. Dimensiunea maximă a văilor s-a observat în zona rugoasă, la ieșirea jetului abraziv din material, datorită faptului că granulele abrazive în această zonă își pierd din energia cinetică.

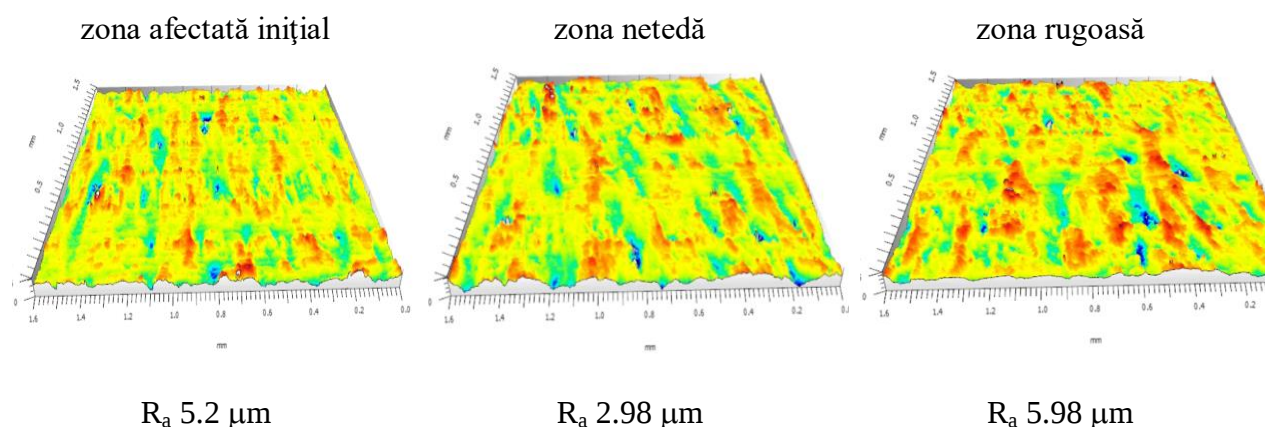


Fig. 2.15. Topografia 3D suprafeței

Profilul 2D al unei suprafețe prelucrate prin tăiere cu jet de apă este prezentat în figură 2.16. Prima observație este aceea că vârfurile și văile profilului nu sunt simetrice și nu a o variație constantă, ca și în cazul prelucrărilor clasice. Adâncimea maximă a unei văi a fost de $-13 \mu m$ și înălțimea maximă a unui vârf ajunge până la $+7 \mu m$.

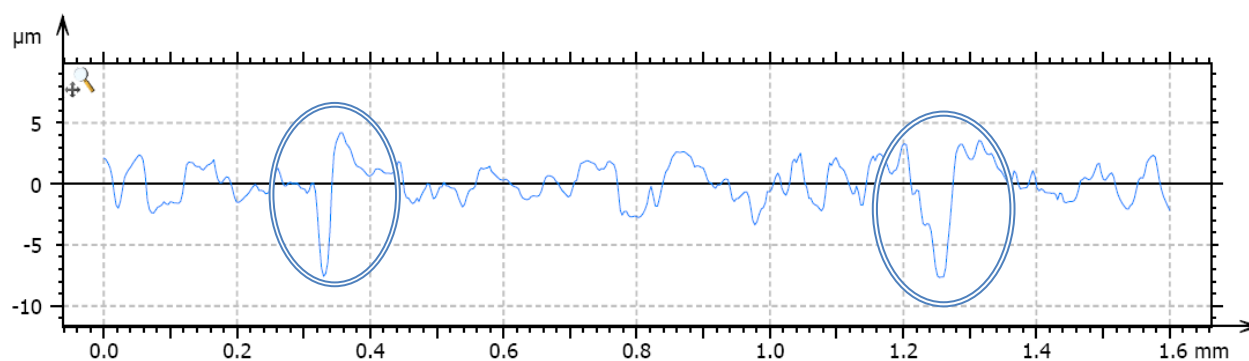


Fig. 2.16. Topografia 2D suprafeței

Analiza influenței parametrilor de proces asupra conicității tăieturii

Analiza influenței parametrilor de proces asupra conicității tăieturii este un aspect important pentru ca, conicitatea este legată de precizia dimensională a pieselor tăiate. Astfel se impune minimizarea conicității pentru ca suprafața tăiată să fie cât mai aproape de verticală.

Parametrii de dimensionali studiați în cadrul experimentelor au fost: lățimea superioară a tăieturii, lățimea inferioară, conicitatea suprafeței, respectiv raza superioară de racordare (figura 2.17).

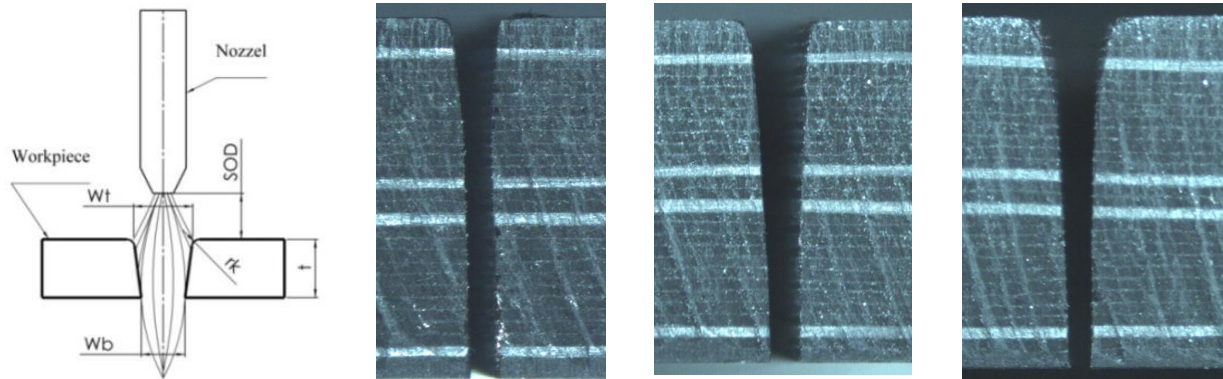


Fig. 2.17. Caracteristicile dimensionale ale tăieturii

În figură 2.18 este reprezentată dependența dintre conicitatea tăieturii și presiunea jetului. Intervalul de variație al presiunii este cuprins între 150 și 350 MPa, materialul prelucrat are o grosime de 2.91 mm, distanța dintre capul de tăiere și semifabricat de 2.99 mm, iar viteza de avans de 3694.62 mm/min. Se observă că odată cu creșterea presiunii de prelucrare a jetului, conicitatea tăieturii scade de la 1.9° la 0.1°. Prin urmare, presiunea fluidului de prelucrare influențează conicitatea tăieturii, remarcând că, prin creșterea valorii presiunii de prelucrare conicitatea tăieturii scade.

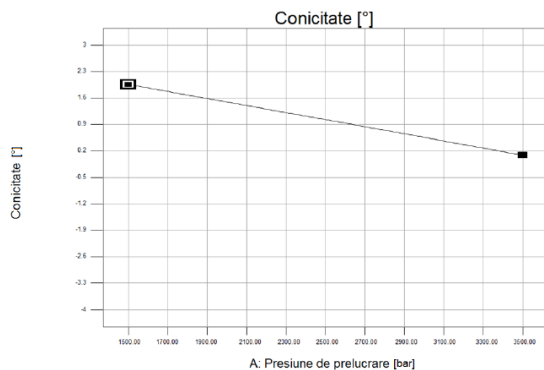


Fig. 2.18. Influența presiunii asupra conicității tăieturii

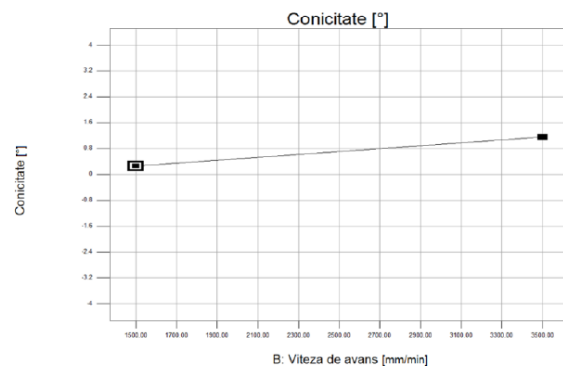


Fig. 2.19. Influența vitezei de avans asupra conicității tăieturii

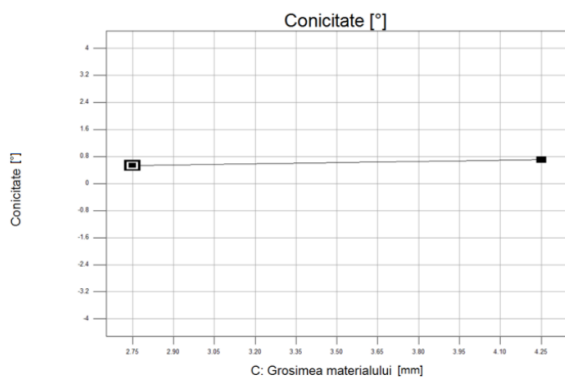


Fig. 2.20. Influența grosimii materialului prelucrat asupra conicității tăieturii

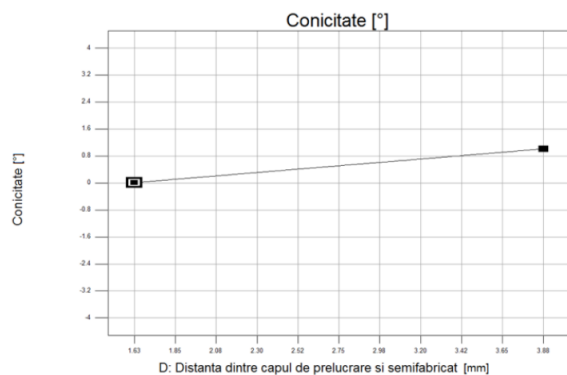


Fig. 2.21. Influența distanței dintre capul de tăiere și semifabricat asupra conicității tăieturii

Figura 2.19 ilustrează dependența dintre conicitatea tăieturii și viteza de avans a capului de prelucrare. Intervalul de variație al vitezei de avans este cuprins între 1500 și 3500 mm/min, materialul prelucrat are o grosime de 3.62 mm, distanța dintre capul de tăiere și semifabricat 3.88 mm, iar presiunea de prelucrare 290.5 MPa. Se observă că odată cu creșterea vitezei de prelucrare, conicitatea tăieturii crește de la 0.25° la 1.15°. În urma acestei analize se poate concluziona că, prin mărirea vitezei de avans conicitatea tăieturii crește.

Graficul din figura 2.20 indică dependența dintre conicitatea tăieturii și grosimea materialului prelucrat. Intervalul de variație al grosimii materialului prelucrat este cuprins între 2.75 și 4.25 mm, viteza de avans a capului de prelucrare este 3094.59 mm/min, distanța dintre capul de tăiere și semifabricat 3.75 mm și presiunea de prelucrare de 163 MPa. Se observă că odată cu creșterea grosimii materialului prelucrat, conicitatea tăieturii are o ușoară tendință de să creștere de la 0.53 la 0.7°. Această analiză denotă faptul că în studiul nostru grosimea materialului prelucrat nu are o influență mare asupra conicității tăieturii.

În figură 2.21 este reprezentată dependența dintre conicitatea tăieturii și distanța dintre capul de tăiere și semifabricat. Intervalul de variație al distanței dintre capul de prelucrare și semifabricat este cuprins între 1.63 și 3.88 mm, materialul prelucrat are o grosime de 4.19 mm, presiunea de prelucrare este 225 MPa și viteza de avans de 1500 mm/min. Se remarcă o creștere a conicității tăieturii de la 0.01° la 1°, odată cu mărirea distanței dintre capul de prelucrare și semifabricat. Prin urmare, distanța dintre capul de prelucrare și semifabricat influențează conicitatea tăieturii, remarcându-se că, prin mărirea distanței dintre capul de prelucrare și semifabricat, crește și conicitatea tăieturii.

În urma analizei influenței parametrilor de proces asupra parametrilor de calitate s-au constatat următoarele:

Presiunea jetului de abraziv

- Creșterea valorii presiunii de prelucrare determină creșterea lățimii superioare a tăieturii.
- Odată cu creșterea presiunii de prelucrare a jetului lățimea inferioară a tăieturii crește.
- Prin creșterea presiunii de lucru a jetului rugozitatea suprafeței prelucrate scade.
- Prin creșterea valorii presiunii de prelucrare rezultă scăderea conicității tăieturii.

Viteza de avans a capului de tăiere

- Prin creșterea valorii vitezei de avans lățimea superioară a tăieturii scade.
- Creșterea vitezei de avans a capului de tăiere determină scăderea lățimii inferioare a tăieturii.
- Odată cu creșterea valorii vitezei de avans rugozitatea suprafeței prelucrate crește.
- Prin mărirea vitezei de avans conicitatea tăieturii crește.

Grosimea materialului prelucrat

- Grosimea materialului prelucrat nu are o influență semnificativă asupra lățimii superioare.
- Odată cu creșterea grosimii materialului prelucrat, lățimea inferioară a tăieturii scade.
- Prin creșterea grosimii materialului rugozitatea suprafeței prelucrate crește.
- Grosimea materialului prelucrat nu are o influență foarte mare asupra conicității tăieturii.

Distanța dintre capul de prelucrare și semifabricat

- Creșterea distanței dintre capul de prelucrare și semifabricat determină creșterea lățimii superioare a tăieturii.
- Prin creșterea distanței dintre capul de prelucrare și semifabricat lățimea inferioară a tăieturii scade.
- Rugozitatea suprafeței prelucrate crește odată cu mărirea distanței dintre capul de tăiere și semifabricat.
- Prin mărirea distanței dintre capul de prelucrare și semifabricat crește și conicitatea tăieturii.

2.2 Realizarea modelelor matematice

Stabilirea tipului de model matematic care poate să descrie cel mai bine relația dintre variabilele dependente (conicitatea tăieturii, rugozitatea suprafeței, lățimea superioară a tăieturii și lățimea inferioară a acesteia) și variabilele independente (presiunea jetului, distanța dintre capul

de prelucrare și semifabricat, viteza de avans, grosimea materialului) s-a realizat prin intermediul metodei celor mai mici pătrate. Datele obținute în urma experimentelor au fost approximate cu ajutorul a patru modele matematice: polinomul cubic, modelul liniar, 2FI și polinomul de ordinul doi.

Pentru a stabili modelele matematice s-a utilizat statistica F (Fischer), coeficientul de determinare R^2 și coeficientul de determinare ajustat R^2 adj. Pentru fiecare model se urmărește probabilitatea „Prob>F”, pentru a observa dacă această valoare se află sub nivelul de semnificație statistică 0.05.

După ce s-a stabilit tipul modelului matematic pentru aproximarea variabilelor dependente, se verifică dacă un anumit termen trebuie sau nu exclus din model. Cel mai utilizat criteriu pentru adăugarea sau eliminarea unei variabile se bazează pe testul F parțial. Metoda ANOVA confirmă adecvanța modelului pătratic (condiția „Prob>F” este mai mică decât 0.0001).

Valoarea statisticii Fischer de 20.97 în cazul modelului pentru lățimea superioară a tăieturii, 12.74 în cazul modelului pentru lățimea inferioară a tăieturii, indică faptul că modelele sunt semnificative. În ambele cazuri există o probabilitate de 0.01% că valoarea medie a modelului să se situeze în afara intervalului de încredere. În acest caz termenii nesemnificativi nu au fost excluși din modelul matematic pentru a putea scrie modelul sub o formă generală. Astfel, s-a obținut forma generală a modelului matematic pentru calculul lățimii superioare și inferioare a tăieturii cu jet de apă și agent abraziv.

Modelul matematic obținut pentru calcularea lățimii superioare a tăieturii, pentru materialul compozit armat cu fibră de carbon, în funcție de parametrii procesului, este următorul:

$$L_s (P, V, h, s_d) = c_1 + c_2 \cdot P + c_3 \cdot V + c_4 \cdot h + c_5 \cdot s_d + c_6 \cdot P \cdot V + c_7 \cdot P \cdot h + c_8 \cdot P \cdot s_d + c_9 \cdot V \cdot h + c_{10} \cdot V \cdot s_d + c_{11} \cdot h \cdot s_d + c_{12} \cdot P^2 + c_{13} \cdot V^2 + c_{14} \cdot h^2 + c_{15} \cdot s_d^2$$

unde: L_s – lățimea superioară a tăieturii, mm, L_i – lățimea inferioară a tăieturii, mm, h – grosimea materialului prelucrat, mm, P – presiunea, MPa, V - viteza de avans, mm/min, s_d – distanța dintre capul de prelucrat și semifabricat [mm], $c_1...c_{15}$ – coeficienți.

Coeficienții modelului matematic pentru lățimea superioară a tăieturii

Coeficientul	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}	c_{11}	c_{12}	c_{13}	c_{14}	c_{15}
Valoarea	0.80498	1.52E-04	-1.30E-04	-0.13633	4.49E-03	-1.43E-08	-1.82E-05	7.41E-06	4.67E-06	-4.00E-06	-2.37E-03	-5.04E-09	2.03E-08	0.014963	9.22E-04

Modelul matematic obținut pentru descrierea lățimii inferioare a tăieturii, pentru materialul compozit armat cu fibră de carbon, în funcție de parametrii procesului este următorul:

$$L_i(P, V, h, s_d) = c_1 + c_2 \cdot P + c_3 \cdot V + c_4 \cdot h + c_5 \cdot s_d + c_6 \cdot P \cdot V + c_7 \cdot P \cdot h + c_8 \cdot P \cdot s_d + c_9 \cdot V \cdot h + c_{10} \cdot V \cdot s_d + c_{11} \cdot h \cdot s_d + c_{12} \cdot P^2 + c_{13} \cdot V^2 + c_{14} \cdot h^2 + c_{15} \cdot s_d^2$$

Coeficienții modelului matematic pentru lățimea inferioară a tăieturii

Coeficientul	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆	c ₇	c ₈	c ₉	c ₁₀	c ₁₁	c ₁₂	c ₁₃	c ₁₄	c ₁₅
Valoarea	1.17415	-3.43E-05	-1.56E-04	-0.07178	-0.02828	4.85E-09	-8.40E-06	7.54E-06	3.59E-06	2.64E-06	-1.98E-03	1.20E-08	1.58E-08	6.11E-03	2.85E-03

Pornind de la modelele matematice pentru calculul lățimii superioare și a celei inferioare, prin aplicarea următoarei relații se calculează conicitatea tăieturii.

$$T_R = (L_s - L_i)/2h$$

Unde: T_R – conicitatea tăieturii °, L_s – lățimea superioară a tăieturii, mm, L_i – lățimea superioară a tăieturii, mm, h – grosimea materialului prelucrat, mm;

Pe baza datelor experimentale s-a dezvoltat un model matematic de regresie pentru calculul rugozității suprafeței prelucrate prin tăiere cu jet de apă și agent abraziv. Valoarea Statisticii Fischer de 3.55 indică faptul că modelul este semnificativ. Există o probabilitate de 0.84% ca valoarea medie a modelului să se situeze în afara intervalului de încredere.

Modelul matematic obținut pentru descrierea rugozității suprafeței prelucrate este următorul:

$$R_a(P, V, h, s_d) = c_1 + c_2 \cdot P + c_3 \cdot V + c_4 \cdot h + c_5 \cdot s_d + c_6 \cdot P \cdot V + c_7 \cdot P \cdot h + c_8 \cdot P \cdot s_d + c_9 \cdot V \cdot h + c_{10} \cdot V \cdot s_d + c_{11} \cdot h \cdot s_d$$

Unde: R_a – rugozitatea suprafeței prelucrate, [μm], $c_1 \dots c_{11}$ – coeficienții modelului matematic pentru calculul rugozității suprafeței prelucrate.

Coeficienții modelului matematic pentru calculul rugozității

Coeficientul	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	c ₆	c ₇	c ₈	c ₉	c ₁₀	c ₁₁
Valoarea	7.7943	-1.78E-03	-3.61E-03	0.88134	1.77269	9.25E-07	-3.44E-04	1.11E-04	6.56E-04	-3.26E-04	-0.34741

Pentru testarea modelelor matematice elaborate au fost realizate cercetări experimentale în aceleași condiții cu cele utilizate în experimentul inițial.

Comparând rezultatele obținute pe cale analitică, utilizând modelele matematice dezvoltate, se observă o diferență față de valorile obținute experimental. În cazul conicității a rezultat o diferență a valorilor calculate față de cele măsurate, cuprinsă între 5% și 13%. Diferența rugozității suprafeței calculată, față de cea măsurată este cuprinsă între 7.5% și 13.8%. Rezultatele confirmă faptul că modelele dezvoltate pot aproxima valorile experimentale la un nivel de precizie acceptat (sub 15%).

Pentru a verifica, dacă modelele matematice dezvoltate pentru CFRP pot fi folosite pentru calculul parametrilor și în cazul materialelor compozite armate cu fibră de sticlă, s-a repetat experimentul făcut pentru validarea modelelor. Astfel, în cazul MC armat cu fibră de sticlă s-a obținut o diferență între parametri calculați și cei mășurați, de sub 17%.

Modelele matematice pentru calculul parametrilor optimi de proces au fost testate și pe mașina Tehnocut din dotarea firmei Trambus, iar rezultatele au fost similare cu cele de pe mașina Omax, pentru că au aceleași dimensiuni ale sistemului de tăiere.

Avizat,

Coordonator,

Universitatea Tehnica din Cluj-Napoca

Agent economic,

S.C. Trambus S.R.L.

Reprezentant legal,

Reprezentant legal,

Rector,

Prof.dr.ing. Vasile Topa

Administrator,

Ing. Emil Trifu

Director Proiect,

S.l.dr.ing. Alexandru Popan

Responsabil de proiect,

Ing. Emil Trifu

Cluj-Napoca, 06.12.2017