

Universitatea "Politehnica" din Timișoara  
Facultatea de Mecanică

---

# OPTIMIZAREA TEHNOLOGICĂ A PRELUCRĂRII MATERIALELOR CU JET DE FLUID CU ABRAZIV



Drd. cu frecv. :

ing. BRANCO PETROVICI

Conducător științific:

prof. dr.ing. TRAIAN FLEȘER

Aprilie 2009

## CUPRINS

Capitolul 1 .....	3
1.1 Prelucrarea cu jeturi de fluid cu abraziv ieri, azi, mâine .....	3
1.2. Particularități ale prelucrărilor cu jet de fluid .....	5
1.3. Caracteristicile prelucrării cu jet de fluid cu abraziv .....	7
1.4. Evaluare procedee: jet de apă vs. jet de apă cu abraziv .....	9
1.5. Domenii de utilizare și operațiile de prelucrare actuale în domeniul studiat .....	10
1.6. Elemente de ecologie și securitate în muncă la procesarea cu jet de fluid .....	14
Capitolul 2 .....	17
Obiectivele tezei .....	17
Capitolul 3 .....	21
Generarea și utilizarea jetului de fluid.....	21
3.1. Considerații generale.....	21
3.2. Sistemului tehnic de prelucrare cu jet de fluid .....	24
3.2.1. Stația de tratare și filtrare a apei.....	27
3.2.3. Conductele de alimentare cu apă la presiune înaltă.....	35
3.2.4. Sistemul de stocare și alimentare cu abraziv.....	36
3.2.5. Rețeaua de colectare și decantare a apei uzate.....	37
3.2.6. Sistemul de aspirație al vaporilor.....	38
3.2.7. Unitatea centrală de comandă.....	38
3.2.8. Sistemul de instalare și deplasare a materialului de prelucrat.....	38
3.2.9. Capul de prelucrare.....	40
3.3. Parametrii regimului de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv.....	53
Capitolul 4 .....	64
Cercetări experimentale, modelarea matematică experimentală și optimizarea procesului de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv.....	64
4.1. Materialele folosite pentru experimentări.....	64

---

Universitatea “Politehnica” din Timișoara  
Facultatea de Mecanică

---

4.2. Instalația de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv folosită și aparatele de măsurare .....	67
4.3. Modelarea experimentală și optimizarea procesului de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv .....	74
4.3.1 Criterii și restricții .....	75
4.3.2 Studiul procesului de tăiere al plăcilor de alumină.....	77
4.3.3 Studiul procesului de tăiere al plăcilor din aliaj de titan .....	90
Capitolul 5 .....	102
Cercetări asupra fiabilității tubului de focalizare .....	102
5.1 Structura jetului.....	102
5.2 Evaluarea fenomenului de uzare a tubului de focalizare .....	104
5.3 Criterii și restricții privind creșterea duratei de funcționare a tubului de focalizare	110
Capitolul 6 .....	121
Comparația tehnico-economică dintre prelucrarea cu jet de fluid cu abraziv și alte procese de prelucrare.....	121
Capitolul 7 .....	131
Concluzii generale și contribuții personale .....	131
7.1. Concluzii generale .....	131
7.2. Contribuții personale.....	132
7.3 Cercetări viitoare .....	133
BIBLIOGRAFIE .....	
Anexa 1 .....	147

# Capitolul 1

## Introducere

### 1.1 Prelucrarea cu jeturi de fluid cu abraziv ieri, azi, mâine

Prelucrarea cu jet de fluid cu abraziv face parte din domeniul prelucrărilor cu medii activate energetic. Preocupările în respectivul domeniu au apărut ca o necesitate pentru creșterea productivității prelucrării noilor materiale metalice aliate, ceramice, compozite, materiale care prezintă proprietăți de procesare semnificativ diferite față de materialele tradiționale. Un considerent important al introducerii acestor procedee de prelucrare s-a bazat pe criteriile tehnice, tehnologice, corelat cu cele de eficiență economică a procesului.

Cercetări recente au scos în evidență soluții pentru utilizarea procedeelelor cu fascicule de energie concentrată cu efecte termice, respectiv fără atingerea temperaturilor de topire a materialelor procesate.

Astfel, inițial cercetările au fost orientate spre utilizarea procedeelelor de prelucrare cu plasmă. Progresele remarcabile în realizarea sistemelor tehnice laser și fascicul de electroni au impus soluții tehnice, tehnologii și utilizarea industrială a acestora. Din punct de vedere fenomenologic prelucrările se bazează pe transferul energiei care generează topirea materialului, transferat ulterior din zona supusă procesării. Energia este obținută prin accelerarea micro-particulelor de tip:

- cuantă de lumină (foton) pentru prelucrarea cu fascicul laser,
- electroni pentru prelucrarea cu fascicul de electroni,
- ioni pentru prelucrarea cu fascicul de ioni,
- molecule de gaze cu temperatura ridicată pentru prelucrarea cu jet de plasmă.

---

## Universitatea "Politehnica" din Timișoara

### Facultatea de Mecanică

---

Primele studii sistematice și cercetări experimentale în vederea utilizării jeturilor de fluide sunt semnalate în anii '30 ai secolului trecut, fiind atribuite inginerilor ruși și americani, pentru aplicare în minerit la exploatarea cărbunilor, respectiv în carierele de piatră. În 1949 compania americană Gilsonite a demarat exploatarea minereurilor cu jeturi de apă [ 1 ], [ 2 ], [ 3 ].

Primul mare proiect pentru exploatarea hidromecanică a cărbunilor a fost testat în Germania în faza de instalație pilot, între anii 1977-1980. Rezultatele obținute au evidențiat un ritm de extracție sub cel așteptat. În această situație s-a optat pentru o tehnologie mixtă la care plăcuțele tăietoare ale utilajelor erau asistate cu jeturi concentrate de apă, la presiune ridicată [ 1 ], [ 2 ].

Rezultatele mult mai promițătoare au fost obținute la tăierea în scopuri industriale a materialelor tehnice, cu ajutorul jeturilor de apă la presiuni ridicate. Bazele științifice ale tăierii cu jet de apă au fost puse încă din anii 1950, de către L.F. Vereschagin, A.A Semertchan, G. P. Nikonov, S.S. Shavlovski [ 1 ], [ 2 ].

În 1956, în fosta URSS se efectuează primele încercări folosind jeturi de apă la presiuni de până la 200 MPa, cu utilaje industriale pentru săparea tunelurilor.

Tehnologia propriu-zisă a fost dezvoltată în anii 1960 la Universitatea din Michigan de către Dr. N.C.Franz, inginer forestier, care utilizează jetul de apă la presiune ridicată pentru tăierea lemnului. Se demonstrează astfel că jetul de apă concentrat și la viteze foarte mari are energie ridicată, capabilă să îndepărteze materialul într-o fantă îngustă [ 1 ], [ 3 ]. Ulterior, contribuții importante în acest domeniu au avut P.D. Lee, F. Lavoie , M. Hashish [ 1 ], [ 2 ], [ 3 ], [ 5 ].

Primul sistem comercial care utiliza energia jetului de fluid la presiune ridicată a fost realizat în 1971 la McCartney Company. Procedul a trezit interes la firma Böing, care a folosit jeturi de fluide pentru tăierea materialelor compozite, a semifabricatelor celulare și a aliajelor metalice speciale din domeniul aerospațial [ 1 ], [ 2 ].

În jurul anului 1980 se realizează transferul tehnologic industrial pentru prelucrările cu fluide și medii activate cinetic de tipul jeturilor concentrate de aer, apă, respectiv apă cu abraziv în suspensie și ca urmare despre dezvoltarea și folosirea pe scară largă a instalațiilor de prelucrare cu jet de fluide se poate vorbi numai începând cu anii 1980 ca urmare a rezultatelor obținute în acest domeniu [ 1 ], [ 2 ].

Prelucrările cu fluide activate cinetic, direcționate cu jeturi subțiri, se bazează pe fenomenele de ciocnire, deformare, generarea fisurilor și ruperea materialului la suprafața de impact dintre particulă și materialul supus procesului de prelucrare. Un pas semnificativ în sporirea eficienței procedurii de prelucrare cu jeturi de fluide la presiuni ridicate a fost remarcat prin introducerea particulelor abrazive în respectivul jet de fluid. Macro-particulele din materiale dure, în deplasare cu viteze mari aflate în suspensie într-un mediu lichid posedă energia necesară pentru prelucrarea materialelor. În acest stadiu, utilizarea roboților industriali pentru manipularea facilă a duzei de dirijare a jetului și introducerea particulelor abrazive în jetul de apă a adus contribuții semnificative în dezvoltarea sistemelor de tăiere cu jeturi de fluide. În ultima perioadă, corporații internaționale puternice s-au specializat, au conceput și realizat sisteme tehnice performante, ceea ce a adus contribuții semnificative la extinderea și la îmbunătățirea tehnologiilor de prelucrare cu jeturi de fluide și a instalațiilor aferente [ 2 ], [ 3 ], [ 4 ], [ 5 ].

În baza celor menționate, se constată astăzi și este concludent că procedeul de prelucrare cu jeturi de fluide face efectiv parte din domeniul prelucrărilor cu energii concentrate bazându-se pe acțiunea directă și localizată a unui mediu cu energie cinetică ridicată, direcționată asupra materialului de prelucrat [12]. Totodată au fost dezvoltate procedee care fac parte din aceeași familie de bază. Pe cale de consecință, procedeele de prelucrare cu jeturi de fluide cu energii concentrate se pot diferenția în trei direcții:

- prelucrări cu fluide omogene chimic,
- prelucrări cu fluid eterogen cu macro-particule abrazive minerale sau sinterizate de tipul compușilor chimici duri,
- prelucrări cu fluide activate suplimentar cu câmpuri sau unde care interacționează cu particulele jetului, producând amplificarea energetică a acestora.

## **1.2. Particularități ale prelucrărilor cu jet de fluid**

La prelucrările la care aportul de lucru mecanic se bazează pe energia cinetică a unor microparticule, similar cazului arcului electric, în zona stratului superficial al suprafeței prelucrate, apar transformări structurale, care generează zonă influențată termic (ZIT). Fenomenul este datorat faptului că o parte însemnată din energia

introdusă în sistem se transformă în căldură, iar restul în energie internă, sau este disipată. În condițiile în care lucrul mecanic pentru îndepărtarea materialului este datorat energiei cinetice transmisă de către macro-particule transportate de fluide, în stratul superficial al suprafeței prelucrate, se induc transformări materializate în durificarea prin ecrusare și dezvoltarea micro-fisurilor. Aceasta se datorează transformării energiei introduse în sistem, preponderent în energie internă și în mai mică măsură în căldură.

La procedeul de prelucrare cu jet de apă cu abraziv nu apare zonă influențată termic ceea ce constituie un mare avantaj față de alte multe procedee de prelucrare.

Principiul de prelucrare cu jet de fluid cu presiune ridicată are la bază transformarea energiei potențiale a fluidului în energie cinetică a jetului, prin trecerea printr-o duză cu un orificiu redus ( $\varnothing 0.18 \div 0.4$  mm). La ieșire din duză, viteza jetului este în domeniul supersonic, având valori de  $2 \div 3$  Mach sau aproximativ 1000 m/s, motiv pentru care aceste jeturi se încadrează în categoria jeturilor de mare viteză [ 2 ].

Fluidul purtător cel mai utilizat este apa, în primul rând din considerente economice, dar și datorită compresibilității sale foarte reduse. La presiunea de 400 MPa apa se comprimă cu 12%. Procedeul de prelucrare cu jet de fluide, cu sau fără abraziv, cunoaște în ultimii ani o dezvoltare considerabilă și o utilizare tot mai largă în diverse domenii. În momentul actual sunt în curs de desfășurare proiecte de cercetare în acest sens, care au ca obiective extinderea utilizării procedeului. Din asemenea programe se desprind cele care generează utilizarea procedeului de tăiere cu jet de apă cu particule abrazive dure.

Ca urmare a cercetărilor efectuate și a rezultatelor obținute în ultimul timp, această tehnologie devine tot mai accesibilă și mai ușor de folosit, situându-se la un nivel superior față de tehnologiile concurente atât din punct de vedere al performanțelor tehnico-economice cât și din punct de vedere al respectării normelor de protecție a mediului înconjurător.

Sistemele tehnice de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv de ultimă generație oferă posibilitatea realizării diferitelor tipuri de operații de prelucrare la o precizie ridicată și o calitate superioară a pieselor prelucrate. Crescând presiunea apei de la cca. 350 MPa la peste 600 MPa a fost posibilă creșterea vitezelor de prelucrare cu 30-50%, scăderea cu aceleași procente a consumului de material abraziv și în consecință creșterea productivității și a performanțelor acestor sisteme de prelucrare.

### 1.3. Caracteristicile prelucrării cu jet de fluid cu abraziv

Dintre **avantajele** prelucrării materialelor cu jet de fluid, față de procedee de prelucrare clasice sau neconvenționale, se menționează :

- posibilitatea prelucrării a unei game foarte diversificate de materiale
- duritatea materialului de prelucrat este practic nelimitată,
- utilizarea facilă la liniile de fabricație flexibile deoarece modificarea traseului de prelucrare este controlată de către un sistem de calcul printr-un soft adecvat
- calitatea superioară a suprafeței pieselor prelucrate
- se pot debita concomitent materiale diferite metalurgic (pachet de table), suprapuse fără contaminare reciprocă,
- forțe mici exercitate de jetul de fluid asupra materialului prelucrat, de regula sub 100 N, fiind evitate astfel deformările în vecinătatea zonei prelucrate ,
- nu există zona influențată termic (ZIT) care la procedeele de prelucrare cu energie termică apare inevitabil,
- reducerea pierderilor de material, datorită lășimii reduse a tăieturii, respectiv cantitate relativ mică de material îndepărtat în timpul prelucrării ,
- productivitate ridicată ,
- posibilitatea tăierii cu mare precizie după contur tridimensional,
- eliminarea problemelor de poluare a mediului prin noxe, praf, căldură, radiații, etc., considerente deosebit de favorabile și pentru sănătatea operatorilor,
- procesare multilaterală,
- fixare ușoară, simplă, a materialelor în timpul prelucrării,
- pregătirea tehnologică pentru tăiere este simplă,
- pregătirea sistemului tehnic pentru operare este simplă,
- posibilitatea prelucrării materialelor cu grosimi mari,
- posibilitatea tăierii materialelor subțiri, moi, ușoare,
- posibilitatea tăierii materialelor reflectorizante,
- posibilitatea tăierii materialelor ușor inflamabile,
- trecerea facilă de la prelucrarea cu jet de apă la prelucrarea cu jet de fluid cu abraziv,
- operații secundare reduse,
- operare nonstop.



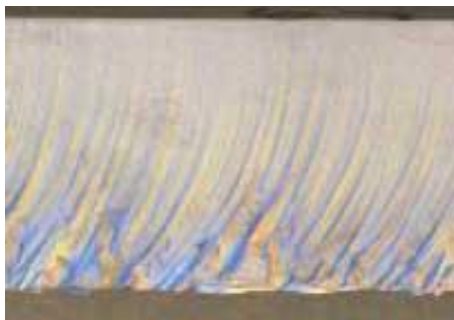
Ca urmare a flexibilității sporite, aceste sisteme de prelucrare pot fi ușor integrate în linii de fabricație moderne conduse cu ajutorul sistemelor de calcul cu software adecvat, ale întreprinderilor din diverse domenii de activitate.

Printre **dezavantaje** se menționează :

- cost relativ ridicat al instalației,
- materialele abrazive au cost relativ ridicat ,
- durata de utilizare a unor componente este limitată,
- corelat cu parametrii tehnologici, se poate atinge nivel ridicat de zgomot produs de către jet la ieșirea din tubul de focalizare,
- în anumite condiții, procedeul poate fi ceva mai lent față de alte procedee utilizate (tăiere cu plasmă sub apă, fascicul de electroni, etc.) pentru prelucrarea materialelor cu grosimi mari, respectiv greu prelucrabile.

Uzual, din punct de vedere tehnologic se întâlnesc cinci clase de calitate ale suprafeței prelucrate (figura 1.3.1) [ 9 ], [ 88 ] :

a. grosieră ( tăieri, debitări, degroșări )



b. intermediară



c. medie



d. bună



e. foarte bună



Figura 1.3.1 Rugozitatea suprafeței

Profilul tăieturii exprimat prin poziția flancurilor, poate fi străpuns, în forma de „v” [a], trapezoidal [c], respectiv paralele [e].

#### 1.4. Evaluare procedee: jet de apă vs. jet de apă cu abraziv

Tăierea materialelor cu jet de apă și tăierea cu jet de apă cu abraziv se consideră procedee distincte. În primul caz, erodarea și dislocarea materialului de prelucrat are loc ca urmare a interacțiunii apei direct cu materialul. În cazul prelucrării cu jet de apă cu abraziv, erodarea materialului se realizează de către granulele de abraziv, apa având rolul de accelerare a acestora și de îndepărtare a materialului erodat din zona de

prelucrare. Rolul de „mini muchii așchietoare” al particulelor abrazive în suspensie de apă este incomparabil de eficient.

Totuși, un rol important îl au și caracteristicile mecanice ale materialului prelucrat. Din analiza celor două procedee se remarcă faptul că pentru materialele cu o bună plasticitate, prelucrarea cu jet de apă este mai eficientă decât cea cu jet de apă cu abraziv. În schimb pentru materialele cu plasticitate mai scăzută sau pentru materiale fragile, prelucrarea cu jet de apă cu abraziv este net avantajoasă față de procedeele clasice. Un factor important în eficiența procedeelelor menționate este viteza de prelucrare. Aceasta scade cu creșterea grosimii materialului prelucrat [10]. Sistemele de tăiere cu jet de apă fără abraziv se utilizează pentru a tăia materiale compozite, carton ondulat, produse din azbest, materiale plastice expandate (spuma), cauciuc, nylon, fibre minerale, placaj, folii de polietilenă, produse alimentare, etc.[ 1],[ 3 ],[ 5 ],[6 ].

Prelucrarea cu jet de fluid cu abraziv se folosește pentru materiale cu duritate și grosime mai ridicate.

### **1.5. Domenii de utilizare și operațiile de prelucrare actuale în domeniul studiat**

Performanțele obținute permit utilizarea acestei tehnologii în domenii foarte diversificate, de la industria alimentară, farmaceutică, aerospațială, navală, construcții de mașini, chimică, petrochimică, minieră, textilă, prelucrare a pielii, prelucrare a lemnului, construcții civile și industriale, amenajări funciare, la domeniul militar și până la cel medical.

Această tehnologie, vine ca o alternativă la tehnologiile poluante, la prelucrarea unor materiale greu prelucrabile (carburi metalice, ceramica industrială, diferite aliaje, etc.). Avantajele semnificative pe care le prezintă în aplicații practice, industriale, față de procedeele convenționale de prelucrare au impulsat studiile și cercetările atât în domeniul hidrodinamicii jetului și a interacțiunii cu materialul solid cât și în domeniul dezvoltării unor sisteme constructive tehnice și optimizarea parametrilor tehnologici ai acestora. Preocupările de extindere a procedurii în noi sfere industriale sunt materializate prin perfecționarea constructivă și funcțională a camerelor de amestec cu injecție controlată de abraziv, ceea ce a permis și realizarea operațiilor de tăiere fină și

micro-găurire foarte precisă. Un exemplu reprezentativ în acest sens este prezentat în figura 1.5.1.



Figura 1.5.1. Prelucrare unei piese în miniatură [ 3 ]

Dintre **operațiile** de prelucrare cu jet de fluid, cel mai des utilizată la scară industrială este operația de tăiere a materialelor. Se pot realiza și alte operații ca: strunjire, debitare, găurire, frezare, filetare, șlefuire, sablare, tratamente de suprafață.

Motivat de pierderile foarte reduse de material, dar și a preciziei de prelucrare, procedeul se utilizează la prelucrarea metalelor prețioase ( aur, platină, argint, pietre rare) prin micro-găurire, șlefuire, tăiere fină, gravare (figura 1.5.2.). În aceste cazuri, procedeul de prelucrare cu jet de fluid se justifică și ca urmare a recuperării deșeurii de material rezultat prin filtrarea foarte fină a apei după prelucrare.



Figura 1.5.2. Gravarea materialelor cu jet de fluid [ 3 ]

Rezultate corespunzătoare, semnificative s-au obținut în diferite ramuri industriale, inclusiv în domeniul curățirii suprafețelor cu jeturi de fluid. Contribuția semnificativă a procedurii în sectorul naval este materializată la curățirea suprafețelor extinse ale navelor (figura 1.5.3 a). Similar, procedeul și-a găsit întrebuințarea și în domeniul construcțiilor civile și industriale (figura 1.5.3.b), respectiv amenajări funciare [ 3 ], [ 18 ], unde pe lângă curățirea suprafețelor, este utilizat pentru demolarea structurilor din materiale de construcții.



a)



b)

Figura 1.5.3. Curățirea cu jet de apă [ 3 ], [ 4 ]



Operațiile de prelucrare cu jet de fluid depind de parametrii jetului de fluid și în primul rând de regiunea folosită din jetul respectiv pentru diferitele operații de prelucrare cunoscute. Calitatea suprafețelor tăiate cu jeturi de fluide satisface exigențe deosebit de severe.

Dacă în anii 1990 se puteau prelucra piese având abateri dimensionale de  $1,5 \pm 0,25$  mm, în prezent se pot prelucra piese cu abateri dimensionale de  $\pm 0,075$  mm.

La aceasta concură mai mulți factori tehnologici, înglobați în soft-ul dedicat.

Din considerentul menționat, este posibilă prelucrarea cu jet de fluid a unor componente din domeniul electronic, circuite cu pretenții severe de dimensiuni și poziții (figura 1.5.4).

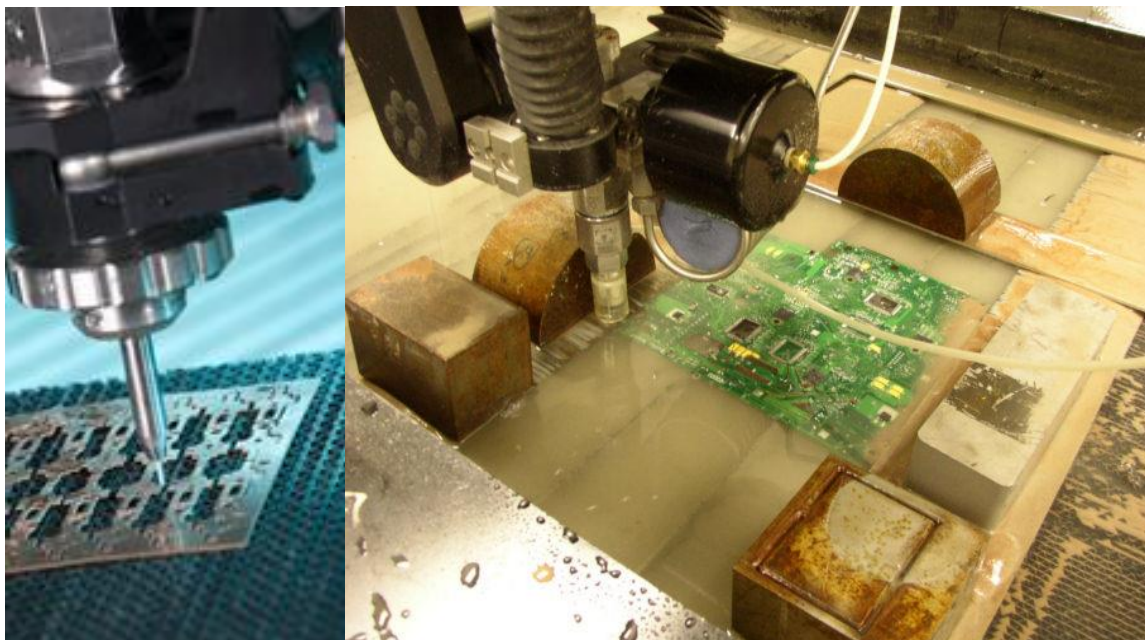


Figura 1.5.4. Aplicații industriale ale prelucrării cu jet de fluid [ 5 ]

Se folosesc la ora actuală cu rezultate bune operații de polizare și șlefuire fină cu jeturi de fluide a suprafețelor materialelor. Tratamente de suprafațare de tipul operației de durificare a materialelor se folosesc cu mare succes, deoarece suprafețele astfel prelucrate au calitate superioară față de procedeul de durificare prin sablare. Diametrul craterului format la impactul dintre particula dură și materialul de procesat este foarte mic, datorită dimensiunii foarte mici a particulei abrazive în comparație cu dimensiunea particulelor folosite în cazul sablării.

Prelucrarea cu jet de apă cu abraziv este un procedeu « prietenos » unde neexistând încălziri ale materialului nu se produce poluarea mediului prin degajare de noxe, radiații termice. Afirmatia anterioară are susținerea soluției tehnice pentru atenuarea poluării fonice, în care sens, materialul supus prelucrării și tubul de focalizare cu jetul de fluid sunt imersate în apă (fig. 1.5.5).



Figura 1.5.5. Prelucrarea cu jet imersat [ 3 ].

Degajările de noxe, respectiv radiația termică la unele procedee clasice de prelucrare creează disconfort pentru operator, cu consecințe asupra sănătății. În cazul procedurii promovată în varianta imersată în apă, asemenea fenomene nu sunt întâlnite.

## **1.6. Elemente de ecologie și securitate în muncă la procesarea cu jet de fluid.**

Procesarea prin tăiere a materialelor cu jeturi de apă sau apă cu particule abrazive în suspensie se supune legislației comunitare privind sănătatea și siguranța operatorilor, diferențiat în trei direcții:

- a. Măsuri luate în spiritul Directivei cadru 89/391/CEE, ce conține prevederile fundamentale legate de sănătatea și siguranța la locul de muncă, directivă ce este la rândul ei susținută de directive individuale.

Obiectivul directivei este asigurarea unui nivel ridicat de protecție a operatorilor prin implementarea de măsuri preventive care să-i protejeze împotriva accidentelor de muncă și a bolilor profesionale prin informare, consultare și training-ul de specialitate. Directiva oferă cadrul general pentru introducerea de măsuri de încurajare a îmbunătățirii siguranței și sănătății operatorilor, urmând ca la locul de muncă să fie detaliate măsurile specifice.

- b. Măsuri luate conform Directivei cadru 80/1107/CEE legată de riscul de expunere la agenți chimici, fizici sau biologici. Dacă în traseul jetului de apă, respectiv apă cu abraziv, ca agent fizic (unealtă de lucru) cu energie cinetică deosebit de ridicată la diametrul sub un milimetru, dar la presiune care atinge  $4 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ , intră operatorul cu părți ale corpului, poate să-i afecteze sănătatea. Dar, conform Directivei 90/270/ CEE, echipamentul – mașina de lucru, este prevăzută cu ecrane de protecție prin care sunt îndeplinite cerințele minime pentru siguranța și sănătatea muncii.

Conform Directivei, datoriile agentului comercial prevăd:

- evaluarea riscului,
- evaluarea posibilelor riscuri privind acuitatea vizuală a muncitorului, probleme de comportament la efort fizic și stres mental,
- întreprinderea de măsuri pentru remedierea deficiențelor în procesul tehnologic,
- asigurarea unor acțiuni de training și evaluare profesională periodică,
- efectuarea sistematică a testelor de vedere ale angajaților.

- c. Măsuri generate din alte directive diferite de cele Cadru, în concordanță cu activitățile ocupaționale sau riscurile specifice ale unor grupuri de personal.

În țara noastră, în domeniul discutat este aplicabilă Legea nr. 319/2006 – legea sănătății și securității în muncă, a cărei scop este instituirea de măsuri privind promovarea îmbunătățirii securității și sănătății în muncă a angajaților. În cadrul ei se prezintă principiile generale referitoare la:



- prevenirea riscurilor profesionale,
- protecția sănătății și securității lucrătorilor,
- eliminarea factorilor de risc și de accidentare,
- informarea, consultarea și participarea echilibrată la muncă,
- pregătirea profesională a operatorilor.

Acest act normativ transpune în legislația națională prevederile Directivei 89/391/CEE.

Prin HG nr. 1091/2006 privind cerințele minime de securitate și siguranță pentru locul de muncă se detaliază prevederi specifice aplicabile la procesarea cu jet de apă și jet de apă cu particule de abraziv [11]. Procesarea materialelor cu jet de apă și jet de apă cu particule de abraziv îndeplinește cerințele din Legea Protecției Mediului, legea nr.137 din 29 decembrie 1995, cu completările ulterioare [12].

Susținerea se bazează pe faptul că :

- procesul nu emană particule sau noxe în mediul de lucru,
- procesul nu emană radiații termice, sau de altă natură,
- nivelul de zgomot la utilizarea echipamentului tehnologic, în anumite condiții de lucru, poate să atingă 75-80 dB, dar măsurile tehnice luate la locul de muncă fac să nu fie depășite normele specifice care privesc securitatea operatorilor și protecția mediului.

Toate acestea detașează semnificativ procedeul în discuție de toate celelalte utilizate pentru tăierea materialelor.

## Capitolul 2

### Obiectivele tezei

În tendința generală a evoluției științifice, tehnice și tehnologice se încadrează cu o poziție bine definită și evoluția procedeelelor de procesare a materialelor. În acest context, procedeul de prelucrare cu jet de apă cu abraziv este apreciat și utilizat cu rezultate semnificative, cu aplicații și restricții.

Programul de cercetare care se finalizează prin prezenta teză de doctorat, își propune să aducă o contribuție prin aplicarea procedeeului despre care se face vorbire în procesarea materialelor biocompatibile cu prelucrabilitate dificilă, cu definirea următoarelor obiective prioritare:

- în domeniul științific – prin studierea fenomenelor de interacțiune dintre jetul de apă cu abraziv și materialele implicate: materiale ale componentelor echipamentului tehnologic, respectiv materialele supuse tăierii,
- în domeniul tehnologic – evaluarea experimentală a efectelor factorilor de influență și optimizarea parametrilor de lucru.

Obiectivele menționate sunt direcționate spre scopul evidențierii posibilităților și extinderii domeniilor de utilizare și în sfera materialelor biocompatibile greu prelucrabile. Aceste materiale ridică multiple probleme în privința prelucrării, date fiind cerințele severe din sfera de securitate și sănătate în utilizare pentru organismele vii.

Pe cale de consecință, programul de cercetare finalizat prin prezenta teză se dorește a îngloba un studiu de anvergură pentru prelucrarea unor aliaje de titan, a unor materiale ceramice. În acest context au fost alese materialele: alumina (oxidul de alu-

miniu)-  $Al_2O_3$  și aliajul de titan TiAl6V4.

Prin aceste considerente au fost detaliate obiectivele:

- Evaluarea stadiului de aplicare a soluțiilor tehnice eficiente, actuale și de perspectivă pentru procesarea materialelor biocompatibile cu duritate ridicată.
- Studiul factorilor de influență implicați, efectele fizice și mecanice generate la interacțiunea jet de apă cu abraziv, în condiții de circulație în secțiuni reduse, respectiv în scop de dislocare de material.
- Dezvoltarea de modele matematice specifice procesului de prelucrare în vederea optimizării tehnologice.
- Evaluarea teoretică și experimentală a interacțiunii parametrilor tehnologici ai procesului de tăiere a materialelor greu prelucrabile.
- Evidențierea de soluții tehnice pentru îmbunătățirea performanțelor funcționale ale unor componente ale sistemului tehnologic.
- Evidențierea parametrilor regimului de prelucrare cu influența majoră asupra calității și prețului final al prelucrării.
- Stabilirea condițiilor tehnice în care se justifică din punct de vedere economic folosirea tehnologiei de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv

În realizarea efectivă a obiectivelor mai sus menționate s-a recurs la abordarea sistemică a procedurii de tăiere cu jet de fluid cu abraziv (figura 2.1).

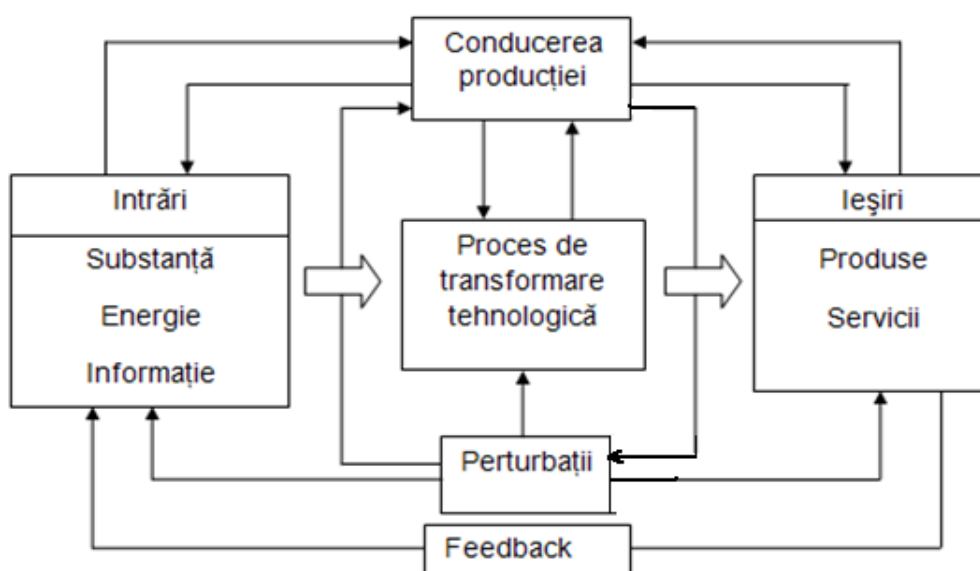


Figura 2.1 Reprezentarea schematică a procesului de producție industrială

În acest context, un sistem principal de producție cuprinde trei părți componente esențiale: intrări, ieșiri și procesul de producție propriu zis. Producția industrială reprezintă un sistem material de acțiune, dinamic, complex, având ca obiective principale obținerea din resurse naturale sau create de om a unor produse finite necesare societății umane, de calitate corespunzătoare, cu minimum de cheltuieli și de efort uman [13].

Procesul de producție este consecința funcționării unor componente și subsisteme de producție, organizate în cadrul unei structuri bine determinate și interconectate în conformitate cu cerințele transformării intrărilor în ieșiri. În concepția actuală de monitorizare permanentă a proceselor, pe tot ciclul și etapele implicate, se furnizează date și informații care trebuie preluate, procesate pentru deciziile on-line, sau ulterioare. De operativitatea reacției feedback depind tocmai deciziile menționate.

Caracterul complex al sistemelor de producție este o reflectare a structuralității materiei ( a capacității obiectelor și fenomenelor de a se organiza succesiv și nelimitat în sisteme din ce în ce mai sofisticate prin relații de coordonare și subordonare) și a diviziunii muncii [13].

Factorii de influență care caracterizează un proces de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv:

- presiunea jetului,
- viteza de prelucrare,
- debitul de abraziv,
- grosimea materialului procesat,
- unghiul de incidență jet/piesa de prelucrat.

Parametrii procesului de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv cuprind:

- forma și diametrul duzei de apă,
- distanța dintre tubul de focalizare și material,
- forma și diametrul tubului de focalizare
- natura și granulația materialului abraziv.

Ieșirile sistemului de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv ( funcții obiectiv ) pot fi:

- lățimea tăieturii la intrare,
- lățimea tăieturii la ieșire,
- lățimea medie a tăieturii,
- rugozitatea suprafețelor prelucrate,
- linearitatea muchiilor prelucrate,
- planeitatea suprafețelor prelucrate,
- poziția spațială a tăieturii,
- durata de viață a componentelor capului de prelucrare (duza de apă, tubul de focalizare, camera de amestec)
- consumul de material abraziv, apă, aer comprimat,
- consumul de energie electrică, etc.

În cadrul programului experimental vor fi studiate:

factorii de influență:

- $x_1 \Rightarrow$  presiunea jetului [MPa]
- $x_2 \Rightarrow$  viteza de prelucrare [mm/min]
- $x_3 \Rightarrow$  forma orificiului interior al tubului de focalizare,

parametrii procesului de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv:

- $p_1 \Rightarrow$  forma și diametrul duzei de apă,
- $p_2 \Rightarrow$  forma și diametrul tubului de focalizare,
- $p_3 \Rightarrow$  distanța dintre tubul de focalizare și material, [mm]
- $p_4 \Rightarrow$  grosimea materialului procesat, [mm]
- $p_5 \Rightarrow$  natura și granulația materialului abraziv.

leșirile sistemului ( funcțiile obiectiv):

- $I_1 \Rightarrow$  lățimea tăieturii la intrare, [mm]
- $I_2 \Rightarrow$  lățimea tăieturii la ieșire, [mm]
- $I_3 \Rightarrow$  lățimea medie a tăieturii, [mm]
- $I_4 \Rightarrow$  durata de viață a tubului de focalizare [ h ]

## Capitolul 3

### Generarea și utilizarea jetului de fluid

#### 3.1. Considerații generale

Preocupările actuale pentru procesarea materialelor, în general, dar cu atât mai mult a celor greu prelucrabile, tind să fie optimizate prin considerente tehnice și economice. Preocupările pe o lungă perioadă de timp au converș spre perfecționarea procedeeleor de prelevare a materialului prin mijloace mecanice care apelează la scule de tăiere, așchiere, respectiv termice la nivele de temperatură care pot să aducă materialul până în starea de topire. Noile cerințe de prelucrare, au dezvoltat procedee noi, care nu utilizează o sculă pentru îndepărtarea materialului, ci energia unor jeturi sau fascicule concentrate care nu afectează starea metalurgică a materialului. În acest context, energia cinetică a jetului de apă se dovedește eficientă, dar deosebit de eficientă prin introducerea în jet a unor particule dure și fragile cu rol de abraziv care interacționează cu materialul supus prelucrării.

La prelucrarea prin procedeele clasice interacțiunea sculă așchietoare-material, respectiv energie termică dezvoltată la tăierea materialului, produce modificări structurale semnificative pe o anumită adâncime. Degradarea materialului este rezultatul ciclurilor termice, la unele procedee (zona influențată termic), respectiv mecanice, la alte procedee (smulgere grăunți, deformare plastică, micro-fisuri, fisuri). Utilizarea jeturilor de fluide cu sau fără abraziv nu generează asemenea degradări, dar nici apariția zonei influențată termic (ZIT).

---

# Universitatea "Politehnica" din Timișoara

## Facultatea de Mecanică

---

Procesul de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv dispune de energie cinetică importantă, care poate fi asigurată peste o viteză minimă a jetului: viteză de prag ( $v_{0prag}$ ). Aceasta depinde în special de presiunea fluidului ( $p$ ) la intrare în duză. Conform relației lui Bernoulli [ 10 ]:

$$p_{at} + \rho_a/2 \times v_0^2 + \rho_a \times g \times h_1 = p + \rho_a/2 \times v_{cond}^2 + \rho_a \times g \times h_2 \quad [ 3.1 ]$$

unde:

$p_{at}$  - presiune atmosferică [MPa],

$p$  - presiunea apei [MPa],

$\rho_a$  - densitatea apei [kg/cm<sup>3</sup>],

$v_0$  - viteza de prag [m/s],

$v_{cond}$  - viteza apei din conductă [m/s ],

$h_1$  - înălțimea de la sol până la suprafața piesei [mm],

$h_2$  - înălțimea de la sol până la ieșirea din tubul de focalizare [mm],

$g$  - accelerația gravitațională [ m/s<sup>2</sup> ]

Pentru  $h_1 = h_2$  ,  $p_{at} \ll p_a$  și  $v_0 \gg v_{cond}$  viteza aproximativă a jetului la ieșire din duză este [10 ]:

$$v_{0prag} = \sqrt{\frac{2p}{\rho_a}} \quad [m/s] \quad ( 3.2.)$$

unde  $v_{0prag}$  este viteza limită (viteza de prag).

În practică [ 10 ] :

$$v_{0prag} = \mu \sqrt{\frac{2p}{\rho_a}} \quad [m/s] \quad (3.3)$$

unde  $\mu$  este un coeficient de eficiență care ține cont de:

- frecările dintre fluid cu peretele duzei de apă,
- geometria și rugozitatea suprafeței de contact dintre duza și fluid,
- regimul de curgere turbulentă prin duza de apă,
- compresibilitatea apei [ 10 ].

Procesul de prelucrare industrială a materialelor cu jeturi de fluide devine eficient tehnic și economic în condițiile în care jetul beneficiază de presiune ridicată, iar purtătorul de energie are secțiune redusă.

Sistemele tehnice performante actuale aferente prelucrării cu jeturi de fluide utilizează un amplificator de presiune constând din două circuite separate hidraulic:

- un circuit primar de obicei cu ulei, unde presiunea este relativ scăzută,
- un circuitul secundar cu apă, cu presiunea ridicată de lucru.

Au existat preocupări pentru generarea presiunii ridicate prin sisteme mecanice în una sau mai multe trepte. Sistemele cu roți dințate, melci, etc., au capacitate limitată de generare a presiunii, insuficientă pentru utilizarea la prelucrarea de dislocare a particulelor de material. Atingerea cerințelor de presiune ridicată a căzut pe seama sistemelor mecanice de tipul amplificatoarelor hidraulice.

Generarea presiunii ridicate se bazează pe raportul suprafețelor (diametrelor) cilindrilor primar cu ulei și cel secundar cu apă (figura 3.1). Presiunea apei se calculează cu relația [10] :

$$p_a = p_u \cdot S_u / S_a \quad [\text{MPa}] \quad (3.4)$$

unde:

$p_a$  - presiunea apei [MPa],

$p_u$  - presiunea uleiului [MPa],

$S_a$  - suprafața pistonului de apă [mm<sup>2</sup>],

$S_u$  - suprafața pistonului de ulei [mm<sup>2</sup>].

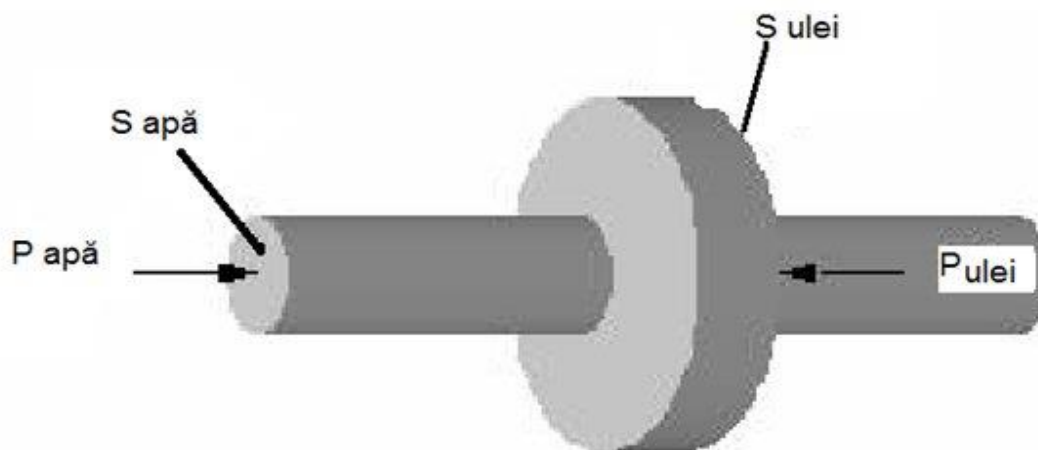


Figura 3.1. Elementele geometrice ale sistemului amplificator de presiune.



Energia cinetică a jetului la ieșire din duză este [ 10 ]:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot \dot{m}_a \cdot v_0^2 \cdot t \quad [\text{J}] \quad (3.5.)$$

unde:  $\dot{m}_a$  este debitul masic al particulelor de abraziv,

cu:

$$m_a = \frac{\pi}{4} \cdot d_0^2 \cdot v_a \cdot \rho_a \quad [\text{kg/s}] \quad (3.6.)$$

$$E_c = \alpha \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \mu^3 \cdot d_0^2 \cdot \left[ \sqrt{\frac{2p}{\rho_a}} \right]^3 \cdot \rho_a \cdot t = \frac{\alpha \cdot \pi \cdot \mu^3}{\sqrt{2 \cdot \rho_a}} \cdot d_0^2 \cdot p^{1.5} \cdot t \quad [\text{J}] \quad (3.7.)$$

unde  $\alpha$  este un coeficient adimensional ce ține cont de:

- micșorarea debitului de apă,
- viteza jetului datorată turbulențelor de curgere a fluidului,
- frecările care apar între jet și pereții duzei de apă.

Pentru duzele din safir  $0,6 < \alpha < 0,8$ .

### 3.2. Sistemului tehnic de prelucrare cu jet de fluid

Tendința generală este de utilizare a multiplicatoarelor de presiune, la care circuitul de medie presiune (până la 20 MPa) utilizează componente pentru instalațiile de acționare hidraulică consacrate. La circuitul de înaltă presiune, atât pentru pompa de apă, cât și pentru etanșări se folosesc soluții constructive specifice.

Caracteristicile generale ale echipamentului tehnic utilizabil la operații de tăiere a materialelor tehnice sunt:

- furnizarea jetului de fluid omogen la presiune reglabilă continuu până la 400 MPa,
- menținerea constantă a presiunii furnizate cu pulsații minime,
- furnizarea jetului de fluid omogen (apă), respectiv cu conținut prescris de pulbere abrazivă,
- direcționare 3D a jetului de fluid,
- controlul riguros 3D a poziției capului port duză în timpul procesului,

- posibilitatea alimentării concomitente a mai multor duze de lucru,
- nivelul de zgomot în timpul procesului să nu depășească 80dB,
- degajarea minimă de vapori de apă sau apă cu particule dure în mediul de lucru,
- posibilitatea colectării apei uzate și a particulelor de materiale abrazive și dislocate,
- consumuri de materiale consumabile și energie scăzute.

Din punct de vedere tehnologic, principala problemă la tăierea industrială o constituie ghidarea jetului, astfel încât să urmărească conturul dorit, menținând totodată duza la distanța optimă față de materialul de prelucrat. Problema și-a găsit soluționarea în utilizarea sistemelor robotizate actuale care realizează conducerea 3D a jetului.

Caracteristicile pentru un jet utilizabil în operații de tăiere a materialelor tehnice sunt:

- directivitatea controlată,
- diametrul minim,
- omogenitatea fluidului cu particule abrazive,
- curgerea neturbulentă.

Precizia de prelucrare cât și productivitatea au fost îmbunătățite considerabil odată cu dezvoltarea și implementarea programelor CAD / CAM. Principalele companii

producătoare de asemenea instalații de prelucrare cu jet de fluid au dezvoltat și patentat soft-uri cu ajutorul cărora se pot obține forme foarte diversificate ale pieselor prelucrate la o precizie ridicată ( $\pm 0,075\text{mm}$ ) [ 3 ], [ 10 ] .

Un sistem tehnic de prelucrare cu jet de fluid este format din:

- stația de tratare a apei,
- sursă de presiune înaltă a apei,
- rețea de conducte pentru distribuția apei la presiune ridicată,
- sistem de alimentare cu abraziv,
- unitate centrală de comandă,
- echipamente de siguranță, supraveghere și control,
- sisteme de ghidare și conducere a capului de prelucrare cu jet,
- sistem de instalare a materialului de prelucrat,

- sistem de aspirație a vaporilor,
- sistem de colectare și epurare a apei.

Ca și echipament conex pentru deservirea sistemului tehnic de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv se folosește un sistem de producere și/sau alimentare cu aer comprimat. Aerul comprimat este folosit pentru transportul și dozarea cu granule abrazive, dar și pentru acționarea echipamentelor pneumatice de comanda existente. Conceptele actuale includ și un uscător de aer pentru a se preveni umezirea granulelor de material abraziv. Umezirea poate duce la înfundarea conductelor de alimentare și curgere a particulelor abrazive.

Ca sursă de presiune înaltă a apei, de obicei se utilizează multiplicatorul hidraulic de presiune.

În figura 3.2 este prezentată imaginea de ansamblu a unui echipament pentru prelucrarea materialelor cu jet de fluid [ 5 ].



Figura 3.2. Instalația de prelucrare cu jet de apă cu abraziv [ 5 ].

Un mare avantaj al acestor sisteme tehnologice este posibilitatea alimentării mai multor posturi de lucru de la o singură sursă de apă la presiune înaltă, după cum se poate vedea în figura 3.3.

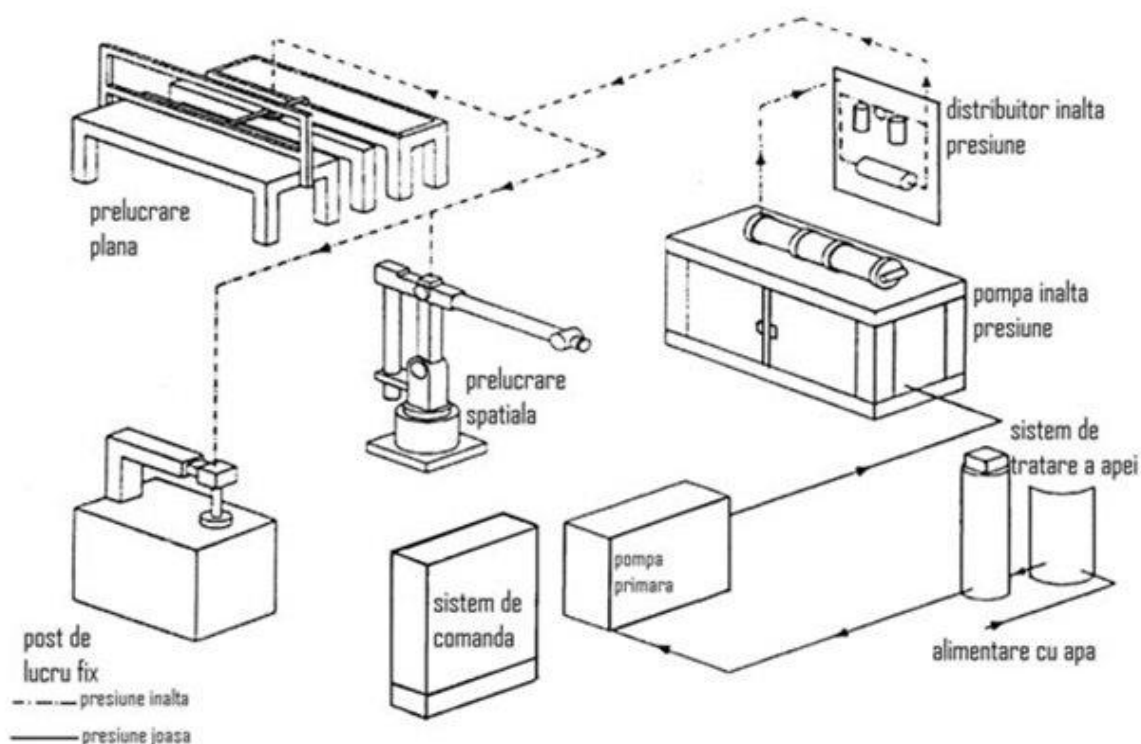


Figura 3.3 Sistemul de prelucrare multipost [ 1 ]

### 3.2.1. Stația de tratare și filtrare a apei

Aceasta are rol esențial în siguranța funcțională, performanțele tehnologice, fiabilitatea echipamentului. Calitatea apei este analizată prin prisma compoziției chimice, respectiv a naturii, dimensiunilor și volumului de impurități. Depunerile minerale existente în apa folosită în procesul de prelucrare contribuie semnificativ la perturbarea procesului. Totodată, se evită deteriorarea etanșărilor și decalibrarea prematură a duzei. Prepararea apei se face prin micro-filtrare, prin osmoza inversă sau prin tratarea în sistem închis (Closed Loop System) cu ozon. Particulele în suspensie pot avea dimensiunile  $0,1 \div 1 \mu\text{m}$  după filtrarea clasică, ceea ce este nepermis în cazul de față din cauză că pot provoca deteriorări majore la sistemele de etanșare, duza de apă, conductele de înaltă presiune, etc.

În figura 3.4.a) se prezintă instalația de purificare a apei prin osmoza inversă și instalația de purificare cu ozon - Closed Loop System în 3.3.b).



Figura. 3.4. a) Filtrarea prin osmoza inversă [ 14 ], b) Sistem cu circuit închis [15 ].

Sărurile de calciu și magneziu dizolvate în apă pot cauza depuneri pe pereții interiori ai circuitului de apă, fenomen deosebit de periculos pentru funcționarea în condiții de siguranță a întregului sistem tehnic de prelucrare. Clorurile și sulfatii produc corodarea părților metalice ale instalației aflate în contact cu apa.

Prin folosirea apei filtrate în procesul de prelucrare cu jet se asigură o creștere semnificativă (de la 30 la 200 de ore) a duratei de funcționare a componentelor instalației respective.

În tabelul 3.1 se prezintă conținutul admis precum și cerințele impuse pentru caracterizarea calitativă a apei [ 5 ]; [ 17 ].

Tabelul 3.1. Caracteristicile apei folosite la prelucrarea cu jet de fluid de înaltă presiune.

Nr.crt.	Caracteristica	u.m.	Valoarea
1	Conținutul de solide, maxim	mg/l	500
2	Conținutul de Fe, maxim	mg/l	0,2
3	Conținutul de Mn, maxim	mg/l	0,1
4	Conținutul de CaCO <sub>3</sub> , maxim	mg/l	25
5	Conținutul de cloruri, maxim	mg/l	100
6	Clor liber	mg/l	1
7	pH	-	6-8
8	Turbiditatea maximă	NTU	5

Fenomenul de osmoză se produce când două soluții apoase de concentrații diferite sunt situate în două celule despărțite printr-o membrană semi-permeabilă (figura 3.5) [ 16 ] .

În mod natural apa pură difuzează prin membrana semi-permeabilă din celula cu concentrație mai mică în celula cu concentrație mai mare, având tendința de egalizare a concentrațiilor în ambele celule și deci, de stabilire a echilibrului.

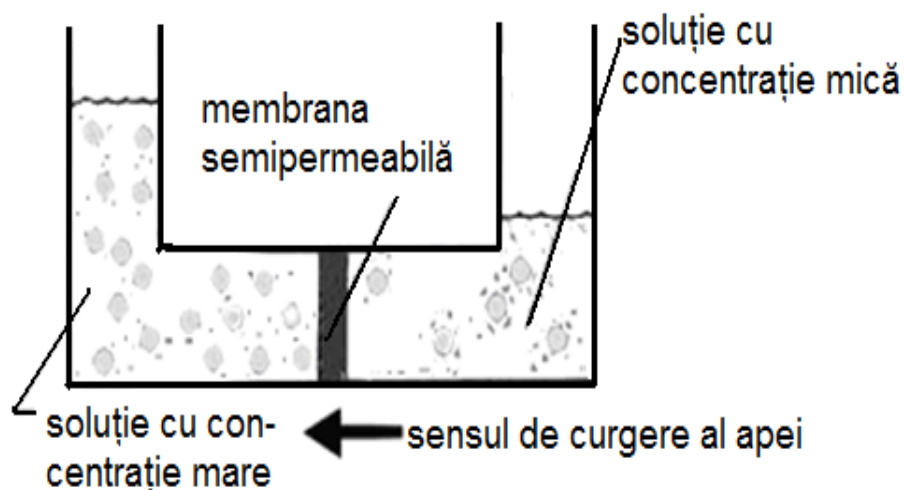


Figura. 3.5. Fenomenul de osmoză

Pe principiul fenomenului invers celui prezentat anterior, adică prin osmoza inversă, apa pură va trece prin membrana semi-permeabilă din soluția concentrată în

cea diluată, în final obținându-se apa pură. Acest lucru se va realiza prin aplicarea unei forțe asupra coloanei cu soluție concentrată care va învinge presiunea osmotică și va determina trecerea apei în celula cu soluție diluată. Pentru realizarea procesului este necesară o sursă de presiune de minimum 0,3 MPa numită presiune osmotică.

Filtrarea pe principiul osmozei inverse se realizează prin intermediul unor module care conțin un vas sub presiune în care se introduc membranele filtrante (figura. 3.6) [ 16 ] .

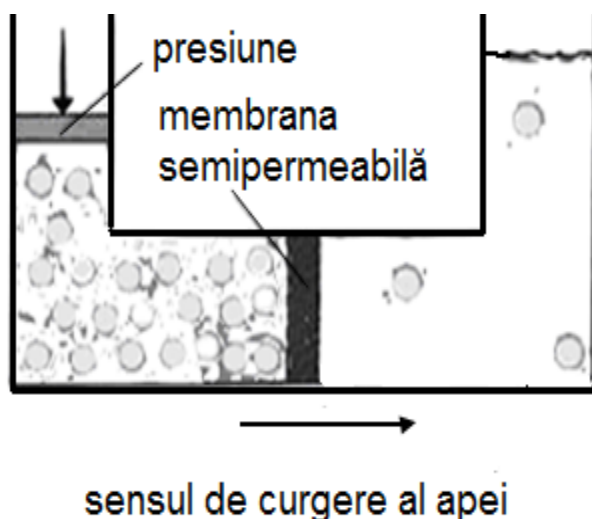


Figura 3.6. Fenomenul de osmoză inversă

În practică pot fi întâlnite următoarele variante constructive pentru **generatorul de presiune**:

- cu camere laterale,
- cu camere paralele,
- cu camere în stea.

Circuitul de ulei este prevăzut cu elemente specifice de funcționare: elemente de filtrare, reductor de presiune, indicator de presiune, sistem de răcire. În schema constructivă (figura 3.7) este inclus circuitul de medie presiune cu ulei și un circuit de înaltă presiune cu apă. Prin intermediul unui distribuitor, uleiul sub presiune pătrunde în camerele de ulei stânga-dreapta. Funcție de sensul de deplasare al pistonului se gene-



rează presiune în cilindrii de apă. Din aceștia, prin conductele de legătură, apa ajunge în atenuatorul de șocuri de pulsație și apoi la capul de lucru. Supapele de sens nu funcționează pe baza diferenței de presiune, acestea fiind comandate electronic și funcționând cu un decalaj precis calculat.

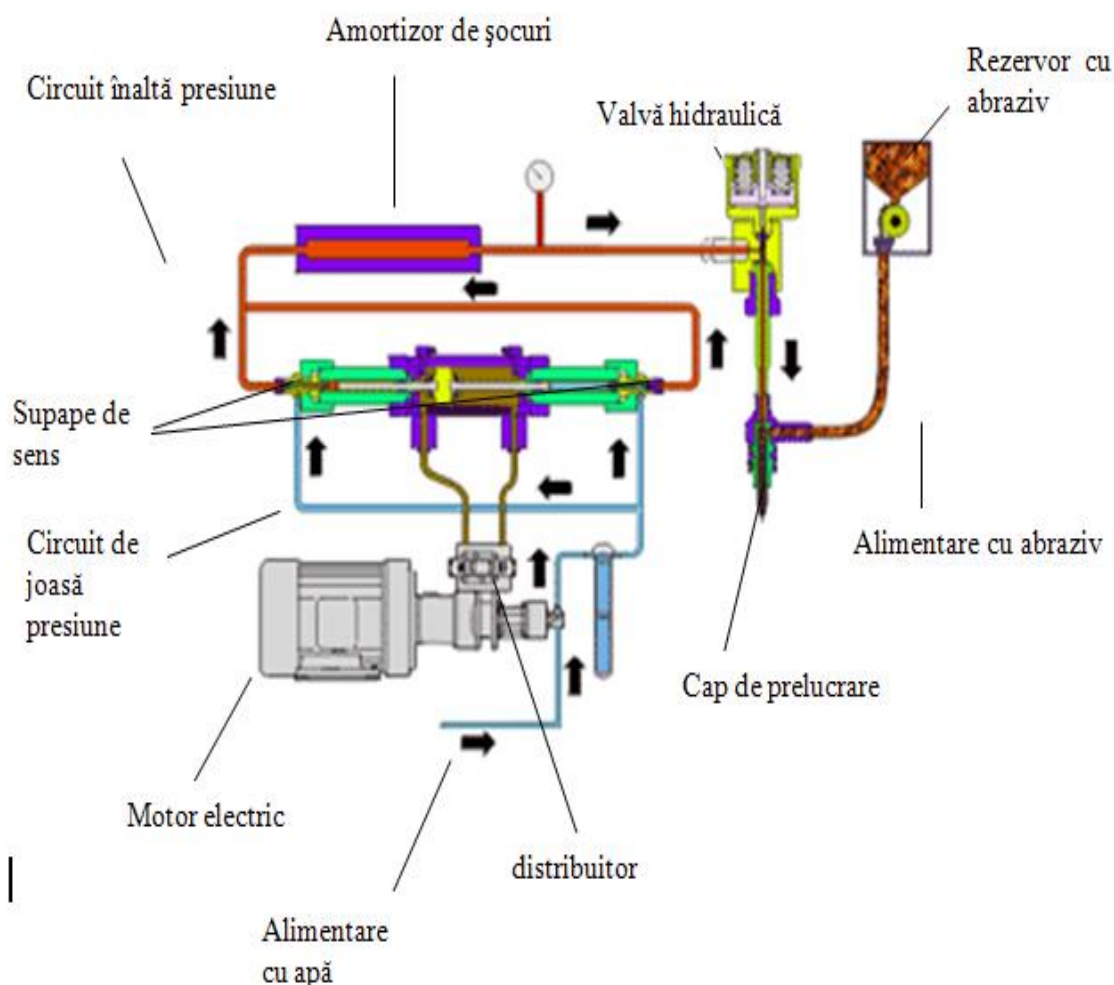


Figura 3.7. Schema de principiu a multiplicatorului de presiune cu camere laterale [ 3 ].

Din componența multiplicatorului de presiune mai fac parte elemente de măsurare a presiunii (manometre) și cele de reglare a presiunii uleiului din circuit prin care se poate varia și presiunea apei. Urmează echipamentele pneumatice de comandă a capului de lucru și de alimentare cu material abraziv.

În loc de ulei, unele sisteme utilizează la treapta de medie presiune apa cu emulsie și inhibitor de coroziune. Avantajul derivă în cazul în care au loc contaminarea cu apă din treapta de înaltă presiune în cea de medie presiune. Se previne astfel degradarea suprafețelor componentelor cu care fluidul vine în contact.



La ieșirea din circuitul de înaltă presiune, se montează un amortizor de șocuri hidraulice pentru a se evita solicitarea sistemului datorită undelor de șoc. Acestea apar datorită fluctuațiilor din funcționarea normală a pompei de înaltă presiune.

Soluțiile constructive aplicate în practică folosesc uzual pompe cu doi, trei, cinci sau șase cilindrii. Din acest motiv este necesară introducerea unui element intermediar, între multiplicator și capul de prelucrare, care să atenueze aceste unde de șoc la o valoare sub 5 %. Preferabil ar fi chiar sub 3 %. Pentru a-și îndeplini rolul funcțional cât mai eficient poziționarea amortizorului de șocuri hidraulice se face cât mai aproape posibil de multiplicatorul de presiune.

Din punct de vedere constructiv, volumul de apă al amortizorului trebuie să fie de  $5 \div 10$  ori mai mare decât volumul de apă al amplificatorului de presiune pentru a putea prelua undele de șoc fără ca să apară efecte negative asupra instalației.

Din acest motiv normele de exploatare și întreținere trebuie respectate cu strictețe. Presiunea apei de alimentare a multiplicatorului de presiune trebuie să fie de aproximativ 0,5 MPa.

Totodată, există un raport optim între volumul de apă din compartimentele cu rol funcțional direct al sistemului. Se prevede astfel constructiv, ca volumul de apă al amortizorului să fie de  $5 \div 10$  ori mai mare decât volumul de apă al amplificatorului de presiune pentru a putea prelua undele de șoc fără ca să apară efecte negative asupra sistemului.

Fluidele utilizate trebuie să aibă comportare elastică între anumite limite. Elementul elastic este apa, datorită compresibilității sale reduse.

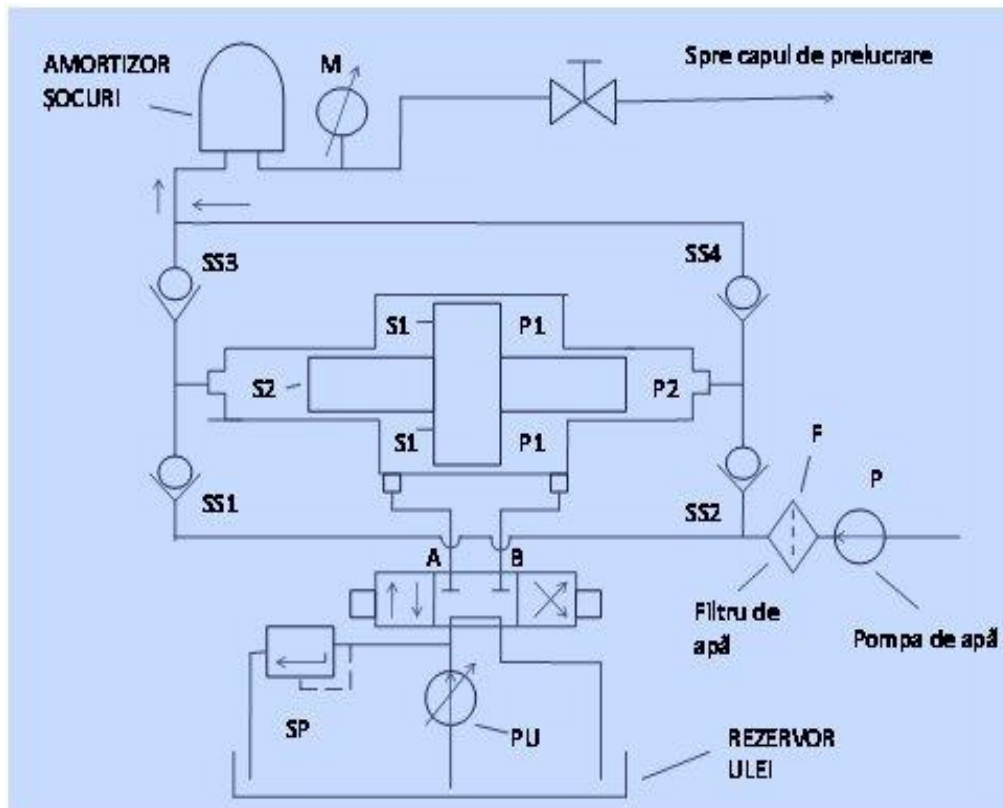
Multiplicatorul de presiune cu camere laterale (figura 3.8) este partea cea mai importantă și cea mai scumpă din componența unui sistem tehnic de prelucrare cu jet de fluid.

La sistemele clasice presiunea apei la ieșirea din pompa de înaltă presiune uzual folosită se situează în intervalul 350-380 MPa ajungând la sistemele de ultimă generație la 600 MPa [ 5 ].

În figura 3.8.a se prezintă vederea de ansamblu a multiplicatorului de presiune iar în figura 3.8.b schema de principiu.



a)



b)

Figura 3.8. Multiplicatorul de presiune cu camere laterale a -- vedere de ansamblu [ 5 ],  
b – schema de principiu

În figurile 3.9, se prezintă schema de principiu a multiplicatorului de presiune cu camere paralele. În figura 3.10 este imaginea multiplicatorului de presiune cu două camere paralele.

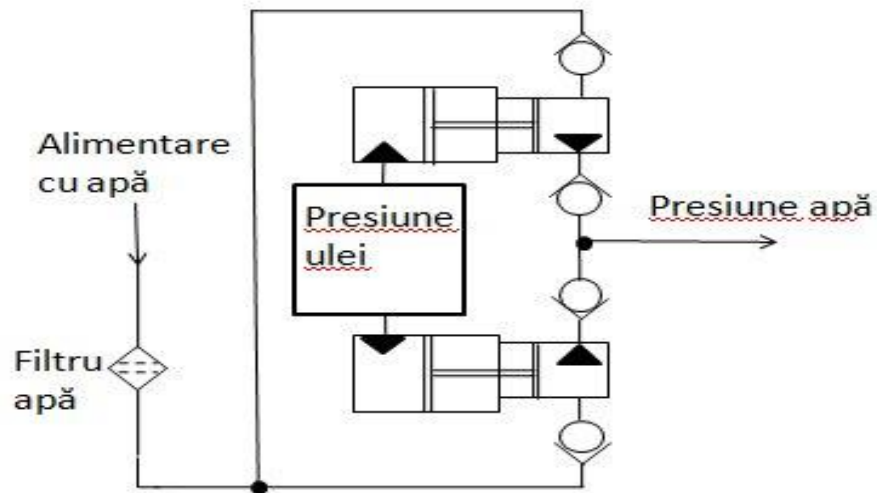


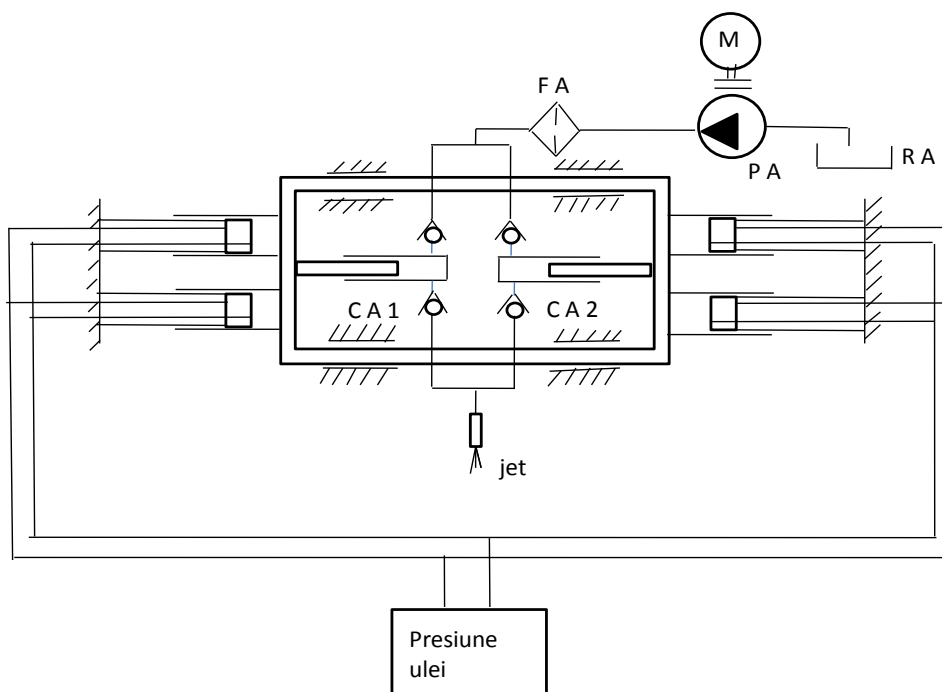
Figura 3.9. Schema de principiu a multiplicatorului cu două camere paralele.



Figura 3.10.

Multiplicatorul cu două camere paralele [ 9 ]

Schema de principiu a multiplicatorului de presiune cu camere cap la cap sau în stea se prezintă în figura 3.11.a [ 2 ].



a)



b)

Figura 3.11. Multiplicatorul de presiune cu camere cap la cap  
a - schema de principiu [11] , b – soluție constructivă.

### 3.2.3. Conductele de alimentare cu apă la presiune înaltă

Circuitul de conducte la presiune înaltă a capului de prelucrare se realizează din materiale rezistente la solicitări mecanice și cu elasticitate ridicate, ce asigură un grad

optim de flexibilitate. Geometria elementelor se corelează cu parametrii tehnologici la limita de solicitare în condiții normale, dar și pentru situații de suprasolicitare ai instalației prin: presiunea, debitul fluidului, pierderile hidraulice, rezultând grosimea peretelui, diametrul interior, pentru un material prevăzut.

În practică, rezultate optime au fost asigurate de circuite de conducte cu diametrele interior / exterior [ 2 ]:

1/4" De x 1/16" Di

3/8" De x 1/8" Di

9/16" De x 3/16" Di

Primele două diametre se folosesc la instalațiile de prelucrare cu jet de fluid mono-post cu distanțe reduse dintre pompa de înaltă presiune și capul de prelucrare, iar al treilea pentru conducta magistrală de alimentare a distribuitorului la instalațiile multi-post. Căderea de presiune pe unitatea de lungime se poate calcula cu relația [ 2 ]:

$$\Delta P = 0,0043(Q^2 / Di^5 \cdot R^{0,25}) \quad (3.8)$$

în care: Q este debitul de fluid din conductă [m<sup>3</sup>/s],  
Di - diametrul interior al țevii [mm],  
R - numărul lui Reynolds.

### 3.2.4. Sistemul de stocare și alimentare cu abraziv

Practica utilizării sistemelor tehnice pentru prelucrarea cu jeturi de fluide purtătoare de materiale abrazive a condus la mai multe soluții, personalizate corelat cu aplicația practică. În figura 3.12 este prezentată o soluție a unui asemenea sistem. Acesta are rolul de stocare și alimentare a capului de prelucrare cu material abraziv.

În componența sa se disting:

- rezervor de stocare a abrazivului prevăzut la partea superioară cu o sită,
- elemente pneumatice de acționare, dozare și transportul granulelor abrazive,
- supape de suprapresiune și descărcare a presiunii aerului comprimat.



Figura 3.12. Sistem pentru stocare – alimentare cu abraziv [ 19 ].

Purtătorul particulelor abrazive este aerul comprimat. Parametrii lui sunt prescriși și monitorizați de unitatea centrală de comandă, fiind asigurat de la un compresor de aer comprimat. Între compresor și sistemul de stocare - alimentare cu abraziv se prevede un uscător de aer pentru a preveni vehicularea particulelor abrazive în prezența vaporilor de apă din aerul comprimat. Umezirea acestor granule ar putea duce la formarea unor mici aglomerări care pot să oprească procesul.

Abrazivul cel mai des folosit este de origine minerală având granulația Mash 80 sau Mash 100, consumul acestuia fiind corelat cu presiunea de lucru folosită sau de setarea de la dozatorul de abraziv.

### 3.2.5. Rețeaua de colectare și decantare a apei uzate

Apa din bazinul de colectare conține particule abrazive cu dimensiuni eterogene, particule din materialul procesat, chiar și eventuale impurități de pe suprafețele acestuia. Pe cale de consecință, corelat cu cerințele de protecție a mediului, apa colectată trebuie să fie „prelucrată”. Se procedează la colectarea apei uzate într-o instalație de decantare – filtrare. Se separă particulele dure, indiferent de natura lor, iar

partea lichidă este deversată în sistemul de canalizare. Particulele rezultate în urma prelucrării se depozitează în locuri special destinate pentru astfel de deșeuri.

Se pot supune reciclării cu ajutorul unor instalații de uscare, separare și selectare. În acest caz se obține material abraziv la o granulație mai fină, deoarece particulele abrazive inițial introduse în proces s-au fărâmițat.

### **3.2.6. Sistemul de aspirație al vaporilor.**

În zona de lucru, se dispersează o anumită cantitate de vapori. Cerințele de protecție a mediului, dar și cele aferente securității și sănătății operatorilor, impun exhaustarea și menținerea unui mediu de lucru în limite riguroase de umiditate datorită vaporilor și particulelor de apă în suspensie. Acestea formează o ceață foarte fină ca urmare a dezintegrării picăturilor de apă. Pot să fie identificate o anumită cantitate de particule de abraziv în momentul începerii prelucrării, la impactul acestora cu suprafața semifabricatului, înaintea și în timpul străpungerii acestuia.

Din considerentele menționate, se apelează la sisteme eficiente de exhaustare. Sistemul este poziționat deasupra zonei de prelucrare a instalației.

### **3.2.7. Unitatea centrală de comandă**

Sistemul tehnic, ca ansamblu complex de lucru, corelat cu tendințele actuale de proiectare și utilizare este echipat cu unitate centrală pentru prescrierea, monitorizarea și stocarea parametrilor tehnologici pe durata operațiilor funcționale prin intermediul unui sistem central de calcul. De o importanță esențială este disponibilitatea unui soft adecvat.

### **3.2.8. Sistemul de instalare și deplasare a materialului de prelucrat.**

În timpul procesului de tăiere cu jeturi de fluide, solicitarea mecanică transmisă materialului este relativ redusă. Deosebit de importantă este precizia deplasărilor după axele OX, OY și OZ, respectiv reproductibilitatea pozițiilor prescrise. Deplasările se pot realiza cu motoare pas cu pas prin intermediul unei transmisii cu reductor cu angrenaje, elemente filetate, componente acționate hidraulic, etc. Cert este că deplasările trebuie să fie asigurate în sistemele 2D, respectiv 3D.



Se apelează de asemenea la mecanisme tip șurub-piulița cu bile cu circuit închis, acționate de motoare pas cu pas. Unele soluții constructive asigură deplasarea pe axa OZ hidraulic pe ghidaje cu sustentație hidrostatică, automatizat. Deplasarea este monitorizată cu traductori de deplasare, iar rezultatul este afișat pe display-ul mașinii. Precizia deplasărilor și a poziționărilor sunt la valoarea de un micron.

În cazul soluțiilor echipate cu angrenaje, sistemul trebuie să asigure diminuarea și compensarea jocului dintre flancurile dinților, concomitent cu funcționarea silențioasă în condiții de reversibilitate. Echiparea actuală pentru conducerea proceselor la instalațiile de prelucrare cu jeturi de fluid se asigură cu sisteme cu comandă numerică, folosirea materialelor noi, pentru confecționarea anumitor piese și subansamble, realizate cu tehnologii avansate. Soluțiile sunt similare cu cele ale mașinilor unelte de tipul CNC, dar și a sisteme tehnice pentru debitare termică cu plasmă, laser, etc. Flexibilitatea acestor concepte materializate prin sisteme de conducere-monitorizare a permis dezvoltarea și utilizarea la scara largă inclusiv la echipamentele pentru prelucrarea cu jeturi de fluide. Se asigură performanțe tehnico economice deosebit de favorabile.

Din punct de vedere al respectării normelor de securitate și sănătate în muncă a operatorilor, cerințele sunt tot mai riguroase, inclusiv în privința protecției mediului înconjurător. Prin soft-ul dedicat, se introduc date despre natura materialului de prelucrat, grosimea acestuia și respectiv un coeficient ce ține cont de gradul de prelucrabilitate al materialului, punctul de coordonate 0 și în funcție de acestea programul calculează parametri optimizați precum: vitezele de prelucrare, timpii necesari, consumul de abraziv, consumul de apă, costul total al operațiilor de prelucrare, etc. În figura 3.13 este imaginea ecranului pentru dialogul operator-mașină.

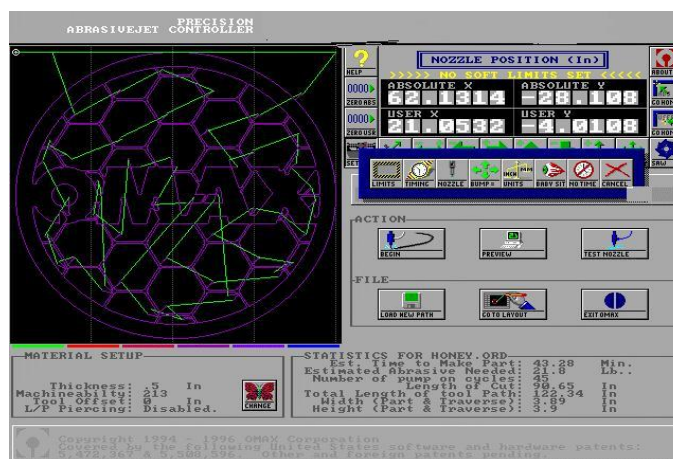


Figura 3.13. Interfața de comandă [ 6 ].



În figura 3.14 se prezintă o soluție constructivă a sistemului de acționare ghidare al instalației de prelucrare cu jet de apă. Se utilizează sania longitudinală (1), care se deplasează prin intermediul unor ghidaje cilindrice pe direcția longitudinală.

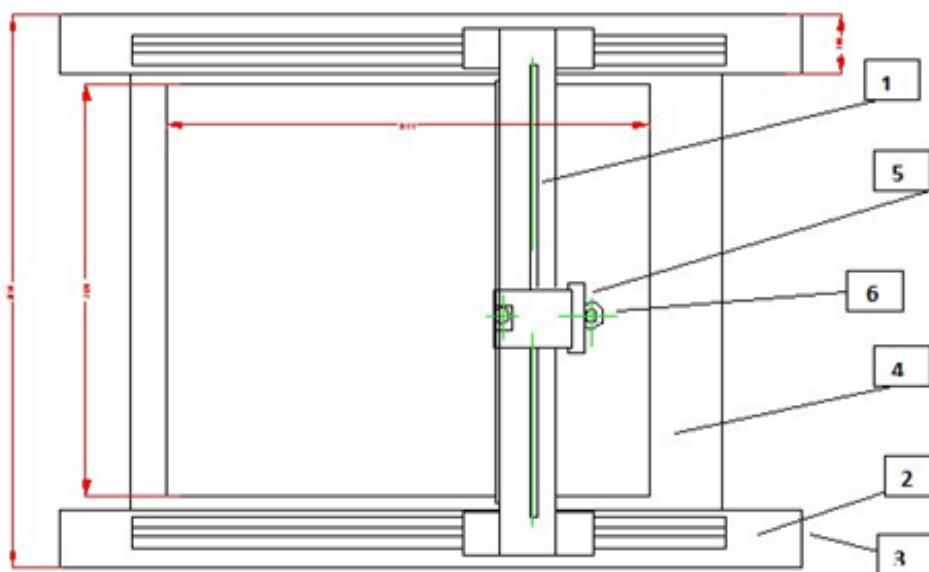


Figura 3.14. Sistemul de acționare-ghidare

Ansamblul sistemului de instalare și deplasare a materialului de prelucrat este poziționat pe batiul (3), în interiorul căruia este dispus disipatorul de energie. Frecvent se utilizează bazinul cu apă pentru amortizarea jetului de fluid după ieșirea din materialul de prelucrat (4). Pe grinda portală (1) se deplasează sania cu ghidaje transversale (5), prin intermediul unei transmisii cu motoare pas cu pas, reductor, angrenaj pinion și cremalieră. Pe sania transversală este dispusă sania pentru deplasarea pe verticală a capului de prelucrare (6). Ghidajele cilindrice cu compensarea automată a jocului sunt optime la nivelul cerințelor actuale pentru precizia și reproductibilitatea poziționării pieselor de prelucrat.

### 3.2.9. Capul de prelucrare.

Instalațiile moderne, performante, actuale, asigură atât mișcarea capului de prelucrare pe axele OX, OY, OZ cât și înclinarea acestuia în raport cu axa OZ în funcție de viteza de prelucrare. Astfel se elimină problemele legate de geometria suprafețelor pieselor cu grosimi mari de prelucrare.

Frecvent se constata dispersarea jetului și afectarea nefavorabilă asupra calității

muchiei tăiate.

Capul de prelucrare (figurile 3.15, 3.16) conține:

- port-duză cu duza de apă,
- camera de amestec a apei cu abraziv,
- tubul de concentrare și direcționare a jetului,
- supapa pneumatică de comandă a jetului,
- sistem de alimentare-dozare cu abraziv,
- sistemele de realizare a înclinării capului.

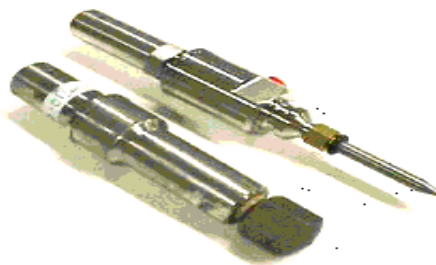


Figura 3.15. Capul de prelucrare [ 6 ].

Cu toată complexitatea constructivă sunt de remarcă dimensiunile reduse ale subansamblului cap de prelucrare. Astfel se asigură sporul semnificativ în poziționare, corelat cu inerția redusă la deplasările care trebuie să asigure precizii ridicate de prelucrare a materialelor.

În sistemele tehnice actuale de prelucrare cu jeturi de lichid, sporul în performanțele de precizie și calitate a suprafețelor prelucrate sunt dependente de utilizarea elementelor. Un exemplu este cazul capului de prelucrare complet automatizat cu mobilitate 3D (figura 3.16).



Figura 3.16. Capul de prelucrare automatizat (3D) [ 8 ]

Comanda jetului se face cu ajutorul unei supape pneumatice, aflate în partea superioară a capului de prelucrare. Aceasta este pilotată electric prin sistemul de monitorizare a procesului. Unele elemente care concură la direcționarea și prelucrarea jetului de apă cu abraziv precum duza de apă, camera de amestec și tubul de focalizare se degradează prin eroziune și trebuie să fie înlocuite. Acestea sunt considerate componente consumabile.

În cazul prelucrării cu jet de fluid a materialelor cu grosimi considerabile și cu viteza de prelucrare mai mare decât cea optimă, la interacțiunea dintre jet și materialul prelucrat, după ce jetul atinge o anumită adâncime de pătrundere în material, se observă o rămânere în urmă (decalaj) a jetului (figura 3.17) față de poziția jetului la intrare în materialul respectiv. Prin urmare se obține o străpungere în v a materialului cu aproximativ aceeași calitate a marginilor tăiate. La prelucrare cu viteza mai mică decât cea optimă, lățimea tăieturii de pe suprafața opusă va fi mai mare decât lățimea tăieturii de pe suprafața de sus, rezultând o străpungere trapezoidală a materialului, deci o calitate mai slabă a tăieturii din punct de vedere al planeității.

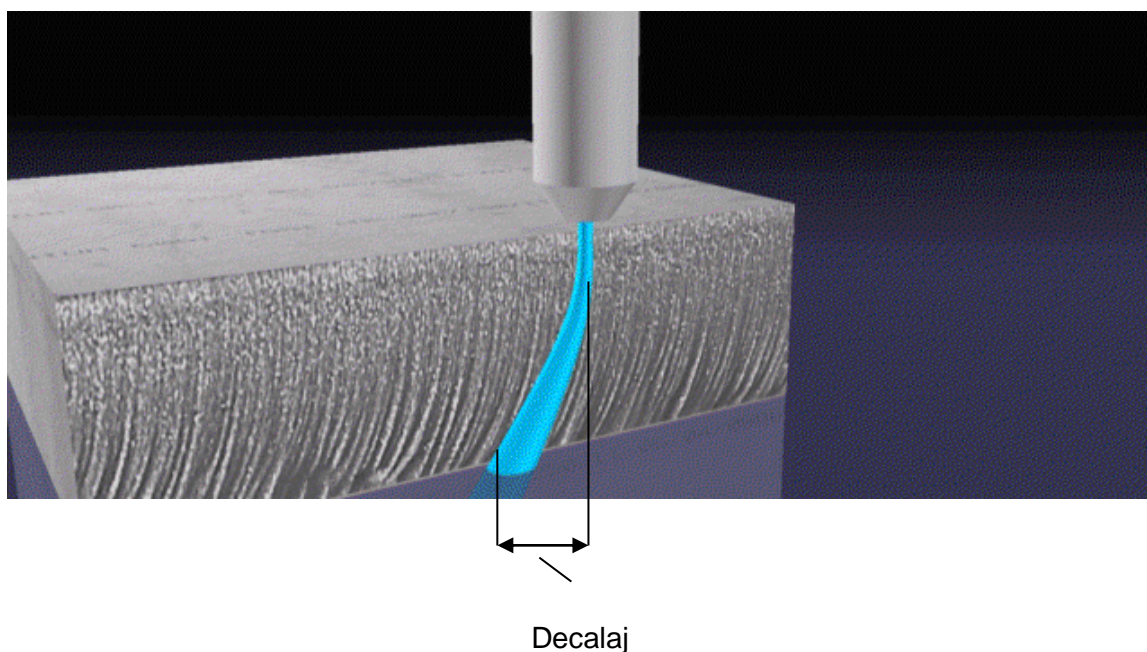


Figura 3.17 Tăierea materialelor cu grosimi mari [ 3]; [18]

Astfel, pentru obținerea calității corespunzătoare a suprafețelor prelucrate, cu străpungere paralelă, este nevoie de respectarea vitezei optime de prelucrare din baza de date aferentă unor instalații performante, automatizate și robotizate. Controlul și eliminarea abaterilor se realizează și cu ajutorul unui software performant, specific [20],

[21], [22], [24], [25], [26]. Un avantaj considerabil în această situație oferă capul de prelucrare 3D complet automatizat. În acest sens, pentru obținerea unei suprafețe de o calitate superioară F.L. Chen, E. Siores ș.a. au folosit tehnica oscilației tubului de focalizare [21], [22].

În figura 3.18 se prezintă aspectul suprafețelor prelucrate cu jet de fluid cu abraziv direct comparativ cu cel al prelucrării acestora cu jet de fluid oscilant având viteza de prelucrare constantă [21], [22].

În funcție de materialul supus prelucrării se poate determina un interval de variație pentru unghiul de înclinare al jetului precum și pentru frecvența respectivă de oscilație.

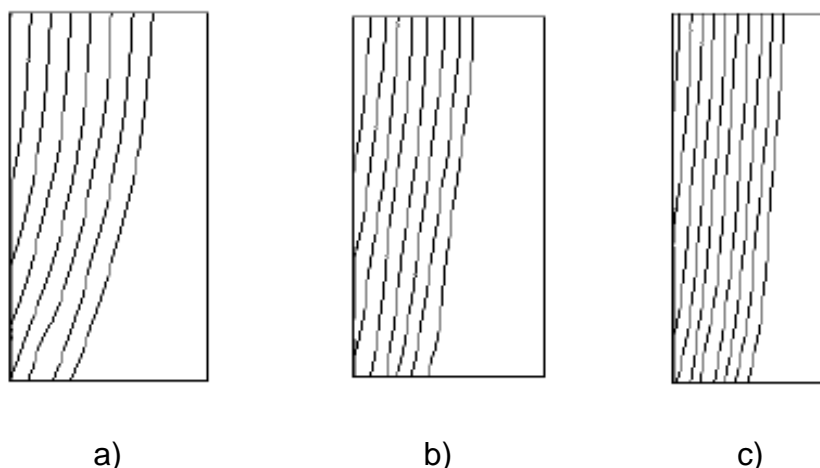


Figura 3.18 Urme produse pe suprafețe prelucrate cu jet de apă cu abraziv

- a) trecere directă,
- b) trecere oscilantă la 2° înclinare și frecvența de 5 Hz
- c) trecere oscilantă la 2° înclinare și frecvența de 8 Hz

Se observă o creștere a adâncimii de pătrundere precum și a calității suprafeței prelucrate cu jet de fluid cu abraziv oscilant cu unghiuri mici (ex: 2° - 3°) și frecvențe dinspre limita superioară a intervalului de frecvențe corespunzător materialului prelucrat față de cazul prelucrării cu jet de fluid cu abraziv direct. Aceste afirmații se referă la prelucrarea materialelor ductile, oțelurilor nealiate și a aluminiului cu jet de fluid cu abraziv, experimentările fiind efectuate pe respectivele material.

În continuare se va folosi termenul de tub de focalizare pentru tubul de centrare al jetului de fluid

### 3.2.9.1. Duza de apă

O componentă cu rol esențial în configurația jetului de fluid este duza. Evoluția permanentă spre parametri tot mai severi de prelucrare a generat configurații constructive bazate pe materiale cu duritate foarte mare: diamant sintetic, safir sau rubin sintetic. Diametrul duzei de safir este de aproximativ 2mm, grosimea de 1 mm, în care este practicat orificiul având diametrul de  $0,1 \div 0,4$  mm.

Energia potențială a fluidului este transformată în duză pentru jetul de fluid în energia cinetică a jetului. Compactitatea și caracteristicile jetului depind în mare măsură de forma, dimensiunile și rugozitatea suprafeței de conducere a fluidului din interiorul duzei. Dacă aparent se utilizează materiale scumpe, costul duzei este determinat în principal de costurile prelucrărilor orificiului. Date fiind dimensiunile reduse și necesitatea de manipulare pentru prelucrare și instalare în capul de prelucrare, duzele sunt fixate în montură din oțeluri cu rezistența mecanică ridicată (figura 3.19)



Figura 3.19. Duza de apă.

Energia potențială a fluidului este transformată în duză în energia cinetică a jetului. Compactitatea și caracteristicile jetului depind în mare măsură de forma, dimensiunile și rugozitatea suprafeței de conducere a fluidului din interiorul duzei. Pentru realizarea jeturilor de fluide la presiune înaltă au fost încercate mai multe tipuri de duze [2] (figura 3.20):

- a) cilindrică
- b) conică
- c) conoidă
- d) conico-cilindrică



e) bicubică

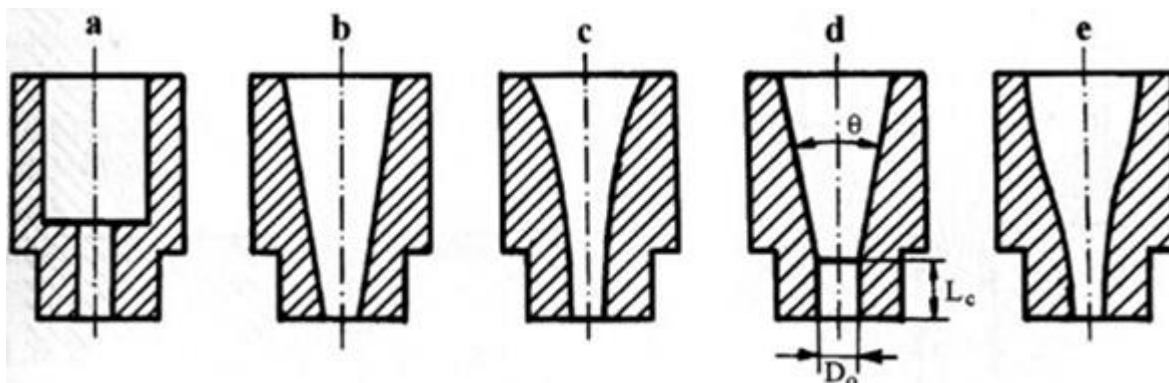


Figura 3.20. Diferite tipuri de duze [ 2 ]

Dintre configurațiile geometrice menționate, duza cilindrică este cel mai ușor de realizat din punct de vedere tehnologic. Studiul curgerii lichidului în duză evidențiază următoarele aspecte [ 2 ] (figura 3.21) :

- contracția bruscă a jetului de fluid la capătul porțiunii cilindrice duce la apariția unor zone de recirculare ( $zr_1$ ), întreținerea mișcării în zonele respective făcându-se cu ajutorul energiei preluate de la curentul principal, energie ce se disipează prin frecare vâscoasă.
- după contracția bruscă, având loc o reatașare a jetului de fluid la peretele porțiunii cilindrice, are loc formarea altei zone de recirculare ( $zr_2$ ), fenomen care duce la scăderea presiunii în zona respectivă și la apariția bulelor cavitaționale. Implozia ulterioară a respectivelor bule poate degrada peretele interior al duzei.

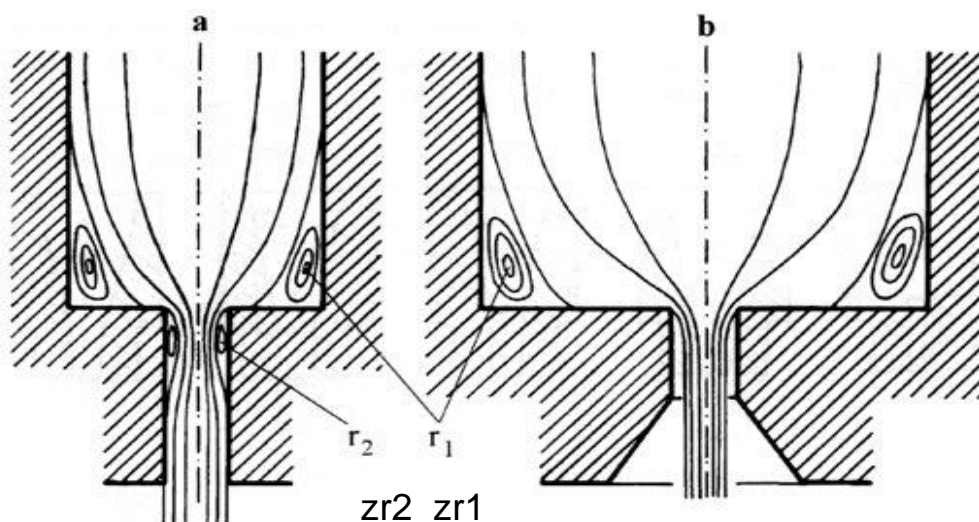


Figura 3.21. Zone de recirculare din duze. [ 2 ]

Prima zonă de recirculare nu poate fi eliminată fără modificarea geometriei duzei însă influența sa asupra jetului poate fi mult diminuată prin utilizarea unui raport suficient de mare între diametrul porțiunii cilindrice anterioare și diametrul orificiului duzei. De regulă se adoptă un raport mai mare de 10:1.

A doua zonă de recirculare poate fi eliminată prin scurtarea porțiunii cilindrice a orificiului duzei, evitându-se astfel contactul jetului cu peretele cilindric interior al acesteia. Soluția ridică însă probleme legate de rezistența mecanică a duzei. Pentru soluționarea acestei din urmă probleme, se folosește o pastilă din safir sau diamant sintetic, prin care se practică orificiul respectiv, montată într-o montură metalică. Astfel are loc creșterea costului duzei.

Un avantaj semnificativ al duzelor cilindrice este că au cea mai mică suprafață aflată în contact cu fluidul în zona vitezelor mari de curgere, în comparație cu celelalte variante de duze. Aceasta configurație asigură și cele mai mici pierderi prin frecare. În schimb, calitatea jetului este puternic influențată de precizia cu care a fost prelucrată muchia de intrare a orificiului, respectiv de uzura ei în timpul funcționării. Evitarea apariției zonelor de recirculare  $zr_1$  se poate obține numai dacă secțiunea de curgere a fluidului scade progresiv cu creșterea corespunzătoare a vitezei jetului.

În ultimii ani, ca urmare a cercetărilor întreprinse în acest sens, au fost realizate duze din materialele precum: carbura de tungsten, carbura de bor, materiale ceramice sinterizate, în loc de safir și diamant. Aceste soluții au dat rezultate bune în anumite cazuri permițând în schimb o scădere a costului și deci și o competitivitate mai mare a procedurii respectiv de prelucrare. Diametrul pastilei de safir este de aproximativ 2mm, grosimea de 1 mm, orificiul având diametrul de  $0,1 \div 0,4$  mm. Cea mai simplă soluție ar fi folosirea duzei conice, dar din punct de vedere tehnologic, suprafața conică este mai greu de realizat și finisat, decât cea cilindrică, mai ales pentru diametre mici ale orificiului.

Au fost încercări și cu duze conoide, la care variația secțiunii de curgere are loc după o lege polinomială sau exponențială. Spre exemplu, dacă se dorește creșterea liniară a vitezei de-a lungul axei, secțiunea trebuie să scadă liniar.

Notând cu  $R_0$  - raza orificiului, cu  $R_1$  - raza la intrare în duză și cu  $L$  - lungimea duzei, raza curentă ( $r$ ), la distanța ( $z$ ) de la intrare, variația secțiunii va fi [ 2 ]:

$$\frac{1}{r^2} = \frac{1}{R} + \frac{z}{L} \left( \frac{1}{R_0^2} - \frac{1}{R_1^2} \right) \quad (3.9)$$

Acest tip de duză este folosit în special pentru jeturile pulsante. Execuția și controlul suprafeței de conducere a fluidului fiind mai dificile crește semnificativ prețul de cost, fără a obține și o creștere corespunzătoare a calității jetului. Aceeași remarcă este valabilă și în cazul duzelor bicubice, la care dependența „ $r(z)$ ” este obținută cu două arce de polinom de gradul al treilea, racordate astfel încât să se obțină o curbă de clasa  $C^2$ .

Realizarea duzelor conico-cilindrice nu ridică probleme mari din punct de vedere tehnologic, materialele folosite pentru construcția acestor duze fiind oțelurilor aliate cu molibden, carburi metalice, diamant sau safir sintetic. Uzura cea mai pronunțată apare în zonele în care fluidul are viteze ridicate, deci în porțiunea cilindrică de la ieșire și în vecinătatea ei. Din acest motiv se preferă și în acest caz folosirea unor pastile din safir sau diamant în care se realizează orificiul respectiv spre deosebire de duza cilindrică, porțiunea conică fiind situată deasupra celei cilindrice (în amonte față de aceasta).

Diametrul tubului de focalizare în cazul utilizării jetului cu abraziv se alege în funcție de diametrul duzei de apă în proporție de  $1/2 \div 1/4$  și în raport de diametrul granulelor de abraziv folosit în raportul de  $1/20 \div 1/50$ .

Duritatea duzei de abraziv se alege în funcție de duritatea granulelor de abraziv în raport de  $1/2 \div 1/4$ .

Pentru a se realiza presiunile necesare pentru prelucrarea diferitelor materiale, duzele utilizate au diametrul interior de  $0,18 \div 0,40$  mm. Materialele utilizate pentru fabricarea duzelor de apă se aleg în funcție de raportul performanță/cost.

Durata de funcționare a duzelor de apă este cea mai mare la cele realizate din diamant, ajungând la peste 1000 de ore pe când la cele din safir această durată este de aproximativ cca. 100 de ore [27]. Costul este corespunzător, mult mai ridicat la cele din diamant.

Durata de funcționare a duzelor de apă depinde critic de gradul de puritate al apei care intră în acestea. Astfel o impuritate a apei dinspre pompă poate deteriora critic duza de apă.

Se poate întâmpla ca în timpul funcționării particule abrazive foarte fine să pătrundă prin orificiul duzei de apă datorită depresiunii create. Acest fenomen provoacă uzura rapidă a suprafeței cilindrice în partea dinspre camera de amestec și are ca rezultat perturbarea condițiilor de curgere ale jetului.



În acest sens au fost efectuate investigații având ca scop înlăturarea fenomenului respectiv de migrare a particulelor foarte fine de abraziv înspre orificiul duzei de apă.

Hashish și Craigen [28], Nanduri ș.a. [29], au folosit duze ventilate care asigură legătura dintre orificiul acestora cu mediul ambiant. Particulele fine de abraziv din contracurent sunt astfel împiedicate să treacă în zona cu depresiune. De menționat că efectele au fost destul de reduse.

O alta soluție pentru diminuarea efectului circulației particulelor abrazive este deschiderea secvențială a alimentării cu abraziv. Este recomandat ca prima dată să fie pornit jetul de apă și apoi alimentarea cu abraziv. La fel, la oprirea jetului se recomandă oprirea alimentării cu abraziv și ulterior oprirea jetului de apă.

Tot la fel de important pentru prevenirea reducerii duratei de funcționare a duzei de apă este respectarea condițiilor de etanșare dintre duza și locașul acesteia din port duză. Un aspect semnificativ care caracterizează eficiența duzei de apă și a întregului proces de prelucrare este legat de stabilirea valorii coeficientului de descărcare ( $C_d$ ) care exprimă gradul de convertire al energiei potențiale a presiunii în energie cinetică a jetului. Coeficientul ( $C_d$ ) depinde de caracteristicile regimului hidraulic de curgere incluzând coeficientul de viteză -  $C_v$ , coeficientul de contracție -  $C_c$ , factorul de compresibilitate  $\Psi$ , dar și de calitatea suprafeței interioare a orificiului duzei de apă din punct de vedere al rugozității și geometriei acesteia.

În urma unor investigații atent elaborate, Hashish [ 30 ], [ 31 ] a determinat dependența coeficientului de descărcare  $C_d$  în funcție de diametrul orificiului duzei de apă ( $d_o$ ) și de presiunea pompei ( $p$ ). Pentru o duză de apă cu orificiul din safir și pentru presiuni ale apei mai mari de 345 MPa valoarea acestui coeficient se poate determina cu relația:

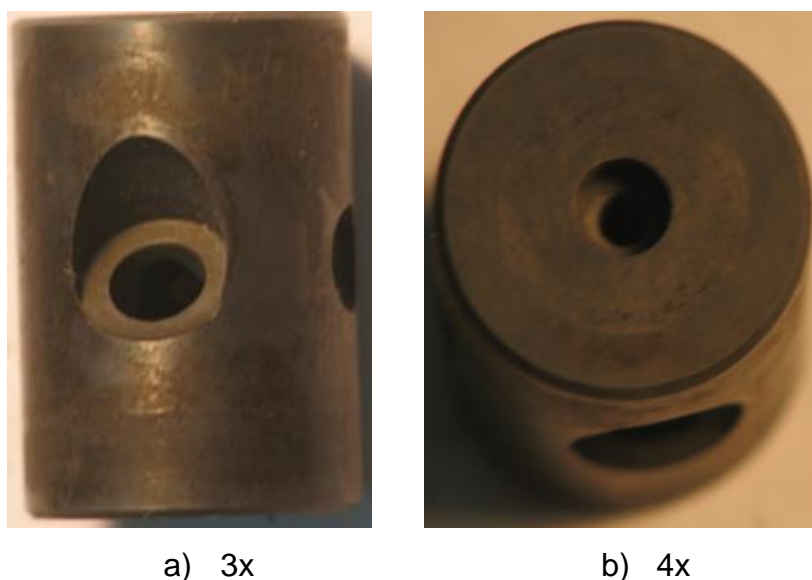
$$C_d = 0,785 - 0,00014P - 0,197d_o \quad (3.10)$$

Se poate constata că măbind presiunea și diametrul jetului scade coeficientul de descărcare ( $C_d$ ). Din analiza ultimilor doi termeni ai ecuației de mai sus observă că, pentru o putere dată a jetului, este mai eficient să se mărească presiunea apei decât diametrul duzei pentru a se obține o convertire cât mai bună a energiei potențiale în energie cinetică a jetului.

### 3.2.9.2. Camera de amestec

Camera de amestec (figura 3.22) este partea deosebit de importantă a capului de prelucrare. În aceasta are loc amestecul dintre granulele de abraziv și jetul de apă. Este considerată parte consumabilă care trebuie înlocuită după o anumită perioadă de timp în funcție de abrazivul folosit și de presiunea de lucru.

Jetul de apă intră prin partea superioară a camerei de amestec iar abrazivul prin partea laterală, prin unul sau două orificii dispuse simetric. Camera de amestec se realizează din materiale dure cum ar fi carburi de wolfram, beriliu, titan, bor, etc.



a) 3x

b) 4x

Figura 3.22. Camera de amestec

Li ș.a. [10], [32], Galecki și Mazurkiewicz [33] au studiat influența configurației camerei de amestec din punct de vedere dimensional asupra performanțelor jetului. S-a concluzionat că distanța ( $l_1$ ) dintre ieșirea din duza de apă și intrarea în tubul de focalizare are o influență majoră asupra adâncimii de tăiere (figura 3.23). Adâncimea de tăiere poate să crească și cu 80% dacă distanța ( $l_1$ ) este optim aleasă.

M. Mazurkiewicz, L. Fincuan, R. Ferguson, ș.a. au studiat influența parametrilor regimului asupra capului de tăiere [34]. Distanța ( $l_2$ ) dintre orificiul de intrare a granulelor abrazive în camera de amestec și intrarea în tubul de focalizare are influență asupra timpului de găurire.

Acest efect este mai pronunțat în cazul folosirii tuburilor cu diametre mai mari ( $d_F=3,175\text{mm}$ ) [34], caz în care timpul respectiv scade chiar cu 30%. Pentru diametre

mai mici ale tubului de focalizare, ( $d_F=0,75\text{mm}$ ) distanța ( $l_2$ ) nu afectează semnificativ jetul de fluid [34].

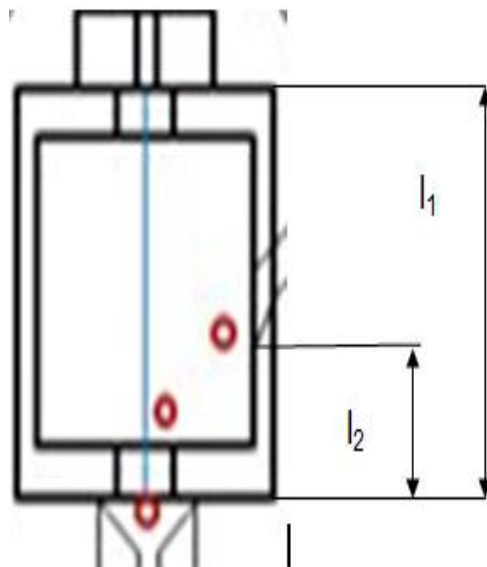


Figura 3.23 Structura camerei de amestec

Lungimea camerei de amestec are influență asupra volumului de material îndepărtat de jet în sensul că dacă această lungime este mai mare de 20mm, volumul de material îndepărtat scade.

Pe lângă caracteristicile dimensionale ale camerei de amestec, un alt aspect ce caracterizează performanțele capului de prelucrare este alinierea dintre orificiul duzei de apă și al tubului de focalizare. În condiții ideale, acestea se află aliniat cu mare precizie, însă în realitate există o abatere atât din punct de vedere axial, cât și unghiular. În primul caz axele de simetrie sunt paralele dar nu și coliniare (figura 3.24.a).

Galecki și Mazurkiewicz [33] au arătat că abaterea axială influențează semnificativ transmiterea presiunii de la duza de apă la tubul de focalizare. La utilajele moderne această toleranță este de maximum  $\Delta y=51\mu\text{m}$  și poate fi reglată cu ajutorul sistemelor de prindere și reglare locale. Abaterea unghiulară însă, (figura 3.21.b), chiar și la unghiuri foarte mici, de  $1^\circ$ , poate produce perturbări importante ale procesului de prelucrare [10], [35].

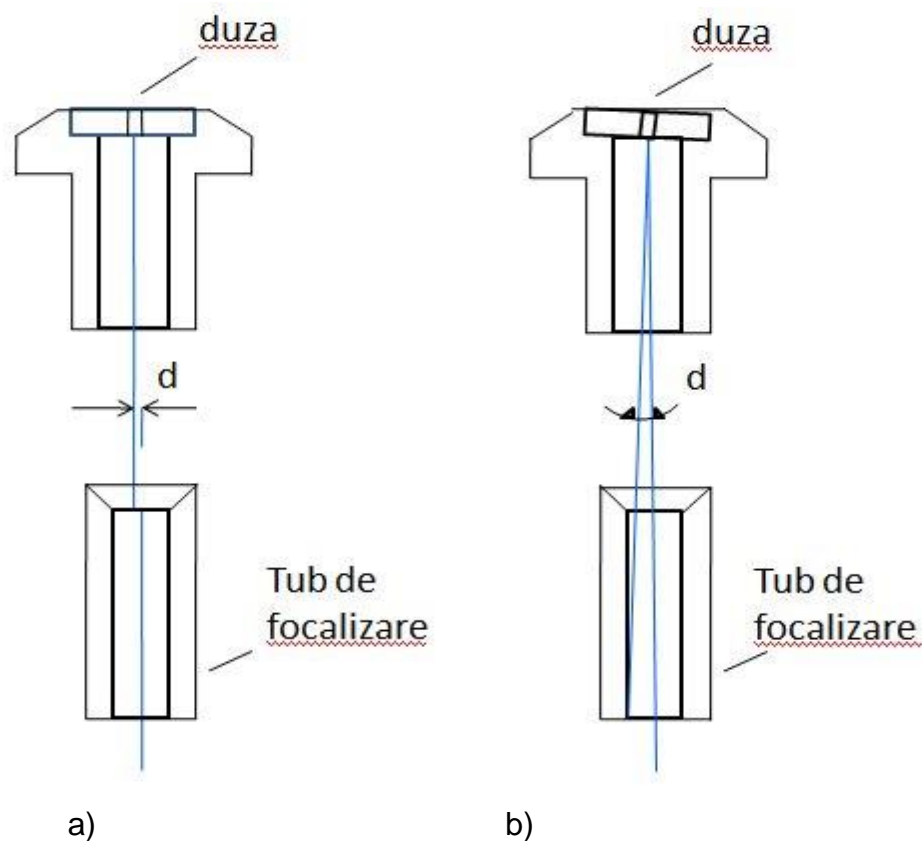


Figura 3.24 Abaterile jetului de fluid. a – neliniaritate, b – neaxialitate.

Astfel, jetul de apă lovește pereții laterali ai tubului de focalizare înainte de a pătrunde în acesta, ceea ce duce la scăderea drastică a duratei de folosire a tubului.

**3.2.9.3. Tubul de concentrare și direcționare** a jetului, (figura 3.25) are rolul de prelucrare a jetului de fluid în sensul atingerii performanțelor tehnice și tehnologice optime: concentrare, focalizare, direcționare spre suprafața de prelucrat. Din aceste considerente, prescurtat, este denumit frecvent tub de focalizare. Datorită fenomenelor hidrodinamice severe ale jetului de fluid eterogen, este realizat din materiale care să confere rezistență ridicată la eroziune și abraziune. Frecvent se utilizează carbura de bor sau de wolfram, materiale cu duritate ridicată care asigură o durată de funcționare de  $90 \div 140$  ore, în funcție de presiunea de lucru, de natura și granulația materialului abraziv.

În respectivul tub are loc accelerarea granulelor abrazive până la viteza de aproximativ  $1,5 \div 2$  Mach, inclusiv la ieșirea din acesta.



Figura 3.25. Tubul de focalizare.

Lungimea tubului de focalizare influențează capacitatea de prelucrare a jetului în sensul că este calculată o lungime optimă a acestuia pentru care pierderile energetice ale jetului sunt minime. Pentru a asigura o precizie mai bună de prelucrare se folosesc totuși tuburi cu o lungime ceva mai mare decât cea optimă.

Lungimea optimă a tubului de focalizare [36], [37] se poate calcula cu relația:

$$L_{F_{\text{optim}}} = (25 \div 50) \times d_F \quad [\text{mm}] \quad (3.11.)$$

în care  $d_F$  este diametrul interior [mm].

Galecki și Summers [ 10 ], [ 38 ] au observat că particulele mai mari la fel ca și cele cu greutate specifică ridicată necesită lungimi mai mari ale tubului de focalizare pe când particulele din material abraziv mai fin pot fi accelerate și pe distanțe mai mici. Lungimea optimă a focalizatorului este influențată cel mai mult de densitatea materialului abraziv din jet.

Mărimea diametrului interior ( $d_F$ ) influențează performanțele jetului de fluid. Măsurătorile făcute cu un anemometru laser au arătat că viteza particulelor abrazive scade cu creșterea diametrului ( $d_F$ ). Blickwedel [ 36 ] analizând procesul complex de amestec care se formează în tubul de focalizare, a arătat ca viteza finală a particulelor de abraziv depinde de densitatea amestecului format între aer, granulele abrazive și

jetul de apă. Cu cât densitatea acestui amestec este mai mare cu atât crește și viteza particulelor abrazive la ieșirea din tub. Această condiție este valabilă pentru diametre mici ale tubului de focalizare.

Himmelreich [37] a arătat că la diametre mari ale focalizatorului au loc fenomene cu un grad ridicat de turbulență. Astfel se argumentează scăderea semnificativă a adâncimii de tăiere prin utilizarea unui tub cu diametrul ( $d_F$ ) peste o anumită valoare. Blickwedel [38] calculează diametrul optim în funcție de diametrul duzei de apă ( $d_a$ ) cu relația:

$$d_{F_{\text{optim}}} = (3 \div 4) \times d_a \quad [ \text{mm} ] \quad (3.12.)$$

Mazurkiewicz ș.a., [ 34 ] sugerează pentru calcularea diametrului optim ( $d_{F_{\text{optim}}}$ ) respectiv în funcție de diametrul mediu al particulei abrazive ( $d_p$ ), relația:

$$d_{F_{\text{optim}}} = 3 \times d_p \quad [ \text{mm} ] \quad (3.13.)$$

Tubul de focalizare având durata de utilizare limitată, este considerat material consumabil, iar costul acestuia influențează semnificativ costul final al prelucrării cu jet de fluid. Categorișirea orificiilor anterior menționate, după diametru se face între limitele:

- diametru mic  $d_F < 1 \text{ mm}$
- diametru mare  $d_F > 3 \text{ mm}$

### 3.3. Parametrii regimului de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv.

Parametrii procesului de prelucrare cu jet de fluid, în funcție de a căror variație se poate studia prelucrarea materialelor pot fi împărțiți în trei mari categorii după cum urmează :

#### A. Cinematici :

- viteza de prelucrare [mm/min],
- distanța duză-material care se prelucrează /mm/.

#### B. Tehnologici:

- diametrul duzei [mm],

- natura abrazivului ,
- granulația abrazivului [mm],
- forma geometrică a granulelor de abraziv,
- debitul de abraziv [g/h],
- diametrul tubului de focalizare [mm],
- lungimea tubului de focalizare [mm],
- aditivarea apei cu polimer.

C. Hidraulici:

- presiunea de lucru [MPa],
- modul de amestec al mediilor folosite,
- tipul jetului,
- debitul de fluid [l/h].

Se prezintă în continuare caracteristicile specifice ale parametrilor respectivi în ordinea corespunzătoare importanței lor în procesele de prelucrare cunoscute .

**(a1). Viteza de prelucrare**

Acesta este parametrul cu influența majoră asupra întregului proces de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv. Această viteză se alege în funcție de caracteristicile materialului prelucrat. În acest sens natura (duritatea) și grosimea materialului prelucrat reprezintă principalii factori în funcție de care se stabilește viteza respectivă. Astfel aceasta scade

cu creșterea grosimii (durității) materialului procesat. Viteza de prelucrare se alege și în funcție de calitatea pe care trebuie să o prezinte suprafața prelucrată. Astfel calitatea suprafeței prelucrate este mai bună în cazul vitezelor mai mici de prelucrare, respectiv aceasta scade cu creșterea vitezei procesului de prelucrare [38]; [39]; [40].

În tabelul 3.3.1 se prezintă modificarea calității suprafeței piesei prelucrate și a pătrunderii jetului în material în funcție de variația vitezei de prelucrare, a presiunii jetului și a debitului de abraziv.



**Tabelul 3.3.1** Interdependența principalilor parametri ai regimului de prelucrare.

Viteza de prelucrare	Calitatea prelucrării	Pătrunderea
Presiunea		
Debitul de abraziv		

Diagram illustrating interdependencies: Viteza de prelucrare (↑) and Calitatea prelucrării (↓) are linked. Presiunea (↑) affects both Viteza de prelucrare (↑) and Calitatea prelucrării (↑). Debitul de abraziv (↑) affects Viteza de prelucrare (↑) and Calitatea prelucrării (↓). Pătrunderea (↻) is also shown.

Cu ajutorul programelor de calcul se poate simula influența parametrilor de prelucrare (figura 3.3.1).

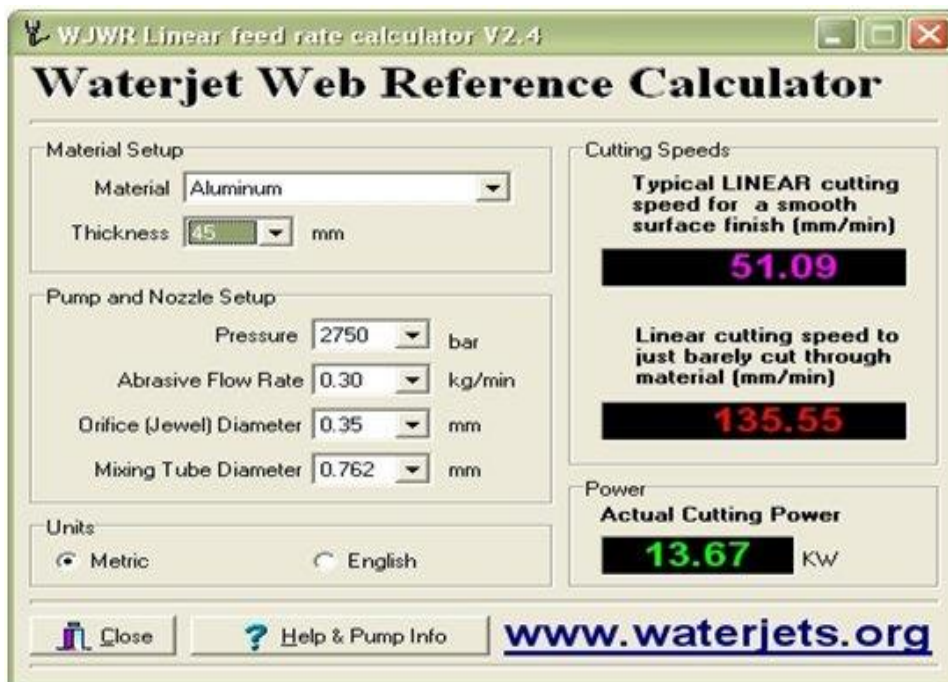


Figura 3.3.1. Simularea parametrilor de prelucrare [ 3 ].

**(a2). Distanța tub de focalizare-material** de prelucrare se stabilește în funcție de operația de prelucrare (tăiere, degroșare, curățire, durificare), astfel încât să fie utilizată porțiunea optimă din jet, corespunzătoare procedului în cauză. De obicei această distanță este de 2 mm în cazul tăierii cu jet de apă cu abraziv.

După viteza de prelucrare, distanța dintre tubul de focalizare și materialul supus prelucrării este un parametru cu o influență majoră asupra calității piesei prelucrate [41], [42],[43],[44].

Primul parametru (viteza de prelucrare) poate fi controlat continuu în timpul procesului de către sistemul cu comanda numerică pe când controlul efectiv și în timp real al distanței dintre tubul de focalizare și materialul procesat reprezintă o problemă întrucât nu s-a dezvoltat un sistem de monitorizare on-line al acestei distanțe.

Cercetători din domeniu precum Jurisevic Bostjan, Junkar Mihael ș.a. [45] au realizat unele experimentări în care au analizat sunetul produs de jet din punct de vedere al frecvențelor în timpul prelucrării la distanțe diferite dintre jet și materialul procesat. Folosind această metodă de monitorizare a sunetului generat de jet în timpul procesului de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv au ajuns la rezultate care confirmă o influență evidentă a distanței respective asupra caracteristicilor sunetului generat de jet. Astfel a rezultat o posibilitate de a controla mai eficient asupra procesului de prelucrare cu jet de apă cu abraziv.

**(b1). Diametrul duzei de apă** este important deoarece energia potențială a fluidului este transformată în duză în energia cinetică a jetului. Compactitatea și caracteristicile jetului depind în mare măsură de forma, dimensiunile și rugozitatea suprafeței de conducere a fluidului vehiculat..

Diametrul duzei (tubului) de abraziv se alege în funcție de diametrul **duzei de apă** în proporția  $1/2 \div 1/4$  și în raport de diametrul granulelor de abraziv folosit în raportul  $1/20 \div 1/50$  [ 1 ].

### **(b2). Natura abrazivului**

Natura materialului abraziv se alege în funcție de materialului care se prelucrează. Duritatea granulelor de abraziv trebuie să fie mai mare decât duritatea materialului prelucrat cu jetul de apă cu abraziv, dar și duritatea materialului din care este confecționată duza trebuie să fie mai mare decât duritatea abrazivului. În caz contrar uzura duzei este rapidă, prin decalibrare.

La ora actuală pe plan mondial cel mai folosit material abraziv este cel de natură minerală obținut prin concasare, măcinare fină și sortare. Datorită omogenității proprietăților sale fizico-chimice asigură posibilitatea unei prelucrări cu jet de apă cu

abraziv la viteze superioare și costuri reduse respectând totodată și normele de poluare a mediului înconjurător.

Există și granule abrazive sintetice care se folosesc în cadrul acestei tehnologii de prelucrare.

În tabelul 3.3.2 se prezintă câteva tipuri de abraziv folosit la prelucrarea cu jet de fluid, precum și proprietățile acestora.

Tabelul 3.3.2 Proprietățile granulelor abrazive [ 1 ].

Abrazivul	Compoziția chimică	Densitatea [g/cm <sup>3</sup> ]	Duritatea
Granit	Trisilicat de aluminiu, magneziu, oxid de fier, mangan, oxid de crom	3,4...4,3	Mohs: 7,5 Knoop: 1350
Oxid de aluminiu	99,5...99,9 % oxid de aluminiu pur, impurități minerale	3,95...4	Mohs: 8...9 Knoop: 2100
Carbura de siliciu	Carbura de siliciu	3,2	Mohs: 9,2 Knoop: 2500
Particule de fier	0,85 % carbon 0,4 % siliciu 0,6 % mangan	8,7	Mohs: - Knoop: 400...800
Carbură de siliciu	Dioxid de siliciu	2,2...2,65	Mohs: - Knoop: 700
Cristale de sticlă	--	2,45...2,5	Mohs: 5,5 Knoop: 400...600

### (b3). Granulația particulelor abrazive

Granulația particulelor abrazive se alege în funcție de duritatea și de grosimea materialului prelucrat cu jetul de fluid cu abraziv, precum și de operația de prelucrare folosită.

La ora actuală, sunt disponibile particule abrazive cu granulații, forme geometrice și duritate diferite, ambalate specific în ambalaje sigure pentru depozitare, transport, manipulare. (Fig. 3.3.2 )



[ 9 ]

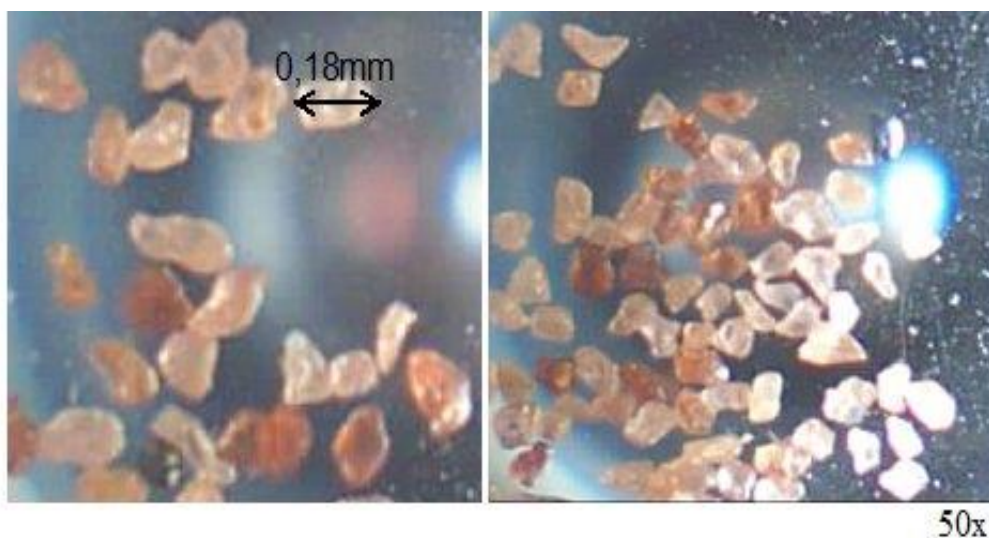


Figura 3.3.2. Granule abrazive

**(b4). Forma geometrică** a granulelor abrazive afectează calitatea suprafeței tăieturii, dar și randamentul procesului respectiv de prelucrare. Utilizarea granulelor abrazive ascuțite la vârf, face să crească cantitatea de material îndepărtat. În schimb rugozitatea suprafeței tăieturii este ceva mai redusă, iar pe suprafața tăiată pot apărea mici zgârieturi. Granulele abrazive cu forme geometrice omogene asigură o rugozitate superioară dar cu randament ceva mai scăzut al procesului de prelucrare.

**(b5). Debitul de abraziv** se stabilește în funcție de materialul prelucrat și de procedeul de lucru folosit.

**(b6.) Diametrul tubului de focalizare** se alege în funcție de granulația și duritatea abrazivului, presiunea de lucru precum și de debitul fluidului și al abrazivului.

**(b7). Lungimea tubului de focalizare** influențează precizia procedeului de prelucrare. Astfel, la tăierea cu jet de apă cu abraziv precizia procedeului crește cu creșterea lungimii tubului de focalizare.

**(b8). Aditivarea cu polimeri** este folosită în fluidul de lucru pentru îmbunătățirea caracteristicilor de prelucrare ale jetului la ieșirea din duză. Se urmărește îmbunătățirea compactității jetului la ieșirea din duză, adică păstrarea formei cilindrice inițiale a jetului până la o distanță mai mare față de aceasta. După filtrare, apa este aditivată cu polimeri din plastic cu fibră lungă într-o pondere de  $0,2 \div 0,4 \%$ .

**(c1). Presiunea de lucru** este presiunea obținută la ieșirea de la pompa de apă și are o influență majoră atât asupra procesului de prelucrare în cauză cât și asupra anumitor componente ale sistemului tehnic de prelucrare cu jet de apă cu abraziv.

Reglarea presiunii de apă se face prin reglarea presiunii uleiului și se calculează înmulțind valoarea acesteia din urmă cu valoarea raportului de comprimare al cilindrilor apă/ulei.

Clasificarea presiunii de lucru:

- joasă, până la 20 [MPa],
- medie, până la 100 [MPa],
- înaltă, până la 400 [MPa],
- foarte înaltă, până la 600 [MPa],
- supra-înaltă, până la 1.000 [MPa] ( doar în laborator).

În funcție de presiunea de lucru  $p$  variază și adâncimea de tăiere  $h$  după cum urmează [ 10 ] (relația 3.14) :

$$h(p) = c_1(p - p_{prag}) \cdot c_2 \quad [m] \quad (3.14.)$$

unde:

$$c_1, c_2 = \text{coeficienți}; \quad c_1 = \frac{\Delta h}{\Delta p},$$

$$p = \text{presiunea pompei} \quad [MPa];$$

$$p_{prag} = \text{presiunea de prag} \quad [MPa];$$

$$h = \text{adâncimea de tăiere} \quad [m].$$

**(c2). Modul de amestec al mediilor folosite** are o mare importanță și afectează procesul de prelucrare a materialelor cu jet de fluide eterogene conținând : apă, abraziv, aer, polimeri.

Astfel, amestecul apă - abraziv se poate realiza prin:

- introducerea sub presiune a granulelor de abraziv în camera de amestec
- absorbția acestora în camera de amestec,
- realizarea unei suspensii de granule abrazive în apă înaintea camerei de amestec.

În primul caz, figura 3.3.3, granulele de abraziv se injectează cu aer comprimat în camera de amestec. Aici este important și unghiul cu care acesta intră în camera de amestec, atât din punct de vedere al performanțelor jetului, cât și din punct de vedere al uzurii capului de prelucrare .

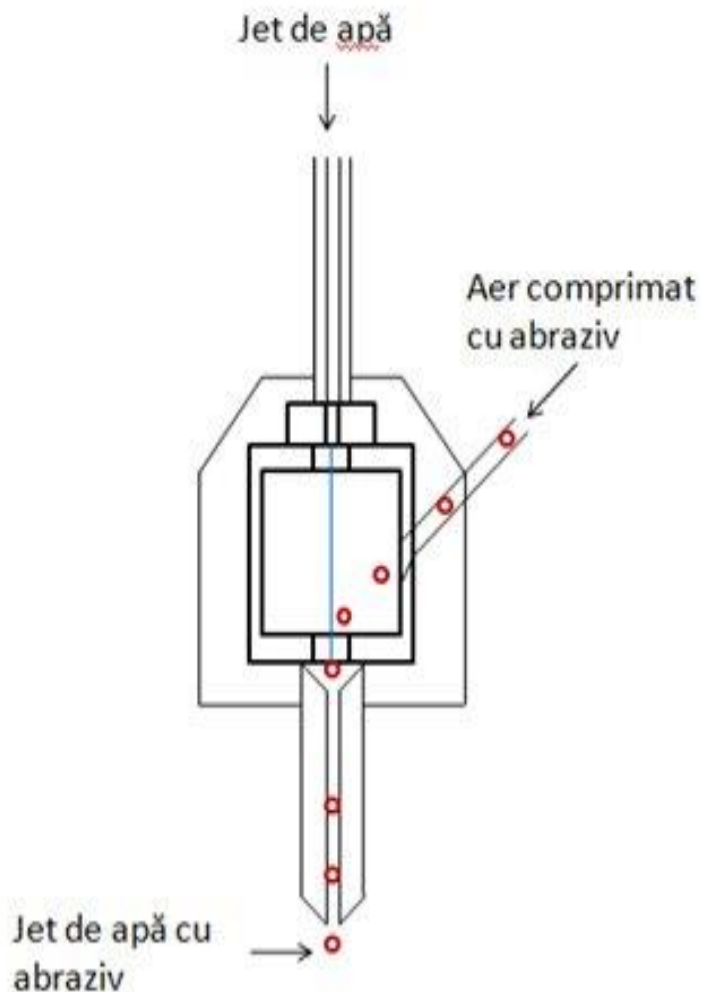


Figura 3.3.3. Amestec prin injecție cu aer comprimat.

În cazul al doilea, (figura 3.3.4), în camera de amestec intră apa la presiune și viteză foarte ridicate formând o depresiune astfel ca materialul abraziv să fie absorbit în camera de amestec

O parte semnificativă din particulele abrazive sunt accelerate de aerul absorbit aflat în jurul jetului de apă iar restul granulelor sunt preluate și accelerate de către jetul de apă la ieșire din duză până ating viteze supersonice.

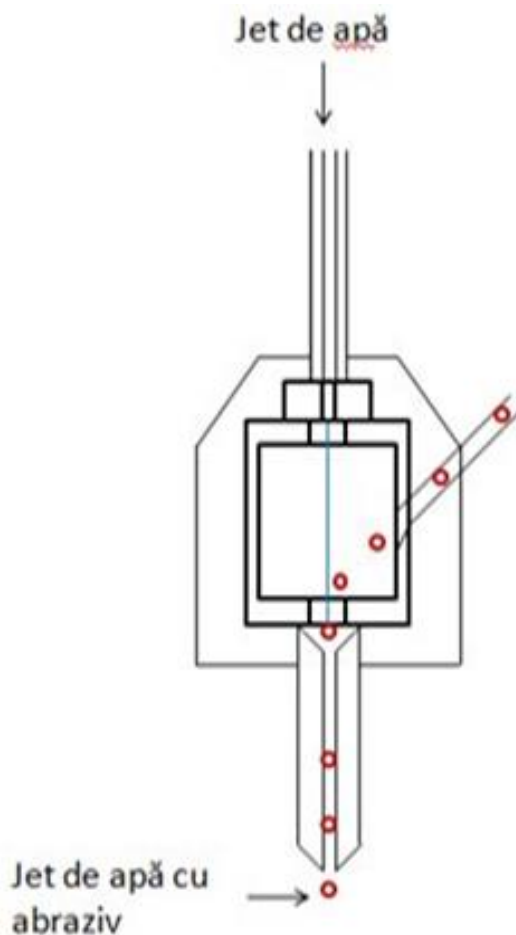


Figura 3.3.4. Alimentarea cu abraziv.

În ultimul caz, apa sub presiune trece printr-un rezervor cu abraziv și amestecul se formează conform figurii 3.3.5. Amestecul apă/abraziv realizat înaintea camerei de amestec este cazul în care o parte din apă sub presiune, de regulă 10%, trece prin rezervorul cu abraziv antrenându-l spre capul de prelucrare unde intră amestecul apă - abraziv deja format. Acest tip de jet se numește jet în suspensie.



Se poate folosi și varianta cu două rezervoare de abraziv pentru a se asigura continuitatea procesului. Astfel când unul trebuie realimentat cu abraziv se cuplează cel de-al doilea rezervor și procesul continuă. Acest tip de jet, datorită avantajelor considerabile pe care le are, se folosește cu succes în domeniul construcțiilor, în minieră, în zone greu accesibile, cu risc de explozie sau ușor inflamabile.

Două avantaje caracterizează acest tip de jet:

- 1) se poate lucra la distanță apreciabilă față de pompa de înaltă presiune (chiar și sute de metri),
- 2) transferul energetic spre particulele de abraziv este net superior deoarece nu există aer în jet, fenomen ce are drept consecință evazarea mult mai scăzută a jetului la ieșirea din tubul focalizator

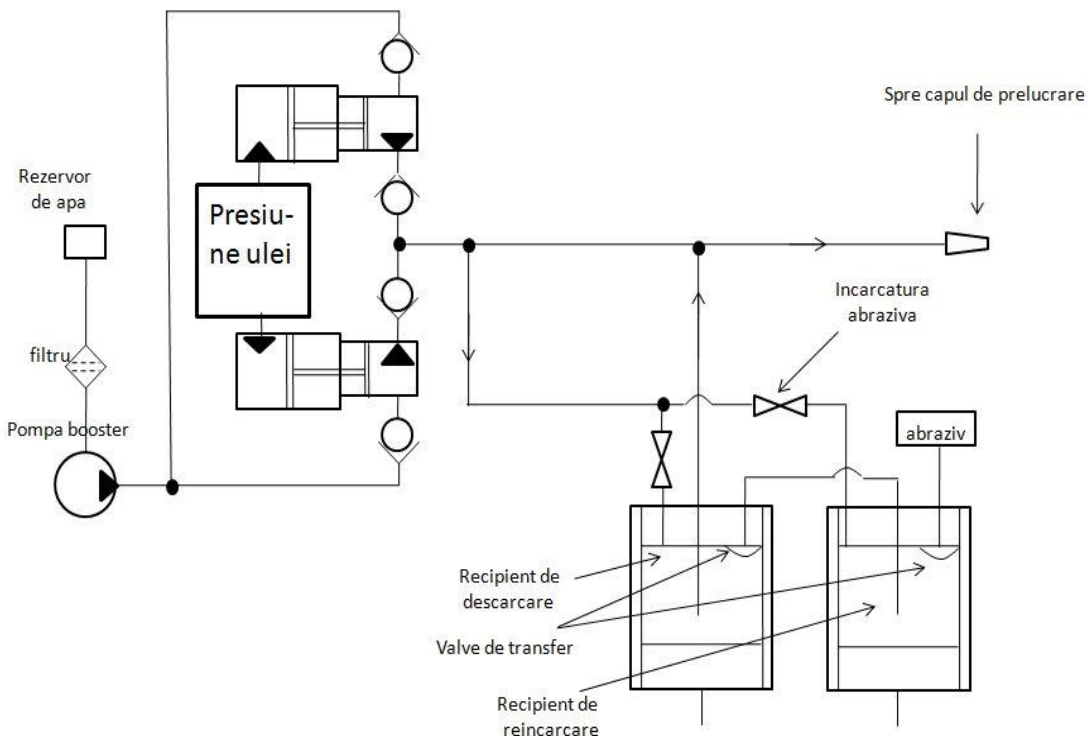


Fig. 3.3.5. Formarea jetului în suspensie.

Toate aceste avantaje fac posibilă folosirea procedurii nu doar pentru operații de tăiere, ci și pentru curățirea suprafețelor de vopsea, de depuneri, etc., din multe sectoare industriale: chimic, petrochimic, naval, aerospațial, etc.

**(c3). Tipul jetului .**

Elementele în funcție de care se pot clasifica jeturile de fluid pot fi:

- debitul de fluid [l/ min],
- geometria jetului,
- structura jetului.

În funcție de debitul de apă, există jeturi:

- cu debite mari: 5 ÷ 40 l/min și presiuni mici,
- cu debite mari: 5 ÷ 40 l/min și presiuni medii,
- cu debite mici: < 5 l/min și presiuni mari,
- cu debite mici: < 5 l/min și presiuni înalte.

După geometria secțiunii jetului de fluid există:

- jeturi cilindrice în secțiune;
- jeturi disipate în secțiune.

După modul în care se prezintă structura lor, jeturile hidraulice se pot clasifica după cum urmează:

- jeturi continue, la presiuni până la 200 [MPa],
- jeturi discontinue, la presiune sub 200 [MPa],
- jeturi cavitaționale, cu presiuni până la 200 [MPa],
- jeturi pulsante cu debit discontinuu și presiuni între 100 și 1.000 [MPa],
- jeturi în impuls (modulate), mai puțin utilizate, care îmbină avantajele jetului continuu cu cele ale jetului pulsator.

Debitul de fluid se poate exprima cu relația 3.15:

$$Q = V_0 \cdot S_0 \quad [\text{m}^3/\text{s}], \quad (3.15.)$$

în care:  $S_0$  este suprafața orificiului duzei la ieșire [ $\text{m}^2$ ],

$V_0$  este viteza jetului la ieșire din duza [ $\text{m/s}$ ]

## Capitolul 4

### Cercetări experimentale, modelarea matematică experimentală și optimizarea procesului de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv

#### 4.1. Materialele folosite pentru experimentări

Pentru experimentări au fost utilizate două materiale cu duritate ridicată care au o mare utilizare în mai multe domenii și care prezintă anumite dificultăți la prelucrare prin procedeele clasice:

- un material ceramic, alumina –  $Al_2O_3$  ,
- un material metalic, aliaj al titanului - TiAl6V4 .

Piesa din alumina s-a obținut prin sinterizare în matriță a pulberii selectate dimensional la presiuni și temperaturi ridicate.

Piesa din aliajul de titan a fost obținută prin deformarea plastică a materialului elaborat prin turnare primară.

Caracteristicile materialelor menționate se prezintă în tabelele 4.1 și 4.2.

Tabelul 4.1. Caracteristicile mecanice ale aliajului TiAl6V4 [46] .

Aliajul	Temperatura de transformare [°C ]	$R_m$ [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$A_5$ %	Z %	densitate (g/cm <sup>3</sup> )
TiAl6V4	890	860	795	10...12	50	4,5

Tabelul 4.2. Caracteristicile mecanice ale aluminei ( $Al_2O_3$ ) [ 47 ]

96% Alumina $Al_2O_3$		
Densitatea	gr/cm <sup>3</sup>	3.72
Duritatea	Mohs	9,2
Temperatura de topire	°C	2050
Porozitatea	%	0
Culoarea	-	albă
Rezistența la încovoiere	MPa	345
Rezistența la compresiune	MPa	2100
Modul de elasticitate	GPa	300

Aliajul TiAl6V4 conține 5,5...7,5 % Al, 3,5...4,5 % V și restul Ti.

Materialele specificate au fost prelucrate pe utilajul de prelucrare cu jet de apă cu abraziv, fiecare la parametrii specifici grosimii și naturii acestuia. Ambele materiale se utilizează tot mai mult la ora actuală în multiple ramuri ale industriei dar un mare succes în ultimii ani are utilizarea acestora în implantologia dentară și ortopedică fiind experimentate în aplicații de inginerie a țesutului osos. Atât  $Al_2O_3$  cât și TiAl6V4 fac parte din grupa materialelor biocompatibile [48]. Având o duritate semnificativă, ambele materiale prezintă anumite dificultăți la prelucrarea prin procedeele clasice motiv pentru care au fost alese pentru programul de experimentări din prezenta teză. Alt motiv pentru care am ales pentru experimentări aceste materiale îl reprezintă cererea tot mai mare pe care acestea o au în ultimii ani și care pot fi prelucrate cu avantaje considerabile prin tehnologia care face obiectul tezei respective comparativ cu alte procedee de prelucrare, avantaje care se referă în primul rând la calitatea suprafețelor astfel obținute (nealterate termic) și la posibilitatea prelucrării grosimilor apreciabile ale acestor materiale [23],[49],[50],[51],[52]. Având în vedere ca apa purificată prin osmoza inversă folosită pentru procesare nu conține nici bacterii nici microbi iar materialul abraziv poate fi sterilizat astfel încât neexistând nici contactul direct între materialul supus prelucrării și elementele instalației de prelucrare această tehnologie oferă posibilitatea prelucrării materialelor în condiții sterile. Mai mult, neexistând nici alterări de natură termică și nici tensiuni de natură mecanică induse în materialul supus prelucrării, această tehnologie

devine foarte interesantă pentru realizarea de elemente pentru diferitele implanturi destinate a fi folosite în organismul uman.

O proprietate necesară pentru orice material ce urmează a fi implantat în țesuturi organice vii este biocompatibilitatea acestuia, ceea ce înseamnă că materialele respective nu trebuie să determine nici o reacție adversă a țesuturilor.

Implanturile trebuie să reziste atacului degradativ sau coroziv din partea fluidelor fiziologice. Aceste materiale trebuie [48] :

- să fie destul de rezistente mecanic pentru a corespunde solicitărilor din condițiile de utilizare,
- să aibă capacitatea de a fi prelucrate în configurații și forme specifice,
- să nu altereze compoziția electrolitică a plasmei sau a țesuturilor,
- să aibă rezistență la coroziune electrochimică prin formare de celule galvanice,
- să nu interfereze cu mecanismul normal de apărare al organismului,
- să nu conducă la formarea de celule cancerigene,
- să nu determine nici o traumă a sângelui, coagularea sau denaturarea proteinelor din sânge.

Alumina ( $Al_2O_3$ ) are o rezistență excelentă la coroziune, o biocompatibilitate bună, rezistență mecanică ridicată la compresiune, precum și o bună rezistență la uzură. Se folosește de peste 20 de ani în chirurgia și implantologia ortopedică, stomatologică, etc.

Titanul este un metal alb argintiu situat la limita dintre metalele grele și cele ușoare a cărui utilizare a crescut intens datorită unei multitudini de proprietăți ca:

- densitate relativ scăzută,
- una dintre cele mai ridicate rezistențe specifice,
- o bună rezistență la cald pentru temperaturi de circa  $500^{\circ}C$ ,
- o excelentă rezistență la coroziune.

Titanul este caracterizat ca un metal rar, fiind foarte răspândit în natură, depășind din acest punct de vedere alte elemente cu o largă utilizare tehnică, cum ar fi: cuprul, plumbul, zincul, nichelul sau staniul.

Aliajele pe bază de titan, prezintă interes tehnic, deoarece conțin elemente care stabilizează forma  $\alpha$  (Al, Cu, Sn, Zr) și elemente care stabilizează forma  $\beta$  (V, Mo, Mn,

Cr, Fe, Ni, Ta ș.a.) astfel încât în funcție de compoziție, aliajele de titan se grupează în trei categorii structurale:

$\alpha$  ( monofazice): TiAl5, TiAl5Sn2,5, TiZr12Al4 ș.a.,

$\alpha+\beta$  (bifazice tipice, pseudo  $\alpha$ , pseudo $\beta$ ): TiAl6V4, TiAl4Mn4, TiAl65Mo3,5, TiAlCr2Mo2 ș.a.,

$\beta$  ( monofazice): TiV13Cr11Al4, TiMo30, TiAl3V13Cr11 ș.a.

Aliajele de titan respective se caracterizează, în general, și printr-o tensiune de vapori relativ redusă și o bună plasticitate la temperaturi scăzute astfel că ele suportă foarte bine condițiile de vid înaintat dar și exploatarea la temperaturi în domeniul criogenic (aliajul TiAl6V4 poate fi utilizat până la cca. - 240°C, temperatură la care rezistența sa la rupere poate atinge 200 daN/mm<sup>2</sup> cu o alungire la rupere de 9%).

O utilizare importantă a aliajului TiAl6V4 este în realizarea de implanturi ortopedice, stomatologice, dar și scule de lucru în domeniul medical [53]. Un inconvenient major al acestui aliaj pe bază de Ti îl reprezintă prelucrabilitatea prin așchiere care este relativ scăzută iar piesele supuse prelucrării care prin alunecare manifestă o rezistență redusă datorită coeficientului de frecare ridicat și conductivității termice scăzute.

În cazul experimentărilor au fost utilizate piese paralelipipedice din Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> cu grosime de 10 mm și de 4 mm cele din TiAl6V4.

## 4.2. Instalația de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv folosită și aparatele de măsurare

Instalația de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv folosită la procesarea materialelor (alumina și aliajul de Ti) din cadrul cercetării experimentale în experimentele 1,2,3 și 4 este marca KMT, complet automatizată, cu comandă numerică având multiplicatorul de presiune cu camere laterale (figura 4.2.1). Este echipată cu un sistem CNC BURNY – ETEK și poate efectua tăieri după un contur programat, conform cu documentația tehnică. Suprafața utilă de lucru are dimensiunile: 1500 x 1000 mm.



Figura 4.2.1 Instalația de prelucrare

Alte caracteristici tehnice sunt următoarele:

- precizia sistemului de urmărire automată, la compensarea fantei zero:  $\pm 1,2$  mm/1000 mm,
- deplasarea mașinii în coordonate cu comandă electromecanică,
- program de operare, înregistrat în memorie EPROM,
- sistem de conversare – prompturi în limba engleză,
- bibliotecă cu 53 programe standard selectabile direct de la tastatură,
- tăiere în lanț (succesiv) sau selectarea tăierii unui reper și repetare,
- punct de start selectabil pe anumite figuri,
- selectarea direcției în cazul repetării aceleași figuri,
- mod de lucru: în sistem m / țoli,
- posibilități de lucru:  
automat, manual sau deplasare de testare cu introducerea datelor pentru selectarea numărului de piese ce vor fi debitate,



- display-urile pot prezenta:
  - dimensiuni absolute,
  - starea mașinii/starea programului,
  - starea programului de tăiere,
  - viteza de tăiere,
  - biblioteca de programe,
  - starea memoriei,
  - mărimea programelor în memoria de programare,
- accelerare – decelerare automată în colțuri – valori selectabile,
- întoarcere la punctul de perforare sau în poziția de pornire,
- numărarea automată a pieselor tăiate (debitate),
- întoarcerea automată pe conturul de tăiere din poziții oarecare (de exemplu din locul în care s-a executat o depanare a duzelor),
- poziționare rapidă de la o piesă la alta,
- selectarea mărimii compensării fantei de debitare,
- presiune aer comprimat: min. 0,5 [MPa],
- presiune apă de tăiere: max. 420 [MPa],
- presiune apă de răcire: min. 0,2 [MPa],
- cursa de reglare a înălțimii aparatului (electromecanic + manual): 100 mm + 8mm,
- tensiune de alimentare comandă numerică,  
220V–50 Hz ( $\pm 2$  %),
- dimensiuni de gabarit:  
3100mm×2100mm×1485 [mm].

În figura 4.2.2 se prezintă multiplicatorul de presiune al sistemului tehnic de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv.

Se remarcă: elementul de filtrare al apei, conductele de legătură (hidraulice și pneumatice), cilindrii de medie și înaltă presiune, elemente de siguranță și control. Multiplicatorul pentru ridicarea presiunii apei este cu camere laterale (stânga – dreapta).





Figura 4.2.2. Multiplicatorul de presiune

În figura 4.2.3 se prezintă masa de lucru a instalației respective, elemente de conducere cu comanda numerică a jetului după axele OX, OY, OZ și bazinul de colectare și atenuare al jetului de fluid cu abraziv.



Figura 4.2.3. Masa de prelucrare

Materialul supus prelucrării este așezat pe suportul metalic sub formă de grilaj realizat din fâșii de platbandă sudată la o anumită distanță (de obicei 20 mm) printre care trece jetul și se atenuază în apa din bazinul de colectare și atenuare. Pentru semifabricate de dimensiuni mai mari supuse prelucrării nu este nevoie de elemente de prindere și fixare ca urmare a forțelor mici din timpul prelucrării.

În figura 4.2.4 se prezintă panoul de comandă și control pentru monitorizarea și controlul întregului proces de prelucrare, manual sau automatizat.



Figura 4.2.4. Panoul de comandă

În figura 4.2.5 se prezintă capul de prelucrare împreună cu sistemul de alimentare cu materialul abraziv.

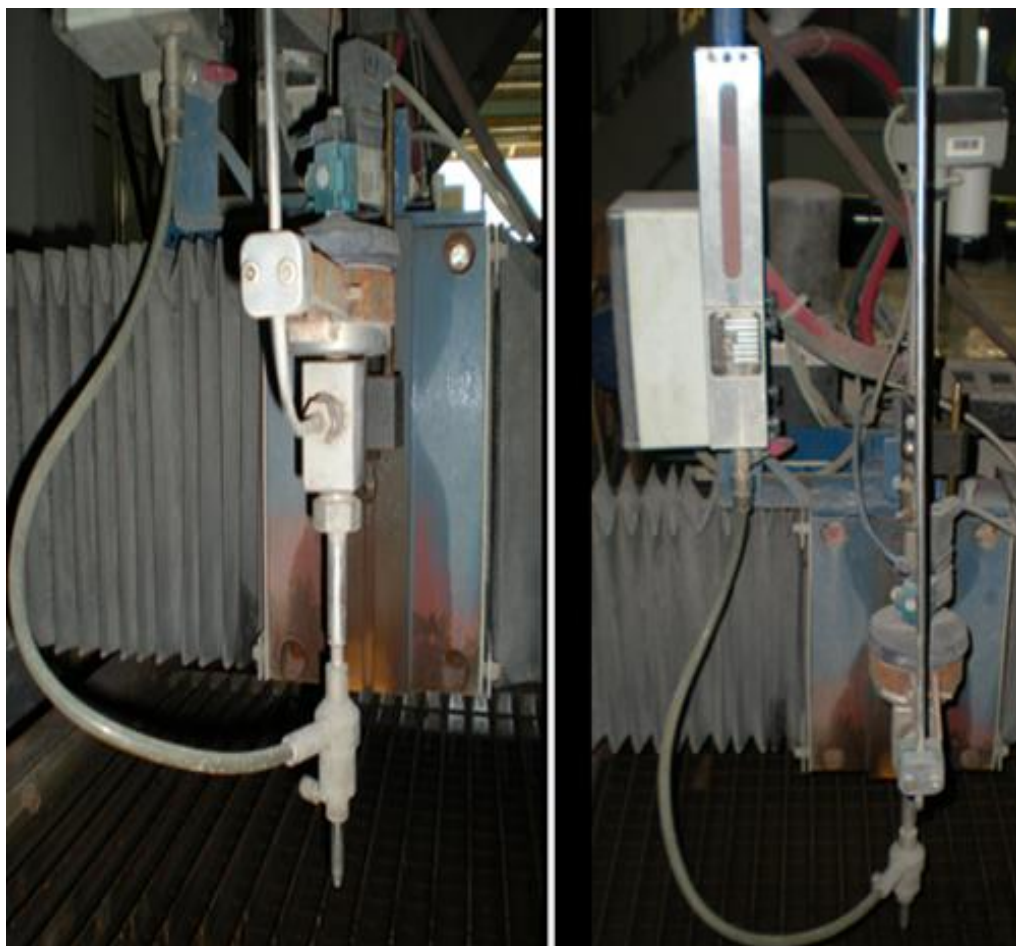


Figura 4.2.5. Capul de prelucrare

În partea superioară a capului de prelucrare se observă sistemul pneumatic de comandă al acestuia precum și sistemul de prindere al tubului de focalizare.

Materialele stabilite pentru primele patru experimente din cadrul cercetării experimentale au fost curățate, marcate și analizate din punct de vedere al calității suprafețelor exterioare înainte de prelucrare. Nu au fost semnalate fisuri sau ciobiri vizibile.

Piese din oxid de aluminiu cu dimensiunile de 100 x 100 x 10 mm, respectiv din aliaj de titan cu dimensiunile 200 x 50 x 4 mm au fost instalate pe durata prelucrării cu dispozitive specifice, după cum se poate vedea în figurile 4.2.6 și 4.2.7.





Figura 4.2.6 Prinderea piesei din oxid de aluminiu



Figura 4.2.7 Prindere piesei din aliaj de titan

Măsurătorile au fost realizate cu ajutorul microscopului din figura 4.2.8. Acesta permite măsurarea cu înaltă precizie, corelat cu valoarea diviziunii scalei de  $0,1 \mu\text{m}$ .



Figura 4.2.8 Microscopul utilizat pentru măsurători geometrice.

Referitor la materialele procesate în timpul experimentărilor 1 - 4, au fost măsurate lăţimea tăieturii la intrarea, respectiv la ieşirea jetului de fluid din material.

Măsurarea diametrului interior în urma secţionării tuburilor de focalizare uzate atât a celor în stare iniţială cât a celor cu orificiul interior de curgere a fluidului modificat, folosite în cadrul experimentărilor s-a realizat tot cu ajutorul microscopului prezentat anterior.

### **4.3. Modelarea experimentală și optimizarea procesului de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv**

### 4.3.1 Criterii și restricții

Științele în general, iar științele naturii în particular fac deseori apel la modele pentru studierea obiectelor, fenomenelor sau proceselor ce urmează a fi analizate.

Veridicitatea afirmațiilor din ștanțele naturii este probată cu ajutorul rezultatelor experimentale, iar o problemă cu care cercetătorii se confruntă frecvent în analiza unui obiect, fenomen sau proces, este capacitatea ca, pornind de la rezultate obținute pe cale experimentală, să poată formula, de o manieră cât mai corectă, dar și cât mai sintetică, legătura cauză-efect sau, utilizând o altă terminologie, legătura dintre factorii de influență și funcția obiectiv. La ora actuală, forma cea mai convenabilă de prezentare a acestei legături este cea a unei ecuații sau a unui sistem de ecuații matematice de tipul [ 54 ]:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (4.3.1.)$$

În care:

$x_1, x_2, \dots, x_k \Rightarrow$  cauze  $\equiv$  factori de influență

$y \Rightarrow$  efect  $\equiv$  funcție obiectiv

Imaginea cea mai răspândită de prezentare a respectivei legături este cea cibernetică prezentată în figura 4.3.1.1 [54].

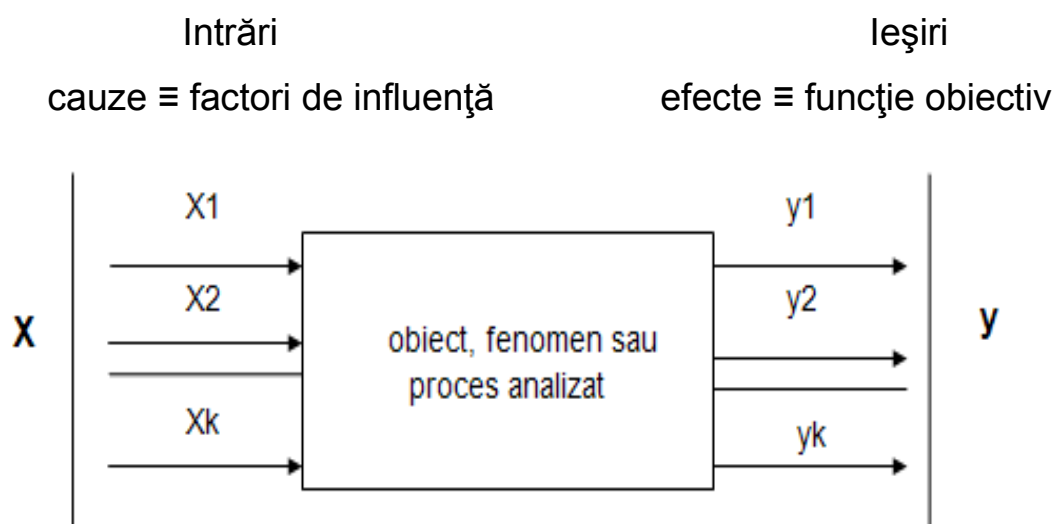


Figura 4.3.1.1 Imaginea cibernetică a legăturii cauză efect [54]

Pentru cazul studiat în prezenta teză, pentru tăierea cu jet de fluid cu abraziv a

materialelor, la experimentele 1 – 4 din cadrul cercetării experimentale, factorii de influență, parametrii procesului, respectiv funcțiile obiectiv au fost după cum urmează:

factori de influență:

$x_1 \Rightarrow$  presiunea jetului [MPa]

$x_2 \Rightarrow$  viteza de prelucrare [mm/min]

parametrii procesului de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv:

$p_1 \Rightarrow$  forma și diametrul duzei de apă,

$p_2 \Rightarrow$  forma și diametrul tubului de focalizare,

$p_3 \Rightarrow$  distanța dintre tubul de focalizare și material, [mm]

$p_4 \Rightarrow$  grosimea materialului procesat, [mm]

$p_5 \Rightarrow$  natura și granulația materialului abraziv.

Ieșirile sistemului ( funcțiile obiectiv ):

$I_1 \Rightarrow$  lățimea tăieturii la intrare, [mm]

$I_2 \Rightarrow$  lățimea tăieturii la ieșire, [mm]

$I_3 \Rightarrow$  lățimea medie a tăieturii, [mm]

Intervalele de variație ale factorilor de influență au fost alese pe baza informației disponibile în literatura de specialitate și ținând seama de performanțele utilajului utilizat la realizarea experimentărilor.

Experimentele 1 – 4, din cadrul cercetării experimentale, au fost realizate pe utilajul de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv descris în capitolul 4, subcapitolul 4.2 și prezentat în figura 4.2.1

Prin urmare, pentru cercetarea efectelor **factorilor de influență** asupra procesării materialelor (alumină, aliajul de Ti), au fost utilizate valorile:

- presiunea apei : 310, 320, 350, 380, 390 [MPa]

- vitezele de prelucrare :



2,5,10,15,17,35,37 [mm/min] pentru experimentele 1 și 2  
150, 310, 320, 350, 380, 390 [mm/min] pentru experimentele 3 și 4

**Parametrii procesului de prelucrare** în acest caz au avut următoarele valori:

- duzele de apă folosite, realizate din diamant sintetic, au avut diametrul de 0,25 [mm],
- tubul de focalizare în stare inițială cu diametrul interior 0,25 [mm]
- distanța dintre tubul de focalizare și material : constantă 2 [mm],
- materialele procesate cu grosimea de:
  - 4 [mm], aliajul de titan,
  - 10 [mm], alumină,
- materialul abraziv: de origine minerală, cu granulația Mash 80,

Funcțiile obiectiv studiate pentru experimentele 1 – 4 au avut valorile prezentate în tabele 1 – 4 din anexa 1.

Modelarea experimentală cu jet de fluid cu abraziv a materialelor din cadrul cercetării experimentale cuprinde două părți după cum urmează:

### 4.3.2 Studiul procesului de tăiere al plăcilor de alumină

Studiul a fost efectuat pe plăci de alumină cu grosimea de 10 mm. S-au realizat tăieturi pe lungime limitată, astfel ca piesa cu tăieturi să rămână compactă. Aceasta a permis măsurarea lățimea tăieturii la intrarea, respectiv ieșirea jetului de fluid din material. Ca factori de influență au fost aleși presiunea jetului "P" [MPa] și viteza de tăiere „v” [mm/min].

Ca funcție obiectiv au fost alese lățimea tăieturi la partea superioară ( $L_{intrare}$  [mm]) și la partea inferioară ( $L_{iesire}$  [mm]), adică la intrarea, respectiv ieșirea jetului de fluid din material. Pentru fiecare din aceste mărimi s-au efectuat trei măsurători la 0, 5 și respectiv 10 mm de la începerea tăieturii. Valorile măsurate au fost mediate pentru a obține o singură valoare pentru lățimea de intrare, respectiv lățimea de ieșire a tăieturii. De asemenea s-a calculat media aritmetică dintre lățimea de intrare și lățimea de ieșire a jetului de fluid din material. Aceasta caracterizează tăietura respectivă ( $L_{med}$  [mm] ) și a fost considerată ca a treia funcție obiectiv.

Experimentele au fost organizate după un plan experimental de tip 2<sup>2</sup>.

Au fost efectuate două serii experimentale, fiecare diferind prin alegerea valorilor maximă și minimă pentru factorul de influență: viteza de tăiere. Factorii de influență au fost considerații într-un sistem codificat adimensional în care valoarea maximă s-a considerat +1, iar valoarea minimă -1. Matricea experimentului o reprezintă încercările 1-4. Pentru a studia statistic modelul empiric obținut s-au efectuat un număr de trei replici în punctul central ( încercările 5-7) și patru verificări pe axele perpendiculare ce trec prin punctul central al experimentului, în afara domeniului experimental (încercările 8-11).

Valorile reale ale factorilor de influență, valorile codificate ale acestora și valorile funcțiilor obiectiv rezultate în urma măsurărilor sunt trecute în tabelele: 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3. și 4.3.4

Pentru presiune au fost adoptate nivelele:

- minim 310 [MPa] ,
- maxim 390 [MPa].

Pentru viteza de tăiere au fost adoptate nivelele:

- minim 2 [mm/min],
- maxim 37 [mm/min].

**Plan experimental 1.** Material: Alumina, grosimea 10 mm

În figura 4.3.2.1 se prezintă probele din oxidul de aluminiu (alumina) cu grosimea de 10 mm prelucrate conform parametrilor stabiliți în *tabelul 4.3.1.*

Transformarea între mărimile reale și mărimile codificate:

- transformarea pentru presiune:

$$A = -1 + \frac{p-320}{300} \quad [ - ]$$

- transformarea pentru viteză:

$$B = -1 + \frac{v-5}{15} \quad [ - ]$$

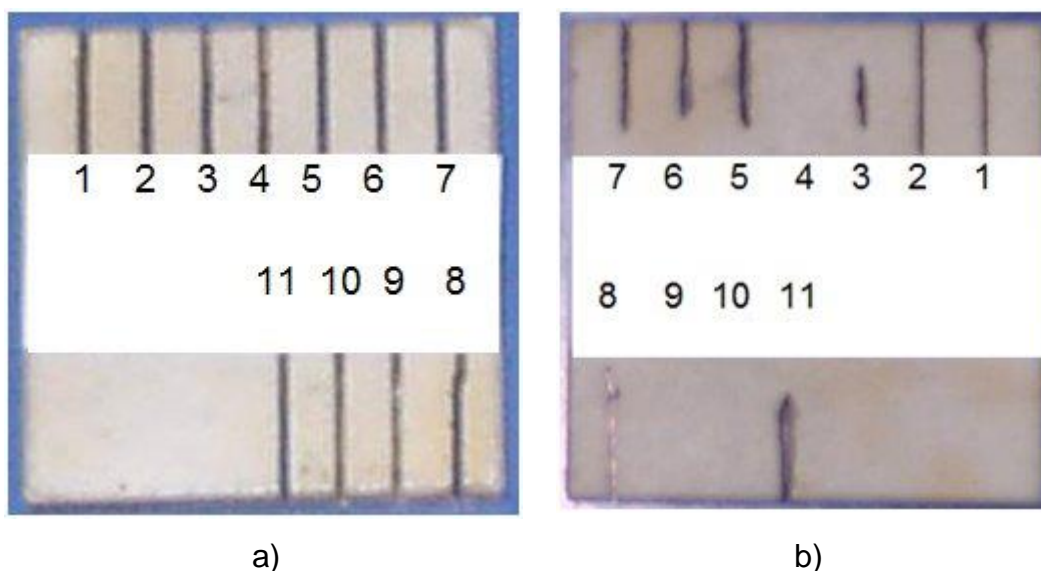


Figura 4.3.2.1 Imaginea probei 1 de aluminiă,  $g=10$  mm. a, b- intrare, respectiv ieșire jet de fluid.

Analiza planului experimental s-a realizat cu ajutorul programului Statgrafics. Acesta furnizează :

- diagrama Pareto de ierarhizare a factorilor de influență și a interacțiunilor dintre aceștia,
- studiul statistic al variației factorilor realizat prin metoda ANOVA
- relația de corelație numită „ model matematic”.

Modelul matematic este un polinom care are ca variabile factorii de influență ( în sistemul codificat) și interacțiunea dintre aceștia reprezentată prin produsul lor.

Coeficienții acestui polinom sunt calculați din datele experimentale, matricea experimentului factorial  $2^2$  permite calculul a cel mult 4 coeficienți. Formula de corelație va fi folosită și la realizarea reprezentărilor sub formă de suprafețe de răspuns pentru funcțiile obiectiv analizate

Tabelul 4.3.1 Condițiile de desfășurare a planului experimental 1.

Tăietura	Presiune [MPa]	Viteza de tăiere [mm/min]	Presiune A[-]*	Viteza de tăiere [mm/min] B[-]*	Lățimea la intrare [mm]	Lățimea la ieșire [mm]	Lățimea medie [mm]
1	320	5	-1	-1	0,776	0,47	0,623
2	380	5	+1	-1	0,79	0,326	0,558
3	320	35	-1	+1	0,636	0,273	0,455
4	380	35	+1	+1	0,61	0	0,305
5	350	20	0	0	0,653	1,16	0,906
6	350	20	0	0	0,726	0,626	0,676
7	350	20	0	0	0,67	0,433	0,551
8	350	2	0	-1,2	0,88	0,713	0,796
9	350	37	0	+1,1	0,55	0	0,275
10	310	20	-1,33	0	0,62	0	0,31
11	390	20	+1,33	0	0,623	0,463	0,543

\*notații conform relațiilor de transformare

Analiza efectuată se va concentra pe diagrama Pareto și pe formula de corelație. Se va preciza coeficientul de corelație dat de metoda de analiză statistică ANOVA.

Influența parametrilor (presiune, viteza de tăiere) asupra lățimii tăieturi la intrarea jetului de fluid pentru alumină cu grosimea de 10 mm este reprezentată în figurile 4.3.2.2 - 4.3.2.3.

Din diagrama Pareto și din formula de corelație se observă că contribuția principală la variația lățimii de intrare o are viteza de tăiere. Lățimea de intrare a tăieturii scade puternic cu scăderea vitezei de tăiere. Interacțiunea dintre presiune și viteză are o contribuție cu un ordin de mărime mai mică. Ea provoacă scăderea abruptă observată la suprafața de răspuns. Contribuția presiunii ca factor separat este cu un ordin de mărime mai mică decât interacțiunea dintre putere și viteză.

Suprafața de răspuns arată că valoarea minimă pentru lățimea de intrare se obține în domeniul experimental pentru viteza maximă și presiunea maximă.

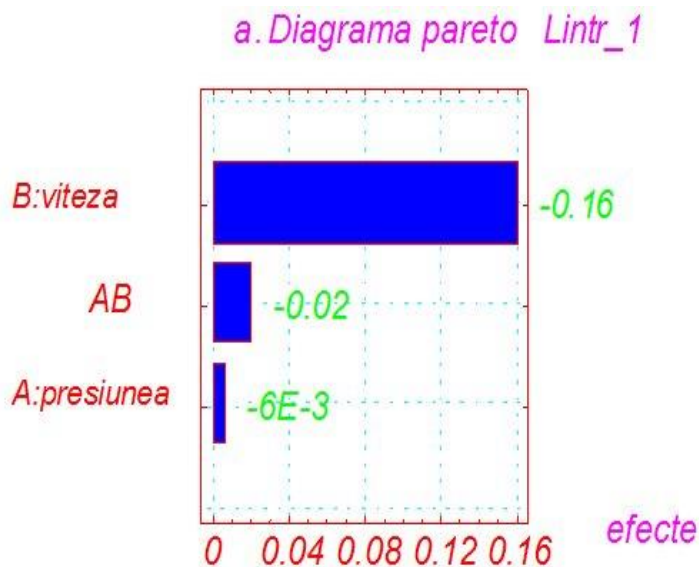


Figura 4.3.2.2. Diagrama Pareto pentru lățimea de intrare

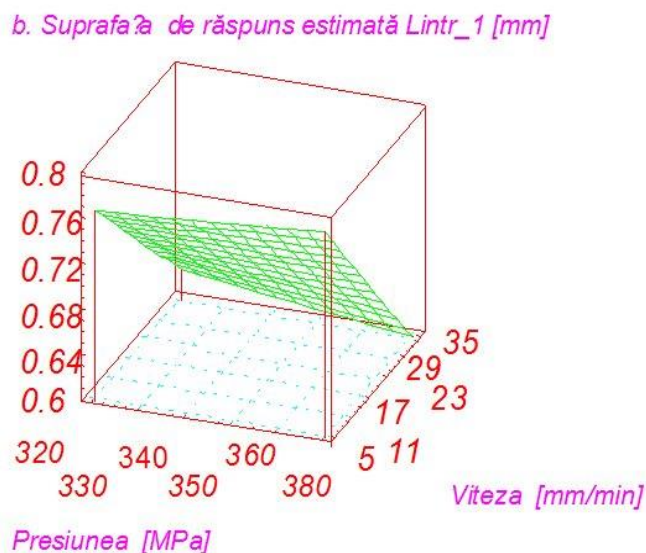


Figura 4.3.2.3.. Suprafața de răspuns pentru lățimea tăieturii de intrare.

Ecuția de regresie pentru calculul lățimii tăieturii la intrare :

$$\text{Lintr1} = 0,694 - 0,003A - 0,08B - 0,01AB$$

$$R^2 = 0.27 - \text{coeficientul de corelație}$$

Influența parametrilor (presiune, viteza de tăiere) asupra lățimii tăieturii la ieșirea jetului de fluid pentru alumina cu grosimea de 10 mm este reprezentată în figurile 4.3.2.4.- 4.3.2.5.

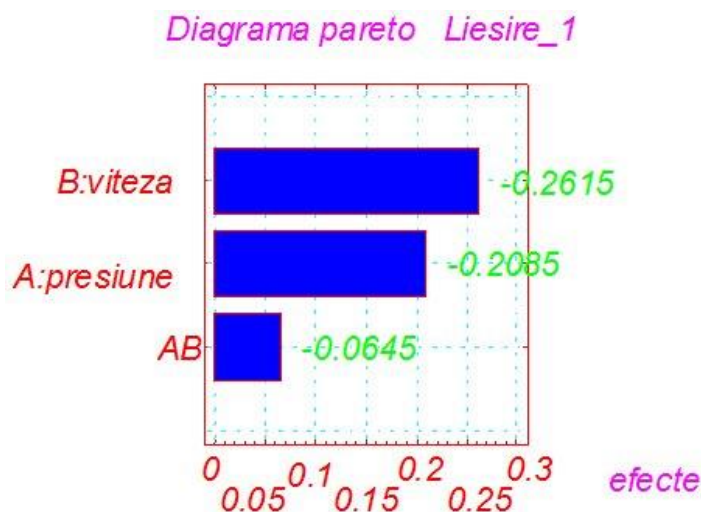


Figura 4.3.2.4. Diagrama Pareto pentru lățimea de ieșire

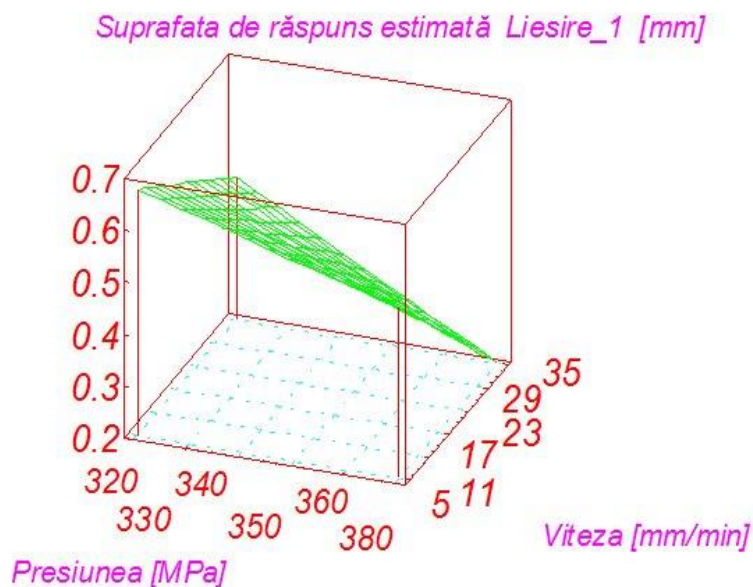


Figura 4.3.2.5 Suprafața de răspuns pentru lățimea tăieturii de ieșire.

Ecuția de regresie pentru calculul lățimii tăieturii la ieșire :

$$Liesire1 = 0,469 - 0,104A - 0,130B - 0,032AB$$

$$R^2 = 0.14 \text{ -coeficientul de corelație}$$

Din diagrama Pareto pentru lățimea de ieșire se observă că factorul care are cea mai mare contribuție este viteza de tăiere. Presiunea are o contribuție apropiată de cea a vitezei. Se arată astfel creșterea rolului presiunii asupra lățimii de ieșire comparativ cu rolul acesteia asupra lățimii de intrare. Efectul interacțiunii dintre presiune și viteză este mai mic decât efectul presiunii însă este comparabil cu diferența dintre efectul presiunii și cel al vitezei. Lățimea de ieșire scade atât cu creșterea presiunii cât și cu creșterea vitezei. Această scădere bruscă este arătată de suprafața de răspuns. Valoarea minimă pentru lățimea medie se obține pentru domeniul experimental studiat la viteză de tăiere maximă și presiune maximă.

Influența parametrilor (presiune, viteză de tăiere) asupra lățimii medii a tăieturi jetului de fluid pentru alumina cu grosimea de 10 mm este reprezentată în figurile 4.3.2.6- 4.3.2.7.

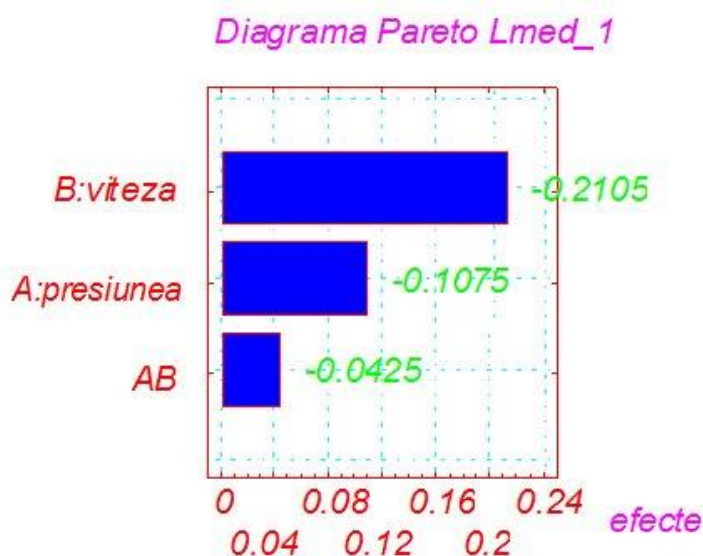


Figura 4.3.2.6 Diagrama Pareto pentru lățimea medie



Suprafața de răspuns estimată  $L_{med\_1}$  [mm]

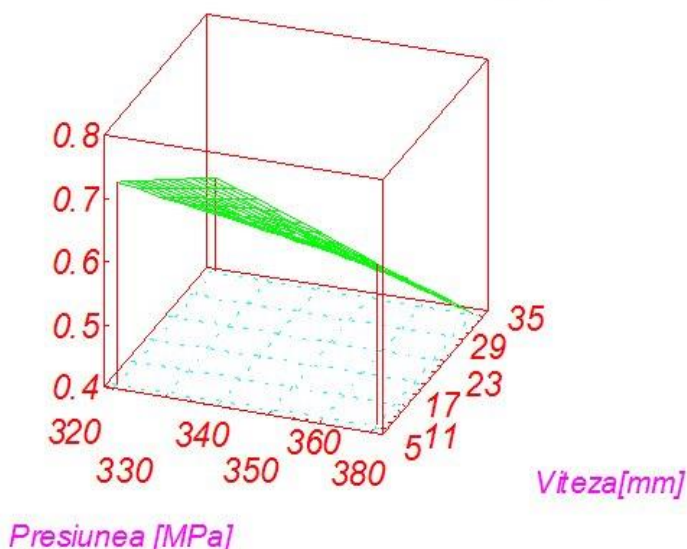


Figura 4.3.2.7. Suprafața de răspuns pentru lățimea medie a tăieturii.

Ecuția de regresie pentru calculul lățimii medii a tăieturii:

$$L_{med1} = 0,582 - 0,053A - 0,105B - 0,021AB$$

$$R^2 = 0.27 - \text{coeficientul de corelație}$$

Lățimea medie caracterizează tăietura. Variația acesteia în funcție de parametrii de proces mediază variația pentru lățimea de intrare, respectiv lățimea de ieșire. Diagrama Pareto arată că viteza de tăiere este parametrul cu influență predominantă asupra valorii lățimii medii a tăieturii, o contribuție cât jumătate din aceasta având presiunea. Interacțiunea dintre presiune și viteză are o contribuție mai mică decât jumătate din cea a presiunii. Ca rezultat general contribuția vitezei depășește pe cea a presiunii. Pe domeniul experimental studiat atât viteza de tăiere cât și presiunea scad dimensiunea tăieturii.

Prelucrarea rezultatelor a evidențiat coeficienți de corelație deosebit de scăzuți ceea ce arată că parametrii tehnologici aleși nu au îndeplinit condițiile optime pentru prelucrarea piesei din alumina. Din considerentul menționat a fost necesară adoptarea unui alt pachet de parametrii tehnologici în cadrul unui alt plan experimental.

**Plan experimental 2.** Material : Alumina, grosimea 10 mm

S-a efectuat un al doilea plan experimental pentru care s-a schimbat domeniul de variație al vitezei. Astfel nivelul minim al vitezei de prelucrare a fost ales la 5 mm/min iar cel maxim la 15 mm/min. Astfel s-a redus intervalul dintre nivelul inferior și cel superior. În figura 4.3.2.8 se prezintă probele din oxidul de aluminiu (alumina) cu grosimea de 10 mm prelucrate conform parametrilor stabiliți în tabelul 4.3.2.

Transformarea între mărimile reale și mărimile codificate:

- transformarea pentru presiune:

$$A = -1 + \frac{p-320}{300} \quad [-]$$

- transformarea pentru viteză:

$$B = -1 + \frac{v-5}{5} \quad [-]$$

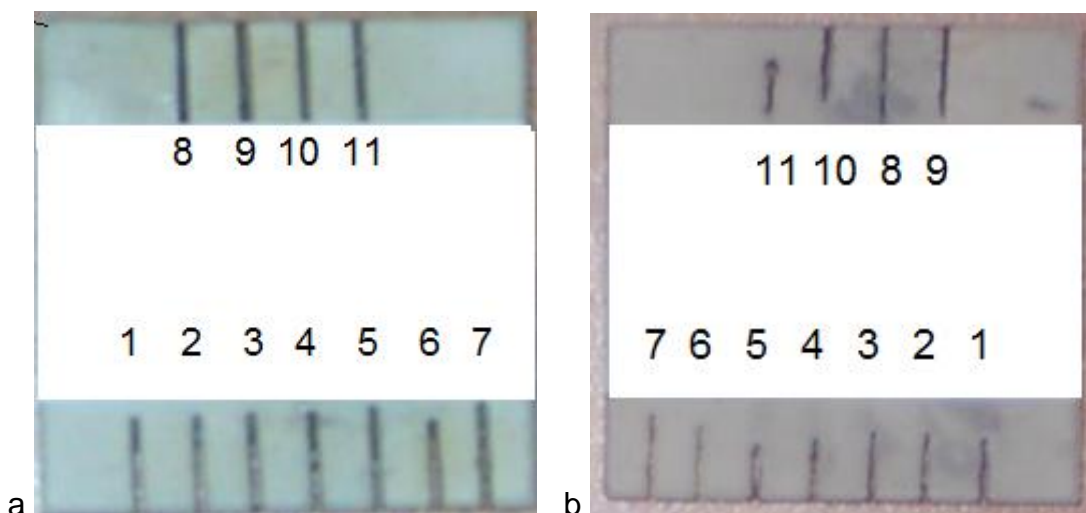


Figura 4.3.2.8. Proba 2 de alumina, g=10 mm. a, b- intrare, respectiv ieșire jet de fluid.

Parametrii regimului de prelucrare folosiți la experimentul 2 se prezintă în tabelul 4.3.2

Tabel 4.3.2 Condițiile de desfășurare a planului experimental 2.

Tăietura	Presiunea [MPa]	Viteza de tăiere [mm/min]	Presiunea [MPa] A[-]	Viteza de tăiere [mm/min] B[-]	Lățimea la intrare [mm]	Lățimea la ieșire [mm]	Lățimea medie [mm]
1	320	5	-1	-1	0,946	0,41	0,678
2	380	5	+1	-1	1,026	0,393	0,71
3	320	15	-1	+1	0,853	0,926	0,89
4	380	15	+1	+1	0,896	0,546	0,721
5	350	10	0	0	0,913	0,63	0,771
6	350	10	0	0	0,903	0,566	0,735
7	350	10	0	0	0,913	0,68	0,796
8	350	2	0	-1,6	1,026	0,586	0,806
9	350	17	0	+1,4	0,953	0,403	0,678
10	310	10	-1,33	0	0,903	0,883	0,893
11	390	10	+1,33	0	0,976	0,423	0,7

Influența parametrilor (presiune, viteza de tăiere) asupra lățimii tăieturi la intrarea jetului de fluid alumina cu grosimea de 10 mm este reprezentată în figurile 4.3.2.9 - 4.3.2.10.

Diagrama Pareto artă că cea mai mare contribuție la stabilirea valorii lățimii de intrare o are viteza de tăiere. Presiunea are o contribuție apropiată, jumătate din cea a vitezei. Creșterea vitezei scade lățimea de intrare. Creșterea presiunii crește lățimea de intrare. Interacțiunea dintre presiune și viteză are o contribuție mult mai mică decât viteza sau presiunea luate separat și efectul ei este similar cu al vitezei, de scădere a lățimii de intrare.

Suprafața de răspuns arată că pentru lățimea de intrare valoarea minimă se obține pentru viteza maximă și presiunea minimă.

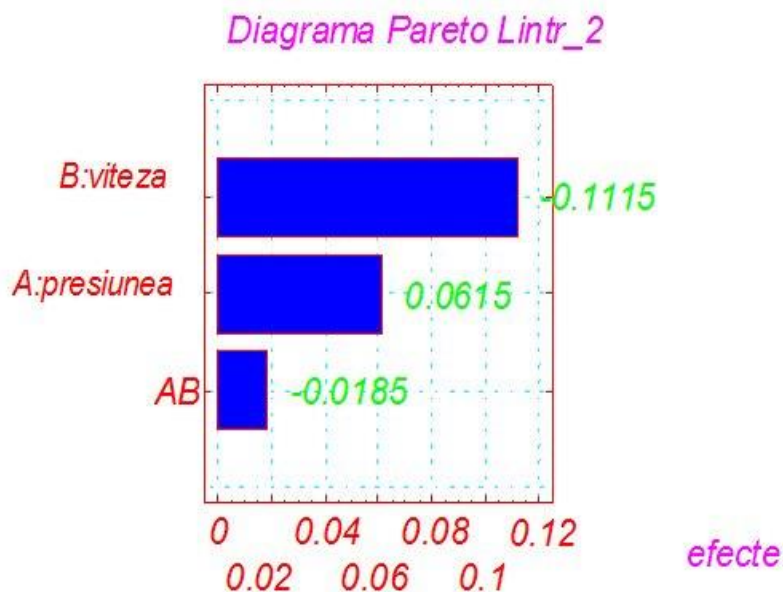


Figura 4.3.2.9 Diagrama Pareto pentru lățimea de intrare

*Suprafata de răspuns estimată Lintr\_2 [mm]*

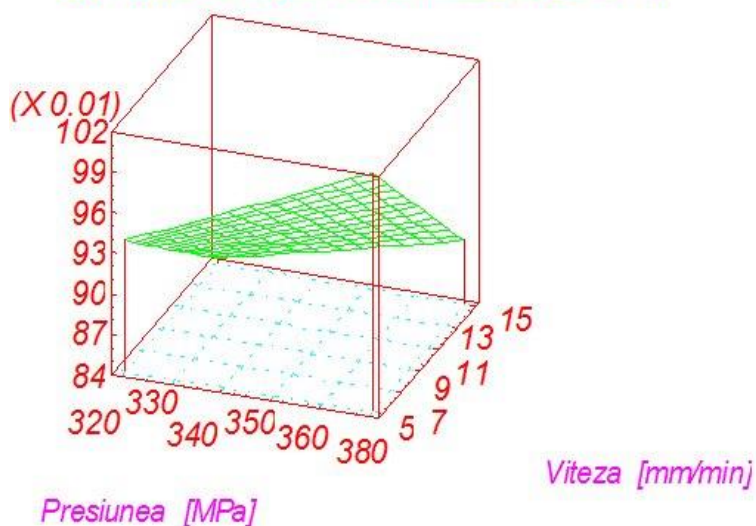


Figura 4.3.2.10. Suprafața de răspuns pentru lățimea tăieturii de intrare.

Ecuția de regresie pentru calculul lățimii tăieturii la intrare :

$$Linr2 = 0,921 + 0,030A - 0,055B - 0,009AB$$

$$R^2 = 0.95 - \text{coeficientul de corelație}$$

Influența parametrilor (presiune, viteza de tăiere) asupra lățimii tăieturii la ieșirea jetului de fluid pentru alumina cu grosimea de 10 mm este reprezentată în figurile

4.3.2.11 – 4.3.2.12.

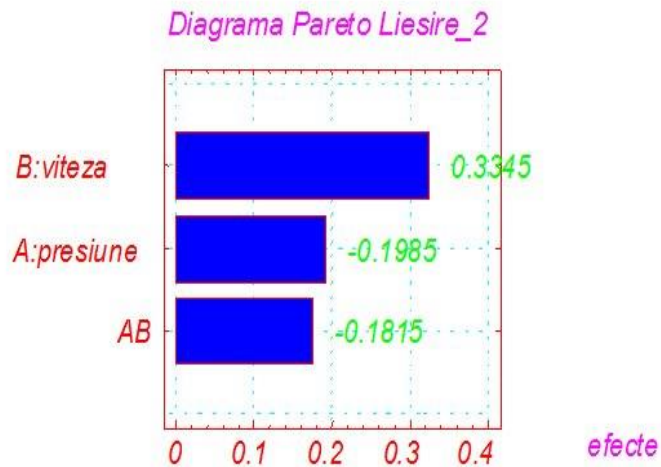


Figura 4.3.2.11 Diagrama Pareto pentru lățimea de ieșire

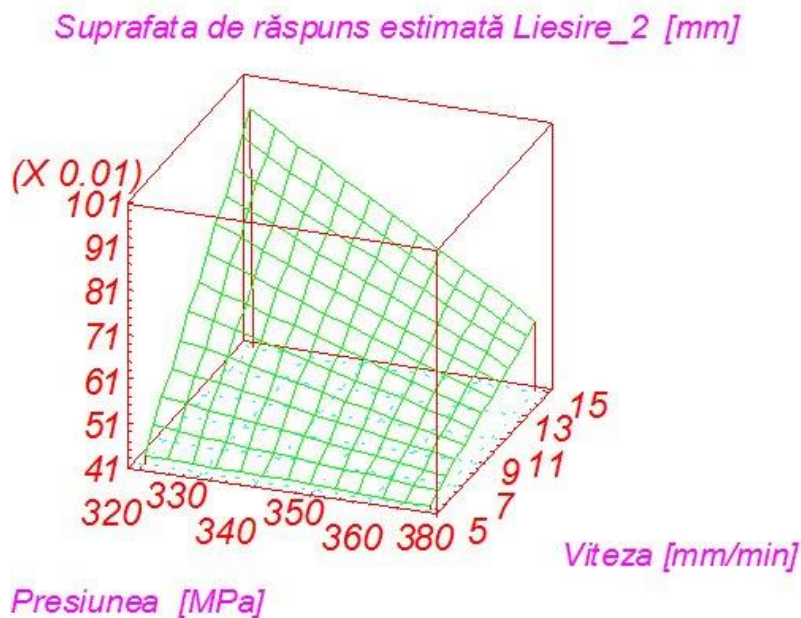


Figura 4.3.2.12 Suprafața de răspuns pentru lățimea tăieturii de ieșire.

Ecuția de regresie pentru calculul lățimii tăieturii la ieșire :

$$Liesire2 = 0,593 - 0,099A + 0,167B - 0,09AB$$

$$R^2 = 0.93 \text{ -coeficientul de corelație}$$

Diagrama Pareto arată că viteza de tăiere este parametrul cu influența predominantă asupra lățimii de ieșire. Lățimea de ieșire crește cu creșterea vitezei.

Presiunea și interacțiunea dintre presiune și viteză au un efect contrar de scădere a lățimii de ieșire. Contribuția lor atinge pentru fiecare în parte două treimi din cea a vitezei. Pe ansamblu efectul presiunii este mai mare decât cel al vitezei.

Suprafața de răspuns arată că pentru lățimea de ieșire minimul se obține la presiune maximă și viteză minimă.

Influența parametrilor (presiune, viteza de tăiere) asupra lățimii medii a tăieturi jetului de fluid este reprezentată în figurile 4.3.2.13 - 4.3.2.14.



Figura 4.3.2.13 Diagrama Pareto pentru lățimea medie

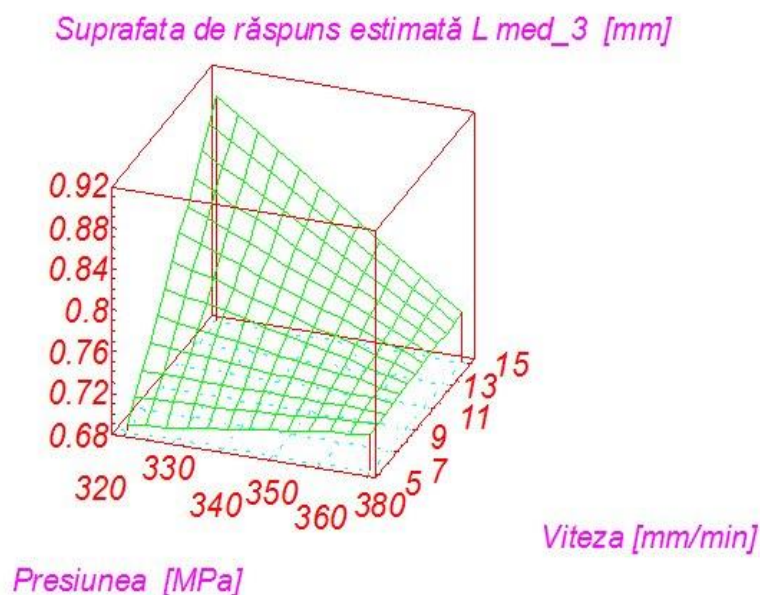


Figura 4.3.2.14. Suprafața de răspuns pentru lățimea medie a tăieturii.

Ecuația de regresie pentru calculul lățimii medii a tăieturii:

$$L_{med2} = 0,757 - 0,034A + 0,055B - 0,05AB$$

$$R^2 = 0.91 \text{ - coeficientul de corelație}$$

Din cele prezentate anterior se observă că efectele presiunii și vitezei de tăiere asupra lățimii de intrare și asupra lățimii de ieșire sunt diferite. Lățimea medie prezintă evident o mediere a celor două tendințe. Diagrama Pareto arată că viteza de tăiere are o contribuție puternică în sensul creșterii lățimii medii a tăieturii. Un efect aproape la fel de puternic contrar, de scădere a lățimii medii îl are interacțiunea dintre presiune și viteză. Presiunea are un efect de scădere a dimensiunilor faliei. Ea are o contribuție importantă efectul său fiind apropiat de jumătate din cel al vitezei. Pe ansamblu ca efect propriu și prin interacțiunea cu viteza, presiunea produce o scădere mai puternică decât cea produsă de viteză. Suprafața de răspuns arată că lățimea medie minimă pe domeniul experimental studiat se obține la presiunea minimă și viteza minimă.

### 4.3.3 Studiul procesului de tăiere al plăcilor din aliaj de titan

Experimentările pentru aliajul de titan - TiAl6V4 cu grosimea de 4 mm au fost realizate folosind același tip de plan experimental. Pentru fiecare tăietură s-a măsurat lățimea de intrare și lățimea de ieșire. Fiecare din aceste valori a fost obținută ca medie pentru patru valori măsurate la 0, 3, 6, 9 mm de la începerea procesului de tăiere. Pentru presiune s-a ales un nivel minim de 320 MPa și un nivel maxim de 380 MPa. Pentru viteza de tăiere s-a ales un nivel minim de 150 mm/min și un nivel maxim de 750 mm/min.

**Plan experimental 3.** Material: Aliajul TiAl6V4 4mm

Formulele de transformare între mărimile reale și cele codificate sunt date de relațiile următoare:

- transformarea pentru presiune:

$$A = -1 + \frac{p-320}{300} \quad [-]$$



- transformarea pentru viteză:

$$B = -1 + \frac{v-150}{300} \quad [-]$$

În figura 4.3.3.1 se prezintă proba din aliajul de titan cu grosimea de 4mm prelucrată conform parametrilor stabiliți în tabelul 4.3.3.



Figura 5.2.1. Proba 1, TiAl6V4 4mm

Tabel 4.3.3 Condițiile de desfășurare a planului experimental 3

Încerca- rea	Presiune [ MPa]	Viteza de taiere [mm/min]	Presiune [ MPa] A[-]	Viteza de tăiere [mm/min] B[-]	Lățimea la intrare [mm]	Lățimea la ieșire [mm]	Lățimea Medie [mm]
1	320	150	-1	-1	0,882	0,68	0,826
2	380	150	+1	-1	0,892	0,78	0,836
3	320	750	-1	+1	0,985	0	0,492
4	380	750	+1	+1	0,947	0	0,473
5	350	450	0	0	1,175	0,787	0,981
6	350	450	0	0	0,955	0,782	0,868
7	350	450	0	0	0,937	0,725	0,831
8	350	100	0	-1,16	1,195	0,795	0,995
9	350	800	0	+1,16	0,87	0	0,435
10	310	450	-1,33	0	0,737	0,59	0,663
11	390	450	+1,33	0	0,637	0,782	0,71

Influența parametrilor (presiune, viteza de tăiere) asupra lățimii tăieturi la intrarea jetului de fluid pentru aliajul de titan cu grosimea de 4mm este reprezentată în figurile 4.3.3.2 - 4.3.3.3

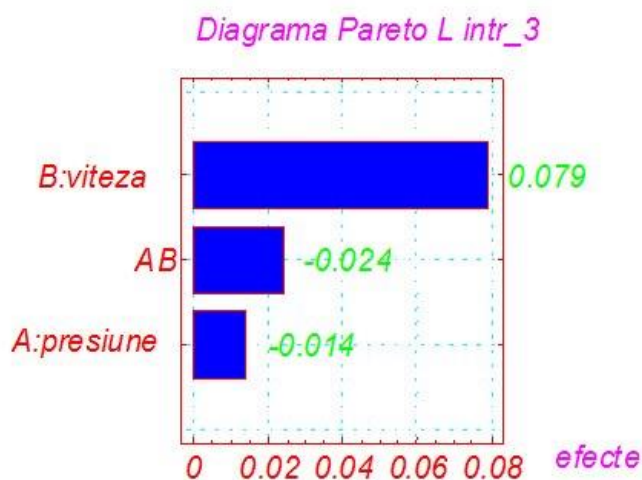


Figura 4.3.3.2 Diagrama Pareto pentru lățimea de intrare

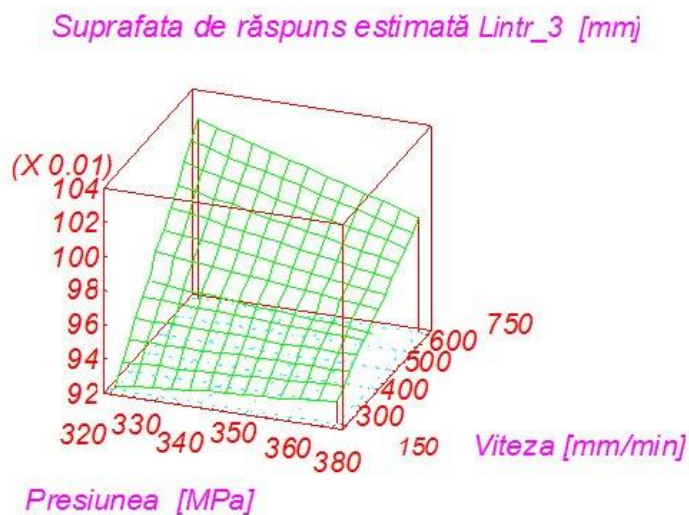


Figura 4.3.3.3 Suprafața de răspuns pentru lățimea tăieturii de intrare.

Ecuția de regresie pentru calculul lățimii tăieturii la intrare :

$$Lintr3 = 0,967 - 0,007A + 0,0395B - 0,012AB$$

$$R^2 = 0.12 - \text{coeficientul de corelație}$$

Pentru lățimea de intrare diagrama Pareto arată că viteza de tăiere este parametrul cu influența predominantă. Lățimea de intrare crește cu aceasta. Presiunea și interacțiunea dintre presiune și viteză au un efect contrar de scădere. Efectul datorat presiunii este pe jumătate din cel datorat interacțiunii dintre presiune și viteză.

Din analiza suprafeței de răspuns rezultă că pentru domeniul experimental studiat valoarea minimă pentru lățimea de intrare se obține pentru viteză minimă și presiune minimă.

Influența parametrilor (presiune, viteza de tăiere) asupra lățimii tăieturi la ieșire jetului de fluid pentru aliajul de titan cu grosimea de 4mm este reprezentată în figurile 4.3.3.4 - 4.3.3.5

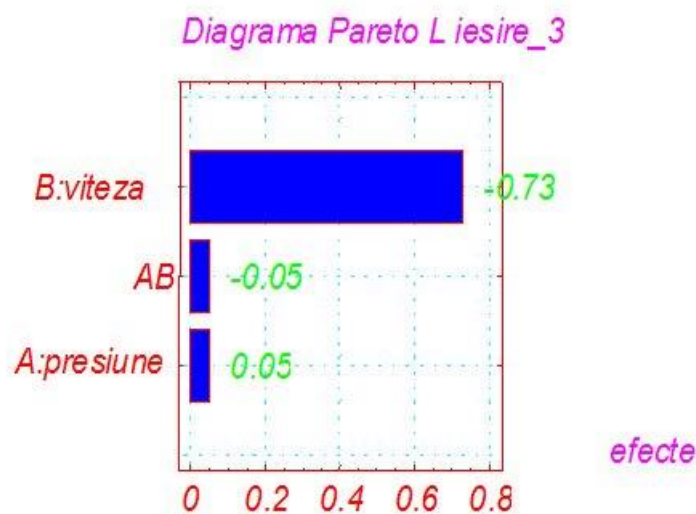
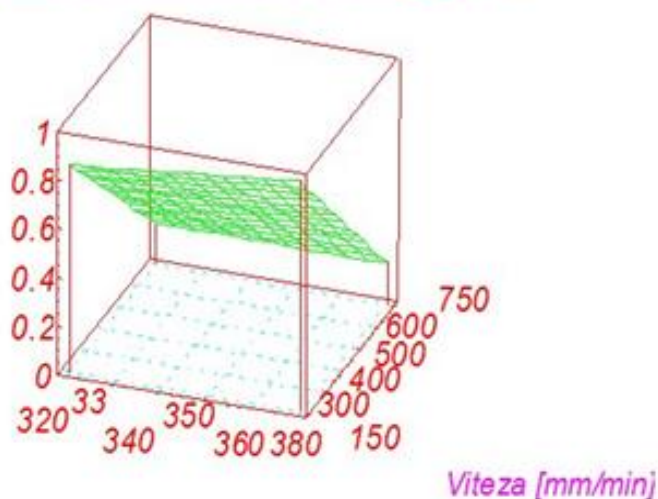


Figura 4.3.3.4 Diagrama Pareto pentru lățimea de ieșire

Suprafața de răspuns estimată  $L_{ieșire\_3}$  [mm]



Presiunea [MPa]

Figura 4.3.3.5 Suprafața de răspuns pentru lățimea tăieturii de ieșire.

Ecuția de regresie pentru calculul lățimii tăieturii la ieșire :

$$L_{ieșire3} = 0,53 + 0,025A - 0,365B - 0,025AB$$

$$R^2 = 0.66 - \text{coeficientul de corelație}$$

Lățimea de ieșire depinde puternic de viteza de tăiere. Lățimea de ieșire scade cu creșterea vitezei de tăiere. Efectul este așadar contrar celui remarcat pentru lățimea de intrare. Interacțiunea dintre presiune și viteză are același tip de efect, acesta este însă cu un ordin de mărime mai mic. Presiunea are un efect de creștere asupra lățimii de ieșire. Acesta este însă egal cu cel de scădere produs de interacțiunea dintre presiune și viteză. Se poate spune că presiunea nu influențează lățimea de ieșire.

Din suprafața de răspuns se observă că lățimea de ieșire minimă se obține pentru viteza de tăiere maximă aproape independent de presiune.

Influența parametrilor (presiune, viteza de tăiere) asupra lățimii tăieturii medii a jetului de fluid pentru aliajul de titan cu grosimea de 4mm este reprezentată în figurile 4.3.3.6 - 4.3.3.7.

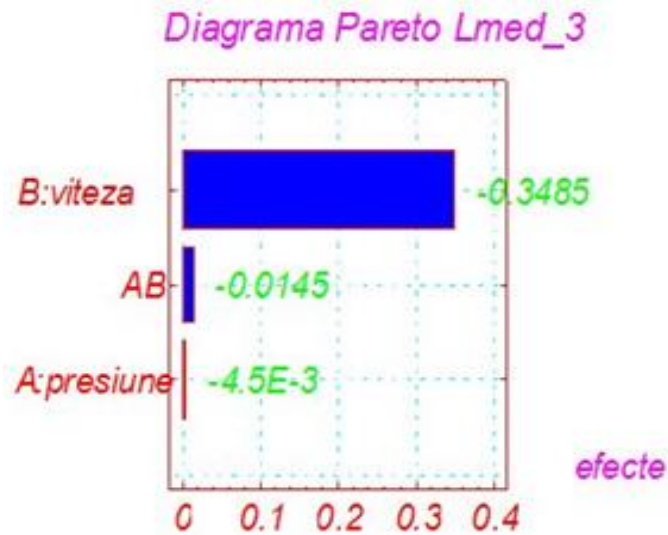


Figura 4.3.3.6 Diagrama Pareto pentru lățimea medie

Suprafata de raspuns estimată Lmed\_3 [mm]

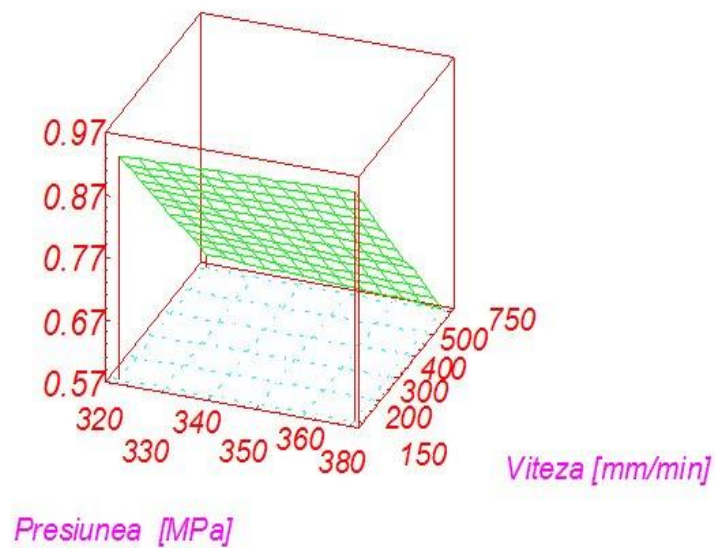


Figura 4.3.3.7. Suprafața de răspuns pentru lățimea medie a tăieturii.

Ecuția de regresie pentru calculul lățimii medii a tăieturii:

$$L_{med3} = 0,758 - 0,002A - 0,174B - 0,007AB$$

$$R^2 = 0.52 - \text{coeficientul de corelație}$$

Lățimea de medie are o dependență care mediază comportarea contrarie observată la lățimea de intrare comparative cu lățimea de ieșire. Cu toate acestea tipul de dependență observat se apropie foarte mult de cel observat pentru lățimea de ieșire. Astfel se observă scăderea puternică datorată vitezei și faptul că influența presiunii este extreme de redusă. Acest lucru este confirmat de suprafața de răspuns. Aceasta prezintă valoarea minimă pentru viteza maximă independent de presiune. Presiunea are un efect de scădere al lățimii medii similar cu cel observat pentru lățimea de intrare.

Prelucrarea rezultatelor a evidențiat coeficienți de corelație scăzuți ceea ce arată că parametrii tehnologici aleși nu au îndeplinit condițiile optime pentru prelucrarea piesei din aliajul de Ti astfel că fost necesară adoptarea unui alt pachet de parametrii tehnologici în cadrul unui alt plan experimental.

**Plan experimental 4.** Material : Aliajul TiAl6V4 4mm

În figura 4.3.3.8 se prezintă proba din aliajul de titan cu grosimea de 4mm prelucrată conform parametrilor stabiliți în tabelul 4.3.4

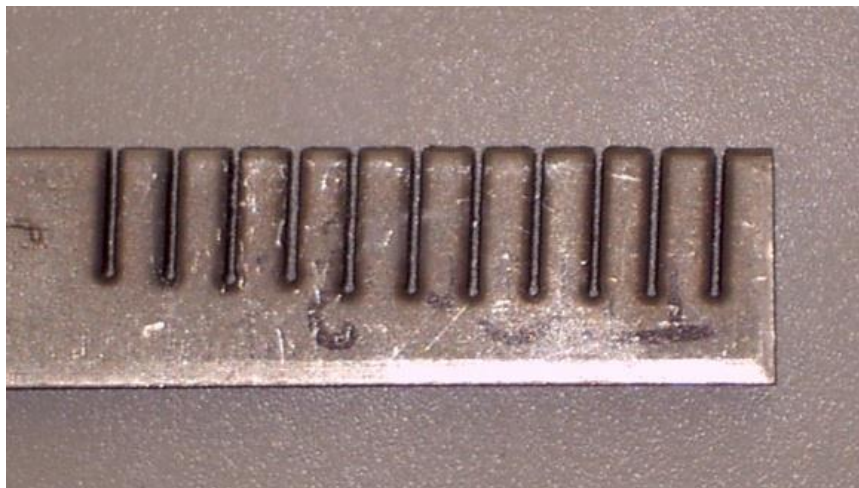


Figura 4.3.3.8 Proba 4, Aliajul TiAl6V4 4mm

Ca și structură se repetă planul experimental anterior. Diferența a constat în micșorarea domeniului de variație al vitezei.

Pentru presiune s-a ales un nivel minim de 320 MPa și un nivel maxim de 380 MPa.

Pentru viteza de tăiere s-a ales un nivel minim de 200 mm/min și un nivel maxim de 400 mm/min. Formulele de transformare între mărimile reale și cele codificate sunt date de formulele următoare:

- transformarea pentru presiune:

$$A = -1 + \frac{p-320}{300} [-]$$

- transformarea pentru viteză:

$$B = -1 + \frac{v-200}{100} [-]$$

Tabel 4.3.4 Condițiile de desfășurare a planului experimental 4

Încercarea	Presiune [MPa]	Viteza de tăiere [mm/min]	Presiune [MPa] A[-]	Viteza de tăiere [mm/min] B[-]	Lățimea la intrare [mm]	Lățimea la ieșire [mm]	Lățimea medie [mm]
1	320	200	-1	-1	0,74	0,794	0,767
2	380	200	+1	-1	0,722	0,796	0,759
3	320	400	-1	+1	0,664	0,654	0,659
4	380	400	+1	+1	0,664	0,636	0,65
5	350	300	0	0	0,678	0,668	0,673
6	350	300	0	0	0,658	0,698	0,678
7	350	300	0	0	0,682	0,628	0,655
8	350	100	0	-2	0,81	0,796	0,803
9	35	500	0	+2	0,624	0,76	0,692
10	310	300	-1,33	0	0,584	0,62	0,602
11	390	300	+1,33	0	0,688	0,658	0,673

Influența parametrilor (presiune, viteza de tăiere) asupra lățimii tăieturii la intrarea jetului de fluid pentru aliajul de titan cu grosimea de 4mm este reprezentată în figurile 4.3.3.9 și 4.3.3.10



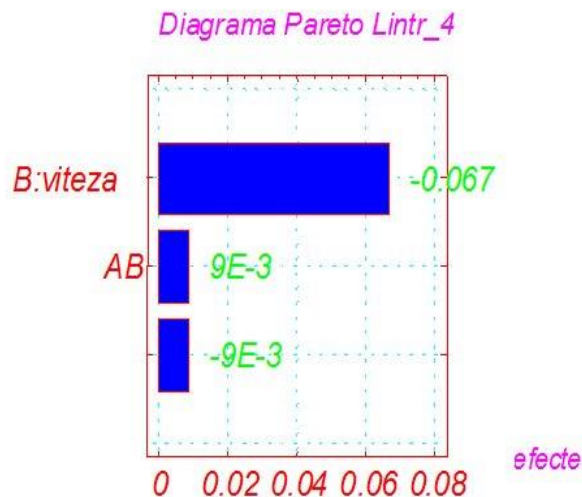


Figura 4.3.3.9 Diagrama Pareto pentru lățimea de intrare

Suprafața de răspuns estimată Lintr\_4 [mm]

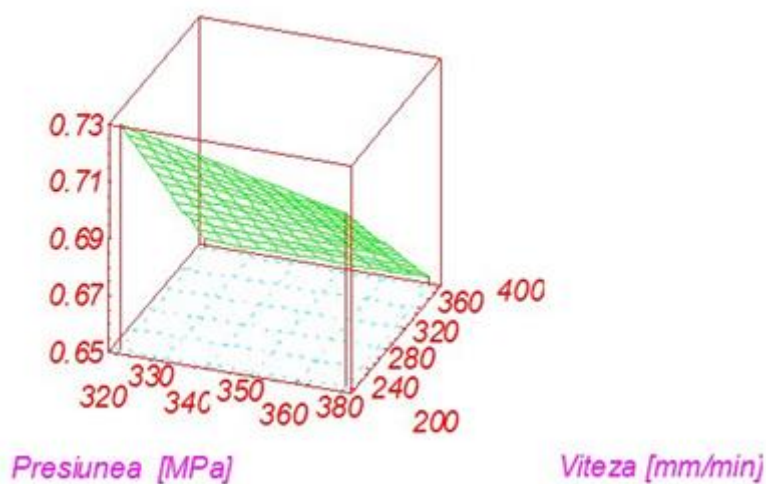


Figura 4.3.3.10 Suprafața de răspuns pentru lățimea tăieturii de intrare.

Ecuția de regresie pentru calculul lățimii tăieturii la intrare :

$$Lintr4 = 0,686 - 0,004A - 0,003B + 0,004AB$$

$$R^2 = 0.77 - \text{coeficientul de corelație}$$

Pentru lățimea de intrare se observă că viteza de tăiere este factorul cu cea mai puternică contribuție. Aceasta se desfășoară în sensul scăderii lățimii de intrare cu creșterea vitezei. Contribuția presiunii prin efect propriu și prin interacțiunea dintre presiune

și viteză este redusă. Interacțiunea dintre presiune și viteză crește lățimea de intrare. Presiunea scade în aceeași proporție lățimea de intrare.

Suprafața de răspuns arată că valoarea minimă pentru lățimea de intrare se obține pentru viteza maximă independent de presiune.

Influența parametrilor (presiune, viteza de tăiere) asupra lățimii tăieturii la ieșirea jetului de fluid pentru aliajul de titan cu grosimea de 4mm este reprezentată în figurile 4.3.3.11 și 4.3.3.12



Figura 4.3.3.11 Diagrama Pareto pentru lățimea de ieșire

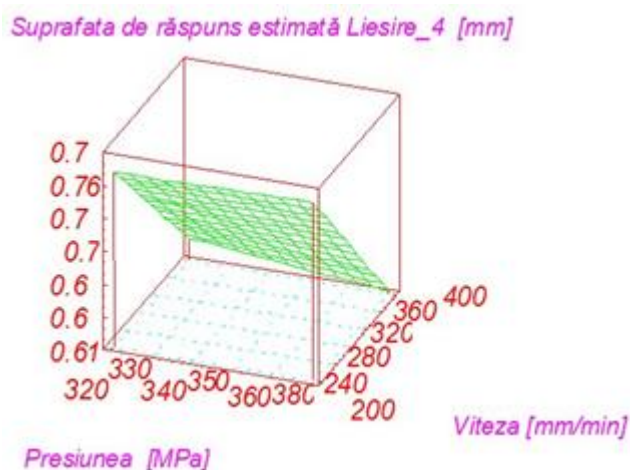


Figura 4.3.3.12 Suprafața de răspuns pentru lățimea tăieturii de ieșire.

Ecuția de regresie pentru calculul lățimii tăieturii la ieșire :

$$Liesire4 = 0,696 - 0,004A - 0,075B - 0,005AB$$

$$R^2 = 0.74 - \text{coeficientul de corelație}$$

Diagrama Pareto arată că lățimea de ieșire depinde puternic de viteză. Lățimea de ieșire scade cu creșterea vitezei de tăiere. Presiunea are un efect slab asupra lățimii de ieșire. Suprafața de răspuns arată că lățimea de ieșire minimă se obține pe domeniul experimental studiat la presiune maximă și viteză maximă.

Influența parametrilor (presiune, viteză de tăiere) asupra lățimii tăieturii medii a jetului de fluid pentru aliajul de titan cu grosimea de 4mm este reprezentată în figurile 4.3.3.13 și 4.3.3.14.

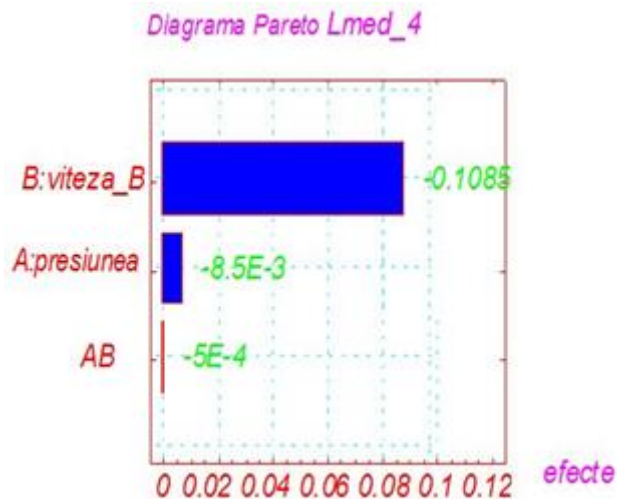


Figura 4.3.3.13 Diagrama Pareto pentru lățimea medie

Suprafața de răspuns estimată Lmed\_4 [mm]

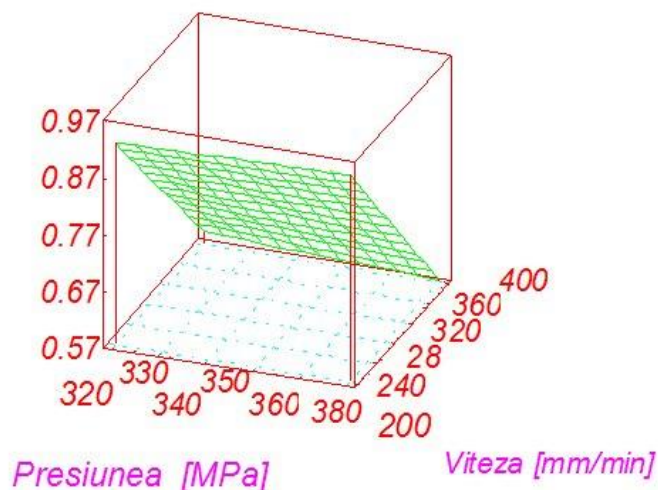


Figura 4.3.3.14 Suprafața de răspuns pentru lățimea medie a tăieturii.

Ecuția de regresie pentru calculul lățimii medii a tăieturii:

$$L_{med4} = 0,691 - 0,004A - 0,054B - 0,0002AB$$

$$R^2 = 0.79 - \text{coeficientul de corelație}$$

Diagrama Pareto arată că lățimea medie depinde puternic de viteză. Lățimea medie scade cu creșterea vitezei de tăiere. Presiunea are un efect slab asupra lățimii de medie. Suprafața de răspuns arată că lățimea medie minimă se obține pe domeniul experimental studiat la viteză maximă independent de presiune.

Tabele cu rezultatele brute ale experimentărilor se găsesc în Anexa 1.

## Capitolul 5

### Cercetări asupra fiabilității tubului de focalizare

#### 5.1 Structura jetului

Ca urmare a studiului făcut asupra structurii geometrice a unui jet de fluid care iese în aer dintr-un orificiu cu secțiune redusă, Yanaida [55] a arătat că există trei regiuni distincte ale jetului (figura 5.1.1):

- regiunea conică numită și inima jetului ,
- regiunea de tranziție,
- regiunea finală.

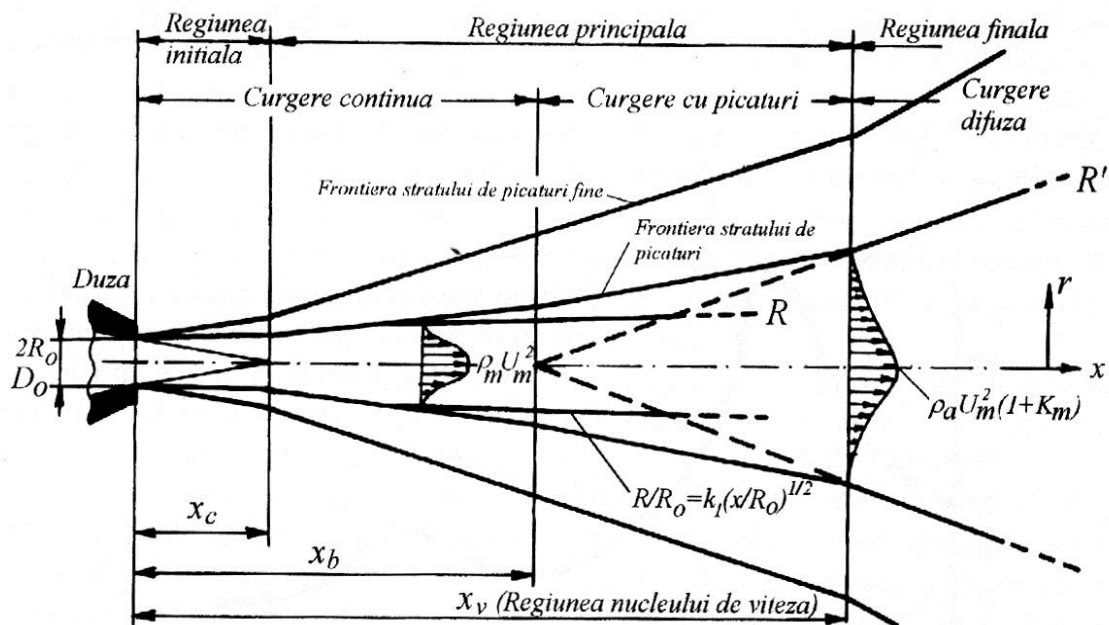


Figura 5.1.1 Structura jetului [ 55 ]

În prima regiune (zonă) parametrii regimului de curgere, rămân constanți de-a lungul axei jetului. Este cazul presiunii statice. Lungimea acestei zone ( $x_c$ ) depinde de diametrul orificiului prin care iese jetul de fluid  $d_0$  și se poate evalua cu relația [ 10 ] :

$$x_c/d_0 = A \quad (5.1.1)$$

în care  $A$  este un parametru dependent de numărul lui Reynolds, de geometria și calitatea suprafeței orificiului prin care iese jetul. În literatura de specialitate se specifică anumite valori măsurate ale acestui parametru:

$$73 < A < 135 \quad [ 55 ]$$

$$A = 90 \quad [ 56 ]$$

$$20 < A < 150 \quad [ 57 ]$$

Nikonov ș.a. [58] au arătat că " $A$ " depinde de numărul lui Reynolds pentru  $Re > 450 \times 10^3$ . Peste această valoare,  $A$  este constant pentru o configurație dată a orificiului.

Neusen, ș.a. [59] au calculat valori pentru  $A$  bazate pe măsurători efectuate asupra vitezei jetului. Astfel, s-a arătat că  $50 < A < 125$ .

Whiting ș.a. [60] au dezvoltat o relație empirică între presiunea pompei și lungimea zonei " $x_c$ ":

$$x_c = -3,545 \cdot 10^{-11} \cdot p + 2,535 \cdot 10^{-2} \quad (5.1.2)$$

în care:  $p$  este presiunea apei [MPa].

Relația anterioară este valabilă pentru  $p = 200-350$  MPa și diametrul orificiului  $d_0 = 0,1-0,3$  mm.

Dezvoltarea instalațiilor industriale de prelucrare cu jet a impulsat studiul structurii jeturilor de fluid. Deși primele studii asupra dezintegrării jeturilor de lichid datează încă din prima parte a secolului trecut, mecanismul complex care guvernează acest fenomen nu este nici acum pe deplin elucidat. Studiul structurii și dinamicii jetului de lichid, în special al jetului supersonic, este una dintre cele mai dificile probleme ale hidrodinamicii. Din punct de vedere teoretic, trecerea de la jetul continuu (la ieșirea din duză) la un amestec de particule de lichid și aer, este foarte dificil de exprimat cu metodele mecanicii mediilor fluide continue. Pe de altă parte, viteza foarte mare de curgere a

jetului și dimensiunile reduse îngreunează mult investigațiile experimentale. Jetul evacuat prin duză intră în contact cu aerul care are densitatea de aproximativ 800 de ori mai mică decât a apei, pierzându-și forma inițial cilindrică la o anumită distanță față de duză. Această evazare aproximativ conică a jetului are loc datorită pulsațiilor turbulente și a frecării cu mediul ambiant. În vecinătatea secțiunii de ieșire, jetul are aspectul unui filament continuu de lichid de viteză practic constantă, înconjurat de un strat subțire de picături fine. Gradientul de viteză din stratul limită al jetului, împreună cu variațiile de presiune din mediul ambiant și cu forțele de tensiune superficială, conduc la amplificarea perturbațiilor inerente curgerii. Pe măsură ce aceste perturbații cresc, din jet se desprind filamente de lichid, care la rândul lor se rup în picături mai mici. Acestea antrenează în mișcarea lor aerul din mediul înconjurător, având loc un schimb de masă între jet și gaz [ 2 ].

Această aerare a jetului începe de la suprafață și se propagă spre interior, astfel că diametrul filamentului continuu de lichid se anulează la o anumită distanță față de duză. Porțiunea respectivă a jetului, în care se menține un nucleu continuu de lichid, având presiunea dinamică, viteza și densitatea constante, se numește regiunea sau zona inițială. În continuare, viteza în axă și presiunea dinamică scad după o lege hiperbolică odată cu creșterea distanței față de duză. În secțiune transversală a jetului, presiunea și viteza scad rapid spre frontieră după o curbă de tip Gauss [8]. Această porțiune a jetului, în care concentrația de picături este ridicată iar evazarea relativ redusă, se numește regiunea (zonă) principală. În continuare, jetul devine un amestec format din picături fine de apă și aer, în care viteza în axă și presiunea dinamică scad mult, numită zona finală. Durificarea materialelor se realizează folosind ultima regiune a jetului, calitatea suprafeței prelucrate fiind net superioară față de calitatea obținută în cazul folosirii operației de sablare.

## 5.2 Evaluarea fenomenului de uzare a tubului de focalizare

Condiția principală pentru utilizarea jeturilor de fluid la prelucrarea materialelor este realizarea unui jet cât mai compact, adică este nevoie ca jetul să-și păstreze energia cinetică până la o anumită distanță față de duză, evitându-se pe cât posibil dezintegrarea lui.

Uzura tubului de focalizare se poate evalua și prin măsurarea diametrului orificiului de ieșire a jetului din tub. În timpul investigațiilor asupra uzurii tubului de



focalizare, Nakaya ș.a. [61] au arătat că degradarea depinde de interacțiunea dintre materialul din care este realizat tubul și materialul abraziv folosit. S-a observat că tuburile din material ceramic s-au uzat mai mult când s-au folosit ca material abraziv oțel, decât în cazul folosirii granulelor din oxidul de aluminiu. De reținut că ultimele aveau duritatea mult mai mare. Rezultatele obținute au arătat caracterul complex al procesului de uzare a tubului de focalizare și că nu este vorba de doar o relație simplă între materialul din care este fabricat tubul de focalizare și cel al granulelor abrazive. Notând cu "d<sub>f</sub>" diametrul tubului de focalizare, cu "W<sub>F</sub>" uzura acestuia, iar cu "t" timpul de utilizare a tubului respectiv, se poate scrie [ 10 ]:

$$d_f = W_F \times t \quad (5.2.1)$$

$$\text{sau } W_F = \frac{\Delta d_F}{\Delta t} \quad (5.2.2)$$

Rezultă astfel că uzura tubului depinde de parametrii materialului din care este realizat tubul, de parametrii procesului dar și de efectele de undă datorate curgerii cu viteze din domeniul supersonic.

Cercetătorii Hashish [62] - [66], Beardsley, Kovacevic, ș.a. [ 10 ], [67], [68], [69], au studiat influența presiunii pompei asupra uzurii tubului de focalizare arătând că uzura respectivă crește cu creșterea presiunii pompei ca rezultat al creșterii vitezei particulelor abrazive.

Kovacevic și Beardsley [67] au arătat că uzura respectivă a tuburilor de focalizare devine mai pronunțată cu creșterea debitului particulelor de abraziv în jetul de apă.

Diametrul orificiului duzei de apă d<sub>o</sub> este un parametru cu o influență semnificativă asupra uzurii tubului și se alege în funcție de diametrul interior al tubului de focalizare "d<sub>f</sub>". Crescând diametrul duzei de apă crește semnificativ și uzura tubului respectiv.

M. Hashish a arătat că tuburile de focalizare fabricate din oțel de scule nealiat nu prezintă sensibilitate la dimensiunea granulelor abrazive, pe când tuburile realizate din carbură de tungsten prezintă o sensibilitate crescută, caz în care uzura se reduce considerabil cu reducerea diametrului particulelor abrazive [10]. În schimb tuburile din materialele cu o duritate relativ scăzută prezintă o sensibilitate ridicată la efectele

locale ale jetului și după o perioadă relativ scurtă de timp pe suprafața cilindrică interioară se manifestă uzura. Suprafața interioară a tubului are forma geometrică ce urmează forma suprafeței exterioare a jetului de apă cu granulele abrazive.

Ca urmare, corelat cu cele de mai sus se susține că tuburile de focalizare realizate din materiale cu duritate mai scăzută prezintă o sensibilitate ridicată mai mult la condițiile de curgere a jetului decât la mărimea granulelor abrazive.

Neuss, ș.a.[8] au studiat influența ambelor materiale, atât a tubului cât și a granulelor abrazive, din punct de vedere al durității acestora exprimate în unități Vickers. Au evidențiat că pentru un anumit interval al raportului valorilor lor se poate estima uzura diametrului tubului de focalizare cu relația:

$$\log d_F = C_1 \times \log \left( \frac{H_p}{H_F} \right) - C_2, \quad (5.2.3)$$

$$\text{pentru } \frac{H_p}{H_F} = 0,7 - 1,2 \quad (5.2.4)$$

în care  $C_1$ ,  $C_2$  reprezintă constante ce țin cont de efectul altor parametri ai regimului de prelucrare.

Ecuția (5.3.2.3) bazată pe estimarea modificării diametrului de ieșire al tubului de focalizare nu caracterizează definitiv uzura unui tub. Neuss, ș.a. au observat că și în cazul în care diametrul de ieșire al tubului nu se modifică poate scădea eficiența procesului de prelucrare datorată tubului respectiv. Aceasta evidențiază o uzură produsă într-un alt loc din interiorul suprafeței cilindrice interioare a tubului respectiv și se reflectă în scăderea masei acestuia [ 67 ]. Scăderea masei tubului, pentru condiții date de funcționare și materialul din care au fost realizate tuburile, este aproximativ liniară în raport cu timpul de funcționare, dar uzura produsă este neuniform distribuită pe suprafața interioară a acestuia. Se constată că este mai accentuată înspre partea de intrare a jetului de fluid [ 10 ].

Un model general este prezentat de Hashish [46] - [52], Nanduri ș.a. [56], (figura 5.2.1).

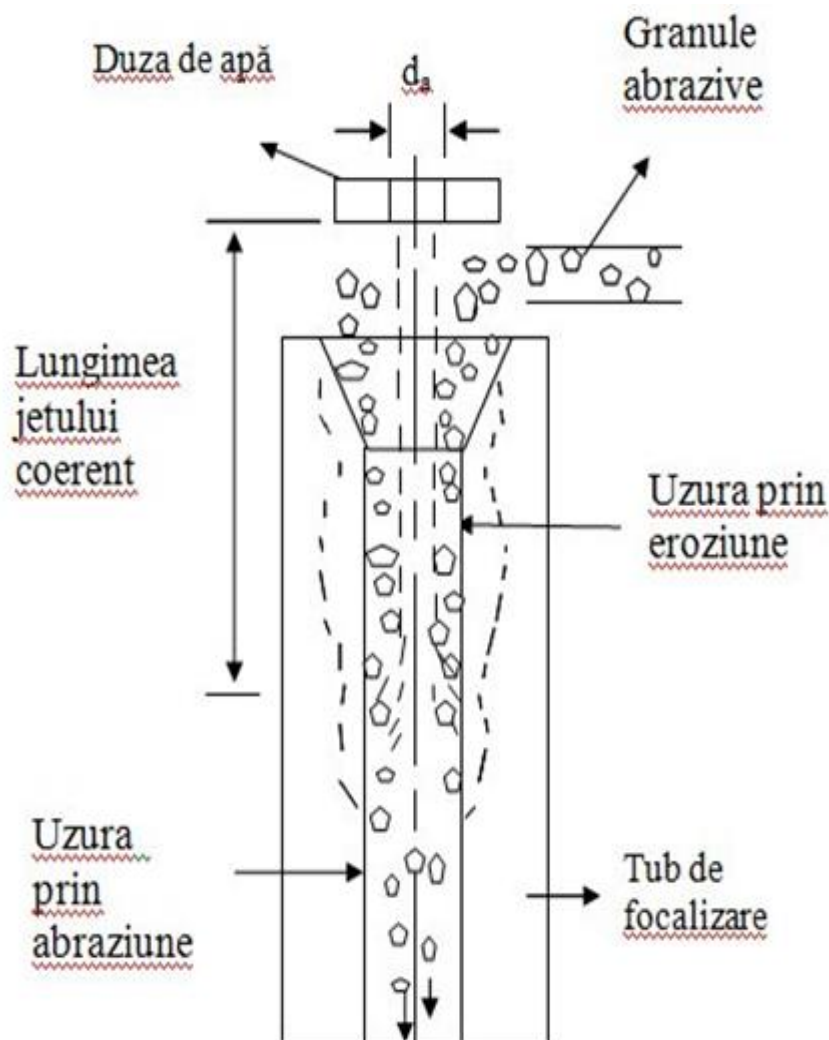


Figura 5.2.1 Uzura tubului de focalizare [10]

La intrare în tubul de focalizare, particulele abrazive lovesc peretele tubului sub diferite unghiuri de impactare destul de largi. Pe măsura înaintării în tubul de focalizare, amplitudinea deplasării particulelor abrazive scade, ele având tendința de a urma traiectorii aproximativ paralele cu peretele interior al tubului de focalizare. De aici rezultă lungimea optimă a tubului.

Lungimea tubului de focalizare reprezintă un factor care poate influența uzura acestuia în partea de ieșire a jetului, iar uzura respectivă afectează precizia de prelucrare a procedurii [10], [69]. Cu creșterea lungimii, până la o valoare optimă, scade uzura orificiului interior.

Pentru o precizie de prelucrare mai mare este necesară o anumită lungime a tubului de focalizare. Cu alte cuvinte, precizia crește cu creșterea lungimii tubului până

la o anumita valoare, peste care proprietățile jetului scad ca urmare a pierderilor de energie din orificiul tubului de focalizare.

Considerând ca regim provizoriu de producere a uzurii tubului eroziunea superficială de impact, Bell și Rogers [70] au sugerat că fracturarea abrazivă este o proprietate predominantă în cazul impactării sub unghiuri mari la formarea uzurii tuburilor din materiale fragile pe când la unghiuri mici de impactare proprietatea cea mai importantă de care se ține cont este duritatea materialului.

Pentru tuburile realizate din materiale ceramice se presupune ca au un comportament combinat dintre cel fragil și cel ductil, mecanismele predominante de erodare fiind cel de micro-abraziune sau micro-brăzdare și cel de micro-fisurare.

Wang ș.a. [71] au observat prezența celor două mecanisme la materialele ceramice impactate cu particule de mare viteză, cel de micro-fisurare fiind mai accentuat în cazul impactării sub unghiuri mai mari. Aceasta comportare duce la uzura accentuată la materialele cu o rezistență scăzută la fracturare. Materialele ceramice cu o granulație mai fină manifestă rezistența cea mai ridicată la eroziune [71], [72].

Kovacevic și Beardsley [67], [68] au dezvoltat un model care definește uzura tuburilor de focalizare bazat pe analiza unor ecuații de regresie multiplă. Pe baza acestui model au obținut următoarea relație pentru durata de viață  $t_F$  :

$$t_F = \frac{5,587}{p^{1,215} \cdot \dot{m}_A^{0,245}} \quad [s] \quad (5.2.5)$$

unde:

$p$  reprezintă presiunea pompei [ MPa ]

$\dot{m}_A$  reprezintă debitul masic al granulelor de abraziv [g/s]

$t_F$  reprezintă durata de viață a tubului de focalizare [s]

Uzura neuniformă a suprafeței interioare a tuburilor de focalizare de diferite forme și mărimi, fără prelucrarea orificiului interior de circulație a fluidului este prezentată în figura 5.2.2



Figura 5.2.2 Uzura suprafeței interioare a tubului de focalizare [73]

După Barda-Carnot [75], conform relației (5.2.6) de curgere a fluidului prin conducte și orificii mici care prezintă variații ale diametrului interior, se poate exprima pierderea de presiune a fluidului [76]. Respectivetele pierderi se datorează destinderilor și comprimărilor bruște ale fluidului.

$$\Delta E = \xi \frac{1}{2} \rho (v_1 - v_2)^2 \quad [\text{MPa}] \quad (5.2.6)$$

unde:

$\Delta E$  - pierderea de presiune

$\xi$  - coeficient de curgere adimensional ce ține cont de pierderile locale,

$$0 \leq \xi \leq 1$$

$\rho$  - densitatea fluidului [Kg/m<sup>3</sup>]

$v_1, v_2$  - vitezele fluidului, prin nod respectiv ventru [m/s]

Astfel, la fiecare destindere (creștere a diametrului interior a tubului focalizator) rezultă o pierdere a energiei jetului. Această pierdere de energie a jetului are ca efect scăderea calității suprafețelor prelucrate precum și a vitezei de prelucrare. Rezultatul este scăderea semnificativă a productivității. Crescând uzura suprafeței interioare a tubului de focalizare și pierderea de energie va crește ajungând ca la un moment dat ca

energia jetului sa fie mai mică decât energia minimă de prag sub care procesul de prelucrare nu mai poate avea loc. Ca urmare este necesară înlocuirea tubului uzat.

Dacă se definește uzura tubului de focalizare ca fiind variația diametrului de ieșire al acestuia în raport cu timpul de funcționare, rezultă:

$$U = (d_f - d_i) \div t \quad (5.2.7)$$

unde:

$U$  = uzura tubului de focalizare [mm/s]

$d_f$  = diametrul final la ieșire din tub [mm]

$d_i$  = diametrul inițial la ieșire din tub [mm]

$t$  = timpul de funcționare [s]

### 5.3 Criterii și restricții privind creșterea duratei de funcționare a tubului de focalizare

Experimentul 5 a fost realizat pe instalația de prelucrare cu jet de apă cu abraziv prezentată în figura 5.3.1 [ 9 ].



Figura 5.3.1 Instalația de prelucrare cu jet de apă cu abraziv [ 9 ]

Este o instalație de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv, cu comanda numerică, fiind prevăzută cu un multiplicator de înaltă presiune cu camere paralele.

Caracteristicile tehnice ale instalației de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv de tip Micra 1010 se prezintă în *tabelul 5.3*.

*Tabelul 5.3* Caracteristicile instalației de prelucrare

Nr.crt.	Parametrii	UM	Valoare
1.	Putere instalata	kW	18,5
2.	Presiunea apei, max.	MPa	413,7
3.	Consumul de apă	l/min	0 - 2
4.	Diametrul duzei de apă, max.	mm	0.33
5.	Viteza de procesare, max.	mm/min	40000
6.	Precizia dinamică	mm	+/- 0.1
7.	Deplasare după axele x,y,z	mm	1000 1000 150

Pentru experimentul 5 din cadrul cercetării experimentale au fost stabiliți:  
factori de influență:

- x1 ⇒ presiunea jetului [MPa]
- x2 ⇒ viteza de prelucrare [mm/min]
- x3 ⇒ forma orificiului interior al tubului de focalizare,

parametrii procesului de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv:

- p1 ⇒ forma și diametrul duzei de apă,
- p2 ⇒ distanța dintre tubul de focalizare și material, [mm]
- p3 ⇒ grosimea materialului procesat, [mm]
- p4 ⇒ natura și granulația materialului abraziv.

Ieșirile sistemului ( funcțiile obiectiv ):

- I1 ⇒ durata de viață a tubului de focalizare [h]

În cazul experimentului 5, valorile factorilor de influență au fost:



presiunea a fost menținută constant la 370 [MPa],

- vitezele de prelucrare au fost cele din baza de date ale sistemului tehnic de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv pe care au fost realizate experimentările, corespunzătoare naturii și grosimii materialului procesat precum și a calității suprafețelor astfel prelucrate,
- au fost folosite atât tuburi de focalizare în stare inițială cu dimensiunile: 6,35 x 0,76 x 76,2 [mm], cât și cele cu orificiul interior profilat de curgere a fluidului.

Parametrii procesului de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv au fost:

- duzele de apă folosite, realizate din safir sintetic, au avut diametrul de 0,25 [mm],
- distanța dintre tubul de focalizare și material a fost menținută constant 2 [mm],
- un singur material procesat cu grosimea constantă,
- materialul abraziv de origine minerală cu granulația Mash 80.

Funcția obiectiv pentru experimentul 5 se referă la durata de viață a tubului de focalizare cu orificiul interior de curgere a fluidului modificat.

Programul de cercetare experimentală a avut ca obiectiv și eficientizarea tehnologiei de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv. Astfel, cu toate că tehnologia de prelucrare cu jet de fluid are multiple avantaje față de cele concurente, dar fiind ceva mai costisitoare, s-a încercat reducerea costul prelucrării prin creșterea duratei de funcționare a tubului de focalizare. În acest sens s-a procedat la prelucrarea suprafeței conului de la intrarea jetului în tubul de focalizare obținând o suprafață profilată.

În figura 5.3.2 a) se remarcă uzura suprafeței interioare a unui tub care a funcționat în condiții identice din punct de vedere al parametrilor regimului de prelucrare (forma și diametrul duzei de apă, distanța dintre tubul de focalizare și material, grosimea materialului procesat, natura și granulația materialului abraziv) și care a fost tăiat diametral, în plan longitudinal prin electroeroziune cu fir.

La începerea experimentării suprafața interioară a tubului de focalizare era cilindrică. După durata de funcționare de cca. 108 ore, aceasta a devenit neuniformă prezentând uzura sub formă de ventre de lungimi diferite. În figura 5.3.2.a) se identifică patru zone unde diametrul interior al tubului prezintă valori maxime numite ventre și minime numite noduri, față de situația din figura 5.3.2 b) în care se remarcă doar două astfel de zone.



Figura 5.3.2 Uzura tubului de focalizare. a) neprelucrat înainte de utilizare, b) prelucrat înainte de utilizare

Analizând regimul de curgere al jetului prin cele două tuburi rezultă, conform relației Borda-Carnot (5.2.6.) că în primul caz pierderea de energie este semnificativ mai mare decât în al doilea caz când s-a folosit tubul de focalizare modificat inițial.

După prelucrarea tubului nou și utilizarea acestuia pe utilajul de prelucrare cu jet de apă cu abraziv, în condiții similare ale parametrilor tehnologici de lucru, pe o durată aproximativ egală (cca. 108 ore), se distinge (figura 5.3.2 b) că pe suprafața cilindrică interioară a apărut uzura specifică doar în zona de intrare a jetului în suprafața cilindrică a orificiului, adică în imediata vecinătate cu zona conică. Se identifică doar două ventre cu lungimi mai mici decât în primul caz, restul suprafeței rămânând aproximativ cilindrică. Ceea ce este cel mai important este faptul că nu apare o decalibrare a acestei suprafețe la partea de ieșire a jetului din tubul de focalizare.

Uzura orificiului de la ieșirea din tubul de focalizare poate fi și neuniformă în sensul că forma orificiului respectiv la un tub nefolosit este circulară, iar după o utilizare completă (în cazul de față 159 ore) devine neregulată. Din cauza solicitărilor complexe la care este supus orificiul tubului în zona de intrare a abrazivului și din cauza fragilității materialului din care este realizat acesta, se pot produce deteriorări sub forma de ciobiri, respectiv dislocări de material. Acestea pot influența negativ atât regimul de curgere cât și poziționarea corespunzătoare a tubului în locașul din capul de prelucrare. Ca urmare se ajunge la uzura orificiului tubului de focalizare, la partea de ieșire a

jetului ca în figura 5.3.3. Acest fenomen se poate datora și montării deficitare a tubului în locașul din capul de prelucrare necurățat de eventualele particule de abraziv.

În astfel de caz în relația (5.3.1) se folosește diametrul final mediu:

$$d_{f \text{ med}} = (d_{f \text{ max}} + d_{f \text{ min}}) / 2. \quad [\text{mm}] \quad (5.3.1)$$

Un alt aspect ce caracterizează uzura tubului de focalizare este abaterea de la circularitate în partea de ieșire a jetului. Majoritatea tuburilor uzate prezintă forma eliptică în zona menționată. Aceasta se datorează semnificativ alinierii necorespunzătoare dintre duza de apă și tubul de focalizare.

Excentricitatea respectivă se poate exprima ca raport dintre diametrul maxim și cel minim al suprafeței de ieșire al orificiului tubului de focalizare.

În figura 5.3.3 este prezentată situația în care tubul de focalizare prezintă la ieșire uzură neuniformă.

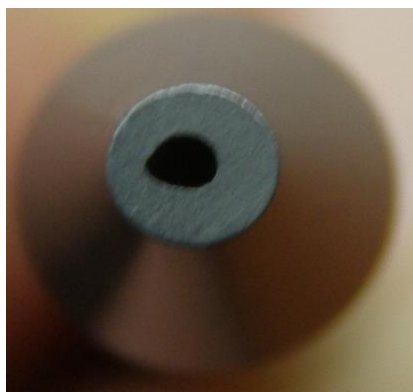


Figura 5.3.3 Uzura la ieșire din tubul de focalizare după 159 ore

Această ovalizare a suprafeței frontale are influență nefastă asupra formei și proprietăților jetului la ieșirea din tub.

Pentru eficiența prelucrării este de preferat ca jetul de fluid să își păstreze cilindricitatea pe o distanță cât mai mare de la ieșirea din tub. Perturbarea prin evazare provine și din contactul cu aerul a jetului de fluid.

În figura 5.3.4 se prezintă valorile (maximă și minimă) măsurate ale diametrului interior ale tuburilor de focalizare de la partea de ieșire a jetului de fluid.

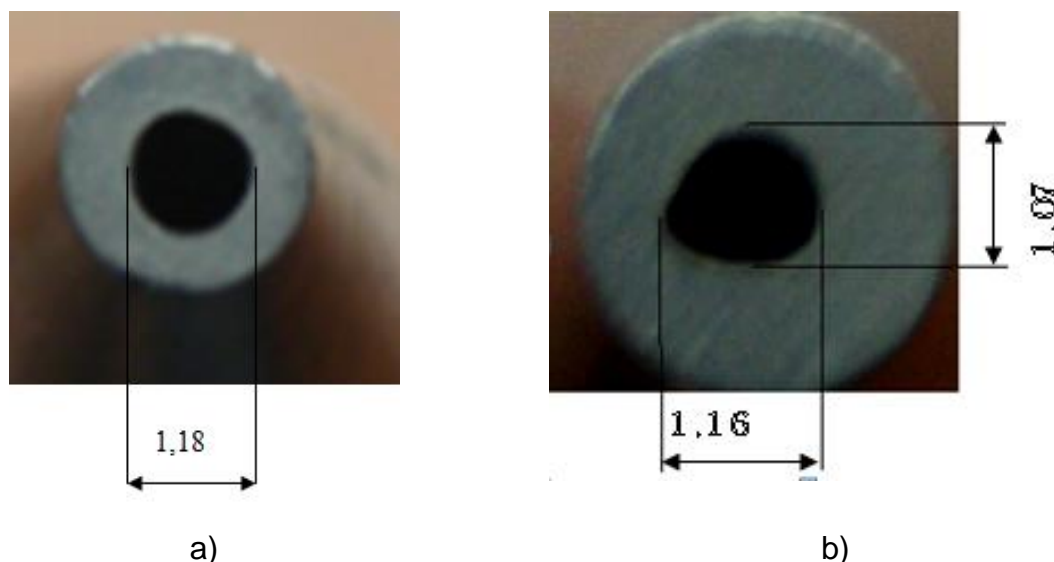


Figura 5.3.4 Dimensiunile în mm ( maximă și minimă) a diametrului interior a tubului de focalizare utilizat: a) 108 ore (în stare de livrare) și b) 159 ore (dar prelucrat înainte de folosire).

În figura 5.3.5 se prezintă suprafața frontală la partea de ieșire a jetului de fluid din tubul de focalizare neprelucrat după 108 ore de utilizare.



Figura 5.3.5 Imagini ale tubului de focalizare în starea de livrare folosit 108 ore

Ulterior tubul de focalizare a fost secționat diametral prin electroeroziune cu fir. Se remarcă diferența dintre diametrul acestuia față de diametrul tubului folosit 159 de ore așa cum a fost prezentat mai sus.

Având în vedere relația 5.3.1, rezultă că este foarte important ca această suprafață, pe unde jetul de fluid iese din tubul de focalizare, să reziste la uzură cât mai mult timp mărindu-se astfel durata de funcționare a respectivului tub, lucru care se poate deduce și din relația (5.2.7). Aspectele scoase în evidență de relațiile (5.1.1) și (5.2.7) se referă la uzura suprafeței cilindrice interioare în partea de ieșire a jetului din

tub care afectează proprietățile jetului. Relația (5.2.6) în schimb arată pierderile de energie ale jetului de fluid datorate uzurii produse pe întreaga suprafață cilindrică interioară a tubului. Uzură respectivă este datorată atât efectului abraziv al granulelor cât și de efectul cavitațional al bulelor de aer din fluidul utilizat.

În figura 5.3.6 se prezintă secțiunea tubului de focalizare, de același tip cu primele două, modificat inițial și utilizat 159 de ore pe utilajul de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv.



Figura 5.3.6 Tubul de focalizare utilizat 159 de ore, modificat, secționat longitudinal.

De reținut că în toate aceste cazuri prelucrarea cu tuburile de focalizare respective s-a realizat pe același utilaj de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv, la parametrii optimi ai regimului de prelucrare recomandați de producătorul utilajului și realizând același tip de piese cu aceeași calitate din punct de vedere al rugozității și geometriei suprafețelor prelucrate. Aceasta evidențiază că tuburile au fost folosite atâta timp cât au asigurat precizia necesară de prelucrare, după care au fost înlocuite exceptând cazul primului tub modificat care a fost schimbat pentru a fi examinat din punct de vedere al uzurii.

În cazurile de față presiunea apei a fost de 370 MPa la care raportul dintre uzura consumabilelor (duza de apă, camera de amestec, tub de focalizare) și productivitate este optim raportat la natura și grosimea materialului prelucrat. Este evident că mărirea presiunii apei la pompă și gradul de uzură al tubului de focalizare la care este necesară înlocuirea acestuia, se produce mai rapid. La fel și duza de apă și camera de amestec se vor uza mai repede, rezultând o creștere a costurilor de prelucrare. Pe de altă parte dacă se micșorează presiunea la pompă, cu toate că uzura consumabilelor respective se produce ceva mai lent, este necesară și scăderea corespunzătoare a

vitezei de prelucrare ajungându-se la situația în care procedeul de prelucrare respectiv poate deveni nerentabil datorită creșterii costurilor cu energia electrică în principal dar și cu apa și abrazivul necesare prelucrării, totul în schimbul unei productivități mai reduse. Din aceste motive este important ca parametrii regimului de prelucrare să fie aleși corect asigurându-se astfel un raport optim calitate/preț pentru piesele prelucrate.

Configurațiile suprafețelor cilindrice interioare a tubului de focalizare:

- modificat anterior menționat și utilizat 159 de ore,
- nemodificat utilizat 108 ore,

pe utilajul de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv menținând parametrii regimului de prelucrare neschimbați, se prezintă în figura 5.3.7.

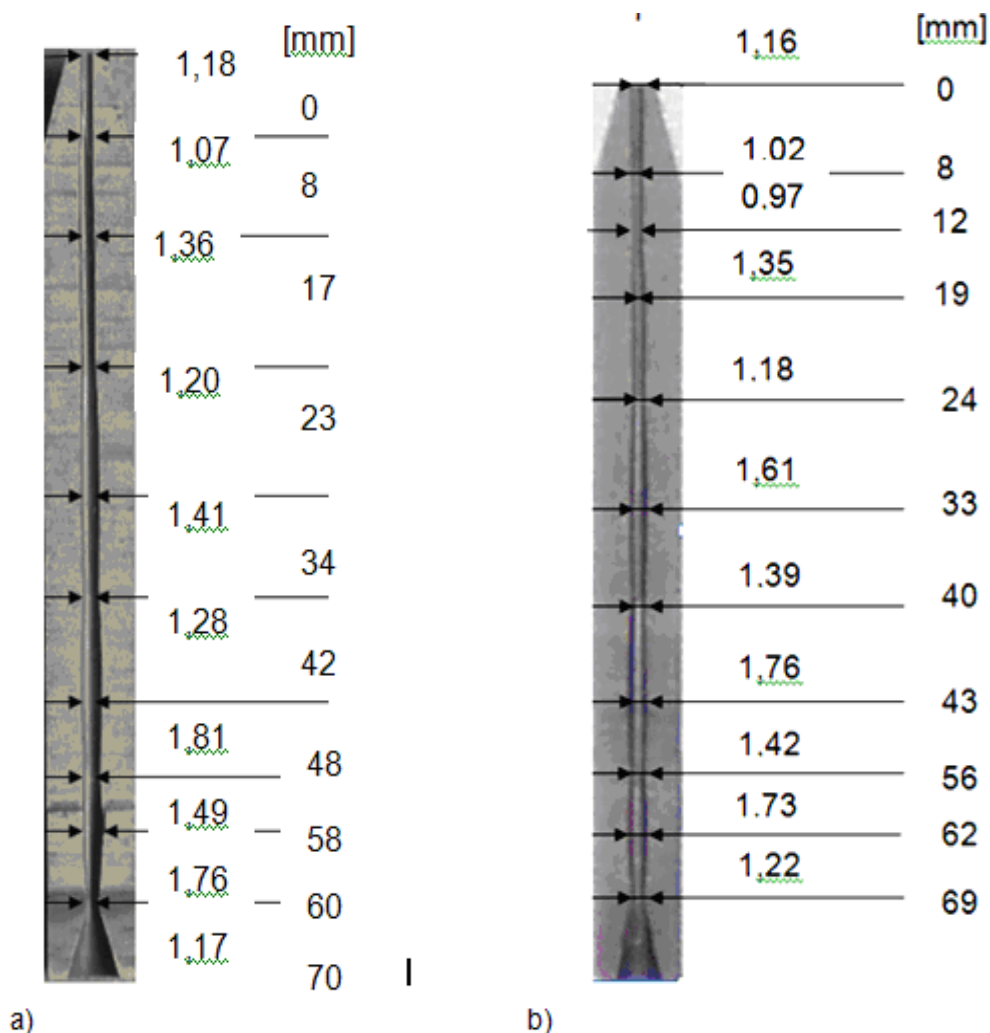


Figura 5.3.7 Uzura suprafețelor interioare ale celor două tuburi:

a) nemodificat, folosit 108 de ore; b) modificat, folosit 159 de ore

Tuburile de focalizare utilizate pentru experimentări a avut dimensiunile 6,35 x 0,76 x 76,2 mm în starea de livrare. Parametrii regimului de prelucrare au fost menținuți



neschimbați.

Analiza de detaliu evidențiază diferențe ale configurației ventrelor dinspre partea cu conul de intrare pentru granule abrazive, pe lungimea orificiului tubului de focalizare, spre partea de ieșire a jetului de fluid.

Un tub de focalizare nou cu dimensiunile: 6,35 x 0,76 x 76,2 mm, nemodificat inițial pe orificiul de trecere a fluidului, este utilizat pe utilajul de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv în condiții normale, în jur de 110-120 de ore. După aceasta, datorită perturbării aspectului jetului de fluid și a eficienței prelucrării, trebuie înlocuit datorită uzurii. La tubul de focalizare la care a fost modificată inițial configurația orificiului de trecere a fluidului s-a constatat o stare de degradare similară cazului anterior, dar după 159 de ore de utilizare. Această constatare evidențiază un spor al duratei de utilizare de cca. 33 %.

Costurile variabile totale pe unitatea de timp ( 1 oră ) se prezintă în diagrama din figura 5.3.8 [126]. Se deosebesc două costuri majore, cel cu materialul abraziv, respectiv cel cu componentele considerate consumabile. După camera de amestec, costurile cu tubul de focalizare au o influență majoră asupra costului prelucrării. Prețul unui asemenea tub de focalizare la ora actuală fiind de cca. 100 EUR. Este evident că sporul privind capacitatea de utilizare de cca. 33% a timpului de utilizare influențează semnificativ și costul final al prelucrării

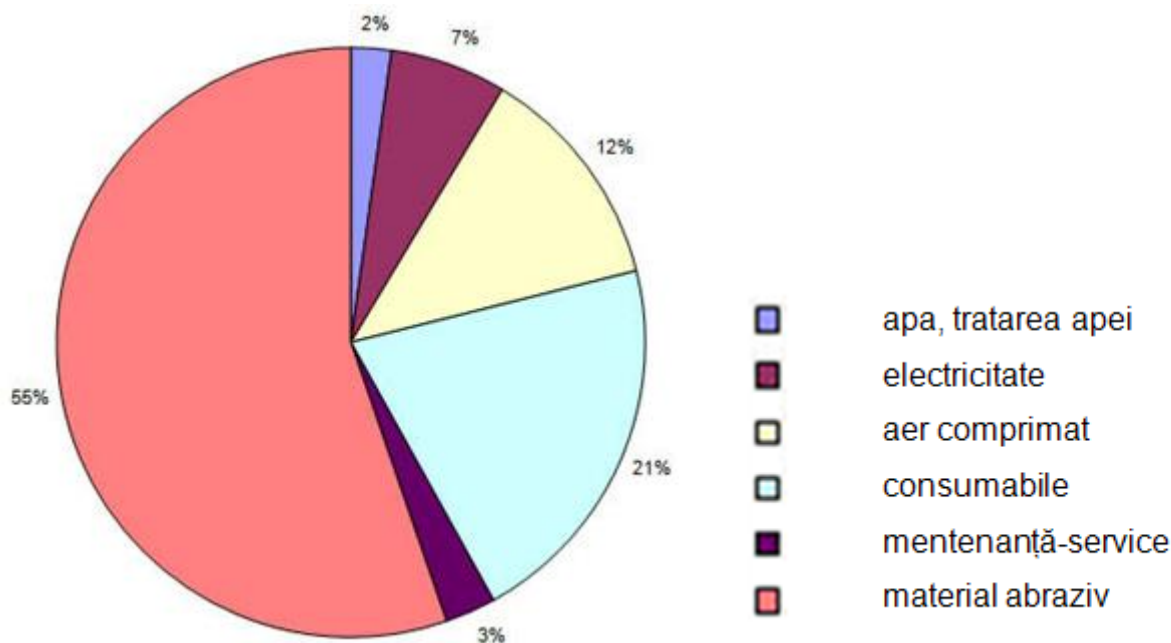


Figura 5.3.8. Costurile variabile



Daca se iau în calcul și costurile fixe împreună cu cele variabile ponderea costurilor devine conform diagramei din figura 5.3.9 [126].

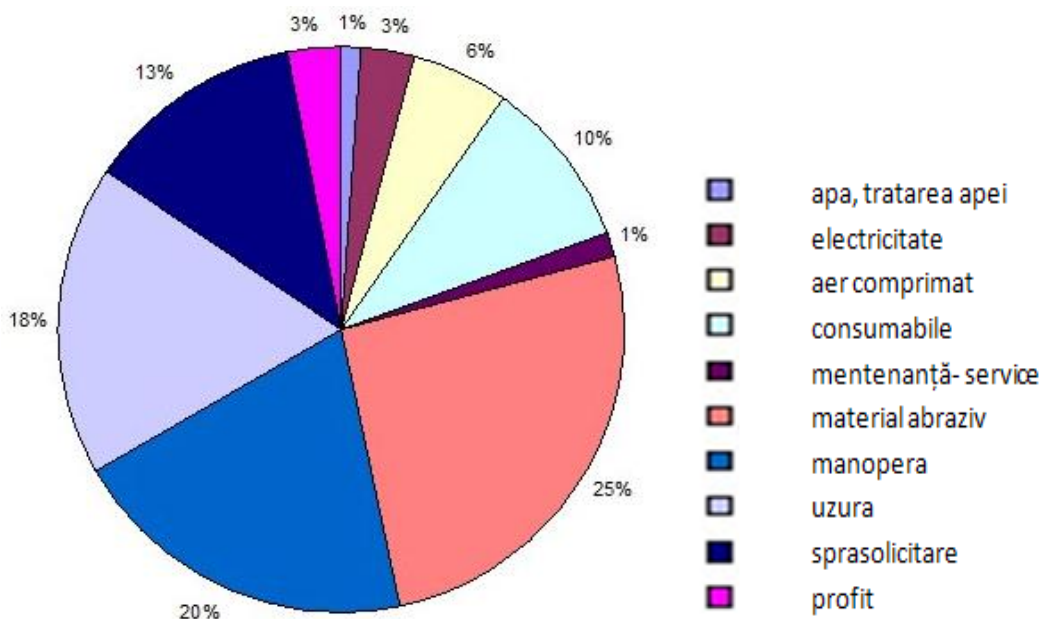


Figura 5.3.9. Costuri fixe și variabile

Dintre elementele considerate consumabile, duzele de apă au durata de viață cea mai scurtă, uzura acestora influențând drastic și durata de funcționare a tubului de focalizare. Costul unei duze de apă uzuale fiind de cca. 8 EUR este de preferat ca aceasta să fie schimbată la timp pentru a nu cauza distrugerii semnificative ale tubului de focalizare dar și ale camerei de amestec. Deoarece camera de amestec are prețul de cost cel mai ridicat (cca. 300 EUR) dintre toate elementele considerate consumabile, deteriorarea acesteia duce evident la creșterea considerabilă a costurilor procesului de prelucrare.

Pentru o procesare cât mai eficientă și în condiții de siguranță este de preferat a se respecta recomandările producătorilor de instalații de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv referitor la înlocuirea la timp a părților considerate consumabile.

Așadar, dintre elementele considerate consumabile, ponderea cea mai mare în prețul de cost final al prelucrării este reprezentată de prețul de cost al camerei de amestec urmată de cel al tubului de focalizare. Urmează duzele de apă și garniturile de etanșare din cilindrii de apă/ulei care au prețul de cost destul de mic și nu afectează semnificativ costul final al prelucrării. Considerând datele mai sus menționate și având în vedere prețul de achiziție al unui tub de focalizare nou neprelucrat de cca. 100 EUR

care trebuie înlocuit după 110-120 ore în cazul optim. Uzual, pentru a asigura precizia prelucrării pieselor, la tipul de instalație de prelucrare cu jet de apă cu abraziv la care au fost efectuate experimentările, tubul de focalizare se înlocuiește după cca. 100-110 ore. Se poate deduce costul datorat degradării tubului de focalizare utilizat în starea inițială de achiziție, de cca. 1 EURO/oră. În cazul folosirii unui tub de focalizare prelucrat în prealabil pe orificiul de circulație a fluidului, se deduce o reducere a costului cu cca. 30%.

## Capitolul 6

### Comparația tehnico-economică dintre prelucrarea cu jet de fluid cu abraziv și alte procese de prelucrare

Procedeul de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv este eficient din punct de vedere economic în cazul prelucrării anumitor materiale de grosimi mai mari ( ex:  $h > 300$  mm la oțel ) promițând o precizie foarte bună și nu necesită prelucrări ulterioare de finisare [77], [78].

Comparativ cu tehnologia de prelucrare cu laser care prezintă o serie de avantaje precum viteza mare de prelucrare, lățime redusă a faliei, zgomot redus în timpul prelucrării, productivitate ridicată dar toate acestea pentru grosimi mici ( $< 10$  mm) ale materialelor prelucrate și exceptând materialele reflectorizante, tehnologia de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv permite procesarea tuturor tipurilor de materiale (cu mici excepții) având și grosimi semnificative ( $>300$  mm). Proces de natură mecanică, prelucrarea cu jet de fluid cu abraziv permite procesarea materialelor fără alterarea termică (ZIT) a acestora iar tensiunile introduse în timpul prelucrării fiind practic ne semnificative.

Unele caracteristici de material, foarte importante la prelucrarea cu laser precum gradul de reflectorizare, conductivitatea termică și punctul de topire nu intră în discuție la prelucrarea cu jet de fluid cu abraziv. În schimb tehnologia de prelucrare cu laser fiind de natură termică este mai poluantă (se degajă fum și praf în urma arderii materialului) dar mult mai silențioasă decât cea de prelucrare cu jet de fluid.

Productivitatea acesteia din urmă crește considerabil prin folosirea instalațiilor de prelucrare (figura 6.1) cu două sau mai multe capete de prelucrare (de exemplu 4) pe când la tehnologia laser acest lucru mărește costurile prelucrării, viteza de prelucrare fiind strict dependentă de puterea razei laser.



Figura 6.1 Utilaj de prelucrare cu patru capete [90]

Ambele tehnologii fiind complet automatizate permit obținerea pieselor cu o configurație foarte complexă și o productivitate ridicată. Din punct de vedere al mentenanței, mai avantajos este cel de prelucrare cu jet datorită modului simplu de înlocuire al elementelor consumabile (duze de apă, tuburi de focalizare, garnituri de etanșare, site de abraziv, etc.) care poate fi realizată chiar și de către operatorul care deservește instalația respectivă într-un timp relativ scurt. În schimb la tehnologia cu rază laser operațiunile de înlocuire sau curățire ale unor elemente precum oglinzi, lentile, duze și refacerea traseului optic necesită un timp mai îndelungat și personal specializat.

Toate aceste aspecte trebuie atent analizate înainte de a decide pentru care din cele două tehnologii se va opta [ 47 ], [ 77 ], [ 78 ], [ 79 ], [ 80 ], [ 84 ].

În acest sens în diagramele 6.3.1 și 6.3.2 se prezintă două exemple de analiză în punct de vedere economic al prelucrărilor cu laser, respectiv cu jet de fluid cu abraziv.

În diagrama 6.3.1. este prezentată variația costurilor de prelucrare pe metru liniar exprimate în moneda unică europeană, a unui oțel inoxidabil cu grosimea de 15 mm la prelucrarea pe utilaje cu jet de fluid cu abraziv de diferite dimensiuni ale mesei de lucru și diferite puteri comparativ cu prelucrarea cu fascicul laser pe utilaje având diferite dimensiuni și puteri ale sursei.

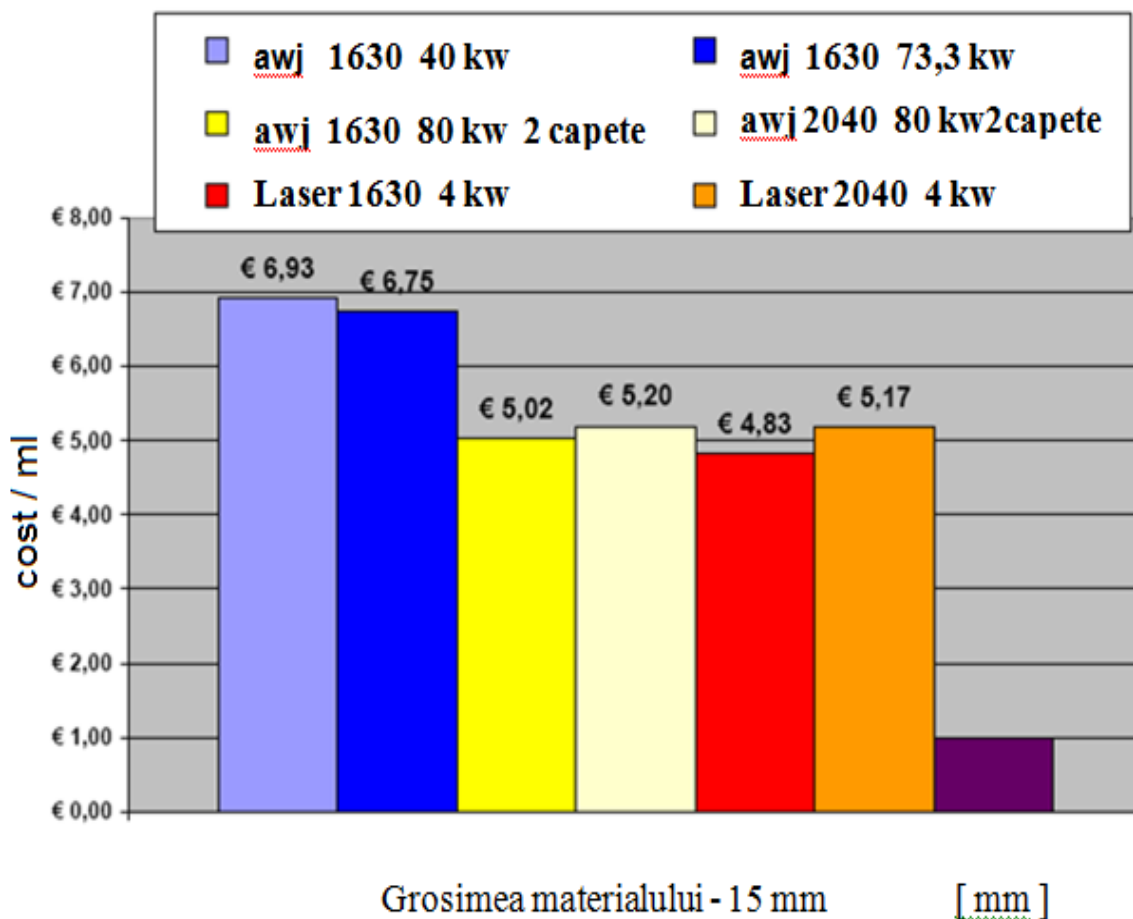


Diagrama 6.3.1. Costuri pe ml la prelucrarea cu laser / jet de fluid cu abraziv pentru oțel inoxidabil cu grosimea de 15 mm [7]

Astfel se poate vedea că tehnologia de prelucrare cu laser este ușor mai rentabilă față de tehnologia de prelucrare cu jet pentru acest tip și grosime de material, diferența fiind de ordinul a câțiva eurocenți.

Este important de menționat aici că aceste costuri de prelucrare depind atât de complexitatea geometriei dar și a calității profilului produsului finit care urmează a fi obținut prin prelucrare folosind cele două tehnologii.

Pe lângă mai multe avantaje pe care le-am menționat, un dezavantaj comun îl reprezintă prețul de achiziție destul de ridicat al celor două tehnologii.

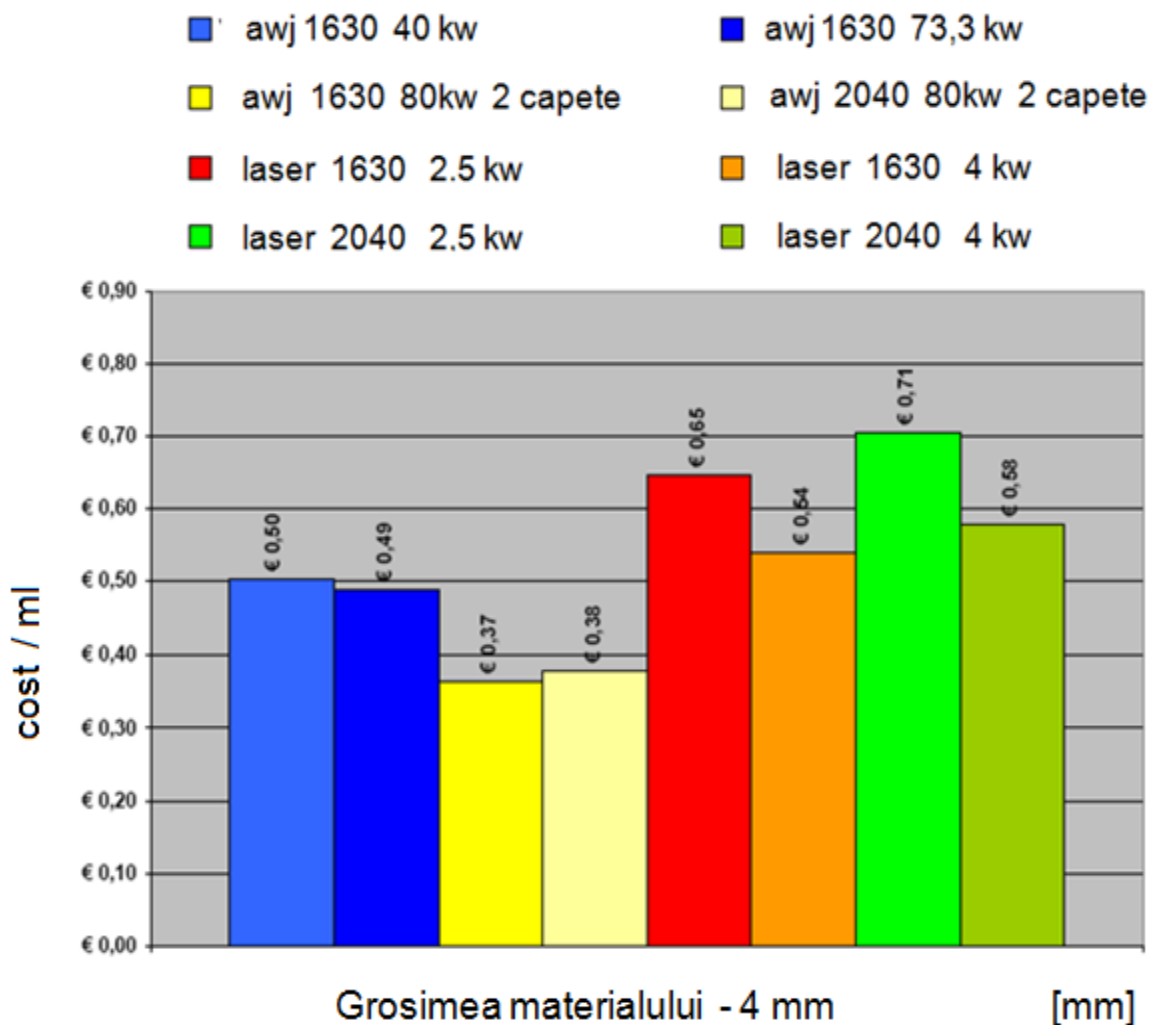


Diagrama 6.3.2 Costuri pe ml la prelucrarea cu laser / jet de fluid cu abraziv pentru aluminiu cu grosimea de 4 mm [7]

În schimb la prelucrarea aluminiului cu ajutorul celor două tehnologii (diagrama 6.3.2) se observă că mai rentabilă este prelucrarea cu jet de fluid cu abraziv. Chiar dacă grosimea materialului prelucrat este relativ mică (4 mm) este evident avantajul din punct de vedere economic al tehnologiei de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv.

Este important de menționat că la prelucrarea cu jet de fluid cu abraziv indiferent de grosimea materialului procesat nu apare zona influențată termic și ca urmare nu este nevoie de prelucrări secundare de finisare care ar mării costul de prelucrare final.

Ca urmare a forțelor mici exercitate de jet asupra materialului prelucrat (cca. 100 N) rezultă și tensiuni reduse induse în timpul prelucrării ceea ce conferă pieselor obținute calități superioare în exploatare.

La prelucrarea materialelor cu grosimi mari la viteze de prelucrare mari cu jet de

apă cu abraziv apar în partea de ieșire a jetului anumite striții pe suprafața prelucrată. Acestea se datorează distribuției ondulatorii (sub formă de undă) a energiei cinetice a particulelor de abraziv [26]. Aceste particule de abraziv au la intrare în material energia mult mai mare decât energia minimă necesară pentru ca procesul de erodare să aibă loc (energia minimă de prag).

Pe măsura înaintării acestora în materiale de grosimi mari (depinde de natura materialului) supus prelucrării, anumite particule pierd din energia lor inițială și continuă deplasarea după traiectoria celor care au reușit să străpungă materialul.

Cauzele producerii strițiilor respective pot fi de natura internă, adică această distribuție ondulatorie a energiei cinetice a jetului dar și de natură externă cum ar fi:

- a) fluctuații sau instabilitate a unor parametri ai procesului precum viteza de prelucrare, presiunea apei și debitul de abraziv,
- b) vibrații ale piesei prelucrate,
- c) vibrații din sistemului de ghidare și conducere al sistemului tehnic

Calitatea suprafețelor prelucrate cu jet de fluid cu abraziv poate fi îmbunătățită chiar și cu 30% dacă se folosește tehnica oscilațiilor controlate ale tubului de focalizare [22]. Aceste oscilații au loc pe direcția de deplasare a tubului de focalizare (înainte-înapoi) cu o frecvență și amplitudine stabilite.

În *tabelul 6.3.1* se prezintă aspecte de ordin tehnic, dar și economic caracteristice pentru prelucrarea cu jet de fluid cu abraziv comparativ cu prelucrarea cu fascicul laser a anumitor materiale cu grosimi frecvent întâlnite în practică.

Datele statistice prezentate în tabel oferă posibilitatea unei decizii orientative preliminare, operative, pentru alegerea uneia sau altei dintre cele două procedee de prelucrare și se referă la utilajele de prelucrare clasice.

În continuare se prezintă avantajele prelucrării cu jet de fluid cu abraziv comparativ cu avantajele prelucrării cu laser, eroziune electrică, plasmă, flacăra oxiacetilenică, respectiv prin frezare.



Universitatea "Politehnica" din Timișoara  
Facultatea de Mecanică

Tabelul 6.3.1. Evaluare orientativă preliminară: jet de fluid/laser.

Materialul	Grosimea [mm]	Prelucrare cu jet de fluid cu abraziv	Prelucrare cu fascicul laser CO <sub>2</sub>
Oțel nealiat	5	ieftin	foarte ieftin
	10	ieftin	foarte ieftin
	15	ieftin	ieftin
	20	egal	egal
	25	posibil	nu e posibil
Oțel aliat	5	ieftin	foarte ieftin
	10	ieftin	ieftin
	15	egal	egal
	20	posibil	nu e posibil
Aluminiu	1	ieftin	ieftin
	2	foarte ieftin	ieftin
	4	foarte ieftin	ieftin
	10	posibil și avantajos	nu e posibil
	20	posibil și avantajos	nu e posibil
Titan	1	egal	egal
	2	egal	egal
	4	ieftin	ieftin
	10	posibil și avantajos	nu e posibil
Alamă	2	foarte ieftin	ieftin
	5	foarte ieftin	ieftin
	10	posibil și avantajos	nu e posibil

În *tabelul 6.3.2.* se prezintă avantajele prelucrării cu laser respectiv cu jet de fluid cu abraziv.

Tabelul 6.3.2. Avantajele prelucrării cu laser vs prelucrarea cu jet de fluid cu abraziv.

Avantajele prelucrării cu laser	Avantajele prelucrării cu jet de fluid cu abraziv
<ul style="list-style-type: none"> <li>- posibilitatea obținerii pieselor cu o configurație complexă, precizie foarte bună și lățime extrem de mică a faliei</li> <li>- viteză mare de prelucrare, productivitate ridicată pentru grosimi mici (&lt;10 mm)</li> <li>- procedeu noncontact</li> <li>- poluare fonică redusă</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- varietate foarte ridicată de materiale având grosimi considerabile și care pot fi procesate fără producerea de ZIT, fără tensiuni de natură termică / mecanică, cu configurații complexe ale suprafețelor obținute, respectând norme de poluare a mediului (fără foc deschis, noxe, praf, radiații)</li> <li>- posibilitatea prelucrării materialelor reflectorizante și ușor inflamabile</li> <li>- posibilitatea prelucrării materialelor cu grosime variabilă</li> <li>- obținerea unor suprafețe netede și uniforme cu toleranță foarte bună ( 0,08-0,1 mm)</li> <li>- posibilitatea realizării filetelor și canalelor</li> <li>- exploatare ușoară și mentenanță simplă</li> <li>- investiție inițială de achiziție mult mai redusă</li> </ul>

În *tabelul 6.3.3.* se prezintă avantajele tehnologiilor de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv și prin eroziune electrică.

Tabelul 6.3.3. Avantajele prelucrării prin eroziune electrică vs prelucrarea cu jet de fluid cu abraziv

Avantajele prelucrării prin eroziune electrică	Avantajele prelucrării cu jet de fluid cu abraziv
<ul style="list-style-type: none"><li>- precizie foarte ridicată a prelucrării (cca. 0,025 mm)</li><li>- posibilitatea procesării materialelor cu grosimi considerabile ( &gt; 300 mm )</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- prelucrarea materialelor cu grosimi sub 25 mm cu viteze de 5-10 ori mai mari, dar cu toleranțe ceva mai mari (cca. 0,075 mm)</li><li>- prelucrare fără ZIT</li><li>- prelucrare foarte bună a materialelor fara conductivitate electrică (sticla, rocile, materiale plastice)</li><li>- posibilitatea prelucrării materialelor cu grosime variabilă</li><li>- posibilitatea efectuării găuririi direct fără pregăurire</li><li>- setare mai comodă a utilajului</li><li>- posibilitatea obținerii pieselor de dimensiuni mari la un cost scăzut</li></ul>

În tabelul 6.3.4. se prezintă avantajele tehnologiilor de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv și plasmă.

*Tabelul 6.3.4. Avantajele prelucrării cu plasmă vs. prelucrarea cu jet de fluid cu abraziv*

Avantajele prelucrării cu plasmă	Avantajele prelucrării cu jet de fluid cu abraziv
<ul style="list-style-type: none"> <li>- productivitate ridicată pentru grosimi mici de material</li> <li>- investiție mai redusă de achiziție</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- prelucrare fără ZIT și deci fără formare de zgură;</li> <li>- posibilitatea procesării unei varietăți mari de tipuri și grosimi de materiale;</li> <li>- posibilitatea procesării materialelor care se topesc greu (granit) sau pot fi alterate prin topire;</li> <li>- precizie mai bună la prelucrarea pieselor cu forme complexe;</li> <li>- finisare mai bună a muchiilor;</li> <li>- prelucrarea materialelor ușor inflamabile;</li> <li>- tehnologie net superioară din punct de vedere al protecției mediului ambiant.</li> </ul>

În tabelul 6.3.5. se prezintă avantajele tehnologiilor de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv și cea cu flacăra oxiacetilenică.

*Tabelul 6.3.5. Avantajele prelucrării cu flacăra oxiacetilenică vs. prelucrarea cu jet de fluid cu abraziv.*

Avantajele prelucrării cu flacăra oxiacetilenică	Avantajele prelucrării cu jet de fluid cu abraziv
<ul style="list-style-type: none"> <li>- investiție mai redusă de achiziție</li> <li>- procedeu mai ieftin</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- prelucrare fără ZIT și deci fără formare de zgură;</li> <li>- posibilitatea procesării unei varietăți mari de tipuri și grosimi de materiale;</li> <li>- posibilitatea procesării materialelor care se topesc greu (granit) sau pot fi alterate prin topire;</li> <li>- precizie net superioară;</li> <li>- finisare mai bună a muchiilor;</li> <li>- prelucrarea materialelor ușor inflamabile;</li> <li>- tehnologie net superioară din punct de vedere al protecției mediului ambiant.</li> </ul>

În *tabelul 6.3.6.* se prezintă avantajele tehnologiilor de prelucrare cu jet de fluid cu abraziv și cea prin frezare.

*Tabelul 6.3.6.* Avantajele prelucrării prin frezare vs. prelucrarea cu jet de fluid cu abraziv.

Avantajele prelucrării prin frezare	Avantajele prelucrării cu jet de fluid cu abraziv
<ul style="list-style-type: none"><li>- investiție mai redusă de achiziție</li><li>- procedeu mai ieftin</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- prelucrare fără ZIT;</li><li>- curățirea mult mai rapidă a materialului;</li><li>- programarea utilajului mai ușoară și mai rapidă;</li><li>- prelucrarea mai bună a materialelor casante, fragile;</li><li>- posibilitatea prelucrării materialelor cu duritate ridicată, oțeluri aliate, titan, inconel, SS 304;</li></ul>

Jeturile de apă se folosesc chiar și la prelucrarea materialelor prin frezare pentru obținerea performanțelor superioare.

Doar analizând atent toate aceste aspecte, atât din punct de vedere al avantajelor cât și cel al dezavantajelor se poate lua o decizie în vederea alegerii tehnologiei de prelucrare adecvate atât din punct de vedere tehnic dar și din cel economic.

## Capitolul 7

### Concluzii generale și contribuții personale

Prin parcurgerea și analizarea materialului prezentat sunt aduse argumente și dovezi convingătoare privind atingerea obiectivelor inițiale. În acest sens sunt de reținut:

#### 7.1. Concluzii generale

- a. Sinteza documentară asupra fenomenelor fizice și mecanice la interacțiunea jetului de fluid de mare presiune și viteză cu materialele procesate.
- b. Studiarea teoretică a fenomenelor fizice și mecanice fundamentale la interacțiunea dintre jeturile de fluide de mare presiune și viteză cu materialele procesate.
- c. Evidențierea caracteristicilor de prelucrabilitate prin mijloace mecanice vs. jet de fluid cu abraziv a unor materiale tehnice.
- d. Evidențierea efectelor induse în masa materialelor procesate de mai multe procedee tehnice consacrate, respectiv avansate.
- e. Analiza factorilor de influență în condițiile interacțiunii jet de fluid omogen, respectiv eterogen și ierarhizarea lor pentru cazuri efective de prelucrare a materialelor.
- f. Studiarea fenomenelor aferente circulației cu presiuni și viteze ridicate a fluidelor omogene și eterogene prin orificii reduse.
- g. Identificarea factorilor de influență asupra duratei de viață a unor componente și definirea de soluții tehnice.

h. Identificarea soluțiilor tehnice pentru atingerea parametrilor optimi diferențiați de către sistemele tehnice utilizabile la tăierea materialelor cu jeturi de fluide.

i. Elaborarea modelului matematic adecvat prelucrărilor de tăiere a materialelor tehnice.

## 7.2. Contribuții personale

a. Conceperea unui program experimental concludent pentru cercetarea fenomenelor fizice și mecanice la interacțiunea dintre jeturile de fluide de mare presiune și viteză cu materialele procesate.

b. Fundamentarea unor relații matematice de corelație între variația factorilor de influență și dimensiunile tăieturii obținute la prelucrarea materialelor studiate.

c. Prelucrarea efectivă a două materiale biocompatibile, greu prelucrabile cu mai multe pachete de parametri tehnologici, în cadrul a patru programe experimentale distincte.

d. Cercetarea efectelor induse de parametrii regimurilor de prelucrare asupra materialelor procesate în mod diferențiat: aliajul titanului TiAl6V4, respectiv oxidul de aluminiu  $Al_2O_3$ .

e. Aplicarea programelor de evaluare prin metoda experimentelor factoriale complete de ordinul I, cu doi factori de influență, pentru pachetele de parametri tehnologici utilizați.

f. Evidențierea matematică a influenței factorilor tehnologici de prelucrare și ierarhizarea contribuțiilor acestora în procesul de tăiere a materialelor.

g. Elaborarea de soluții optimizate pentru tehnologii de tăiere a materialelor cu prelucrabilitate dificilă: alumina, respectiv aliajul TiAl6V4.

h. Realizarea unui nou model de suprafață în zona de intrare a jetului în tubul de focalizare care a condus la creșterea duratei de funcționare cu cca. 30 % față de tipurile consacrate, normalizate.

i. Propunerea unui proiect spre expertizare de către OSIM în vederea brevetării soluției tehnice legate de sporirea duratei de viață a tubului de focalizare a instalației de



prelucrare cu jet de apă cu abraziv.

### **7.3 Cercetări viitoare**

În urma rezultatelor cercetărilor experimentale din prezenta teză în vederea creșterii timpului de funcționare a tubului de focalizare se pot continua cercetări în această direcție în vederea:

- dezvoltării unui model matematic pentru modelarea fenomenului de uzare a tuburilor de focalizare.

- extinderea aplicării metodologiei de cercetare experimentală folosind planurile de experimentare factoriale la studiul altor materiale.

- elaborarea de programe de cercetare prin metoda experimentelor factoriale complete de ordinul superior, cu implicarea mai multor factori de influență.

## BIBLIOGRAFIE

- [ 1 ] B. Petrovici: Referat Nr.1 Stadiul actual al prelucrării materialelor cu jet de fluid cu abraziv, Mai 2005.
- [ 2 ] R. Resiga: Teza de doctorat „ Studiul jeturilor de lichide de mare viteză ” Universitatea „Politehnica” din Timișoara, Facultatea de Mecanică, 1996
- [ 3 ] x x x About waterjets <http://www.waterjets.org/>
- [ 4 ] x x x NLB Literature <http://www.nlbcorp.com/accessories.asp>
- [ 5 ] x x x How Waterjet Cutting Works <http://www.flowcorp.com/waterjet-applications>.
- [ 6 ] B. Petrovici: Water jet cutting in the Food Industry, Proceedings of the International Conference, S.I.P.A 2005, Timsoara, ISBN: 973-638-225-7
- [ 7 ] x x x Despre jeturi de apă <http://www.flowcorp.com/about-flow.cfm/>
- [ 8 ] x x x About Abrasivejets <http://www.omax.com/>
- [ 9 ] x x x Wterjet technology <http://www.tecnocut.it/>
- [ 10 ] A. W. Momber, R. Kovacevic „ Principles of Abrasive Water Jet Machining”, Springer, 1998
- [ 11 ] \*\*\*: Official Journal of the European Union <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.douri= DD:05:02:31990L0269>

[ 12 ] x x x Legea protecției mediului [http://www.cdep.ro/pls/legis/legis\\_pck.htp\\_act\\_ida=6749](http://www.cdep.ro/pls/legis/legis_pck.htp_act_ida=6749)

[ 13 ] A. Nichici: Formarea profesională în inginerie ieri , azi, mâine, Editura Politehnica, Timișoara, 2004, ISBN: 973-625-198-5

[ 14 ] x x x Filtre apa prin osmoza inversa. <http://www.osmozainversa.ro/1900.php>

[ 15 ] x x x DSP products detail&product. <http://www.jetedge.com/content.cfm?fuseaction>

[ 16 ] x x x Procesul de osmoza inversă. <http://www.osmoza-inversa.ro/.php>

[ 17 ] Mihaela Nistoran-Botiș, B. Petrovici ș.a.: Water quality in processing by abrasive water jet, Revista de tehnologii neconvenționale, 3/ 2007, p. 78+80. ISSN-1454-3087

[ 18 ] x x x Water Jet Cutting & Water Jet Cleaning Applications [http://www.jetedge.com/content.cfm?fuseaction=dsp\\_applications](http://www.jetedge.com/content.cfm?fuseaction=dsp_applications)

[ 19 ] x x x Accessories bulk abrasive. <http://www.omax.com/.php>

[ 20 ] G. Vikram, N. Ramesh Babu: Modelling and analysis of abrasive water jet cut surface topography, Manufacturing Engineering Section, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Madras, Chennai, 600 036, India, 2002

[ 21 ] F.L. Chen, E. Siores: The effect of cutting jet variation on striation formation in abrasive water jet cutting, IRIS, Swinburne University of Technology, Melbourne, Australia, 2001

[ 22 ] F.L. Chen , E. Siores, K. Patel: Improving the cut surface qualities using different controlled nozzle oscillation techniques, Industrial Research Institute Swinburne, Swinburne University of Technology, PO Box 218, Melbourne, VIC 3122, Australia, 2001

- [ 23 ] B. Petrovici, T. Fleșer: The quality of the surface obtained by cutting with the abrasive water jet of the semi-manufactured from TiAl6V4, Accepted paper
- [ 24 ] S.P. Raju, M. Ramulu: Predicting hydro-abrasive erosive wear during abrasive water jet cutting, PED-Vol. 68-1, Manuf. Sci. Eng., ASME 1(1994) 339–351.
- [ 25 ] J. Zeng, T.J. Kim: Development of abrasive water jet kerf cutting model for brittle materials, in: Proceedings of 10th International Conference on Jet cutting Technology, Amsterdam, 1992, pp.115–133.
- [ 26 ] J. Chao, E.S. Geskin: Experimental study of the striation formation and spectral analysis of the abrasive water jet generated surfaces, in: Proceedings of the 7th American Water Jet Conference, 1993, pp. 27–41.
- [ 27 ] x x x Abrasive Engineering Society <http://www.abrasiveengineering.com/>
- [ 28 ] M. Hashish, S. Craigen: Apparatus for Piercing Brittle Materials with High Velocity Abrasive-Laden Waterjets, US Patent 4, 934, 111, 1990
- [ 29 ] M. Nanduri, D.G. Taggart, T.J. Kim, E. Ness, E. Risk: Effect of Offset Bores on the Performance and Life of Abrasive Waterjet Mixing Tubes, Proceedings of the 8th American Water Jet Conference, 1995
- [ 30 ] M. Hashish: Optimisation factors in abrasive waterjet machining, journal of Engineering for manufacturing 113, 1991
- [ 31 ] M. Hashish: Waterjet Machine Tool of the Future, 9-th American Waterjet Conference, 1997
- [ 32 ] Z. Li ș.a: Improvement of water particles mixing in the course of abrasive waterjet formation, P.E.D. Vol. 68-1, 1994
- [ 33 ] Galecki, M. Mazurkiewicz: Hydroabrasive Cutting Head – Energy Transfer Efficiency. In: Dornfeld, D., Hood, M. (eds) 1987 Proceedings 4th US Water Jet

Conference, ASME, New York, pp. 109-111, 1987

[ 34 ] M. Mazurkiewicz, L. Fincuan, R. Ferguson: Investigation of Abrasive Cutting Head Internal Parameters. In: Woods, P.A. (ed) Proceedings 9th International symposium Jet Cutting Technology, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, pp 75-84, 1988.

[ 35 ] H. Blickwedel, N.S. Guo, H. Halferkamp, H. Louis: Prediction of abrasive jet cutting performance and quality, in: Proceedings of the Ninth International Symposium on Jet Cutting Technology, UK, 1991, pp. 164–179

[ 36 ] H. Blickwedel: Erzeugung und Wirkung von Hochdruck-Abrasivstrahlen, Verein Deutscher Ingenieure - 1990 - VDI Verlag,

[ 37 ] U Himmelreich, W Riess: Hydrodynamic Investigations on Abrasive-Waterjet Cutting Tools, Proc. 10th Int. Conf. on Jet Cutting Tech., 3-22, Elsevier, 1992

[ 38 ] G. Galecki, D. Summers: Steel shot entrained ultra high pressure waterjet for cutting and drilling in hard rocks, rockmech.mst.edu University of Missouri-Rolla, High Pressure Waterjet Laboratory, Rolla, Missouri 6540, 1992

[ 39 ] B. Petrovici, T. Fleșer, M. Ghiță ș.a.: Considerations about material remaining biocompatible with abrasive waterjet. Revista de tehnologii neconvenționale, 3/ 2007, p. 78+80. ISSN-1454-3087

[ 40 ] B. Petrovici, T. Fleșer, ș.a.: Considerații asupra prelucrării cu jet de apă cu abraziv în suspensie a aliajelor pe bază de titan, Revista de tehnologii neconvenționale, 3/ 2007, p. 78-80. ISSN-1454-3087

[ 41 ] N.S Guo, H. Louis, G. Meier, et .al.: Abrasive water jet cutting methods to calculate cutting performance and cutting efficiency, Geomechanics 93, pp 291-299,1994

[ 42 ] S.P. Raju, M. Ramulu: Predicting hydro-abrasive erosive wear during abrasive water jet cutting, PED-Vol. 68-1, Manuf. Sci. Eng., ASME 1(1994) 339–351.

- [ 43 ] C. Ciupan, D. Julean, A. Pop: Analytical Model of Abrasive Water Jet Cutting Process. 5th International Conference "TCMR - 2002", Iasi, 23-25 may.
- [ 44 ] M. Hashish: Material properties in abrasive-water jet machining. Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 117, ,pp.578-583, 1995
- [ 45 ] B. Jurisević, D. Brissaud, M. Junkar: Monitoring of abrasive water jet (AWJ) cutting using sound detection, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 24, Numbers 9-10, November 2004 , pp. 733-737(5)
- [ 46 ] M. Dreucean: Modelarea: proiectarea și realizarea practică a unui sistem de implanturi medicale destinat chirurgiei maxilo-faciale și ortopedice, Universitatea POLITEHNICA din Timisoara
- [ 47 ] P. Bârsănescu, O. Ciobanu,: Rezistența Materialelor, Vol.1; Editura"Gh. Asachi"; Iași, 2001
- [ 48 ] M. V. Popa, E. Vasilescu, P. Drob, D. Iordachescu, A. Cimpean, D. Ionita, C. Vasilescu: Characterisation of some implant materials in simulated biological fluids, Proceedings of "World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2006", Ed. Springer Berlin, ISBN 3-540-36839, paper 5013.
- [ 49 ] A. Momber and R. Kovacevic: Fracture of Brittle Multiphase Materials by High Energy Water Jets, the Journal of Materials Science, 1996, pp. 1081-1085.
- [ 50 ] J. Zeng, T.J. Kim: Development of abrasive water jet kerf cutting model for brittle materials, in: Proceedings of 10th International Conference on Jet cutting Technology, Amsterdam, 1992, pp.115–133.
- [ 51 ] P.H. Shipway , G. Fowler and I.R Pashby: Journal of material processing, Volume 159, Issue 3, 10 February, 2005, Pages 356-368
- [ 52 ] G. Fowler, P.H. Shipway and I.R.Pashby: Journal of material processing, Volume 258, Issue 3, 2005, Pages 123-132

- [ 53 ] D. Batalu: Materiale biocompatibile utilizate pentru realizarea implanturilor Curs-Proiectarea implanturilor, 2007
- [ 54 ] E.F. Cicală: Metoda experimentelor factoriale, Editura Politehnica Timișoara, 2005
- [ 55 ] K. Yanaida: Flow characteristics of Water Jets. In: Coles, N.G., Barrall, J.S. (eds.) 1974 Proceedings 2nd International Symposium of Jet Cutting Technology, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, pp. A2/19-A2/32, 1974.
- [ 56 ] D. S. Shavlovsky: Hydrodynamics of High Pressure Fine Continuous Jets. In : Brock, T.E., Richardson, A. (eds.) 1972 Proceedings of the 1st International Symposium of Jet Cutting Technology, BHRA Fluid Engineering , Cranfield, pp.A6-A81, 1972.
- [ 57 ] R. A. Tikhomirov, V. B. Babanin, E. N. Pethukov, et al.: High-Pressure Jetcutting. ASME Press, New York,1992.
- [ 58 ] G. P. Nikonov, I. A. Kuzmich, and Yu. A. Goldin: Breakup of Rock by High-Pressure Jets [in Russian], Nedra, Moscow,1986.
- [ 59 ] K. F. Neusen, T. J. Gores, and R. S. Amano: Axial Variation of Particle and Drop Velocities Downstream From an Abrasive Water Jet Mixing Tube, 12th International Symposium on Jet Cutting Technology, pp93-103, 1994.
- [ 60 ] C. Whiting, E.E. Graham and B. Ghorashi: Evaluation of Parameters in a Fluid Cutting Equation, Trans. ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 112, pp. 240-244, August 1990.
- [ 61 ] M. Nakaya, T. Kitagawa and S. Satake: Concrete cutting with abrasive waterjet, 7th International Symposium on Jet Cutting Technology, Ottawa, 1984
- [ 62 ] M. Hashish: Pressure effects in abrasive waterjet machining, J. Eng. Mater. Technol. 111 (1989) 221–228.



- [ 63 ] M. Hashish: Prediction models for AWJ machining operations, in: Proceedings of the 7th American Water Jet Conference, 1993, pp. 205–216.
- [ 64 ] M. Hashish: On the modelling of surface waviness produced by abrasive water jets, in: 11th Symposium on Jet Cutting Technology, Netherlands, 1992, pp. 17–34.
- [ 65 ] M. Hashish: Pressure effects in abrasive waterjet machining, Journal of Engineering Materials and Technology 111 ,1989, 221–228
- [ 66 ] M. Hashish: A modeling study of metal cutting with abrasive-waterjets. ASME Journal of Engineering Material and Technology, 1984, 106, 88-100.
- [ 67 ] R. Kovacevic, H. E. Beardsley: "Nozzle Wear Sensing in Turning Operation with Abrasive Waterjets," Proceedings of the SME's Nontraditional Machining, 1989
- [ 68 ] R. Kovacevic and H.E. Beardsley: High-Speed Water Jet as A Coolant/Lubricant in Grinding, Abrasive Magazine, June/July 1997.
- [ 69 ] R. Mohan, and R. Kovacevic: A Review of Abrasive Waterjet Nozzle Wear Monitoring Techniques, International Conference on Agile Manufacturing, Lafayette, LA, Feb. 23-25,1997.
- [ 70 ] J.F. Bell, PS Rogers: Laboratory scale erosion testing of a wear resistant glass-ceramic, Materials Science and Technology, 1987
- [ 71 ] D.F. Wang, J.H. She, Z.M. Ma: Effect of microstructure on erosive wear behaviour of SiC ceramics. Wear 180:35-41, 1995
- [ 72 ] I.Chen, E. Siores and K. Wong: Kerf characteristics in abrasive waterjet cutting of ceramic materials, Tools manufacturing, Vol. 36, No. 11, 1996
- [73] xxx Boride Abrasive Flow Products [http://www.kennametal.com/images/pdf/products\\_services/advanced\\_materials/roctecbrochure8-30-06.pdf](http://www.kennametal.com/images/pdf/products_services/advanced_materials/roctecbrochure8-30-06.pdf)

- [ 74 ] xxx Waterjet Parts <http://www.accustream.com/products/category-151/category-157.html>
- [ 75 ] I. Bordeașu: Eroziunea cavitațională asupra materialelor utilizate în construcția mașinilor hidraulice și elicelor navale. Efecte de scară, Teză de doctorat, Timișoara, 1997
- [ 76 ] A.C. Walsshaw, D.A. Jobson: Mechanics of Fluids, Longmans, UK, 1990.
- [ 77 ] B. Petrovici, T. Fleșer, ș.a.: Considerații asupra prelucrării cu jet de apă cu abraziv a materialelor stratificate, Revista Sudura, Nr.5, 2008, ISSN1453-0384
- [ 78 ] B. Petrovici, T. Fleșer, ș.a.: Considerații asupra prelucrării cu jet de apă cu abraziv a materialelor stratificate suprapuse, Revista Sudura, Nr.2, 2009, ISSN1453-0384.
- [ 79 ] A.W. Momber: Water Jet Applications in Construction Engineering, Balkema, Rotterdam, 1998.
- [ 80 ] D. Arola, M. Ramulu: Mechanism of material removal in abrasive water jet machining of common aerospace materials, in: Proceedings of the 7th American Water Jet Conference, 1993, pp. 43–64.
- [ 81 ] D. Margoli: Improvements to abrasive waterjet systems are increasing their use <http://www.cuttingtoolengineering.com/pdf/2006/0605-Waterjet.pdf>
- [ 82 ] Ashraf I. Hassan, C. Chen, R. Kovacevic: On-line monitoring of depth of cut in AWJ cutting, Southern Methodist University, Department of Mechanical Engineering, Research Center for Advanced Manufacturing (RCAM), 1500 International Parkway, Suite 100, Richardson, TX 75081, USA, 2003
- [ 83 ] J. Wang: The effect of jet impact angle on the cutting performance in AWJ machining of alumina ceramics. Key Eng. Mat., 238/239, 2003
- [ 84 ] xxx A Metal Cutting Comparison: Waterjet vs. Laser <http://www.laico.com/>

downloads/ brochurecomparisonlvswj.pdf

[ 85 ] M. Hashish: Singulation of Electronic Packages With Abrasive Waterjets, Journal of Electronic Packaging, Volume 128, Issue 4, 479, 2006

[ 86 ] C. Braviere, Icon Machine Tool: Making Sense of Flexible Cutting Solutions: Laser and Waterjet <http://www.iconmachinetool.com/News/FlexibleCuttingSolutions.pdf>

[ 87 ] A Karpiński., E. Wantuch: AWJ Cutting of Glass Fibre Reinforced Composites, Quality Waterjet Newsletter 2006 [http:// www.qualjet.com/ Newsletter/Newsletter-111406.pdf](http://www.qualjet.com/Newsletter/Newsletter-111406.pdf)

[ 88 ] xxx Edge quality <http://www.waterjettingdirectory.com/articles/abrasivewaterjetcutting.htm>

[ 89 ] K. Ruusuvoori, K. Lahdenperä, M. Oksa, et.al.: Controlled removal of HVOF hard coatings by abrasive water jet, Proceedings of the 2005 International Thermal Spray Conference, Basel, Switzerland, pp. 1016-1020,2005.

[ 90 ] x x x Utilaj de prelucrare. [http://www.aero-mag.com/issues/april09/PDF/AM\\_Apr\\_09\\_Composites.pdf](http://www.aero-mag.com/issues/april09/PDF/AM_Apr_09_Composites.pdf)

[ 91 ] T. Fleser, Anghel Gabriela, B. Petrovici: Evaluarea calității structurilor metalice în viziunea ISO 9001-2000. Buletin AGIR, dec. 2003, nr. 4, p.48-53, ISSN 1224-7928

[ 92 ] xxx Standard de firmă <http://www.sidora.bizoo.ro/>

[ 93 ] xxx Enabling Tool for innovative glass applications <http://www.govforums.org/glass/documents/michigan.pdf>

[ 94 ] Y. Nakamura et al.: Applicability Examination and Evaluation of Reactor Dismantlement Technology in the Fugen Examination of Double Tubes Cutting by Abrasive Water Jet, Proceedings of 14th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE14), Miami, USA, ICONE14-89380, 2006.

- [ 95 ] X. H. Li, Y. Liao, X. Y. Lei et.al.: Numerical Controlled Water Cutter and its Applications in the Machining of Natural Rock Material, Key Engineering Materials Vol. 250 (2003) pp 274-280, online at <http://www.scientific.net>
- [ 96 ] J.Foldyna, Sitek, et. al.: Utilization of ultrasound to enhance high-speed water jet effects, Institute of Geonics, Academy of Sciences of the Czech Republic, Studentsk\_a 1768, Ostrava-Poruba 708 00, Czech Republic
- [ 97 ] J. Foldyna, L. Sitek: Methodology of evaluation of nozzles for high-speed water jet generation, in: Dunn, Meyer, Hood (Eds.), Proceedings of the 6th Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology, Sydney 2000, CMTE Australia, pp. 127–131, 2000.
- [ 98 ] J. Foldyna, L. Sitek, P. Jekl, D. Novakova: Measurement of force effects of modulated jet, in: Proceedings of the 39th International Conference Experimental Stress Analysis EAN 2001, CTU in Prague, pp. 63–68, 2001.
- [ 99 ] T. Susuzlu, A. M. Hoogstrate, B. Karpuschewski: Initial Research on the Ultra-High Pressure Waterjet up to 700 MPa. J. of Material Processing Technology, 149:30-36, 2004.
- [100] F.H. Trieb, J. Schedelmaier, M. Poelzl: Developments on Optimized Autofrettage of High Pressure Components for Waterjet Cutting Pumps, Proceedings of the 17th Int. Conf. on Jetting Technology, Mainz, Germany, 23-32, 2004.
- [101] Gh. Zecheru, Gh. Drăghici: Elemente de știința și ingineria materialelor, Editura Ilex, București, 2001
- [102] A. Nanu ș.a: Tratat de tehnologii neconvenționale. Prelucrarea prin eroziune cu fluide activate energetic, Vol., Editura Artpres, 2005
- [103] M. Vasilescu: Contribuții la prelucrarea materialelor cu jet de apă, Teza de doctorat, Timișoara, 1999

- [104] P. Jovanović: Correlation of cutting data by abrasive water jet, Annals of the Oradea University, Fascicle of Management and Technological Engineering, Volume VII (XVII), 2008.
- [105] A. Reviczky, T. Slavici, D. Gubencu: Controlul și comanda sistemelor tehnologice. Metode CAD/CAM, Editura Fundației Ioan Slavici, Timișoara, 2004
- [106] H. Louis, M. Mohamed, F. Pude: Cutting Mechanism and Cutting Efficiency for Water Pressures above 600 MPa, 2003 WJTA American Waterjet Conference, Houston, Texas, 2003.
- [107] B. Jurisević, K.C. Heiniger, A. Schuetz, M. Junkar: "Feasibilities of Abrasive Water Jet Multipass Cutting Technique," Proceedings of the 2003 WJTA American Waterjet Conference, Houston, Texas, 2003.
- [108] M. Agus, et.al.: "Multi-pass Abrasive Waterjet Cutting Strategy." Proceedings of the 16th International Conference on Water Jetting, p.p. 242-257, Aix-en Provence, France, 16-18, October 2002, BHR Group.
- [109] J. Wang, D. M. Guo: "The Cutting Performance in Multipass Abrasive Waterjet Machining of Industrial Ceramics." Journal of Material Processing Technology, 6546: 1-7, 2003
- [110] D. Wright, J. Wolgamott and G. Zink: "Waterjet Nozzle Material Types," Proceedings of the 2003 WJTA American Waterjet Conference
- [111] J. Olsen, J. Zeng, C. Olsen and B. Guglielmetti: Advanced Error Correction Methodology Applied to Abrasive Waterjet Cutting, Proceedings of the 2003 WJTA American Waterjet Conference, Houston, Texas, 2003.
- [112] Conner, M. Ramulu and M. Hashish: Abrasive Waterjet Machining of Aerospace Structural Sheet and Thin Plate Materials, Proceedings of the 2003 WJTA American Waterjet Conference, Houston, Texas, 2003.

[113] P.W. Johnson, A.J. Graettinger, C.H. Sewell: An Abrasive Suspension Waterjet for Drilling Small-Diameter Holes, Proceedings of the 2003 WJTA American Waterjet Conference, Houston, Texas, 2003.

[114] A.Henning, E. Westkämper: Modulation of Cutting Operation With Abrasive Waterjets, Proceedings of the 2003 WJTA American Waterjet Conference, Houston, Texas, 2003.

[115] A. Dorle, L. J. Tyler, D.A. Summers: Measurement of Particle Velocities in High Speed Waterjet Technology, Proceedings of the 2003 WJTA American Waterjet Conference, Houston, Texas, 2003.

[116] S. Kunaporn, M. Ramulu, M. Hashish: Mathematical Modeling of Ultra High Pressure Waterjet Peening, Proceedings of the 2003 WJTA American Waterjet Conference, Houston, Texas, 2003.

[117] A. Perec: Some Aspects of Hydroabrasive Suspensive Jet Cutting of Marble, Proceedings of the 2003 WJTA American Waterjet Conference, Houston, Texas, 2003.

[118] O. Petrenko, V. Samardzić, E.S. Geskin, et.al.: Investigation of the High-Speed Water Slugs, Proceedings of the 2003 WJTA American Waterjet Conference, Houston, Texas, 2003.

[119] M. Hashish: Inside AWJ Nozzles, 2003 WJTA American Waterjet Conference, Houston, Texas, 2003.

[121] D.S. Miller: Developments in Abrasive Waterjets for Micromachining, 2003 WJTA American Waterjet Conference, Houston, Texas, 2003.

[121] W. T. Hennies, C. L. V. José, F. R. Valenzuela Diaz, et.al.:Technological Characteristics of Garnets for Ultra-High Pressure Water Jets In: Material Science Forum Vols. 416-418 (2003) pp.41-46 © 2003 Trans Tech Publications, Switzerland.

[122] G. R. Martín Cortés, W. T Hennies, et. al.: Dimension Stone Cutting with AWJ

Methods Material Science Forum Vols. 498-499, pp.482-487 © 2005 Trans Tech Publications, Switzerland, 2005.

[123] J. Zeng, J. Olsen, C. Olsen, B. Guglielmetti: Taper-free abrasive waterjet cutting with a tilting head, 2005, Proceedings of the 2005 WJTA American Water Jet Conference, WJTA Houston, Texas 2005.

[124] D. Wright, J. Wolgamott, G. Zink: Safe Waterjet Cleaning Of Steel Process Lines, Proceedings of the 2005 WJTA American Water Jet Conference, WJTA Houston, Texas 2005.

[125] D. Wright, J. Wolgamott, G. Zink: A Comparison Of Tube Nozzle Performance, 2007 WJTA American Waterjet Conference, Houston, Texas, 2007.

[126] J. Day (Bystronic Inc.) : Increasing the Profitability of Waterjet Cutting, 2007 WJTA American Waterjet Conference, Houston, Texas, 2007.

[127] P. Roth, H. Looser, K.C. Heiniger, S. Bühler: Determination of abrasive particle velocity using laser-induced fluorescence and particle tracking methods in abrasive water jets, Proceedings of the 2005 WJTA American Water Jet Conference, WJTA Houston, Texas 2005.

[128] H. Orbanić, M. Junkar: Analysis of striation formation mechanism in abrasive water jet cutting, An International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear, 265, 2008, 821–830.

[129] L. Frenzel: What effect does waterjet cleaning have on the surface and surface preparation? 2007 American WJTA Conference and Expo, Houston, Texas, 2007.

[130] V. Madr, et al.: Analysis of flow inside the focusing tube of the abrasive water jet cutting head. American WJTA Conference, Houston, Texas, 2007.



**Anexa 1**

*Tabel 1.* Plan experimental 1. Alumina grosimea 10 mm

Tăietura	Parametrii		Lățimea de intrare [mm]				Lățimea de ieșire[mm]			
	Presiunea P [MPa]	Viteza de taiere v[mm/min]	cota 0	cota 5	cota 10	media	cota 0	cota 5	cota 10	media
1	320	5	0.8	0.78	0.75	0.77	0,59	0,37	0,45	0,47
2	380	5	0.8	0.78	0.79	0.79	0,36	0,27	0,35	0,32
3	320	35	0.62	0.61	0.68	0.63	0	0,40	0,42	0,27
4	380	35	0.61	0.60	0.62	0.61	0	0	0	0
5	350	20	0.66	0.65	0.65	0.65	1,47	1,17	0,84	1,16
6	350	20	0.75	0.74	0.69	0.72	0,47	0,52	0,89	0,62
7	350	20	0.69	0.67	0.65	0.67	0,56	0,32	0,42	0,43
8	350	2	1.55	0.54	0.55	0.88	0,46	0,91	0,77	0,71
9	350	37	0.65	0.44	0.56	0.55	0	0	0	0
10	310	20	0.67	0.58	0.61	0.62	0	0	0	0
11	390	20	0.63	0.63	0.61	0.62	0,49	0,43	0,47	0,46

*Tabel 2. Plan experimental 2. Alumina grosimea 10 mm*

Tăietura	Parametrii		Lățimea de intrare [mm]				Lățimea de ieșire[mm]			
	Presiunea P [MPa]	Viteza de taiere v[mm/min]	cota 0	cota 5	cota 10	media	cota 0	cota 5	cota 10	media
1	320	5	0.86	1.02	0.96	0.94	0,46	0,38	0,39	0,41
2	380	5	0.99	1.05	1.04	1.02	0,41	0,39	0,38	0,39
3	320	15	0.89	0.88	0.79	0.85	1,13	1,04	0,61	0,92
4	380	15	0.97	0.89	0.83	0.89	0,74	0,46	0,44	0,54
5	3500	10	0.89	0.91	0.94	0.91	0,86	0,61	0,42	0,63
6	350	10	0.88	0.92	0.91	0.90	0,61	0,70	0,39	0,56
7	350	10	0.92	0.89	0.93	0.91	0,65	0,91	0,48	0,68
8	350	2	1.12	1.00	0.96	1.02	0,77	0,55	0,44	0,58
9	350	17	1.09	0.90	0.87	0.95	0,43	0,43	0,35	0,40
10	310	10	0.85	1.02	0.84	0.90	1,01	1,01	0,63	0,88
11	390	10	0.85	1.03	1.05	0.97	0,41	0,45	0,41	0,42

Universitatea "Politehnica" din Timișoara  
Facultatea de Mecanică

Tabel 3. Plan experimental 3. Aliajul TiAl6V

	Parametrii		Lățimea de intrare [mm]					Lățimea de ieșire[mm]				
			cota				media	cota				medi a
Tăie- tura	Presiun ea P [MPa]	Viteza de taiere v[mm/ min]	0	3	6	9	media	0	3	6	9	medi a
1	320	150	1,04	1,02	1,12	9,99	3,29	0,96	0,57	0,58	0,61	0,68
2	380	150	1,14	1,12	0,22	1,09	0,89	1,06	0,67	0,68	0,71	0,78
3	320	750	1,14	0,91	0,92	0,97	0,98	0	0	0	0	0
4	380	750	0,98	1,05	0,88	0,88	0,94	0	0	0	0	0
5	350	450	0,94	0,99	0,99	1,78	1,17	1,03	0,79	0,60	0,73	0,78
6	350	450	0,98	0,96	0,96	0,92	0,95	0,83	0,71	0,87	0,72	0,78
7	350	450	0,92	0,93	0,95	0,95	0,93	0,93	0,75	0,65	0,57	0,72
8	350	100	1,22	1,22	1,18	1,16	1,19	1,01	0,72	0,72	0,73	0,79
9	350	800	0,92	0,92	0,88	0,76	0,87	0	0	0	0	0
10	310	450	0,85	0,85	0,66	0,59	0,73	0,95	0	0,68	0,73	0,59
11	390	450	0,67	0,67	0,63	0,58	0,63	1,01	0,85	0,69	0,58	0,78

*Tabel 4. Plan experimental 4. Aliajul TiAl6V4*

	Parametrii		Lățimea de intrare [mm]						Lățimea de ieșire[mm]					
			cota					media	cota					media
Tă- ie- tura	Presiun ea P [MPa]	Viteza de taiere v[mm/ min]	0	3	6	9	12	media	0	3	6	9	12	media
1	320	200	1,20	0,68	0,62	0,61	0,59	0,74	1,52	0,61	0,62	0,59	0,63	0,79
2	380	200	1,02	0,72	0,61	0,60	0,66	0,72	1,51	0,63	0,62	0,61	0,61	0,79
3	320	400	1,12	0,68	0,53	0,51	0,48	0,66	1,15	0,71	0,51	0,45	0,45	0,65
4	380	400	1,03	0,56	0,61	0,55	0,57	0,66	1,08	0,51	0,52	0,51	0,56	0,63
5	350	300	1,22	0,62	0,52	0,52	0,51	0,67	1,22	0,57	0,52	0,53	0,50	0,66
6	350	300	1,05	0,60	0,54	0,55	0,55	0,65	1,19	0,60	0,57	0,54	0,59	0,69
7	350	300	1,11	0,64	0,59	0,54	0,53	0,68	1,15	0,53	0,54	0,46	0,46	0,62
8	350	100	1,19	0,71	0,72	0,70	0,73	0,81	1,18	0,72	0,71	0,70	0,67	0,79
9	350	500	1,03	0,61	0,52	0,49	0,47	0,62	0,90	0,94	0,97	0,56	0,43	0,76
10	310	300	0,94	0,50	0,54	0,47	0,47	0,58	0,98	0,57	0,54	0,53	0,48	0,62
11	390	300	1,08	0,65	0,56	0,52	0,63	0,68	1,03	0,58	0,54	0,56	0,58	0,65