ROMÂNIA

MINISTERUL EDUCAȚIEI

UNIVERSITATEA „VASILE ALECSANDRI” DIN BACĂU

Calea Mărăşeşti, Nr. 157, Bacău, 600115
Tel. +40-234-542411, fax +40-234-545753
www.ub.ro; e-mail:rector@ub.ro

ing. Bogdan Niță

REZUMAT

TEZĂ DE DOCTORAT

Coordonator

Prof. univ. dr. ing. habil. Carol Schnakovszky

Bacău

2024

ROMÂNIA

MINISTERUL EDUCAȚIEI

UNIVERSITATEA „VASILE ALECSANDRI” DIN BACĂU

Calea Mărăşeşti, Nr. 157, Bacău, 600115
Tel. +40-234-542411, fax +40-234-545753
www.ub.ro; e-mail:rector@ub.ro

ing. Bogdan Niță

Contribuții privind optimizarea diferitelor procedee de răcire necesară procesului de așchiere

Coordonator

Prof. univ. dr. ing. habil. Carol Schnakovszky

Bacău

2024

CUPRINS

CUPRINS

INTRODUCERE

1. CAPITOLUL 1

STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND INFLUENȚA MEDIILOR DE RĂCIRE ASUPRA CARACTERISTICILOR DE CALITATE ALE SUPRAFEȚELOR

1.1. Aspecte generale privind așchierea
- **1.1.1. Definire**
- **1.1.2. Tipuri de așchiere și mișcările caracteristice**
- **1.1.3. Frezarea**
- **1.1.4. Tipuri de lichide de răcire/lubrifiere**
  - **1.1.4.1. Lichidele de răcire/lubrifiere pe bază de ulei**
  - **1.1.4.2. Lichidele de răcire/lubrifiere sintetice și semi-sintetice**
  - **1.1.4.3. Lichidele de răcire criogenice**
  - **1.1.4.4. Lubrifianți solizi**
  - **1.1.4.5. Nano-fluide de răcire/lubrifiere**
- **1.1.5. Metode de răcire/lubrifiere**

1.2. Influența parametrilor de frezare asupra calității suprafețelor

1.3. Influența mediilor de prelucrare asupra caracteristicilor de calitate și eficiență ale materialelor implicate
- **1.3.1. Influența mediului de lucru asupra parametrilor de calitate a suprafeței (rugozitate)**
- **1.3.2. Efectul lichidelor criogenice asupra duratei de utilizare a sculei așchietoare**
- **1.3.3. Efectul lichidelor criogenice asupra forțelor de așchiere**

1.4. Concluzii privind stadiul actual al cercetărilor privind influențele lichidelor și mediilor de răcire/lubrifiere

2. CAPITOLUL 2

OBIECTIVELE ȘI ETAPELE TEZEI DE DOCTORAT

2.1. Considerente principale pentru stabilirea obiectivelor tezei

2.2. Obiectivul tezei

2.3. Direcțiile și etapele de studiu

3. CAPITOLUL 3

ELABORAREA PLANURILOR EXPERIMENTALE ȘI A METODOLOGIEI DE CERCETARE

3.1. CONDIȚII EXPERIMENTALE
- **3.1.1. Obiective și etape**
- **3.1.2. Materiale utilizate pentru testare**

3.1.3. Caracteristicile echipamentului de lucru utilizat
3.1.4. Caracteristicile mediului de lucru utilizat

3.2. ELABORAREA PLANULUI EXPERIMENTAL
3.2.1. Analiza cu ajutorul Python_Excel_MatLab
3.2.1.1. Descrierea coeficientului de corelație Pearson

4. CAPITOLUL 4

CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND INFLUENȚA PARAMETRILOR DE PRELUCRARE ÎN DIFERITE MEDII DE AȘCHIERE

4.1. REZULTATELE EXPERIMENTALE ȘI PRELUCRAREA ACESTORA
4.1.1. Rezultatele experimentale la prelucrarea aluminiului 99.9%
4.1.1.1. Influența parametrilor de prelucrare asupra caracteristicilor de calitate ale suprafeței la prelucrarea în mediu uscat
4.1.1.2. Influența parametrilor de prelucrare asupra caracteristicilor de calitate ale suprafeței la prelucrarea MQL
4.1.1.3. Influența parametrilor de prelucrare asupra caracteristicilor de calitate la prelucrarea cu azot lichid (LN_2)
4.1.1.4. Influența parametrilor de prelucrare asupra caracteristicilor de calitate la prelucrarea cu crioMQL 35
4.1.1.5. Concluzii referitoare la prelucrarea materialului Al 99.9%
4.1.2. Rezultatele experimentale la prelucrarea aliajului de aluminiu 2017
4.1.2.1. Influența parametrilor de prelucrare asupra caracteristicilor de calitate ale suprafeței la prelucrarea în mediu uscat
4.1.2.2. Influența parametrilor de prelucrare asupra caracteristicilor de calitate ale suprafeței la prelucrarea în mediu MQL
4.1.2.3. Influența parametrilor de prelucrare asupra caracteristicilor de calitate ale suprafeței la prelucrarea cu azot lichid (LN_2)
4.1.2.4. Influența parametrilor de prelucrare asupra caracteristicilor de calitate ale suprafeței la prelucrarea cu MQL +LN_2
4.1.2.5. Concluzii referitoare la prelucrarea aluajului de aluminiu 2017
4.1.3. Rezultatele experimentale la prelucrarea aliajului de aluminiu 7075
4.1.3.1. Influența parametrilor de prelucrare asupra caracteristicilor de calitate ale suprafeței la prelucrarea în mediu uscat
4.1.3.2. Influența parametrilor de prelucrare asupra caracteristicilor de calitate ale suprafeței la prelucrarea în mediu MQL
4.1.3.3. Influența parametrilor de prelucrare asupra caracteristicilor de calitate ale suprafeței la prelucrarea în mediu criogenic
4.1.3.4. Prelucrarea aliajului de aluminiu 7075 cu metoda MQL + LN_2
4.1.3.5. Concluzii referitoare la prelucrarea aluajului de aluminiu 7075
4.1.4. Analiza rezultatelor în funcție compoziția chimică a materialului
4.1.4.1. Analiza materialelor pentru prelucrarea uscată
4.1.4.2. Analiza materialelor pentru prelucrarea MQL
4.1.4.3. Analiza materialelor pentru prelucrarea criogenică
4.1.4.4. Analiza materialelor pentru prelucrarea criogenică + MQL

5. CAPITOLUL 5

CERCETĂRI PRIVIND DETERMINAREA UNEI DISTRIBUȚII OPTIMALE A MEDIILOR DE PRELUCRARE ÎN VEDEREA OBȚINERII UNEI CALITĂȚI SUPERIOARE A SUPRAFEȚELOR PRELUCRATE

5.1. Modelarea digitala a prelucrarilor prin metoda elementului finit

5.1.1. Prezentarea modelului de simulare
5.1.2. Crearea unui model simplificat pentru simularea procesului de frezare

5.2. Rezultate obținute în urma simulării procesului de frezare
5.2.1. Analiza fortelor de prelucrare.
5.2.1.1. Influența vitezei de avans și a adâncimii de prelucrare asupra mărimii forțelor generate la prelucrarea aluminiului 99.9%
5.2.1.2. Influența vitezei de avans și a adâncimii de prelucrare asupra mărimii forțelor generate la prelucrarea aliajului de aluminiu 2017
5.2.1.3. Influența vitezei de avans și a adâncimii de prelucrare asupra mărimii forțelor generate la prelucrarea aliajului de aluminiu 7075
5.2.2. Analiza comparativa a influentei caracteristicilor fizico-chimice ale materialului
5.2.3. Analiza prin simulare a distributiei temperaturilor generate pe suprafata materialelor
5.2.4. Analiza distributiei tensiunilor reziduale in stratul superficial
5.2.5. Concluzii privind rezultatele obținute în urma simulării

5.3. Aplicarea metodei reţelelor neuronale în vederea optimizării
5.3.1. Caracteristici ale rețelelor neuronale
5.3.2. Etapele implementării reţelelor neuronale în vederea obţinerii unei distribuţii optimale a tensiunilor reziduale
5.3.3. Optimizarea efectuata pe baza rezultatelor experimentale

5.4. Determinarea parametrilor optimi
5.4.1. Parametrii prescrisi de retea pentru mediul de lucru uscat
5.4.2. Parametrii prescrisi de retea pentru mediul de lucru MQL
5.4.4. Parametrii prescrisi de retea pentru mediul de lucru combinat (LN_2+ MQL)
5.4.5. Concluzii privind optimizarea cu ajutorul retelelor neuronale

6. CAPITOLUL 6

CONCLUZII GENERALE

6.1. Concluzii privind stadiul actual al tehnicii:

6.2. Concluzii privind influența compoziției chimice asupra caracteristicilor de calitate ale suprafeței obținute în diverse medii de prelucrare.

6.3. Concluzii privind influența principalilor parametrii de prelucrare asupra caracteristicilor de calitate ale suprafeței obținute

6.4. Concluzii privind analiza cu element finit

6.5. Concluzii privind optimizarea cu ajutorul retelelor neuronale

6.6. Contribuții originale

6.7. Direcții viitoare de studiu

ANEXE

BIBLIOGRAFIE

INTRODUCERE

Aschierea prin frezare reprezintă unul dintre procesele fundamentale in prelucrarea materialelor, fiind utilizat pe scara larga și jucând un rol crucial în industria de fabricatie. Procesul de frezare este esențial pentru transformarea materialelor brute în componente precise și complexe, utilizate într-o gamă variată de aplicații, de la piese de mașini și echipamente industriale, până la componente aeronautice și dispozitive medicale de înaltă precizie. Acest proces presupune îndepărtarea materialului de pe suprafața unei piese prin intermediul unei scule rotative numită freză, care are multiple tăișuri dispuse uniform pe circumferința sa. Frezarea oferă versatilitate în prelucrare datorită capacității sale de a realiza operații de prelucrare pe suprafețe plane, conturate și profilate, permițând obținerea unor forme complexe și precise. Totuși, acest proces implică și provocări semnificative legate de forțele intense de prelucrare, generarea de căldură și uzura sculelor. În timpul frezării, freza intră în contact cu materialul piesei de prelucrat, generând forțe de prelucrare considerabile care pot duce la deformări și uzură, afectând astfel calitatea suprafeței prelucrate și precizia dimensiunilor. Una dintre provocările majore ale procesului de frezare este managementul căldurii generate în timpul operației de prelucrare. Căldura excesivă poate cauza o serie de probleme, cum ar fi deformările termice ale piesei și uzura rapidă a sculelor. În plus, frecarea intensă dintre scula cu care se realizează prelucrarea și materialul piesei, poate duce la formarea de bavuri, microfisuri și alte defecte de suprafață care compromit calitatea piesei finite. În acest context, utilizarea eficientă a mediilor de răcire și lubrifiere devine esențială pentru optimizarea procesului de frezare.

Mediile de răcire și lubrifiere sunt utilizate pentru a reduce frecarea și căldura generate în zona de prelucrare, contribuind astfel atât la prelungirea duratei de viață a sculelor cât și la îmbunătățirea calității suprafeței pieselor prelucrate. Aceste medii joacă un rol crucial în dispersarea căldurii și în facilitarea îndepărtării așchiilor din zona de prelucrare, prevenind acumularea acestora care poate afecta procesul de prelucrare. Alegerea unui mediu adecvat de răcire și lubrifiere este influențată de o serie de factori, inclusiv materialul piesei de prelucrat, tipul de freză utilizat, viteza de prelucrare și condițiile de prelucrare. Există o varietate de medii de răcire și lubrifiere utilizate în procesul de frezare, fiecare având caracteristici și aplicații specifice. Fluidele de răcire și lubrifiere lichide, cum ar fi soluțiile solubile în apă, uleiurile de prelucrare și emulsii, sunt cele mai frecvent utilizate datorită capacității lor de a răci eficient zona de prelucrare și de a reduce frecarea. Acestea pot fi aplicate prin diverse metode, inclusiv pulverizarea, imersia sau aplicarea cu jet. Pe lângă fluidele lichide, aerul comprimat și lubrifianții uscați reprezintă alternative viabile pentru anumite aplicații specifice. Pe măsură ce cerințele industriei pentru precizie și eficiență cresc, tehnologiile avansate de răcire și lubrifiere devin din ce în ce mai relevante. Dezvoltări recente, cum ar fi utilizarea

nanofluidelor, răcirea criogenică și tehnicile de lubrifiere minimă (MQL - Minimum Quantity Lubrication), oferă soluții inovatoare pentru îmbunătățirea performanțelor procesului de frezare. Aceste tehnologii avansate permit o mai bună gestionare a căldurii și a frecării, contribuind la realizarea unor procese de prelucrare mai eficiente și mai sustenabile.

În concluzie, frezarea este un proces de prelucrare esențial în industria de fabricație, dar care implică provocări semnificative legate de managementul căldurii și uzura sculelor. Utilizarea adecvată a mediilor de răcire și lubrifiere este crucială pentru optimizarea procesului, asigurând o calitate superioară a pieselor prelucrate și prelungirea duratei de viață a sculelor. Dezvoltările recente în domeniul tehnologiilor de răcire și lubrifiere oferă noi oportunități pentru îmbunătățirea eficienței și sustenabilității procesului de frezare, contribuind la succesul pe termen lung al industriei de prelucrare a metalelor.

Rezultatele cercetărilor teoretice şi experimentale efectuate în vederea îndeplinirii obiectivului tezei sunt prezentate în cadrul celor şase capitole ale lucrării:

- **Primul capitol** prezintă un studiu privind stadiul actual al cercetărilor privind influența mediilor de răcire și lubrifiere asupra caracteristicilor de calitate ale suprafețelor.
- Având la bază concluziile rezultate în urma studierii stadiului actual al cercetărilor în domeniul influenței parametrilor și mediilor de frezare asupra calității suprafeței, în cel de **al doilea capitol** au fost formulate obiectivele de cercetare ale prezentei tezei de doctorat.
- **Capitolul 3** prezintă planurile experimentale și a metodologiei de cercetare urmat de **capitolul 4** care prezintă rezultatele cercetărilor experimentale pentru cele 4 medii de așchiere (așchiere uscată, fără agent de răcire sau lubrifiere, așchiere cu MQL, așchiere cu ajutorul azotului lichid și ultimul mediu de prelucrare, mediul combinat crioMQL).
- **Capitolul 5** prezină cercetările privind determinarea unei distribuții optimale a mediilor de prelucrare în vederea obținerii unei calități superioare a suprafețelor de prelucrat. Aici sunt prezentate rezultatele obținute prin modelarea digitală cu ajutorul elementului finit și determinarea parametrilor optimi de prelucrare cu ajutorul rețelelor neuronale.
- **În capitolul al şaselea** sunt prezentate concluziile finale, contribuţiile originale şi propuneri privind direcţiile viitoare de cercetare .

În încheiere ţin să adresez câteva cuvinte de mulţumire celor care au avut un rol important în îndrumarea mea pe tot parcursul desfăşurării activităţilor legate de realizarea cercetărilor şi de finalizarea prezentei lucrări.

În primul rând adresez profunde mulţumiri domnului Prof. univ. dr. ing. habil. **Carol Schnakovszky**, conducătorului științific al tezei și rector al Facultăţii de Inginerie a Universităţii „Vasile Alecsandri” din

Bacău, pentru sprijinul acordat şi pentru sfaturile competente primite pe parcursul realizării cercetărilor şi elaborării lucrării.

Adresez sincere mulţumiri domnilor prof. dr. ing. **Dumitru Nedelcu** de la Universitatea Tehnica „Gh. Asachi" din Iaşi, prof. dr. ing. habil. **Viorel Păunoiu** de la Universitatea „Dunărea de Jos" din Galați şi conf. dr. ing. **Chiriță Bogdan Alexandru** de la Universitatea „Vasile Alecsandri" din Bacău pentru amabilitatea de a fi acceptat să facă parte din colectivul de referenți științifici ai tezei şi pentru indicații date în urma analizei tezei şi pentru aprecierile făcute privind teza elaborată.

Asociez acestor mulţumiri întreg colectivul catedrei de Ingineria şi Managementul Sistemelor Industriale, din cadrul Universităţii „Vasile Alecsandri" din Bacău cât și colegilor mei foşti/actuali doctoranzi.

Ing. **Bogdan Niță**

CAPITOLUL 1

STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND INFLUENȚA MEDIILOR DE RĂCIRE ASUPRA CARACTERISTICILOR DE CALITATE ALE SUPRAFEȚELOR

Aspecte generale privind așchierea

Definire

Aschierea este un proces de prelucrare mecanică prin care materialul este îndepărtat sub formă de așchii folosind scule așchietoare, în scopul obținerii unor piese cu forme și dimensiuni precise (fig.1). Acest proces este esențial în fabricarea componentelor pentru diverse industrii, inclusiv automotive, aeronautică, electronică și medicală. Prin îndepărtarea controlată a materialului, aschierea permite obținerea unor finisaje de înaltă calitate și a unor toleranțe stricte în ceea ce privește dimensiunile pieselor [1].

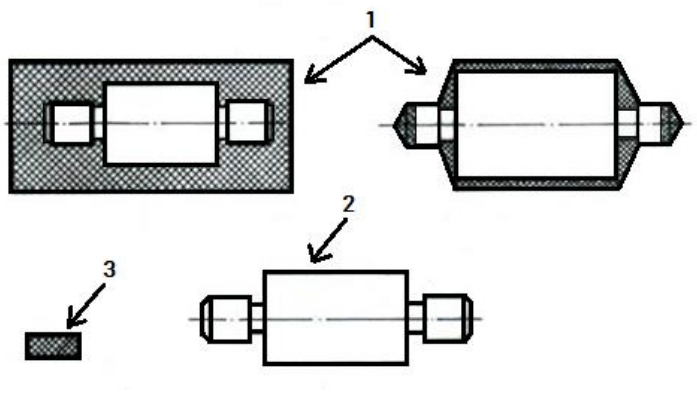


Figura 1 Adaosuri de prelucrare

1- Suprafete initiale; 2- Suprafete prelucrate; 3- Adaos

Piesa inițială, cu dimensiunile specifice, care nu a trecut printr-un proces de aschiere poartă numele de semifabricat. Semifabricatele folosite în procesul de așchiere pot fi obținute prin mai multe procedee tehnologice, precum: turnare, deformare plastică sau sudare.

Suprafața semifabricatului înainte de prelucrare poartă numele de suprafață inițială, iar cea de după prelucrare se numește suprafață prelucrată. Suprafața care intră în contact cu scula de așchiere se numește suprafață de așchiere.

Așchierea joacă un rol crucial în producția industrială datorită capacității sale de a transforma materialele brute în componente precise și funcționale. Acest proces este fundamental pentru manufactura avansată și pentru producerea de piese care necesită un grad înalt de precizie și calitate

a suprafeței. Așchierea este utilizată pentru a produce o gamă largă de produse, de la piese mici și complexe până la componente mari și robuste [2].

Procesul de aschiere se bazează pe interacțiunea dintre scula de prelucrare și materialul piesei de prelucrat. Scula de prelucrare, realizată din materiale dure și rezistente la uzură, penetrează materialul piesei și îndepărtează așchii, transformând materialul brut în produsul finit dorit. Procesul implică generarea de forțe de prelucrare semnificative și căldură, care trebuie gestionate eficient pentru a menține calitatea piesei și durabilitatea sculelor [3].

Tipuri de lichide de răcire/lubrifiere

În procesul de frezare, gestionarea căldurii generate și asigurarea unei lubrifieri adecvate sunt esențiale pentru obținerea unor rezultate optime [13]. Frezarea, fiind o operațiune de prelucrare prin așchiere [14], implică o interacțiune intensă între sculă și materialul prelucrat [15], generând temperaturi ridicate în punctul de contact [16]. Aceste temperaturi pot afecta negativ atât durata de viață a sculei de frezare [17], cât și calitatea suprafeței piesei prelucrate [18]. De asemenea, frecarea excesivă între sculă și material poate duce la uzură prematură [19] și la formarea unor așchii care pot interfera cu procesul de prelucrare [20].

Pentru a preveni aceste probleme, se utilizează diverse metode de răcire și lubrifiere [21], fiecare având specificațiile și avantajele sale. Sistemele de răcire și lubrifiere nu numai că ajută la menținerea temperaturilor la un nivel controlat, dar și reduc coeficientul de frecare, îmbunătățind astfel performanța globală a procesului de frezare [22]. Prin implementarea unei strategii adecvate de răcire și lubrifiere, se poate crește eficiența operațională, se poate extinde durata de viață a sculelor și se poate îmbunătăți calitatea produsului finit [23].

Există mai multe tipuri de sisteme de răcire și lubrifiere folosite în frezare, fiecare fiind potrivit pentru anumite tipuri de aplicații și materiale (fig.10). În cele ce urmează, vom detalia principalele metode utilizate în acest domeniu și vom analiza avantajele și dezavantajele fiecăreia [24].

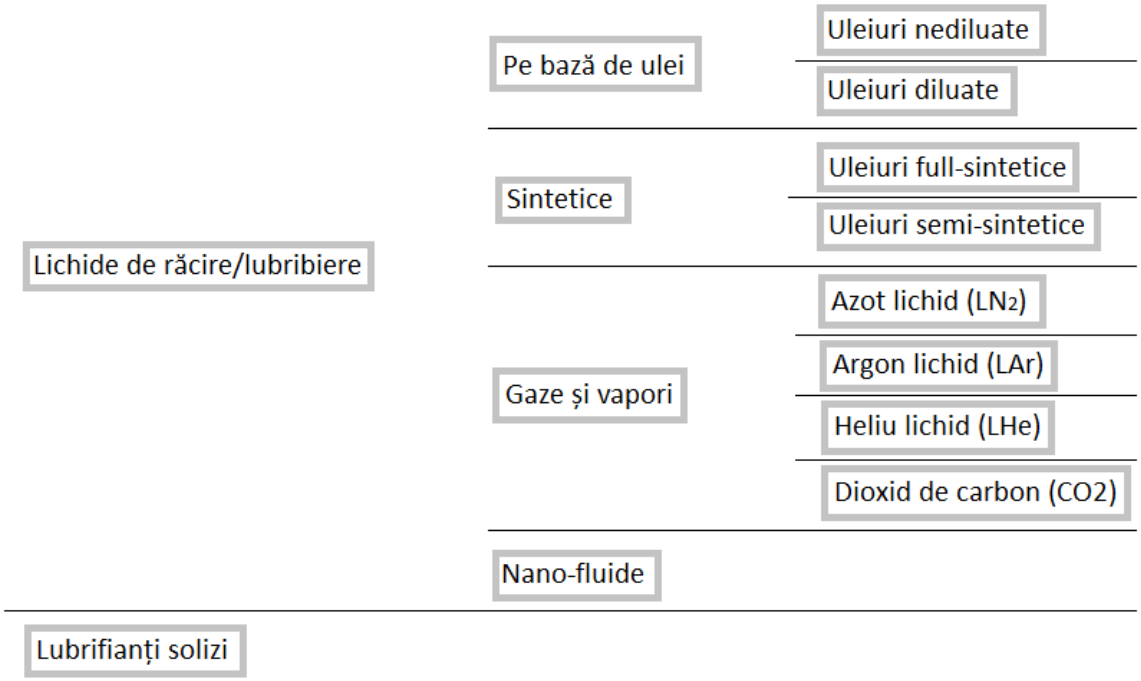


Figura 2 Clasificarea lubrifianților și agenților de răcire

Metode de răcire/lubrifiere

Metodele de răcire și lubrifiere sunt esențiale în procesele de fabricație și prelucrare a metalelor, contribuind la reducerea uzurii sculelor, îmbunătățirea calității suprafețelor prelucrate și prelungirea duratei de viață a echipamentelor. Aceste metode sunt aplicate în diverse moduri, în funcție de specificul aplicației, tipul de prelucrare și materialele implicate.

- **Răcirea prin inundare**

Răcirea prin inundare implică utilizarea unui volum mare de fluid de răcire, care este pompat continuu în zona de prelucrare pentru a îndepărta căldura și așchiile [159].

Această metodă este eficientă în eliminarea căldurii și așchiilor și oferă o bună lubrifiere a sculei așchietoare și a piesei prelucrate [160], însă necesită o cantitate mare de fluid [161] totodată și un sistem de recirculare și filtrare pentru a menține fluidul curat [61].

Metoda racirii sau a lubrifierii prin inundarea piesei și a sculei așchietoare este utilizată în prelucrarea materialelor dure și în operațiuni de mare viteză [162].

- **Răcire prin jet**

Fluidele de răcire sunt aplicate sub formă de jet direcționat direct pe zona de prelucrare, folosind duze specializate.

Această metodă are avantajul că jetul de lichid are precizie [163] și consumă mai puțin fluid comparativ cu metoda prin inundare [164]. Este folosită în prelucrarea de precizie și în operațiuni unde este necesară o răcire concentrată și nu foarte eficientă [165].

Metoda necesită echipamente speciale pentru direcționarea jetului [64] și poate fi mai puțin eficientă în îndepărtarea așchiilor [166].

- **Lubrifiere MQL (Minimum Quantity Lubrication)**

MQL implică utilizarea unei cantități foarte mici de fluid de lubrifiere, sub formă de aerosol, aplicată direct pe zona de prelucrare [167] (figura 14).

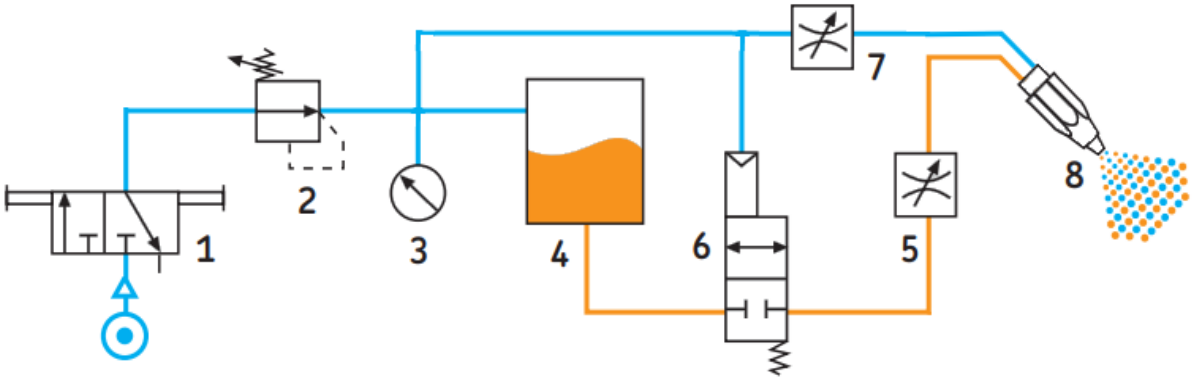


Figura 3 Schema constructiva - MQL

1- Supapa manuala; 2 - Valava pentru controlul de presiune; 3 - Manometru; 4 - Bazin cu ulei; 5 - Surub de ajustare; 6 - Supapa2/2; 7 - Actuator; 8 - Diuza de pulverizare.

Metoda MQL vine cu avantajul că folosește o cantitate foarte mică de fluid, cu deminsiuni foarte mici ale particulelor, ajungând pe suprafață prelucrată și pe scula aşchietoare cu o mai mare ușurință [168]. Costurile de eliminare a deșeurilor sunt reduse [169] dar necesită echipamente speciale pentru generarea aerosolului [170] și ficiența sa este variabilă în funcție de aplicație [171].

Metoda de lubrifiere MQL este ideală pentru operațiuni de prelucrare de mare precizie și pentru materiale mai puțin dure [172].

- **Răcire prin sculă**

Fluidul de răcire este pompat prin canale interne ale sculei, ajungând direct la punctul de contact cu piesa de prelucrat [173].

Această metodă de răcire este eficientă în cazul în care lichidul de răcire sau lubrifiere trebuie să ajungă direct la punctul de contact fără să interactioneze cu piesa prelucrată foarte mult, înainte sau după [174]. Reduce riscul de supraîncălzire a sculei însă piesa prelucrată nu profită de racire suficientă [175]. Metoda este folosită de cele mai multe ori cu cantitatea maximă de lichid care este permisă să treacă prin sculă pentru a fi mai eficientă sau împreună cu alte metode, cum ar fi răcire criogenică internă si lubrifiere MQL externă [176].

Metoda răcirii interne necesită scule și echipamente compatibile și poate fi costisitoare [177].

- **Răcire cu aer comprimat**

Utilizarea aerului comprimat pentru a răci și a îndepărta așchiile din zona de prelucrar nu este cea mai eficienă metodă, însă pentru prelucrări rapide și nu foarte pretențioase, poate să aducă o contribuție semnificativă la calitatea piesei prelucrate [178].

Această metodă este simplă și ieftină fără necesitatea gestionării lichidelor dar are eficiență limitată în răcire și lubrifiere și uneori nu este suficientă pentru operațiuni intensive [179]. In schimb, este potrivită pentru operațiuni ușoare și pentru materiale care nu generează multă căldură în timpul prelucrării [180].

- **Răcire criogenică**

Implică utilizarea gazelor lichefiate, precum azotul lichid sau dioxidul de carbon în cea mai mare parte, pentru a răci rapid zona de prelucrare [181]. Aceste lichide criogenice sunt extrem de eficiente [182] prevenind deformările termice și îmbunătățind durata de viață a sculei [183].

Pentru utilizarea lor în unele industrii, costul lor nu se justifică, deoarece necesită echipamente și măsuri de siguranță speciale care pot creste semnificativ costul producției, însă pentru industria aeronautică și cea militară, costul producerii și depozitării acestor lichide este unul nesemnificativ [184].

Influența parametrilor de frezare asupra calității suprafețelor

În timpul prelucrării, rugozitatea suprafeței joacă un rol major pentru evaluarea calității piesei de prelucrat. Rugozitatea se referă la totalitatea microneregularităților de pe suprafață produse în urma prelucrării. Rugozitatea suprafeței este influențată de parametrii de prelucrare controlați, cum ar fi avansul viteza, viteza axului, adâncimea de prelucrare, precum și prin cei necontrolați precum neomogenitatea piesei de prelucrat și a sculei, uzura sculei, erori de mișcare a mașinii, formarea de așchii, și tulburări aleatorii imprevizibile [185].

Din literatura de specialitate se observă faptul că viteza de avans este unul dintre factorii cei mai importanți care influențează în mare măsură rugozitatea suprafeței. În general, o creștere a vitezei de avans duce la o creștere a valorii rugozității; excepție făcând aliajele speciale sau adaosurile mici de prelucrare care uneori conduc la depuneri pe suprafață ceea ce denaturează valoarea rugozității [10, 186, 187]. Deasemenea, viteza de prelucrare, viteza de avans, și adâncimea de prelucrare sunt parametrii importanți care afectează calitatea suprafeței. Dar acești parametri depind puternic de geometria și dinamica sculei așchietoare [188].

Un alt parametru important care influențează calitatea suprafeței este reprezentat de viteza de așchiere Vc. În literatura de specialitate se observă că o creștere a vitezei de prelucrare (turația)

conduce la o scădere a valorii rugozității. Totodată aceasta poate conduce la valori mari ale rugozității și/sau abaterii în plan dacă parametrii aleși pentru prelucrare conduc la o supraîncălzire a sculei, o deformare termică a piesei/sculei. Pe de altă parte, vitezele prea mici pot produce așchii neuniforme și o finisare slabă a suprafeței [9].

Calitatea suprafeței este influiențată și de adâncimea de prelucrare. Prin creșterea/scăderea masei de material forța de așchiere poate fi influențată implicit și rugozitatea va fi afectată ulterior [18]. Din literatură s-a observat că o adâncime mare de prelucrare mare poate duce la supraîncărcarea sculei și la o calitate slabă a suprafeței, lucru datorat în mare măsură vibrațiilor și forțelor mari de prelucrare. Pe de altă parte o adâncime de prelucrare mică poate conduce la o finisare mai bună a suprafeței, concomitent cu prelungirea timpului de prelucrare datorită ratei mici de îndepărtare a materialului [11].

Având în vedere costurile ridicate de producție generate de către prelucrările prin așchiere, au fost dezvoltate modele teoretice de prezicere a rugozității. Acestea au fost dezvoltate pe două direcții, modele matematice și modele de analiză cu element finit [189]. Au fost create modele analitice pentru a prezice rugozitatea suprafeței și durata de viață a sculei în termeni de viteză de așchiere, viteză de avans și adâncimea de prelucrare a materialului [190, 191], investigații experimentale [192, 193], proiectarea experimentelor [194, 195] și tehnici de optimizare, cum ar fi rețeaua neuronală, algoritm genetic, logica fuzzy și abordările neuronale fuzzy pentru a prezice rugozitatea suprafeței [196].

Influența mediilor de prelucrare asupra caracteristicilor de calitate și eficiență ale materialelor implicate

Influența mediului de lucru asupra parametrilor de calitate a suprafeței (rugozitate)

Calitatea suprafeței este reprezentată în mare parte de rugozitatea și lipsa depunerilor pe suprafața prelucrată și este influențată în cea mai mare parte de viteza de avans și viteza de prelucrare și adâncimea de prelucrare [22], însă depunerile de pe tăișul sculei așchietoare pot fi o cauză majoră de creștere a rugozității suprafeței [197].

În ceea ce privește rugozitatea suprafeței există teste efectuate pe mai multe tipuri de materiale. În cazul AISI 4340, prelucrat cu două viteze diferite de așchiere, V_c = 180 și 220 m/min avansul pe dinte fz = 0,10 și 0,15 mm/dinte, cu o adâncime de prelucrare ap = 0,3 mm în condiții uscate

și criogenice [199]. În acest experiment, numai rugozitatea suprafeței, Ra, a fost măsurată după teste, iar rezultatele cele mai bune au fost obținute pentru prelucrarea sub influența LN_2. În condiții uscate, pentru Vc=180 m/min rugozitatea obținută a fost Ra=0,33µm și în condiții utilizării LN_2 aceasta a fost îmbunătățită cu aproximativ 25%, rezultând o valoare a rugozității de 0,25µm. Pentru Vc=220 m/min îmbunătățirea a fost mai mică, doar 14 % între Ra=0,35 µm în stare uscată și Ra=0,3 µm în condiții de răcire criogenică LN_2 [199] (Fig.16). Rezultatele au arătat că viteza de avans a avut cea mai mare influență asupra rugozității suprafeței, dar o mică influență a avut-o și adâncimea de prelucrare.

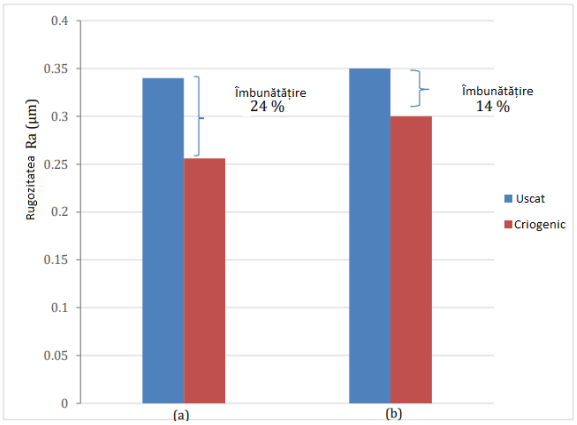


Figura 4 Rugozitatea medie a suprafeței pentru prelucrarea uscată și criogenică a AISI 4340
(a) Vc: 180 m / min, fz: 0,1 mm / dinte, ap: 0,3 mm
(b) Vc: 220 m / min, fz: 0,15 mm / dinte, ap: 0,3 mm

O îmbunătățire a rugozității suprafeței a fost observată și la frezarea aliajului de aluminiu 6061 prin metoda de răcire criogenică, folosind o freză cilinrdo-frontală tip deget cu două tăișuri și un diametru de aschiere de 12 mm cu un avans pe dinte inițial de 0.01 mm și unul de 0.015 mm cu o adâncime de 3 mm. Rugozități obșinute au fost Ra = 1,8 µm și Ra = 1,9 µm pentru frezarea uscată și respectiv, cea asistată de un jet de emulsie și Ra = 1,1 µm pentru frezarea criogenică, toate pentru primul set de parametrii (viteza de avans de 90 mm/min). Pentru viteza de avans de 150 mm/min (avansul pe dinte fz = 0.015 mm/dinte), valorile au fost aproape aceleași, Ra=1,6/1,8 µm pentru frezarea uscată și cea cu emulsie, dar net mai scazute (Ra=0,9 µm) pentru frezarea criogenică [18] (fig. 18).

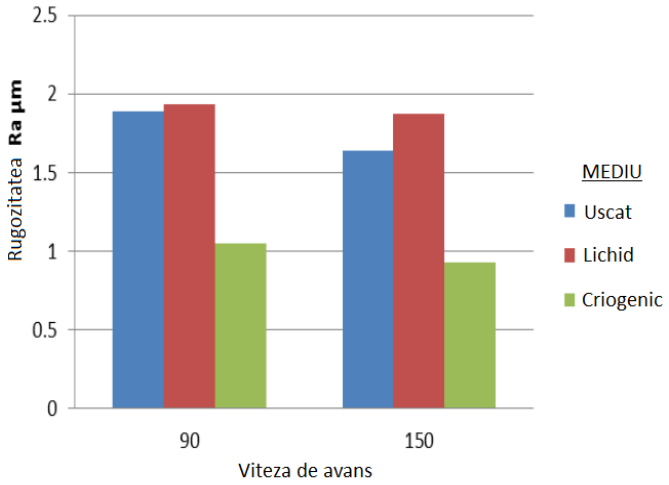
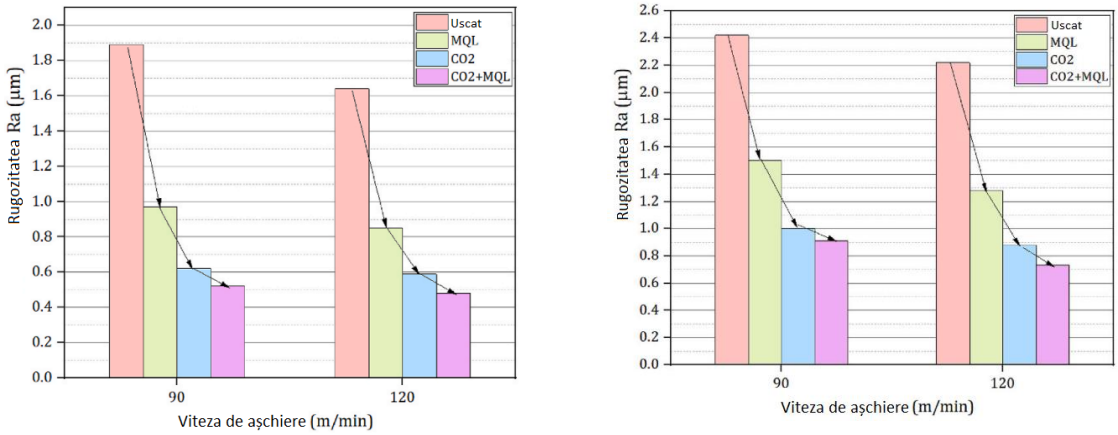


Figura 5 Rugozitatea suprafeței prelucrate uscat vs jet de emulsie vs criogenic

Constatări similare au fost raportate de V. Sivalingam et al.[24] pentru frezarea aliajului de aluminiu 6082. Studiul s-a axat pe analiza calitații suprafeței. Două seturi de parametri au fost utilizate pentru prelucrarea aliajului, viteza de așchiere $(S_d)v_c$ = 90 m/min cu avansul pe dinte $(S_d)fz$ = 0.05 mm/dinte (f = 0.1 mm/rotație) și viteza de așchiere $(S_d)v_c$ = 120 m/min cu avansul pe dinte fz=0.1 mm/dinte (f = 0.2 mm/rotație) în condiții de: prelucrare uscată, MQL, răcire criogenică și MQL + răcire criogenică. Pe baza rezultatelor după prelucrarea aliajului, pentru primul set de parametri fz = 0,05 mm/dinte și vc = 90 m/min rugozitatea suprafeței s-a îmbunătățit de la Ra = 1,9µm pentru frezarea uscată la Ra = 0,62µm pentru frezarea criogenică, rezultând o îmbunătățire mai mare de 200%. La viteza de așchiere $(S_d)v_c$ = 120 m/min cu avansul pe dinte $(S_d)fz$ = 0.05 mm/dinte, diferența a fost mai mică, de la Ra = 1,65µm la frezarea uscată la Ra = 0,58µm la frezarea criogenică, rezultând o îmbunătățire de 158%. Pentru viteza de așchiere $(S_d)v_c$ = 120 m/min cu avansul pe dinte fz=0.1 mm/dinte (f = 0.2 mm/rotație), diferențele au fost similare. Pentru acești parametri, rugozitatea suprafeței folosind MQL a fost cu 53% mai mare decât frezarea criogenică, iar pentru MQL + crio doar o mică îmbunătățire de 20% a fost constatată [24] (fig.19).



a. f=0.1 mm/rev b. f=0.2 mm/rev

Figura 6 Rugozitatea suprafeței prelucrate uscat vs MQL vs cryo vs cryo + MQL a. f = 0,1 mm / rev și b. f = 0,2 mm / rev

O bună îmbunătățire adusă de utilizarea lichidului criogenic, la frezarea aliajelor de aluminiu, este reprezentată de eliminarea în mare măsură sau chiar în totalitate a adeziuniii între așchie și scula așchietoare, ceea ce duce la o rugozitate mai mică a suprafeței și la o suprafață mai curată fără depuneri. Această aderență scăzută între așchie și scula asșchietoare este aproape eliminată din cauza efectului de întărire al așchiilor și, de asemenea, a temperaturii scăzute care împiedică reacția chimică dintre aluminiu și scula așchietoare [197]. Ea conduce, de asemenea, la temperaturi de prelucrare mai mici și forțe de prelucrare mai mici, care sunt strâns legate de stresul rezidual de pe suprafața piesei prelucrate.

N. H. A. Halim și colab. [19] a demonstrat că utilizarea CO2 la frezarea Inconel 718 are ca rezultat o rugozitate mai bună a suprafeței. În acest experiment, răcirea criogenică a fost comparată cu frezarea uscată a acestui material greu de prelucrat, folosind inserții de frezare din carbură multi-acoperită PVD. În tabelul 1 pot fi găsiți toți cei 8 parametri controlați.

Tabel 1 Parametrii de prelucrare [19]

	Încercări							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Viteza de așchiere, Vc (m/min)	120	120	130	130	140	140	140	140
Avansul pe dinte, fz (mm/dinte)	0,25	0,20	0,15	0,25	0,25	0,20	0,15	0,25
Adâncimea de prelucrare, ap (mm)	0,5	0,7	0,5	0,3	0,7	0,5	0,5	0,7
Angajamentul sculei, ae (mm)	0,4	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,2	0,4

Rezultatele au arătat o îmbunătățire a rugozității (Ra) între 75% și 142,8%, la frezarea criogenică comparativ cu frezarea uscată. Deasemenea rezultatele au demonstrat că frezarea

criogenică a reușit să prelungească durata de viață a sculei, ceea ce a dus la îmbunătățirea rugozității suprafeței în comparație cu frezarea uscată (fig. 20).

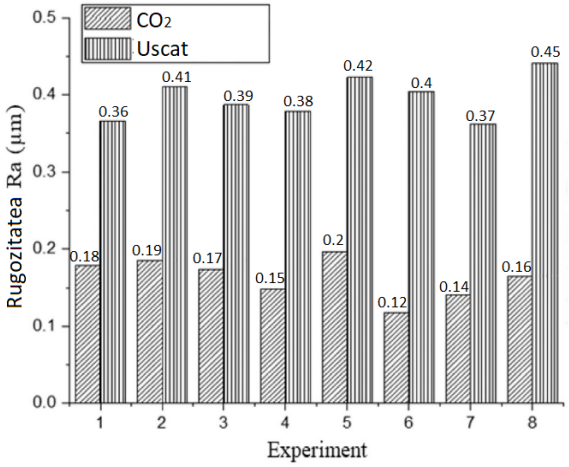


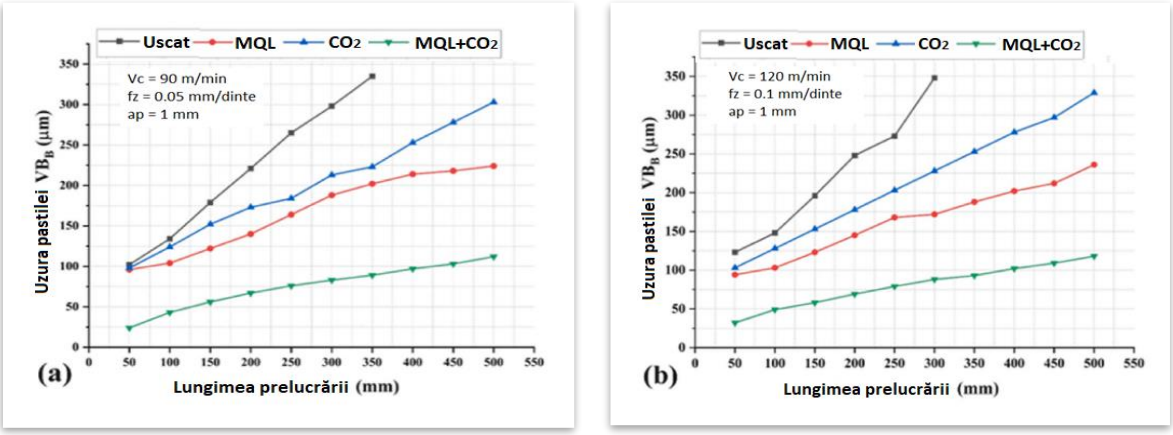
Figura 7 Rugozitatea suprafeței prelucrate uscat vs criogenic pentru toți cei 8 parametri

În concluzie, putem afirma că abordarea criogenică la prelucrarea prin frezare, aduce beneficii importante în ceea ce privește calitatea suprafeței, îmbunătățind rugozitatea suprafeței cu procente variind de la 14% la 158% în funcție de parametrii de prelucrare și de materialul prelucrat.

1.1.1. Efectul lichidelor criogenice asupra duratei de utilizare a sculei așchietoare

Azotul lichid, fiind un mediu de răcire pe bază de gaz, nu este renumit pentru proprietățile sale lubrifiante, cu toate acestea, în anumite condiții, poate îmbunătăți durata de viață a sculei așchietoare pentru frezarea anumitor materialele specifice.

Pentru aliajul de aluminiu 6082, rezultatele cercetărilor efectuate de V. Sivalingam și colab. [24] au arătat că frezarea criogenică a aliajului de aluminiu duce la îmbunătățirea duratei de viață a sculei așchietoare, comparativ cu frezarea uscată. Pentru o prelucrare cu lungimea de 350 mm, uzura sculei pentru frezarea uscată a fost VBB = 330µm și pentru frezarea criogenică aceasta a scazut la VBB = 225µm, rezultând o îmbunătățire de 46% (fig.21a). Pentru al doilea set de parametri, rezultatele au fost similare, cu o îmbunătățire de 55%[24] (fig. 21b).



a. f=0.1mm/rev b. f=0.2mm/rev

Figura 8 Uzura flancului sculei pentru a. f = 0.1mm / rev și b. f = 0.2mm / rev

Un studiu realizat de M. A. Suhaimi și colab. [173], în ceea ce privește încercarea lor de frezare a aliajului de titan de gradul 5, Ti-6Al-4V, sub influența azotului lichid, care a fost comparat cu frezarea sub jet de emulsie și frezarea MQL. Acesta a arătat că uzura flancului sculei așchietoare a fost mai mică la frezarea cu răcire criogenică comparativ cu metoda uscată, dar mai mare decât în cazul prelucrarii MQL. Îmbunătățirea observată în cazul frezării criogenice față de frezarea cu jet de emulsie, a fost de aproximativ 5%. Aceasta nu este o îmbunătățire semnificativă pentru a justifica utilizarea metodei de răcire criogenică. Pe de alta parte atunci cand racirea criogenica a fost combinată cu metode MQL, s-a obținut o îmbunătățire semnificativă de 90% față de racirea prin inundare [173]. De asemenea, au fost testate atât metoda de distribuire internă cât si cea externă a LN_2, și s-a putut constata că metoda de pulverizare (externă) a fost mai eficientă (fig.22).

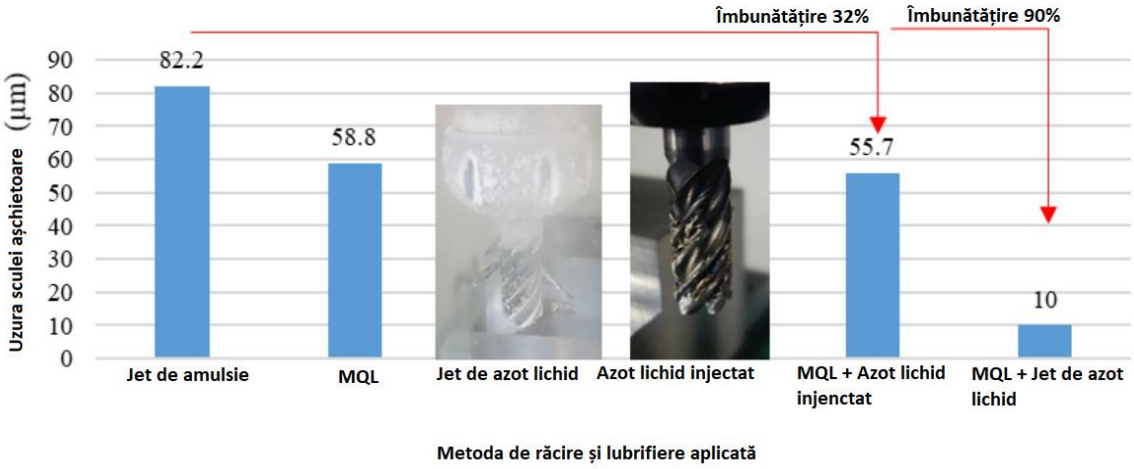


Figura 9 Uzura medie a flancului pentru toate cele 6 metode de răcire

O altă cercetare a fost efectuată de A. Shokrani și colab. [200], pe același aliaj de titan, Ti-6Al-4V, și s-a concentrat pe uzura sculei și calitatea suprafeței. Parametrii utilizați pentru realizarea experimentului au fost: viteza de așchiere V_c = 70 m/min, avansul pe dinte Fz = 0.03 mm/dinte, adancimea de prelucrare ap = 1 mm si angajamentul sculei de 50% și s-au comparat frezarea uscataă și frezarea cu răcire criogenică si racire prin inundare. Rezultatele au arătat că metoda de răcire criogenică a îmbunătățit durata de viață a sculei, comparativ cu celelalte două metode testate. Uzura flancului pentru frezarea criogenică a fost VBB = 0,065 mm comparativ cu VBB = 0,15 mm și 0,17 mm pentru frezarea uscată și respectiv, umedă. Utilizarea LN_2 a avut ca efect creșterea duratei de viață a sculei cu 130% în comparație cu frezarea uscată [200](fig.23).

Rezultate similare su fost prezentate si in cazul frezării Inconel 718 (19). În funcție de parametrii de frezare, s-a observat o îmbunătățire între 20% și 90% în cazul frezarii cu racire cu lichid criogenic fata de frezarea uscată [19]. Toți parametrii de prelucrare au fost prezentați în tabelul 8.

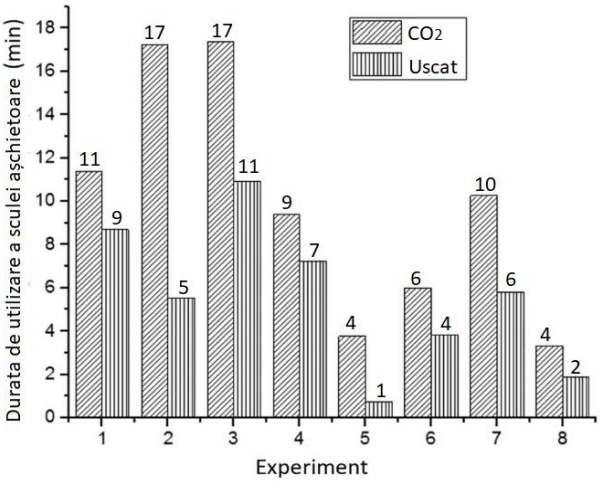


Figura 10 Timpul aproximativ până la îndepărtarea acoperirii PVD

Există câteva teste efectuate prin strunjire pe superaliaj pe bază de nichel, Inconel 625, care au arătat că acest aliaj are nevoie de o anumită lubrifiere atunci când este prelucrat [20]. În funcție de parametrii de prelucrare, lichidul criogenic simplu nu ar putea fi cea mai bună metodă de răcire a sculei aşchietoare și a piesei prelucrate, dar ar putea contribui la reducerea uzurii sculei atunci când este combinat cu MQL [20]. În lucrarea lui Yldimiri și colab. au fost utilizate trei seturi de parametri, adâncimea de prelucrare, ap = 0,5 mm, avansul pe rotație fn = 0,12 mm/rotație și vitezele de așchiere Vc = 50/75/100 m/min. Scula aşchietoare a suferit mai mult atunci când viteza de prelucrare a fost mai mare, deasemenea uzura a fost cu 25% mai mare în cazul frezării criogenice față de MQL. O îmbunătățire de 333% a fost obținută atunci când frezarea criogenică a fost combinată cu MQL, comparativ și cu metoda simplă de lubrifiere MQL [20](fig.24).

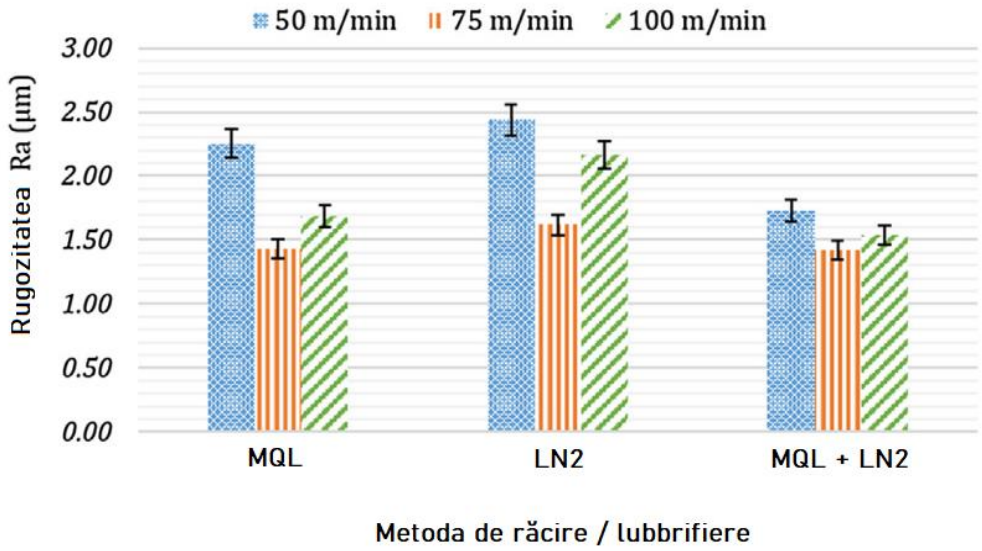


Figura 11 Uzura medie a flancului pentru toți cei 3 parametri

Efectul lichidelor criogenice asupra forțelor de așchiere

În majoritatea experimentelor, forțele de prelucrare sunt strâns legate de uzura sculei așchietoare. Diminuarea forțelor de prelucrare depinde foarte mult de uzura flancului. Există unele rezultate catastrofale la prelucrarea Ti-6Al-4V din cauza lipsei de lubrifiere (fig.25)[173]. Forța necesară pentru prelucrarea piesei, crește foarte mult după ce flancul inserției începe să se uzeze.

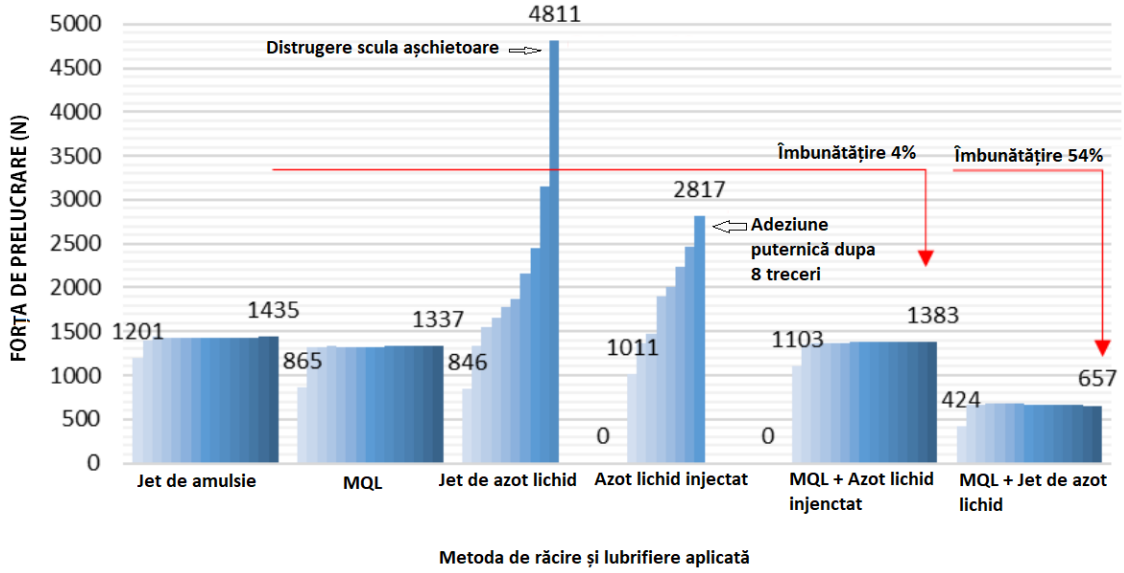


Figura 12 Forța de prelucrare pentru toate metodele de răcire / lubrifiere

Forțele de prelucrare au fost comparate și în articolul lui O. Pereira și colab., [201] unde forța de prelucrare la frezarea Inconel 718 a fost comparată între prelucrarea umedă, prelucrarea

criogenică, prelucrarea MQL și prelucrarea crio+MQL. Pentru acest experiment s-a utilizat o freză cilinrdo-frontală tip deget cu 6 tăișuri și un diametru de aschiere de 10 mm și un singur set de parametrii de prelucrare, viteza de așchiere V_c = 40 m/min, avansul pe dinte fz = 0.03 mm/dinte adâncimea de prelucrare radiala a_e = 0.2 mm și adâncimea de prelucrare axiala a_p = 10 mm. În acest experiment, prelucrarea umedă cu emulsie de ulei (10% ulei sintetic) a dat cele mai bune rezultate în comparație cu al doilea cel mai bun rezultat al MQL combinat cu lichid criogenic. Cel mai slab rezultat în acest caz l-a avut metoda de lubrifiere MQL, plasând frezarea criogenică deasupra (fig.26). Cu toate acestea, utilizarea lichidelor de răcire pe bază de substanțe chimice dăunează sănătății umane și problemelor de poluare a mediului [202] deci ar fi de preferat să se utilizeze metoda de racire combinata MQL și LCO_2.

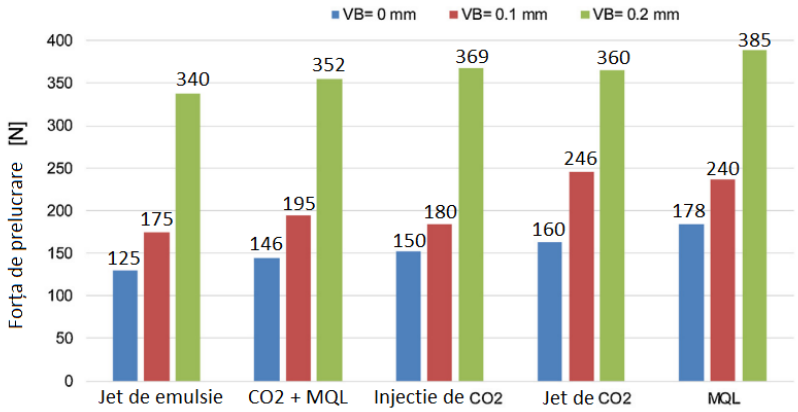


Figura 13 Forța de prelucrare pentru toate metodele de răcire / lubrifiere

În concluzie, uzura flancului a fost redusă de la 4% la 333%, atunci când a fost implicată răcirea criogenică în comparație cu frezarea uscată.

Concluzii privind stadiul actual al cercetărilor privind influențele lichidelor și mediilor de răcire/lubrifiere

În urma analizării stadiului actual al cercetărilor privind influențele lichidelor criogenice asupra pieselor prelucrate prin așchiere se pot desprinde următoarele concluzii și considerații:

Parametrii de prelucrare, compoziția chimică a materialului și mediile de lucru, sunt factori care influențează caracteristicile de calitate ale suprafeței (rugozitate, abatere în plan, tensiuni reziduale, microduritate) în funcție de modul lor de utilizare.

În ceea ce privește stadiul actual prezentat mai sus pot fi extrase urmatoarele concluzii:

- Creșterea **vitezei de așchiere** în cazul materialelor feritice conduce atât în mediul uscat cât și în mediu criogenic la creșterea valorii rugozității. Din literatură [199, 203] se observă că utilizarea criogeniei în cazul oțelurilor face ca valoarea rugozității obținută după criogenie să fie mai mică decât valoarea rugozității obținută în mediul uscat; cel mai probabil acest comportament este datorat reducerii temperaturii obținute la contactul sculă semifabricat, pe deoparte, și creșterii fragilității materialului (așchii numeroase = temperatură mai scăzută), pe de altă parte;
- Creșterea **vitezei de avans**, în condițiile în care restul parametrilor rămân constanți, conduce la creșterea valorii rugozităților atât la materialele feroase cât și la materialele neferoase [190, 203, 204]; Acest comportament se datorează ratei de îndepărtare a materialului care în mod natural crește odată cu creșterea vitezei (fz). Acest comportament nu este universal valabil în cazul utilizării altor medii de răcire decât cel uscat;
- **Adâncimea de prelucrare** nu are influență majoră asupra rugozității suprafeței [203];
- Compoziția chimică a materialelor este unul din factorii care afectează în mod flagrant mărimea rugozității. Din literatură se observă că, în general, aliajele neferoase care au coeficienți de transef termic superior aliajelor feroase dezvoltă rugozități mai mari față de acestea în condiții similare [190], viteze de prelucrare similare conduc la o valoare a rugozității de 10 ori mi mică;
- Mediile de lucru influențează valoarea caracteristicilor de calitate ale suprafeței, (rugozitate, duritate, abatere în plan și tensiuni reziduale) prin favorizare sau nu a transferului termic și a gradului de lubrifiere a suprafețelor. Metodele și lichidele de răcire/lubrifiere contribuie la îmbunătățirea rezultatelor, reducând forțele de așchiere, micșorând rugozitățile și prelungind viața sculei așchietoare, toți acești factori fiind legați între ei, influențându-se reciproc.
- Din analiza literaturii de specialitate se observă că în funcție de compoziția chimică cât și de parametrii de prelucrare mediile afectează caracteristicile de calitate ale suprafeței. De exemplu în cazul aliajelor feroase se observă că rugozitatea cea mai bună este obținută la utilizarea lichidelor criogenice în defavoarea răcirii cu apă, emulsie, uleiuri etc.. Aliajele feroase înregistrează rugozități mai mici cu până la 45% față de mediul uscat și până la 65% față de mediul inundat (jet de emulsie). Răcirea prin diverse metode (LN_2, CO_2) conduce și în cazul aliajelor neferoase la o rugozitate în general mai mică decât în cazul utilizării aerului sau a altor tipuri de procedee. O particularitate interesantă este observată în cazul aliajelor de aluminiu unde la adâncimi de prelucrare mici (până la 0.4mm) utilizarea răcirii duce la rugozități mai mici, în timp ce în cazul creșterii adâncimii de prelucrare (peste 0.5 mm) se obțin rugozități ușor mai mari decât în cazul prelucrării uscate sau MQL. Dacă ar fi să concluzionăm

importanța lichidelor de răcire/lubrifiere am putea face următoarea afirmație: Lichidele criogenice au o mare contribuție reducând foarte mult temperaturile de prelucrare, rezultând imbunătățiri de peste 300% în calitatea suprafeței, comparată cu prelucrarea fără lubrifiere/răcire. Aceste lichide criogenice vin ca o îmbunătățire semnificativă la metodele de răcire/lubrifere clasice. Din rezultate, se observa că un jet de lichid criogenic adăugat la un jet de lichid de lubrifiere aplicat prin metoda MQL, îmbunătățește rezultatele, în ceea ce privește rugozitatea surafeței, forțele de așchiere, depunerile pe suprafață și durata de viață a sculei așchietoare.

In literatura de specialitate găsim un număr mic de studii referitoare la prelucrarea cu ajutorul lichidelor criogenice pentru aliajele neferoase (aliaje de aluminiu). Acest lucru se datorează cel mai probabil costurilor de producție, transport și depozitare a lichidelor criogenice cât și a ratei înalte de prelucrabilitate a aliajelor „moi".

CAPITOLUL 2

OBIECTIVELE ȘI ETAPELE TEZEI DE DOCTORAT

Considerente principale pentru stabilirea obiectivelor tezei

Pornind de la concluziile principale ale stadiului actual al cercetărilor privind mediile de prelucrare și influența acestora asupra caracteristicilor de calitate ale suprafeței au rezultat următoarele considerente principale ce au stat la baza stabilirii obiectivelor tezei:

- calitatea suprafeței este afectatăă de toți parametrii participanți la procesul de producție, iar cunoașterea modului de influență al acestora poate conduce la optimizarea procesului productiv
- factorii principali ce influențează carcteristicile de calitate ale suprafetei sunt parametrii de așchiere (viteză de așchiere, viteză de avans) și compoziția chimică a metalelor prelucrate; optimizarea parametrilor de așchiere în condițiile în care sunt cunoscuți constituenții chimici ai materialului poate conduce la intuirea stării de calitate a suprafeșei la final;
- în vederea îmbunătățirii caracteristicilor de calitate ale suprafețelor pot fi utilizate diverse combinații de lichide/ soluții ce vor influența caracteristicile de calitate ale suprafeței generate de parametrii de prelucrare
- există un număr relativ mic de studii referitoare la caracteristicile de calitate ale suprafeței la aliajele neferoase (in special Al) prelucrate prin metode criogenice; cel mai probabil numarul mic se datoreaza in principal costurilor ridicate de productie și logistică pe de o parte; pe de

altă parte fiind materiale in general „moi” acestea au o prelucrabilitate în general bună; problemele fiind date de depunerile pe tăișul sculei pe care acestea le produc, lucru care ar putea fi redus prin tratamente termice-criogenice

- elaborarea unor modele de calcul și simulare sunt greu de luat în considerare datorită instabilității procesului de răcire care face un transfer termic rapid și, în consecință, nu poate fi prezis ușor.

Obiectivul tezei

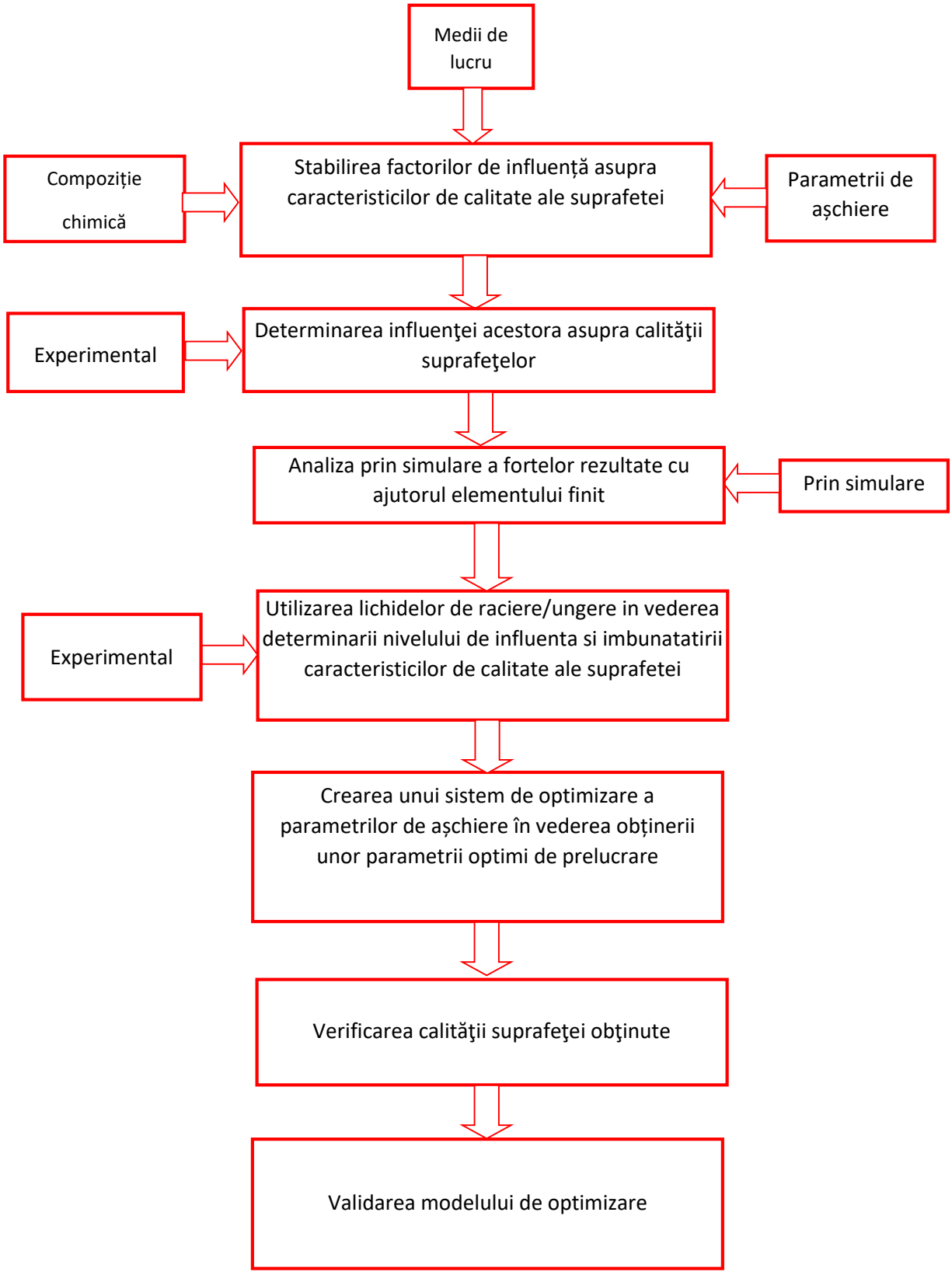
Obiectivul cercetării îl reprezintă stabilirea pe cale experimentală a influenței varierii parametrilor de prelucrare în diverse medii (uscat, criogenic, mql, combinate) asupra caracteristicilor de calitate ale suprafeței. Îndeplinirea obiectivului presupune ca, din regimurile de lucru adoptate să poată fi ales un optim atât din punct de vedere al caracteristicilor de calitate ale suprafetei, cât și din punct de vedere al productivității și durabilității.

Direcțiile și etapele de studiu

Pentru îndeplinirea obiectivelor susmenţionate s-a propus parcurgerea următoarelor etape de cercetare:

- Identificarea prin încercări experimentale a comportamentului aliajelor neferoase de aluminiu, cu procentaje variate între 99.90-88.5%, sub acțiunea diverselor regimuri de prelucrare
- Identificarea influenței compoziției chimice a aliajelor neferoase sub acțiunea diverselor regimuri de prelucrare
- Identificarea ,prin încercari experimentale, influenței diverselor medii de răcire/lubrefiere (mediu uscat, mediu MQL, mediu criogenic, mediu combinat MQL+LN_2) asupra comportamentului aliajelor de aluminiu
- Identificarea prin simulare a mărimii fortelor generate în timpul prelucrării prin varierea diferiților parametrii, utilizând softul AdvantEdge.
- Determinarea influenței prelucrărilor prin frezare și a mediilor de lucru simple sau intrepolate în vederea îmbunătățirii calității spurafeței la prelucrarile de finisare
- Crearea unui model de optimizare utilizând metoda rețelelor neuronale care să permită determinarea unui regim de prelucrare optim și validarea modelului prin verificarea experimentală a rezultatelor referitoare la parametrii implicați în proces asupra calităţii suprafeţei prelucrate.

Schema logică a cercetării ce va fi realizată în cadrul prezentei teze este prezentată în figura următoare:



CAPITOLUL 3

ELABORAREA PLANURILOR EXPERIMENTALE ȘI A METODOLOGIEI DE CERCETARE
CONDIȚII EXPERIMENTALE

Obiective și etape

- Utilizarea diferitelor medii de răcire/lubrifiere în vederea îmbunătățirii calității suprafeței rezultate dupa finisare;
- Stabilirea planului experimental și efectuarea măsurătorilor de:
    - rugozitate – în mod nedistructiv cu profilometru Zygo;
    - tensiuni reziduale – în mod nedistructiv cu aparatul cu raze x Micro 360 Pulstec;
    - microduritatea suprafeței – prin indentare cu microdurimetrul METKON MH3 și cu echipamentul portabil Equotip 550 Leeb D;
    - abaterea la planeitate – în mod nedistructiv cu profilometru Zygo.
- Prelucrarea datelor experimentale – Design Expert, MatLab și limbaj de programare Python;
- Utilizarea rețelelor neuronale pentru optimizarea procesului de finisare prin frezare pentru aliajele de aluminiu 2017, 7075 și aluminiu 99.9%;
- Modelarea digitală a prelucrărilor prin metoda elementului finit în vederea determinării forțelor de așchiere;
- Concluzii și perspective.

Materiale utilizate pentru testare

Pentru studiul experimental s-au utilizat bucăți de aluminiu cu dimensiunile de 190 x 10 x 60 mm, suprafața frezată fiind de 190 x 10 mm (fig. 29).

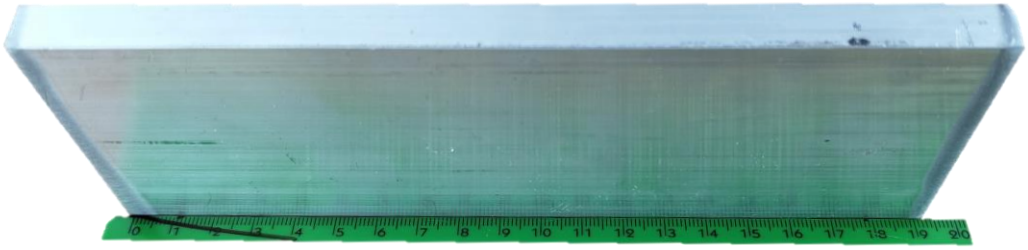


Figura 14 Bucata de aluminiu 99% utilizată pentru experminetele de frezare

- **Aliajul de aluminiu 2017**

Seria 2xxx are ca element de aliere principal cuprul, și magneziu, respectiv siliciul ca aliat secundar (tabel 2). Aceste aliaje necesită tratament termic și îmbătrânire artificială pentru a obține valori optime ale limitei de curgere. Aliajele din această serie au o rezistentă limitată la coroziune [212].

Aliajul de aluminiu 2017A (Al4.0Cu0.7Mn0.7Mg0.5Si) este utilizat pentru producerea de componente în industria aero-spațială [213], industria auto [214], industria navală [215] etc. Este un aliaj ce oferă rezistență mare pentru greutatea lui, de aici și aplicabilitatea în diferite structuri de rezistență. Are o rezistență la tracțiune de aproximativ 390 Mpa, rezistență la curgere de 260 Mpa, rezistența la rupere de 470 MPa și densitatea de 2.79 g/cm^3 [216]. Compoziția chimică este prezentată în tabelul 2.

Tabel 2 Compoziția chimică al aliajului de aluminiu 2017 [249]

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Zr	Al
MIN	0.2%	0%	3.5%	0.4%	0.4%	0%	0%	0%	0%	Rest
MAX	0.8%	0.7%	4.5%	1%	1%	0.25%	0.1%	0.1%	0.1%	Rest

- **Aliajul de aluminiu 7075**

Seria 7xxx are ca elemente de aliere zinc cuplat cu magneziu dar și cupru sau alte elemente precum manganul sau cromul în cantități foarte mici (tabelul 3). Aliajele din seria aceasta se pot trata termic și au o rezistentă mecanică foarte mare. Cele mai utilizate aliaje din această serie sunt 7075, 7050 si 7049, care sunt printre aliajele cele mai rezistente disponibile, motiv pentru care sunt utilizate în aviație și industria auto [217].

Aliajul de auminiu 7075 utilizat pentru studiul experimental, are o rezistență la tracțiune de până la 572 MPa, rezistență la curgere de 503 MPa, rezistență la forfecare de 331 MPa, rezistența la rupere

de 605 MPa, rezistență la oboseală de 159 MPa, un modul de elasticitate de 71.7 GPa și un modul de forfecare de 26.9 Gpa [218].

Tabel 3 Compoziția chimică al aliajului de aluminiu 7075 [251]

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	ALTELE	Al
MIN	0%	0%	1.2%	0%	2.1%	5.1%	0%	0.18%	0.05%	Rest
MAX	0.4%	0.5%	2%	0.3%	2.9%	6.1%	0.2%	0.28%	0.15%	Rest

1.1.2. Caracteristicile echipamentului de lucru utilizat

- **Centrul de prelucrare**

Pentru realizarea experimentelor s-a utilizat un centru de prelucrare CNC Knuth Rapimill 700 (fig. 30) ,cu 3 axe și o interfață de control de la Siemens (fig. 31), Sinumerik 802D.



Figura 15 Centru de prelucrare Rapimill 700



Figura 16 Interfața Centrului de prelucrare Rapimill 700

- **Scula aşchietoare**

Pentru prelucrarea prin aşchiere s-a utilizat o freză cilindo-frontală Sandvik, R390-018A16L-11L cu diametrul de prelucrare de 18 mm (fig. 32) echipată cu două plăcuțe Sandvik CoroMill, R390-11T308E-KL H13A (fig. 33) [219]. Caracteristicile dimensionale ale frezei le regăsim în tabelul 4 și ale plăcuței în tabelul 5.

- **Determinarea rugozității**

Pentru măsurarea rugozității am uitilizat un profilometru AMETEK_ Zygo ce topografiază suprafața prelucrată și măsoară rugozitatea în mod nedistructiv prin interferometrie cu lumină albă (fig.34).

Acesta dispune de mai multe lentile optice pentru topografierea suprafeței (fig. 34) cu un câmp de vizualizare cuprins între 8.7 mm și 17.5 mm în funcție de ocularul utilizat. Are o viteză de scanare a suprafeței de 171 µm/sec și cu ajutorul software-ului MX poate să topografieze mai multe suprafețe în mod automat .

După topografierea suprafeței, cu ajutorul softwarelui de prelucrare a datelor MX 6.4 sunt puse în evidență suprafețele "de raspuns la lumină". Softul are posibilitatea de a masura atât topografia integral cât și de a prelucra topografia astfel incât să fie puse în evidentă sau scoase diverse defecte / zone analizate.

- **Determinarea microdurității**

Avand în vedere caracreristicile fizico mecanice ale materialelor utilizate cât și utilizarea unui material cu puritate mare (AL99,9%) s-a utilizat un microdurimetru cu indentare tip METKON HM 3 cu următoarele caracteristici: forța de apăsare la măsurare 10 – 1000 gf; lungime maximă de măsurare 200 µm; dimensiuni maxime admise 110 x 110 mm, indentorul utilizat este de tip piramidă (diamant).

- **Determinarea tensiunilor reziduale**

Pentru realizarea masurătorilor pentru tensiunilor reziduale de suprafată (până la adîncimea de 10 µm) (fig. 38) s-a utilizat un dispozitiv cu raze X controlat de un brat robotic KUKA (fig.39).

Dispozitivul Pulstec µ-X360s este un dispozitiv portabil, care poate fi atașat pe un stand sau poate fi controlat de un brat robotic, putând să realizeze măsurători ale tensiunilor reziduale de suprafață (până la 10 µm adâncime) în mod nedistructiv. Acesta efectuează un bombardament cu raze X asupra materialului de măsurat și în funcție de viteza de răspuns prelucrează și interpretează rezultatele [225].

1.1.3. Caracteristicile mediului de lucru utilizat

- **Mediul MQL**

- S-a utilizat un dispozitiv de pulverizare cu două diuze, MQL de la SKF (fig. 40);
- Ulei vegetal – 1 l/h pulverizat la o presiune de 3 bari;
- Distanța de pulverizare – 20 cm de la fiecare diuză către zona de prelucrare (fig. 41);



Figura 17 Dispozitivul MQL - SKF

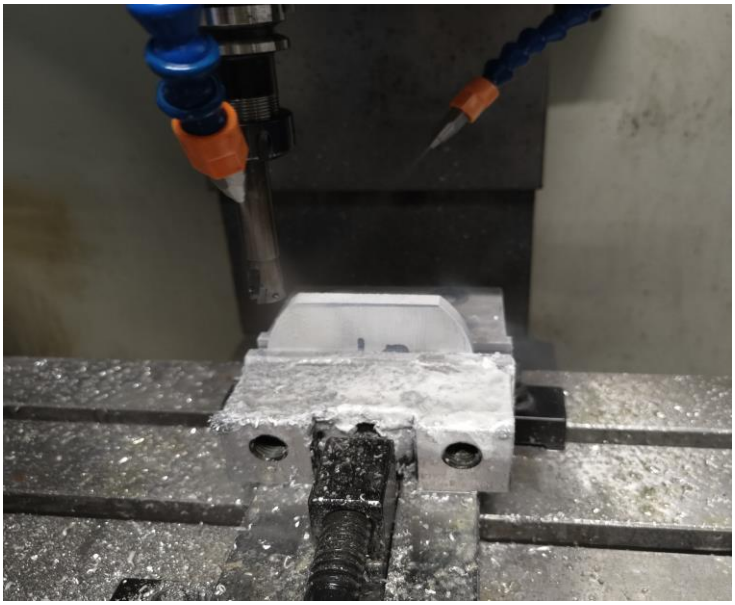


Figura 18 Mod de aplicare al mediului MQL

- **Mediul criogenic**

În vederea evitării temperaturii crescute ce se înregistrează în hala de producție, materialele au fost imersate complet în azot lichid (LN_2). Înainte de fiecare prelucrare, temperatura a fost măsurată cu o termocuplă de tip K care a fost amplasată la 1 mm adâncime sub suprafața de prelucrat (fig. 42) pentru a putea „porni fiecare experiment” la o temperatură constantă de -60°C (fig. 43).

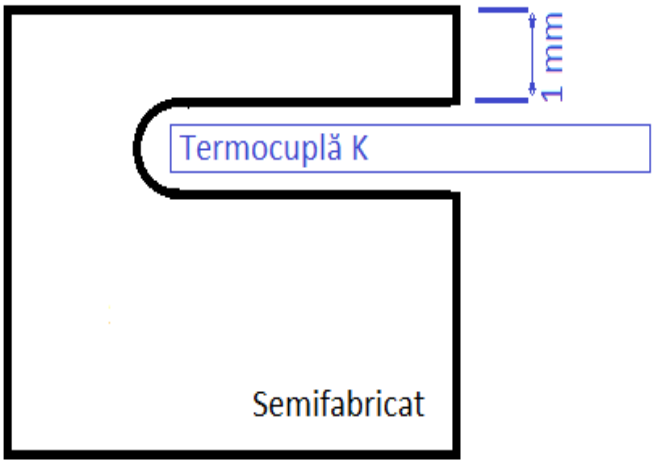


Figura 19 Schema de pozitie pentru termocupla K



Figura 20 Dispozitiv cu termocupla K

ELABORAREA PLANULUI EXPERIMENTAL

Pentru generarea parametrilor și analizarea rezultatelor am utilizat două căi de analiză. Programul de analiză statistică **Design Expert** și analiza cu ajutorul limbajului de programare Python. În ajutorul Python am utilizat interfețe de tip Excel, MatLab și biblioteci precum Pandas sau Seaborn. Codurile pentru generarea grafica au fost realizate cu PyCharm și VS Code asistate de AI.

Analiza cu ajutorul Python_Excel_MatLab

Dupa notarea în Excel a valorilor măsurate după prelucrare, am realizat graficele simple pentru compararea datelor. Pentru realizarea matricei de tip „Heatmap” (fig. 44) am urmat o serie de pași:

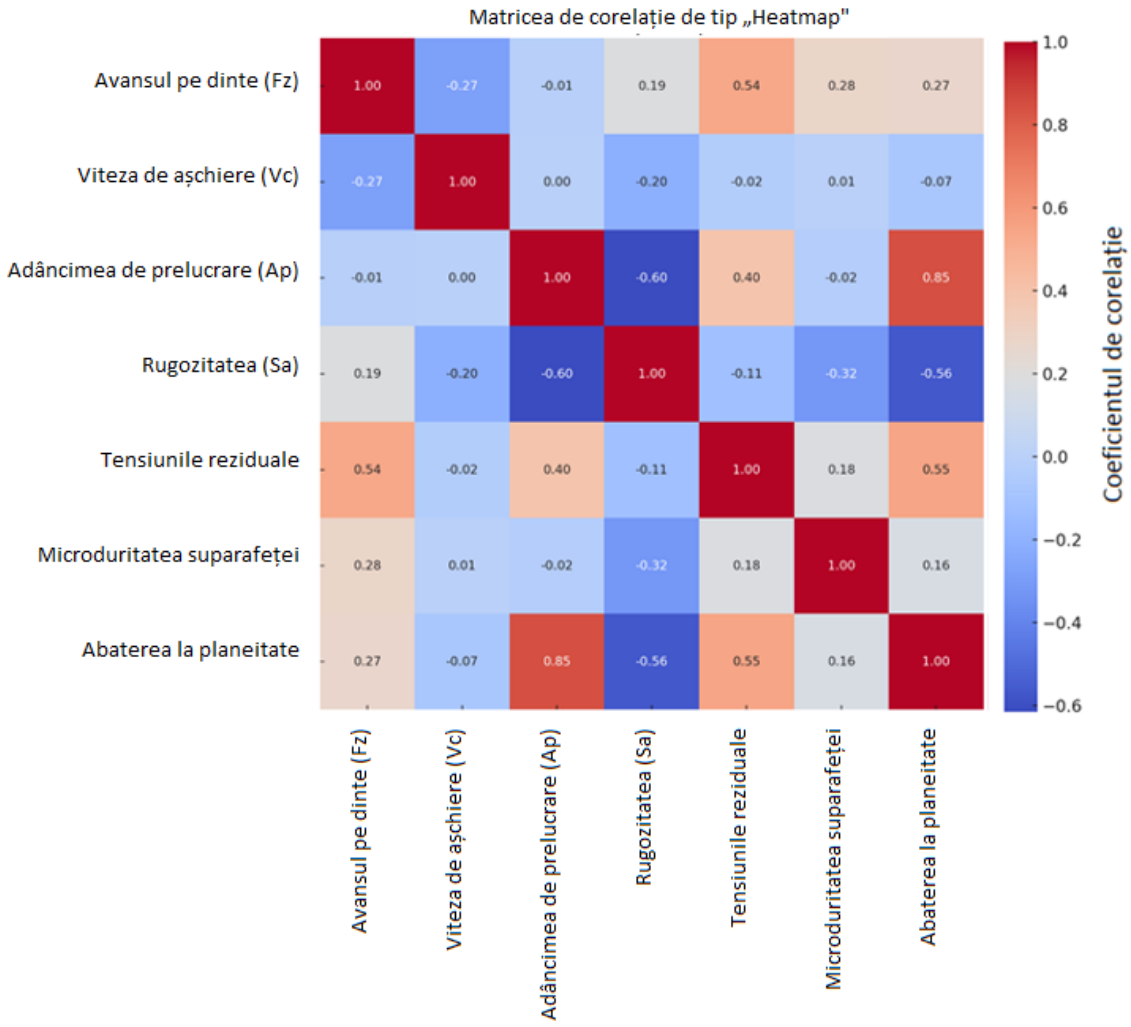


Figura 21 Matricea de corelație de tip „heatmap”

a. **Încărcarea și inspecția datelor**

b. **Prelucrarea datelor**

c. **Analiza datelor**

d. **Analiza relațiilor între datele de intrare și rezultate**

e. **Transformarea datelor**

f. **Modelarea și concluziile**

Descrierea coeficientului de corelație Pearson

Coeficientul de corelație Pearson (notat adesea ca rrr) este o măsură statistică a forței și direcției relației liniare dintre două variabile continue. Valoarea coeficientului variază între -1 și 1:

- r=1r = 1r=1: Corelație liniară perfect pozitivă. Pe măsură ce o variabilă crește, cealaltă variabilă crește proporțional.
- r=−1r = -1r=−1: Corelație liniară perfect negativă. Pe măsură ce o variabilă crește, cealaltă variabilă scade proporțional.
- r=0r = 0r=0: Nicio corelație liniară. Nu există o relație liniară evidentă între cele două variabile.

Calculul coeficientului Pearson

Formula pentru coeficientul de corelație Pearson este:

$$r = \frac{\sum(x_i - \dot{x})(y_i - \dot{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \dot{x})^2}\sqrt{\sum(y_i - \dot{y})^2}}$$

- x_i și y_i sunt valorile individuale ale variabilelor X și Y;
- $\dot{x}_i$ și $\dot{y}_i$ sunt mediile variabilelor X și Y;

1.1.3.1. Calcularea corelațiilor cu Pandas

Biblioteca Pandas în Python are o metodă corr() care calculează automat coeficienții de corelație Pearson între toate perechile de coloane numerice dintr-un DataFrame. Iată cum se calculează corelațiile:

```
python
Copy code
import pandas as pd

# DataFrame-ul conține variabilele pentru care dorim să calculăm
corelațiile
data = pd.DataFrame({
```

```
    'Var1': [10, 20, 30, 40],
    'Var2': [20, 25, 35, 45],
    'Var3': [15, 25, 30, 40]
})

# Calcularea matricei de corelație
correlation_matrix = data.corr()

print(correlation_matrix)
```

1.1.3.2. Interpretarea rezultatelor

Interpretarea valorilor coeficientului Pearson trebuie să țină cont de magnitudinea și semnul acestora:

- Magnitudinea: Indică forța relației. De exemplu, un coeficient de 0.8 sau -0.8 indică o relație puternică, în timp ce un coeficient de 0.2 sau -0.2 indică o relație slabă.
- Semnul: Indică direcția relației. Un semn pozitiv înseamnă că variabilele se deplasează în aceeași direcție, în timp ce un semn negativ înseamnă că se deplasează în direcții opuse.

1.1.3.3. Limitări ale coeficientului Pearson

1. Relații neliniare: Pearson măsoară doar relațiile liniare. Dacă există o relație neliniară, coeficientul poate să nu reflecte corect relația.
2. Sensibilitate la valori extreme: Valorile extreme pot influența semnificativ coeficientul Pearson, distorsionând rezultatele.
3. Distribuții normale: Funcționează cel mai bine atunci când variabilele sunt distribuite normal.

CAPITOLUL 4

CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND INFLUENȚA PARAMETRILOR DE PRELUCRARE ÎN DIFERITE MEDII DE AȘCHIERE

REZULTATELE EXPERIMENTALE ȘI PRELUCRAREA ACESTORA

După prelucrarea materialelor s-au analizat suprafețele, datele au fost trecute în tabele și s-au realizat grafice pentru compararea acestora. Datele au fost analizate pentru fiecare tip de material și pentru fiecare tip de prelucrare, și anume, prelucrarea uscată, prelucrarea sub influența azotului lichid, prelucrarea sub influența unui agent de lubrifiere aplicat prin metoda MQL și prelucrarea combinată MQL și azot lichid .

Rezultatele experimentale la prelucrarea aluminiului 99.9%

Influența parametrilor de prelucrare asupra caracteristicilor de calitate la prelucrarea cu crioMQL

- **Influența asupra rugozității suprafeței**

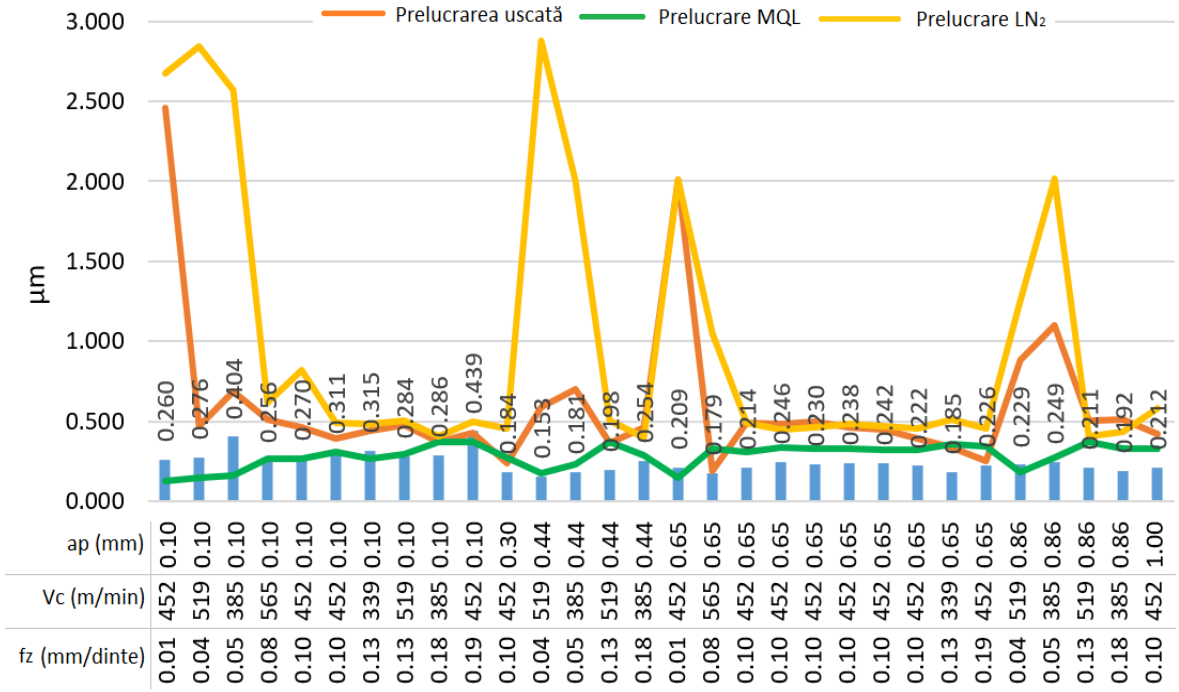


Figura 22 Graficul rugozității pentru aluminiu 99.9% - azot lichid + MQL

Din analiza datelor prezentate la figura 68 se observă faptul că utilizarea mediilor combinate LN_2 și MQL conduce pe de o parte la reducerea semnificativă a valorilor rugozităților și pe de altă parte oferă o tendință de dispunere similară cu cea indusă de prelucrările cu MQL.

Utilizarea vitezelor de avans de până la 0.05 mm/dinte face ca valorile rugozităților să urmeze o tendință ușor crescătoare.

Utilizarea unor adâncimi de prelucrare mici conduce ca și în celelalte cazuri la valori mai mari ale rugozităților decât în cazul adâncimilor mari de prelucrare.

În general observăm că creșterea vitezei de avans conduce la creșterea valorii rugozității (fig. 69).

Rugozitatea în cazul prelucrării crioMQL, care combină lichidul criogenic cu MQL, pare să ofere rezultate foarte bune, cu o rugozitate general mai scăzută comparativ cu prelucrarea exclusiv criogenică și apropiată de cea obținută prin MQL. Acest lucru sugerează că sinergia dintre răcirea criogenică și lubrifierea MQL poate optimiza procesul de tăiere, minimizând variațiile de rugozitate și îmbunătățind uniformitatea finisajului.

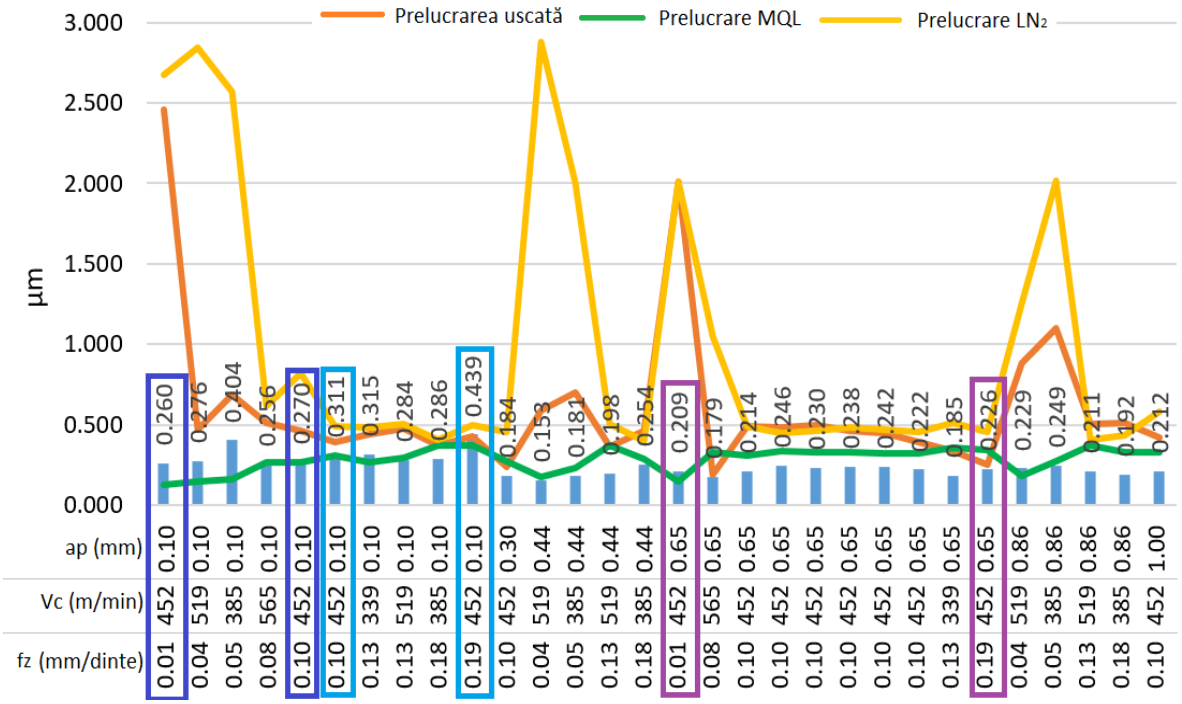


Figura 23 Graficul rugozității pentru aluminiu 99.9% - azot lichid + MQL

- **Influența asupra tensiunilor reziduale pe suprafață**

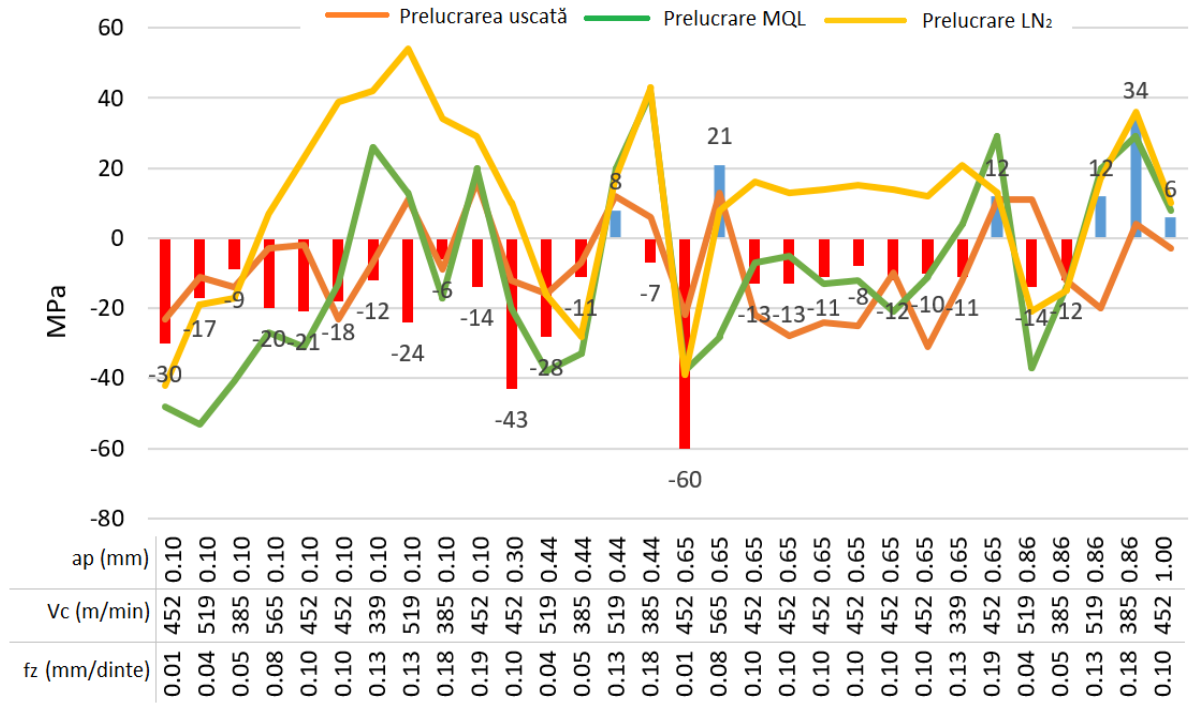


Figura 24 Graficul tensiunilor reziduale pentru aluminiu 99.9% - azot lichid + MQL

Din analiza rezultatelor prezentate în figura 70 se observă că procedeul de prelucrare combinat, conduce la generarea de tensiuni cu valori compresive în stratul superficial. Spre deosebire de celelalte medii de lucru se observă faptul că doar în cazul adâncimilor mari de așchiere tensiunile au valori de întindere.

Valorile de compresiune variază într-un interval relativ mare și sunt preponderente, de la valori ușor negative până la valori destul de mari (exemplu, -60 MPa). Aceste valori arată capacitatea procesului crioMQL de a induce stări de stres benefice care pot ajuta la întărirea materialului și la îmbunătățirea rezistenței la oboseală.

În condițiile păstrării unei adâncimi mici de prelucrare se observă o tendință de dispunere relativ stabilă (0.01 – 0.19 mm/dinte, ap = 0.1 mm). Creșterea adâncimii de prelucrare nu revelă o schimbare majoră a valorilor tensiunilor reziduale. Prin compararea cu celelalte procedee observăm că tendința de variație este aproximativ aceeași (cu exepția prelucrării cu LN_2) doar valorile sunt îmbunătățite (spre compresiune).

- **Influența asupra micodurității suprafeței**

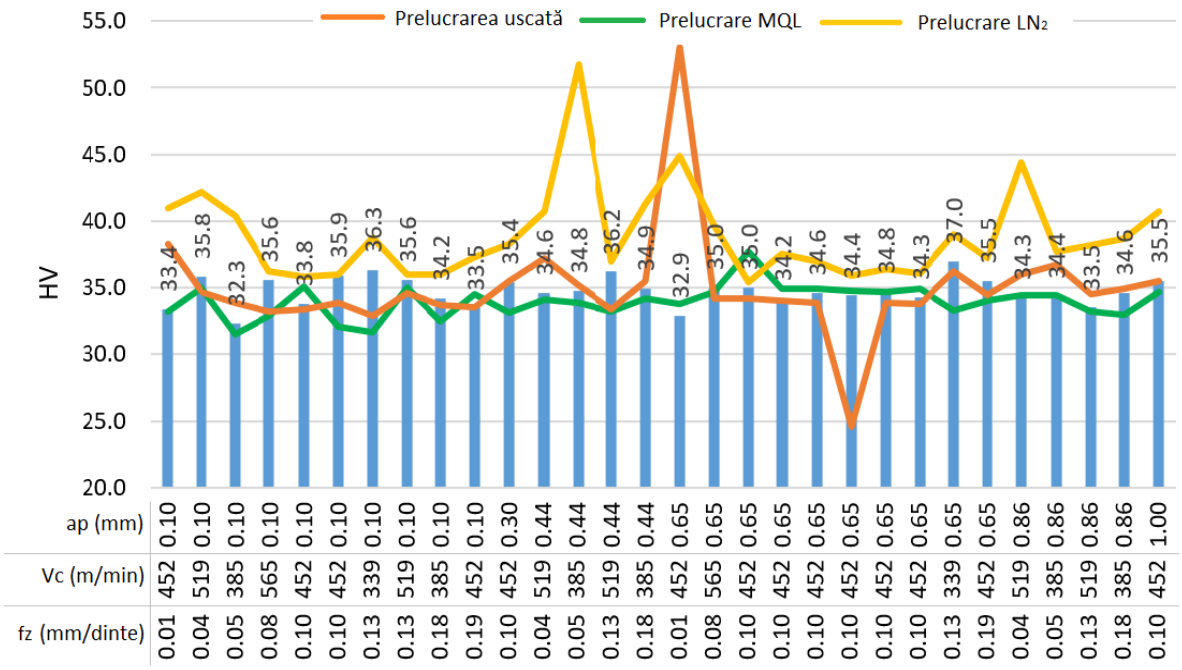


Figura 25 Graficul microdurității la aluminiu 99.9% - azot lichid + MQL

Din datele prezentate mai sus (fig .81) se observă ca și în celelalte cazuri o abatere aproximativ constantă cu valori similare celorrezultate în urma prelucrării cu MQL.

- **Influența asupra abaterii la planeitate**

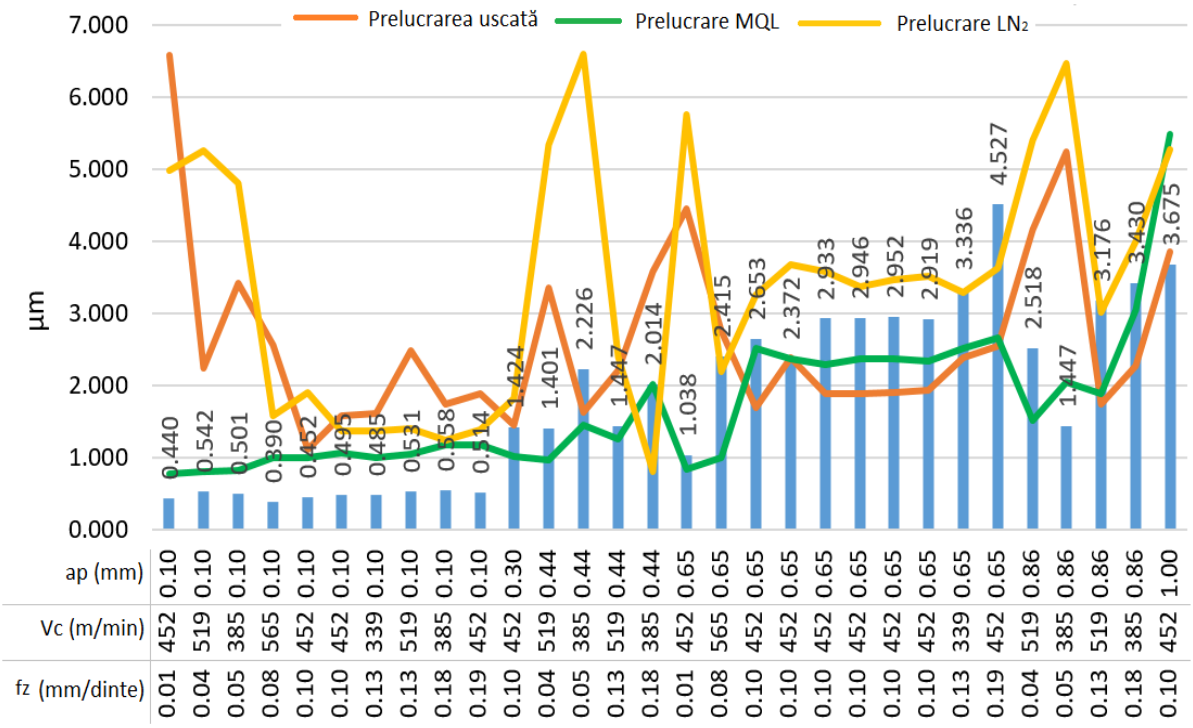


Figura 26 Graficul abaterii la planeitate la aluminiu 99.9% - azot lichid + MQL

Din analiza rezultatelor prezentate în figura 72 se observă faptul că unul dintre factorii principali de influență pare a fi în acest caz, adâncimea de prelucrare. Utilizarea unei adâncimi mici, de până la 0.1 mm conduce la generarea de abateri cu valori de sub 0.6 µm. Aceasta pare să fie afectată progresiv de creșterea vitezei de avans. Acesta este un aspect crucial în aplicații unde calitatea și precizia suprafeței sunt esențiale, cum ar fi în prelucrarea componentelor fine sau în finisările de înaltă calitate. Astfel, crioMQL se poate dovedi a fi o alegere valoroasă pentru îmbunătățirea proceselor de producție în industria modernă.

Creșterea adâncimii de așchiere conduce la generarea de rugozități cu valori mari de până la 4.5 µm.

Din analiza comparativă cu celelalte medii de prelucrare reprezentate prin linii putem spune că prelucrearea crioMQL (fig. 76) înregistrează abateri la planeitate care sunt comparabile cu cele ale prelucrării MQL, dar cu o tendință spre o variabilitate mai mare. Aceasta sugerează că, deși combinarea răcirii criogenice cu lubrifierea MQL poate oferi beneficii în termeni de duritate și uzură a sculei, controlul planeității poate fi o provocare și necesită optimizare suplimentară.

- **Analiza prin metoda Pearson a prelucrării al aluminiului 99.9% în mediu combinat crio + MQL**

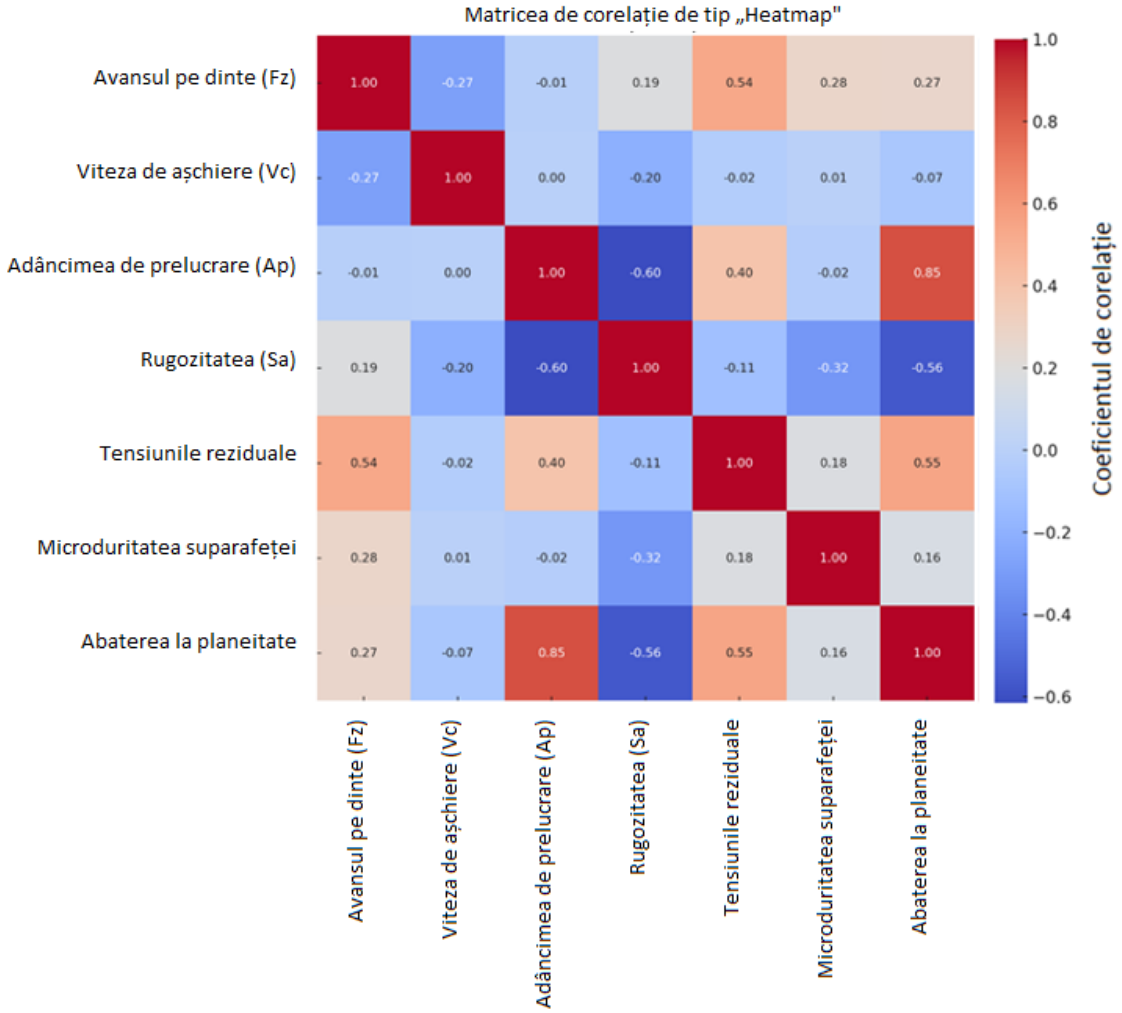


Figura 27 Matricea de corelație pentru prelucrarea criogenică + MQL a aluminiului 99.9%

Din analiza matriceală prezentată în figura 73 pot fi stabilite câteva interdependențe între parametrii de prelucrare astfel:

Avans pe dinte (fz)

Influența asupra rugozității Sa: Observăm o corelație relativ slabă (0.19) care sugerează faptul că există o ușoară creștere a rugozității suprafeței pe măsură ce avansul pe dinte crește. Acest lucru indică faptul că, pentru a obține rugozități mai bine, avansul pe dinte ar trebui gestionat cu atenție.

Influența asupra tensiunilor reziduale: Observăm o corelație îmbunătățită (0.54): În cee ace privește relația cu tensiunile reziduale; Aceasta indică faptul că o creștere a avansului pe dinte este asociată cu o creștere a tensiunilor reziduale. Din această interacțiune putem deuce că în procesele în care tensiunile reziduale sunt o preocupare, avansul ar trebui optimizat pentru a minimiza efectele adverse.

Influența asupra abaterii în plan: Observăm o corelație moderată (0.27) între avansul pe dinte și abaterea în plan indicând faptul că o creștere a avansului ar putea afecta abaterea în plan.

Adâncime de așchiere (ap)

Influența asupra abaterii în plan: Observăm o corelație puternic pozitivă (0.85) lucru care indică faptul că pe măsură ce crește adâncimea de prelucrare tinde să crească și abaterile la planeitate, ceea ce poate afecta precizia dimensională.

Influența asupra rugozității Sa: Observăm o corelație puternic negativă (-0.60) Lucru care sugerează faptul că o adâncime de prelucrare mai mare poate reduce rugozitatea, ceea ce ar putea fi benefic pentru obținerea unei suprafețe cu rugozitate scăzută.

Corelații posibile în mediul combinat la prelucrarea aluminiului 99.9%

Între **rugozitatea Sa** și **tensiunile reziduale** se observă o corelație slab negativă (-0.11) lucru care ar indica o relație inversă, între rugozitatea suprafeței și tensiunile reziduale, sugerând că modificările în rugozitate nu afectează semnificativ tensiunile reziduale.

Între **rugozitatea Sa** și **abatera la planeitate** observăm o corelație negativă moderată (-0.56) lucru care sugerează o legătură inversă moderată, indicând că o suprafață mai netedă tinde să fie asociată cu abateri mai mici de la planitate.

Avansul pe dinte și **adâncimea de prelucrare** sunt cei mai influenți factori asupra variabilelor de ieșire, având un impact semnificativ asupra calității suprafeței și preciziei dimensionale.

Ajustarea parametrilor de avans pe dinte și adâncime de prelucrare poate îmbunătăți atât calitatea suprafeței, cât și precizia dimensională, fiind esențială pentru obținerea rezultatelor dorite în procesul de fabricație.

3.1.1.1. Concluzii referitoare la prelucrarea materialului Al 99.9%

Datorită purității sale ridicate, acest tip de aluminiu prezintă o conductivitate electrică și termică superioară, rezistență excelentă la coroziune și o prelucrare ușoară. În cadrul procesului de prelucrare, este esențial să se mențină condiții stricte pentru a evita impuritățile și pentru a optimiza caracteristicile finale ale materialului. Aceste aspecte fac din aluminiul 99.9% un material ideal pentru aplicații în industrii de înaltă tehnologie, precum cea aerospațială și electronică. În urma studiului experimental al prelucrării prin alchiere în diverse medii de lucru am putea concluziona astfel:

Parametrii de prelucrare cât și mediul de lucru au influențat în masură mai mică sau mai mare caracteristicile de calitate ale suprafeței. Din analiza efectuată asupra aluminiului 99.9 % au fost observate urmatoarele aspecte, astfel:

- Avansul pe dinte urmat de adâncimea de prelucrare sunt parametrii cu cea ma mare influență asupra caracteristicilor de calitate generate; în funcție de mediul de lucru, varierea acestora a condus în general la corelații puternic pozitive.
- Creșterea vitezei de avans a condus la creșterea valorii rugozității și a abaterilor in plan;
- O creștere a avansului de prelucrare pare sa aiba o corelatie moderat negativa în relație cu distributia tensiunilor reziduale, în sensu la că, în general creșterea vitezei de avans a consdus la obținerea de tensiuni de compresiune în stratul superficial;
- Adânacimile de prelucrare egale cu 0.1 mm au generat în cazul acestui material „moale" valori relativ mari ale rugozităților cât și ale abaterilor în plan; acest comportament este pus pe seama fenomenului de ecruisare a suprafeței, al adeziunii așchiilor cu grosime foarte mică cât și a creșterii temperaturii în zona de contact (așchiile fiind mici cantitatea de căldură purtată fiidn proportional mai mică);
- Cele mai mari influențe ale adâncimii de prelucrare se observă asupra abaterilor în plan; masa de material îndepartata combinată cu viteza de avans conduce la dezvoltarea forțelor și a căldurii, care la rândul lor vor conduce la „destabilizarea" termică pe suprafața a materialului prelucrat și implicit la creșterea valorilo abaterilor în plan.

  Mediul de lucru influențează foarte mult atât amplitudinea valorilor căt și sensul acestora (în cazul tensiunilor reziduale) . Practic, la o anliza / parametru putem observa următoarele aspecte, astfel:
- Rugozitatea înregistrează valorile cele mai mari la prelucrarea în mediul uscat. Acest comportament este pus pe seama aderenței așchilor moi pe suprafața sculei așchietoare cât și pe suprafața prelucrată. Un comportament similar este generat de prelucrarea în mediul

criogenic. La temperaturi criogenice, aluminiul poate deveni mai dur și mai fragil. Această întărire a suprafeței poate duce la formarea de microfisuri în timpul prelucrării, ceea ce contribuie la creșterea rugozității. Uilizarea lichidelor de racire ungere in sistem MQL conduce la scaderea valorilor rugozitatilor in general. Varianta optimă pare a fi data de combinația CRIO-MQL care combină atât contractarea și fragilizarea materialului cât și buna lubrifiere generată prin MQL. Acest fapt conduce la diminuarea fenomenului de adeziune, cât și la reducerea temperaturii în zona de contact sculă-semifabricat, astfel obținandu-se rezultate optime.

- Abaterea în plan are valori mari atât în cazul prelucrării în mediul uscat, cât și în cazul utilizării prelucrărilor în mediul criogenic. Datorită adeziunilor și a smulgerilor de pe suprafața materialului, pe alocuri apar valori mari neconforme care nu pot fi neapărat corelate cu viteza de avans sau adâncimea de prelucrare ci doar cu comportamentul materialului și compoziția chimică a acestuia. Utilizarea lichidelor de răcire/lubrifiere cât și a combinației acestora conduce la obținerea abaterilor cu valorile cele mai reduse. În continuare factorul decisiv în cazul acestora (indiferent de mediul de prelucrare) va fi masa de material îndepartata (adâncimea de prelucrare).
- Teniunile reziduale sunt afectate de mecanismul de generare mecanic/termic care le afecteaza sensul și amplitudinea în mod direct. Astfel, un mecanism în care extremele (caldura/afectare mecanica) “primeaza” conduce la valori mici de compresiune și apariția valorilor de întindere (prelucrarea uscată și prelucrarea criogenică); pe de altă parte o prelucrare în mediu de “răcire/lubrifiere” cu MQL sau combinat crio-MQL conduce scăderea valorilor tensiunilor către compresiune (MQL) sau chiar trecerea aproape în totalitate în compresiune în cazul folosirii regimului combinat crio-MQL.
- Microduritatea în cazul utilizării unui regim “soft “de prelucrare pare să fie afectata major doar la răcirea în mediul criogenic care, probabil datorită efectelor de răcire extrem de rapidă, conduc la modificarea structurii materialului, generand un astfel de comportament (creșterea microdurității).

Per ansamlu, referindu-ne la mediile de răcire putem spune că o combinație între răcirea criogenică și MQL, crioMQL, pare să fie o metodă promițătoare, oferind un echilibru între controlul temperaturii și lubrifiere, ceea ce duce la îmbunătățirea calității suprafeței. Aceasta poate fi o opțiune valoroasă pentru aplicații care necesită atât temperaturi scăzute cât și un finisaj de suprafață de înaltă calitate.

Deși crioMQL poate oferi un finisaj superior, trebuie evaluate costurile asociate cu echipamentul criogenic și consumabilele pentru MQL. Analiza cost-beneficiu va determina dacă economiile din uzura redusă a uneltei și calitatea îmbunătățită a produsului justifică investiția inițială.

În concluzie, in cazul acestui material, crioMQL reprezintă o metodă promițătoare pentru a atinge un echilibru optim între eficiența răcirii și eficacitatea lubrifierii, conducând la îmbunătățiri semnificative ale calității suprafeței prelucrate. Aceasta metodă oferă un avantaj competitiv, mai ales în industria de prelucrare a metalelor unde calitatea finisajului este crucială.

Rezultatele experimentale la prelucrarea aliajului de aluminiu 2017

Influența parametrilor de prelucrare asupra caracteristicilor de calitate ale suprafeței la prelucrarea în mediu uscat

Influența parametrilor de prelucrare asupra caracteristicilor de calitate ale suprafeței la prelucrarea cu MQL +LN_2

- **Influența asupra rugozității suprafeței**

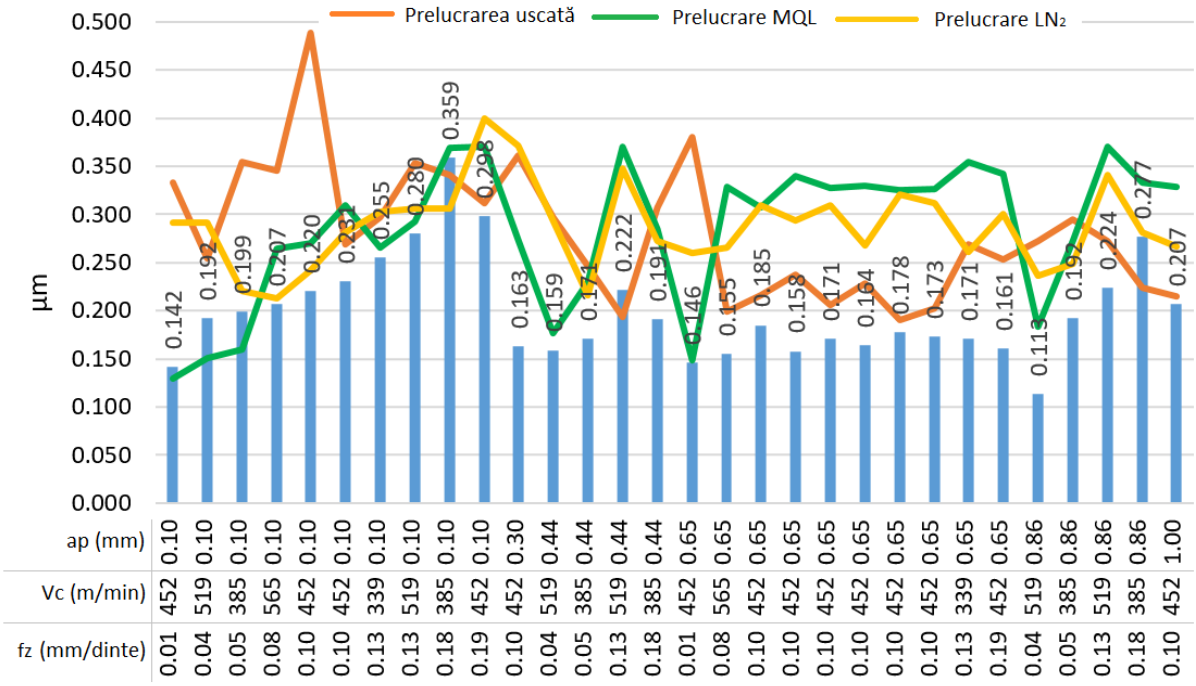


Figura 28 Graficul rugozității pentru aliajul de aluminiu 2017 - azot lichid + MQL

Din analiza datelor prezentate mai sus observăm următoarele aspecte (fig. 91):

- Creșterea vitezei de avans conduce la o creștere a valorilor rugozității;

- Prin comparație cu celelalte medii de prelucrare, observăm o scădere a valorilor rugozităților;
- Spre deosebire de celelalte metode, în cazul utilizării avansurilor mici, obținem valorile cele mai mici ale rugozității, lucru care confirmă utilitatea combinației materialului fragilizat cu lubrifiereza acestuia;
- CrioMQL prezintă cea mai mică variabilitate în rugozitatea suprafeței și, în general, cele mai scăzute valori. Acest lucru sugerează că combinația dintre răcirea intensă a azotului lichid și lubrifierea MQL este foarte eficientă în producerea unei suprafețe netede și uniforme.

- **Influența asupra tensiunilor reziduale pe suprafață**

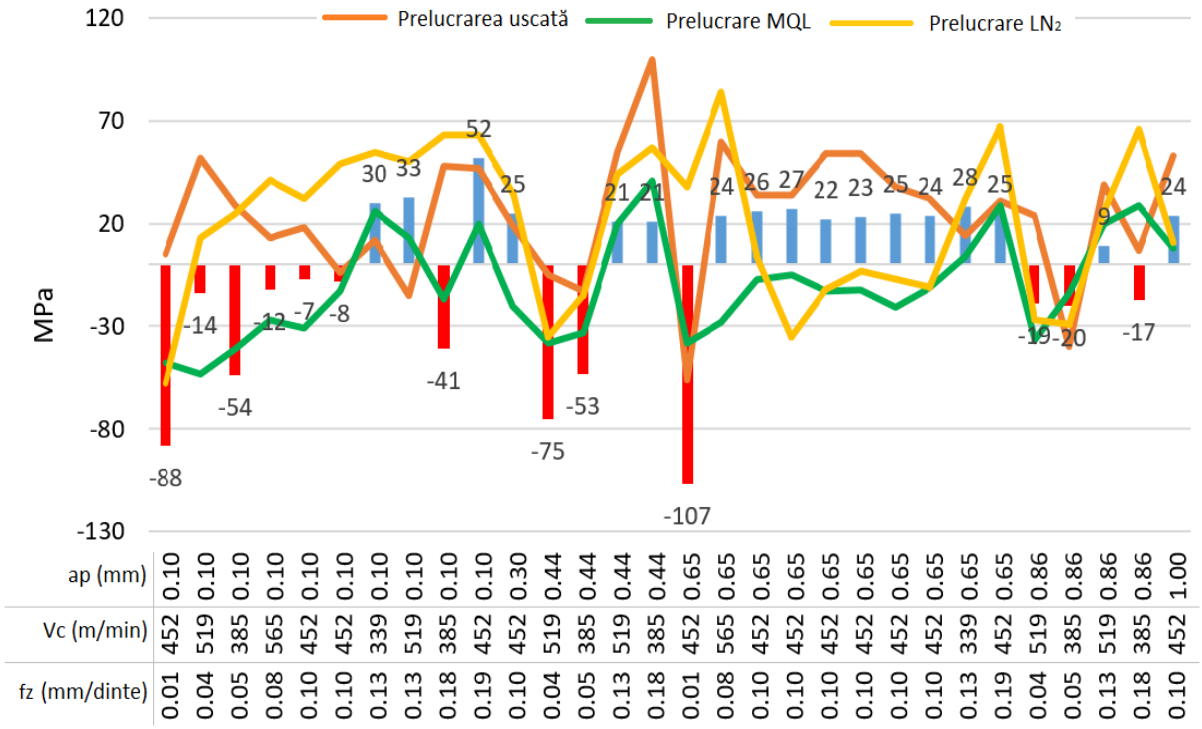


Figura 29 Graficul tensiunilor reziduale aliajul de aluminiu 2017 - azot lichid + MQL

Din analiza graficului de mai sus (fig. 92) se observă următoarele aspecte:

- Utilizarea acestui mediu de lucru generează comportamente similare cu mediul de prelucrare MQL sau uscat în funcție de mecanismul care stă la baza producerii tensiunilor (mecanic sau termo-mecanic);
- La utilizarea adâncimilor de prelucrare de 0.1 mm sunt generate tensiuni cu valori generale de compresiune, lucru care sugerează o influență mai accentuată a modelului mecanic;
- Creșterea adâncimii de prelucrare conduce la schimbarea sensului tensiunilor în tensiuni de întindere;

- Utilizarea avansurilor foarte mici (0.01 mm/dinte) conduce la apariția „mecanică” a tensiunilor de compresiune cu valoare mare;

- **Influența asupra micodurității suprafeței**

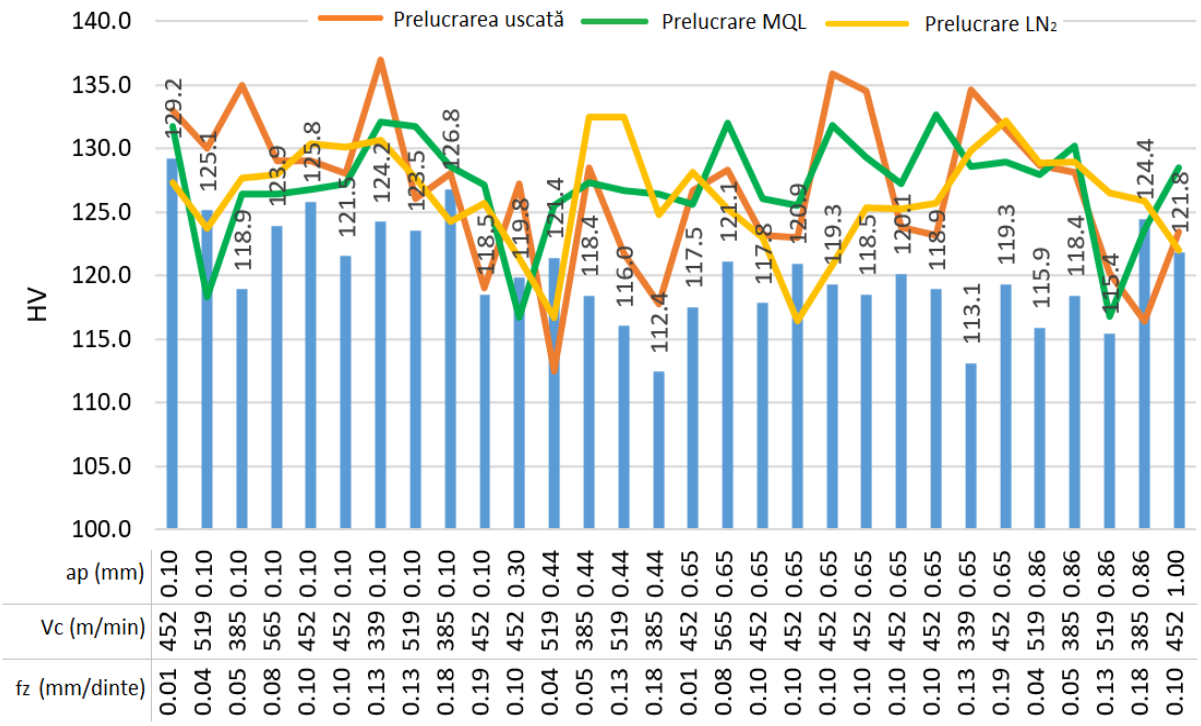


Figura 30 Graficul microdurității la aliajul de aluminiu 2017 - azot lichid + MQL

Din analiza datelor prezentate în figura 93 observăm faptul că microduritatea obținută prin crioMQL este relativ constantă, cu valori care variază între aproximativ 112 HV și 129.4 HV.

Deși crioMQL oferă o suprafață foarte uniformă și stabilă, microduritatea mai scăzută indică faptul că această metodă ar putea fi mai puțin eficientă în aplicarea unui tratament de întărire superficială comparativ cu celelalte metode. Acest lucru ar putea fi avantajos sau dezavantajos în funcție de cerințele aplicației specifice.

Microduritatea mai scăzută în crioMQL sugerează un control excelent al căldurii generate în timpul prelucrării, ceea ce reduce stresul termic și evită întărirea superficială nedorită. Aceasta ar putea fi benefică în aplicațiile unde se dorește o suprafață mai moale și uniformă pentru prelucrări ulterioare sau pentru a preveni fisurarea sau deteriorarea prematură.

Dacă aplicația necesită o suprafață cu microduritate mai mare pentru a rezista mai bine la uzură, alte metode precum prelucrarea uscată sau prelucrarea criogenică fără MQL ar putea fi mai potrivite.

În schimb, dacă uniformitatea și prevenirea supraîncălzirii sunt prioritare, crioMQL ar putea fi alegerea ideală.

- **Influența asupra abaterii la planeitate**

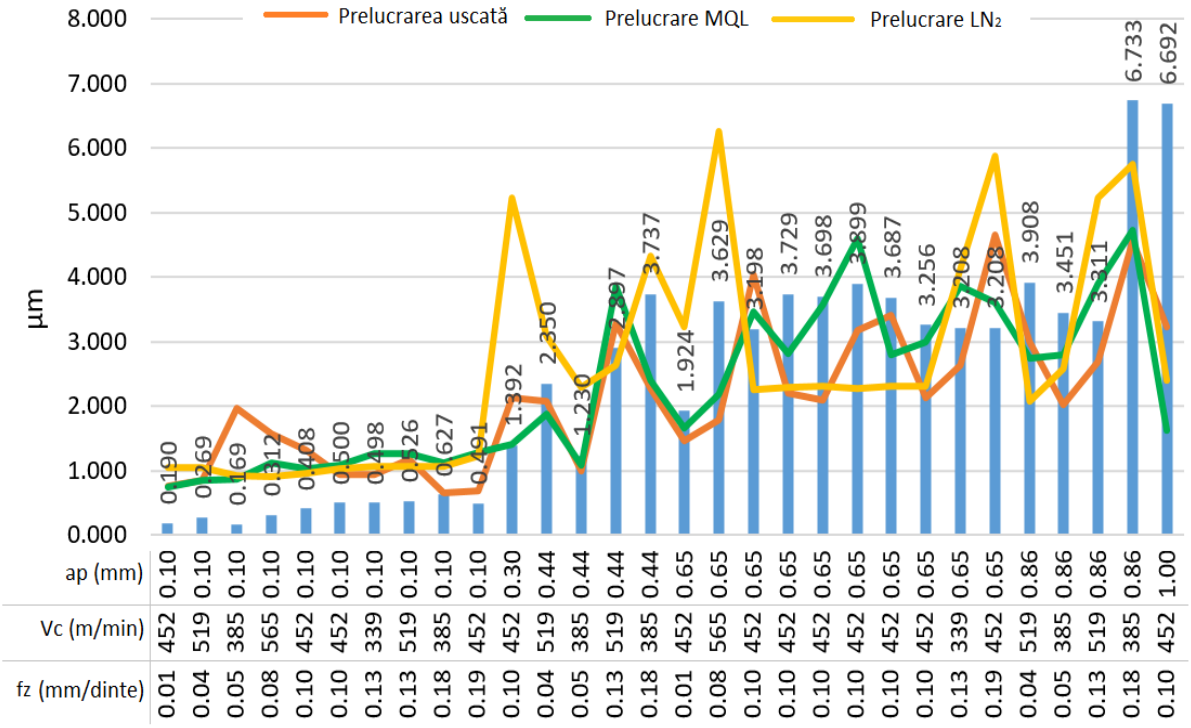


Figura 31 Graficul abaterii la planeitate la aliajul de aluminiu 2017 – azot lichid + MQL

Din analiza datelor prezentate în figura 94 observăm că creșterea vitezei de avans și a adâncimii de prelucrare conduce la o creștere a valorilor abaterii în plan. Mediul de lucru crioMQL tinde să genereze abateri mai mari la planeitate (fig. 92) la adâncimi de așchiere mai mari și viteze ridicate, ceea ce poate sugera o limitare a acestei metode în a menține planeitatea la parametrii extremi de prelucrare.

În general, crioMQL oferă abateri la planeitate care sunt comparabile cu cele ale MQL și LN2, dar nu reușește întotdeauna să mențină planeitatea mai bine decât prelucrarea uscată, în special la setări de parametri mai intensivi.

Alegerea crioMQL ar trebui să fie bazată pe necesitățile specifice ale aplicației, având în vedere că, deși poate oferi avantaje semnificative în alte aspecte (cum ar fi microduritatea și stabilitatea tensiunilor reziduale), poate necesita ajustări pentru a minimiza abaterile la planeitate la adâncimi și viteze de tăiere mai mari.

- **Analiza prin metoda Pearson a prelucrării aliajului de aluminiu 2017 în mediul LN2+MQL**

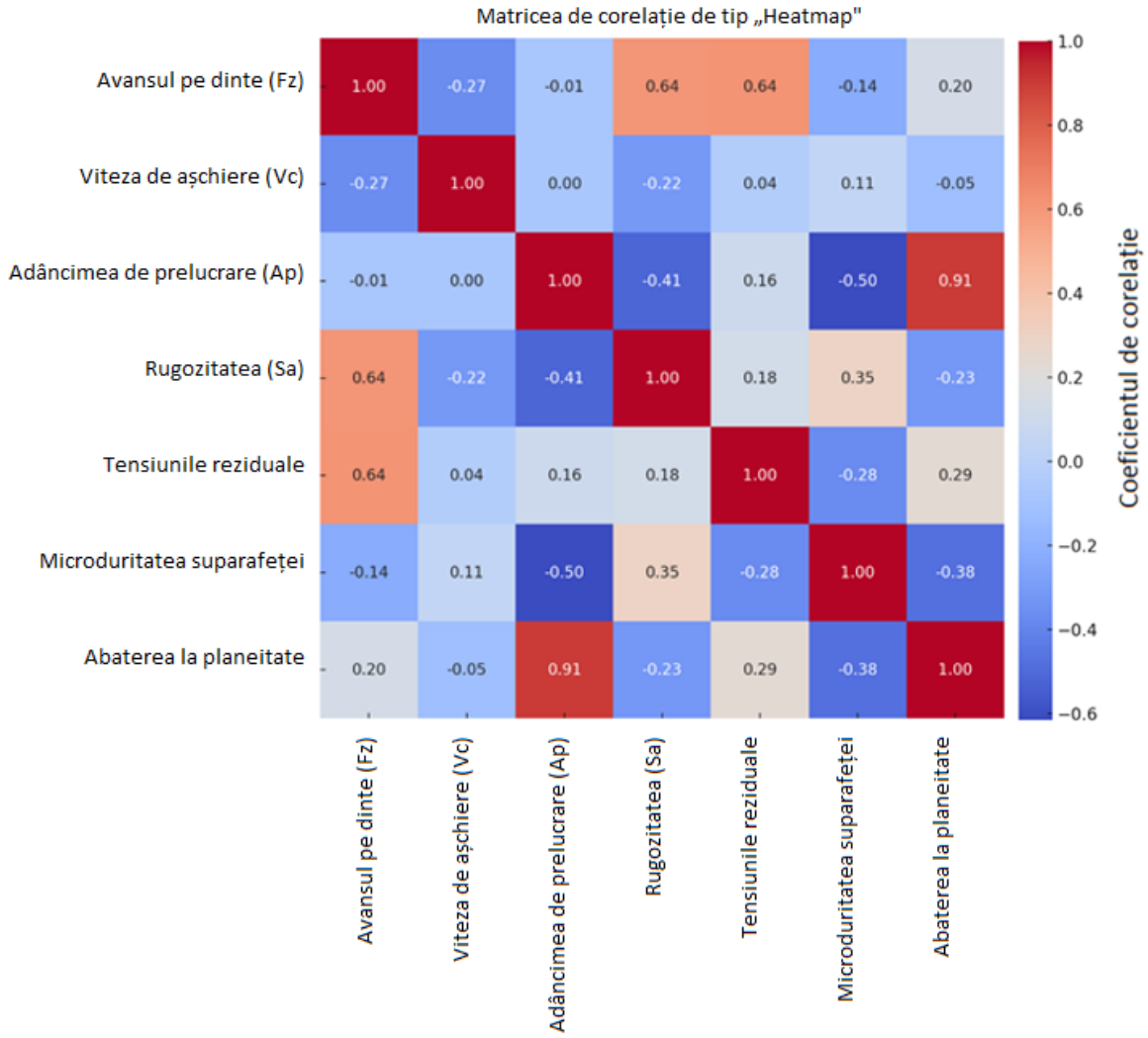


Figura 32 Matricea de corelație pentru prelucrarea criogenică + MQL a aliajului de aluminiu 2017

Din analiza matriceală prezentă în figura de mai sus pot fi stabilite câteva interdependențe între parametrii de prelucrare, astfel (fig. 95):

Avansul pe dinte (fz)

Influența asupra rugozității Sa și tensiunilor reziduale: Observăm o corelație puternică pozitivă (0.64), care indică faptul că un avans pe dinte mai mare poate fi asociat cu o rugozitate mai mare a suprafeței și tensiuni reziduale cu valori mari.

Adâncime de așchiere ap (mm)

Influența asupra abaterii în plan: Observăm o corelație foarte puternică (0.91) care arată faptul că abatere mai mare de la planitate este strâns legată de adâncimea mai mare de prelucrare .

Rugozitatea suprafeței (Sa)

Influența asupra microduritatății: Observăm o corelație ușor negativă (-0.41), care sugerează că o rugozitate mai mare a suprafeței conduce la o scădere a concentratorului de tensiune asociată cu o duritate mai scăzută.

Corelații posibile în mediul MQL+LN_2 la prelucrarea aliajului de aluminiu 2017

Avansul pe dinte și **adâncimea de prelucrare** sunt variabile cheie care influențează semnificativ mai multe caracteristici ale rezultatelor, inclusiv rugozitatea, tensiunile reziduale și abaterile de la planeitate.

Ajustările acestor parametri de intrare pot fi folosite pentru a controla și optimiza calitatea și caracteristicile pieselor prelucrate.

3.1.1.2. Concluzii referitoare la prelucrarea aluajului de aluminiu 2017

Aliajul de aluminiu 2017 este un material de înaltă rezistență, utilizat în industria aeronautică. Acesta face parte din seria de aliaje 2000, care sunt aliaje de aluminiu – cupru, cunoscute pentru duritatea lor. Combinația cu cuprul face ca acest aliaj să aibă și o conductivitate termică crescută (aluminiu 235 W/mK; cuprul 400 W/mK), lucru care conduce la un bun comportament la variații mari de temperatură. Aceste aspecte fac din aliajul de aluminiu 2017 un aliaj ideal pentru aplicații precum cea aerospațială.

În urma prelucrărilor experimentale, au fost observate următoarele aspecte:

Parametrii de prelucrare, cât și mediul de lucru, influențează caracteristicile de calitate ale suprafeței:

- Avansul pe dinte urmat de adâncimea de prelucrare sunt parametrii cu cea ma mare influență asupra caracteristicilor de calitate generate; în funcție de mediul de lucru, varierea acestora a condus în general la corelații puternic pozitive.
- Creșterea vitezei de avans a condus la creșterea valorii rugozității și a abaterilor in plan;
- O viteză de avans foarte mică (0.01 mm/dinte) conduce la generarea de tensiuni reziduale cu valori de compresiune; un comportament similar este observat și în cazul avansurilor de până la 0.05 mm/dinte;
- Viteza de prelucrare Vc afectează în foarte mică măsură parametrii de ieșire;
- Adâncimile de așchiere egale cu 0.1 mm au generat și în cazul acestui material valori relativ mari pentru rugozități, comparativ cu celelalte adâncimi; acest comportament este pus pe seama fenomenului de tasare al suprafetei, al adeziunii așchiilor cu grosime foarte mică cât și a creșterii temperaturii în zona de contact (așchiile fiind de secțiuni mici, cantitatea de căldură purtată fiind proportional mai mică);
- Adâncimile de prelucrare influențează abaterile în plan, observându-se că odată cu creșterea adâncimilor de prelucrare cresc și valorile abaterilor. Cele mai mari valori ale abaterilor în plan sunt înregistrate în toate mediile de lucru la adâncimi de așchiere egale cu 0.86 – 1 mm (până la 6,733 μm);

Mediul de lucru influențează în cazul acestui material, atât forma, sensul și distribuția caracteristicilor de calitatet cât și amplitudinea acestora. La o analiză atentă asupra fiecărui parametru putem concluziona astfel:

- Rugozitatea. În funție de mediul de lucru observăm că dispunerea valorilor rugozității poate fi afectată atât ca amplitudine cât și ca omogenizare. Utilizarea mediului de prelucrare uscat arată că materialul are o compoziție chimică favorabilă acestei metode, lucru care conduce la valori aproximativ constante (pentru planul experimental utilizat). În cazul prelucrării uscate sunt obținute valori de aproximativ 0.4 μm, cu o tendință usor descrescătoare odată cu creșterea adâncimii de prelucrare. Utilizarea mediului MQL conduce la o schimbare a dispunerii rugozității. Față de mediul uscat observăm o scădere generală a valorilor rugozităților până la 0.119 μm, cu mențiunea că distribuția valorilor nu mai este la fel de uniformă ca în cazul prelucrărilor uscate. Utilizarea criogeniei conduce la o dispunere aproximativ constantă, predictibilă a valorilor rugozității. Valorile generate la prelucrarea crio față de uscat coboară cu mai mult de 0.1 μm. Utilizarea combinației crio+MQL conduce la același „tablou” de dispunere ca în cazul utilizării MQL în care valorile de la criogenie vor fi în general reduse, dar cu valori greu de intuit.

- Abaterea în plan . Utilizarea mediului de lucru uscat a generat valorile cele mai mici ale abaterii. Ca și în cazul celorlalte medii, valoarea abaterii va fi influențată de creșterea adâncimii de prelucrare. Utilizarea mediului uscat pare sa aibă valori ușor mai mari doar atunci când adâncimea de prelucrare este egală cu 0.1 mm. În acest caz creîndu-se temperatură, se amplifică fenomenul de depunere pe suprafață. Trecerea la mediul MQL oferă valori în general, ușor mai mari decât valorile generate la prelucraera uscată. Utilizarea mediului criogenic determină, în general, creșterea valorilor abaterii la planeitate. Utilizarea metodei combinate de răcire-ungere MQL și criogenie conduce la o scădere generală a valorilor abaterii, apropiată de cele generate în mediul uscat.
- Teniunile reziduale În cazul tensiunilor mediul de lucru pare să afecteze sensul de distribuție al acestora. Din analiza datelor observăm că la prelucrarea uscată cu viteze de avans mici vom obține tensiuni reziduale de întindere cu valori mari. În general, prelucrarea uscată conduce la valori pozitive (de întindere) ale tensiunilor în stratul superficial. Utilizarea MQL conduce pentru majoritatea regimurilor de prelucrare la formarea de tensuni reziduale de compresiune. Utilizarea mediului criogenic schimbă sensul de distribuție generală al tensiunilor și ne oferă valori de întindere mai mari chiar și decât în cazul prelucrării uscate. Cea mai bună distribuție, compresivă, cu valorile negative cele mai mari, este dată de utilizarea mediului de lucru crioMQL. Acest mediu în combinație cu viteze de avans mici conduce la valori mari de compresiune în stratul superficial al piesei.
- Microduritatea suprafeței se menține aproximativ constantă, mediile de prelucrarea adăugate, conducând în general la o scădere a valorilor acesteia. Prelucrarea în mediul uscat conduce la cele mai mari valori ale microdurității (137 HV) în condițiile în care utilizăm adaosuri mici de prelucrare (0.1 mm). Utilizarea metodei MQL va genera aproximativ aceleași valori, cu mențiunea că în cazul adâncimilor mici de prelucrare, va conduce la obținerea de durități mai mici. Aplicarea mediului criogenic scade duritatea în stratul superficial, sub valorile conferite de MQL și prelucrarea uscată. Cele mai mici durități sunt generate la prelucrarea combinată crioMQL.

Per ansamlu, referindu-ne la mediile de răcire observăm că fiecare mediu în parte conduce la un alt timp de comportament al acestui material. Mediile fără lubrifiere (uscat, criogenic) conduc la rezultate omogene (în condițiile experimentale utilizate), ușor predictibile. Deși utilizarea MQL sau combinația criogenie cu MQL conduce la valori mai mici, faptul că acestea nu sunt constante face dificilă găsirea unei combinații optime a parametrilor regimului de prelucrare.

În concluzie, in cazul acestui material, prelucrarea uscată și/sau în mediul criogenic reprezintă o metodă promițătoare pentru a atinge un echilibru optim.

Rezultatele experimentale la prelucrarea aliajului de aluminiu 7075

Prelucrarea aliajului de aluminiu 7075 cu metoda crioMQL

- **Influența parametrilor asupra rugozității suprafeței**

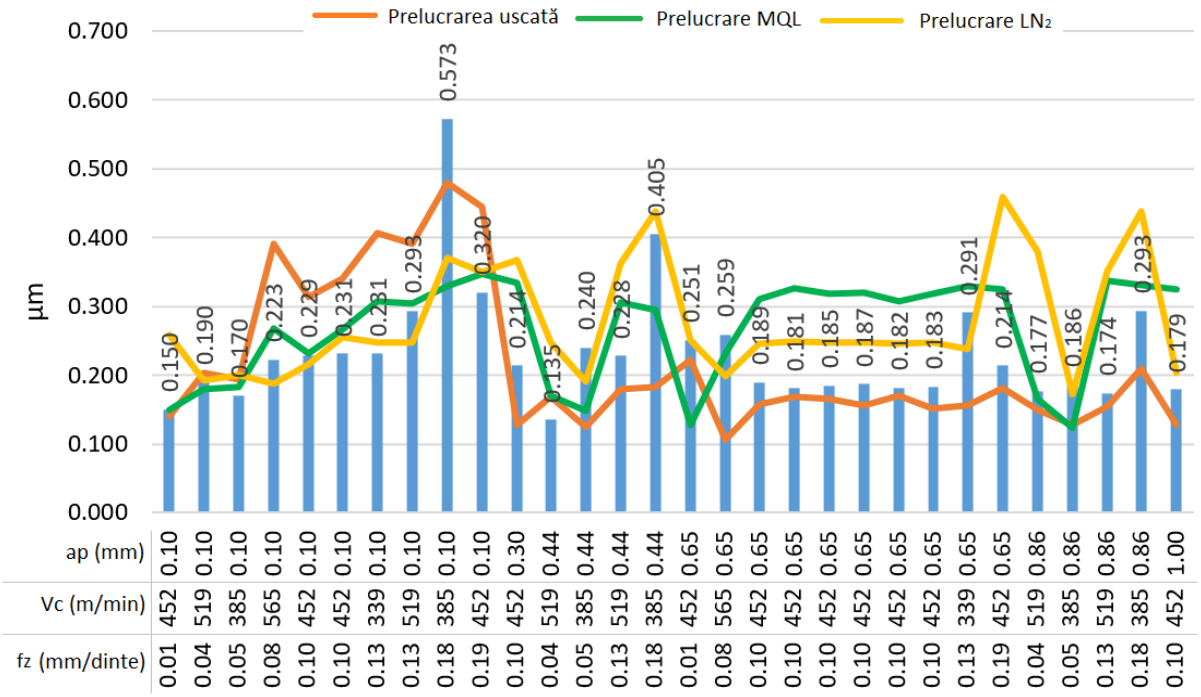


Figura 33 Graficul rugozității pentru aliajul de aluminiu 7075 - azot lichid + MQL

Din analiza datelor prezentate în figura 111 observăm faptul că rugozitatea pentru crioMQL este destul de constantă și relativ scăzută în comparație cu celelalte metode, indicând o suprafață netedă și uniformă.

Această metodă pare să ofere cele mai bune rezultate în ceea ce privește rugozitatea, ceea ce sugerează că combinația dintre răcirea criogenică și lubrifierea minimă este foarte eficientă în reducerea rugozității suprafeței.

Creșterea vitezei de avans pe dinte conduce la creșterea valorilor rugozității.

Utilizarea avansurilor mari pe dinte (0.18 mm/dinte) produce în acest caz cele mai mari valori ale rugozităților.

- **Influența parametrilor asupra tensiunilor reziduale pe suprafață**

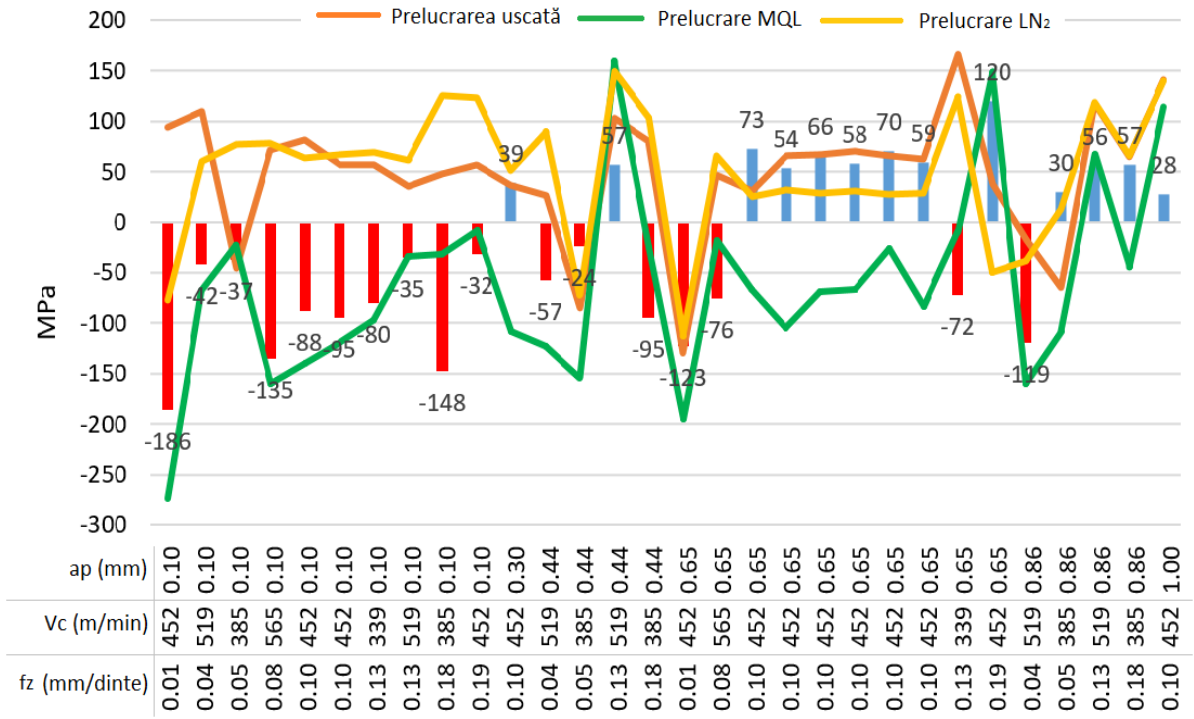


Figura 34 Graficul tensiunilor reziduale pentru aliajul de aluminiu 7075 - azot lichid + MQL

Din analiza datelor prezentate mai sus (fig. 112) observăm faptul că tensiunile induse au valori similare cu prelucrarea în mediul MQL. Creșterea vitezei de avans conduce la o scădere a valorilor tensiunilor reziduale.

Utilizarea adâncimilor mari de prelucrare (mai mari decât 0.65 mm) conduce la schimbarea în general a tipului de tensiuni în stratul superficial.

Utilizarea vitezelor de avans foarte mici (0.01 mm/dinte) conduc la generarea de tensiuni compresive cu valori foarte mari.

- **Influența parametrilor asupra micodurității suprafeței**

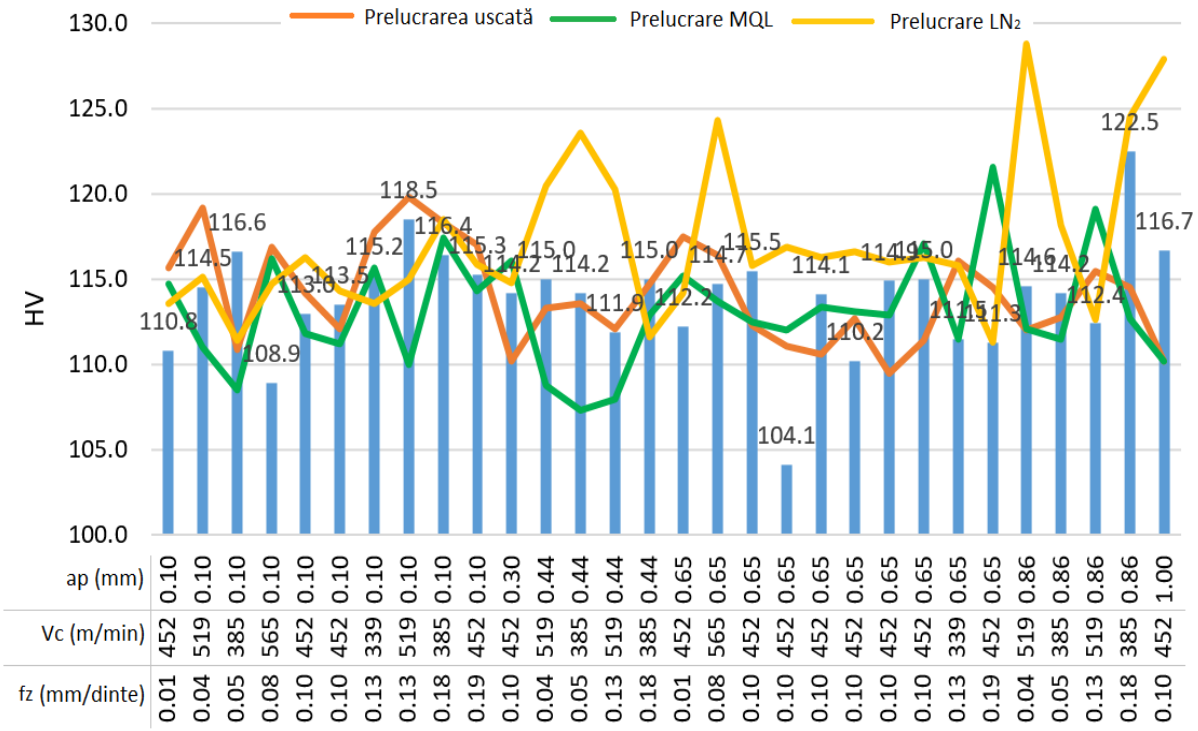


Figura 35 Graficul microdurității la aliajul de aluminiu 7075 - azot lichid + MQL

Din analiza datelor prezentate mai sus (fig. 113) observăm faptul că valorile microdurității obținute prin CrioMQL sunt relativ constante, variind între aproximativ 108.1 HV și 118.5 HV, cu excepția unei valori foarte mici și una foarte mari față de media microdurității (fig. 103).

Această consistență indică faptul că CrioMQL oferă un control bun asupra microdurității suprafeței, ceea ce sugerează o stabilitate în procesul de prelucrare și o protecție eficientă a materialului împotriva supraîncălzirii și a uzurii.

CrioMQL se evidențiază din nou ca metoda optimă pentru obținerea unei microdurități ridicate și consistente, ceea ce indică o suprafață bine protejată și stabilă. În comparație, prelucrarea cu azot lichid și MQL oferă rezultate bune, dar cu mai multe fluctuații. Prelucrarea uscată, deși eficientă în creșterea microdurității, poate duce la o suprafață mai fragilă, ceea ce trebuie luat în considerare în funcție de aplicația finală a piesei.

- **Influența parametrilor asupra abaterii la planeitate**

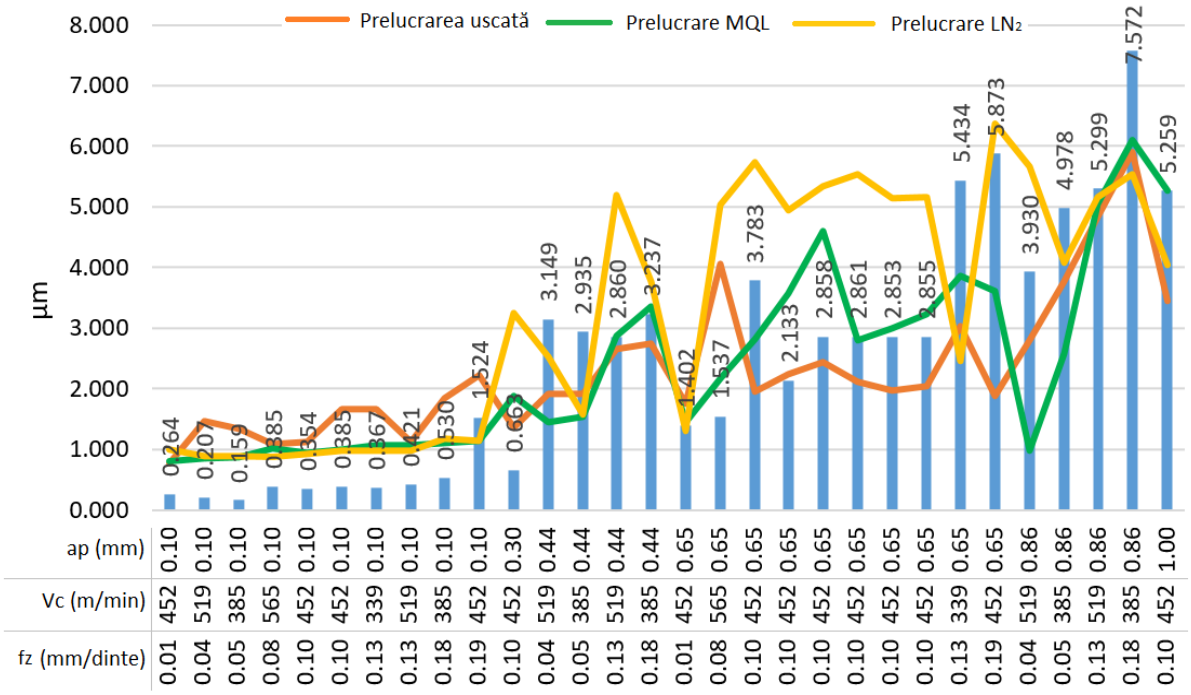


Figura 36 Graficul abaterii la planeitate la aliajul de aluminiu 7075 – azot lichid + MQL

Din analiza datelor prezentate mai sus (fig. 114) observăm faptul că abaterile la planeitate pentru CrioMQL sunt relativ scăzute și constante la adâncimi de tăiere mici, dar cresc semnificativ la adâncimi mai mari.

În general, CrioMQL oferă o suprafață cu o planeitate mai bună la adâncimi mici și moderate de tăiere, dar tinde să piardă această consistență la adâncimi mai mari și la avansuri pe dinte mai mari.

Tendința abaterii la planeitate în CrioMQL, mai ales la parametri de prelucrare agresivi, seamănă cu cea observată în prelucrarea uscată. Aceasta sugerează că, în anumite condiții, avantajele CrioMQL în menținerea planeității pot fi limitate, iar comportamentul poate deveni similar cu prelucrarea uscată. Cu toate acestea, CrioMQL oferă avantaje clare la parametri de prelucrare mai moderați, unde poate menține o planeitate mai bună și mai constantă decât prelucrarea uscată.

- **Analiza prin metoda Pearson a prelucrării aliajului de aluminiu 7075 în mediul MQL+LN_2**

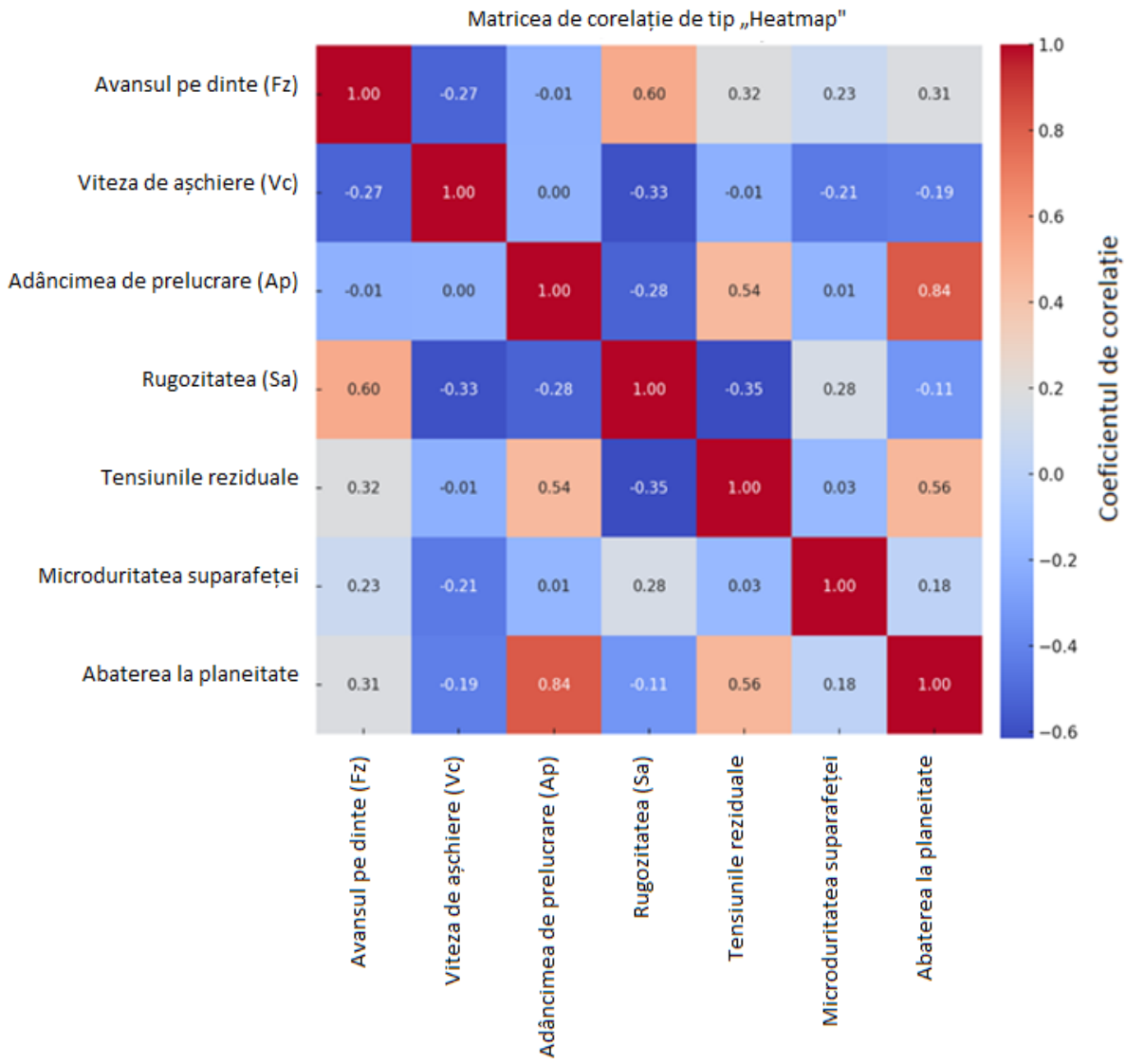


Figura 37 Matricea de corelație pentru prelucrarea criogenică a aliajului de aluminiu 7075

Din analiza matriceală prezentă în figura de mai sus pot fi stabilite câteva interdependențe între parametrii de prelucrare, astfel (fig. 115):

Avansul pe dinte fz (mm/dinte)

Influența asupra rugozității Sa: Observăm o corelație puternic pozitivă (0.60) care sugerează că un avans pe dinte mai mare duce la o creștere a rugozității suprafeței. Acest lucru poate fi problematic pentru finisare, indicând necesitatea unei ajustări delicate a avansului în funcție de cerințele de suprafață.

Adâncime de așchiere ap (mm)

Influența asupra abaterii la planeitate (µm): Observăm o corelație extrem de puternică (0.84) demonstrând că o adâncime mai mare de prelucrare crește semnificativ abaterea de la planitate. Acest lucru poate influența negativ toleranțele dimensionale și poate necesita strategii de compensare în procesul de producție.

Corelații posibile în mediul MQL+LN_2 la prelucrarea aliajului de aluminiu 7075

Între **tensiunile reziduale** și **rugozitatea Sa**: Observăm o corelație pozitivă moderată (0.54) între aceste variabile care sugerează că modificările în procedurile de prelucrare care influențează tensiunile reziduale pot avea de asemenea și un impact asupra finisajului suprafeței.

Controlul **avansului pe dinte** și **adâncimii de prelucrare:** Având în vedere impactul lor semnificativ asupra calității suprafeței și abaterii de la plan, acești parametri ar trebui optimizați cu atenție pentru a atinge cerințele specifice ale produsului.

3.1.1.3. Concluzii referitoare la prelucrarea aluajului de aluminiu 7075

Aliajul de aluminiu 7075 este unul dintre cele mai utilizate materiale în industria aeronautică. Prezența elementelor de aliere, zinc (peste 5%), magneziu (peste 3%), face ca acest aliaj să fie rezistent atât din punct de vedere mecanic cât și la coroziune. Prezența cuprului în aliaj conferă materialului o creștere a coeficientului de transfer termic (cu 400 w/mk) lucru care conduce la un comportament mai stabil în cazul utilizării regimurilor ce impun variații de temperatura.

În urma prelucrărilor experimentale în diverse medii de lucru am putea concluziona astfel:

Parametrii de prelucrare cât și mediul de lucru au influențat caracteristicile de calitate ale suprafeței. Din analiza efectuata asupra aliajului de aluminiu 7075 au fost oservate urmatoarele aspecte, astfel:

- Avansul pe dinte. Creșterea vitezei de avans conduce la creșterea valorilor parametrilor de calitate ai suprafeței (rugozitate, tensiuni, abateri la planeitate). Utilizarea vitezelor de avans

mari (0.18 - 0.19 mm/dinte) conduce la obținerea celor mai mari rezultate în cazul rugozității și a tensiunilor reziduale (până la 0.573 µm, respectiv +120 MPa/-140 MPa).

- Viteza de așchiere. În cazul acestui parametru nu putem face o corelație a influenței asupra caracteristicilor de suprafață, deoarece setul de date utilizat nu sunt suficient de diferiți pentru a pune în valoare acest aspect.
- Adânacimile de prelucrare. Utilizarea adâncimilor mici, de până la 0.1 mm, conduce la obținerea de valori în general mari atât pentru rugozități cât și pentru tensiuni reziduale. Creșterea adâncimii de prelucrare poate fi pusă în relație directă cu creșterea valorilor abaterilor în plan. Prelucrarea cu adâncimea de așchiere de 0.86 mm și viteza de avans de 0.18 mm/dinte duce la o abatere maximă de aproape 8 µm.

  Mediul de lucru. În cazul acestui material observăm o tendință de dispunere a valorilor similară cu cea generată la materialul 2017, mediile de lucru utilizate în acest caz schimbând in general amplitudinea valorilor dar nu și modul de dispunere pe grafic.
- Rugozitatea, Prelucrarea în mediul uscat conducela o rugozitate cu variații mici pentru setul de parametrii utilizați. Valorile acestora se stabilizează în jurul a 0.150 µm. Valori ușor mai crescute înregistrăm în mediul uscat, în cazul utilizării adâncimii de 0.1 mm. Prelucrarea în mediu MQL conduce la o creștere a instabilității cât și a valorilor rugozității, acestea ajungând în medie la aproximativ 0.3 µm. Prelucrarea în mediul criogenic revelă un comportament similar cu prelucrarea în mediul uscat cu singura diferență care este dată de creșterea valorilor (cu aproximativ 0.05 µm). Utilizarea mediului combinat crioMQL, conduce la un tipar similar cu prelucrarea în mediu MQL dar cu amplitudini reduse și valori medii ale rugozității de aproximativ 0.2 µm.
- Abaterea în plan. Ca și în cazul aliajului 2017 abaterea în plan poate fi împărțită în două sectoare, pe de o parte abaterea generată la adâncimi cu valori de 0.1 mm, pe de altă parte la adâncimi mari de 0.86 mm. Din analiza rezultatelor se observă că prelucrarea în mediu uscat conduce în acest caz (0.1 mm adâncime) la valorile cele mai mari de până la 1.5 µm, în timp ce în același context prelucrarea cu azot lichid si MQL separat, vor oferi rugozități usor mai mici, aproximativ 1 µm. Utilizarea mediului mediului combinat crioMQL aduce pentru acest material la adâncimi de 0.1 mm, valori ale rugozităților de până la 0.15 µm.
    - La adâncimi mai mari de 0.3 mm găsim un comportament separat pentru fiecare mediu utilizat. Prelucrarea în mediul uscat conduce la valorile medii cele mai mici de până la 1.7 µm, abatere la planeitate. Utilizarea metodei MQL conduce la o variație mai mare a parametrilor cât și la creșterea în medie a valorilor acestora de până la aproximativ 2.5 µm. Mediul criogenic pare în acest caz nu este o alegere bună pentru

sceste prelucrări, deoarece conduce la o varietate mare a rezultatelor și o creștere medie de până la 4 µm abatere. Utilizarea mediului combinat crioMQL nu este decât o amplificare negativă sau pozitivă în funcție de adâncimea de măsurare a valorilor abaterilor în plan. De exemplu în cazul utilizării mediului crioMQL la adâncimea maximă de prelucrare 0.86 mm, obținem o abatere de 7.6 µm.

- Tensiunile reziduale Mediile de prelucrare în cazul acestui aliaj pot influența decisiv atât amplitudinea cât și dispunerea în compresiune sau întindere. Prelucrarea în mediul uscat a aliajului de aluminiu 7075 induce în stratul superficial tensiuni reziduale de întindere cu valori medii de aproximativ 50 MPa fiind afectate foarte mult doar de vitezele foarte mici de avans, de până la 0.05 mm. Un comportament similar, cu aproximativ aceleași valori, este înregistrat și în cazul prelucrărilor în mediu criogenic. Cele mai bune valori obținute în aceste cazuri le vom regăsi la avansul de 0.01 mm/dinte (valori minime de întindere sau mari de compresiune). Utilizarea mediului MQL conduce la schimbarea sensului din întindere în compresiune cu valori medii de aproximativ – 100 MPa, pentru tot setul de date. Utilizarea unui mediu combinat criogenic cu MQL conduce la un comportament predictiv al valorilor tensiunilor. Practic această combinație reduce valoarea tensiunilor de compresiune către 0 MPa la adâncimi mici și trece în mediul de întindere la adâncmi mari de prelucrare. Utilizarea ultimelor două medii de prelucrare în cazul acestui material poate conduce la optimizări predictive ale parametrilor de prelucrare.
- Microduritatea nu este influențată foarte mult de mediile de prelucrare. Practic, observăm valori aproape constante la utilizarea tuturor celor 4 medii de prelucrare, diferența de duritate medie fiind de aproximativ 5 unități HV. Dintre toate mediile de prelucrare utilizate valorile cele mai mici sunt obținute în medie la prelucrarea MQL.

Analiza rezultatelor în funcție compoziția chimică a materialului

Vom analiza datele în funcție de mediul de prelucrare pentru a putea identifica influența compoziției chimice asupra calității rezultate.

Analiza materialelor pentru prelucrarea uscată

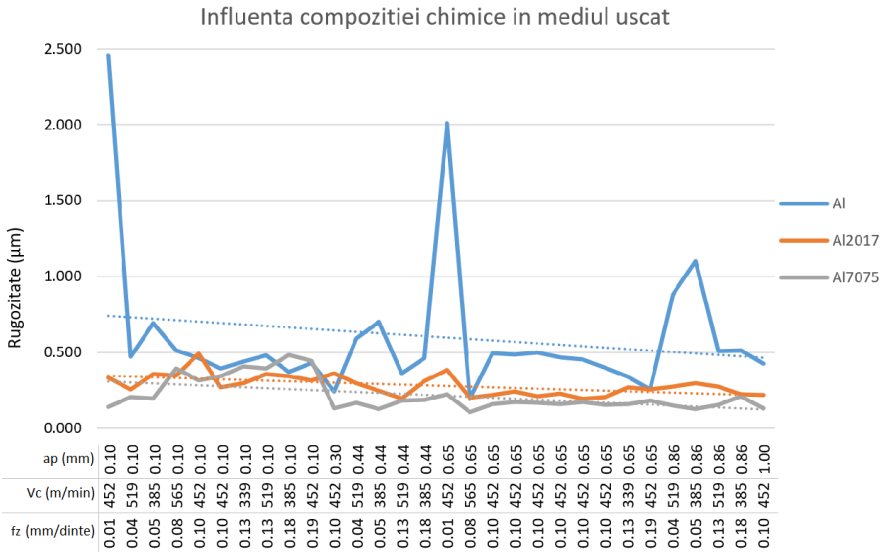


Figura 38 Influența compoziției chimice în mediul uscat

Din analiza datelor prezentate în figura 116 observăm următoarele aspecte:

- Utilizarea aliajului de tip 7075 revelă cele mai mici rugozități în condiții de prelucrare uscată;
- Utilizarea adâncimilor de prelucrare de 0.1 mm a generat în toate cazurile rugozități mai mari;
- Utilizarea aluminiului cu puritate 99,9% a generat cele mai mari rugozități, ce mai probabil datorită caracteristicilor fizico-mecanice ale acestuia.

Analiza materialelor pentru prelucrarea MQL

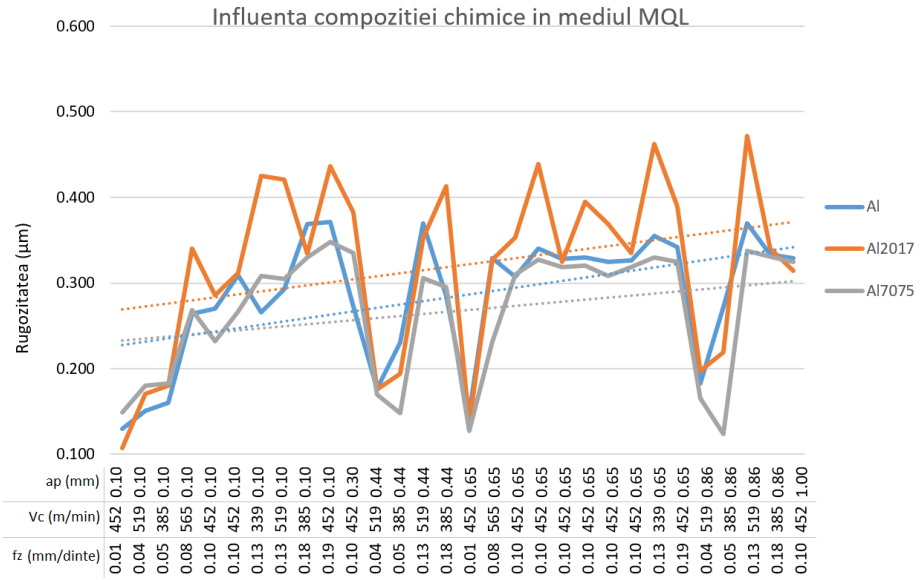


Figura 39 Influența compoziției chimice în mediul MQL

Din analiza datelor prezentate în figura 119 observăm următoarele aspecte:

- În mediul MQL observăm o tendință diferită de propagare a valorilor rugozității care manifestă o tendință crescătoare odată cu creșterea adâncimii de așchiere;
- Utilizarea mediului MQL conduce la o îmbunătățire majoră a rugozităților generate pe aluminiu 99.9%; În același timp observăm o creștere a acestor valori pe aliajul 2017; Cel mai probabil există o conexiune direcă între microduritatea materialului și utilizarea lichidelor de răcire/lubrifiere;
- În cazul utilizării vitezelor mici de avans (0.04 / 0.05 mm/dinte) observăm că aliajul de aluminiu 2017 generează valori foarte mari ale rugozităților, în timp ce materialele mai „moi" generează rugozități mici în aceleași condiții.

Analiza materialelor pentru prelucrarea criogenică

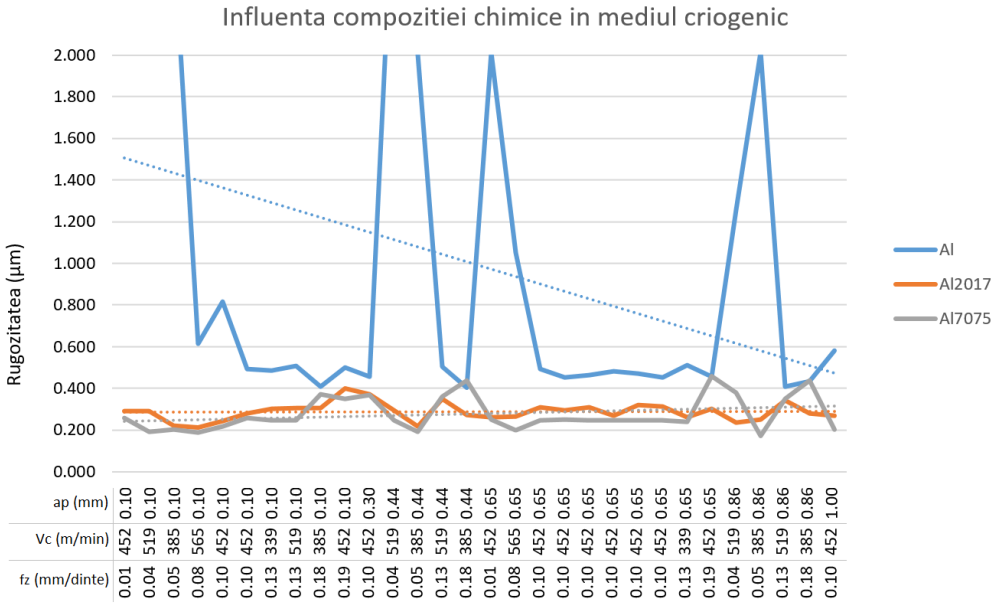


Figura 40 Influența compoziției chimice în mediul criogenic

Din analiza datelor prezentate în figura 112 observăm următoarele aspecte (fig 122):

- Aluminiul 99.9% denotă cea mai mare instabilitate la prelucrarea cu azot lichid;
- Odată cu adâncimea de așchiere sunt observate ușoare tendințe de descreștere a valorilor rugozității;

- Utilizarea cuprului ca principal element de aliere în aliajul de aluminiu 2017 conferă materialului un bun coeficient de transfer termic, lucru care îl poziționează pe primul loc în prelucrarea cu LN_2;
- Aliajul de aluminiu 7075 prezintă tendințe similare de dispunere ale valorilor cu aluminiu 99.9% doar că acesta are valori mult mai scăzute ale rugozităților;

În concluzie putem spune că în cazul utilizării LN_2 materialul 2017 este cel mai constant în rezultarea valorilor rugozității.

Analiza materialelor pentru prelucrarea criogenică + MQL

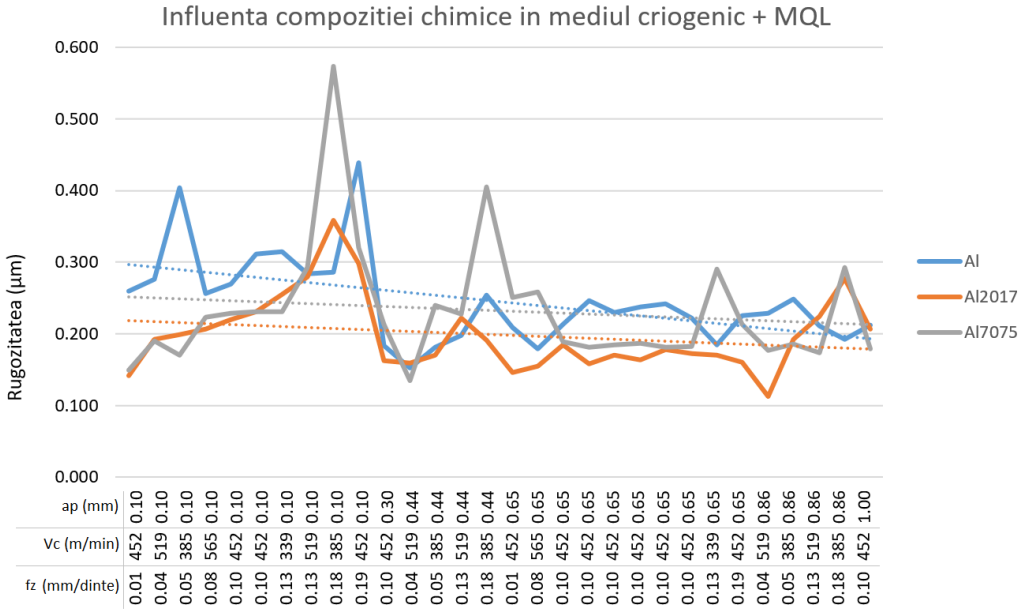


Figura 41 Influența compoziției chimice în mediul criogenic

Din analiza datelor prezentate în figura 125 observăm următoarele aspecte (fig. 125):

- Toate cele 3 materiale prezintă o tendință descrescătoare a rugozității odată cu creșterea adâncimii de prelucrare;
- Utiliarea aliajului 2017 care anterior revela o stabilitate termică bună face ca acesta să confere cele mai bune valori ale rugozității;
- Valorile mari ale avansului pe dinte fac și în acest caz ca rugozitățile să aibă o tendință crescătoare.

CAPITOLUL 5

CERCETĂRI PRIVIND DETERMINAREA UNEI DISTRIBUȚII OPTIMALE A MEDIILOR DE PRELUCRARE ÎN VEDEREA OBȚINERII UNEI CALITĂȚI SUPERIOARE A SUPRAFEȚELOR PRELUCRATE

Modelarea digitala a prelucrarilor prin metoda elementului finit

Prezentarea modelului de simulare

Pentru verificarea prin simulare a rezultatelor obținute experimental a fost utilizat un soft de analiză si prelucrare cu element finit AdvantEdge specializat pentru prelucrări prin așchiere. Programul beneficiază de o interfață simplă (fig. 128) care permite utilizatorului să efectueze simulări atât în regim 2D cât și 3D. Este prevăzut cu propriile modele matematice, dar și cele generic utilizate (Lagrangiane sau Euleriane) cu ajutorul cărora sunt calculați parametrii de proces, respectiv distribuția tensiunilor reziduale, forța de așchiere, curgerile plastice, etc. Remodelarea nodurilor rețelei și a parametrilor de așchiere (rază la vârf a sculei, deformații ale materialului, coeficienții termici de prelucrare) este ușoară și nu necesită utilizarea unui alt program de prelucrare a datelor.

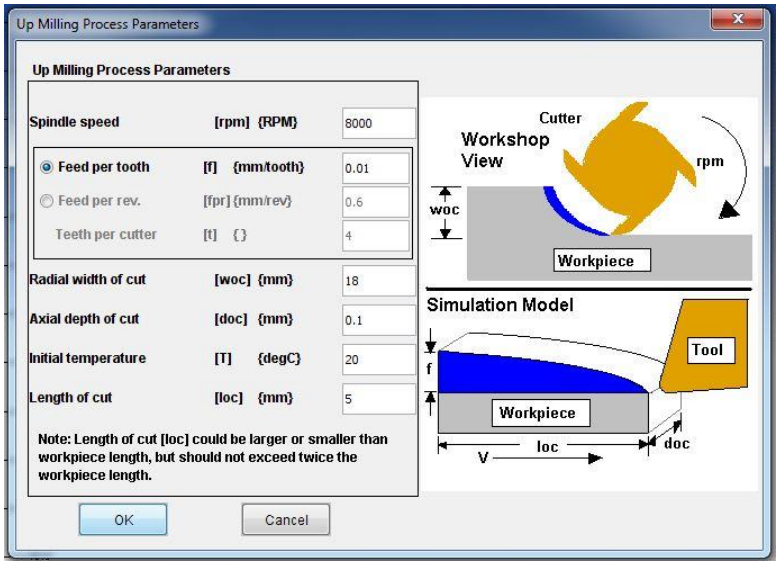


Figura 42 Interfața grafică a programului AdvantEdge

Forța de așchiere cât si distribuția temperaturilor pe suprafața de prelucrat sunt extrase utilizand modulul de analiza TECPLOT, modul intregrat în software-ul AdvantEdge. Tecplot este un software de vizualizare și analiză a datelor, utilizat în principal în domeniul ingineriei, în special în simulările CFD (Computational Fluid Dynamics) și în alte aplicații de analiză numerică. Este dezvoltat

de compania Tecplot, Inc. și este cunoscut pentru capacitățile sale avansate de a genera grafice, diagrame și vizualizări complexe din seturi de date mari și complexe.

Achizitia temperturilor s-a facut trasand o „o linie de colectare” la 0.2 mm adancime pe suprafata de masurat(fig. 129) . Rezultatele sunt exportate in fisier ASCII si interpretate cu ajutorul xcel .

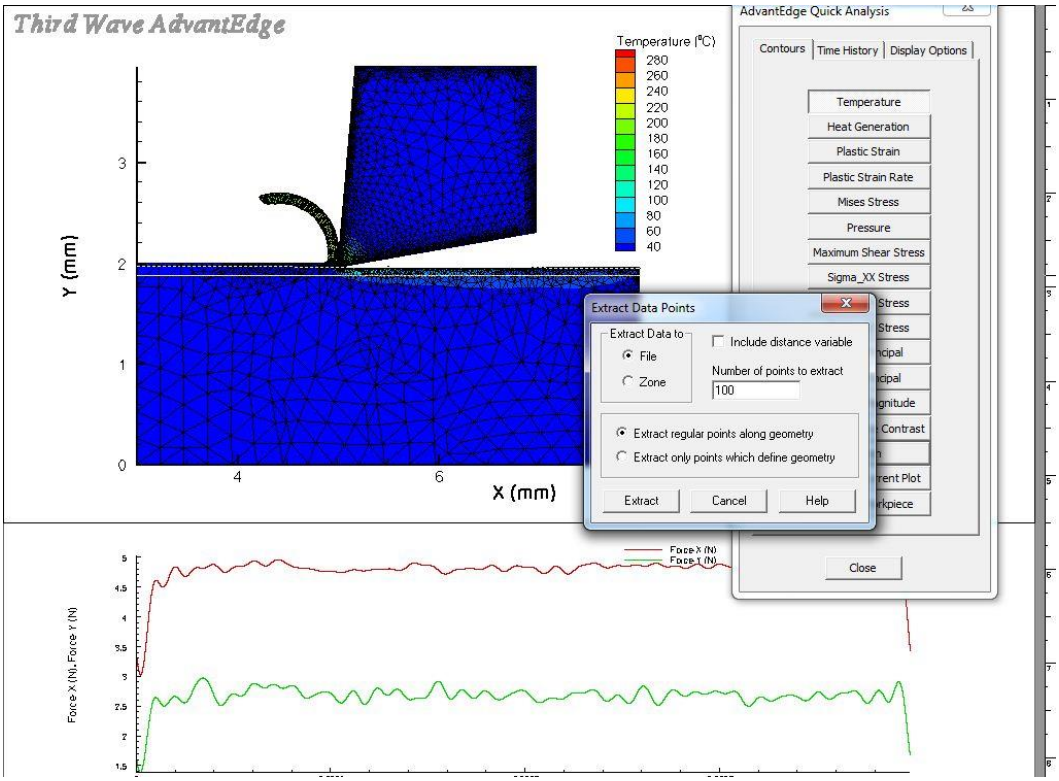


Figura 43 Exportarea fortelor si al temperaturilor rezultate

În ceea ce privește distribuția tensiunilor reziduale, analiza acestora se face imitând procedeul de extracţie cu raze x. Utilizatorului i se permite să definească pașii de achiziție, unghiul de incidență al vectorului de colectare, grosimea razei, numărul de straturi din care se vor extrage tensiunile și numărul de puncte de achiziție din fiecare strat verificat. Pentru achiziția de tensiuni programul are posibilitatea de a extrage atât tensiunile reziduale punctuale cât și de a face determinări medii.

3.2. Rezultate obținute în urma simulării procesului de frezare

Analiza fortelor de prelucrare.

Influența vitezei de avans și a adâncimii de prelucrare asupra mărimii forțelor generate la prelucrarea aluminiului 99.9%

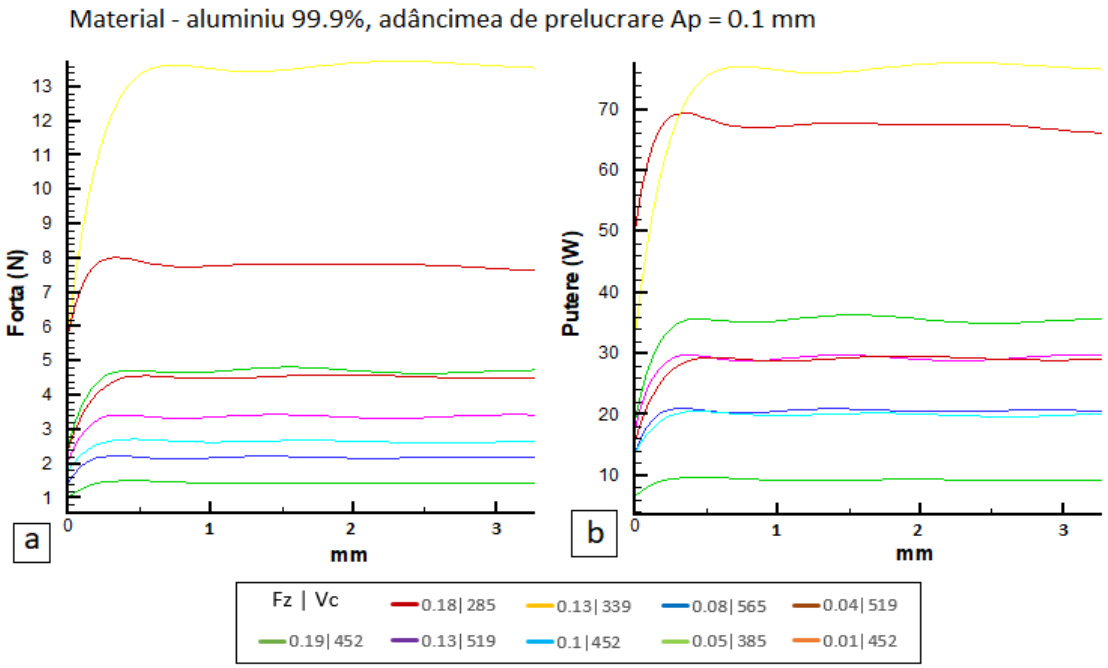


Figura 44 Rezultatul simulării obținut în Advant Edge (a) Forța (N) b) Putere (W)) la prelucrarea aluminiului 99,9% cu adâncimea de prelucrare Ap = 0.1 mm

Influența vitezei de avans și a adâncimii de prelucrare asupra mărimii forțelor generate la prelucrarea aliajului de aluminiu 2017

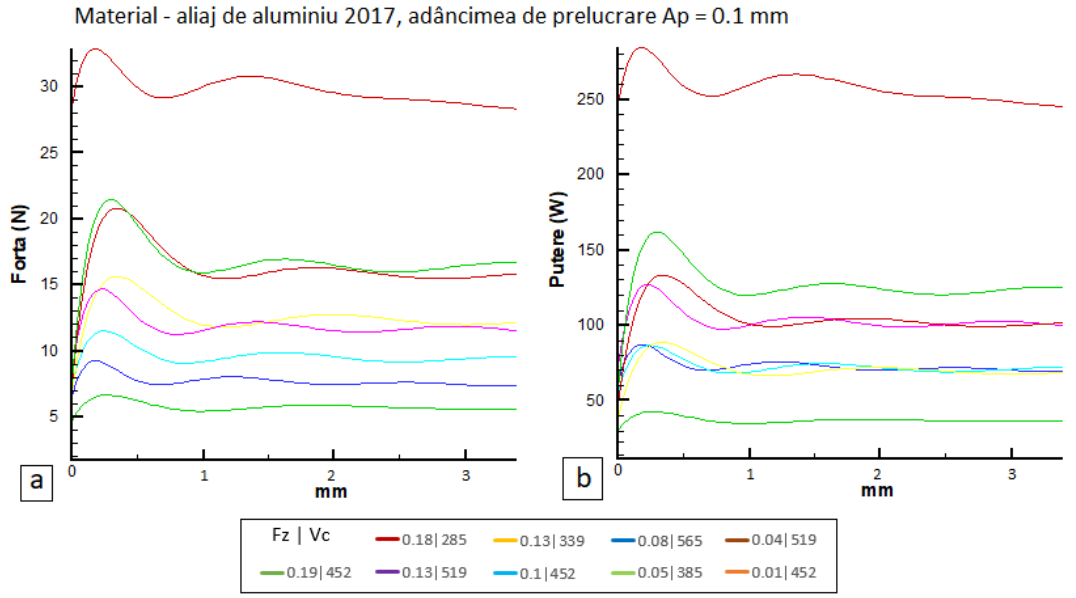


Figura 45 Rezultatul simulării obținut în Advant Edge (a) Forța (N) b) Putere (W)) la prelucrarea aliajului de aluminiu 2071 cu adâncimea de prelucrare Ap = 0.65 mm

Influența vitezei de avans și a adâncimii de prelucrare asupra mărimii forțelor generate la prelucrarea aliajului de aluminiu 7075

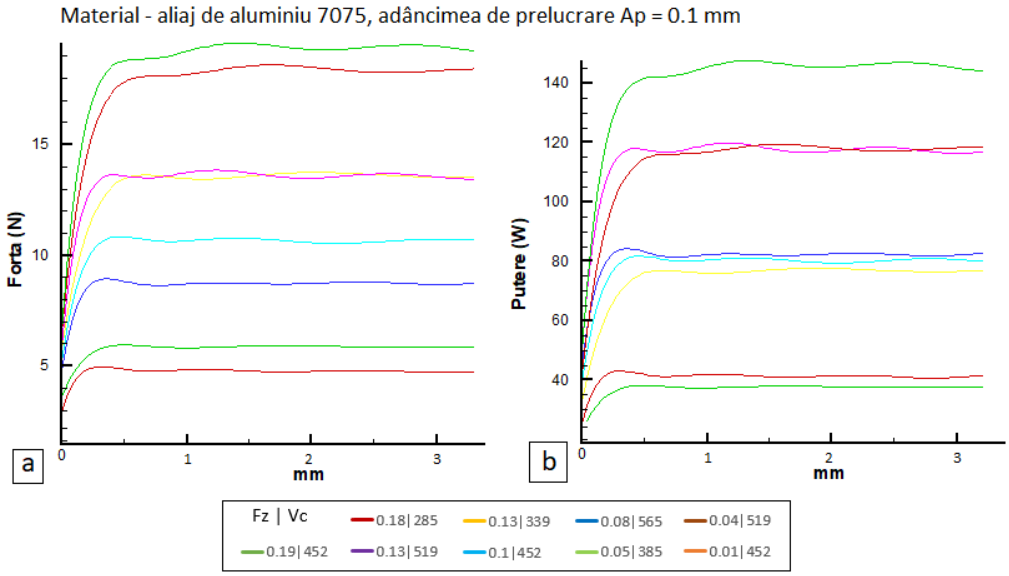


Figura 46 Rezultatul simulării obținut în Advant Edge (a) Forța (N) b) Putere (W)) la prelucrarea aliajului de aluminiu 7075 cu adâncimea de prelucrare Ap = 0.1 mm

Figura 47 Rezultatul simulării obținut în Advant Edge (a) Forța (N) b) Putere (W)) la prelucrarea aliajului de aluminiu 7075 cu adâncimea de prelucrare Ap = 0.65 mm

Figura 48 Analiza forțelor

Creșterea adâncimii de prelucrare conduce la creșterea mărimilor forțelor până la 127 N (forță maxima) în cazul aunei viteze de avans de 0.19 mm/dinte (fig. 147 și fig. 148).

Fz | Vc

Analiza comparativa a influentei caracteristicilor fizico-chimice ale materialului

Din rezultatele prezentate mai jos se observa că duritatea materialului influențează și mărimea forței de prelucrare în conditiiile în care restul parametrilor sunt lașați constanți. La analiza distribuției forțelor pe adâncime de 0.1, respectiv 0.65 în condițiile în care au fost comparate la viteza de avans de 0.1 mm și la 0.19 mm/dinte este observat același comportament arătat la analiza fiecărui material. O creștere a vitezei de avans pe dinte duce la o creștere a mărimii forței. Același comportament este înregistrat și în cazul creșterii adâncimii de prelucrare.

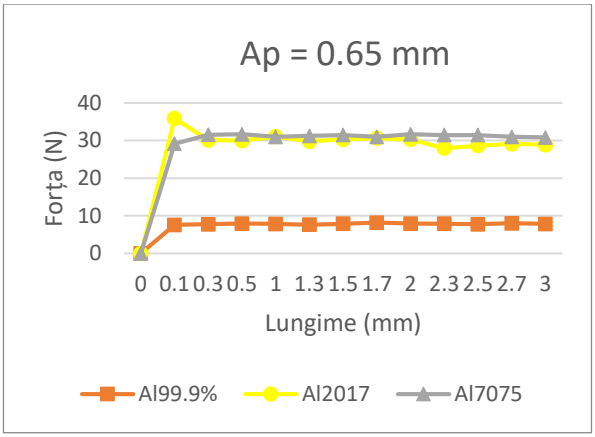


Figura 49 Comparația forțelor pentru Avansul fz = 0.1 mm/dinte la adâncimea de prelucrare ap = 0.65 mm

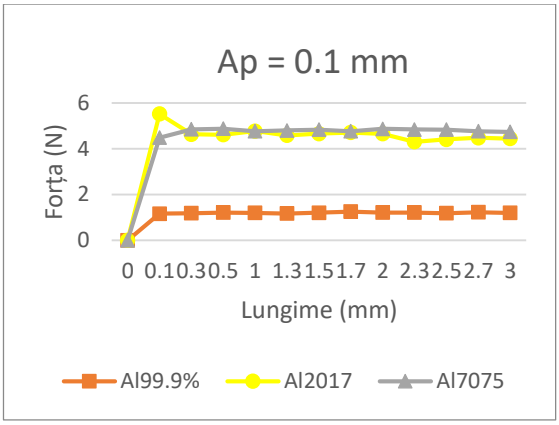


Figura 50 Comparația forțelor pentru Avansul fz = 0.1 mm/dinte la adâncimea de prelucrare ap = 0.1 mm

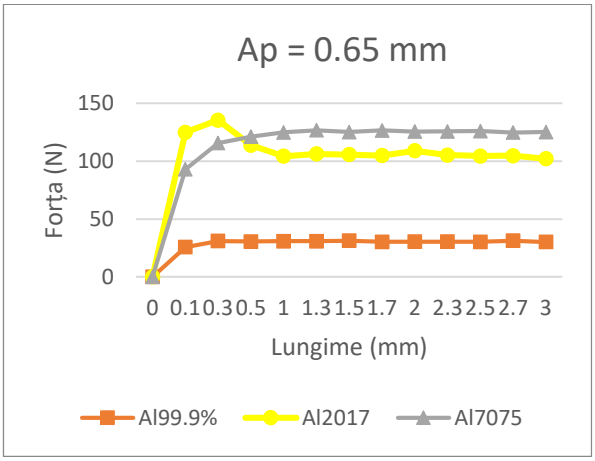


Figura 51 Comparația forțelor pentru Avansul fz = 0.19 mm/dinte la adâncimea de prelucrare ap = 0.65 mm

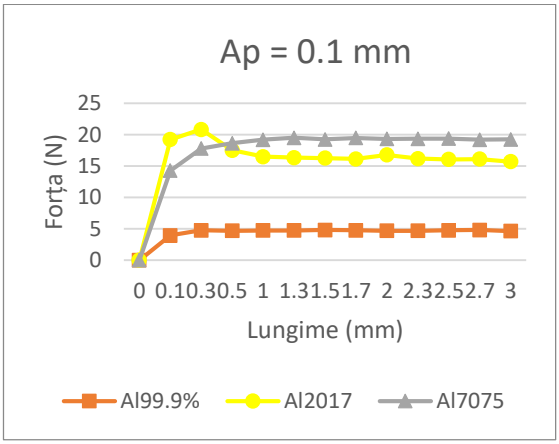


Figura 52 Comparația forțelor pentru Avansul fz = 0.19 mm/dinte la adâncimea de prelucrare ap = 0.1 mm

Analiza prin simulare a distributiei temperaturilor generate pe suprafata materialelor

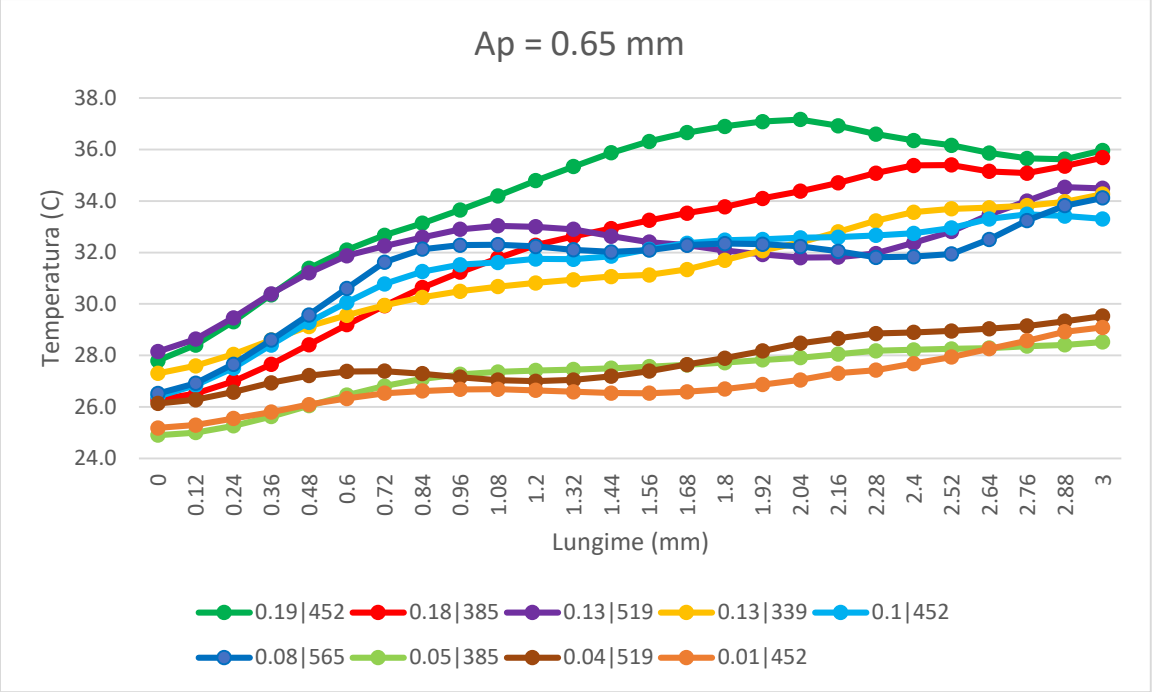


Figura 53 Analiza prin simulare a distributiei temperaturilor generate pe suprafata la aluminiu 99.9%

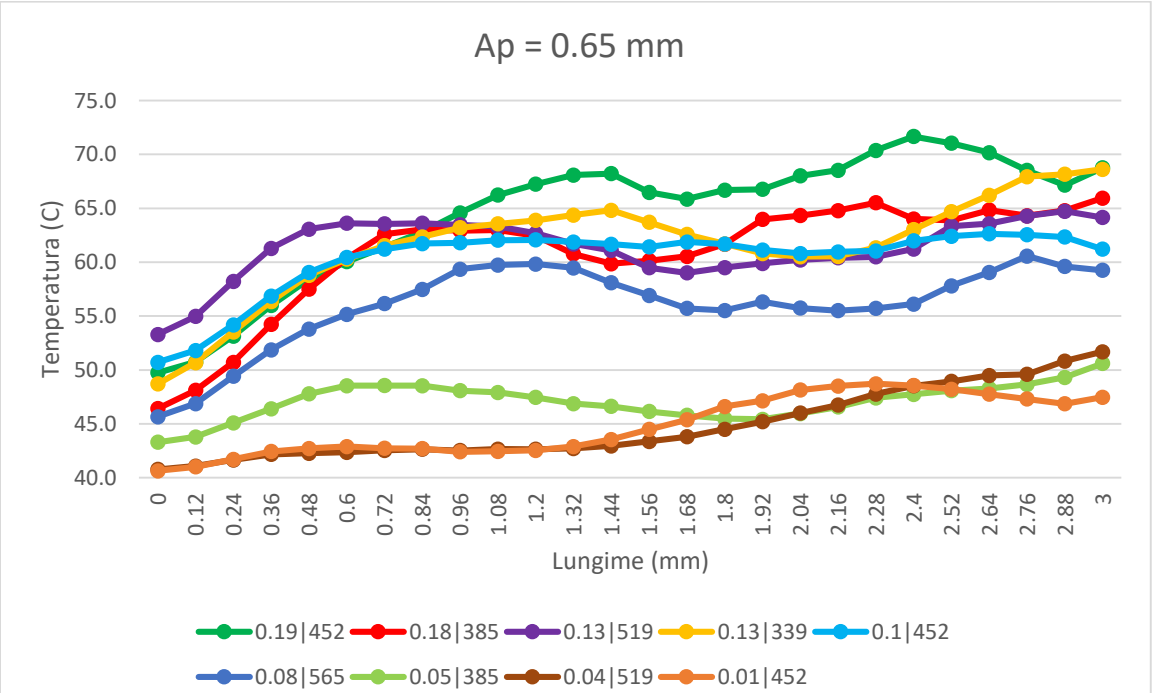


Figura 54 Analiza prin simulare a distributiei temperaturilor generate pe suprafata la aliajul de aluminiu 2017

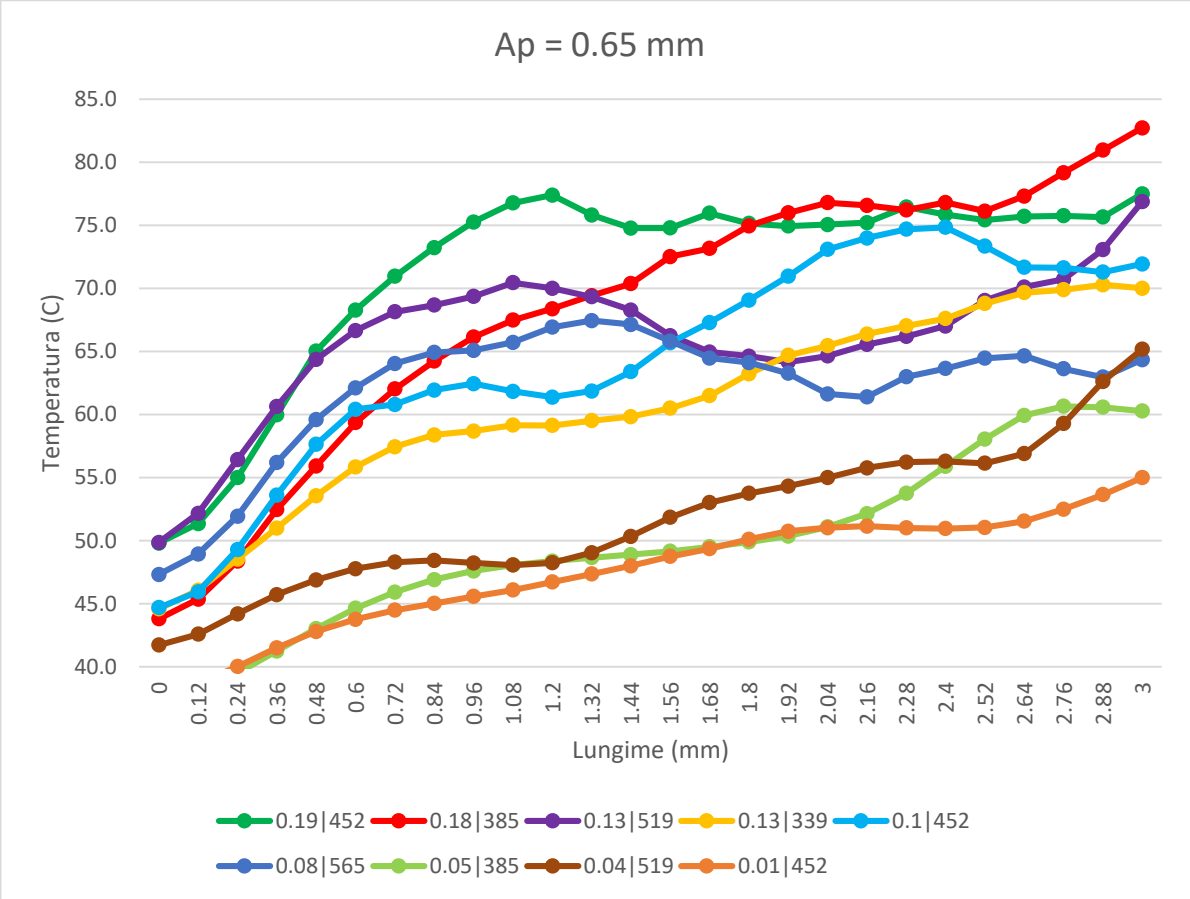


Figura 55 Analiza prin simulare a distributiei temperaturilor generate pe suprafata la aliajul de aluminiu 7075

Deoarece în planul experimental adâncimea de 0.65 a fost aleasa că și „reprezentativa” am ales să extragem distribuția căldurii din acest set experimental. Pentru o analiza corecta am împărțit zona de analiza în 3, astfel zona 1 de intrare a sculei unde temperaturile au creșteri bruște (până la 0.3 mm); zona 2 de normalizare unde temperatura în general fluctuează foarte puțin și zona 3 de ieșire din semifabricat (dincolo de 3.5 mm zona care a fost îndepărtată) unde temperatura înregistrează valori foarte mari. Din analiza datelor se observa că generarea temperaturilor este corelata mărimea forței de prelucrare, astfel observam că utilizarea unui material cu duritate mai mare (2017) generează temperaturi ușor mai mari decât aliajul 7075 și al 99.9 . Viteaza de avans este și în acest caz factorul de influenta. Se observa că la creșterea vitezei de avans creste și mărimea gradientului de temperatura. Utilizarea vitezelor de avans de până la 0.05mm conduc la o distribuție a temperaturii uniforma cu valori în general mici. Cu acest rezultat putem corela și valorile mici ale abaterilor dimensionale care au fost descrise la capitolul determinări experimentale (fig. 153, fig. 154 și fig 155).

Concluzii privind rezultatele obținute în urma simulării

Prelucrarea cu diferiți parametrii de așchiere (viteză de avans, viteză de așchiere, adâncime de așchiere) și pe materiale cu compoziții chimice diferite influențează distribuția tensiunilor reziduale generate de prelucrarea prin frezare. Astfel, în urma analizării influenței compoziției chimice a materialului asupra distribuției tensiunilor reziduale au fost observate următoarele aspecte :

- Viteza de avans cât și viteza de prelucrare influențează distribuția tensiunilor reziduale în stratul superficial
- Utilizarea unor viteze de avans mari concomitent cu viteze d eprelucraere mici au condus la generarea de tensiuni de întindere în stratul superficial
- Creșterea vitezei de prelucrare conduce la scăderea tensiunilor de întindere, chiar trecerea în domeniul compresiv
- Utilizarea aliajelor care au în comozitia lor aliaje cu capacitate mare de transfer termic conduce la generarea de tensiuni reziduale d ecompresiune în stratul superficial cât și al generarea unei distribuții uniformizate

Aplicarea metodei reţelelor neuronale în vederea optimizării

Reţelele neuronale (RN) artificiale sunt formate din neuroni artificiali interconectaţi (construcţii care imită proprietăţile celulelor neuronale biologice). Aceste reţele pot fi folosite pentru a obţine o înţelegere a reţelelor neuronale biologice sau pentru rezolvarea problemelor de inteligenta artificiala, fără a crea un model al unui sistem biologic real.

În ultima vreme, numărul cercetătorilor care au investigat aplicabilitatea modelelor RN în controlul proceselor de deformare a crescut considerabil. De exemplu, Karatas ş.a. [226] au utilizat o reţea neuronală pentru determinarea distribuției tensiunilor reziduale generate de sablarea cu alice, Kurt [227] a făcut o modelare cu rețele neuronale pentru a determina comportamentul tensiunilor reziduale și parametrii optimi de prelucrare, Umbrelo [228] a utilizat rețelele neuronale pentru determinarea distribuției tensiunilor reziduale în stratul superficial generat prin strunjire, Wahab [229] a propus un model predictiv de distribuție a tensiunilor reziduale cu ajutorul rețelelor neuronale, Figueira [230] a determinat influența distribuției tensiunilor reziduale din stratul superficial asupra rezistenței la oboseală. etc.

Etapele implementării reţelelor neuronale în vederea obţinerii unei distribuţii optimale a tensiunilor reziduale

Pentru identificarea cu ajutorul reţelelor neuronale artificiale a relaţiei optime dintre parametrii procesului caracteristicile de calitate ale suprafetei, trebuie parcurse următoarelor patru mari etape (fig. 164):

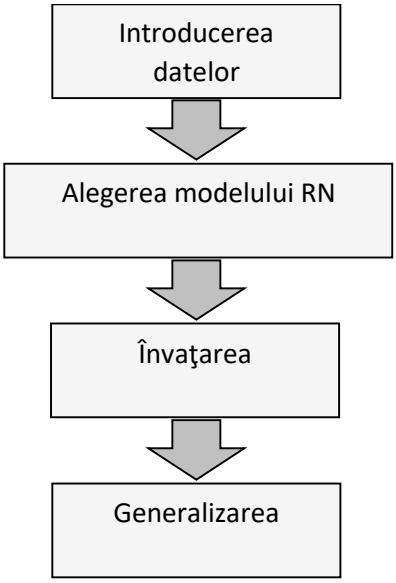


Figura 56 Etapele implementării rețelei neuronale [152]

a. Introducerea datelor

b. Alegerea modelului R

c. Antrenarea rețelei

Optimizarea efectuata pe baza rezultatelor experimentale

În urma optimizării in functie de mediul de lucru utilizat s-au ales diverse tipuri constructive de retea astfel:

- Mediul uscat

La prelucrarea datelor pe acest mediu s-a constatat ca cea mai buna alegere o constituie construirea unei retele alcatuita dintr un strat ascuns cu 4 elemente pe strat. Aceasta retea ofera media patratica mica intre ciclul de i enta mica intre factorul generat de invatare cat si cel de confirmare. Pentru a ajunge la alegerea acestui model reteaua a fost construita prin incercari asa cum se arata in tabelul (22).

Determinarea rețelei optime. Un alt factor important care indică rețeaua corespunzătoare ce urmează a fi utilizată este „testul” efectuat de rețea pe baza analizei datelor de intrare și a rezultatelor generate de aceasta. Astfel, eroarea maximă admisă (numerică) între datele de intrare (dorite) și cele

generate nu trebuie să aibă o diferență mare una față de alta. Astfel în urma analizării rețelelor prezentate în fig. 165 fost aleasă rețeaua cu un strat ascuns și patru neuroni pe strat. În cadrul prezentei analize s-a utilizat un set de date de validare ce a constituit 25% din totalul datelor de intrare ale reţelei, procesul de validare repetându-se pentru un număr diferit de neuroni în stratul intermediar.

Tabel 4 Tabel cu numar de straturi, neuroni și rezultate pentru mediul uscat

Tip de reţea		Media minimă pătratică		Factor maxim de încredere r
Nr.	Nr. neuroni/	Învaţare	Validare	
1	2	0,45	-0,20	0,43
	4	0,08	0,13	**0,66**
	6	0,11	-0,55	0,71
	8	0,38	0,031	0,80
	16	0,09	-0,09	0,81
2	2	0,24	0,04	0,72
	4	0,03	0,10	0,50
	6	0,075	0,11	0,54
	8	0,12	0,48	0,35
	16	0,10	0,30	0,66
	32	0,15	0,14	0,59
	64	0,02	0,18	0,55
3	2	-0,11	0,21	0,61
	4	-0,01	-0,05	0,43
	6	0,17	0,03	0,39
	16	0,10	-0,28	0,75
4	2	-0,40	-0,05	-0,02

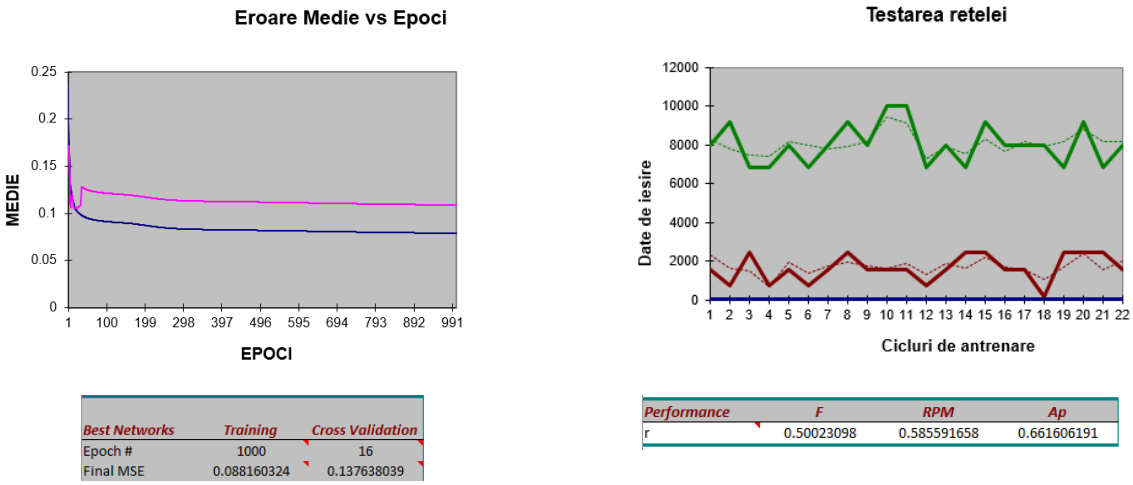


Figura 57 Reprezentarea grafică a ciclurilor de antrenare si testare pentru mediul uscat

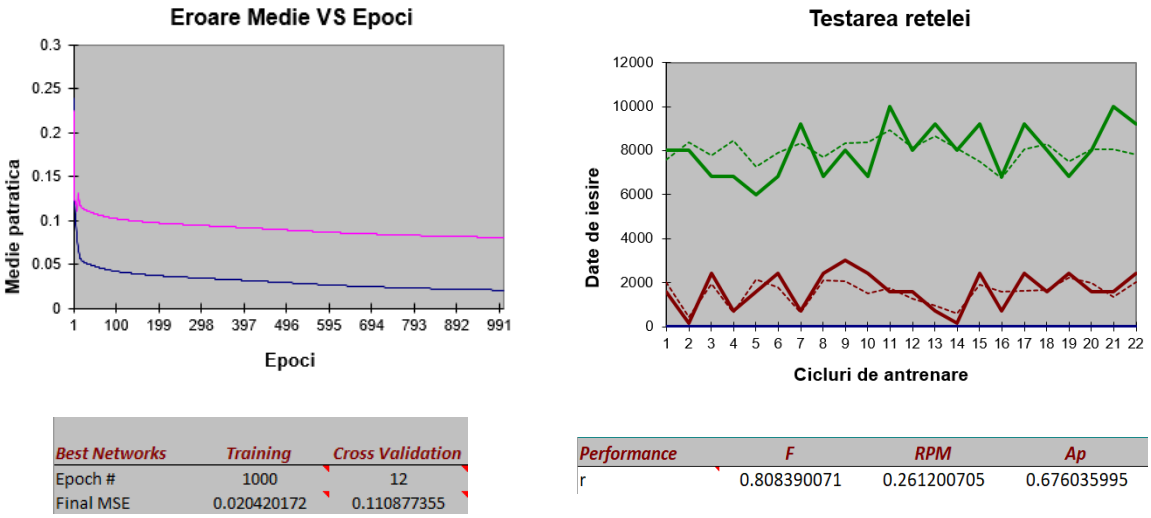
- Mediul MQL

La prelucrarea datelor pe acest mediu s-a constatat că cea mai buna alegere o constituie construirea unei rețele alcătuită dintr un strat ascuns cu 8 elemente pe strat. Aceasta rețea oferă media pătratica mica intre ciclul de învățare și antrenare cât și o diferență mica intre factorul generat de învățare cât și cel de confirmare. Pentru a ajunge la alegerea acestui model rețeaua a fost construita prin încercări așa cum se arata în tabelul 19.

Testarea rețelei efectuata pe baza datelor de intrare experimentale a scos în evidenta o medie pătratica mica cât și un factor de încredere maxim "r" de 0.8. Pentru a ajunge la aceasta configurație considerate optima au fost variate mai multe tipuri de rețele cu 1,2,3 straturi și cu 2-64 elemente pe strat (tabelul 19). În cadrul prezentei analize s-a utilizat un set de date de validare ce a constituit 25% din totalul datelor de intrare ale reţelei, procesul de validare repetându-se pentru un număr diferit de neuroni în stratul intermediar.

Tabel 5 Tabel cu numar de straturi, neuroni și rezultate pentru mediul MQL

Tip de reţea		**Media minimă pătratică**		**Factor maxim de încredere r**
Nr.	**Nr. neuroni/**	**Învaţare**	**Validare**	
1	2	0,05	0,07	0,90
	4	0,05	0,08	0,73
	6	0,03	0,10	0,75
	8	0,02	0,16	**0,67**
	16	0,03	0,10	0,59
	32	0,01	0,13	0,72
2	2	0,06	0,05	0,71
	4	0,04	0,06	0,86
	6	0,03	0,12	0,85
	8	0,02	0,08	0,66
	16	0,013	0,15	0,59
	32	0,01	0,16	0,64
3	2	0,07	0,13	0,44
	4	0,05	0,07	0,62



Best Networks	Training	Cross Validation
Epoch #	1000	12
Final MSE	0.020420172	0.110877355

Performance	F	RPM	Ap
r	0.808390071	0.261200705	0.676035995

Figura 58 Reprezentarea grafică a ciclurilor de antrenare pentru mediul MQL

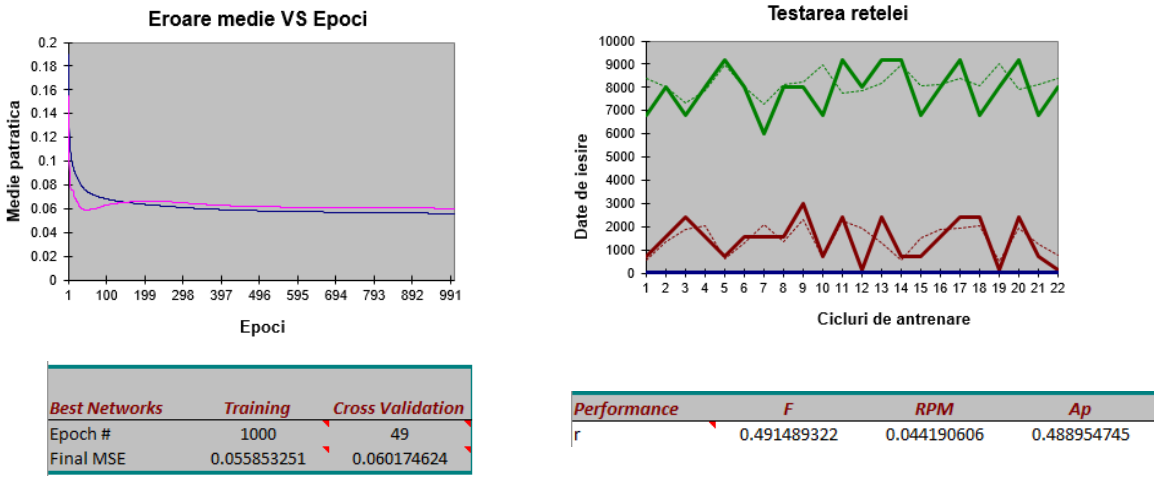
Mediul Criogenic (LN2)

La prelucrarea datelor pe acest mediu s-a constatat că cea mai buna alegere o constituie construirea unei rețele alcătuită dintr un strat ascuns cu 4 elemente pe strat. Pentru a ajunge la alegerea acestui model rețeaua a fost construita prin încercări așa cum se arata în tabelul 20.

Testarea rețelei efectuata pe baza datelor de intrare experimentale a scos în evidenta o medie pătratica mica cât și un factor de încredere maxim "r" de 0.5. Pentru a ajunge la aceasta configurație considerate optima au fost variate mai multe tipuri de rețele cu 1,2,3 straturi și cu 2-16 elemente pe strat (tabelul 20). În cadrul prezentei analize s-a utilizat un set de date de validare ce a constituit 25% din totalul datelor de intrare ale reţelei, procesul de validare repetându-se pentru un număr diferit de neuroni în stratul intermediar.

Tabel 6 Tabel cu numar de straturi, neuroni și rezultate pentru mediul Criogenic LN2

Tip de reţea		Media minimă pătratică		Factor maxim de încredere r
Nr.	Nr. neuroni/	Învaţare	Validare	
1	2	0,06	0,09	-0,45
	4	0,05	0,06	**0,49**
	6	0,04	0,14	0,73
	8	0,03	0,15	0,78
	16	0,02	0,16	0,004
2	2	0,06	0,25	0,41
	4	0,14	0,16	0.25
	6	0.12	0.03	0,35
3	2	0.13	0,07	0,44



Best Networks	Training	Cross Validation
Epoch #	1000	49
Final MSE	0.055853251	0.060174624

Performance	F	RPM	Ap
r	0.491489322	0.044190606	0.488954745

Figura 59 Reprezentarea grafică a ciclurilor de antrenare pentru mediul LN2

Mediul combinat (LN_2 + MQL)

Datorita unei slabe corelații intre parametrii în acest caz a trebuit să construim o rețea mai complexa. Astfel, în cazul mediului combinat s-a ales prin încercări multiple să se construiască o rețea cu un strat ascuns cu 16 elemente pe strat. Aceasta rețea oferă media pătratica mica intre ciclul de învățare și antrenare cât și o diferență mica intre factorul generat de învățare cât și cel de confirmare. Pentru a ajunge la alegerea acestui model rețeaua a fost construita prin încercări așa cum se arata în tabelul 21.

Testarea rețelei efectuata pe baza datelor de intrare experimentale a scos în evidenta o medie pătratica mica cât și un factor de încredere maxim "r" de 0.94. Pentru a ajunge la aceasta configurație considerate optima au fost variate mai multe tipuri de rețele cu 1,2,3 straturi și cu 2-64 elemente pe strat (tabelul 21). În cadrul prezentei analize s-a utilizat un set de date de validare ce a constituit 25% din totalul datelor de intrare ale reţelei, procesul de validare repetându-se pentru un număr diferit de neuroni în stratul intermediar.

Tabel 7 Tabel cu numar de straturi, neuroni și rezultate pentru mediul Crio+ MQL

Tip de reţea		Media minimă pătratică		Factor maxim de încredere r
Nr.	Nr. neuroni/	Învaţare	Validare	
1	2	0,07	0,03	0,86
	4	0,04	0,12	0,78
	6	0,04	0,09	0,88
	8	0,03	0,11	0,96
	16	0,02	0,09	**0,94**
	32	0,09	0,12	0,83
	64	0,01	0,14	0,68
	6	0,04	0,10	0,95

2	64	0,04	0,1	0,87
3	6	0,04	0,08	0,95

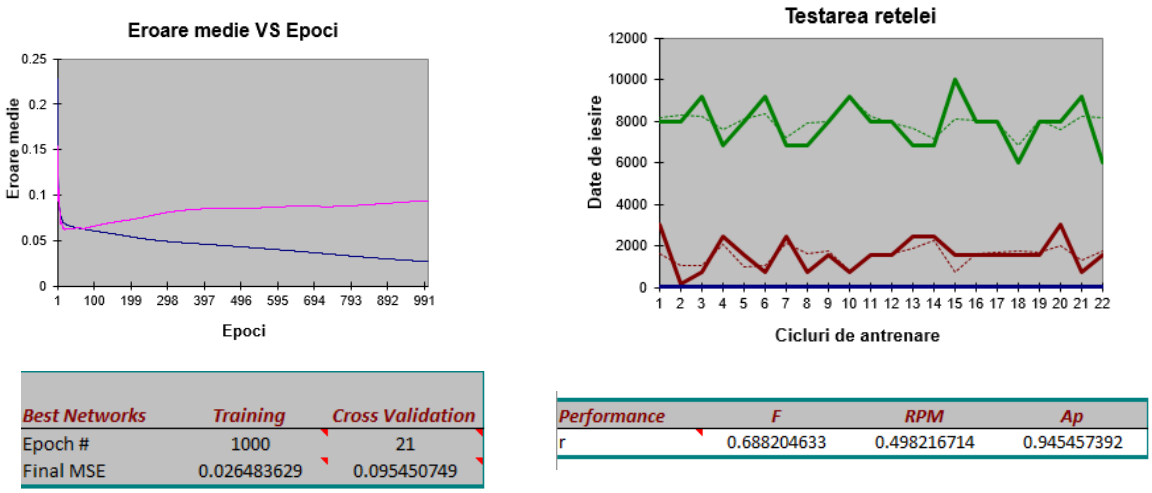


Figura 60 Reprezentarea grafică a ciclurilor de antrenare pentru mediul combinat Crio LN2+MQL

Determinarea parametrilor optimi

Tabel 8 Parametrii pentru optimizare

Material	F (mm/min)	rpm	Ap	Experimental optinut din valorile optime			
				Sa	MPa	HV	Ab plan
2017	1425	8000	0.3	0.17	33	131	1.71
7075	1425	8000	0.3	0.16	45	116	1.50
99.9	1425	8000	0.3	0.57	-17	35	2.46

3.2.1. Concluzii privind optimizarea cu ajutorul retelelor neuronale

În vederea identificării parametrilor optimi ai procesului de prelucrare prin frezare, care să conducă la îmbunătățirea calității suprafețelor prelucrate, a fost utilizată metoda rețelelor neuronale. În urma aplicării metodei de optimizare a parametrilor calității suprafețelor prelucrate s-au constatat următoarele aspecte:

- în vederea determinării modelului RN care să permită rezolvarea cu succes a problemei analizate, s-au testat diverse topologii ale reţelei. Acestea au fost create pentru fiecare mediu de

prelucrare in parte. Rezultate optime, in functie de mediu utilizate au avut structura diferita bazata fiind pe un strat ascuns cu numar diferit de neuroni in functie de mediu / strat .

- testarea capacităţii de generalizare a modelului ales a presupus prescrierea de către reţea a unor ieşiri corecte pentru intrări diferite de cele cu care a fost antrenată; în urma testului s-a obţinut o bună concordanţă între datele dorite şi cele prescrise, realizându-se astfel validarea reţelei neuronale; pentru testarea datelor prescrise de rețea au fost efectuate comparații cu valorile determinate experimental;

- domeniile optime de prelucrare au condus la valori ale adancimii de prelucrare egale cu 0.3 mm; viteze de rotatie de 8000 rpm si viteze de avans cuprinse intre 1095 si 2000 mm/min

- utilizarea parametrilor optimizați a generat valori usor diferite in realitate fata de cei prescrisi de retea

- în comparație cu programele de simulare cu element finit, sau analiza 3D, utilizarea rețelelor neuronale reduce timpul de calcul de la zile la câteva secunde;

- utilizarea rețelelor prezintă avantajul verificării inverse a rezultatelor, fapt care conduce la minimizarea erorii de calcul sub 15%.

CAPITOLUL 6

CONCLUZII GENERALE

Calitatea suprafeței este reprezentată în general de câțiva factori de bază cum sunt:

- rugozitatea suprafeței;
- abaterea la planeitate;
- starea de tensiuni reziduale în stratul superficial;
- microduritatea suprafeței.

Calitatea suprafeței este influențată atât de parametrii de prelucrare cât și de compoziția chimică a materialelor sau mediile de lucru utilizate. Cunoașterea efectului pe care le au diverse medii și parametrii asupra caracteristicilor de calitate poate conduce la optimizarea parametrilor în vederea obținerii caracteristicilor de calitate dorite.

3.3. Concluzii privind stadiul actual al tehnicii:

Analiza stadiului actual al cercetărilor privind influența mediilor de prelucrare asupra caracteristicilor de calitate ale suprafeței, a condus la următoarele concluzii și considerente:

- calitatea suprafeței piesei prelucrate este influențată în principal de regimurile de prelucrare adoptate, fiecare material având din acest punct de vedere un comportament specific determinat de caracteristicile fizico-chimice ale acestuia;
- determinarea precisă a influenței parametrilor regimurilor de așchiere poate contribui la realizarea unor piese corespunzătoare din punct de vedere al calităţii suprafeţei şi al preciziei de formă și dimensională;
- există un număr mic de studii referitoare la prelucrarea aliajelor de aluminiu în mediu criogenic. Studiile realizate până la această data au fost orientate în următoarele direcţii:
  - studiul asupra aliajelor de aluminiu de tip dur-AL
  - studii realizate asupra materialelor greu de prelucrat precum INCONEL, aliaje de titan, aliaje greu prelucrabile, etc.;
  - studiul diverselor medii combinate cu mediul criogenic asupra caracteristicilor de calitate ale suprafeței generate la prelucrarea materialelor greu de prelucrat;
  - studii teoretice de modelare, simulare în vederea prezicerii caracteristicilor de calitate ale suprafeței (rugozitate);
- nu au fost realizate/găsite studii în medii de prelucrare criogenice ale aliajelor moi, precum aluminiu 99.9%;
- există un număr limitat de studii referitoare la influența mediilor de prelucrare asupra distribuției tensiunilor reziduale.

În urma analizării stadiului actual al cercetărilor privind influențele lichidelor criogenice asupra pieselor prelucrate prin așchiere se pot desprinde următoarele concluzii și considerații:

Parametrii de prelucrare, compoziția chimică a materialului și mediile de lucru, sunt factori care influențează caracteristicile de calitate ale suprafeței (rugozitate, abatere în plan, tensiuni reziduale, microduritate) în funcție de modul lor de utilizare.

In literatura de specialitate găsim un număr mic de studii referitoare la prelucrarea cu ajutorul lichidelor criogenice pentru aliajele neferoase (aliaje de aluminiu). Acest lucru se datorează cel mai

probabil costurilor de producție, transport și depozitare a lichidelor criogenice cât și a ratei înalte de prelucrabilitate a aliajelor „moi”.

Cercetările efectuate în cadrul prezentei teze au constat în stabilirea pe cale experimentală şi teoretică a dependenței dintre interacțiunea generată de parametrii dinamici de prelucrare (avans pe dinte, viteză de așchiere, adâncime de prelucrare), compoziția chimică a materialelor utilizate și diverse medii de prelucrare (uscat, MQL, criogenic, criogenic+MQL).

Astfel, prin regimurile de lucru adoptate, s-a determinat care este influența acestora asupra calității suprafețelor prelucrate. Pentru verificarea determinărilor experimentale cât și pentru a determina influența parametrilor de prelucrare asupra forțelor generate în timpul prelucrării, s-a folosit softul AdvantEdge, soft specializat în prelucrări prin așchiere. Optimizarea valorilor parametrilor de calitate ai suprafeței a fost efectuată utilizând metoda rețelelor neuronale.

Utilizarea acestora a condus la alegerea parametrilor optimi de prelucrare în diverse medii de lucru.

Unul dintre aspectele urmărite în cadrul studiilor experimentale efectuate l-a reprezentat determinarea influenței parametrilor procesului de frezare (compoziţia chimică a materialului prelucrat, adâncimea de prelucrare, viteza de avans) și a influenței mediilor de prelucrare asupra caracteristicilor de calitate ale suprafeței.

Concluzii privind influența compoziției chimice asupra caracteristicilor de calitate ale suprafeței obținute în diverse medii de prelucrare.

În urma analizării influenței compoziției chimice a materialului prelucrat în diverse medii au fost observate următoarele aspecte :

<u>Prelucrarea în mediul uscat</u>

- Odată cu creșterea adâncimii de prelucrare există o tendință de descreștere a valorilor rugozității pentru toate materialele prelucrate;
- Utilizarea aliajului de tip 7075 pune în evidență cele mai mici rugozități în condiții de prelucrare uscată;
- Utilizarea adâncimilor de prelucrare de 0.1 mm a generat în toate cazurile rugozități cu valori mari;

- Utilizarea aluminiului cu puritate 99,9% a generat cele mai mari rugozități, cel mai probabil datorită caracteristicilor fizico-chimice ale acestuia.
- Utilizarea materialului cu puritate mare, aluminiu 99.9%, a condus la apariția de tensiuni reziduale cu valori de compresiune și variații foarte mari în funcție de regimul de așchiere ales. Pe de altă parte utilizarea aliajelor de aluminiu (2017, 7075) prezintă tensiuni reziduale uniformizate cu valori mari și distribuție în general în zona de întindere.

- Duritatea inițială a materialului își lasă amprenta și în cazul acestor prelucrări. Utilizarea aliajului de aluminiu 7075 prezintă cea mai mare duritate medie, indicând că este un material mai dur, potrivit pentru aplicații care necesită rezistență ridicată. Trecerea la aliajul de aluminiu 2017 a condus la durități cu valori mari dar cu variații mici (în fucnție de parametrii de prelucrare).
- În cee ace privește abaterea în plan observăm că fiecare material se comport ușor diferit. Aluminiu 99.9% prezintă o variație mai mare în abaterea planului, indicând o stabilitate dimensională variabilă. Aliajului de aluminiu 2017 are o abatere plană medie mai mică, sugerând o precizie dimensională mai bună. Aliajului de aluminiu 7075 prezintă o variabilitate mai mică, dar cu abateri plan moderate.

Prelucrarea în mediul MQL

- În mediul MQL observăm o tendință diferită de propagare a valorilor rugozității care manifestă o tendință crescătoare odată cu creșterea adâncimii de așchiere;
- Utilizarea mediului MQL conduce la o îmbunătățire majoră a rugozităților generate pe aluminiu 99.9%; În același timp observăm o creștere a acestor valori pe aliajul 2017; Cel mai probabil există o conexiune direcă între microduritatea materialului și utilizarea lichidelor de răcire/lubrifiere;
- În cazul utilizării vitezelor mici de avans (0.04 / 0.05 mm/dinte) observăm că aliajul de aluminiu 2017 generează valori foarte mari ale rugozităților, în timp ce materialele mai „moi” generează rugozități mici în aceleași condiții.

- Utilizarea mediului de prelucrare cu cantitate minima de lubrifiant (MQL) conduce în cazul tuturor materialelor prelucrate la generarea de tensiuni compressive în stratul superficial. Prelucrarea aluminiului 99.9% a condus la generarea de tensiuni cu valori mari și variații nesemnificative. Utilizarea aliajelor de aluminiu (2017, 7075) conduce la tensiuni de compresiune cu valori intermediare și variații mai mari

- Microduritatea în stratul superficial nu a variat foarte mult . Față de durităţile măsurate initial observăm o reducere a valorilor durității. Cele mai mari valori la utilizarea acestui mediu au fost proportional obținute, în cazul aliajului 2017.
- Utilizarea mediului MQL aduce o normalizare a rezultatelor abaterilor de la plan fiind înregistrate valori mai mici față de utilizarea celolalte medii de prelucrare.

Prelucrarea în mediul criogenic (LN_2)

- Aluminiul 99.9% denotă cea mai mare instabilitate la prelucrarea cu azot lichid;
- Odată cu adâncimea de așchiere sunt observate ușoare tendințe de descreștere a valorilor rugozității pentru toate materialele utilizate;
- Utilizarea aliajului de aluminiu 2017 care are ca și element principal de aliere, cupru, conferă materialului un bun coeficient de transfer termic, lucru care îl poziționează pe primul loc în prelucrarea cu LN_2;
- Utilizarea mediului criogenic conduce și în cazul tensiunilor reziduale la apariția pentru toate materialele de tensiuni de întindere în stratul superficial. Valorile cele mai mici ale tensiunilor sunt înregistrate în cazul aluminiului 99.9% în timp ce un aliaj cu multe elemente de aliere (7075) face ca tensiunile obținute să aibă variații și valori mari.
- Utilizarea agentului criogenic face ca materialul să aibă un comportament similar cu prelucrarea în mediul uscat cu mențiunea că valorile micodurității sunt mai mari decât în cazul prelucrării uscate.
- În cazul abaterilor în plan, utilizarea agentului criogenic, conduce la variații foarte mari ale abaterilor. Utilizarea „frigului” face materialul casant în consecință, cu abateri mari, greu de optimizat.

Prelucrarea în mediul combinat (crio+MQL)

- Toate cele 3 materiale prezintă o tendință descrescătoare a rugozității odată cu creșterea adâncimii de prelucrare;
- Utiliarea aliajului 2017 care anterior revela o stabilitate termică bună face ca acesta să confere cele mai bune valori ale rugozității;
- Valorile mari ale avansului pe dinte fac și în acest caz ca rugozitățile să aibă o tendință crescătoare.
- Utilizarea mediului combinat generează comportamente diferite în funcție de compoziția materialului. Utilzarea materialului pur și a aliajelor cu elemente care au coeficienți buni de

transfer termic (cupru- 400w/mK) conduce la o bună conductivitate termică și implicit la o stare de tensiuni favorabilă în stratul superficial (al99.9 – tensiuni de compresiune cu variații mici; al2017 – tensiuni apropiate de 0 Mpa); În cazul aliajului de aluminiu 7075 sunt observate variații mari de la compresiune la întindere lucru care face acest material greu de optimizat (din punct de vedere al distribuției tensiunilor);

- Utilizarea agentului criogenic în cobinație cu MQL face ca amplitudinea valorilor să fie mai scăzută și dispunerea rezultatelor uniforme față de alte medii.
- În cazul abaterilor în plan, dispunerea rezultatelor este omogenă valorile obținute fiind ușor mai mici decât în celelalte cazuri.

3.4. **Concluzii privind influența principalilor parametrii de prelucrare asupra caracteristicilor de calitate ale suprafeței obținute**

Dintre parametrii utilizați în cadrul diverselor medii de prelucrare cdele mai importante influențe au fost date de viteza de avans pe dinte și adâncimea de prelucrare. Datorită setului de date generat prin planul experimental putem spune că viteza de prelucrare nu a avut o influență majoră asupra caracteristicilor de calitate ale suprafeței.

Avansul de prelucrare

Creșterea avansului de prelucrare pare a fi factorul decisiv de influență al caracteristicilor de calitate ale suprafeței. În general creșterea vitezei de avans a condus la creșterea valorilor rugozităților și a abaterilor în plan. O relație ușor inversă este observată în cazul prelucrării în mediul criogenic unde odată cu creșterea avansului se observă o descreștere a valorilor rugozităților.

Adâncimea de așchiere

În cadrul setului de date programat prin Design Expert au fost folosite două tipuri de adâncimi, adâncimi mici, constante de prelucrare (0.1 mm) și adâncimi progresive de la 0.3 mm la 1 mm. Acest set a fost ales sub această formă pentru a observa atât influența adâncimilor cât și influența vitezelor de avans în diverse condiții.În cazul utilizării de 0.1 mm se observă că acestea conduc la rezultate cu valori mari atât ale rugozităților cât și ale abaterilor în plan sau ale tensiunilor reziduale. Adâncimea de 0.1 mm face ca așchierea să fie o semi-tasare și sa genereze depuneri atât pe semifabricat cât și pe scula așchietoare (așchii mici). Utilizarea adâncimilor mai mari de până la 1 mm are o influență clară asupra abaterilor de la planeitate, indicând o corelație pozitivă între cele două (crește adâncimea - crește valoarea abaterii).

Concluzii privind analiza cu element finit

În urma efectuării simulărilor procesului de frezare (simulare ortogonală) pot fi generate următoarele concluzii:

- simularea procesului de frezare a permis analizarea unor parametrii care altfel sunt greu de masurat in conditiile in care mdiile pot fi daunatoare echipamentelor
- prin analiza cu element finit s-au determinat valorile fortelor generate in timpul prelucrarii, al temperaturilor rezultate in urma prelucrarii cat si a distributiei tensiunilor reziduale
- totodata s a observat faptul ca exista aceleasi interactiuni majore care afecteaza parametrii de calitate, respectiv viteza de avans pe dinte cat si adancimea de prelucrare

Concluzii privind optimizarea cu ajutorul retelelor neuronale

În vederea identificării parametrilor optimi ai procesului de prelucrare prin frezare, care să conducă la îmbunătățirea calității suprafețelor prelucrate, a fost utilizată metoda rețelelor neuronale. În urma aplicării metodei de optimizare a parametrilor calității suprafețelor prelucrate a fost determinat un regim de aschiere optimizat, cu variati doar in cazul vitezei de avans. In vederea optimizarii s-au facut verificari experimentale ale datelor rezultate din prelucrarile recomandate de retea. Astfel s-a obesrvat ca exista totusi mici diferente ale valorilor reale fata de cele prescrise dar acestea au o eroare mai mica de 15% lucru care face ca reteaua sa fie acceptata.

Contribuții originale

Prin cercetările teoretice și experimentale efectuate în cadrul acestei teze s-au adus următoarele contribuții originale:

Aplicarea celor 4 medii de prelucrare în vederea determinării factorilor de influență pe aliajele de aluminiu inclusiviu pe aluminiul 99,9% (aluminiu electrotehnic).

Investigarea şi analiza experimentală a următorilor factori ce afectează caracteristicile de calitate ale suprafeței ale pieselor prelucrate prin frezare în diverse medii de lucru:

- influența vitezei de avans asupra rugozității suprafeței în mediu uscat;
- influența vitezei de avans asupra distribuției tensiunilor reziduale în mediu uscat;
- influența vitezei de avans asupra microdurității în mediu uscat;

- influența vitezei de avans asupra abaterii la planeitate în mediu uscat;
- influența vitezei de avans asupra rugozității suprafeței în mediu MQL;
- influența vitezei de avans asupra distribuției tensiunilor reziduale în mediu MQL;
- influența vitezei de avans asupra microdurității în mediu MQL;
- influența vitezei de avans asupra abaterii la planeitate în mediu MQL;
- influența vitezei de avans asupra rugozității suprafeței în mediu criogenic (LN_2);
- influența vitezei de avans asupra distribuției tensiunilor reziduale în mediu criogenic (LN_2);
- influența vitezei de avans asupra microdurității în mediu criogenic (LN_2);
- influența vitezei de avans asupra abaterii la planeitate în mediu criogenic (LN_2);
- influența vitezei de avans asupra rugozității suprafeței în mediu combinat (LN_2 + MQL);
- influența vitezei de avans asupra distribuției tensiunilor reziduale în mediu combinat (LN_2 + MQL);
- influența vitezei de avans asupra microdurității în mediu combinat (LN_2 + MQL);
- influența vitezei de avans asupra abaterii la planeitate în mediu combinat (LN_2 + MQL);
- influența adâncimii de prelucrare asupra rugozității suprafeței în mediu uscat;
- influența adâncimii de prelucrare asupra distribuției tensiunilor reziduale în mediu uscat;
- influența adâncimii de prelucrare asupra microdurității în mediu uscat;
- influența adâncimii de prelucrare asupra abaterii la planeitate în mediu uscat;
- influența adâncimii de prelucrare asupra rugozității suprafeței în mediu MQL;
- influența adâncimii de prelucrare asupra distribuției tensiunilor reziduale în mediu MQL;
- influența adâncimii de prelucrare asupra microdurității în mediu MQL;
- influența adâncimii de prelucrare asupra abaterii la planeitate în mediu MQL;
- influența adâncimii de prelucrare asupra rugozității suprafeței în mediu criogenic (LN_2);
- influența adâncimii de prelucrare asupra distribuției tensiunilor reziduale în mediu criogenic (LN_2);
- influența adâncimii de prelucrare asupra microdurității în mediu criogenic (LN_2);
- influența adâncimii de prelucrare asupra abaterii la planeitate în mediu criogenic (LN_2);
- influența adâncimii de prelucrare asupra rugozității suprafeței în mediu combinat (LN_2 + MQL);
- influența adâncimii de prelucrare asupra distribuției tensiunilor reziduale în mediu combinat (LN_2 + MQL);
- influența adâncimii de prelucrare asupra microdurității în mediu combinat (LN_2 + MQL);
- influența adâncimii de prelucrare asupra abaterii la planeitate în mediu combinat (LN_2 + MQL);
- influența compoziției chimice a materialului prelucrat cu diverse regimuri de așchiere în medii diferite;

Analiza prin simulare cu ajutorul softului AdvantEdge a următorilor factori ce afectează mărimea forței de prelucrare.

- influența vitezei de așchiere asupra forței de prelucrare;
- influența vitezei de avans asupra forței de prelucrare;
- influența adâncimii de prelucrare asupra forței de prelucrare;
- influența compoziției chimice a materialului prelucrat asupra forței de prelucrare;

Determinarea domeniului optim de variație a factorilor de calitate ai suprafeței prin utilizarea metodei rețelelor neuronale; determinarea cu ajutorul rețelelor neuronale a parametrilor optimi de prelucrare în vederea obținerii parametrilor doriți de calitate ai suprafeței.

Direcții viitoare de studiu

Pe baza cercetărilor efectuate și a rezultatelor obținute în urma prezentei teze se consideră că în vederea cercetărilor viitoare pot fi abordate următoarele teze de cercetare:

- Aplicarea unor metode nedistructive de determinare a tensiunilor reziduale care să permită obținerea unei distribuții exacte a acestora în funcţie de diferiţi parametrii şi factori de influenţă;
- Analiza influentei asupra distribuţiei tensiunilor reziduale şi a altor factori de influenta (materialul sculei si geometria acesteia, numarul de dinti ai sculei, temperatura generata de procesul de aşchiere, etc) la prelucrarea aluminiului 99.9% care datorită bunelor caracteristici de conductivitate termică poate fi ușor optimizată utilizării pe scară mai largă.
- Realizarea unui model matematic complex de legatura între mediile de lucru utilizate si parametrii de calitate ai suprafetei;