



**ŞCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ**

**Facultatea: Inginerie Tehnologică și Management Industrial**

**Ing. Bogdan ARSENE**

**CERCETĂRI PRIVIND MANAGEMENTUL TEHNOLOGIILOR ÎN  
INDUSTRIA CONSTRUCȚIILOR DE MAȘINI**

**RESEARCH REGARDING THE MANAGEMENT OF  
TECHNOLOGIES IN THE MANUFACTURING INDUSTRY**

**REZUMAT / ABSTRACT**

**Conducător științific**

**Prof.dr.ing. Gavrilă CALEFARIU**

**BRAȘOV, 2022**

D-lui (D-nei) .....

## COMPONENTA

### Comisiei de doctorat

Numită prin ordinul Rectorului Universităţii Transilvania din Braşov

Nr. .... din .....

PREŞEDINTE

Prof.dr.ing. **Gheorghe OANCEA**, Universitatea Transilvania  
din Braşov

CONDUCĂTOR ŞTIINŢIFIC:

Prof.dr.ing **Gavrilă CALEFARIU**, Universitatea Transilvania  
din Braşov

REFERENŢI:

Prof.dr.ing. **Lucian-Ionel CIOCA**, Universitatea Lucian Blaga  
din Sibiu

Prof.dr.ing. **Tiberiu Gabriel DOBRESCU**, Universitatea  
POLITEHNICA din Bucureşti

Conf.dr.ing **Flavius Aurelian SÂRBU**, Universitatea  
Transilvania din Braşov

Data, ora şi locul susţinerii publice a tezei de doctorat: ....., ora ....., sala .....

Eventualele aprecieri sau observaţii asupra conţinutului lucrării vor fi transmise electronic, în timp util, pe adresa [arsene.bogdan@unitbv.ro](mailto:arsene.bogdan@unitbv.ro)

Totodată, vă invităm să luaţi parte la şedinţa publică de susţinere a tezei de doctorat.

Vă mulţumim.

## Cuvânt înainte

Aş dori să adresez primele mulțumiri domnului Prof.univ.dr.ing. Gavrilă CALEFARIU care mi-a oferit această oportunitate, pentru perseverența cu care m-a îndrumat în elaborarea acestei lucrări și pentru profesionalism.

În aceeași măsură, adresez mulțumiri distinșilor referenți științifici, Prof.univ.dr.ing. Gheorghe OANCEA, Prof.univ.dr.ing. Lucian-Ionel CIOCA, Prof.univ.dr.ing. Tiberiu Gabriel DOBRESU și Conf.univ.dr.ing. Flavius Aurelian SÂRBU pentru acceptul de a fi membri ai Comisiei de analiză a tezei și pentru efortul și răbdarea de a analiza prezenta teză.

Mulțumesc pentru susținere, pentru sfaturi și pentru îndrumarea în elaborarea acestei lucrări, domnului Șef lucrări dr.ing. Cătălin GHEORGHE, precum și membrilor comisiei de îndrumare, doamnei Conf.univ.dr.ing. Cristina GĂVRUȘ și domnului Prof.univ.dr.ing. Mircea BOȘCOIANU.

Țin să mulțumesc, de asemenea, colectivului departamentului de Inginerie și Management Industrial din cadrul Facultății de Inginerie Tehnologică și Management Industrial de la Universitatea Transilvania din Braşov, pentru suportul oferit pe parcursul studiilor, precum și domnilor Mircea Vasiloni și Ovidiu Sîrbu pentru sprijinul oferit la planificarea experimentelor.

De asemenea, mulțumesc conducerii Întreprinderii Electroprecizia Săcele, domnului Director Ștefan Rîșnoveanu, care a sprijinit teza prin furnizarea semifabricatelor de duritate înaltă, pe care s-au derulat cercetările experimentale, domnului Andrei Tret, reprezentant Sandvik Coromant România, care a sprijinit teza prin furnizarea plăcuțelor aşchietoare, precum și tuturor celor care, fie cu mult fie cu puțin, au fost alături de mine la acest demers.

**Bogdan ARSENE**

**Braşov, 2022**

## CUPRINS

|   | Pg.<br>teza | Pg.<br>rezumat |
|---|-------------|----------------|
| <b>LISTA DE NOTAȚII/SIMBOLURI</b> .....   | 4           | 10             |
| <b>INTRODUCERE</b> .....  | 13          | 11             |
| <b>1. CAPITOL 1 Stadiul actual al problematicii managementului tehnologiilor în industria construcțiilor de mașini</b> .....    | 15          | 13             |
| 1.1 Considerații generale referitoare la fabricație și la tehnologiile de fabricație în industria construcțiilor de mașini..... | 15          | 13             |
| 1.1.1 Introducere.....  | 15          | -              |
| 1.1.2 Competiția globală și costurile de fabricație.....  | 16          | 13             |
| 1.1.3 Tendințe generale în fabricație.....  | 17          | 13             |
| 1.2 Considerații generale referitoare la managementul tehnologiilor.....  | 19          | 14             |
| 1.3 Tehnologii de fabricație în industria construcțiilor de mașini.....   | 27          | 15             |
| 1.3.1 Clasificarea tehnologiilor de fabricație.....   | 27          | 15             |
| 1.3.2 Tehnologii de fabricație prin aşchiere.....   | 28          | -              |
| 1.3.3 Tehnologii de fabricație neconvenționale.....   | 31          | -              |
| 1.3.4 Tehnologii de fabricație aditive.....   | 34          | -              |
| 1.3.5 Microtehnologii și nanotehnologii de fabricație.....  | 38          | -              |
| 1.3.6 Biotehnologii de fabricație.....  | 41          | -              |
| 1.4 Criterii de alegere și parametri de caracterizare a tehnologiilor de fabricație.....  | 43          | 16             |
| 1.4.1 Criterii de alegere a tehnologiilor de fabricație.....  | 43          | 16             |
| 1.4.1 Parametri și indicatori de caracterizare a tehnologiilor de fabricație.....   | 44          | 16             |
| <b>2. CAPITOL 2 Obiectivele tezei de doctorat</b> .....   | 45          | 17             |
| <b>3. CAPITOL 3 Considerații privitoare la posibilitatea înlocuirii rectificării cu strunjirea dură</b> .....                   | 47          | 19             |
| 3.1 Introducere.....  | 47          | 19             |
| 3.2 Integritatea suprafețelor.....  | 53          | 19             |
| 3.3 Materiale și tehnologii utilizate la fabricarea și acoperirea sculelor pentru strunjirea dură.....                          | 60          | -              |
| 3.3.1 Materiale utilizate la fabricarea sculelor pentru strunjirea dură.....  | 60          | -              |
| 3.3.2 Materiale și tehnologii pentru acoperirea sculelor utilizate la strunjirea dură.....                                      | 66          | -              |
| 3.4 Provocările înlocuirii rectificării cu strunjirea dură.....   | 68          | 20             |





|  |            |           |
|--|------------|-----------|
| 3.4.1 Straturile albe (White layers).....  | 68         | 20        |
| 3.4.2 Uzura sculei la strunjirea dură.....   | 76         | 21        |
| 3.4.3 Strunjirea suprafeţelor întrerupte.....  | 89         | 23        |
| 3.4.4 Costurile procedului.....  | 94         | -         |
| 3.5 Influenţa geometriei sculei asupra performanţelor strunjirii dure - geometria Wiper.....   | 97         | 24        |
| 3.6 Tensiunile reziduale la strunjirea dură.....   | 102        | 26        |
| 3.7 Acurateţea strunjirii dure.....  | 111        | -         |
| 3.8 Metode de analiză, modelare şi optimizare a parametrilor strunjirii dure, utilizate în literatura de specialitate.....                                       | 114        | -         |
| 3.9 Concluzii.....   | 118        | 27        |
| <b>4. CAPITOL 4 Contribuţii teoretice privitoare la evaluarea şi managementul tehnologiilor.....</b>   | <b>121</b> | <b>30</b> |
| 4.1 Analiza calitativă a înlocuirii rectificării cu strunjirea dură.....   | 121        | 30        |
| 4.2 Eficienţa economică a înlocuirii rectificării cu strunjirea dură.....  | 124        | 31        |
| 4.2.1 Introducere.....   | 124        | 31        |
| 4.2.2 Indicatori pentru determinarea eficienţei economice.....   | 124        | 31        |
| 4.2.3 Modelele matematice ale eficienţei economice.....  | 126        | 31        |
| <b>5. CAPITOL 5 Managementul tehnologiilor în contextul Industry 4.0 - tendinţe şi provocări în sistemele de fabricaţie.....</b>                                 | <b>131</b> | <b>33</b> |
| 5.1 Introducere.....   | 131        | 33        |
| 5.2 Tehnologii cheie implicate în Industria 4.0.....   | 132        | 33        |
| 5.3 Tendinţe şi provocări ale managementului fabricaţiei în contextul Industriei 4.0.....  | 136        | 35        |
| 5.3.1 Resursa umană în Industria 4.0 - securitatea muncii şi abilităţile angajaţilor.....  | 136        | 35        |
| 5.3.2 Managementul calităţii: mentenanţă şi maşini-unelte.....   | 138        | 35        |
| 5.3.3 Logistică şi planificare în contextul Industriei 4.0.....  | 140        | 36        |
| 5.3.4 Costurile organizaţiei şi impactul economic în contextul Industriei 4.0.....   | 142        | 37        |
| 5.4 Concluzii.....   | 144        | 38        |
| <b>6. CAPITOL 6 Aspectele de mediu ale înlocuirii rectificării cu strunjirea dură şi posibilitatea utilizării uleiurilor vegetale ca lichid de aşchiere.....</b> | <b>147</b> | <b>40</b> |
| 6.1 Consideraţii generale.....   | 147        | 40        |



|  |            |           |
|--|------------|-----------|
| 6.2 Tehnica lubrifierii cu cantitate minimă de lubrifiant.....   | 151        | 40        |
| 6.3 Tipuri de lichide de răcire-ungere.....  | 154        | -         |
| 6.4 Mecanismul de lubrifiere al uleiurilor vegetale.....   | 160        | 41        |
| 6.5 Analiza stadiului actual al aşchierii metalelor necălite cu uleiuri vegetale ca lichide de răcire-ungere.....                | 162        | -         |
| 6.6 Analiza stadiului actual al strunjirii dure cu uleiuri vegetale ca lichide de răcire-ungere.....                             | 165        | 41        |
| 6.7 Analiza utilizării nanolubrifiantilor pe bază de uleiuri vegetale, în aşchiere.....  | 171        | -         |
| 6.8 Concluzii.....   | 176        | 45        |
| <b>7. CAPITOL 7 Rezultate experimentale privind înlocuirea lubrifiantilor sintetici și minerali cu lubrifianti organici.....</b> | <b>179</b> | <b>47</b> |
| 7.1 Proiectarea experimentelor.....  | 180        | 48        |
| 7.2 Desfășurarea experimentelor.....   | 182        | 49        |
| 7.2.1 Materiale și metode.....   | 182        | 49        |
| 7.2.2 Rezultatele primului experiment.....   | 190        | 54        |
| 7.2.3 Interpretarea rezultatelor.....  | 194        | -         |
| 7.2.4 Analiza statistică a datelor experimentale.....  | 202        | 56        |
| 7.2.4.1 Analiza efectelor medii.....   | 202        | 56        |
| 7.2.4.2 Analiza de varianță (ANOVA).....   | 203        | 56        |
| 7.2.4.3 Analiza modelelor de regresie pentru Ra.....   | 204        | -         |
| 7.2.4.4 Analiza modelelor de regresie pentru Rz.....   | 216        | -         |
| 7.2.4.5 Analiza modelelor de regresie pentru Rpk.....  | 228        | -         |
| 7.2.5 Rezultatele celui de al doilea experiment - uzura sculei, deviațiile de formă și integritatea suprafețelor.....            | 240        | 57        |
| 7.2.5.1 Analiza uzurii sculei.....   | 240        | 57        |
| 7.2.5.2 Analiza abaterilor de formă și a rugozităților Rsk și RKu.....   | 245        | 61        |
| 7.2.5.3 Analiza metalografică a suprafețelor obținute.....   | 246        | -         |
| 7.2.6 Analiza costurilor.....  | 247        | -         |
| 7.2.7 Concluzii.....   | 249        | 62        |
| <b>8. CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII ORIGINALE. DISEMINAREA REZULTATELOR. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE.....</b>                 | <b>251</b> | <b>64</b> |
| <b>BIBLIOGRAFIE.....</b>   | <b>257</b> | <b>70</b> |
| <b>Scurt rezumat (română /engleză).....</b>  | <b>283</b> | <b>73</b> |

## CONTENT

|  | Pg.  | Pg.     |
|--|------|---------|
|  | teza | rezumat |
| <b>NOTATIONS/SYMBOLS LIST</b> .....  | 4    | 10      |
| <b>INTRODUCTION</b> .....  | 13   | 11      |
| <b>1. CHAPTER 1 The current state of technology management problem in the manufacturing industry</b> .....           | 15   | 13      |
| 1.1 General considerations regarding manufacturing and manufacturing technologies in the manufacturing industry..... | 15   | 13      |
| 1.1.1 Introduction.....  | 15   | -       |
| 1.1.2 Global competition and the manufacturing costs.....  | 16   | 13      |
| 1.1.3 General trends in manufacturing.....   | 17   | 13      |
| 1.2 General considerations regarding technology management.....  | 19   | 14      |
| 1.3 Manufacturing technologies in the manufacturing industry.....  | 27   | 15      |
| 1.3.1 Classification of manufacturing technologies.....  | 27   | 15      |
| 1.3.2 Cutting manufacturing technologies.....  | 28   | -       |
| 1.3.3 Nonconventional manufacturing technologies.....  | 31   | -       |
| 1.3.4 Additive manufacturing technologies.....   | 34   | -       |
| 1.3.5 Manufacturing microtechnologies and nanotechnologies.....  | 38   | -       |
| 1.3.6 Manufacturing biotechnologies.....   | 41   | -       |
| 1.4 Selection criteria and characterization parameters of manufacturing technologies.....                            | 43   | 16      |
| 1.4.1 Selection criteria of manufacturing technologies.....  | 43   | 16      |
| 1.4.1 Parameters and indicators for characterization of manufacturing technologies.....                              | 44   | 16      |
| <b>2. CHAPTER 2 The objectives of the phd thesis</b> .....   | 45   | 17      |
| <b>3. CHAPTER 3 Considerations regarding the possibility of replacing grinding with hard turning</b> .....           | 47   | 19      |
| 3.1 Introduction.....  | 47   | 19      |
| 3.2 Surfaces integrity.....  | 53   | 19      |
| 3.3 Materials and technologies for manufacturing and coating of hard turning tools.....                              | 60   | -       |
| 3.3.1 Materials for manufacturing of hard turning cutting tools.....   | 60   | -       |
| 3.3.2 Materials and technologies for coating of hard turning tools.....  | 66   | -       |
| 3.4 The challenges of replacing grinding with hard turning.....  | 68   | 20      |



|   |            |           |
|---|------------|-----------|
| 3.4.1 White layers.....   | 68         | 20        |
| 3.4.2 Hard turning tool wear.....   | 76         | 21        |
| 3.4.3 Hard turning of interrupted surfaces.....   | 89         | 23        |
| 3.4.4 Process costs.....  | 94         | -         |
| 3.5 The influence of tool geometry on the performance of hard turning - Wiper geometry.....   | 97         | 24        |
| 3.6 Residual stress on hard turning.....  | 102        | 26        |
| 3.7 The accuracy of hard turning.....   | 111        | -         |
| 3.8 Analysis, modeling and optimization methods of hard turning parameters, used in the current state.....  | 114        | -         |
| 3.9 Conclusions.....  | 118        | 27        |
| <b>4. CHAPTER 4 Theoretical contributions on the evaluation and management of technologies.....</b>   | <b>121</b> | <b>30</b> |
| 4.1 Qualitative analysis of replacement grinding with hard turning.....   | 121        | 30        |
| 4.2 The economic efficiency of replacing grinding with hard turning.....  | 124        | 31        |
| 4.2.1 Introduction.....   | 124        | 31        |
| 4.2.2 Indicators for determining economic efficiency.....   | 124        | 31        |
| 4.2.3 Mathematical models of economic efficiency.....   | 126        | 31        |
| <b>5. CHAPTER 5 The management of technologies in the context of Industry 4.0 - trends and challenges in manufacturing systems.....</b>             | <b>131</b> | <b>33</b> |
| 5.1 Introduction.....   | 131        | 33        |
| 5.2 Key technologies involved in Industry 4.0.....  | 132        | 33        |
| 5.3 Trends and challenges of manufacturing management in the context of Industry 4.0.....   | 136        | 35        |
| 5.3.1 Human resources in Industry 4.0 - safety and employee skills.....   | 136        | 35        |
| 5.3.2 Quality management: maintenance and machine-tools.....  | 138        | 35        |
| 5.3.3 Logistics and planning in the context of Industry 4.0.....  | 140        | 36        |
| 5.3.4 Organization costs and the economic impact in the context of Industry 4.0.....  | 142        | 37        |
| 5.4 Conclusions.....  | 144        | 38        |
| <b>6. CHAPTER 6 Environmental aspects of replacing grinding with hard turning and the possibility of using vegetable oils as cutting fluid.....</b> | <b>147</b> | <b>40</b> |
| 6.1 General considerations.....   | 147        | 40        |
| 6.2 Minimum quantity lubrication technique.....   | 151        | 40        |



|  |            |           |
|--|------------|-----------|
| 6.3 Coolants types.....  | 154        | -         |
| 6.4 The lubrication mechanism of vegetable oils.....   | 160        | 41        |
| 6.5 Analysis of the current state of cutting soft metals with vegetable oils as coolant...                                   | 162        | -         |
| 6.6 Analysis of the current state of hard turning with vegetable oils as coolant.....  | 165        | 41        |
| 6.7 Analysis of the vegetable oils based nanolubricants used in cutting.....   | 171        | -         |
| 6.8 Conclusions.....   | 176        | 45        |
| <b>7. CHAPTER 7 Experimental results on the replacement of synthetic and mineral lubricants with organic lubricants.....</b> | <b>179</b> | <b>47</b> |
| 7.1 Experimental design.....   | 180        | 48        |
| 7.2 Experimental deployment.....   | 182        | 49        |
| 7.2.1 Materials and methods.....   | 182        | 49        |
| 7.2.2 First experiment results.....  | 190        | 54        |
| 7.2.3 Interpretation of results.....   | 194        | -         |
| 7.2.4 Statistical analysis of the experimental data.....   | 202        | 56        |
| 7.2.4.1 Mean effects analysis.....   | 202        | 56        |
| 7.2.4.2 ANOVA.....   | 203        | 56        |
| 7.2.4.3 Analysis of regression models for Ra.....  | 204        | -         |
| 7.2.4.4 Analysis of regression models for Rz.....  | 216        | -         |
| 7.2.4.5 Analysis of regression models for Rpk.....   | 228        | -         |
| 7.2.5 The results of the second experiment - tool wear, shape deviations and surface integrity.....                          | 240        | 57        |
| 7.2.5.1 Tool wear analysis.....  | 240        | 57        |
| 7.2.5.2 Analysis of shape deviations and Rsk and Rku roughness.....  | 245        | 61        |
| 7.2.5.3 Metallographic analysis of the surfaces.....   | 246        | -         |
| 7.2.6 Costs analysis.....  | 247        | -         |
| 7.2.7 Conclusions.....   | 249        | 62        |
| <b>8. FINAL CONCLUSIONS. ORIGINAL CONTRIBUTIONS. DISSEMINATION OF RESEARCH RESULTS. FUTURE DIRECTIONS.....</b>               | <b>251</b> | <b>64</b> |
| <b>REFERENCES (extract).....</b>   | <b>257</b> | <b>70</b> |
| <b>Abstract.....</b>   | <b>283</b> | <b>73</b> |

| LISTA DE NOTAȚII/SIMBOLURI |                              |                   |
|----------------------------|------------------------------|-------------------|
| Simbol                     | Definiție                    | Unitate de măsură |
| s                          | Avans de lucru               | mm/rot            |
| t                          | Adâncime de aşchiere         | mm                |
| Va                         | Viteză de aşchiere           | m/min             |
| D                          | Durabilitate                 | min               |
| Vb                         | Uzura flancului              | mm                |
| T                          | Temperatură                  | °C                |
| Ne                         | Puterea necesară             | kW                |
| Fa                         | Forța principală de aşchiere | N                 |
| Ra                         | Rugozitate Ra                | μm                |
| Rz                         | Rugozitate Rz                | μm                |
| Rpk                        | Rugozitate Rpk               | μm                |
| Rsk                        | Factorul de asimetrie        | μm                |
| Rku                        | Factorul de aplatizare       | μm                |
| r                          | Raza sculei                  | mm                |

## INTRODUCERE

Subiectul dezvoltat în cadrul prezentei teze de doctorat este de mare importanță în industria modernă a construcțiilor de mașini de precizie. Nevoia tot mai mare de produse fiabile și de procese de fabricație sustenabile, precum și preocupările autorului pentru îmbunătățirea continuă a produselor și proceselor, au făcut ca cercetarea să fie orientată în direcția determinării condițiilor tehnice și economice în care procedeul tehnologic de strunjire dură poate înlocui procedeul tehnologic de rectificare, precum și în direcția identificării unor soluții noi de creștere a performanțelor procedurii de strunjire dură.

Teza de doctorat este compusă din opt capitole, ce cuprind aspectele relevante ale subiectului tratat.

Capitolul 1, prezintă aspectele generale ale tehnologiilor de fabricație, tendințele din fabricație, problematica managementului tehnologiilor, precum și clasificarea și caracterizarea tehnologiilor de fabricație. Capitolul se încheie cu o sinteză a metodelor de determinare a tehnologiei optime.

Capitolul 2, prezintă obiectivul principal al tezei de doctorat, precum și cele cinci obiective specifice cu ajutorul cărora acesta este îndeplinit.

Capitolul 3, intitulat "*Considerații privitoare la posibilitatea înlocuirii rectificării cu strunjirea dură*" prezintă noțiuni legate de integritatea suprafețelor, deosebit de importantă atunci când se modifică o tehnologie de fabricație, aspecte legate de sculele așchietoare pentru oțelurile călite, precum și provocările pe care le întâmpinăm atunci când înlocuim rectificarea cu strunjirea dură. De asemenea, tot în acest capitol se regăsesc noțiuni despre influența microgeometriei sculei asupra suprafeței și aspecte legate de tensiunile reziduale ce rezultă din prelucrări.

În capitolul 4, "*Contribuții teoretice privitoare la evaluarea și managementul tehnologiilor*", este evidențiată matricea de evaluare tehnologică, calitativă și economică a celor două procese de finisare și se regăsește modelul reconceptuat de calcul al costurilor influențate de tehnologie, precum și relațiile pentru determinarea procesului optim, considerând productivitatea și profitul.

Capitolul 5, denumit "*Managementul tehnologiilor în contextul Industry 4.0 - tendințe și provocări în sistemele de fabricație*" subliniază principalele tendințe și provocări care decurg din implementarea tehnologiilor informației și comunicării în sistemele de fabricație, grupate în patru categorii strâns legate de managementul fabricației.

În capitolul 6, intitulat "*Aspectele de mediu ale înlocuirii rectificării cu strunjirea dură și posibilitatea utilizării uleiurilor vegetale ca lichid de așchiere*" sunt analizate preocupările legate de mediul înconjurător și de sănătate a oamenilor din zonele de producție, în special efectul mediilor de lubrifiere clasice. Capitolul descrie tehnica modernă a lubrifierii cu cantitate minimă de lubrifiant, analiza uleiurilor vegetale ca lubrifiant, analiza utilizării uleiurilor vegetale ca lichide de răcire-ungere în diferite procese de așchiere, precum și sinteza utilizării nanolubrifiantilor pe bază de uleiuri vegetale.

Capitolul 7 al tezei cuprinde proiectarea și desfășurarea experimentelor, precum și rezultatele celor două experimente. De asemenea, sunt prezentate materialele și metodele utilizate, interpretarea

rezultatelor, analiza statistică a acestora prin diferite metode statistice, analiza uzurii sculei, analiza abaterilor de formă și analiza metalografică a probelor.

Capitolul 8 conține concluziile finale ale cercetării și contribuțiile originale aduse. De asemenea, sunt evidențiate direcțiile viitoare de cercetare ale acestui topic deosebit de important în managementul unui sistem de fabricație.

Cele 8 capitole ale tezei de doctorat sunt desfășurate pe 282 de pagini și cuprind 185 de figuri, 76 de tabele, 63 de relații matematice și 454 surse bibliografice.

Teza de doctorat prezintă contribuții originale cu privire la creșterea performanțelor procedului de strunjire dură, într-o manieră sustenabilă.



## **1. CAPITOL 1 Stadiul actual al problematicii managementului tehnologiilor în industria construcţiilor de maşini**

### **1.1 Consideraţii generale referitoare la fabricaţie şi la tehnologiile de fabricaţie în industria construcţiilor de maşini**

#### **1.1.2 Competiţia globală şi costurile de fabricaţie**

Economia fabricaţiei a fost dintotdeauna o consideraţie majoră, dar a devenit şi mai mare de când competitivitatea globală pentru preţuri mici şi produse de înaltă calitate a devenit o necesitate pe piaţa globală.

Pe de o parte, pentru a rămâne profitabile, sistemele de fabricaţie trebuie să calculeze cu mare acurateţe costurile totale ale unui produs şi să stabilească un preţ de vânzare potrivit. Chiar dacă costurile dezvoltării şi fabricării unui produs sunt calculate minuţios, stabilirea preţului poate reprezenta o decizie grea [MUR,01]. Pe de altă parte, eforturile de reducere a costurilor sunt foarte importante pentru obţinerea şi consolidarea profitabilităţii şi cash-flow-ului. Până în prezent, munca depusă în analiza costurilor de fabricaţie s-a concentrat pe identificarea oportunităţilor de reducere a costurilor [LEM,01]. În ultimii ani folosirea metodologiei costului ca bază pentru reducerea costurilor a crescut semnificativ. În acelaşi timp influenţa evaluării detaliate a costurilor a devenit din ce în ce mai critică în procesul de luare a deciziilor [LEM,01].

#### **1.1.3 Tendinţe generale în fabricaţie**

Odată cu progresele în tot ceea ce înseamnă materiale, procese şi controlul producţiei, remarcăm câteva tendinţe generale în fabricaţie [KAL,09]:

- materiale şi procese - tendinţele sunt spre un control mai bun al compoziţiei materialelor (impurităţi, incluziuni) pentru a spori proprietăţile generale, caracteristicile de fabricaţie, fiabilitate şi reciclare, ţinând în acelaşi timp costul cât mai jos. Cercetarea-dezvoltarea continuă fără întreruperi, domeniile de vârf fiind reprezentate de: super-conductori, semiconductori, nanomateriale, aliaje amorfe şi cu memorie, precum şi la acoperiri metalice. Echipamentele şi metodele de testare şi măsurare sunt îmbunătăţite, prin folosirea software-urilor şi calculatoarelor avansate şi a materialelor ceramice şi compozite [KAL,09];
- sisteme de fabricaţie - dezvoltarea continuă a sistemelor de control şi monitorizare, de inspecţie automată, a roboţilor industriali, a echipamentelor/sistemelor de manipulare şi asamblare şi a senzoricilor au un impact major asupra eficienţei şi fiabilităţii tuturor proceselor şi echipamentelor de fabricaţie. Progresele în software şi hardware, în sistemele de comunicaţii, în sistemele expert, în inteligenţa artificială şi reţele neuronale au permis implementarea eficientă a tehnologiei de grup, a fabricaţiei celulare şi a sistemelor flexibile de fabricaţie, precum şi a practicilor moderne în managementul eficient al sistemelor de fabricaţie [KAL,09];
- tendinţe organizaţionale - în mod tradiţional, în filosofia operaţională, în organizaţii accentul a fost pus pe comunicarea "de sus în jos" şi pe un control puternic al managementului, având ca prioritate principal creşterea profitului. În zilele noastre, tendinţa la scară largă este comunicarea "de-a lungul întregii organizaţii". Competiţia globală şi cerinţele pentru fabricaţia de top împing organizaţiile către schimbări majore ale strategiilor. Fabricaţia a devenit parte

integrată a modelelor de business pe termen lung pentru companiile care trebuie să își mențină poziția competitivă și să își mărească cota pe piață. [KAL,09].

Principalul obiectiv în fabricație este minimizarea duratei proceselor, a costurilor, a energiei și a resurselor, menținând sau îmbunătățind, în același timp, performanțele [NEU,02]. În ziua de azi, principala provocare în industria construcțiilor de mașini (ICM) constă în dezvoltarea și aplicarea de strategii inovative care vizează în primul rând reducerea timpului de ciclu și a costurilor, pentru o productivitate sporită, profitabilitate mărită și eficiența a utilizării resurselor și a energiei, dar și îmbunătățirea performanțelor și reducerea emisiilor [NEU,02].

## 1.2 Considerații generale referitoare la managementul tehnologiilor

Managementul tehnologiilor (MT) este o specialitate interdisciplinară ce integrează științe, inginerie, cunoaștere și metode de management de bază. MT înseamnă managementul sistemelor care ajută la crearea, achiziția și utilizarea tehnologiei sau managementul eficient al schimbărilor tehnologice [RAF,01].

Managementul tehnologiilor reprezintă o disciplină complexă, care cuprinde mai multe teme de cercetare și activități, legate de sau incorporate în trei procese de bază ale unei afaceri [CET,05]:

- inovație - în general inovația se referă la produse sau procese, inovație de management, de marketing, dar în ultima perioadă noi tipuri de inovații au fost dezbătute, precum eco-inovarea, inovarea inversă, inovarea socială și inovarea bazată pe proiectare;
- procese operaționale - inovația tehnologică și know-how-ul de proiectare au potențialul de a aborda multe probleme de mediu, de costuri și de profitabilitate, cu impact în creșterea sustenabilității, dar sustenabilitatea nu depinde doar de tehnologie, ci necesită de asemenea produse, procese și sisteme sustenabile;
- strategie - inovația schimbă aspectele unei afaceri, inclusiv strategiile. Recentele progrese din domeniul informației și comunicării conduc spre așa numita digitalizare, care dă naștere la noi căi colaborative de a face afaceri și noi modele de afaceri. Un concept fundamental al managementului tehnologiilor este reprezentat de curba S a tehnologiei sau ciclul de viață a tehnologiei care caracterizează felul în care inovația afectează performanța tehnologiei de-a lungul fazelor de introducere, îmbunătățire și maturitate [GAI,02]. Această curbă este folosită de organizații ca un mecanism pentru planificarea dezvoltării de noi tehnologii [GAI,02].

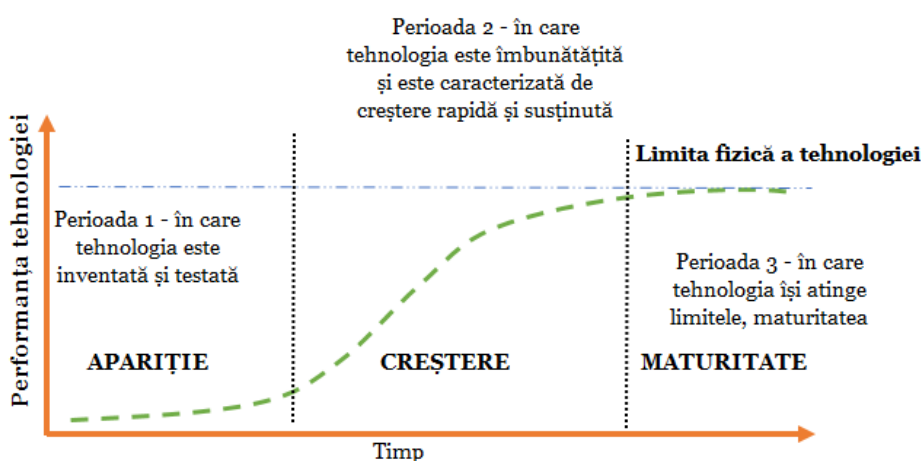


Fig. 1.2 - Curba S a tehnologiilor. Adaptare după [SWA,01]

În lucrarea sa din 1995, "Technology management: a process approach", Gregory [GRE,01] a propus un model cadru pentru managementul tehnologiilor care cuprinde 5 procese, acesta fiind unul din primele modele referitoare la MT și sursa de inspirație a modelelor care au urmat.



Fig. 1.3 – Model de management al tehnologiilor în 5 etape. Adaptare după [PHA,02]

### 1.3. Tehnologii de fabricație în industria construcțiilor de mașini

#### 1.3.1 Clasificarea tehnologiilor de fabricație

Tehnologiile de fabricație se pot clasifica după cum urmează:

- a) în funcție de succesiunea lor în realizarea produsului:
  - *tehnologii primare* sau tehnologii de elaborare a semifabricatelor: turnarea, forjarea, matrițarea, laminarea, trefilarea, extrudarea etc.;
  - *tehnologii secundare* sau tehnologii care asigură preciziile de prelucrare prescrise în desenele de execuție (strunjire, frezare, rectificare, găurire, tăiere, microtehnologie, nanotehnologie, neconvenționale etc.);
  - *tehnologii terțiare*: asamblare, vopsire, sablare, zincare, acoperiri metalice etc.
- b) în funcție de rolul în poziționarea concurențială a sistemului de producție [ABR,01]:
  - *tehnologii esențiale* sau tehnologii ce caracterizează domeniul industrial și care sunt deținute și utilizate de majoritatea sistemelor de producție asemănătoare;
  - *tehnologii de diferențiere* sau tehnologii deținute și utilizate doar de unele sistemele de producție, care oferă un avantaj competitiv;
  - *tehnologii definitorii* sau tehnologii de interes major pentru sistemele de producție reprezentând nucleul acestora;
  - *tehnologii periferice* sau tehnologii care nu reprezintă o importanță maximă.

## 1.4 Criterii de alegere și parametri de caracterizare a tehnologiilor

### 1.4.1 Criterii de alegere a tehnologiilor de fabricație

O tehnologie de fabricație poate fi aleasă, stabilită sau analizată din prisma mai multor criterii, dintre care le amintim pe cele mai importante:

- **criteriul tehnologic** - probabil cel mai important criteriu de alegere a unei tehnologii de fabricație întrucât aceasta trebuie să fie capabilă să îndeplinească cerințele impuse de desenul de execuție.
- **criteriul productivitate** - tehnologia de fabricație trebuie să fie capabilă să asigure necesarul de produse în timp util cu un număr minim de utilaje;
- **criteriul economic** - tehnologia de fabricație trebuie să fie cât mai ieftină; dacă totuși tehnologia nu este cea mai ieftină în raport cu altă tehnologie, aceasta trebuie să compenseze costul mai mare prin productivitate.
- **criteriul ecologic** - acest criteriu a devenit în ultimii ani din ce în ce mai important; tehnologia de fabricație trebuie să fie ecologică sau "verde", atât pentru om cât și pentru natură, în conformitate cu standardele internaționale și cu reglementările de mediu.
- **criteriul siguranță ocupațională și securitate** - asemenea criteriului ecologic, acest criteriu a devenit fundamental în luarea deciziilor, mai ales în întreprinderile care pun accentul în primul rând pe siguranța și securitatea angajaților.

### 1.4.2 Parametri și indicatori de caracterizare a tehnologiilor de fabricație

Principalii parametri și indici de caracterizare a tehnologiilor de fabricație sunt:

- **parametri de tehnologie** - acești parametri sunt impuși de desenul de execuție, iar ca exemplu putem enumera toleranțele dimensionale, rugozitățile, abaterile geometrice și de formă, duritatea materialului, dimensiunile de gabarit sau procentul de utilizare a materiei prime [ULU,01];
- **parametri de productivitate** - productivitatea unei tehnologii este dată în principal de norma tehnică de timp. În funcție de tipologia producției în calculul normei tehnice intervin timpi care influențează semnificativ productivitatea tehnologiei (spre ex. timpul de adaptare la schimbarea reperului, timpul normat sau timpul de staționare în reparații). De asemenea productivitatea unei tehnologii de fabricație poate fi determinată de rata de îndepărtare a materialului, rata de depunere a materialului, precum și de flexibilitatea acesteia;
- **indicatori economici** - din punct de vedere economic, o tehnologie de fabricație poate fi caracterizată de costul operațional sau de indicatorii de evaluarea a investiției în tehnologie, cum ar fi valoarea actualizată netă (VAN), rata internă de rentabilitate (RIR), termenul de recuperare a investiției (Tr), rata de recuperare a investiției (RRI) și indicele de profitabilitate (Ip) [ABR,01][CAL,04][HEN,01][ULU,01].
- **indicatori și indici de ecologie** - aspectele de mediu pot fi reprezentate de diferiți indicatori de monitorizare a calității aerului, apei, solului și diferiți indici ca de exemplu indicele verde (green index - GI) care măsoară reducerea emisiilor de dioxid de carbon (CO<sub>2</sub>) [WEB,05] și indicele de fabricație verde (green manufacturing index - GMI) care măsoară implementarea proceselor verzi de fabricație [NUK,06] și evident, eliminarea substanțelor periculoase pentru om și mediu (ex. lichidele de așchiere).

## 2. CAPITOL 2 Obiectivele tezei de doctorat

În zilele noastre, companiile din industria modernă a fabricației se confruntă cu provocările de a reduce costurile, de a crește productivitatea și calitatea produselor și de a reduce la minimum problemele de mediu, pentru a rămâne competitive pe o piață globală foarte dinamică [WEI,01].

Cererea pentru produse foarte variate în ceea ce privește complexitatea, materialul, dimensiunea și forma, cerințele pentru calitate ridicată, cererea continuă pentru productivitate ridicată, competiția globală și intensă, precum și tendința către o producție curată și verde, împing companiile din domeniul fabricației să dezvolte și să adopte continuu strategii inovatoare pentru optimizarea prelucrărilor, să îmbunătățească procesele de producție, să profite de oportunitățile economice și să creeze locuri de muncă mai ecologice, mai prietenoase cu mediul [WEI,01][KOE,02][NEU,02]. Aceste aspecte impun incorporarea diferitelor progrese tehnologice, creșterea eficienței și flexibilității proceselor și chiar modificări în structura organizațională [KOE,02]. Pentru a atinge aceste obiective, procesul de prelucrare trebuie să fie cât mai eficient, asigurând o rată ridicată de îndepărtare a materialelor, calitate ridicată, fiabilitate și flexibilitate [ARS,03].

Calitatea suprafețelor este deosebit de importantă în alegerea tehnologiei de fabricației. Costurile de fabricație cresc considerabil pe măsură ce condițiile de calitate ale suprafeței de prelucrat sunt mai ridicate, de aceea este foarte important ca valoarea rugozității suprafeței, aleasă sau determinată, să nu impună la fabricație condiții mai severe decât cele strict necesare funcționării produsului în condiții optime [BAL,15]. Acesta este un prim pas important în pregătirea fabricației, urmat de unul de asemenea foarte important și anume alegerea tehnologiei optime. Astăzi, este foarte cunoscut faptul că rugozitatea suprafeței are o influență foarte mare asupra uzurii și frecării, mai ales la acele componente supuse la solicitări ciclice și pentru care rezistența la oboseală este foarte importantă [BAL,15][HAS,01].

Astfel, motivația tezei de doctorat vine din necesitatea de a căuta continuu soluții la actualele provocări din industria fabricației, ca punct de plecare fiind tehnologia. Activând într-o societate comercială din domeniul producției industriale, care nu dispune de un centru de cercetare pentru dezvoltare tehnologică, am devenit preocupat de îmbunătățirea continuă a produselor și proceselor. Având ca procese de finisare de bază atât strunjirea dură cât și rectificarea, procese care pot fi definite ca "competitoare", atenția a fost îndreptată în direcția înlocuirii rectificării cu strunjirea dură, umedă sau uscată.

**Obiectivul principal al tezei este acela de a determina condițiile tehnice și economice în care strunjirea dură poate înlocui rectificarea, precum și identificarea unor soluții noi de creștere a performanțelor procedurii tehnologice de strunjire dură.**

Obiectivul principal se dorește a fi îndeplinit prin următoarele cinci obiective specifice.

***Primul obiectiv specific este reprezentat de determinarea, pe baza literaturii de specialitate, a limitelor cunoscute în acest domeniu.***

Trasarea acestor granițe între cunoscut și necunoscut este absolut necesară pentru a putea descoperi aspecte noi în problematica tezei.

***Obiectivul specific 2 vizează dezvoltări teoretice, stabilirea parametrilor cercetării, a metodologiei de cercetare, a echipamentelor și aparaturii.***

Acestea sunt elementele de bază în abordarea ulterioară a cercetărilor experimentale.

**Obiectivul specific 3, este acela de a determina performanţele tehnologice ale strunjirii dure la aşchiera uscată şi la aşchiera cu ulei de porumb pulverizat şi verificarea îndeplinirii condiţiilor de fabricaţie verde.**

În literatura de specialitate se arată că de cele mai multe ori, strunjirea dură uscată este superioară celei umede. În plus, la aceasta din urmă se utilizează un volum mare de lichide de aşchiere. Lămurirea altor aspecte ale acestei probleme justifică existenţa acestui obiectiv specific. Acesta presupune inclusiv prelucrarea statistică a rezultatelor în vederea modelării matematice

**Obiectivul specific 4 este dat de interpretarea rezultatelor în vederea valorificării lor atât tehnic, cât şi economic.**

Măsura îndeplinirii concomitente a cerinţelor tehnice dar şi a celor economice defineşte aria de aplicabilitate a oricărui procedeu.

**Obiectivul specific 5 vizează relaţionarea procedului de strunjire dură cu conceptul de Industrie 4.0.**

Această a patra revoluţie industrială integrează noutatea tehnologică cu tehnologia informaţiei la nivele din ce în ce mai înalte.

**Aceste obiective stau la baza derulării cercetărilor din prezenta teză de doctorat.**

În figura 2.1 este prezentată diagrama cercetării:

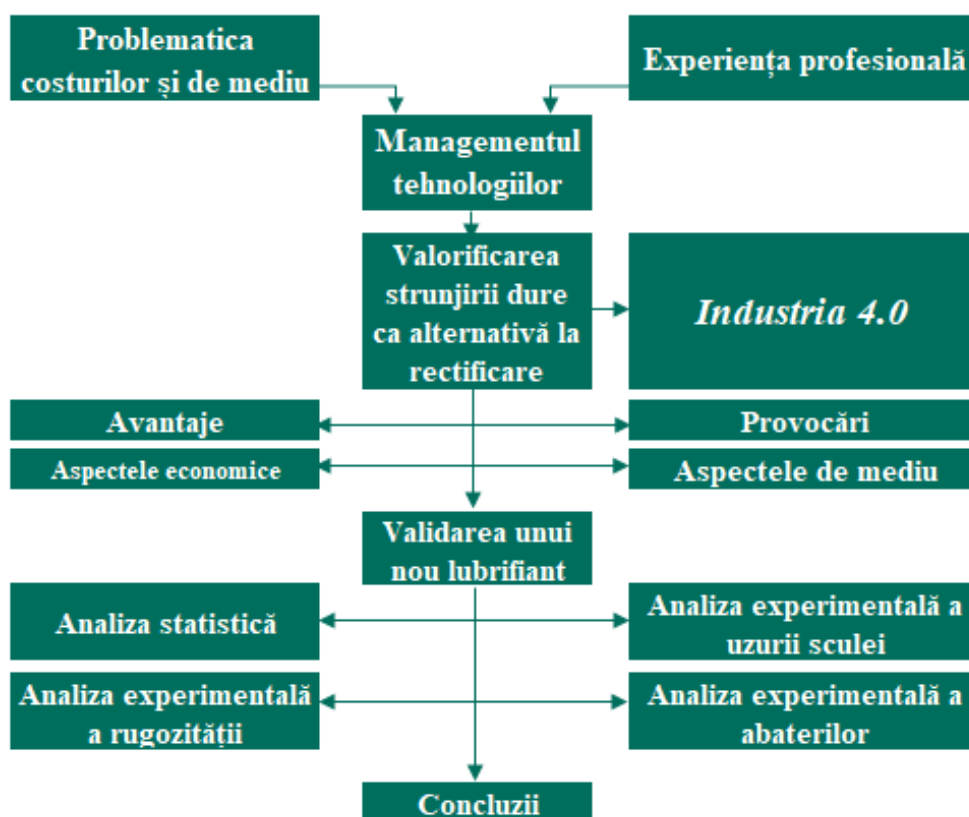


Fig. 2.1 - Diagrama cercetării



### 3. CAPITOL 3 Considerații privitoare la posibilitatea înlocuirii rectificării cu strunjirea dură

#### 3.1 Introducere

Într-un produs/ansamblu alcătuit din mai multe piese, anumite componente sunt esențiale pentru obținerea performanțelor funcționale dorite. Pentru atingerea acestora, au fost identificați trei factori cheie în proiectarea componentelor și anume materialul, produsul și tehnologia de fabricație [HAS,01]. În general, componentele trebuie să satisfacă mai multe cerințe în același timp, precum rezistența la oboseală, la uzură și coroziune, frecare cât mai mică sau vibrații și zgomot, reduse [HAS,01].

#### 3.2 Integritatea suprafețelor

O suprafață tehnologică reprezintă o suprafață obținută prin metode de fabricație, convenționale (așchiere, deformări plastice) sau neconvenționale, cu îndepărtare sau redistribuire de material. Suprafața rezultată în urma unui astfel de procedeu prezintă proprietăți și caracteristici noi comparativ cu cea inițială, acestea constituind așa numita integritate a suprafeței [DAV,01].

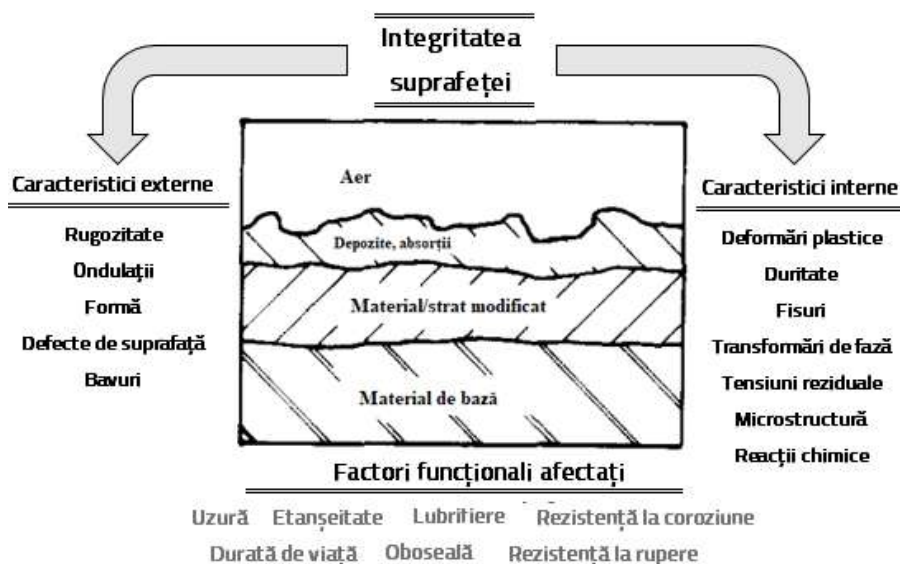


Fig. 3.3 - Caracteristicile integrității suprafeței și factorii funcționali afectați. Adaptare după [GRI,02].

Una din concluziile fundamentale, subliniată de cercetători, precum Grzesik și Wanat [GRZ,01][GRZ,03], Warren și Guo [WAR,01][WAR,02] sau Klocke ș.a. [KLO,01], care au realizat experimente în această arie a înlocuirii rectificării cu strunjirea dură, a fost că strunjirea dură și rectificarea produc caracteristici diferite ale suprafețelor.

Parametrii cheie pentru creșterea rezistenței la oboseală sunt rugozitatea mică și tensiunile reziduale de compresiune, dar cu toate acestea cei mai mulți factorii ce țin de precizia geometrică, relieful (profil și rugozitate) și integritatea suprafeței trebuie controlați strict. Spre exemplu, în ceea ce privește reducerea zgomotului și vibrațiilor, circularitatea și ondulațiile piesei/componentei trebuie îmbunătățite [HAS,01]. Din analiza calitativă realizată de Hashimoto [HAS,01] știm că toate procedeele de finisare și superfinisare generează proprietăți tribologice diferite.

Tabel 3.4 - Indicații pentru alegerea procedurii de finisare sau suprafinisare. Adaptare după [HAS,01]

| Performanța produsului vs. metoda de finisare |                            | Rezistență la oboseală                    | Frecare | Uzură | Generarea de căldură | Moment | Densitatea de putere | Vibrații / Zgomot | Lubrifiere | Coroziune | Aspect vizual |     |
|---|----------------------------|---|---------|-------|----------------------|--------|----------------------|-------------------|------------|-----------|---------------|-----|
| Metoda de finisare și finisare fină           | Inserție<br>Strunjire dură | ***                                       | *       | *     | *                    | *      | *                    | *                 | **         | -         | **            |     |
|   | Abrasive cu liant          | Rectificare                               | *       | *     | *                    | *      | *                    | *                 | *          | *         | -             | *   |
|   |                            | Superfinisare                             | **      | **    | *                    | *      | **                   | **                | ***        | *         | *             | *   |
|   |                            | Finisarea cu vibrații (finisarea în masă) | ***     | ***   | **                   | ***    | **                   | *                 | -          | *         | **            | **  |
|   |                            | Honuire                                   | *       | ***   | **                   | *      | *                    | *                 | *          | ***       | *             | *   |
|   |                            | Finisare cu benzi sau perii               | -       | -     | *                    | *      | -                    | -                 | -          | -         | *             | *   |
|   |                            | Abrasive libere                           | Sablare | -     | -                    | *      | *                    | -                 | -          | -         | -             | *   |
|   | Lepuire                    |   | **      | **    | **                   | **     | **                   | **                | -          | *         | **            | *   |
|   | Polișare                   |   | *       | **    | **                   | **     | **                   | **                | -          | *         | **            | **  |
|   | Lustruire                  |   | *       | *     | **                   | **     | **                   | **                | -          | *         | **            | *** |
|   | Fin. cu flux de abraziv    |   | -       | *     | **                   | -      | -                    | -                 | -          | -         | **            | **  |
|   | Fin. magneto-abrazivă      |   | -       | *     | **                   | -      | -                    | -                 | -          | -         | **            | **  |

\*\*\* Influență semnificativă ; \*\* Influență mare ; \* Influență relativă ; - Aproape nici o influență

### 3.4 Provocările înlocuirii rectificării cu strunjirea dură

#### 3.4.1 Straturile albe (White layers)

Straturile albe sunt structuri foarte subțiri, cu grosimea de câțiva micrometri, în general nu mai mari de 15  $\mu\text{m}$ , ce pot avea compoziție diferită de la un material la altul și apar pe suprafață prelucrată datorită fenomenelor termice și mecanice la care este supus materialul [GUO,02][RAM,01][KLO,01] și deseori s-a presupus că ar fi în detrimentul duratei de viață a piesei [GUO,03]. Aceste straturi fine sunt caracterizate de rezistență mare la coroziune și de duritate și fragilitate ridicată, mai mari decât materialul de bază [KLO,01][GUO,03][JOU,01], iar acest aspect poate conduce la apariția fisurilor și la defectarea produsului [BOS,01].

Cele trei fenomene, descrise de literatura de specialitate care conduc la apariția acestor straturi albe sunt:

- transformări de fază datorate încălzirii și răcirii bruște (efecte termice) [GRI,01][GUO,03][BOS,01][HOS,02][DUA,01][NIE,01]. Acest aspect poate fi datorat uzurii sculei sau vitezei mari de așchiere [KOE,02][GUO,03][HOS,02].
- deformările plastice ce au ca rezultat o structură fină a grăunților (efecte mecanice) [GRI,01][GUO,03][RAM,01][BOS,01][HOS,02][DUA,01][NIE,01];
- reacții chimice ale suprafeței cu mediul extern cum ar fi oxidarea (efecte chimice) [GRI,01][BOS,01].

Transformarea de fază este principalul fenomen care contribuie la apariția straturilor albe în strunjirea dură. Pentru ca straturile albe să apară, două condiții sunt îndeplinite [TON,01]:

- temperatura în zona de contact trebuie să depășească temperatura de austenizare;
- răcirea suprafeței trebuie să se petreacă foarte repede.



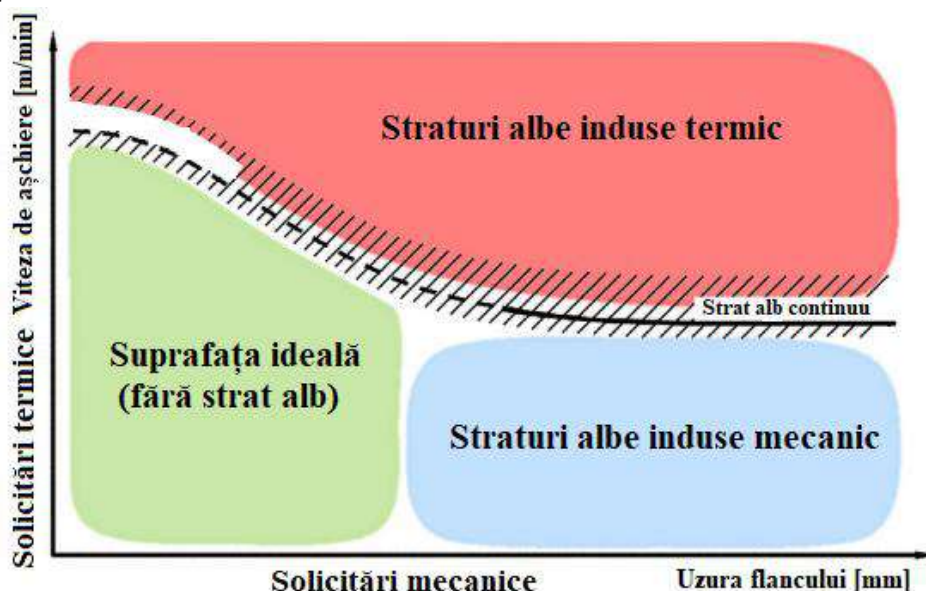


Fig. 3.18 - Modul de apariţie al straturilor albe. Adaptare după [HOS,04]

### 3.4.2. Uzura sculei la strunjirea dură

Frecarea și uzura sculelor aşchiitoare limitează deseori performanţa proceselor de aşchiere, iar îmbunătăţirea procesului poate fi atins doar înţelegând aceste mecanisme. Complexitatea unui proces de aşchiere face dificilă analiza sistematică a acestor mecanisme în zona activă a sculei și prin urmare cunoaşterea detaliată a interacţiunilor tribologice în zona de contact are o importanţă deosebită pentru înţelegerea, controlul și proiectarea economică a procesului de aşchiere [WEI,01].

Uzura sculelor aşchiitoare este cauzată de diferite fenomene, precum abraziunea, adeziunea, difuzia între sculă și piesa de prelucrat, gradienti termici sau variațiile forțelor [STR,01]. Uzura sculei constă atât în fenomene fizice cât și în fenomene chimice și se mai manifestă în 50% din cazuri prin abraziune, 20% prin adeziune, 10% prin reacții chimice și 20% prin alte mecanisme, precum oxidarea sau oboseală [STR,01]. Dacă în timpul prelucrărilor, plăcuțele aşchiitoare sunt supuse la șocuri termice sau mecanice puternice, acestea se pot fisura sau ciobi, iar în acest caz plăcuțele aşchiitoare nu pot fi recondiționate (reascuțite) [STR,01].

Dintre toate aceste forme de manifestare cele mai întâlnite la strunjirea dură sunt uzura flancului, cauzată în principal de abraziune și uzura crater cauzată în principal de difuzie datorită temperaturilor mari în pe fața de degajare [ASL,01][BOB,02][SHA,08][DOS,01][LAH,01]. Mărimea uzurii flancului se notează cu  $V_B$ , iar mărimea uzurii crater cu  $K_B$ .

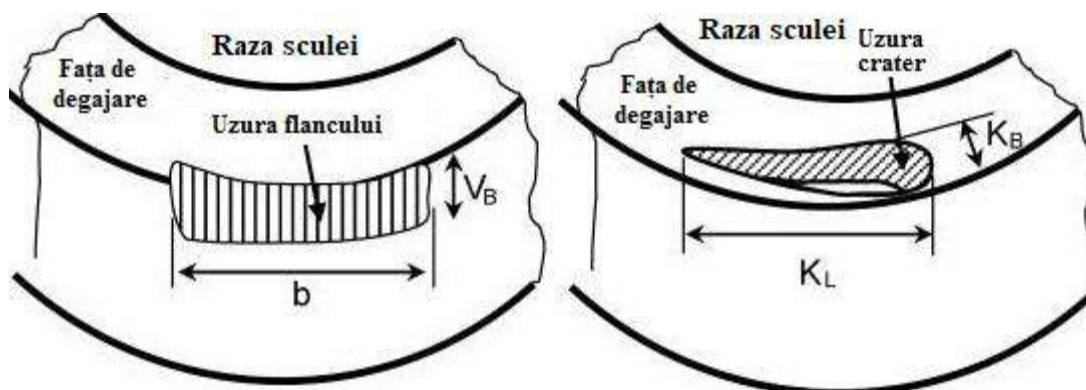


Fig. 3.22 - Reprezentarea schematică a uzurii flancului (stânga) și a uzurii crater (dreapta). Adaptare după [ASL,01]

Comparativ cu procesele convenţionale de aşchiere, la strunjirea dură, forţa pasivă ( $F_p$ ) sau forţa radială este forţa cu valoarea cea mai mare dintre cele 3 componente ale rezultantei forţelor [NAK,01][KON,01][TON,01][SHA,08][BAT,02][SAM,01][TAN,01][YOU,01]. Valoarea acestei forţe creşte semnificativ pe măsură ce uzura flancului creşte, iar în contrast cu strunjirea convenţională raportul de forţe  $F_c/F_p$  este inversat [NAK,01][TON,01]. De asemenea, creşterea unghiului de degajare negativ (în general mai mari de  $-30^\circ$ ) comportă o creştere a forţei pasive mult mai accentuată decât a forţei în direcţia vitezei de aşchiere [NAK,01][TON,01]. Materialele dure uzează foarte repede scula aşchietoare astfel forţele de aşchiere, în special forţa pasivă, cresc şi generează erori dimensionale şi de formă [NAK,01].

Tabel 3.6 - Rezultatele unor cercetări care au investigat uzura sculei la strunjirea dură

| Material                           | Tip plăcuţă<br>aşchietoare              | Regim<br>aşchiere |      |      | Lub.   | Uzură<br>[mm] | Mecanism<br>predomina<br>nt | $D$<br>[min] | Referinţă |
|------------------------------------|---|-------------------|------|------|--------|---------------|-----------------------------|--------------|-----------|
|                                    |   | Va                | s    | t    |        |               |                             |              |           |
| 36CrNiMo4<br>(AISI 4340)<br>56 HRC | NCB-S                                   | 150               | 0,08 | 0,15 | -      | 0.2/Vb        | Abraziune                   | ≈ 100        | [GOD,01]  |
|                                    | NCB-S                                   | 270               | 0,08 | 0,15 | -      |               | Difuzie                     | ≈ 100        |           |
|                                    | Al2O3+TiN                               | 150               | 0,08 | 0,15 | -      |               | Abraziune                   | ≈ 70         |           |
|                                    | Al2O3+TiN                               | 270               | 0,08 | 0,15 | -      |               | Abraziune                   | ≈ 32         |           |
| 36CrNiMo4<br>48 HRC                | CM acoperită<br>TiN/TiCN/<br>Al2O3/ZrCN | 90                | 0.05 | 0.5  | Uscată | 0.3/Vb        | Abraziune                   | 31           | [SAH,01]  |
| X153CrMoV12<br>58-60 HRC           | Ceramică<br>Al2O3+TiC                   | 250               | 0.2  | 0.2  | -      | 0.2/Vb        | Abraziune                   | ≈ 10         | [KAR,01]  |
| 100Cr6<br>(AISI 52100)<br>63 HRC   | Al2O3+TiCN<br>acop.TiN                  | 100               | 0.05 | 0.5  | Uscată | -             | Abraziune şi<br>adeziune    | 43.03        | [ASL,01]  |
|                                    |   | 200               |      |      |        |               |                             | 3.2          |           |
|                                    |   | 100               |      |      |        |               |                             | 13.34        |           |
|                                    |   | 200               |      |      |        |               |                             | 1.73         |           |
| 100Cr6<br>63 HRC                   | NCBP acop. AlCrN                        | 100               | 0.08 | 0.25 | Uscat  | 0.3/Vb        | Abraziune                   | 100          | [UHL,01]  |
|                                    | NCBP acop. AlTiN                        |                   |      |      |        |               |                             | 120          |           |
|                                    | NCBP neacop.                            |                   |      |      |        |               |                             | 25           |           |
| 100Cr6<br>66 HRC                   | Al2O3 (70%) + TiC<br>(30%)              | 140               | 0.08 | 0.3  | Uscat  | 0.3/Vb        | Abraziune                   | 35           | [ABI,01]  |
| X40CrMoV5-1<br>(AISI H13)<br>54HRC | Al2O3 (71%) +TiC<br>(28)                | 80                | 0.05 | 0.2  | Uscată | 0.14/Vb       | Abraziune                   | 20           | [FER,02]  |
|                                    |   | 240               |      |      |        | 0.25/Vb       |                             | 23           |           |
| X153CrMo12<br>(AISI D2)<br>45 HRC  | Al2O3 (70%) +TiC<br>(30%)               | 110               | 0.05 | 0.1  | Uscată | 0.2/Vb        | Abraziune<br>Adeziune       | 8.8          | [MIR,01]  |
|                                    |   | 150               |      |      |        |               |                             | 7.1          |           |
|                                    |   | 190               |      |      |        |               |                             | 5            |           |
|                                    | NCBP                                    | 110               |      |      |        |               | 11.3                        |              |           |
|                                    |   | 150               |      |      |        |               | 7.5                         |              |           |
|                                    |   | 190               |      |      |        |               | 5.7                         |              |           |
| X210Cr12<br>(AISI D3)<br>63 HRC    | 70% Al2O3 +30%<br>TiC, acoperită TiN    | 150               | 0.08 | 0.2  | Uscată | 0.3/Vb        | Abraziune                   | 24           | [BEN,01]  |
|                                    | 70% Al2O3 +30%<br>TiC, neacoperită      |                   |      |      |        |               |                             | 18.9         |           |
| AISI D2<br>60 HRC                  | 70% Al2O3 +30%<br>TiCN acop. TiN        | 100               | 0.06 | 0.4  | Uscată | -             | Abraziune<br>Adeziune       | 29.5         | [KAM,01]  |
|                                    | NCBP-S acop. TiN/<br>Al2O3 /TiCN        |                   |      |      |        |               |                             | 12.5         |           |

|                     |  |                          |      |      |        |         |                       |  |          |  |
|---------------------|--|--------------------------|------|------|--------|---------|-----------------------|--|----------|--|
|                     | NCBP-R acop. TiN/<br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiCN                        |                          |      |      |        |         |                       |  | 15       |  |
| AISI 4140<br>60 HRC | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (70%) + TiC<br>(30%) Wiper                        | 160                      | 0.08 | 0.2  | Uscată | 0.29/Vb | -                     | 90   | [ELB,01] |  |
|                     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (70%) + TiC<br>(30%)                              |                          |      |      |        | 0.31/Vb |                       |  |          |  |
| AISI H11<br>50 HRC  | NCB (57% NCB și<br>35% TiCN)   | $\frac{120}{180}$<br>240 | 0.08 | 0.15 | Uscată | 0.3/Vb  | -                     | $\frac{76}{40}$<br>20.5                        | [AOU,01] |  |
| 100Cr6<br>60 HRC    |  | 150                      | 0.2  | 0.1  |        |         |                       | 29   |          |  |
| 100Cr6<br>52 HRC    | NCBP acop. TiN   | 200                      | 0.1  | 0.1  | Uscată | 0.3/Vb  | Abraziune             | $\frac{25}{48}$<br>49                          | [POU,01] |  |
| AISI D2<br>60 HRC   | Ceramică mixtă<br>acop. TiN  | 150                      | 0.15 | 0.2  | -      | 0.15/Vb | Abraziune<br>Adeziune | 15   | [ÖZE,01] |  |
| AISI D2<br>52 HRC   | NCB (60%) + TiN  | $\frac{100}{175}$        |      |      |        |         | Abraziune<br>Adeziune | $\frac{12}{6}$                                 |          |  |
|                     | NCB (57%) + TiN<br>acop. TiN   | 100                      | 0.05 | 0.06 | Uscată | 0.2/Vb  | Difuzie               | $\frac{7}{2}$                                  | [SHA,08] |  |
|                     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (70%) + TiC<br>(30%)                              | 100                      |      |      |        |         | Abraziune<br>Adeziune | $\frac{14.5}{8}$                               |          |  |
| 100Cr6<br>62 HRC    | NCB cu conținut<br>scăzut  | $\frac{91}{183}$         | 0.15 |      |        |         |                       | $\frac{\approx 14}{\approx 1.5}$               |          |  |
|                     | NCB cu conținut<br>ridicat   | 91                       | 0.15 | 0.2  | Uscată | 0.2/Vb  | -                     | $\frac{\approx 28}{\approx 4}$                 | [DAW,01] |  |
| 100Cr6<br>60 HRC    | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (65%),<br>Ti(C,O) (30%), ZrO <sub>2</sub><br>(5%) | 130                      | 0.14 | 0.25 | Uscată | 0.3/Vb  | Abraziune             | $\approx 17$                                   | [BHA,01] |  |
| AISI D2<br>52 HRC   | NCB (60%) +<br>TiN (40%)   | $\frac{60}{100}$<br>175  | 0.1  | 0.06 | Uscată | 0.2/Vb  | Abraziune<br>Difuzie  | $\frac{\approx 27}{\approx 17}$<br>$\approx 8$ | [DOS,01] |  |
| AISI H11<br>52 HRC  |  | 220                      | 0.18 |      |        | 0.3/Vb  |                       | $\approx 20$                                   |          |  |
| AISI H11<br>50 HRC  | NCB (50%)  |                          |      | 0.15 | Uscată |         | Abraziune             |  | [RAT,01] |  |
|                     |  | 180                      | 0.12 |      |        | 0.2/Vb  |                       | $\approx 20$                                   |          |  |
| 36CrNiMo4<br>56 HRC | NCB (60%)  |                          |      |      |        |         | Abraziune             | $\approx 60$                                   |          |  |
|                     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + SiC   | 150                      | 0.08 | 0.15 | Uscată | 0.2/Vb  | Abraziune<br>Difuzie  | $\approx 22$                                   | [OLI,01] |  |

### 3.4.3 Strunjirea suprafețelor întrerupte

Suprafețele întrerupte reprezintă o mare provocare pentru strunjirea dură, în a înlocui rectificarea, întrucât plăcuțele aşchiatoare utilizate sunt fragile și au o rezistență relativ mică la șocuri mecanice [DIN,01] [VEN,01], iar acest aspect poate conduce la ruperea, spargerea sau ciobirea plăcuței. Chiar dacă acest aspect poate reprezenta o restricție, numeroase studii au demonstrat că alegerea corectă a materialului din care este fabricată plăcuța, a geometriei și micro-geometriei plăcuței aşchiatoare și a parametrilor de aşchiere conduc cu succes la atingerea eficienței economice a strunjirii dure la prelucrarea suprafețelor întrerupte [DIN,02][DIN,01][VEN,01][GOD,01][OLI,01].

Tabel 3.7- Rezultatele unor cercetări care au investigat strunjirea dură întreruptă

| Referință | Material      | HRC            | Material<br>scula | Tip<br>Muchie             | Regim aşchiere         | Uzură                      | Concluzii   |
|-----------|---------------|----------------|-------------------|---------------------------|------------------------|----------------------------|---|
|           |               |                |                   |                           | Va, s, t               | Vb                         |   |
| [DIN,02]  | SAE 01        | 58<br>±2       | NCB-S 60%         | 0.1mm<br>× 20°            | 120, 0.08, 0.3         | 0.2                        | - plăcuțele aşchietoare cu 90% NCB au avut durabilitatea cea mai mare la prelucrarea suprafețelor întrerupte. La strunjirea suprafețelor continue plăcuțele NCB-S au fost superioare  |
|           |               |                | NCB-R 90%         |                           | 150, 0.08, 0.3         |                            |   |
|           |               |                |                   |                           | 180, 0.08, 0.3         |                            |   |
| [DIN,01]  | 36CrNi<br>Mo4 | 56             | NCB-S 60%         | 0.1mm<br>× 20°            | 150, 0.08, 0.15        | 0.2<br>sau<br>T=100<br>min | - indiferent de pregătirea muchiei la strunjirea suprafețelor întrerupe plăcuțele NCB-R au avut durabilitate asemănătoare. Ca și în studiul precedent, la strunjirea suprafețelor continue, plăcuțele NCB-S au fost superioare - cele cu muchia doar teșită |
|           |               |                | NCB-R 90%         | 0.1mm<br>× 20°            |                        |                            |   |
|           |               |                | NCB-S 60%         | 0.1mm<br>× 20°<br>cu raza |                        |                            |   |
|           |               |                | NCB-R 90%         | 0.1mm<br>× 20°<br>cu raza |                        |                            |   |
| [OLI,01]  | 36CrNi<br>Mo4 | 56             | NCB-S 60%         | 0.1mm<br>× 20°            | 150, 0.08, 0.15        | 0.2                        | - comportamentul celor două plăcuțe a fost asemănător în cazul prelucrărilor întrerupte și semi-întrerupte, cu un ușor avantaj al plăcuței aşchietoare cu NCB la prelucrarea piesei cu 8 canale   |
|           | Al2O3 + SiC   | 0.1mm<br>× 20° |                   |                           |                        |                            |   |
| [GOD,01]  | 36CrNi<br>Mo4 | 56             | NCB-R             | 0.3mm<br>×20°<br>cu rază  | 150, 195<br>0.08, 0.15 | 0.2<br>sau<br>T=100<br>min | - plăcuțele cu NCB au avut durabilitate superioară celor ceramice, dar și plăcuțele ceramice sunt capabile să prelucreze suprafețe întrerupte   |
|           |               |                | Al2O3 + SiC       | 0.1mm<br>× 20°            | 150, 195<br>0.08, 0.15 |                            |   |

### 3.5 Influența geometriei sculei asupra performanțelor strunjirii dure - geometria Wiper

Geometria negativă conferă plăcuțelor o rezistență mecanică ridicată și implicit o durabilitatea mare. O lățime și un unghi mai mare ale teșirii se traduce printr-o rezistență a plăcuței aşchietoare mai mare dar și forțe de aşchiere și temperatură în zona de contact, mai mari [KOE,02][SAN,02]. Datorită acestui unghi de degajare negativ, forțe mari de compresiune sunt create atât pe muchia aşchietoare cât și pe piesă. Ca o consecință, materialul se fisurează, iar apoi apare deformarea plastică creându-se astfel aşchia specifică strunjirii dure denumită "dinți de fierăstrău" [SAM,01].

Pentru a îmbunătăți eficiența strunjirii dure la prelucrările de finisare, raza la vârf este transformată dintr-o formă simplă într-o formă complexă care constă într-o multitudine de raze (raze multiple) și/sau teșiri (raze suplimentare adiacente vârfului sculei). Această geometrie a vârfului plăcuței aşchietoare poartă denumirea de geometrie Wiper. Această înșiruire de raze și teșiri permite avansuri de lucru (s) de cel puțin două ori mai mari decât cele utilizate la plăcuțele aşchietoare convenționale

pentru obținerea aceleiași calități a suprafeței (ex. rugozitate) sau dacă se utilizează același avans de lucru ( $s$ ), calitatea suprafeței este îmbunătățită semnificativ [ÖZE,01][FER,01][SAN,02][KHA,05]. Utilizând această geometrie la strunjirea dură de finisare, este posibilă obținerea cu ușurință a unor rugozități  $R_a$  superioare celor obținute prin rectificare (spre exemplu  $R_a < 0.4 \mu\text{m}$ ). Diferența dintre cele două tipuri de plăcuțe este evidențiată în figura 3.38.

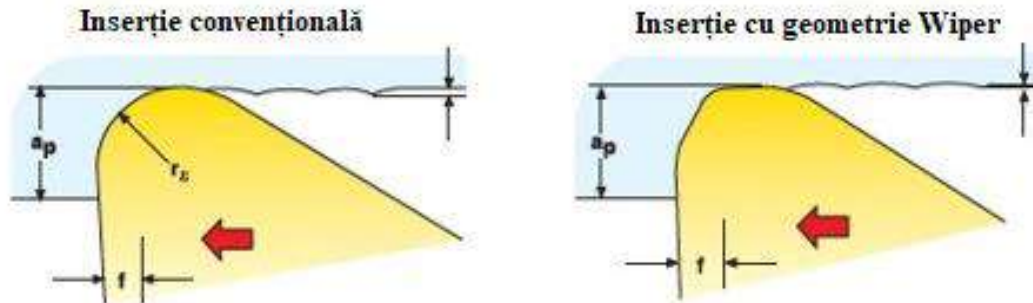


Fig. 3.38 - Plăcuță aşchiitoare convențională (stânga) și cu geometrie wiper (dreapta). Adaptare după [SEC,01]

În tabelul 3.6 a fost realizat un rezumat al unor cercetări, prezente în literatura de specialitate, care au urmărit rugozitatea  $R_a$  obținută la strunjire dură cu plăcuțe ceramice și cu NCB, convenționale sau cu geometrie wiper.

Tabel 3.8 - Rezultatele unor cercetări care au investigat rugozitatea  $R_a$  la strunjirea dură de finisare

| Material piesă         | Plăcuță aşchiitoare   | Regim aşchiere |           |           | Lubrifiere          | Rugoz. $R_a^*$ [ $\mu\text{m}$ ] | Ref.     |
|------------------------|---|----------------|-----------|-----------|---------------------|----------------------------------|----------|
|                        |   | Va             | s         | t         |                     |                                  |          |
| 100Cr6<br>(AISI 52100) | TNGA 160408 cu NCB (70%)  | 100            | 0.1       | 0.3       | -                   | 0.31                             |          |
|                        | SNMG 120408 - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (71%) + TiC (28%)          | 113            | 0.1       | 0.3       | -                   | 0.39                             | [GRZ01]  |
|                        | GE BZN 8100 cu NCB rotundă  | 119            | 0.05      | 0.25      | Uscat               | 0.138                            | [WAR,01] |
|                        | SNGA120408 T01020 CBN7020   | 125-246        | 0.08-0.16 | 0.15-0.45 | -                   | 0.19                             | [BOU,02] |
|                        | CNGA120408 - 60% NCB + 40% TiCN - Wiper                                 | 150            | 0.2       | 0.15      | -                   | 0.22                             | [GUD,01] |
|                        | CNGA 120408 NCB   | 210            | 0.05      | 0.005     | Uscat               | 0.1                              | [JOU,01] |
| X153CrMo12<br>AISI D2  | CNGA 120408, ceramică pe bază de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - wiper | 150            | 0,05      | 0.15      | -                   | 0.18                             | [ÖZE,01] |
|                        |   | 80             | 0,1       | 0,2       | -                   | 0,17                             | [GAI,01] |
|                        | CNGA 120408 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiCN, acoperită TiN        | 140            | 0.06      | 0.4       | Uscat               | 0.28                             | [KAM,01] |
| 42CrMo4<br>AISI 4142   | TNGA cu NCB   | 175            | 0.05      | 0.02      | -                   | 0.28                             | [STH,01] |
|                        | CNGA 120408 Wiper cu NCB  | 130            | 0.05      | 0.1       | Lichid convențional | 0.3                              | [PUH,01] |
| AISI H13               | CNGA 120408 Wiper -71% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 28% TiC         | 160            | 0.05      | 0.2       | -                   | 0.07                             | [FER,01] |
| OHNS                   | WNMG 060408 Wiper   | 120            | 0.08      | 0.1       | Uscat               | 0.109                            | [DAD,01] |

|                      |   |     |      |      |       |      |          |
|----------------------|---|-----|------|------|-------|------|----------|
| AISI H11             | SNGA120408, ceramice,<br>acoperite TiN            | 200 | 0.08 | 0.1  | Uscat | 0.18 | [KHE,01] |
|                      | SNGA120408<br>- 57% NCB și 35% TiCN               | 180 | 0.08 | 0.15 | Uscat | 0.25 | [AOU,01] |
| AIDI D3              | SNGA120408 - Al2O3<br>70%, TiC 30%, acoperite TiN | 210 | 0.08 | 0.4  | Uscat | 0.25 | [BEN,01] |
| 60WCrV8<br>(AISI S1) | SNGA 120408 - Al2O3                               | 300 | 0.05 | 0.2  | Uscat | 0.15 | [KAÇ,01] |
|                      | SNGA 120408 NCB-S                                 |     |      |      |       | 0.26 |          |
| AISI 4140            | CNGA 120408                                       | 150 | 0.08 | 0.1  | Uscat | 0.22 | [ELB,01] |
| 41Cr4<br>(AISI 5140) | CNGA120408 Wiper<br>(71% Al2O3, 28% TiC)          | 100 | 0.1  | 0.25 | Uscat | 0.28 | [GRZ,02] |

### 3.6. Tensiunile reziduale la strunjirea dură

La strunjirea dură, care este caracterizată de unghiuri de degajare negative de valoare mare, scula aşchietoare alunecă cauzând fisura, dislocare a materialului și deformare plastică în adâncime [JAH,01], ceea ce induce și anumite tensiuni reziduale. Comparativ cu rectificarea sau honuirea, strunjire dură poate induce tensiuni reziduale de compresiune ( $\sigma$ ) cu valoare de până la 1.000 megapascali (Mpa), până la o adâncime de aproximativ 0,5 mm [DEN,02], despre care se vorbește în literatura de specialitate că sunt adesea asociate cu o creștere a rezistenței la oboseală [KON,01] [DEN,02][VAR,02][GUO,01].

Panta profilului tensiunilor reziduale de compresiune, se pare că este un important factor, pe lângă adâncime, în special pentru oboseala la contactul de rostogolire. Prin urmare, atunci când se discută despre efectul tensiunilor reziduale de compresiune, trebuie considerat întreg profilul (adâncime, pantă, valoarea maximă etc.) și numai tensiunea reziduală la suprafață [GUO,01].

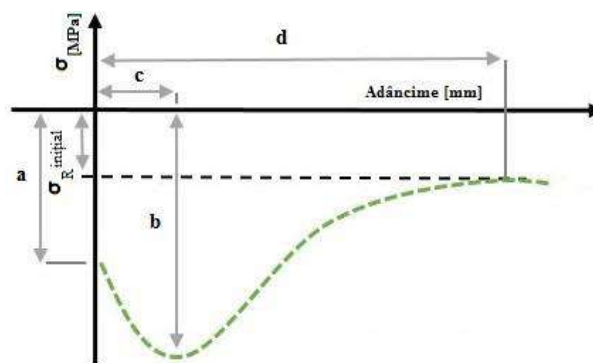


Fig. 3.41 - Schema valorilor caracteristice ale tensiunilor reziduale. Adaptare după [CAR,01][CHE,02]

Principala metodă de măsurare a tensiunilor reziduale este difracția cu raze X. În general piesele supuse măsurării sunt polișate electrochimic, după fiecare măsurătoare, pentru îndepărtare unor adaosuri foarte mici, de câțiva micrometri, astfel încât curba tensiunilor să poată fi determinate în adâncime. Acest procedeu de polișare nu induce alte tensiuni și nu schimbă tensiunile reziduale existente.



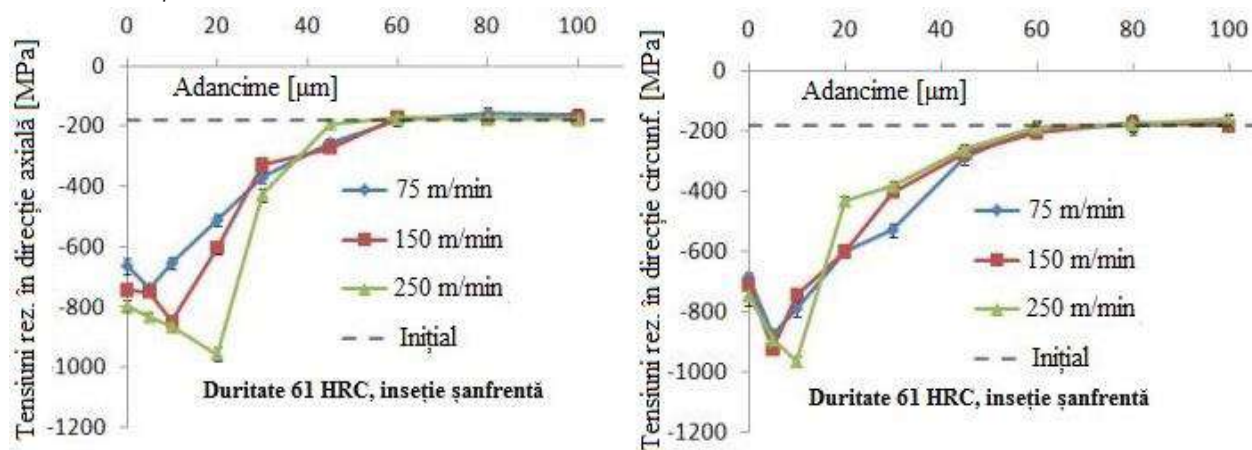


Fig. 3.46 - Efectul vitezei asupra tensiunilor reziduale, măsurate în direcție axială (stânga) și tangențială (dreapta), la prelucrarea cu plăcuță aşchiitoare şanfrenată. Adaptare după [CAR,01]

### 3.9 Concluzii

Straturile albe au fost și reprezintă încă un subiect de mare interes în cercetarea strunjirii dure. Concluziile pe care le putem desprinde din literatura studiată sunt:

- straturile albe pot avea structura și microduritate, diferite, în funcție de compoziția oțelului;
- straturile albe apar în special datorită transformărilor de fază, când se utilizează viteze de aşchiere mari, mai mari de 100-110 m/min și deformărilor plastice când se utilizează viteze de aşchiere mai mici, sub 100 m/min;
- la viteză de aşchiere mai mare de 100-110 m/min se poate atinge temperatura de austenizare în zona de aşchiere și astfel pot apărea transformările de fază;
- apariția și grosimea straturilor albe nu este influențată de structura materialului, martensitică sau bainitică;
- creșterea uzurii flancului conduce la creșterea temperaturii în zona de aşchiere și implicit poate conduce la apariția straturilor albe;
- straturi albe au fost observate după prelucrări/treceri realizate cu plăcuță aşchiitoare cu uzură a flancului de cel puțin 0,1 mm;
- plăcuțele cu muchii cu teșire mare (unghi și lățime), precum și cu raze mari generează straturi albe continue, chiar și fără uzură;
- utilizarea mediilor de răcire, lichide sau gazoase (răcire cu gaz sau criogenică), au un impact pozitiv și reduce riscul apariției straturilor albe;
- creșterea vitezei de aşchiere poate conduce la creșterea grosimii straturilor albe;
- rezistența la oboseală scade odată cu creșterea stratului alb și a microdurității.

Chiar dacă aceste straturi albe au fost recunoscute ca un defect al piesei, ca o neconformitate, există "voci" care afirmă că aceste straturi ar putea reprezenta și un aspect pozitiv. Dacă straturile ar fi continue, cu grosime uniformă și adecvată și microduritate mai mare decât a materialului de bază, ar putea fi valorificate într-un context pozitiv [HOS,04][MEH,01]. Evident, acest aspect necesită însă studii amănunțite și testare. De asemenea, proprietățile anticorozive, stabilitatea termo-mecanică pe termen lung și rezistența la oboseala de contact trebuie investigate la acele piese cu "white layers" pe suprafețele funcționale.

Uzura sculei la strunjirea dură reprezintă o provocare mare în atingerea eficienței economice. Concluziile pe care le putem desprinde din literatura studiată sunt:

- la strunjire dură principalul fenomen de formare al uzurii este abraziunea, iar uzura specifică este uzura flancului. În funcție de material și de viteza de aşchiere poate apărea și adeziune și difuzia (la cele cu NCB)
- plăcuțele cu NCB manifestă în general uzură prin abraziune și difuzie, iar plăcuțele ceramice uzură prin abraziune și adeziune;
- acoperirea plăcuțelor îmbunătățește durabilitatea sculei și ajută la prevenirea adeziunii materialului piesei pe sculă;
- plăcuțele aşchietoare cu NCB sunt în general superioare din punct de vedere al uzurii celor ceramice datorită proprietăților fizice și mecanice, însă costul de producție, respectiv prețul de vânzare este mult mai mare comparativ cu plăcuțele aşchietoare ceramice;
- viteza de aşchiere este principalul parametru de aşchiere care influențează uzura flancului;
- duritatea și compoziția materialului influențează uzura sculei. O reducere a durității cu câteva unități HRC poate conduce la o creștere cu 60-80% a durabilității;
- plăcuțele aşchietoare din NCB cu conținut scăzut sunt superioare celor cu conținut ridicat în anumite circumstanțe ca de exemplu la prelucrările continue, pe distanțe scurte, de finisare;
- plăcuțele aşchietoare din materiale ceramice sunt potrivite pentru strunjirea dură, dată fiind durabilitatea medie raportată la cost.

Atât plăcuțele aşchietoare cu NCB cât și cele ceramice sunt potrivite pentru strunjirea dură de finisare. Din literatura de specialitate tragem concluzia că durabilitatea acestor plăcuțe este influențată de mulți factori, dar printr-o alegere optimă a parametrilor de aşchiere, a acoperirii și a geometriei putem atinge durabilități mari, mai mari de 40 minute. Punctul de duritate între oțelurile moi și dure ar fi la duritatea de 50 HRC. Sub această valoare, care se traduce printr-o aşchiere moale, forțele de aşchiere sunt mai mici, iar rezistența la uzură este controlată în principal de rezistența liantului grăunților, pe când în cazul prelucrării unor materiale cu duritate mai mare de 50 HRC, uzura sculei este dominată de abraziune [POU,01]. În aceste caz rezistența la uzură este determinată de geometria sculei, tipul de acoperire și structura de compoziție a sculei (liant, dimensiunea grăunților, conținut de material ceramic/NCB). Acest aspect a fost subliniat înainte de Tonshoff ș.a. [TON,01]] care au confirmat că punctul de duritate între materialele moi și dure ar fi la duritatea de 50 HRC. Peste această duritate forțele cresc rapid, în special forța pasivă.

Din toate cercetările realizate de Diniz, de Oliveira și A. de Godoy [DIN,01][DIN,02][GOD,01] [OLI,01], concluzionăm că prelucrarea suprafețelor întrerupte la strunjire dură poate fi realizată cu succes utilizând plăcuțe cu NCB cu conținut ridicat întrucât prezintă tenacitate și duritate mare, dar și plăcuțe ceramice întărite cu SiC. Plăcuțele aşchietoare cu NCB au arătat o mai bună rezistență la uzură, o durabilitate mai mare și au generat o calitate a suprafeței mai bună comparativ cu materialele ceramice [GOD,01][OLI,01]. Ambele tipuri de plăcuță aşchietoare sunt predispuse la apariția uzurii prin difuziune: plăcuța cu NCB pe de o parte datorită conținutului mare de NCB și a lipsei materialului ceramic, iar plăcuța ceramică pe de altă parte datorită lamelelor de SiC care reacționează chimic cu fierul la temperaturi înalte [STE,02].

Din punct de vedere al calității suprafeței obținute la finisare, plăcuțele aşchietoare cu geometrie wiper, fie ele ceramice fie cu NCB, sunt superioare celor convenționale. Marele dezavantaj este că efectul produs de geometria wiper nu se aplică decât suprafețelor drepte, longitudinale. La prelucrarea razelor geometria wiper nu îmbunătățește suprafața. Pentru finisare și pentru obținerea



unor suprafețe cât mai fine și mai precise se recomandă utilizarea unor muchii cu unghi al teșiturii mic de 10-15°. Influența principală asupra rugozității, dintre parametrii de așchiere, o are avansul. Viteza și adâncimea de așchiere au o influență relativ mică, iar în funcție de condițiile de lucru, variază între al doilea și al treilea parametru ca semnificație. De asemenea valori cât mai mici ale lui  $s$  și  $t$  conduc la rugozitate mai bună.

Referitor la tensiunile reziduale sau stresul remanent indus în piesă de solicitările termice și mecanice, putem concluziona că strunjirea dură este capabilă să genereze tensiuni de compresiuni, benefice pentru creșterea rezistenței la oboseală sau a duratei de viață a pieselor, în special acelea foarte solicitate, care preiau solicitări sau forțe mari. Din cercetările analizate știm că:

- la strunjire dură, tensiunile reziduale predominante sunt cele de compresiune;
- principala metodă de măsurare a tensiunilor reziduale este difracția cu raze X;
- rezistența la oboseală a componentelor scade pe măsură ce tensiunile reziduale de tracțiune cresc;
- tensiunile de compresiune au o influență pozitivă asupra rezistenței la oboseală;
- influența majoră o au tensiunile la suprafață comparativ cu tensiunile din piesă;
- plăcuțele așchietoare noi generează în general tensiuni de compresiune în timp ce plăcuțele așchietoare uzate tensiuni de tracțiune, în special la suprafață;
- creșterea vitezei de așchiere generează tensiuni de compresiune mai adânci și mai mari, atât în direcție longitudinală cât și tangențială;
- forțele de așchiere influențează mărimea tensiunilor reziduale;
- uzura sculei, care conduce la solicitări termice și mecanice mai mari în zona de așchiere, conduce la o modificare a stării suprafeței din punct de vedere al tensiunilor. Uzura schimbă starea tensiunilor din compresiune în tracțiune și le împinge mult mai în adâncime;
- uzura sculei determină tensiuni de tracțiune pe o adâncime de 10 până la 120  $\mu\text{m}$ , în unele cazuri și peste această valoare, având efect negativ;
- microgeometria muchiei are o influență mare asupra tensiunilor. Plăcuțele așchietoare cu muchia teșită generează tensiuni de compresiune mai mari și mai adânci decât plăcuțele așchietoare cu muchia rotunjită. De asemenea, microgeometria wiper are efect pozitiv asupra tensiunilor;
- creșterea durității materialului conduce la tensiuni mai mari.

Din punct de vedere al acurateții dimensionale și anume precizie dimensională sau de formă, se recomandă utilizarea unor raze ale plăcuțelor cât mai aproape de valoarea adâncimii de așchiere pentru a reduce forțele pasive. În acest sens, la strunjirea dură de finisare unde se utilizează adâncime de așchiere mică se recomandă raze mici, potrivite, preferabil Wiper, viteze de așchiere medii și avansuri mici, pentru a obține atât rugozitate bună dar și precizie dimensională. Chiar dacă există studii care au urmărit compararea procedurii de strunjire dură cu cel de rectificare din punct de vedere al abaterilor dimensionale, de formă și de poziție, este relativ dificil să stabilim un verdict întrucât există mulți factori care pot influența aceste caracteristici. De un lucru suntem însă siguri - foarte multe piese/repere care la această oră se fac prin rectificare pot fi realizate cu succes prin strunjire dură.

#### 4. CAPITOL 4 Contribuții teoretice privitoare la evaluarea și managementul tehnologiilor

##### 4.1 Analiza calitativă a înlocuirii rectificării cu strunjirea dură

Considerând literatura de specialitate, experiența și cercetările directe ale autorului, atât teoretice cât și practice și plecând de la profilul capabilității celor două procese prezentat de Klocke ș.a. [KLO,01], a fost elaborată o matrice de evaluare tehnologică, calitativă și economică care diferențiază cele două operații de finisare din punct de vedere tehnologic, calitativ și economic.

Matricea de evaluare [ARS,01] este reprezentată în tabelul următor:

Tabel 4.1 - Matricea de evaluare a proceselor

| Caracteristică                                     | Strunjire dură | Rectificare |
|--|----------------|-------------|
| Costul mașinii                                     | *              |             |
| Costul sculei aşchietoare raportat la durabilitate | =              | =           |
| Costul sculelor și dispozitivelor                  | *              |             |
| Posibilitatea de recondiționare a sculei           | **             |             |
| Utilizarea lichidului de răcire                    | **             |             |
| Costul lichidul de răcire                          | *              |             |
| Rata de îndepărtare a materialului                 | *              |             |
| Rugozități   | =              | =           |
| Abateri de formă:                                  |                |             |
| ▣ cilindricitate                                   | *              |             |
| ▣ planeitate                                       | =              | =           |
| ▣ circularitate                                    | *              |             |
| ▣ liniaritate                                      | =              | =           |
| Abateri de poziție:                                |                |             |
| ▣ paralelism                                       | =              | =           |
| ▣ perpendicularitate                               | =              | =           |
| ▣ concentricitate                                  | =              | =           |
| Precizie dimensională (clasa de precizie)          |                | *           |
| Reciclarea deșeurilor (sculă + material)           | **             |             |
| Timp de reglaj și transformare a mașinii           | *              |             |
| Flexibilitate                                      | *              |             |
| Prelucrări întrerupte                              |                | *           |
| Riscul de apariție a zonelor influențate termic    | *              |             |
| Tensiuni reziduale (de compresiune)                | *              |             |
| Grad de specializare al operatorului               | *              |             |

\* → ușor avantaj    \*\* → avantaj mare    = → egalitate

## 4.2 Eficiența economică a înlocuirii rectificării cu strunjirea dură

### 4.2.1. Introducere

Pentru ca strunjirea dură să poată înlocui rectificarea la finisarea pieselor din oțel, tratate termic și aduse la o duritate mai mare de 50 HRC, ca și operație finală, procesul trebuie să fie capabil să îndeplinească mai multe criterii, printre care:

- criteriul tehnologic - scula aşchiitoare și mașina-unealtă trebuie să fie capabile să realizeze condițiile tehnice impuse de desenul de execuție;
- criteriul calitativ - fiind operație finală de finisare suprafețele trebuie să fie integre, lipsite de zone influențate termic și fisuri.

Pe lângă aceste criterii, se mai pune problema costurilor de fabricație, astfel, strunjirea dură trebuie să fie capabilă să îndeplinească pe lângă aceste criterii și **criteriul eficienței economice** – prelucrarea prin strunjire dură trebuie să fie mai ieftină decât prelucrarea prin rectificare sau dacă costul de prelucrare/piesă este mai mare la strunjire dură decât la rectificare atunci procedeul de strunjire dură trebuie să compenseze această diferență de cost prin productivitate.

### 4.2.2. Indicatori pentru determinarea eficienței economice

Eficiența economică a înlocuirii rectificării cu strunjirea dură poate fi determinată pornind de la *metoda costurilor influențate de tehnologie și dotare* [CAL,04]. Astfel, costul total al unui produs  $n$ , aplicând tehnologia de fabricație  $i$ , îl putem scrie sub forma următoare:

$$C_{total\ n,i} = C_{teh\ n,i} + A_c \text{ [um/an]} \quad (4.4)$$

unde,  $C_{total\ n,i}$  - costul total al piesei  $n$ , aplicând operația de finisare  $i$ ;

$C_{inf\ n,i}$  - costul influențat de tehnologie al piesei  $n$ , aplicând operația de finisare  $i$ ;

$A_c$  - restul costurilor care alcătuiesc costul total, acestea fiind aceleași indiferent de tehnologia de finisare aleasă.

### 4.2.3. Modelele matematice ale eficienței economice

Modelul costului influențat de tehnologie și dotare prezentat anterior nu conține două elemente de cost care ar putea face diferența în alegerea soluției optime și anume:

- costul lichidului de aşchiere;
- valoarea deșeurilor recuperabile (șpan, sculă).

Cercetările legate de strunjirea dură sunt orientate către fabricația verde. Metoda fabricației cu cantitate minimă de lubrifiere, este o metodă de succes, cu rezultate foarte bune, în vederea obținerii fabricației verzi și în reducerea costurilor cu lichidele de aşchiere. Strunjirea dură, folosind această tehnică cu uleiuri vegetale, are un mare avantaj competitiv în fața rectificării. De asemenea, șpanul rezultat în urma strunjirii poate fi valorificat; nu este și cazul rectificării.

În acest sens, eficiența economică a înlocuirii rectificării cu strunjirea dură, luând în considerare costul tehnologiei ( $C_{teh\ n,i}$  [u.m./buc]), productivitatea tehnologiei ( $Q_{n,i}$  [buc/an]) și prețul de vânzare al unui produs ( $P_{v\ n}$  [lei/buc]), într-o perioadă de timp determinată ( $F_{tef}$  [min/an]), este dată de relația de mai jos:

$$\left[ P_{vn} - \left( \frac{C_{astr} + C_{rstr}}{Q_{n,str}} + C_{uE} \cdot N_{kW_{n,str}} + C_{mstr} \cdot N_{t_{n,str}} + \frac{P_{astr} \cdot T_{B_{n,str}}}{D_{str}} + C_{dstr} + C_{lstr} - V_{drec} \right) - A_c \right] \cdot Q_{n,str} >$$

$$\left[ P_{vn} - \left( \frac{C_{arec} + C_{rrec}}{Q_{n,rec}} + C_{uE} \cdot N_{kW_{n,rec}} + C_{mrec} \cdot N_{t_{n,rec}} + \frac{P_{arec} \cdot T_{B_{n,rec}}}{D_{rec}} + C_{drec} + C_{lrec} \right) - A_c \right] \cdot Q_{n,rec}$$
(4.9)

Printre avantajele pe care le are strunjirea dură în raport cu rectificarea, aminteam în capitolul 3 că plăcuțele aşchietoare folosite la acest tip de prelucrare pot fi recondiţionate. În acest sens costul sculei, dacă se foloseşte acelaşi tip de plăcuţă şi la operaţia de degroşare şi la operaţia de finisare, devine:

$$C_{sstr} = \frac{P_{astr} \cdot T_{B_{n,str}}}{D_{str}} = \frac{P_{astr} \cdot T_{B_{n,str,fin}}}{D_{str}} + \frac{P_{recstr} \cdot T_{B_{n,str,deg}}}{D_{rec,str}} \quad (4.10)$$

În contextul în care se folosesc scule diferite la operaţiile de finisare şi degroşare, relaţia (10) devine:

$$C_{sstr} = \frac{P_{astr} \cdot T_{B_{n,str}}}{D_{str}} = \frac{P_{astr,fin} \cdot T_{B_{n,str,fin}}}{D_{str,fin}} + \left( \frac{\frac{P_{astr,deg} \cdot T_{B_{n,str,deg}}}{D_{str,deg}} + \frac{P_{recstr} \cdot T_{B_{n,str,deg}}}{D_{rec,str}} \cdot n}{n+1} \right) = \quad (4.11)$$

$$= \frac{P_{astr,fin} \cdot T_{B_{n,str,fin}}}{D_{str,fin}} + \frac{T_{B_{n,str,deg}} (P_{astr,deg} \cdot D_{rec,str} + P_{recstr} \cdot D_{str,deg} \cdot n)}{D_{str,deg} \cdot D_{rec,str} \cdot (n+1)} \text{ [um/buc];}$$

Plecând de la relaţia 4.9 condiţia care trebuie îndeplinită pentru ca operaţia de strunjire dură să fie mai avantajoasă decât operaţia de rectificare, într-o formă mai restrânsă, este:

$$(P_{vn} - C_{total_{n,str}}) \cdot Q_{n,str} > (P_{vn} - C_{total_{n,rec}}) \cdot Q_{n,rec} ; \quad (4.12)$$

Diferenţa dintre preţul de vânzare şi costul total al piesei reprezintă profitul obţinut după vânzarea unei piese. Astfel relaţia 12 devine:

$$P_{rn,str} \cdot Q_{n,str} > P_{rn,rec} \cdot Q_{n,rec} \quad (4.13)$$

Condiţia (13) devine:

$$\frac{Q_{n,str}}{Q_{n,rec}} > \frac{P_{rn,rec}}{P_{rn,str}} \quad (4.14)$$

Dacă fracţia  $\frac{Q_{n,str}}{Q_{n,rec}}$  reprezintă factorul de productivitate  $F_p$  şi fracţia  $\frac{P_{rn,str}}{P_{rn,rec}}$  reprezintă factorul de profit  $F_{pr}$ , condiţia care trebuie îndeplinită pentru ca strunjirea dură să fie mai eficientă economic decât rectificarea, într-o perioadă de timp determinată, este:

$$F_p > F_{pr}^{-1} \quad (4.15)$$

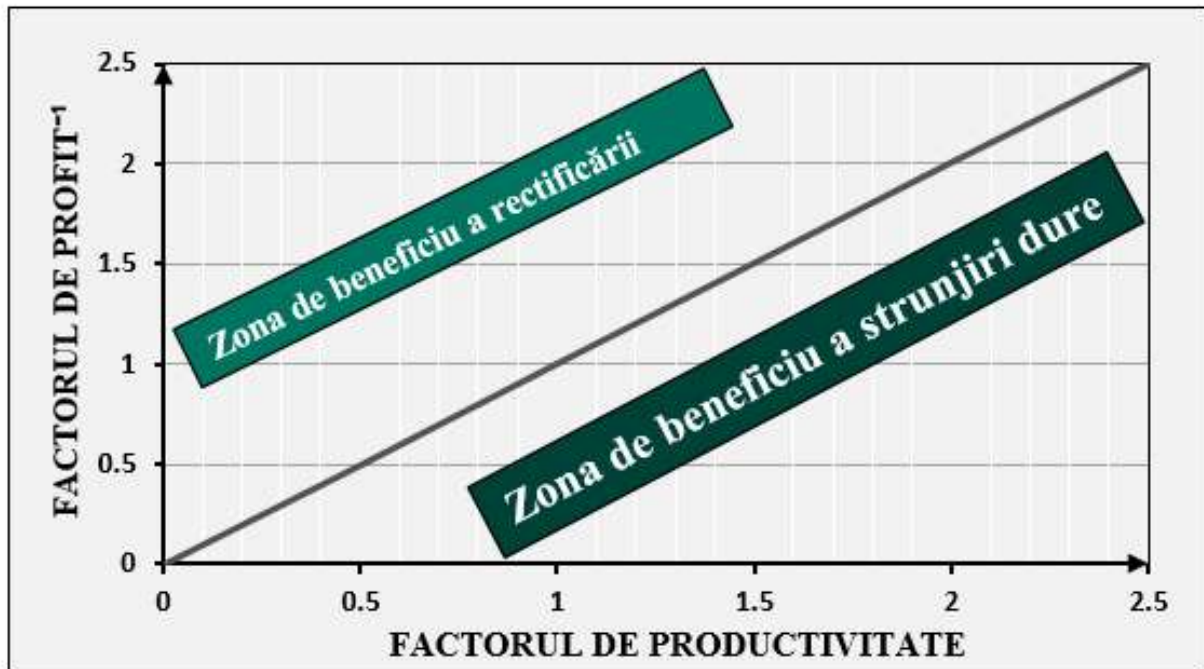


Fig. 4.3 - Zonele de beneficiu ale proceselor

Din graficul de mai sus, figura 4.3, putem trage concluziile că zona de sub linia gri reprezintă zona în care strunjirea dură este mai eficientă, linia gri reprezintă mulțimea punctelor în care strunjirea dură este egală cu rectificarea, iar peste linia verde rectificarea este mai avantajoasă, din punct de vedere al beneficiului obținut, luând în considerare costului tehnologiei ( $C_{\text{tehnologie}_{n,i}}$ ), respectiv costul total de al piesei ( $C_{\text{total}_{n,i}}$ ), productivitatea tehnologiei ( $Q_{n,i}$ ) și prețul de vânzare al produsului ( $P_{v_n}$ ), într-o perioadă de timp determinată ( $F_{\text{ref}}$ ).

## 5. CAPITOL 5 Managementul tehnologiilor în contextul Industry 4.0 - tendințe și provocări în sistemele de fabricație

### 5.1. Introducere

Globalizarea de astăzi creează și aduce noi oportunități de dezvoltare durabilă. Noi piețe emergente se ridică și prin urmare noi soluții inovative, mai prietenoase cu mediul, sunt lansate pentru satisfacerea cererii actuale. Economia globală se confruntă astăzi cu multe provocări, iar pentru sistemele de producție sau de fabricație, pentru a fi competitive pe piața mondială, este obligatoriu să inoveze în permanență. Industria 4.0 (I4.0) cu a ei componentă principală, fabrica inteligentă sau fabrica viitorului, poate fi privită ca o inovație în aria fabricației.

Elementul principal al industriei 4.0 îl reprezintă conceptul de "fabrică inteligentă" [KAG,01][ZUE,01][WAG,05]. Fabrica tradițională devine fabrica inteligentă, mai flexibilă și mai autonomă, sustenabilă, cu echipamente și utilaje inteligente capabile să colecteze, stocheze, interpreteze și să schimbe un volum mare de date cu alte entități, cu operatori inteligenți și produse inteligente [KAG,01][ROB,02][KOL,01][WAG,05] având ca obiectiv principal creșterea performanțelor afacerii.

### 5.2. Tehnologii cheie implicate în Industria 4.0

Industria 4.0 este strâns legată de noile tehnologii ale informației și comunicării enumerate în subcapitolul 5.1. Internetul lucrurilor sau Internetul Obiectelor reprezintă o rețea globală de



dispozitive, maşini, echipamente, senzori, actuatori și roboți, interconectate, capabile să comunice între ele [NEU,03][ATZ,01][QIN,01][THA,01].

Principalele provocări prezentate de literatura de specialitate în ceea ce privește tehnologiile informației și comunicării în sistemele de fabricație, în contextul Industriei 4.0 sunt:

Tabel 5.1 - Provocări pentru tehnologiile informației și comunicării în contextul industriei 4.0

| Provocare                                    | Referințe  |
|--|--|
| Infrastructura IT                            | [KAG,01][ATZ,01][VAR,06]                                       |
| Colectarea, stocarea și managementul datelor | [ZAS,01][ZHO,05][KHA,07][ZHO,08]                               |
| Securitatea datelor                          | [KAG,01][STO,01][ROB,02][SCH,02]<br>[ZHO,05] [ATZ,01] [KHA,07] |
| Conversia datelor în același format          | [ATZ,01][KHA,07]   |
| Achiziția de date nefolositoare              | [ZHO,08]   |
| Viteza de transfer a datelor / 5G            | [KAG,01][VAR,06]   |

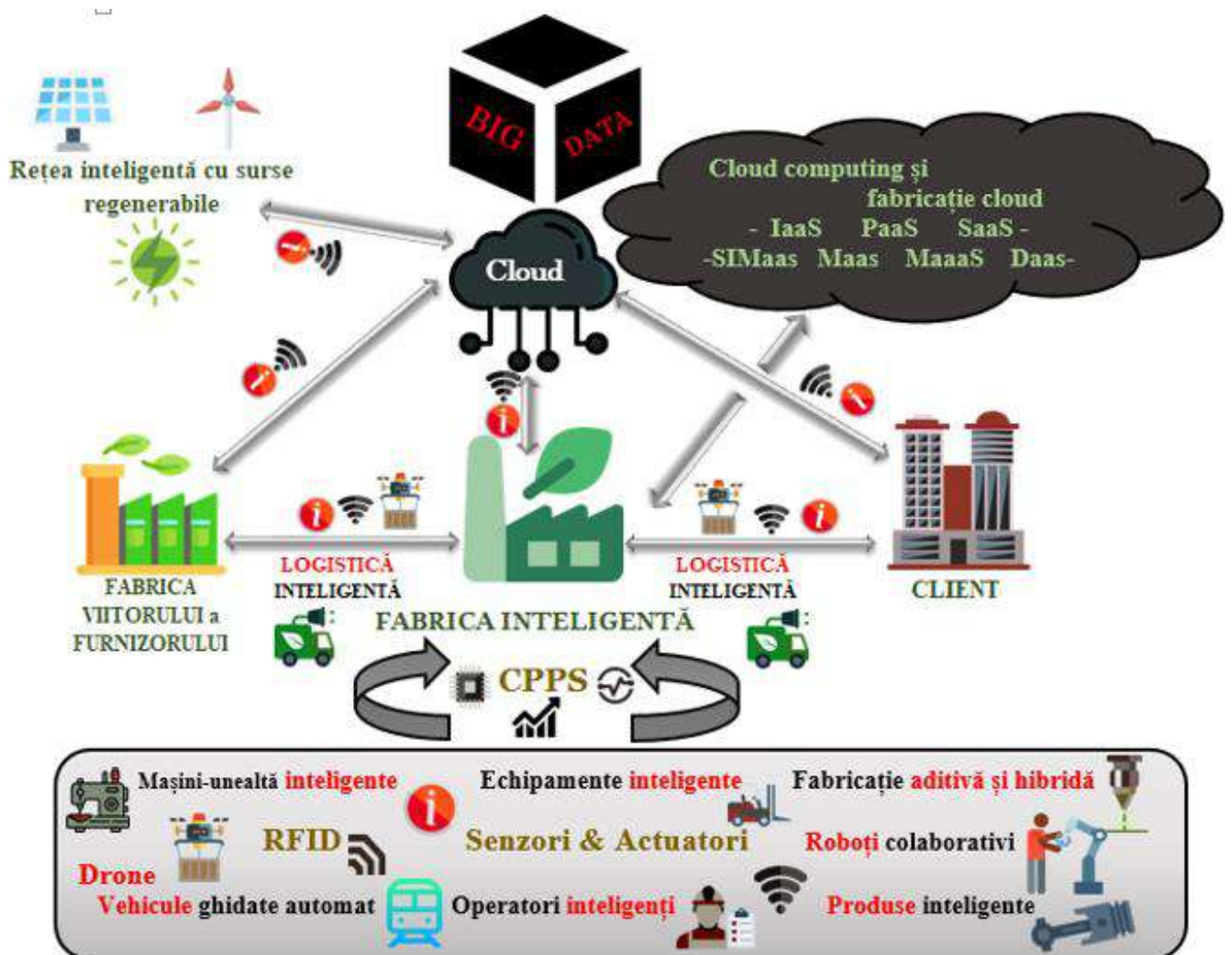


Fig. 5.2 - Prezentare generală a tehnologiilor cheie implicate în I4.0

### 5.3. Tendințe și provocări ale managementului fabricației în contextul Industriei 4.0

#### 5.3.1 Resursa umană în Industria 4.0 - securitatea muncii și abilitățile angajaților

Tabel 5.2 - Tendințele legate de resursele umane în contextul industriei 4.0

| Tendință                                   | Referință  | Discuție  |
|--|--|---|
| Realitatea augmentată                      | [KOL,01]<br>[PIN,01]<br>[SCH,03]<br>[GOR,01]             | ■ poate fi utilă în utilizarea echipamentelor complexe sau poate fi utilizată pentru rezolvarea ușoară a unor sarcini dificile la posturile de lucru. De asemenea este o soluție rapidă și relativ ieftină pentru școlarizări |
| Roboții colaborativi                       | [BOR,01]<br>[KHA,03]                                     | ■ pot prelua de la operatori cele mai grele și mai periculoase sarcini  |
| Aplicații mobile                           | [GAS,01]   | ■ asigură evaluarea riscurilor la posturile de lucru și ajută la crearea unor posturi de lucru mai ergonomice   |
| Interfețe om-mașină                        | [WAG,05]<br>[THI,01]<br>[LUK,02]<br>[GOR,01]<br>[LIU,05] | ■ asigură și permit comunicarea dintre mașină și utilizatori și oferă acces la schimbul de date și informații. De asemenea, reprezintă legătura dintre lumea fizică și virtuală   |
| Interfețe om-echipament                    | Ipoteza autorului  | ■ asigură și permit comunicarea dintre echipamente și utilizatori și oferă acces la date și informații. De asemenea reprezintă legătura dintre lumea fizică și virtuală   |
| Operatori și tehnicieni <i>inteligenți</i> | [PIN,01]<br>[PRI,01]<br>[ATZ,01]<br>[LON,01]<br>[BEN,03] | ■ noile tehnologii ale informației și comunicării necesită noi abilități și calificări pentru angajați în multe domenii, precum managementul operațiunilor, știința datelor și managementul lanțului de aprovizionare         |
| Fabricile și modulele de învățare          | [PRI,01]<br>[THI,01]<br>[BAE,01]                         | ■ asigură performanță înaltă în dezvoltarea noilor abilități și dobândirea de cunoștințe în ceea ce privește noile tehnologii   |

Tabel 5.3 - Provocări pentru resursele umane în contextul industriei 4.0

| Provocare   | Referințe                                    |
|---|--|
| Determinarea distanței optime dintre roboți și operatori                | [KHA,03]                                     |
| Retehnologizarea echipamentelor tradiționale                            | Ipoteza autorului                            |
| Instruirea operatorilor și tehnicienilor cu privire la noile tehnologii | [PIN,01][PRI,01][THI,01][BEN,03]<br>[TUP,01] |
| Noua forță de muncă calificată și tânără                                | [SCH,02][PRI,01][HEC,01][TUP,01]             |

#### 5.3.2 Managementul calității: mentenanță și mașini-unelte

Tabel 5.4 - Tendințele în managementul calității în contextul industriei 4.0

| Tendință | Referință | Discuție |
|----------|-----------|----------|
|----------|-----------|----------|

|  |  |   |
|--|--|---|
| Maşină-unealtă inteligentă sau maşină-unealtă 4.0      | [STO,01]<br>[LIU,05]<br>[ULH,01]<br>[CHI,05]<br>[CAG,01]             | ■ maşina-unealtă va fi echipată cu mulți senzori care măsoară diferite caracteristici, vor avea sistem inteligent de monitorizare a prelucrărilor și vor deține un sistem inteligent de mentenanță predictivă bazat pe algoritmi de analiză robuști |
| Învățarea maşinii (Machine learning)                   | [ROB,02]<br>[NEU,03]<br>[QIN,01]<br>[LIU,05]<br>[ULH,01]<br>[UPA,01] | ■ maşina-unealtă va avea capacitatea de auto-optimizare și de a lua decizii pentru îmbunătățirea proceselor   |
| Comunicare maşină-maşină                               | [WAG,05]<br>[VAR,06]<br>[LIU,05]                                     | ■ permit comunicarea între maşini și fabricație cooperativă prin transferul de date în timp real  |
| Mentenanță la distanță utilizând realitatea augmentată | [SCH,03]<br>[GOR,01]<br>[MAS,03]                                     | ■ este utilă la micșorarea timpul de reacție la defectarea maşinilor și diminuează erorile sarcinilor de mentenanță   |
| Aparate de măsură și control wireless                  | Ipoteza autorului  | ■ asigură transferul de date despre măsurători în timp real și evită erorile sau trucurile controlorilor  |

Tabel 5.5 - Provocări pentru managementul calității în contextul industriei 4.0

| Provocare  | Referințe         |
|--|-------------------|
| Implementarea tehnologiilor de detectare (senzorică)               | [LIU,05][CHI,05]  |
| Dezvoltarea sistemului inteligent de mentenanță predictivă         | [LIU,05][CHI,05]  |
| Dezvoltarea algoritmilor robuști de analiză                        | [CHI,05]          |
| Controlul maşinilor-unealtă  | [KHA,07][TUP,01]  |
| Îmbunătățirea algoritmilor de căutare pentru realitatea augmentată | [MAS,03]          |
| Retehnologizarea maşinilor existente                               | Ipoteza autorului |

### 5.3.3 Logistică și planificare în contextul Industriei 4.0

Tabel 5.6 - Tendințe ale logisticii în contextul industriei 4.0

| Tendință                                    | Referințe                        | Discuție   |
|---|----------------------------------|--|
| Mărimea loturilor unu (1)                   | [KAG,01]<br>[STO,01]<br>[SCH,02] | ■ permite obținerea de produse personalizate la costuri rezonabile, realizând profit |
| Mijloace de transport autonome și ecologice | [SCH,02]<br>[KAY,01]             | ■ permit logistică ieftină și ecologică  |
| Drone pentru livrarea bunurilor ușoare      | [NEU,03]<br>[KAY,01]             | ■ vor permite livrare de bunuri ușoare și ultra-ușoare rapid, ieftin și ecologic     |
| Vehicule ghidate automat                    | [KAG,01]                         | ■ vor fi interconectate prin wireless și vor fi utilizate                            |



|  |  |  |
|--|--|--|
|  | [STO,01]<br>[HER,01]<br>[WAN,02]                                     | pentru realizarea transportului intern de-a lungul fluxului de materiale   |
| Identificare cu frecvențe radio (IFR) a materiei prime, produselor sau unităților de transport | [OLE,01]<br>[HOF,02]<br>[MAD,01]<br>[WAN,02]<br>[DUR,02]<br>[YAN,07] | ■ IFR aduce o creștere a trasabilității, a transparenței și a vizibilității în întregul lanț de aprovizionare  |
| Sisteme inteligente de dirijare/navigare și optimizare a transportului                         | [HOF,02]   | ■ vor permite o eficiență ridicată a logisticii externe prin optimizarea continuă a traseelor, în funcție de condițiile de trafic                    |
| Container PI ( $\pi$ )   | [MON,02]<br>[MAS,01]   | ■ reprezintă o nouă paradigmă care poate fi unitatea inteligentă de încărcare  |
| Anticiparea/prezicerea cererii viitoare  | [BAE,01]<br>[HOF,02]<br>[YAN,07]                                     | ■ cerințele viitoare ale clienților vor putea fi anticipate sau prezise utilizând analiza volumului mare de date și a tehnicilor de minare a datelor |
| Sisteme ERP agile  | [BUD,01]<br>[TRS,01]   | ■ pot oferi cea mai bună planificare a producției în timp și spațiu  |

*Tabel 5.7 - Provocările logisticii în contextul industriei 4.0*

| Provocare   | Referințe                |
|---|--------------------------|
| Tranziția către transportul și mijloacele de transport ecologice                      | [SCH,02][KAY,01]         |
| Proiectarea containerul PI- $\pi$   | [MON,02][MAS,01]         |
| Adoptarea noilor tehnologii în sfera logisticii                                       | [KAY,01][OLE,01][HOF,02] |
| Integrarea tuturor participanților din lanțul de aprovizionare în ecosistemul digital | Ipoteza autorului        |

### 5.3.4 Costurile organizației și impactul economic în contextul Industriei 4.0

*Tabel 5.8 - Tendințe legate de costurile organizației și impactul economic*

| Tendințe  | Referințe  | Discuție   |
|---|--|--|
| Fabricația aditivă și hibridă                               | [BOR,01]<br>[DIL,01]<br>[SAN,05]                                     | ■ mărimea lotului unu (1) poate fi atinsă foarte repede și ieftin și permite produse personalizate                             |
| Fabricația cloud  | [THA,01]<br>[TAO,01]<br>[RUD,03]<br>[ZHO,04]<br>[TAL,01]<br>[CAG,01] | ■ transformă resursele de fabricație disponibile în servicii ieftine și permite un mod ușor de a comanda și de a produce piese |
| Instrucțiuni, proceduri și hărți virtuale pentru mentenanță | [SCH,03]<br>[GOR,01]   | ■ pot reduce cheltuielile cu mentenanța prin evitarea prezenței tehnicienilor externi (de la furnizori) la locul defecțiunii   |

|   |                                  |  |
|---|----------------------------------|--|
| Optimizarea proceselor în timp real                           | [KAG,01]<br>[LIU,05]             | ■ auto-optimizarea parametrilor de aşchiere poate conduce la reducere timpului de ciclu şi a energiei consumate şi la creşterea durabilităţii sculelor   |
| Reciclarea produselor mai rapidă şi într-o cantitate mai mare | [KAG,01]<br>[SCH,02]<br>[KAY,01] | ■ odată cu tranziţia către produsele inteligente, fabricile inteligente vor fi capabile să recicleze mai mult şi mai repede; aceste aspecte vor conduce la reduceri semnificative de costuri şi la conservarea resurselor naturale |
| Produse inteligente   | [KAG,01]<br>[MCK,01]             | ■ produsele inteligente vor cunoaşte propria istorie, de la fabricaţie la reciclare, iar informaţia stocată de către aceste produse pe toată durata de viaţă va contribui la identificarea anumitor componente pentru reutilizare  |
| Sursă proprie de energie (electricitate)                      | Ipoteza autorilor                | ■ surse proprii de energie înseamnă costuri reduse cu energia, venituri din vânzarea energiei suplimentare şi reducerea dependenţei de furnizorii externi  |

Tabel 5.9 - Provocările legate de aspectele economice

| Provocare   | Referinţă                |
|---|--------------------------|
| Finanţarea şi cât de mult va costa digitalizarea                                      | [STO,01][SCH,02][NEU,03] |
| Tranziţia întreprinderilor mici şi mijlocii către Industria 4.0                       | [SOM,01][SCH,02]         |
| Dezvoltarea şi fabricarea produselor inteligente                                      | [KAG,01][ZHO,05][ZUE,01] |
| Fabricaţie aditivă de calitate înaltă   | [DIL,01]                 |
| Tranziţia de la fabricaţia clasică, convenţională către fabricaţia aditivă şi hibridă | Ipoteza autorului        |

#### 5.4. Concluzii

Industria 4.0 este aşteptată să schimbe modul în care produsele sunt fabricate. Noile tehnologii ale informaţiei şi comunicării vin să sprijine tranziţia sistemelor de producţie de la fabricaţia tradiţională către fabricaţia inteligentă, integrând dispozitive, echipamente, maşini şi oameni pentru a crea aşa numita fabrică a viitorului.

Noi strategii, modele de afaceri, produse şi procese mai ecologice vor apărea, orientate către crearea de valoare adăugată cât mai mare şi dezvoltare sustenabilă.

Procesele de fabricaţie vor integra cele mai noi tehnologii ale informaţiei şi comunicării pentru a crea fabricaţia inteligentă şi fabricile sustenabile şi astfel noi tendinţe şi provocări pentru mediul global vor lua naştere.

Acest capitol, care reprezintă o analiză conceptului de Industrie 4.0, aduce o mai bună vizualizare, înţelegere şi interpretare a industriei 4.0 şi dezvăluie tendinţele şi provocările pe care sistemele de producţie sau de fabricaţie le întâlnesc sau le vor întâlni şi oferă o perspectivă pentru cercetările ulterioare. Putem întări ideea că industria 4.0 este un proces complex care necesită foarte mulţi specialişti din diferite domenii, timp şi finanţare pentru implementarea şi integrarea tuturor funcţiilor.

Din literatura de specialitate studiată concluzionăm o serie de elemente, pe de o parte tendințele care apar odată cu creșterea fenomenului I4.0, iar pe de altă parte provocările pe care industria în general le va întâmpina și va trebui să le gestioneze. Astfel, tendințele generale sunt după cum urmează:

- contopirea tehnologiilor IT cu tehnologii de fabricație în tehnologii hibrid;
- coboți în producția de serie mică și medie;
- echipamente și sisteme de manipulare conectate la rețele interne pentru achiziția de date în timp real;
- utilizarea tehnologiei de realitate virtuală și realitate augmentată la posturile de lucru cu grad mare de dificultate sau cu riscuri mari;
- mașini-unelte cu senzorică complexă și cu algoritmi de învățare;
- logistică autonomă, vehicule ghidate automat (AGW-uri) și drone;
- sisteme cu IFR utilizate la scară largă, pentru piese, componente, scule și dispozitive cu rolul de creștere al trasabilității;
- sisteme ERP agile;
- sisteme informatice pentru optimizarea proceselor în timp real;
- tehnologii durabile, ecologice, cu amprentă redusă de dioxid de carbon;
- reciclarea într-un volum cât mai mare;
- fabricația hibridă și aditivă pe scară largă în vederea optimizării costurilor și reducerii poluării;
- creșterea participanților din lanțurile globale de aprovizionare în economia circulară;
- resurse proprii, ca de exemplu, energie electrică din surse proprii pentru a reduce dependența de furnizori și de evoluția pieței.

Tendențele enumerate mai sus tind să fie globale. Odată cu implementarea acestor concepte sau soluții în sistemele de fabricație apar și provocări. Dintre acestea le amintim pe cele mai importante, după cum urmează:

- securitatea datelor, viteza de transfer și de acces al datelor, precum și disponibilitatea acestora;
- deficitul de forță de muncă tânără, forța de muncă îmbătrânită, dificil de reinstruit și de adaptat la noile tehnologii;
- dezvoltarea algoritmilor robuști de analiză și a sistemelor de detectare;
- integrarea tuturor participanților din lanțul de aprovizionare în ecosistemul digital;
- tranziția către mijloace de transport mai ecologice, mai sustenabile;
- tranziția întreprinderilor mici și mijlocii către Industria 4.0;
- costurile pentru adoptarea noile tehnologii și re tehnologizării și identificarea surselor de finanțare;

Ideile și beneficiile mapate ale industriei 4.0 trebuie să fie transferate din viziune în realitate [SOM,01], ceea ce înseamnă că este necesar nu doar să dezvoltăm strategii și să avem idei despre viitor ci trebuie de asemenea să accelerăm procesul de implementare a Industriei 4.0, să avem rezultate și să cuantificăm beneficiile.

Preocupările digitalizării sunt orientate în special pe întreprinderile mici și mijlocii datorită lipsei resurselor [SOM,01][SCH,02], iar prin urmare, pentru integrarea cu succes a tuturor participanților din lanțurile de aprovizionare sunt necesare investiții mari, susținute nu numai de corporații, ci și de

guverne [KLI,01]. În orice caz, îndrăznim să afirmăm că cea mai importantă resursă pentru succesul Industriei 4.0 este resursa umană și trebuie tratată cu prioritate.

După cum am demonstrat în capitolele anterioare, strunjirea dură poate înlocui rectificarea, iar această înlocuire poate fi văzută ca un pas înainte spre o tehnologie mai durabilă, cu consum redus de energie și materiale care pot fi reciclate sau reutilizate, care reprezintă un pilon al Industriei 4.0.

Nu în ultimul rând, înlocuirea lichidelor de aşchiere clasice cu soluții pentru lubrifiere ecologice, durabile, fac din această direcție un „element” care poate fi atribuit Industriei 4.0.

## 6. CAPITOL 6 Aspectele de mediu ale înlocuirii rectificării cu strunjirea dură și posibilitatea utilizării uleiurilor vegetale ca lichid de aşchiere

Fabricația verde se refera la metode și tehnici pentru reducerea costurilor și a impactului de mediu [TAI,01], pentru crearea de locuri de muncă sigure și curate [SIV,01], pentru reducerea emisiilor nocive, pentru a minimiza și elimina consumul risipitor de resurse și pentru a recicla cât mai mult posibil [PAU,01][MAR,01][PAS,01]. În fabricație, procesele de prelucrare sunt mari consumatoare de resurse și prin urmare preocupările și viitoarele cercetări în domeniul prelucrărilor verzi trebuie să se focuseze pe elementele principale care conduc la implementarea fabricației verzi, cum ar fi mașini-unelte eficiente energetic, scule aşchietoare reciclabile, lubrifianți ecologici și biodegradabili și surse de energie regenerabile [ARS,03], după cum sunt prezentate în figura 6.1.



Fig. 6.1 - Resurse verzi pentru fabricație verde și sustenabilă

### 6.2 Tehnica lubrifierii cu cantitate minimă de lubrifiant

#### 6.1 Considerații generale

Conform lui [BOU,01] și lui Dhar ș.a. [DHA,01], tehnica lubrifierii cu CML a fost propusă, sugerată „ca un mijloc de abordare”, ca o soluție la problemelor de mediu și a riscurilor profesionale din zonele de fabricație asociate cu LA și particulele aeropurtate. Lubrifierea cu CML este o metodă utilizată la prelucrările mecanice în special, pentru a asigura lubrifierea și răcirea suprafețelor prelucrate, și constă în pulverizarea directă în zona de lucru a unei cantități mici de ulei (particule fine) cu ajutorul aerului comprimat (sau gaz) [PAU,01][LIE,03], la o rată de pulverizare cuprinsă în general între 10-200 mililitri/oră (mL/h) și presiune cuprinsă în general între 2-8 bari [ELM,01][TAI,01][MIA,01][LIE,03] ca o alternativă ecologică la sistemele tradiționale de răcire [PAU,01][TAI,01]. Prin intermediul acestei metode se formează o ceață de ulei cu picături micrometrice, care este pulverizată în zona de aşchiere cu o viteză mare prin intermediul unei duze [WAN,20]. Această

metodă a arătat de-a lungul timpului, cu precădere în ultimii 10-15 ani, numeroase avantaje în comparație cu RA, precum reduceri semnificative ale costurilor cu LA, cu energia și cu echipamentele, consumă mai puțină energie, oferă flexibilitate ridicată în relocarea mașinilor, reduce riscurile de contaminare a mediului, asigură un loc de muncă mai sănătos și curat, influențează în mod pozitiv calitatea produselor, asigură creșterea productivității [PAU,01][TAI,01][STE,02], oferă o lubrifiere mai bună decât răcirea tradițională cu fluide pe bază de apă și reduce încălzirea sculei și piesei datorată frecării [STE,02][SIN,09].

#### 6.4 Mecanismul de lubrifiere al uleiurilor vegetale

Conținutul de acizi grași al uleiurilor s-a dovedit a fi un factor important care influențează proprietățile de aşchiere [ZHA,40]. Efectele anti-frecare și anti-uzură sunt obținute datorită moleculelor uleiului vegetal care aderă pe suprafața metalului, rezultând adsorbția fizică și chimică. Datorită activității chimice a grupurilor polare ale uleiului vegetal și în funcție de atracția dintre atomi sau molecule care pot fi absorbiți de suprafața metalică (reacționează cu metalul), o rețea moleculară stratificată se formează pe suprafață (moleculele polare reacționează creând o peliculă de "săpun metallic"), reducând în consecință frecarea. Astfel, interfața de frecare este separată de un film de adsorbție, format. Stratul fin de ulei are capacități mari anti-frecare, anti-uzură și de preluare a solicitărilor mecanice, reducând astfel forțele de frecare și de aşchiere [LI,20][WAN,30][DUA,03]. În plus, datorită temperaturii mari de la suprafața metalului, saponificarea uleiului se realizează ușor. Reacția de saponificare poate înlocui atomii de metal de la suprafața cu atomi de hidrogen în grupă funcțională carboxyl. Astfel, rezultatul reacției chimice poate produce o peliculă bine absorbită, care ajută la creșterea durabilității [WAN,10].

Uleiul de porumb conține mai mulți acizi grași saturați decât uleiul de rapiță sau floarea soarelui. Acizii grași din uleiul de porumb îl fac potrivit ca lubrifiant în aşchiere; energia de legătură dintre acizii saturați și suprafața piesei este mare, astfel pelicula de ulei care rezultă în urma lubrifierii și adsorbției are rezistență ridicată, stabilitate bună și bune proprietăți de lubrifiere.

Abilitatea uleiurilor vegetale de a pătrunde în interfețele sculă-piesă și sculă-așchie stabilesc eficacitatea lubrifierii [DUA,02][WAN,10]. În comparație cu plăcuțele aşchietoare cu unghiuri de degajare pozitive, lipsa spărgătorului de aşchii (micro-geometria specifică) și suprafața netedă a plăcuței aşchietoare negative ceramice îmbunătățesc alunecarea lubrifiantului, debitul și capacitatea de pătrundere în interfața piesă-sculă, astfel crescând rezistența la frecare și uzură și îmbunătățind rugozitatea suprafeței [ARS,06].

#### 6.6 Analiza stadiului actual al strunjirii dure cu uleiuri vegetale ca lichide de răcire-ungere

Tabel 6.5 - Rezumatul cercetărilor care au urmărit analiza uleiurile vegetale pure ca lichid de aşchiere

| Referință | Lubrifiant    | Proces         | Material             | Duritate (HRC) | Vol./ Pres.      | Remarci   |
|-----------|---------------|----------------|----------------------|----------------|------------------|---|
| [GAJ,01]  | Biodegradabil | Strunjire dură | X40CrMoV5 (AISI H13) | 56             | 35 mL/h<br>5 bar | Prelucrarea cu CML a fost superioară celei cu RA și a determinat rezultate superioare în ceea ce privește forța principală de aşchiere, forța în direcția avansului, rugozitatea suprafeței și coeficientul de frecare, iar dintre cele două uleiuri, uleiul vegetal- |

|                      |   |                    |                               |       |                  |   |
|----------------------|---|--------------------|-------------------------------|-------|------------------|---|
|                      |   |                    |                               |       |                  | biodegradabil a fost superior   |
| [GUN,01]             | Ulei de cocos<br>Ulei de rapiţă<br>Ulei de soia | Strunjire<br>dură  | 40NiCrMo6<br>(AISI 4340)      | 52-54 | 50 mL/h<br>6 bar | Uleiul de rapiţă a fost superior din punct de vedere al durabilităţii sculei şi rugozităţii Ra comparativ cu uleiul de cocos şi soia  |
| [MIA,01]             | Ulei de măsline                                 | Strunjire<br>dură  | C60<br>(AISI 1060)            | 55-60 | 150 ml/h         | S-a analizat influenţa parametrilor de lucru asupra rugozităţii şi uzurii sculei, fără comparaţie între metodele de lubrifiere  |
| [SHA,05]             | Accu lube LB-6000 - ulei de rapiţă              | Strunjire<br>dură  | AISI D2                       | 55-62 | 5 bar            | Rugozitatea Ra şi temperatura în zona de aşchiere au fost îmbunătăţite (micşorate) cu aproximativ 50% când s-a utilizat lubrifierea cu CML comparativ cu prelucrarea uscată   |
| [CHI,01]             |   | Strunjire<br>dură  | 100Cr6<br>(AISI 52100)        | 60-62 | -                | La Va de peste 160 m/min şi t mai mare de 0,35 mm uleiul de cocos a generat Ra superioară comparativ cu celelalte două metode utilizate   |
| [XAV,01]             | Ulei de cocos                                   | Strunjire<br>moale | 5CrNi18-10<br>(AISI 304)      | ≈ 35  | -                | Uleiul de cocos s-a dovedit mai performant decât celelalte două tipuri de ulei în reducerea uzurii sculei şi a rugozităţii, iar conform ANOVA este al doilea factor ce influenţează rugozitatea, după avansul de lucru. |
| [ELM,01]<br>[ELM,02] | Ulei de ricin                                   | Strunjire<br>moale | X20Cr13<br>(AISI 420)         | 47-48 | 50 mL/h<br>5 bar | Prelucrarea cu ulei de ricin asigură o durabilitate a sculei mai mare comparativ cu prelucrarea uscată datorită reducerii frecării şi temperaturii; rugozitatea şi forţele de aşchiere au fost uşor îmbunătăţite.       |
| [BEL,01]             | Ulei de rapiţă                                  | Găurire            | X2CrNiMo1<br>7<br>(AISI 316L) | -     | RA               | Uleiurile vegetale au condus la o creştere a durabilităţii sculei cu 177% şi o scădere de 7% a forţei de apăsare în comparaţie cu uleiul mineral.   |
| [RAH,02]             |   |                    | Ti-6Al-4V                     |       | 10 mL/h<br>2 bar | Forţa de aşchiere (de apăsare), momentul de torsiune, uzura sculei şi temperatura piesei au fost mai mici când s-a utilizat ulei de palmier, comparativ cu esterul sintetic.  |
| [RAH,03]             | Ulei de palmier                                 | Găurire            | Inconel 718                   |       | -                |   |
| [KUR,02]             | Ulei de rapiţă<br>Ulei de FS                    | Frezare            | X5CrNi18-10<br>(AISI 304)     | ≈ 35  | RA               | Uleiul de rapiţă s-a dovedit a fi cel mai eficient din punct de vedere al rugozităţii Ra obţinute, atunci când obiectivul primar a fost reducerea Ra.   |
| [CET,01]             |   |                    |                               |       |                  | Lichidele de aşchiere pe bază de ulei de rapiţă şi FS (cu aditivi adăugaţi) au fost superioare uleiurilor mineral şi semi-sintetic din punct de vedere al forţelor de aşchiere şi rugozităţii, măsurate.                |
| [OZC,01]             | Ulei de rapiţă<br>Ulei de FS                    | Strunjire<br>moale | X2CrNi18-9<br>(AISI 304L)     | ≈ 35  | RA               |   |
| [PER,01]             | Ulei de rapiţă<br>Ulei de FS                    | Frezare            | Inconel 718                   | -     | 100mL/h          | Uleiul de floarea soarelui high-oleic a fost superior celui de ricin şi rapiţă din  |

|          |  |           |                          |        |                                  |   |
|----------|--|-----------|--------------------------|--------|----------------------------------|---|
|          | Ulei de ricin  |           |                          |        |                                  | punct de vedere al forţelor de aşchiere şi a durabilităţii sculei.  |
| [RAJ,02] | Ulei de soia   | Strunjire | 36CrNiMo4<br>(AISI 4340) | 45     | 180 mL/h<br>360 mL/h<br>540 mL/h | Ulei de soia a condus la valorile cele mai mici ale forţei de aşchiere.   |
| [GHU,01] | Ulei de soia<br>Ulei de cocos<br>Ulei de FS<br>Ulei de arahide | Strunjire | 25CrMo4<br>(AISI 4130)   | -      | 50 mL/h                          | Temperatura în zona de aşchiere a fost redusă cu 18% la prelucrarea cu CML în comparaţie cu prelucrarea uscată şi cu 5% comparativ cu prelucrarea cu RA. Uleiul de soia a produs cele mai bune rezultate cu referire la forţe şi rugozitatea obţinută.  |
| [GHU,02] | Ulei de soia<br>Ulei de floarea soarelui                       |           |                          |        |                                  | Uleiul de soia a fost mai performant, în sensul că a generat o reducere de aproximativ 9% a forţelor şi puterii consumate comparativ cu uleiul mineral şi 7% comparativ cu uleiul de floare-soarelui.   |
| [SUR,01] | Ulei de ricin<br>Ulei de palmier<br>Ulei de arahide            | Strunjire | X210Cr12<br>AISI D3      | -      | 300 mL/h                         | Uleiul de arahide a fost superior, iar Va a fost principalul factor de influenţă a rugozităţii Ra.  |
| [EKI,01] | Ulei de rapiţă<br>cu apă                                       | Strunjire | S355J0                   | -      | 10 mL/h<br>30 mL/h<br>50 mL/h    | Amestecul de lubrifiant 10 mL/h ulei şi 1,7 l/h apă a generat cea mai mică forţă de aşchiere (rezultanta forţelor) comparativ cu utilizarea a 0,3 sau 1 l/h apă.  |
| [AGR,02] | Ulei de aloe vera  | Strunjire | M2                       | -      | 50 mL/h                          | Utilizarea uleiului de aloe vera a generat o rugozitate mai mică (6,7%) comparativ cu utilizarea lichidului de aşchiere convenţional.   |
| [FAI,02] | Ulei de palmier<br>de susan, de<br>cocos şi de<br>măslina      | Găurire   | AISI 316                 | -      | 600 mL/h                         | Cea mai mică uzură a sculei, precum şi cel mai potrivit tip de aşchiere au fost generate de uleiul de cocos.  |
| [ABD,01] | Ulei de<br>Jatropha  | Strunjire | AISI 1045                |        | 160 mL/h<br>4 bari               | Lichidele ionice în uleiul vegetal au un efect pozitiv, îmbunătăţind capacitatea de răcire şi lubrifiere. Forţele de aşchiere, energia specifică, coeficientul de frecare, temperatura în zona de aşchiere şi uzura sculei au fost mai mici în cazul utilizării lubrifiantilor cu lichide ionice comparativ cu uleiul vegetal pur |
| [CHA,04] | Ulei de soia   | Strunjire | AISI 52100               | 55 HRC | 100 mL<br>5 bar                  | Strunjirea cu CML şi ulei simplu a produs rugozitate mai bună, tensiuni reziduale mai mici, uzură a sculei mai mică şi o grosime a stratului alb mai mică comparativ cu strunjire uscată sau cu aer comprimat răcit.  |
| [OZB,01] | Biodegradabil  | Strunjire | AISI D2                  | 50 HRC | 150 mL/h<br>6 bar                | Comparativ cu prelucrarea uscată, sistemul cu CML reduce temperatura  |



|          |  |             |                  |        |                              |  |
|----------|--|-------------|------------------|--------|------------------------------|--|
|          |  |             |                  |        |                              | în zona de aproximativ cu aproximativ 100°C. De asemenea, rugozitatea suprafeței a fost îmbunătățită cu peste 80%, iar durabilitatea cu peste 200%.  |
| [KHU,05] | Ulei de ricin<br>Ulei de FS                                  | Găurire     | Al 6063          | -      | 50 mL/h<br>2 bar             | Uleiurile vegetale conduc la forțe, moment și rugozitate mai mici comparativ cu găurirea uscată sau cu lichid convențional.  |
| [PAD,08] | Ulei de cocos<br>Ulei de rapiță                              | Strunjire   | AISI 1040        | 32 HRC | 10mL/min                     | Uleiurile vegetale au fost superioare aşchierii uscate și cu LA convențional din punct de vedere a rugozității suprafeței, forței principale de aşchiere, temperaturii în zona de aşchiere și a uzurii sculei. Uleiul de cocos a fost superior celui de rapiță.                  |
| [PAL,10] | Ulei de FS   | Găurire     | AISI 321         | -      | 120 mL/h<br>6 bar            | Uleiul de FS pur și nanolubrifianțul (FS + AL2O3) au fost superioare găurii uscate și cu emulsie, în ceea ce privește forța de aşchiere, momentul, rugozitatea, uzura și temperatura în vârful burghiului.   |
| [SAL,01] | Ulei de ricin<br>Ulei de FS                                  | Strunjire   | Inconel 718      | -      | 250 mL/h<br>2, 3,5, 5<br>bar | Uleiurile vegetale au condus la uzură a sculei și rugozitate a suprafeței mai bune decât în aşchieria uscată, iar uleiul de FS a fost superior uleiului de ricin   |
| [SHU,01] | Ulei de rapiță   | Frezare     | Aluminiu<br>6061 | -      | -                            | Uleiul de rapiță a produs rugozitate și uzură a sculei superioare aşchierii uscate și cu RA, la toate nivelurile ale regimului de aşchiere.  |
| [SHR,02] | Ulei de soia<br>Ulei de arahide                              | Frezare     | Aluminiu<br>Oțel | -      | -                            | Utilizarea uleiurilor aduce o rugozitate mai mică comparativ cu frezarea uscată. Influența uleiurilor este asemănătoare.   |
| [CHA,10] | Ulei de palmier<br>Ulei de cocos                             | Strunjire   | TI 6Al- 4 V      | -      | -                            | Uleiul de palmier a fost superior celui de cocos din punct de vedere al uzurii sculei și temperaturii în zona de aşchiere.   |
| [LI,25]  | Ulei de ricin,<br>soia, rapiță, FS,<br>palmier și<br>arahide | Rectificare | GH4169           | -      | 50mL/h<br>6 bar              | Uleiul de ricin a generat cea mai mică forță de aşchiere în timp ce uleiul de palmier a generat cea mai mică temperatură de aşchiere și a doua cea mai mică forță de aşchiere. Acizii grași saturați sunt mai eficienți din punct de vedere al lubrifierii decât cei nesaturați. |

Literatura de specialitate care urmărește strunjirea dură cu CML utilizând uleiuri vegetale este destul de săracă; această arie a fost slab dezbătută de cercetători. Dacă rezultatele cercetărilor viitoare sunt asemănătoare sau chiar mai bune decât cele existente la strunjire moale, atunci perspectiva strunjirii dure pentru reducerea costurilor de fabricație și creșterea productivității pare a fi reală.



Din literatura de specialitate ştim că  $N_e$  a unei maşini-unelte depinde de  $V_a$  şi forţa principală de aşchiere ( $F_a$ ), după cum urmează:

$$N_e = \frac{F_a \times V_a}{6000} ; \quad (6.1)$$

În acest sens, perspectivele strunjirii dure cu ulei vegetal ca lichid de ungere-lubrifiere [ARS,03] pot fi:

Reducerea  $F_a$  &  $V_a$  Constantă → Reducere a  $N_e$  ceea ce înseamnă reducere a costului energiei, uzură mai mică a sculei, durabilitate mai mare şi cost al sculei mai mic;

Reducerea  $F_a$  & Creşterea  $V_a$  →  $N_e$  Constantă şi creştere a productivităţii.

## 6.8 Concluzii

Fabricaţia verde reprezintă, astăzi, un pilon important pentru strategiile companiilor din domeniul fabricaţiei. Maşinile-unealtă eficiente energetic, soluţiile software pentru optimizarea aşchierii în timp real, energie din surse regenerabile, sculele aşchietoare din materiale reciclabile şi lubrifianţii biodegradabili reprezintă principalele elemente ale tranziţiei către o prelucrare mai ecologică.

Este larg cunoscut faptul că lichidele de răcire-ungere sau lichidele de aşchiere sunt dăunătoare atât pentru mediul înconjurător cât şi pentru oameni, operatori care au contact cu acestea, iar validarea şi implementarea unor soluţii mai economice, mai prietenoase din punct de vedere sănătate şi securitate în muncă reprezintă un pas important către o fabricaţie ecologică.

Tehnica lubrifierii cu cantitate minimă de lubrifiant este tehnica cea mai promiţătoare, din punct de vedere al performanţelor pe care le oferă, la prelucrările mecanice ale oţelurilor călite. Această tehnică aduce atât beneficii economice, precum costuri mai reduse, cât şi beneficii de ordin calitativ sau de siguranţă a muncii. Concomitent cu implementarea acestei tehnici, utilizarea de lubrifianţi ecologici, pe bază de uleiuri vegetale, reprezintă o soluţie viabilă pentru optimizarea proceselor de aşchiere. Nu în ultimul rând, utilizarea nanolubrifianţilor în aşchiere poate reprezenta viitorul, însă aplicarea acestora necesită studii aprofundate care să vizeze în primul rând influenţa nanoparticulelor asupra sănătăţii utilizatorilor.

Din literatura de specialitate studiată, care a vizat analiza influenţei aplicării uleiurilor vegetale în aşchiere, tragem următoarele concluzii:

- ✓ utilizarea lichidelor de aşchiere clasice, (emulsii) au numeroase dezavantaje dintre care amintim costul mare, provocările legate de depozitare şi tratare, conţinutul de substanţe nocive pentru om şi mediu;
- ✓ tehnica lubrifierii cu CML este larg utilizată în cercetare;
- ✓ prin intermediul tehnicii lubrifierii cu CML, pătrunderea lubrifiantului în zonele de deformare şi formare a căldurii este eficientă;
- ✓ utilizarea acestei tehnici aduce optimizări de proces, reduceri de costuri şi creştere a calităţii produselor comparativ cu răcirea din abundenţă sau prelucrarea uscată;

- ✓ principalele caracteristici calitative și cantitative analizate sunt: rugozitatea suprafeței, durabilitatea și uzura sculei, temperatura în zona de aşchiere, micro-duritatea, forțele de aşchiere, momentul de torsiune, energia specifică, coeficientul de frecare, puterea consumată și forma aşchiei;
- ✓ caracteristicile analizate, precum rugozitatea, uzura sculei, puterea sau forțele de aşchiere sunt îmbunătățite atunci când se utilizează tehnica lubrifierii cu CML cu uleiuri vegetale, comparativ cu răcirea din abundență cu emulsii;
- ✓ presiunea optimă a lubrifiantului este de 4-6 bar;
- ✓ rata optimă de pulverizare este de aproximativ 50-150 mL/h;
- ✓ cele mai des utilizate uleiuri vegetale în cercetări sunt: uleiul de floare-soarelui, uleiul de rapiță, uleiul de cocos, uleiul de soia, uleiul de măsline, uleiul de ricin, uleiul de palmier, uleiul de susan;
- ✓ stratul subțire (filmul) de ulei are capacități mari anti-fricțiune, anti-uzură și de preluare a solicitărilor mecanice, reducând astfel forțele de frecare și de aşchiere;
- ✓ cu cât conținutul de acizi grași saturați este mai mare în uleiul vegetal, cu atât este mai eficient ca lubrifiant în aşchiere;
- ✓ în comparație cu plăcuțele aşchietoare cu unghiuri de degajare pozitive, lipsa spărgătorului de aşchii (micro-geometria specifică) și suprafața netedă a plăcuței aşchietoare negative ceramice îmbunătățesc alunecarea lubrifiantului, debitul și capacitatea de pătrundere în interfața piesă-sculă, astfel crescând rezistența la frecare și uzură și îmbunătățind rugozitatea suprafeței;
- ✓ orientarea necorespunzătoare a duzei de pulverizare afectează capacitatea de pătrundere a lubrifiantului în zona de aşchiere și reduce capacitatea de lubrifiere [DUA,02]. De aceea poziția duzei, unghi și distanță, este un parametru foarte important la lubrifierea cu CML, ce trebuie investigat;
- ✓ nanolubrifiantii pe bază de ulei vegetal reprezintă următoarea etapă de dezvoltare a lichidelor de aşchiere întrucât datorită proprietăților nanoparticulelor aduc o îmbunătățire a caracteristicilor măsurate. Cu toate acestea, sunt mai scumpe, mai greu accesibile decât uleiurile vegetale pure, iar influența pe care nanoparticulele o pot avea asupra mediului sau oamenilor nu este bine stabilită și necesită cercetări amănunțite.

Tranziția către lichidele de aşchiere biodegradabile este necesară pentru a asigura o fabricație sustenabilă, ecologică, cu locuri de muncă curate și sigure pentru om, cu scopul de a obține avantajul competitiv tehnologic și de a reduce emisiile de gaze cu efect de seră.

Acizii grași din uleiul de porumb, precum și prețul și disponibilitatea, îl fac potrivit ca lubrifiant în aşchiere; energia de legătură dintre acizii saturați și suprafața piesei este mare, astfel pelicula de ulei care rezultă în urma lubrifierii și absorbției are rezistență ridicată, stabilitate bună și bune proprietăți de lubrifiere.

Strunjirea dură a materialelor cu duritate mai mare de 50 HRC, cu scopul de înlocui rectificarea într-un mod ecologic, este slab dezbătută de literatura de specialitate. Prin urmare, viitoare cercetări trebuie să se focalizeze în această direcție, folosind plăcuțe ceramice și cu NCB cu geometrie wiper (raze multiple), pentru a investiga caracteristicile suprafeței (cum ar fi microduritatea, straturile albe, tensiunile reziduale, sau rugozitatea), uzura sculei (durabilitatea sculei), puterea consumată și costurile procesului.

Utilizarea uleiurilor vegetale în lubrifierea cu CML oferă performanță foarte bună a lubrifierii. Cercetările care se desfășoară în continuare și care fac obiectul tezei, se referă la analiza influenței

aplicării uleiurilor vegetale, mai exact uleiul de porumb, ca lichide de aşchiere utilizând tehnica lubrifierii cu CML asupra unor rugozităţi "exotice", precum Rk, Rvk şi Rpk, precum şi asupra uzurii sculei. Aceste rugozităţi, definite de standardul ISO 13565, sunt utilizate din ce în ce mai mult, ca indicator calitativ, la piesele supuse la solicitări mecanice ridicate întrucât permit evaluarea suprafeţelor obţinute mult mai bine decât clasicele rugozităţi Ra sau Rz. Ca direcţie de cercetare în viitor, este necesară analiza celor două metode de lubrifiere şi anume RA şi lubrifierea cu CML cu lubrifianţi ecologici, hibridi sau nanolubrifianţi din punct de vedere al altor caracteristici calitative, precum tensiunile remanente, straturile albe sau factorul de asimetrie al suprafeţei.

## **7. CAPITOL 7 Rezultate experimentale privind înlocuirea lubrifianţilor sintetici şi minerali cu lubrifianţi organici**

Strunjirea dură de precizie a câştigat din ce în ce mai multă atenţie în industria fabricaţiei, în ultimii ani, datorită presiunii continue a pieţei globale pentru reducerea costurilor, minimizarea problemelor de mediu şi de sănătate şi realizarea unei producţii mai curate. Prin urmare, aşchiera uscată şi lubrifierea cu cantitate minimă de lubrifiant au devenit utilizate pe scară largă în fabricaţie, pentru a răspunde problemelor de mediu cu privire la clasicele emulsii, dăunătoare pentru mediu şi om. Uleiurile vegetale, în prelucrarea cu CML, sunt o soluţie promiţătoare pentru lichidele de aşchiere pe bază de petrol; cu toate acestea, efectele şi performanţa acestora asupra rugozităţii suprafeţei şi uzurii sculei, la strunjirea dură cu plăcuţe ceramice rămân neclare. Pentru a rezolva această limitare s-au desfăşurat experimente de strunjire dură, pentru a compara aşchiera cu lubrifiere cu CML asistată de ulei de porumb şi aşchiera uscată, la viteze de aşchiere şi avansuri de lucru, diferite.

Uleiul de porumb este mai bogat în acizi graşi saturaţi decât uleiul de floarea soarelui sau de rapiţă şi mai bogat în acizi graşi mononesaturaţi decât uleiul de cocs, floarea soarelui şi soia; prin urmare, îl face potrivit ca lubrifiant pentru aşchiere. În plus, preţul şi disponibilitatea îl fac mai accesibil pentru industria globală de aşchiere. Întrucât comunitatea ştiinţifică confirmă faptul că [CHI,01][GHU,01][RAJ,02] [MAH,01][RAH,03][GAJ,01][SHA,09][SHA,05][KHA,01][LOH,01] strunjirea dură cu CML şi în cele mai multe cazuri cea uscată, oferă răspunsuri (rugozitatea suprafeţei, uzura sculei, forţele de aşchiere, putere, etc.) mai bune decât prelucrarea cu emulsii, cercetarea nu a luat în considerare şi răcirea clasică din abundenţă. „Bătălia” este dată de aşchiera uscată şi cu CML, deoarece acestea sunt cele mai uşor şi mai ieftin de implementat, în comparaţie cu metodele de răcire criogenice sau alte metode de răcire şi lubrifiere hibride.

Obiectivul principal al cercetării este acela de a determina performanţele tehnologice ale strunjirii dure la aşchiera cu ulei de porumb şi la aşchiera uscată, în vederea îndeplinirii condiţiilor de fabricaţie verde. Acest obiectiv este realizat prin următoarele obiective specifice:

- ✓ determinarea, pe baza literaturii, a limitelor cunoscute în acest domeniu;
- ✓ stabilirea parametrilor cercetării, a metodologiei de cercetare, a echipamentelor şi aparaturii;
- ✓ prelucrarea statistică a rezultatelor în vederea modelării matematice;
- ✓ interpretarea rezultatelor în vederea valorificării lor atât tehnic, cât şi economic.

Astfel, au fost definite patru ipoteze. Ipotezele cercetării au fost elaborate în baza experienţei practice acumulate până în prezent şi a analizei stadiului actual prezentat în studiul bibliografic. Aceste ipoteze sunt:

- ✓ Ipoteza 1. Rugozitatea suprafeței la strunjirea dură asistată de lubrifierea cu CML este semnificativ mai bună decât la prelucrarea uscată, când se utilizează ulei de porumb;
- ✓ Ipoteza 2. Uleiul de porumb la strunjirea dură asistată de lubrifierea cu CML este un parametru semnificativ pentru răspunsuri;
- ✓ Ipoteza 3. Uzura sculei la strunjirea dură asistată de lubrifierea cu CML este mai mică decât la prelucrarea uscată când se utilizează ulei de porumb;
- ✓ Ipoteza 4. Obiectivul fabricației verzi/ecologice, atunci când se folosește ulei de porumb, este realizabil în condiții economice.

## 7.1 Proiectarea experimentelor

Proiectarea statistică a experimentelor este "o colecție de tehnici/metode/proceduri de realizare a unei experiențe, cu scopul declarat de a se stabili modul în care să se acționeze asupra unui număr dat de factori (denumiți controlați) care influențează caracteristica studiată, în vederea prelucrării statistice a datelor experimentale obținute" [ISA,10]. Factorii controlați reprezintă elementele a căror influență asupra caracteristicii analizate, denumită și variabilă de răspuns, se poate evidenția prin intermediul analizei statistice [ISA,10].

Performanța uleiului de porumb, a cărui utilizare la strunjirea dură reprezintă o noutate [ARS,06], este investigată cu ajutorul unor parametri calitativi și cantitativi ai prelucrărilor prin așchiere, precum rugozitatea suprafeței, uzura și durabilitatea sculei, comparativ cu așchiera uscată, utilizând plăcuțe din materiale ceramice cu micro-geometrie de tip Wiper (raze multiple), mult mai ieftine decât cele cu NCB. De asemenea, evaluarea uleiului de porumb ca lubrifiant este susținută și de analiza și modelarea statistică.

Proiectarea statistică a experimentelor s-a realizat plecând de la experimentul factorial complet. În cadrul unui experiment factorial complet, fiecare nivel al unui factor se combină cu fiecare nivel al celorlalți factori.

În cadrul experimentelor s-au considerat doi (2) factori, cu trei (3) niveluri fiecare și un factor cu două (2) niveluri, rezultând astfel un număr total de optsprezece (18) categorii de experimente ( $3^2 \times 2^1$ ). Pentru fiecare din cele 18 categorii de experimente, s-au realizat patru (4) încercări, încercarea principală și trei (3) replici succesive (prima, a doua respectiv a treia replică), rezultând astfel 72 încercări alcătuite din experimentul inițial și trei replici pentru validarea experimentelor.

Testele au fost împărțite egal după cum urmează: 36 de teste de pentru fiecare tip de lubrifiere, strunjire dură uscată și strunjire dură cu ulei de porumb, fiind împărțite în continuare în trei seturi a câte 12 teste în funcție de nivelurile vitezei de așchiere  $V_a$  (3 niveluri). Mai mult, aceste seturi au fost împărțite din nou în trei subgrupe pe baza nivelurilor avansului de lucru (3 niveluri), rezultând patru experimente, experiment principal și trei replici pentru confirmare, pentru fiecare nivel. Proiectarea factorială completă permite toate combinațiile posibile ale nivelurilor factorilor, permițând construcția și analiza ușoară a proiectului de experimente [PAE,01].

Pentru a stabili nivelul de semnificație al parametrilor de intrare (factorilor), analiza statistică a fost realizată și interpretată cu ajutorul diagramelor de efecte medii, analiza de varianță (ANOVA) și modele de regresie. ANOVA a fost efectuată, cu ajutorul software-ului MINITAB V.19, realizat de Minitab LLC, State College, PA, SUA, pentru a stabili influența și semnificația statistică a condițiilor de

aşchiere, adică avansul, viteza de aşchiere și tipul de lubrifiere asupra variabilelor de răspuns, iar modelele de regresie au fost realizate, pe baza rezultatelor experimentale, pentru validare. Un nivel ridicat de coeficient de determinare ( $R^2$ ) arată acuratețea modelelor de regresie și semnificația rezultatelor experimentale [ABB,01].

Trei măsurători după fiecare primă încercare (30 mm lungime de aşchiere), au fost efectuate în trei locații diferite, la aproximativ  $120^\circ$  una dintre ele, în mijlocul suprafeței prelucrate și a fost înregistrată valoarea medie. Pentru validarea experimentului, rugozitatea pentru replicile 2, 3 și 4 a fost măsurată o singură dată, după fiecare test, într-un loc în mijlocul suprafeței prelucrate, iar valorile au fost înregistrate.

Calitatea suprafeței piesei a fost evaluată conform ISO 4287-1997 pentru parametrii de amplitudine și ISO 13565-2 pentru parametrii de distribuție a înălțimii profilului. Au fost măsurate și înregistrate rugozitățile  $R_a$ ,  $R_z$  și  $R_{pk}$ .  $R_a$  este cel mai popular indicator care definește calitatea unei suprafețe și un criteriu de caracterizare a tehnologiei.  $R_z$  este utilizat pe scară largă pe suprafețele care sunt considerate „importante”, iar  $R_{pk}$ , parte din familia  $R_k$ , a devenit utilizat pe scară largă în aplicațiile supuse sarcinilor/solicitări mecanice ridicate, deoarece vârfurile (de pe suprafețele funcționale) sunt primele predispuse la uzură, iar o valoare ridicată poate duce la defecțiuni premature sau la o durată de viață mai mică a componentei.

Graficele 2D și 3D au fost realizate pentru o mai bună înțelegere a experimentelor. În grafice au fost înregistrate valorile medii ale celor patru (4) încercări aferente fiecărei categorii de experimente.

În a doua etapă, uzura sculei a fost investigată în prelucrarea uscată și cu ulei de porumb. S-au utilizat câte trei (3) mostre pentru fiecare tip de prelucrare. Uzura sculei a fost măsurată după 1,3, 3,8, 6,3, 8,9, 11,4, 14, 16,6, 19, 22, 25, 28 și 30 minute de tăiere și rugozitățile aferente după 1,3, 3,8, 11,4, 14, 16,6, 25 și 28 minute de tăiere.

Uzura sculei a fost evaluată conform ISO 3685. A fost evaluată uzura flancului, iar limită de uzură a fost setată la 0,3 mm. Turația piesei a fost ajustată periodic astfel încât să se păstreze viteza de aşchiere de 180 m/min.

Primele mostre au fost finalizate și schimbate după 8,9 minute de prelucrare. Mostrele cu numărul doi au fost finalizate și schimbate după 19 minute de prelucrare. Mostrele cu numărul 3 au atins 28 de minute la strunjirea uscată, respectiv 30 de minute de prelucrare când s-a utilizat uleiul.

În următoarea etapă, la cele șase (6) mostre s-au măsurat abaterile de formă, circularitatea și liniaritatea, precum și parametrii de rugozitate  $R_{sk}$  și  $R_{ku}$ ,

La final, piesele prelucrate au fost supuse analizei metalografice pentru identificarea influențelor termice, respectiv white layers. Piesele au fost debitate pe o mașină de debitat cu disc fără inserții metalice, au fost lustruite și supuse la atac metalografic cu soluție de nital.

## 7.2 Desfășurarea experimentelor

### 7.2.1 Materiale și metode

În această etapă a fost investigată performanța uleiului de porumb la strunjirea dură asistată de lubrifierea cu cantitate minimă de lubrifiant, în ceea ce privește rugozitățile suprafeței și uzura sculei comparativ cu prelucrarea uscată, utilizând viteză de aşchiere și avans, variabile [ARS,06]. Plăcuțe



ceramice cu geometrie Wiper au fost utilizate întrucât sunt o alternativă ieftină la plăcuțele aşchietoare cu NCB.

Maşina-unealtă pe care s-au realizat experimentele este un strung CNC de precizie, de tipul PLG42, produs de Po Ly Gim Machinery Co., Ltd., Tongluo, Taiwan, cu puterea de 5,5 kW (7,5 cai putere), echipat cu un sistem de control FANUC Oi Mate-TC, cu trei bacuri hidraulice de prindere, aflat în patrimoniul departamentului de Inginerie și Management Industrial.



Fig. 7.1 - Strungul CNC utilizat la experimente

Piesele utilizate în teste au fost sub formă de bară dreaptă din oțel AISI D2 (DIN 1.2379, BOHLER K110, standard german DIN X155CrVMo121), având diametrul de 50 mm și lungimea de 145 mm. Mostrele au fost călite și revenite, rezultând o duritate de  $55 \pm 2$  HRC. Acest oțel este un oțel de sculărie, bogat în carbon și crom, cu duritate mare, rezistență ridicată la uzură după tratamentul termic, cu bună stabilitate dimensională, călibilitate puternică și rezistență la coroziune și este utilizat foarte des la fabricarea poansoanelor, matrițelor, dispozitive de lustruire, calibre și alte tipuri de scule/dispozitive de sculărie. Duritatea mare a acestui oțel și conținutul ridicat de crom conduce la uzura rapidă a sculei, de aceea îl face potrivit pentru cercetare.

Toate mostrele (figura 7.3) au fost degroșare pentru evitarea erorilor de formă, au fost canelate (canal de 3 mm lățime pe o adâncime de 2 mm, din 30 în 30 de mm) pentru o ieșire lină a sculei, iar ulterior au fost debitate prin procedeul de debitare cu jet abraziv. Au rezultat astfel un număr dublu de mostre, primele de aproximativ 63 mm lungime, iar restul de aproximativ 82 mm lungime. Prelucrările s-au realizat pe suprafețele cu lungime de 30 mm, pentru a elimina influența vibrațiilor.

Duritatea mostrelor a fost măsurată cu un durimetru Sauter HMM fabricat de Kern & Sohn, Balingen-Frommern, Germania. Valorile obținute sunt prezentate în tabelul 7.1, iar modul de lucru este prezentat în figurile 7.5 - 7.7. Duritatea a fost măsurată atât pe piese neagră (nedegroșată) cât și albă (degroșată) în 3 puncte (figura 7.7). Diferența dintre cea mai mică și cea mai mare duritate a fost de 2 unități HRC.



Fig. 7.7- Măsurarea durității în 3 puncte

Compoziția chimică a oțelului este prezentată în tabelul 7.2.

Tabel 7.2 - Compoziția chimică a oțelului AISI 2D (%)

| C    | Si   | Mn   | P     | S       | Cr   | Mo   | Ni   | V    | Cu   |
|------|------|------|-------|---------|------|------|------|------|------|
| 1,57 | 0,28 | 0,29 | 0,022 | <0,0003 | 11,4 | 0,74 | 0,23 | 0,74 | 0,08 |

Uleiul de porumb este obținut din germeni de porumb prin extracție sau presare și este alcătuit din acizi grași saturați în proporție de 14,3% (în special acid palmitic) și acizi grași nesaturați în proporție de 85,7% (în special acid oleic și linoleic) [SAB,05]. Este în general ieftin și are o vâscozitate mai mică decât uleiurile de soia, rapiță sau floarea soarelui care au fost studiate, cercetate, ca lubrifianți și care se regăsesc în aplicații industriale sub diferite forme. Caracteristicile fizico-chimice ale uleiului de porumb [FAS,01] [NOU,01][SAH,20] sunt prezentate în tabelul 7.3:

Tabel 7.3 - Caracteristicile fizico-chimice ale uleiului de porumb

| Caracteristici                          | Unitate de măsură | Interval temperatură |       |             |       |       |
|---|-------------------|----------------------|-------|-------------|-------|-------|
|   |                   | 22°C                 | 35°C  | 50°C        | 80°C  | 160°C |
| Vâscozitate dinamică                    | [mPa·s]           | 53-59                | 31-37 | 22-23       | 11-12 |       |
| Vâscozitate cinematică la 40°C          | cST               |                      |       | 28          |       |       |
| Căldură specifică                       | [kJ/kg·K]         | -                    | 1,673 | -           | 1,783 | 2,021 |
| Punct de aprindere                      | °C                |                      |       | 234         |       |       |
| Indice de aciditate                     | mg KOH/g          |                      |       | 0,6         |       |       |
| Indicele de saponificare                | mg KOH/g          |                      |       | 187-195     |       |       |
| Densitate relativă (20°C/ apă la 20 °C) | -                 |                      |       | 0,917-0,925 |       |       |

Experimentele s-au desfășurat în două părți. În prima parte experimentele au vizat analiza influenței modului de lubrifiere asupra rugozităților suprafeței, iar în a doua parte experimentele au vizat analiza influenței modului de lubrifiere asupra uzurii sculei, la prelucrarea dură cu plăcuță aşchiitoare ceramică.

Este bine cunoscut faptul că strunjirea dură necesită unghi de degajare negativ al ansamblului cuțit-plăcuță aşchiitoare și microgeometrie a muchiei aşchiitoare principale cu teșire, rază sau ambele și mașină-unealtă foarte rigidă capabilă să compenseze distorsiuni termice ale pieselor [GRZ,03]. În acest sens, pentru experimente a fost selectată o plăcuță aşchiitoare ceramică negativă (cu unghi de aşezare de 0°) de tipul CNGA 120412 T01020WG, sort CC650, cu geometrie a vârfului de tip Wiper și rază la colț  $r=1,2$  mm, alcătuită din ceramică mixtă (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> și TiN/TiCN) și recomandată pentru finisarea cu viteză mare a fontei cenușii și a oțelurilor dure, fabricată de Sandvik Coromant, Sandviken, Suedia. Muchia aşchiitoare principală a fost realizată pentru aplicații de strunjire dură, rezultând o teșire de 0,1 mm x 20°. Suportul de plăcuță (cuțitul de strung) a fost de tipul PCLNL 20x20 produs tot de Sandvik. Din ansamblul plăcuță aşchiitoare-suport a rezultat următoarea geometrie: unghi de aşezare  $\alpha$  de 6°, unghi de degajare  $\gamma$  de -6°, unghi de înclinare  $\lambda$  de -6° și unghi de atac principal  $\kappa$  de 95°. Unghiul de degajare efectiv  $\gamma_{ef}$  a fost de -26° (-20° al teșirii plăcuței aşchiitoare și -6° al suportului de cuțit). Parametrii de aşchiere au fost selectați pe baza recomandărilor oferite de producătorul sculelor și propriei experiențe din domeniul industrial. Viteza de aşchiere  $V_a$  a fost



setată la 120, 150 și 180 m/min, iar avansul de lucru s a fost setat la 0,15, 0,2 și 0,25 mm/rot. Adâncimea de aşchiere a fost menţinută constantă la toate experimentele având valoarea t 0,2 mm.

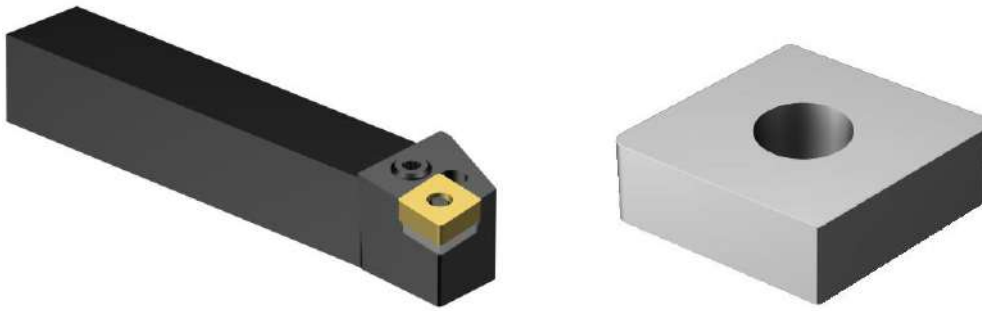


Fig. 7.8 - Cutitul de strung de tipul PCLNL 20x20 (stânga) și plăcuța ceramică (dreapta). Adaptare după [SAN,01]

Sistemul de lubrifiere cu cantitate minimă de lubrifianț a fost realizat într-un mod asemănător cu cel dezvoltat în lucrarea lui Islam ș.a. [ISL,01] și constă în pistol de pulverizat (vopsit) cu recipient pentru soluție (în cazul nostru ulei vegetal), suport magnetic flexibil pentru susținere, compresor de aer, regulator de presiune, furtune pneumatice și coliere de oțel pentru rigiditate. Reprezentarea schematică și fizică sunt prezentate în figurile 7.9 și 7.10.

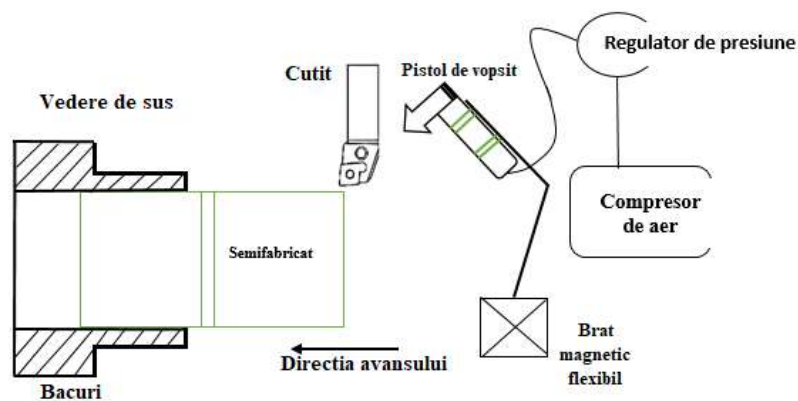


Fig 7.9- Reprezentarea schematică a sistemului

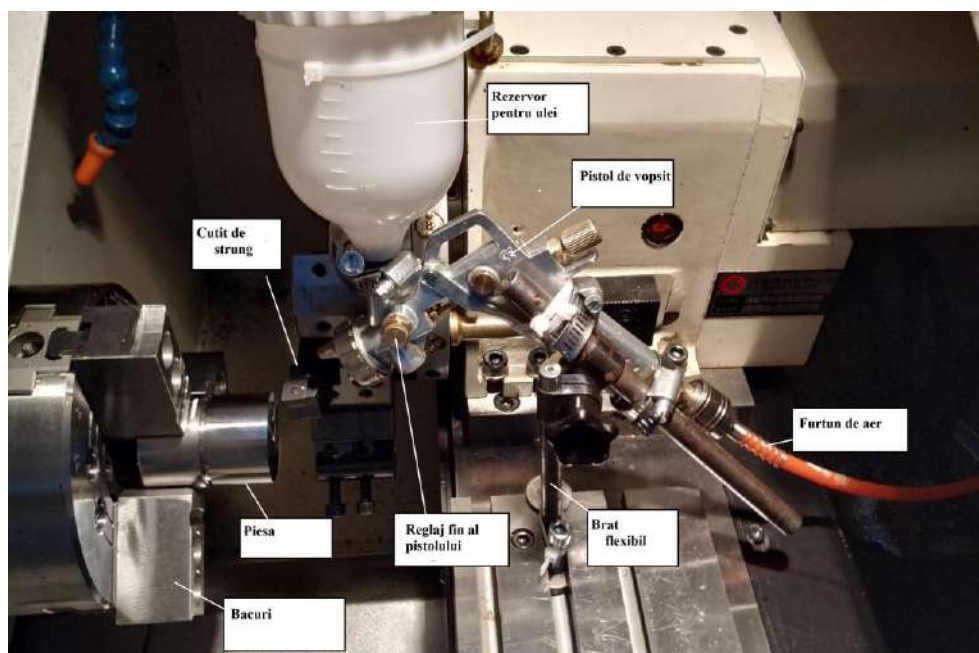


Fig 7.10 - Sistemul de prelucrare și lubrifiere

Presiunea de aer a fost setată în regulator la 4 bari (0.4 MPa), iar rata de pulverizare (debitul) la 50 mL/h. Rata de pulverizare a fost setată cu ajutorul regulatorului de pe dispozitiv și cu ajutorul unei seringi de 5 mL. S-au turnat câte 5 mL în rezervor și s-a cronometrat timpul de pulverizare, până la realizarea reglajului.

Dispozitivul de lubrifiere (pistolul) a fost înclinat la aproximativ 30° comparativ cu față de degajare a pastilei, la o distanță de aproximativ 35–40 mm, iar direcția a fost ajustată astfel încât lichidul să ajungă în interfața sculă-piesă, pe fața de degajare a sculei spre vârful pastilei.

Rugozitatea suprafeței a fost măsurată cu un rugozimetru Rugosurf 10G/ TESA (figura 7.9), fabricat de TESA SA, Renens, Elveția, cu filtru Gaussian, lungime cut-off (lungime de undă de tăiere)  $\lambda_c$  de 0.8 (lungime de evaluare 4 mm). După prima trecere/prelucrare, rugozitatea a fost măsurată în trei puncte, la aproximativ 120°, iar valoarea medie a fost înregistrată, iar după fiecare din următoarele trei replici, rugozitatea a fost măsurată într-un singur punct, iar valorile înregistrate. Rugozitățile  $R_a$ ,  $R_a$  și  $R_{pk}$  au fost înregistrate și analizate.

Pentru a doua parte a experimentelor aceeași parametri de așchiere, același suport de cuțit, aceeași parametri pentru lubrifiere cu CML au fost aleși pentru comparație. Durabilitatea sculei a fost măsurată având la bază criteriul uzurii flancului. Uzura sculei a fost măsurată după un anumit număr de minute de așchiere (conform capitol 7.1), până când uzura flancului a atins valoarea  $V_b = 0,3$  mm. Uzura sculei a fost măsurată cu un microscop optic de tipul VMS-001 (figura 7.17) fabricat de Veho, Southampton, Anglia, cu mărire de 20–200  $\times$ , 1,3 MP și rezoluție de până la 1280  $\times$  960, în timp ce rugozitatea  $R_a$  a fost măsurată cu același rugozimetru. Viteza de așchiere și avansul au fost constante pe toată durata experimentului și au fost stabilite la 180 m/min, respectiv 0,1 mm/rot, întrucât acești parametri au generat cele mai bune valori ale rugozității în prima etapă a experimentelor.

Tabel 7.4 - Parametrii de proces la primul experiment

| Parametrii la strunjire    | Nivel 1 | Nivel 2        | Nivel 3 |
|----------------------------|---------|----------------|---------|
| Viteză de așchiere [m/min] | 120     | 150            | 180     |
| Avans [mm/rot]             | 0,1     | 0,15           | 0,2     |
| Tip de lubrifiere          | Uscat   | Ulei de porumb | -       |
| Adâncime de așchiere [mm]  | 0,1     |                |         |

Condițiile experimentale, pentru primul test, sunt rezumate în tabelul 7.3:

Tabel 7.5 - Condițiile experimentale

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Mașina utilizată           | Polygym PLG42 5.5 kW (7.5 HP)                 |
| Materialul piesei          | AISI D2 (DIN 1.2379, DIN X155CrVMo121)        |
| Diametru și lungime        | Ø50x30 mm                                     |
| Lungimea așchiată          | 30 mm   |
| Cuțit de strung            | PCLNL2020K12                                  |
| Plăcuță așchietoare        | CNGA 120412 T01020WG, tip CC650, wiper        |
| Condiții de lubrifiere     | 4 bari (0.4 MPa), rată de pulverizare 50 mL/h |
| Variabile răspuns măsurate | $R_a$ , $R_z$ , $R_{pk}$                      |

## 7.2.2 Rezultatele primului experiment

Testul a fost realizat cu scopul de a identifica influența avansului ( $s$ ), vitezei de aşchiere ( $V_a$ ) și a metodei de lubrifiere (Lub.) asupra rugozității. Tabelul 7.6 prezintă rezultatele experimentale, respectiv valorile rugozităților  $R_a$ ,  $R_z$  și  $R_{pk}$  pentru toate combinațiile de factori ( $s$ ,  $V_a$  și Lub.) și trei replici pentru confirmarea experimentelor. Rezultatele arată că valorile rugozității  $R_a$  se situează în intervalul 0,151-0,452  $\mu\text{m}$ , ale rugozității  $R_z$  intervalul 0,887 - 2,534  $\mu\text{m}$ , iar ale rugozității  $R_{pk}$  în intervalul 0,261 - 1,049  $\mu\text{m}$ . Valorile obținute sunt asemănătoare și chiar mai bune decât valori obținute la operații clasice de finisare, precum rectificarea. Cele mai bune valori ale rugozităților  $R_a$  și  $R_{pk}$ , 0,151 respectiv 0,261  $\mu\text{m}$  au fost obținute la încercarea cu numărul 63, cu viteză de aşchiere de 180 m/min (cea mai mare), avans de 0,1 mm/rot (cel mai mic) și lubrifiere cu ulei (a doua replică a categoriei), în timp ce cea mai bună rugozitate  $R_z$  de 0,887  $\mu\text{m}$  a fost obținută cu aceiași parametri, la încercarea cu numărul 64, a treia replică a categoriei. Cele mai slabe valori s-au înregistrat la a treia categorie de experimente, când s-a utilizat viteză de aşchiere de 120 m/min (cea mai mică), avans de 0,2 mm/rot (cel mai mare) și prelucrare uscată, rugozitatea  $R_a$  înregistrând valoarea de 0,452  $\mu\text{m}$  la prima replică, iar rugozitățile  $R_z$  și  $R_{pk}$  înregistrând valorile de 2,534  $\mu\text{m}$  respectiv 1,049  $\mu\text{m}$  la experimentul inițial.

Tabel 7.6 - Rezultatele experimentelor

| Încercare | Parametri de intrare |       |       | Ieșiri/răspunsuri       |                         |                            |
|-----------|----------------------|-------|-------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|
|           | $V_a$                | Avans | Lub.  | $R_a$ ( $\mu\text{m}$ ) | $R_z$ ( $\mu\text{m}$ ) | $R_{pk}$ ( $\mu\text{m}$ ) |
| 1         | 120                  | 0.1   | Uscat | 0.270                   | 1.517                   | 0.442                      |
| 2         | 120                  | 0.1   | Uscat | 0.250                   | 1.420                   | 0.457                      |
| 3         | 120                  | 0.1   | Uscat | 0.263                   | 1.394                   | 0.455                      |
| 4         | 120                  | 0.1   | Uscat | 0.274                   | 1.564                   | 0.596                      |
| 5         | 120                  | 0.15  | Uscat | 0.256                   | 1.462                   | 0.429                      |
| 6         | 120                  | 0.15  | Uscat | 0.288                   | 1.527                   | 0.506                      |
| 7         | 120                  | 0.15  | Uscat | 0.311                   | 1.912                   | 0.594                      |
| 8         | 120                  | 0.15  | Uscat | 0.336                   | 2.056                   | 0.689                      |
| 9         | 120                  | 0.2   | Uscat | 0.413                   | 2.534                   | 1.049                      |
| 10        | 120                  | 0.2   | Uscat | 0.452                   | 2.321                   | 0.834                      |
| 11        | 120                  | 0.2   | Uscat | 0.399                   | 2.157                   | 0.693                      |
| 12        | 120                  | 0.2   | Uscat | 0.387                   | 2.113                   | 0.640                      |
| 13        | 150                  | 0.1   | Uscat | 0.240                   | 1.371                   | 0.429                      |
| 14        | 150                  | 0.1   | Uscat | 0.256                   | 1.540                   | 0.471                      |
| 15        | 150                  | 0.1   | Uscat | 0.233                   | 1.287                   | 0.422                      |
| 16        | 150                  | 0.1   | Uscat | 0.236                   | 1.314                   | 0.419                      |
| 17        | 150                  | 0.15  | Uscat | 0.282                   | 1.729                   | 0.478                      |
| 18        | 150                  | 0.15  | Uscat | 0.283                   | 1.843                   | 0.437                      |
| 19        | 150                  | 0.15  | Uscat | 0.337                   | 2.296                   | 0.650                      |
| 20        | 150                  | 0.15  | Uscat | 0.295                   | 1.897                   | 0.634                      |
| 21        | 150                  | 0.2   | Uscat | 0.284                   | 1.729                   | 0.532                      |
| 22        | 150                  | 0.2   | Uscat | 0.331                   | 1.881                   | 0.613                      |
| 23        | 150                  | 0.2   | Uscat | 0.291                   | 1.673                   | 0.572                      |
| 24        | 150                  | 0.2   | Uscat | 0.317                   | 1.847                   | 0.648                      |
| 25        | 180                  | 0.1   | Uscat | 0.205                   | 1.253                   | 0.319                      |
| 26        | 180                  | 0.1   | Uscat | 0.185                   | 1.073                   | 0.294                      |
| 27        | 180                  | 0.1   | Uscat | 0.194                   | 1.183                   | 0.321                      |

Tabel 7.6 - Continuare

| Încercare | Încercare |       |             | leşiri/răspunsuri    |                      |                       |
|-----------|-----------|-------|-------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
|           | Va        | Avans | Lub.        | Ra ( $\mu\text{m}$ ) | Rz ( $\mu\text{m}$ ) | Rpk ( $\mu\text{m}$ ) |
| 28        | 180       | 0.1   | Uscat       | 0.189                | 1.044                | 0.314                 |
| 29        | 180       | 0.15  | Uscat       | 0.239                | 1.359                | 0.372                 |
| 30        | 180       | 0.15  | Uscat       | 0.210                | 1.189                | 0.371                 |
| 31        | 180       | 0.15  | Uscat       | 0.271                | 1.723                | 0.629                 |
| 32        | 180       | 0.15  | Uscat       | 0.270                | 1.643                | 0.619                 |
| 33        | 180       | 0.2   | Uscat       | 0.398                | 1.830                | 0.791                 |
| 34        | 180       | 0.2   | Uscat       | 0.403                | 1.887                | 0.593                 |
| 35        | 180       | 0.2   | Uscat       | 0.383                | 1.774                | 0.389                 |
| 36        | 180       | 0.2   | Uscat       | 0.407                | 1.895                | 0.563                 |
| 37        | 120       | 0.1   | Ulei porumb | 0.245                | 1.451                | 0.439                 |
| 38        | 120       | 0.1   | Ulei porumb | 0.211                | 1.215                | 0.337                 |
| 39        | 120       | 0.1   | Ulei porumb | 0.232                | 1.295                | 0.455                 |
| 40        | 120       | 0.1   | Ulei porumb | 0.233                | 1.409                | 0.362                 |
| 41        | 120       | 0.15  | Ulei porumb | 0.257                | 1.578                | 0.438                 |
| 42        | 120       | 0.15  | Ulei porumb | 0.286                | 1.453                | 0.439                 |
| 43        | 120       | 0.15  | Ulei porumb | 0.253                | 1.516                | 0.423                 |
| 44        | 120       | 0.15  | Ulei porumb | 0.250                | 1.778                | 0.373                 |
| 45        | 120       | 0.2   | Ulei porumb | 0.306                | 1.530                | 0.520                 |
| 46        | 120       | 0.2   | Ulei porumb | 0.315                | 1.646                | 0.533                 |
| 47        | 120       | 0.2   | Ulei porumb | 0.311                | 1.635                | 0.548                 |
| 48        | 120       | 0.2   | Ulei porumb | 0.382                | 2.302                | 0.750                 |
| 49        | 150       | 0.1   | Ulei porumb | 0.233                | 1.345                | 0.404                 |
| 50        | 150       | 0.1   | Ulei porumb | 0.213                | 1.239                | 0.411                 |
| 51        | 150       | 0.1   | Ulei porumb | 0.227                | 1.376                | 0.418                 |
| 52        | 150       | 0.1   | Ulei porumb | 0.215                | 1.221                | 0.425                 |
| 53        | 150       | 0.15  | Ulei porumb | 0.208                | 1.240                | 0.314                 |
| 54        | 150       | 0.15  | Ulei porumb | 0.236                | 1.222                | 0.403                 |
| 55        | 150       | 0.15  | Ulei porumb | 0.251                | 1.285                | 0.407                 |
| 56        | 150       | 0.15  | Ulei porumb | 0.268                | 1.337                | 0.444                 |
| 57        | 150       | 0.2   | Ulei porumb | 0.266                | 1.573                | 0.478                 |
| 58        | 150       | 0.2   | Ulei porumb | 0.269                | 1.488                | 0.502                 |
| 59        | 150       | 0.2   | Ulei porumb | 0.277                | 1.604                | 0.502                 |
| 60        | 150       | 0.2   | Ulei porumb | 0.271                | 1.563                | 0.400                 |
| 61        | 180       | 0.1   | Ulei porumb | 0.154                | 0.959                | 0.261                 |
| 62        | 180       | 0.1   | Ulei porumb | 0.163                | 0.976                | 0.296                 |
| 63        | 180       | 0.1   | Ulei porumb | 0.151                | 1.005                | 0.261                 |
| 64        | 180       | 0.1   | Ulei porumb | 0.154                | 0.887                | 0.280                 |
| 65        | 180       | 0.15  | Ulei porumb | 0.210                | 1.311                | 0.321                 |
| 66        | 180       | 0.15  | Ulei porumb | 0.192                | 1.169                | 0.318                 |
| 67        | 180       | 0.15  | Ulei porumb | 0.237                | 1.421                | 0.391                 |
| 68        | 180       | 0.15  | Ulei porumb | 0.233                | 1.386                | 0.379                 |
| 69        | 180       | 0.2   | Ulei porumb | 0.350                | 2.073                | 0.655                 |
| 70        | 180       | 0.2   | Ulei porumb | 0.378                | 2.191                | 0.623                 |
| 71        | 180       | 0.2   | Ulei porumb | 0.330                | 2.043                | 0.460                 |
| 72        | 180       | 0.2   | Ulei porumb | 0.359                | 2.112                | 0.550                 |

## 7.2.4 Analiza statistică a datelor experimentale

### 7.2.4.1 Analiza efectelor medii

Figura 7.54 prezintă diagramele efectelor medii pentru  $R_a$ ,  $R_z$  și  $R_{pk}$ . Graficele indică faptul că creșterea vitezei de aşchiere conduce la o rugozitate mai bună, în special la  $R_z$  și  $R_{pk}$ , creșterea avansului la rugozitatea cea mai slabă în toate cazurile și utilizarea lubrifierii cu CML asistată de ulei vegetal îmbunătățește rugozitatea suprafeței. După cum se știe în teorie, avansul este cel mai important parametru care influențează rugozitatea; creșterea avansului înrăutățește semnificativ rugozitatea suprafeței. Al doilea parametru pare să fie metoda de lubrifiere, în timp ce viteza de aşchiere este mai puțin importantă în această ecuație. O concluzie importantă care se poate trage din aceste diagrame este că lubrifierea cu CML asistat de ulei de porumb duce la îmbunătățirea calității suprafeței. Prin urmare ipoteza 1 este confirmată.

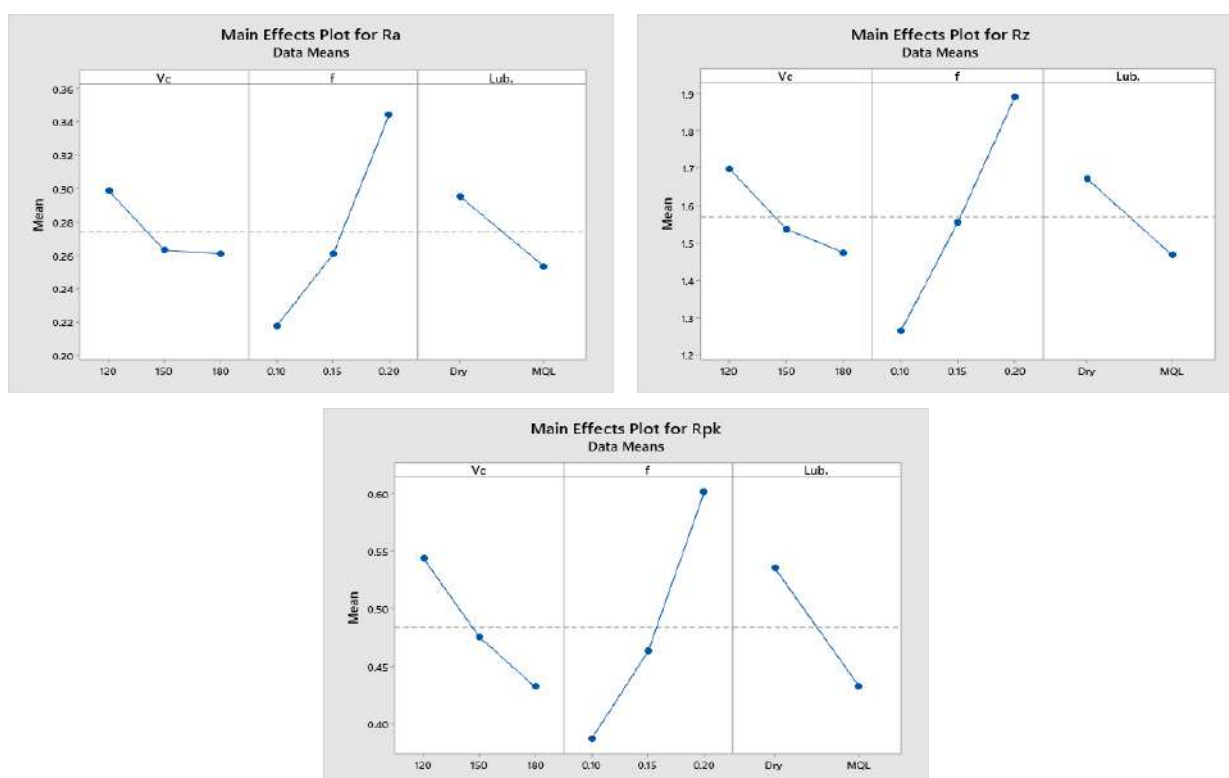


Fig. 7.54 - Diagramele efectelor medii pentru  $R_a$ ,  $R_z$  și  $R_{pk}$

### 7.2.4.2 Analiza de varianță (ANOVA)

Analiza dispersională sau analiza de varianță (ANOVA) pentru rugozitățile suprafeței  $R_a$ ,  $R_z$  și  $R_{pk}$  a fost realizată cu ajutorul softului MINITAB V.19, pentru a identifica care dintre parametrii de intrare au semnificație statistică asupra caracteristicilor măsurate.

Analiza a fost efectuată la un nivel de semnificație de 0,05, ceea ce înseamnă un interval de încredere de 95%. În tabelele 7.7, 7.8 și 7.9, sunt prezentate rezultatele analizei de varianță. Sursa de variație cu o valoare P mai mică de 0,05 este considerată a avea semnificație statistică pentru răspunsuri (rugozități). Penultima coloană a tabelor prezintă valoarea P și în toate cazurile este mai mică de 0,05 (nivel de semnificație), ceea ce înseamnă că toți cei trei parametri și anume viteza de aşchiere ( $V_a$ ), avansul ( $s$ ) și metoda de lubrifiere (Lub.) au semnificație statistică pentru toate cele trei tipuri de

rugozităţi. Avansul este parametrul cel mai important, care influenţează în cea mai mare măsură rugozitatea. Acesta este urmat de metoda de lubrifiere şi viteza de aşchiere.

Tabel 7.7 - Rezultatele analizei de varianţă (ANOVA) pentru Ra

| Source       | DF        | SS             | MS       | F     | P     | Observaţie   |
|--------------|-----------|----------------|----------|-------|-------|--------------|
| Va           | 2         | 0.02202        | 0.011010 | 9.18  | 0.000 | Semnificativ |
| s            | 2         | 0.20085        | 0.100423 | 83.72 | 0.000 | Semnificativ |
| Lub.         | 1         | 0.03175        | 0.031752 | 26.47 | 0.000 | Semnificativ |
| Error        | 66        | 0.07916        | 0.001199 |       |       |              |
| <b>Total</b> | <b>71</b> | <b>0.33378</b> |          |       |       |              |

Tabel 7.8 - Rezultatele analizei de varianţă (ANOVA) pentru Rz

| Source       | DF        | SS            | MS      | F     | P     | Observaţie   |
|--------------|-----------|---------------|---------|-------|-------|--------------|
| Va           | 2         | 0.6462        | 0.32309 | 6.38  | 0.003 | Semnificativ |
| s            | 2         | 4.7342        | 2.36710 | 46.71 | 0.000 | Semnificativ |
| Lub.         | 1         | 0.7614        | 0.76143 | 15.03 | 0.000 | Semnificativ |
| Error        | 66        | 3.3443        | 0.05067 |       |       |              |
| <b>Total</b> | <b>71</b> | <b>9.4862</b> |         |       |       |              |

Tabel 7.9 - Rezultatele analizei de varianţă (ANOVA) pentru Rpk

| Source       | DF        | SS            | MS       | F     | P     | Observaţie   |
|--------------|-----------|---------------|----------|-------|-------|--------------|
| Va           | 2         | 0.1528        | 0.076419 | 8.33  | 0.001 | Semnificativ |
| s            | 2         | 0.5682        | 0.284121 | 30.98 | 0.000 | Semnificativ |
| Lub.         | 1         | 0.1892        | 0.189181 | 20.63 | 0.000 | Semnificativ |
| Error        | 66        | 0.6053        | 0.009171 |       |       |              |
| <b>Total</b> | <b>71</b> | <b>1.5155</b> |          |       |       |              |

Toţi cei trei parametri sunt semnificativi statistic pentru rugozitatea suprafeţei. Avansul (s) este cel mai important parametru care influenţează rugozitatea suprafeţei. Viteza de aşchiere şi metoda de lubrifiere au, de asemenea, semnificaţie statistică. Astfel, se confirmă ipoteza 2 şi anume, uleiul de porumb la strunjirea dură asistată de lubrifierea cu CML este un parametru semnificativ pentru rugozitatea suprafeţei. Rezultatele sunt în concordanţă cu obiectivele stabilite iniţial şi confirmă că strunjirea dură asistată de lubrifierea cu CML cu uleiuri vegetale îmbunătăţeşte calitatea suprafeţei în comparaţie cu aşchiera uscată.

## 7.2.5 Rezultatele celui de al doilea experiment - uzura sculei, deviaţiile de formă şi integritatea suprafeţelor

### 7.2.5.1 Analiza uzurii sculei

În operaţiile de aşchiere, datorită frecării, a cantitate mare de căldură este generată în zona de tăiere. Cea mai mare parte din ea, aproximativ 80%, este disipată prin intermediul aşchiei, iar restul este preluată de piesă şi sculă, în funcţie de conductivitatea termică, ceea ce înseamnă că deteriorări ale suprafeţei, alterarea preciziei dimensionale şi de formă, precum şi uzura rapidă a sculei, pot apărea. Reducerea cantităţii de căldură sau îmbunătăţirea transferului de căldură către aşchie, conduc la o calitate a suprafeţei mai bună, o durabilitate a sculei mai mare şi control mai bun al procesului.



Lubrifierea cu cantitate minimă de lubrifiant și ulei vegetal contribuie la reducerea frecării, a temperaturii din zona de așchiere și a căldurii generate și la îmbunătățirea transferul de căldură datorită capacității de lubrifiere, abilității de a îndepărta așchiile din zona de lucru (datorită fluxului de aer) și capacității de a menține contactul cu suprafața solidă (umectare) [PAU,01][HEI,01][OZB,01]. Aplicarea amestecului de ulei-aer la presiune mare în zona de așchiere conduce la răcire și lubrifiere optimă [PAU,01][HEI,01][ELM,01][OZB,01].

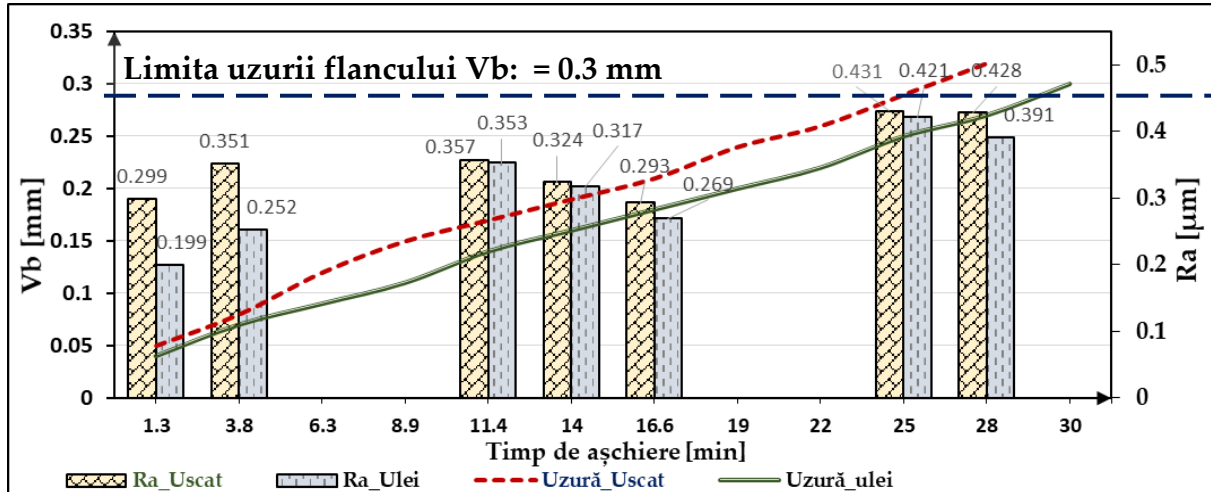


Fig. 7.87 - Evoluția uzurii sculei și rugozitatea Ra aferentă

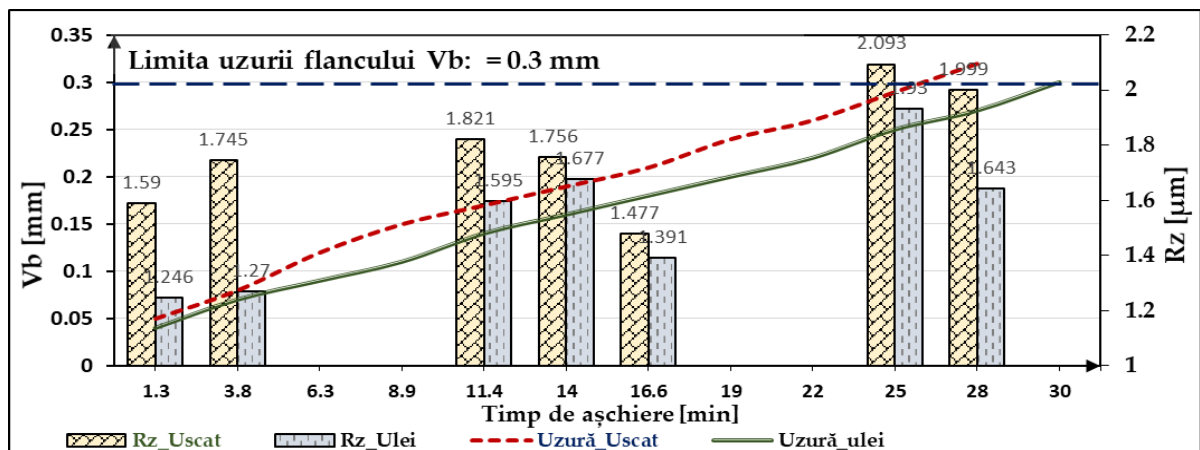


Fig. 7.88 - Evoluția uzurii sculei și rugozitatea Rz aferentă

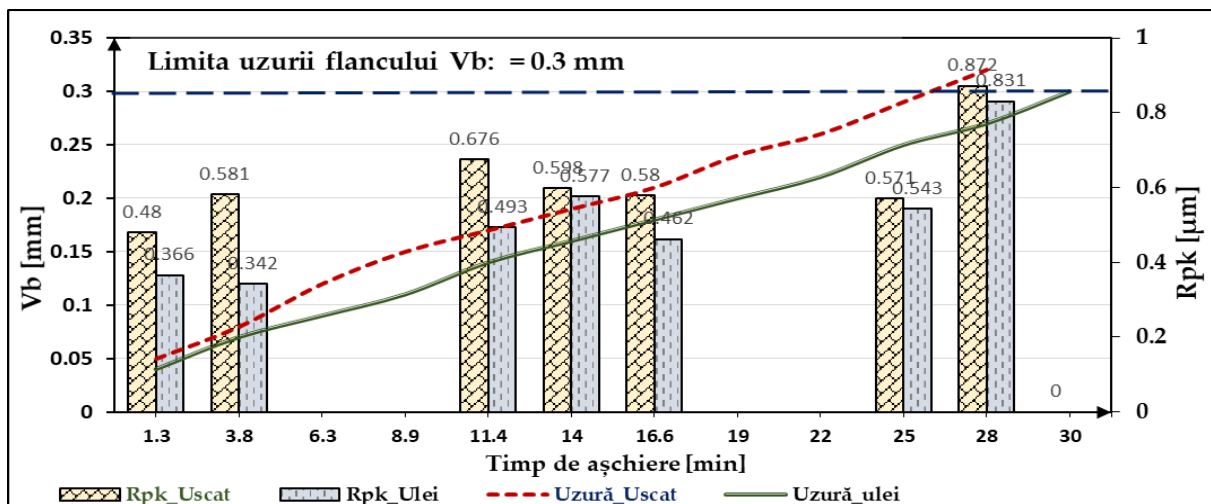


Fig. 7.89 - Evoluția uzurii sculei și rugozitatea Rpk aferentă



Uzura flancului este principalul tip de uzură care se regăseşte la plăcuţele aşchietoare pentru strunjire dură. Întrucât în experimente au fost utilizate plăcuţe aşchietoare ceramice, uzura crater nu este accentuată, ci ușor vizibilă și doar în zona microgeometriei muchiei (teşirii), datorită stabilităţii chimice excelente care îi conferă rezistentă la difuzie [TON,01]. Uzura observată în experimente este în special uzura flancului care apare datorită fenomenului de abraziune cauzată de particulele dure din piesă. În figurile 7.87 - 7.89 este prezentă evoluţia uzurii sculei în timp, raportată la timpul de aşchiere, de bază, și rugozităţile aferente ( $R_a$ ,  $R_z$  și  $R_{pk}$ ). În cazul  $R_a$ , după primele minute de aşchiere, valorile rugozităţii sunt mult mai bune la lubrifiere comparativ cu aşchiera uscată, adică o îmbunătăţire de aproximativ 30%. Pe măsura ce uzura creşte, diferenţa scade la 8% după 16,6 minute de aşchiere, respectiv 9% după 28 minute. Aşa cum am menţionat anterior, aplicând lubrifierea cu cantitate minimă de lubrifian şi ulei de porumb la strunjirea dură, îmbunătăţim performanţa procesului. Datorită proprietăţilor excelente anti-fricţiune și anti-uzură ale uleiului de porumb și a filmului de lubrifiere puternic creat, uzura sculei a fost redusă la minimum și calitatea suprafeţii a fost îmbunătăţită pe parcursul experimentului [ARS,06]. Durabilitatea sculei, măsurată atunci când uzura flancului  $V_b$  a atins valoare de 0,3 mm, a fost la aşchiera uscată de 25,5 minute (0,32 după 28 minute de prelucrare) și de 30 de minute când lubrifierea a fost aplicată.

După 14 minute de aşchiere, uzura flancului măsurată în aşchiera uscată a fost de 0,19 mm, în timp ce la lubrifierea cu ulei a fost de 0,16 mm. Nu s-au observat deteriorări premature, precum ciobire sau rupere, în acest punct. Aplicând ulei de porumb la strunjirea dură a oţelului AISI D2, durata de viaţă a sculei a fost îmbunătăţită cu 15,8% după 14 minute de aşchiere.

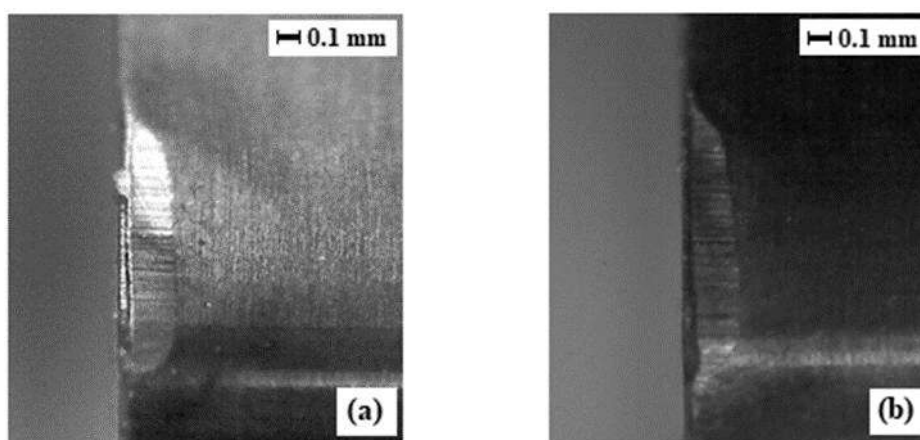


Fig. 7.92 - Uzura flancului la prelucrarea uscată (a) și cu CML (b), după 14 minute de aşchiere

În figurile 7.95 și 7.96, sunt prezentate uzurile sculelor după 28 minute de aşchiere, la prelucrarea uscată (fig. 7.96) și cu CML (fig. 7.95). Când este utilizată lubrifierea, uzura flancului este normală, uniformă. Sunt prezente mici particule lipite/aderate pe faţa de degajare (adeziune) și o mică ciobitură este observată la intersecţia muchiilor. Astfel, datorită efectului anti-uzură și de lubrifiere și răcire a uleiului și a capacităţii amestecului ulei-aer de a elimina microparticulele, abraziunea sculei atunci când se aplică ulei este mai mică decât în prelucrarea uscată. Pelicula de ulei poate fi o barieră pentru microparticulele dure din piesă care provoacă abraziunile flancului [ARS,06].

Valorile rugozităţilor obţinute după 28 de minute sunt:  $R_a = 0,391$ ,  $R_z = 1,643$  și  $R_{pk} = 0,831$   $\mu\text{m}$ . La aşchiera uscată, ciobire și adeziune excesivă pot fi observate după 28 minute de aşchiere. Valorile rugozităţilor obţinute după 28 minute sunt:  $R_a = 0,428$ ,  $R_z = 1,999$  și  $R_{pk} = 0,872$   $\mu\text{m}$ . Lipsa răcirii și

lubrifierii conduc la o cantitate mai mare de căldură, temperatură mai mare, favorizând difuzia și adeziunea. În figura 7.96 observăm pe lângă abraziune abraziune, prezența materialului aderat pe fața de degajare, ciobitură mare și uzură crater mai pronunțată datorită cantității mai mari de căldură generată în timpul aşchierii. Concluzionăm astfel că, căldură generată în aşchiera uscată și lipsa lubrifierii au afectat într-un mod negativ muchia aşchietoare, pe când în cazul lubrifierii, uleiul de porumb aplicat pe fața de degajare a îmbunătățit lubrifierea și răcirea în interfața sculă-piesă, păstrând astfel o calitate bună a muchiei.

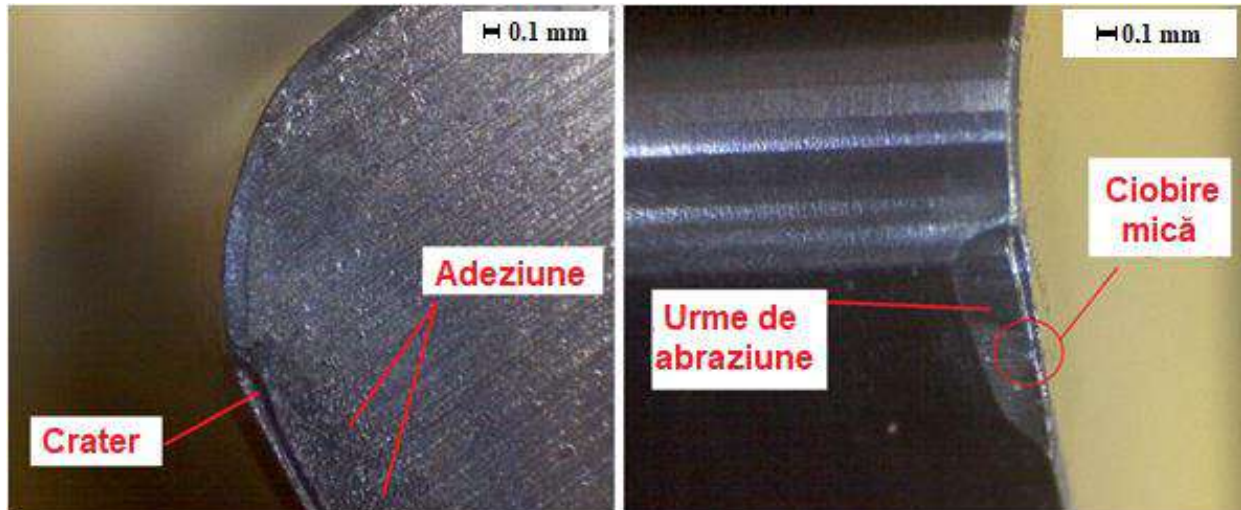


Fig. 7.95 - Uzura sculei la prelucrarea cu CML după 28 minute de aşchiere

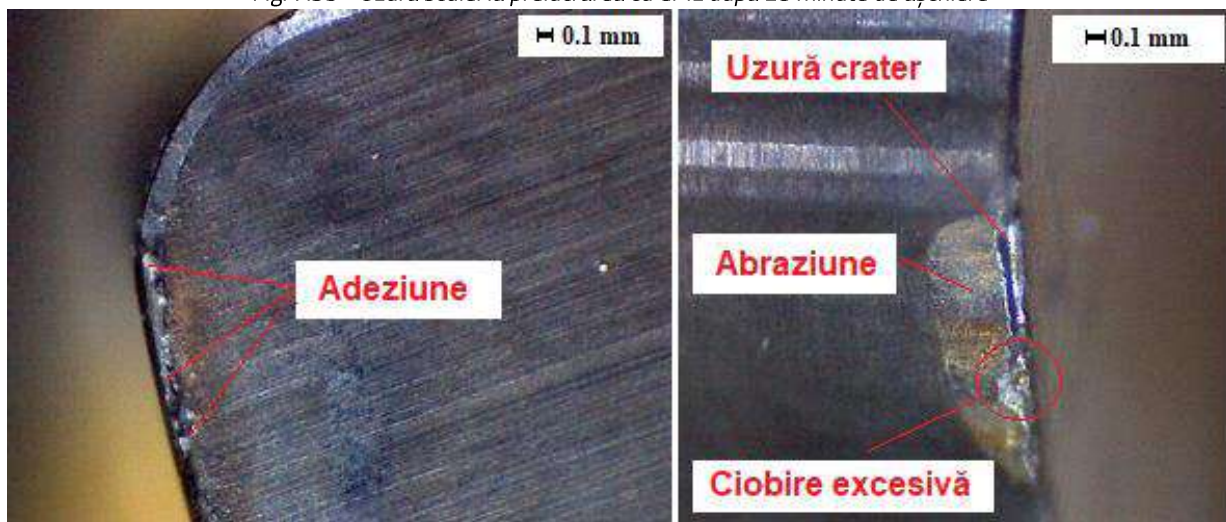


Fig. 7.96 - Uzura sculei la prelucrarea uscată după 28 minute de aşchiere

Considerând cele amintite mai sus, ipoteza 3 este astfel confirmată și anume, uzura sculei la strunjirea dură cu CML și ulei de porumb este mai mică decât la aşchiera uscată.

Plăcuțele aşchietoare ceramice reprezintă o alternativă viabilă la plăcuțele foarte scumpe cu NCB, pentru operația de strunjire dură de finisare. Întrucât după 28 minute de aşchiere suprafața rezultată prezintă o calitate foarte bună, rugozitate  $R_a$  mai mică de  $0,4 \mu\text{m}$ , implementarea și utilizarea industrială a strunjirii dure pentru înlocuirea rectificării este posibilă.

### 7.2.5.2 Analiza abaterilor de formă și a rugozităților Rsk și Rku

Pentru a întări capabilitatea procesului de strunjire dură, ca alternativă mai ecologică la rectificarea, s-au măsurat, la mostrele pe care s-a urmărit durabilitatea sculei, atât la prelucrarea uscată cât și la cea cu ulei de porumb, rugozitățile Rsk și Rku și abaterile de formă, precum circularitatea și liniaritatea.

Rugozitățile au fost măsurate cu ajutorul echipament de măsurare a rugozității și conturului de tip MarSurf VD 280, în timp ce abaterile de formă au fost măsurate cu un echipament de măsurat forma de tip CNC automat, MMQ 44, ambele produse de Mahr GmbH, Göttingen, Germania, într-un laborator profesional de măsurători metrologice din Braşov, România.

În tabelul 7.49 sunt prezentate aceste măsurători.

Tabel 7.49 - Măsurători ale mostrelor cu privire la rugozități și abateri de formă

| Rugozitate/<br>Abatere de formă | Mostra 1 -<br>8,9 min. de aşchiere |        | Mostra 2 -<br>19 min. de aşchiere |        | Mostra 3 - durabilitate<br>atinsă |       |
|---------------------------------|------------------------------------|--------|-----------------------------------|--------|-----------------------------------|-------|
|                                 | Uscat                              | Ulei   | Uscat                             | Ulei   | Uscat                             | Ulei  |
|                                 | Rsk                                | -0,094 | -0,618                            | -0.838 | -0.077                            | 0.412 |
| Rku                             | 2,870                              | 2,584  | 3.578                             | 2.237  | 1.829                             | 2.127 |
| Circularitate                   | 2.72                               | 1.13   | 0.97                              | 0.94   | 2,89                              | 2,3   |
| Liniaritate                     | 1.44                               | 0.96   | 1.08                              | 0.91   | 0.87                              | 1.12  |

Precum aminteam în capitolul 3, cei doi parametri legați de rugozitatea suprafeței măsurate, factorul de asimetrie (Rsk) și factorul de aplatizare (Rku), influențează funcționalitatea și durata de viață a unei piese, în special cele supuse la solicitări mecanice mari, din punct de vedere al frecării, uzurii și capacității de lubrifiere [DAV,01][HAS,01].

Parametrul Rsk este foarte important pentru aplicațiile tribologice și controlul uzurii [DAV,01]. Valoarea pozitivă a parametrului indică o suprafață predominantă de vârfuri, pe când valoarea negativă indică o suprafață predominantă de văi, ce are capacitate mare de retenție a lubrifianților și comportare bună din punct de vedere al portanței [HAS,01][WAI,01]. Observăm că după 19 minute de aşchiere suprafețele prezintă în ambele experimente Rsk negativ. La finalul duratei de viață a plăcuței aşchietoare, în cazul lubrifierii valoare lui Rsk este mai apropiată de 0, mai mică decât în cazul strunjirii dure uscate.

Valoarea parametrului Rku descrie claritatea distribuției. Dacă valoarea lui Rku este mai mare ca 3 suprafața este dominată de vârfuri ascuțite, iar dacă este mai mică decât 3, vârfurile sunt „denivelate” [DAV,01]. După 19 minute de aşchiere, valoarea lui Rku este mai mică când lubrifierea este aplicată decât la aşchiera uscată. La finalul duratei de viață a plăcuței aşchietoare, în ambele cazuri valoare lui Rku a fost mai mică decât 3, iar colaborat cu valoarea lui Rpk, piesele strunjire dur cu lubrifiere cu ulei de porumb pot avea o durată de viață mai mare.

### 7.2.7 Concluzii

Cercetarea a fost realizată cu cerinţele producţiei ecologice, cu consecinţe favorabile atât din punct de vedere tehnic, cât şi economic. Aplicarea uleiului vegetal, i.e. uleiul de porumb, ca fluid de aşchiere este calea corectă către o producţie mai curată şi durabilă. Performanţa uleiului de porumb a fost investigată în ceea ce priveşte rugozitatea suprafeţei şi uzura sculei, pe oţel călit AIDI D2 cu plăcuţe cu microgeometrie de tip Wiper, fabricate din materiale ceramice. Următoarele concluzii pot fi trase din cercetare, respectiv capitolul 7:

- ✓ parametri optimi de aşchiere s-au dovedit a fi viteza de aşchiere cea mai mare, de 180 m/min şi avansul cel mai mic, de 0,1 mm/rot, atât la prelucrarea uscată cât şi cu lubrifianţ, la toate tipurile de rugozitate;
- ✓ valori ale rugozităţii Ra mai mici de 0,2 µm, Rz mai mici de 1 µm şi Rpk mai mici de 0,4 µm pot fi obţinute cu uşurinţă cu viteză de aşchiere de 180 m/min şi avans de 0,1 mm/rot;
- ✓ rugozitate a suprafeţei mai bună ca la rectificare poate fi obţinută la strunjirea dură cu plăcuţe de tip wiper;
- ✓ avansul de lucru (mm/rot) este cel mai important factor care influenţează rugozitatea suprafeţei, urmat de tipul de lubrifiere, iar ultimul factor fiind viteza de aşchiere. Toţi cei trei parametri de intrare sunt semnificativi statistic pentru rugozitatea suprafeţei;
- ✓ aplicând ulei de porumb ca lichid de aşchiere la strunjirea dură, rugozitatea Ra este îmbunătăţită cu o valoare cuprinsă între 8% şi 19%, rugozitatea Rz cu o valoare cuprinsă între 6% şi 16%, iar rugozitatea Rpk cu o valoare cuprinsă între 5% şi 18%, la viteză de aşchiere constantă;
- ✓ creşterea vitezei de aşchiere la strunjirea dură cu plăcuţe ceramice îmbunătăţeşte rugozitatea Ra cu 27%, Rz cu 23% şi Rpk cu 26% la aşchieria uscată, în timp ce dacă aplicăm lubrifierea cu CML şi ulei de porumb rugozitatea Ra este îmbunătăţită cu 32%, Rz cu 29%, iar Rpk cu 34%;
- ✓ în aşchieria uscată, rugozitatea Ra poate fi îmbunătăţită eficient cu 27%, în timp ce în lubrifierea cu CML cu 32% atunci când viteza de aşchiere este crescută;
- ✓ creşterea vitezei la strunjirea dură cu plăcuţe aşchietoare ceramice îmbunătăţeşte rugozitatea suprafeţei;
- ✓ la strunjirea dură uscată, Rz poate fi îmbunătăţită eficient cu 23%, în timp ce la lubrifierea cu CML cu 29% atunci când viteza de aşchiere este crescută;
- ✓ valorile Rz, în cazul strunjirii dure cu plăcuţe ceramice sunt de aproximativ şase ori mai mari decât valorile Ra ( $Rz \approx 6 \cdot Ra$ );
- ✓ datorită capacităţii uleiului de a pătrunde în interfaţa sculă-aşchie-piesa la prelucrarea cu CML, proprietăţilor anti-frecare, moleculelor de ulei care aderă pe suprafaţa metalului şi acizilor graşi saturaţi şi mononesaturaţi relativ mari, uleiul de porumb este capabil să creeze o peliculă, un film lubrifianţ rezistent în zona de aşchiere cu proprietăţi ridicate de lubrifiere care îmbunătăţeşte uzura sculei şi fineţea suprafeţei;
- ✓ modelele de regresie pătratică sunt mai puternice şi mai precise decât cele liniare la toate cazurile;
- ✓ uzura sculei este îmbunătăţită când uleiul de porumb este aplicat la strunjirea dură cu plăcuţe ceramice cu 17,6% comparative cu aşchieria uscată la acelaşi procedeu;
- ✓ uzura a sculei mai mică a fost observată la prelucrarea cu CML şi ulei de porumb comparativ cu aşchieria uscată;



- ✓ mecanismul principal de uzură observat a fost abraziunea. La aşchiera uscată, adeziune și ciobire excesivă au fost observate;
- ✓ durabilitatea sculei a atins 25,5 minute la aşchiera uscată, în timp ce la aşchiera cu lubrifiere durabilitatea atinsă a fost de 30 minute, la o uzură acceptabilă a flancului Vb de 0,3 mm;
- ✓ datorită efectului anti-uzură și de lubrifiere și răcire a uleiului și a capacității amestecului ulei-aer de a elimina microparticulele, abraziunea sculei atunci când se aplică ulei este mai mică decât în prelucrarea uscată;
- ✓ uleiul de porumb poate fi utilizat cu succes ca lichid de aşchiere la strunjirea dură întrucât duce la îmbunătățirea calității suprafeței;
- ✓ după 19 minute de aşchiere suprafețele prezintă în ambele experimente Rsk negativ;
- ✓ la finalul duratei de viață a plăcuței aşchietoare, în ambele cazuri valoarea lui Rku a fost mai mică decât 3, iar colaborat cu valoarea lui Rpk, piesele strunjire dur cu lubrifiere cu ulei de porumb pot avea o durată de viață mai mare;
- ✓ din punct de vedere al abaterilor de formă circularitățile măsurate au avut valori mai mici de 3  $\mu\text{m}$ , iar liniaritățile au avut valori mai mici de 2  $\mu\text{m}$ ;
- ✓ procesul de strunjire dură este capabil să genereze precizii ridicate și calități foarte bune ale suprafeței. Cerințele ridicate ale industriei construcțiilor de mașini de precizie cu privire la calitatea superioară și durată mare de viață ale pieselor călite pot fi atinse prin strunjire dură;
- ✓ integritatea suprafeței - utilizarea uleiului de porumb ca lubrifiant ajută la evitarea formării zonelor influențate termic;
- ✓ o creștere a avansului în intervalul 0,1 - 0,15 mm/rot poate fi ușor susținută pentru creșterea productivității fără să fie afectată excesiv finisarea suprafeței;
- ✓ plăcuțele aşchietoare ceramice reprezintă o alternativă viabilă la plăcuțele aşchietoare foarte scumpe cu NCB, pentru operația de strunjire dură de finisare;
- ✓ obiectivul fabricației ecologice când uleiul de porumb este utilizat, este realizabil în condiții economice.

## 8. CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII ORIGINALE. DISEMINAREA REZULTATELOR. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

### CONCLUZII FINALE

Managementul tehnologiilor, ca parte componentă, a unui sistem de producție, a devenit astăzi sursă de avantaj competitiv, strâns legată de inovație, operațiuni și strategie, precum și o cale sustenabilă de realizare de valoare adăugată.

Industria construcțiilor de mașini, dar nu doar ea, se confruntă astăzi nu numai cu provocările deja consacrate de a reduce costurile, de a crește productivitatea și calitatea produselor și de a diminua impactul asupra mediu înconjurător, ci și cu factori care până nu demult păreau greu de anticipat și prognozați, precum criza materiilor prime și a energiei, inflație ridicată, stare de război în estul Europei și migrație ridicată, iar pentru a face față acestor factori de influență, perturbatori și pentru a asigura funcționarea corespunzătoare a lanțurilor de aprovizionare, acestea trebuie să dezvolte și să implementeze continuu strategii inovatoare pentru optimizarea proceselor de fabricație. Cerințele de calitate din ce în ce mai ridicate, reglementările standardelor internaționale, precum și flexibilitatea sistemelor de producție și răspunsul rapid la schimbări completează acest tablou, iar managementul tehnologiilor face posibilă depășirea acestor provocări și contribuie la dezvoltarea durabilă a industriei. Un bun exemplu de management al tehnologiilor este înlocuirea rectificării cu strunjirea dură.

Procesul de aşchiere denumit strunjire dură este utilizat pe scară largă în industria construcțiilor de mașini și aşchierii materialelor tratate termic, ca alternativă la procesul de rectificare, datorită numeroaselor avantaje prezentate și demonstrate inclusiv în această lucrare și va mai fi mult timp de acum încolo un proces bine ancorat în strategiile tehnologice ale companiilor din domeniu.

Principalele avantaje ale strunjirii dure în fața rectificării, unele prezente în literatura de specialitate, iar altele dovedite în această lucrare, sunt următoarele:

- zona afectată termic este mai mică la strunjirea dură comparativ cu rectificarea;
- existența tensiunilor reziduale de compresiune;
- rata de îndepărtare a materialului mai mare ceea ce conduce la creșterea productivității;
- calitate a suprafeței cel puțin la fel de bună ( $Ra < 0,4 \mu m$ );
- reciclarea sculei și ale deșeurilor rezultate;
- prelucrarea ecologică, uscată sau cu CML.

Prin strunjire dură se obțin rugozități ale suprafeței cel puțin la fel de bune precum la rectificare. De asemenea alte caracteristici ale suprafeței, precum factorul de asimetrie sau factorul de aplatizare, pot fi obținute la strunjirea dură, similare sau mai bune decât la rectificare. Calitatea deosebită a suprafeței rezultate (iar aici amintim rugozitatea, forma, tensiunile reziduale, deformările plastice și influențele termice) fac din strunjirea dură un proces optim pentru creșterea duratei de viață a pieselor, în special prin rezistența la oboseală.

Cu toate acestea strunjirea dură nu poate înlocui rectificarea în toate aplicațiile. Există și situații în care prelucrarea cu o singură sculă nu este posibilă sau lungimea de aşchiere este foarte mare, cazuri în care pot apărea diferite probleme de calitate. Mai trebuie precizat faptul că există și câteva

provocări ale înlocuirii rectificării cu strunjirea dură, unele dintre acestea fiind prezentate și analizate în lucrarea de față. Astfel amintim:

- straturile albe (white layers);
- uzura sculei;
- suprafețele întrerupte;
- costurile procedului.

Straturile albe apar în special datorită transformărilor de fază, atunci când temperatura în zona de aşchiere depășește temperatura de austenizare, dar se pot forma și din cauza deformărilor plastice. Straturile albe nu sunt de dorit, iar din acest punct de vedere strunjirea dură are un avantaj major întrucât contactul dintre sculă și piesă se realizează într-un singur punct.

Uzura sculei este un factor negativ, atât pentru integritatea suprafeței cât și pentru costurile de proces. Progresele din punct de vedere al materialelor și acoperirilor sculelor aşchietoare au condus la creșterea durabilității sculelor, iar prin alegerea corectă a micro-geometriei și a materialului în raport cu condițiile economice și cerințele de prelucrare, durabilitatea poate fi crescută considerabil. De asemenea suprafețele întrerupte pot fi prelucrate cu ușurință și în condiții avantajoase de cost.

Abraziunea este fenomenul principal de apariție a uzurii la strunjirea dură, care conduce la uzura de tip flanc. Uzura flancului este responsabilă pentru calitatea și precizia suprafeței. Creșterea rezistenței la uzură, respectiv creșterea durabilității sculei, este un obiectiv primar în optimizarea procesului de aşchiere, acest lucru fiind posibil prin alegerea unei acoperiri optime, a unui mediu de aşchiere potrivit și a unui material aşchietor care satisface cerințele de duritate.

Tensiunile reziduale sunt un factor determinant în durata de viață a componentelor supuse la solicitări mecanice. Prin strunjire dură se obțin tensiuni reziduale de compresiune, care sunt de dorit, iar prin utilizare plăcuțelor cu geometrie de tip wiper (raze multiple) obținem pe de o parte tensiuni adânci de compresiune, iar pe de altă parte calitate a suprafeței foarte bună. Geometria de tip Wiper permite dublarea avansurilor de lucru, producând aceeași calitate a suprafeței sau obținerea unor calități superioare ale suprafeței dacă se mențin regimurile de aşchiere, comparativ cu o plăcuță aşchietoare convențională, iar dacă microgeometria plăcuței aşchietoare este realizată cu teșire mică (unghi și lățime) și rotunjire a muchiei (hon) se obțin precizii dimensionale superioare.

Pentru determinarea tehnologiei optime, trebuie luate în considerare și costurile asociate strunjirii dure, în raport cu rectificarea. Din punct de vedere tehnologic, costurile aferente utilajelor și sculelor au cea mai mare pondere, însă costul lichidelor de aşchiere și valoarea deșeurilor rezultate pot face diferența din punct de vedere economic. Din acest motiv, modelul costurilor influențate de tehnologie și dotare a fost actualizat.

Matricea de evaluare a celor două procese indică faptul că strunjirea dură este un proces care poate substitui cu ușurință rectificarea în foarte multe aplicații, obținând cel puțin aceleași condiții calitative, dar beneficiind de creștere de productivitate și reducere de costuri.

Sustenabilitatea și aspectele legate de protecția mediului au devenit criterii de evaluare a tehnologiilor, pe lângă costuri și productivitate. Astfel eliminarea sau înlocuirea lichidelor de aşchiere clasice pe bază de uleiuri minerale sau sintetice aduce, pe de o parte îmbunătățiri legate de mediu, iar pe de altă parte reduceri de costuri și creșterea competitivității. Astfel prelucrările uscate au devenit



din ce în mai utilizate, mai ales la strunjirea dură, în locul aşchierii clasice, însă provocările amintite mai sus au condus la implementarea unor noi tehnici, precum lubrifierea cu CML și apariția unor lubrifianți ecologici, în special pe bază de uleiuri vegetale. Conținutul mare de acizi grași saturați și mononesaturați care le conferă excelente proprietăți de lubrifiere, natura lor biodegradabilă, precum și modul de obținere și disponibilitatea, fac din uleiurile vegetale un substituent foarte bun al uleiurilor pe bază de petrol sau substanțe chimice. Cele mai utilizate uleiuri vegetale ca lubrifianți în aşchiere sunt: uleiul de cocos, uleiul de soia, uleiul de rapiță, uleiul de ricin și uleiul de palmier. Următoare etapă de dezvoltare tehnologică în acest domeniu o reprezintă nanolubrifianții care, datorită constituenților nanometrici, pot îmbunătăți procesele de aşchiere.

Cercetările practice realizate în cadrul laboratorului de Sisteme de producție al departamentului de Inginerie și Management Industrial au confirmat faptul că strunjirea dură, în condiții de lubrifiere cu cantitatea minimă de lubrifianți, conduce la rezultate mult mai bune decât cele obținute prin rectificare. Rezultatele obținute în experimente precum și performanța uleiului de porumb, au fost validate prin prelucrarea statistică realizată prin mai multe metode, prin analiza uzurii sculei, prin măsurarea unor parametri de rugozitate și de formă, prin analiza metalografică a suprafețelor obținute și printr-un calcul de costuri.

La aşchiera cu CML, datorită abilității uleiului de a pătrunde în interfața sculă-piesă-așchie, a proprietăților anti-frecare, a moleculelor care aderă la suprafața metalică, precum și a conținutului relativ mare de acizi grași saturați și mononesaturați, uleiul de porumb este capabil să creeze un strat (un film subțire) lubrifianți puternic și rezistent, în zona de aşchiere cu proprietăți de lubrifiere ridicate. Prin urmare, utilizarea uleiului de porumb la strunjirea dură asistată de lubrifierea cu CML și plăcuțe aşchietoare ceramice cu microgeometrie wiper îmbunătățește rugozitatea suprafeței datorită efectului de lubrifiere și capabilității uleiului de a pătrunde în interfața sculă-piesă. O creșterea a avansului în intervalul 0,1 -0,15 mm/rot poate fi ușor susținută pentru a îmbunătăți productivitatea fără a afecta calitatea suprafeței prea mult.

Nu în ultimul rând, trebuie să amintim de tendința actuală care a cuprins industria fabricației, și nu numai și anume Industria 4.0. Această "modernizare" a fabricii tradiționale care devine mai flexibilă și mai autonomă, sustenabilă, cu echipamente și utilaje inteligente capabile să colecteze, stocheze, interpreteze și să schimbe un volum mare de date între ele sau cu alte entități, este însoțită atât de tendințe, cerute în special de piață, cât și de provocări majore. Cele mai mari provocări în Industria 4.0 sunt legate de tehnologiile informației și ale comunicațiilor, de resursele umane, de logistică și de costuri. Tendințele sunt orientate în special către digitalizare, către implementarea tehnologiilor IT în fabricație, a roboților colaborativi și în alte industrii și linii de fabricație decât cele din domeniul autovehiculelor, către mașini-unelte care comunică între ele, preiau și trimit date în cloud, către implementarea pe scară largă a sistemelor IFR, sisteme ERP agile, fabricație cloud și optimizarea proceselor în timp real.

## CONTRIBUȚII ORIGINALE

Studiile și cercetările prezentate în această teza de doctorat au fost realizate cu rigoare științifică și au un caracter original. Ca urmare, contribuțiile personale sunt următoarele:

1. Analiza amănunțită a stadiului actual al implementării strunjirii dure în fabricație, ca alternativă la rectificare (capitol 3), ceea ce a condus la rezultatele de la punctele 2 și până la 7;
2. Determinarea avantajelor și beneficiilor strunjirii dure în fața rectificării, ca proces final de finisare (subcapitol 3.1);
3. Determinarea parametrilor legați de integritatea suprafețelor care trebuie analizați la înlocuirea rectificării cu strunjirea dură (subcapitol 3.2);
4. Realizarea unei analize complexe cu privire la materialele utilizate la construcția sculelor așchietoare și la acoperirile acestora în vederea alegerii optime a sculei, în funcție de condițiile de lucru (subcapitol 3.3);
5. Structurarea principalelor provocări ale înlocuirii rectificării cu strunjirea dură (subcapitol 3.4)
  - 5.1. Analiza apariției straturilor albe la strunjirea dură și stabilirea unor direcții pentru evitarea acestora (subcapitol 3.4.1);
  - 5.2. Analiza uzurii sculei la strunjirea dură și trasarea unor indicații pentru creșterea durabilității sculei (subcapitol 3.4.2);
  - 5.3. Analiza strunjirii dure a suprafețelor întrerupte și determinarea condițiilor pentru eficiența economică a acestei operații (subcapitol 3.4.3);
  - 5.4. Analiza elementelor de cost în vederea stabilirii eficienței economice a înlocuirii rectificării cu strunjirea dură;
6. Studiul influenței geometriei sculei asupra performanțelor strunjirii dure (subcapitol 3.5);
7. Analiza tensiunilor reziduale la strunjirea dură și stabilirea unor direcții pentru obținerea tensiunilor de compresiune (subcapitol 3.6);
8. Realizarea unei matrici de evaluare tehnologică, calitativă și economică a celor două procese de finisare (subcapitol 4.1);
9. Reconceptarea modelului de calcul al costurilor influențate de tehnologie și stabilirea unei relații simple pentru determinarea procesului optim considerând productivitatea și profitul;
10. Efectuarea unor studii cu privire la implementarea conceptului Industry 4.0 în fabricație și determinarea tendințelor precum și a provocărilor asimilate acestui concept (capitolul 5);
11. Efectuarea unor studii cu privire la aspectele de mediu ale înlocuirii rectificării cu strunjirea dură, stabilirea resurselor verzi pentru fabricația verde, identificarea provocărilor cauzate de utilizarea lichidelor de așchiere clasice, precum și studiul tehnicii lubrifierii cu cantitate minimă de lubrifiant (capitolul 6);
12. Realizarea unei cercetări teoretice asupra așchierii metalelor necălite și a strunjirii dure cu uleiuri vegetale ca lichide de răcire-ungere, identificarea principalilor compuși organici utilizați în cercetare, analiza și comparația acestora, precum și determinarea beneficiilor utilizării acestor uleiuri la lubrifierea cu cantitate minimă de lubrifiant (subcapitol 6.5 și 6.6);
13. Determinarea perspectivelor, teoretice, ale strunjirii dure cu ulei vegetal ca lichide de ungere-lubrifiere din prisma costurilor și productivității (subcapitol 6.6);

14. Realizarea unei cercetări teoretice asupra utilizării nanolubrifianţilor pe bază de uleiuri vegetale, în aşchiere, identificarea principalilor compuşi nanometrici utilizaţi în prezent, precum şi stabilirea influenţelor şi beneficiilor utilizării acestora (subcapitol 6.7);
15. Realizarea şi validarea unor cercetări experimentale privind înlocuirea lubrifianţilor sintetici şi minerali cu lubrifianţi organici prin care a fost validat uleiul de porumb ca lichid de aşchiere şi stabilirea influenţei parametrilor de proces asupra variabilelor de răspuns (capitol 7);
  - 15.1. Executarea a 72 de experimente si 108 măsurători de rugozitate pentru determinarea influenţei parametrilor de aşchiere (avans şi viteză de aşchiere) precum şi a tipului de lubrifiere asupra rugozităţii suprafeţei. Ca noutate, a fost utilizată lubrifierea cu ulei de porumb;
  - 15.2. Conceperea cu ajutorul programelor Excel şi Statistica a graficelor 2D şi 3D pentru interpretarea rapidă a rezultatelor, determinarea tendinţelor şi pentru confirmarea ipotezei 1;
  - 15.3. Realizarea analizei efectelor medii pentru determinarea teoretică a factorilor semnificativi care influenţează parametrii de rugozitate, validând astfel faptul că rugozitatea suprafeţei la strunjirea dură asistată de lubrifierea cu CML cu ulei de porumb este semnificativ mai bună decât la prelucrarea uscată;
  - 15.4. Realizarea analizei de varianţă (ANOVA) pentru determinarea factorilor semnificativi statistic care influenţează parametrii de rugozitate a suprafeţei, validând astfel ipoteza 2;
  - 15.5. Determinarea ecuaţiilor de regresie liniară şi pătratică, prin două metode (două software-uri) pentru trei tipuri de rugozitate, pentru prelucrarea uscată şi cu ulei de porumb cu plăcuţă aşchietoare ceramică de tip wiper, analiză complexă a acestora şi stabilirea factorilor semnificativi statistici;
  - 15.6. Analiza uzurii sculei la prelucrarea uscată şi cu cantitate minimă de lubrifianţ cu ulei de porumb prin evidenţierea şi măsurarea uzurii flancului, determinarea durabilităţii sculei la ambele metode de aşchiere şi confirmarea ipotezei 3;
  - 15.7. Analiza abaterilor de formă şi a rugozităţilor Rsk şi Rku, prin care s-a determinat faptul că prin strunjire dură se obţin precizii de 1-2  $\mu\text{m}$ , precizii asemănătoare cu cele obţinute prin rectificare, precum şi factor de asimetrie negativ, deosebit de important pentru rezistenţa la oboseală a componentelor mecanice;
  - 15.8. Analiza metalografică a suprafeţelor obţinute prin care a fost demonstrat faptul că lubrifierea cu ulei de porumb contribuie, prin efectul de răcire şi lubrifiere, la obţinerea unor suprafeţe lipsite de zone influenţate termice (white layer);
  - 15.9. Analiza economică a utilizării uleiului de porumb ca lubrifianţ la strunjirea dură, prin care demonstrăm că beneficiile economice sunt reale şi importante în alegerea tehnologiei optime, precum şi faptul că fabricaţia verde este realizabilă în condiţii economice confirmând astfel ipoteza 4.

## DISEMINAREA REZULTATELOR

Diseminarea rezultatelor cercetărilor efectuate și prezentate în această teză a constat în publicarea a **7 articole științifice, din care 6 ca prim autor**. Dintre acestea **3 sunt indexate ISI, iar 4 indexate BDI**, după cum urmează:

- ✓ 3 articole Web of Science:

[ARS,06] publicat în revista Metals, MDPI, ISSN 2075-4701, FRI 0,650, SRI 1.359, conform clasificării UEFISCDI JCR 2020 (ediția iunie 2021);

[ARS,03] susținut la conferința 3rd China-Romania Science and Technology Seminar (CRSTS 2018) 24–27 April 2018, Braşov, Romania și publicat în IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 399.

[PAS,01] susținut la conferința 3rd China-Romania Science and Technology Seminar (CRSTS 2018) 24–27 April 2018, Braşov, Romania și publicat în IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 399.

- ✓ 4 articole BDI:

[ARS,01][ARS,02][ARS,05] publicate în revista B+, Recent;

[ARS,04] susținut la conferința ICMAS 2018, București, Romania și publicat în revista Proceedings in Manufacturing Systems, Volume 13, Issue 4, 2018, 183-187 ISSN 2067-9238.

## DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

Direcțiile viitoare de cercetare pornesc de la stadiul actual al cercetărilor realizate în domeniul tezei de doctorat, precum și din concluziile rezultate în urma experimentelor și a preocupărilor ridicate de comunitatea științifică în acest domeniu. Acestea trebuie să urmărească următoarele aspecte:

- ✓ Identificarea influenței lichidelor de aşchiere pe bază de uleiuri vegetale asupra reliefului suprafeței;
- ✓ Identificarea influenței lichidelor de aşchiere pe bază de uleiuri vegetale asupra tensiunilor remanente din piese;
- ✓ Identificarea influenței lichidelor de aşchiere pe bază de uleiuri vegetale asupra unor parametri de sustenabilitate, precum energia consumată sau emisiile de dioxid de carbon;
- ✓ Dezvoltarea de lubrifianți organici și ecologici pe bază de uleiuri vegetale;
- ✓ Analiza comparativă a uleiului de porumb cu alte uleiuri vegetale din punct de vedere al variabilelor de răspuns;
- ✓ Dezvoltarea unor modele matematice de predicție a rugozităților la strunjirea dură cu plăcuțe ceramice de tip wiper pe clase de material;
- ✓ Analiza comparativă a plăcuțelor ceramice cu cele din nitrură cubică de bor la strunjirea dură asistată de ulei de porumb din punct de vedere calitate, cost, uzură și productivitate;
- ✓ Determinarea influenței aplicării lubrifianților organici asupra rezistenței la oboseală a pieselor;
- ✓ Identificarea influenței particulelor din nanolubrifianți asupra organismului uman și mediului înconjurător;
- ✓ Dezvoltarea și testarea unei soluții software pentru modelarea și simularea strunjirii dure la prelucrarea cu uleiuri vegetale.

## BIBLIOGRAFIE (EXTRAS)

- [ABB,01] Abbas, A. T., Gupta, M. K., Soliman, M. S., Mia, M., Hegab, H., Luqman, M., and Pimenov, D. Y., 2019, "Sustainability Assessment Associated with Surface Roughness and Power Consumption Characteristics in Nanofluid MQL-Assisted Turning of AISI 1045 Steel," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 105(1–4), pp. 1311–1327.
- [ABR,01] Abrudan, I., Candrea, D., ş.a., 2002, "Manual de Inginerie Economică: ingineria şi managementul sistemelor de producţie," Editura DACIA, Cluj-Napoca, România, ISBN: 973-35-1588-4.
- [ARS,01] Arsene, B., Calefariu, G., 2017, "Qualitative Analysis of Replacing Grinding with Hard Turning," *RECENT*, 18 (1-51), pp 6-11.
- [ARS,02] Arsene, B., Calefariu, G., 2017, "The Economic Efficiency of Replacing Grinding with Hard Turning," *RECENT*, 18 (2-52), pp 71-76.
- [ARS,03] Arsene, B., Pascariu, G. P., Sarbu, F. A., Barbu, M., and Calefariu, G., 2018, "Green Manufacturing by Using Organic Cooling-Lubrication Fluids," 3rd China-Romania Science and Technology Seminar (CRSTS 2018), IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., 399(1).
- [ARS,04] Arsene, B., Sarbu, F.A., Calefariu, G., 2018, "REPLACING GRINDING WITH HARD TURNING – A SOLUTION FOR GREEN MACHINING," *Proceedings in Manufacturing Systems*, 13 (4), pp. 183-187
- [ARS,05] Arsene, B., Calefariu, G., 2018, "Trends and Challenges of Manufacturing Management in Industry 4.0," *RECENT*, 19 (2-55), pp 108-121.
- [ARS,06] Arsene, B., Gheorghe, C., Sarbu, F.A., Barbu, M., Cioca, L.-I., Calefariu, G., 2021, "MQL-Assisted Hard Turning of AISI D2 Steel with Corn Oil: Analysis of Surface Roughness, Tool Wear, and Manufacturing Costs," *Metals*, 11, 2058.
- [BAL,15] Bălăcescu, A., 2008, "Cercetari privind influenţa lichidelor de aşchiere asupra performanţelor de precizie ale inelelor de rulmenţi la prelucrarea prin rectificare şi superfinisare," Teză de doctorat, Universitatea Transilvania, Braşov.
- [BER,08] Berce, P., ş.a., 2014, "Tehnologii de fabricaţie prin adăugare de material şi aplicaţiilor lor", Editura Academiei Române, Bucureşti, România, ISBN: 978-973-27-2396-8.
- [BOU,01] Boubekri, N., and Shaikh, V., 2014, "Minimum Quantity Lubrication (MQL) in Machining: Benefits and Drawbacks," *J. Ind. Intell. Inf.*, 3(3), pp. 205–209.
- [BRI,02] Brinksmeier, E., Meyer, D., Huesmann-Cordes, A. G., and Herrmann, C., 2015, "Metalworking Fluids - Mechanisms and Performance," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, 64(2), pp. 605–628.
- [CAL,04] Calefariu, G., and Barbu, M., 2011, "Sisteme de producţie: teorie şi aplicaţii," Editura Lux Libris, Braşov, Braşov, România, ISBN: 978-973-131-112-8.
- [CAR,03] Carvalho, D. O. A., da Silva, L. R. R., Sopchenski, L., Jackson, M. J., and Machado, Á. R., 2019, "Performance Evaluation of Vegetable-Based Cutting Fluids in Turning of AISI 1050 Steel," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*
- [CHI,01] Chinchankar, S., Salve, A. V., Netake, P., More, A., Kendre, S., and Kumar, R., 2014, "Comparative Evaluations of Surface Roughness During Hard Turning under Dry and with Water-Based and Vegetable Oil-Based Cutting Fluids," *Procedia Mater. Sci.*, 5, pp. 1966–1975.
- [CHO,01] Choi, Y., 2010, "Influence of a White Layer on the Performance of Hard Machined Surfaces in Rolling Contact," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B: J. Eng. Manuf.*, 224(8), pp. 1207–1215.
- [CHO,03] Y K. Chou, Evans, C. J., 1998, "Process Effects on White Layer Formation in Hard Turning," *Transactions of NAMRI/SME*, 26.
- [DAD,01] D'Addona, D. M., and Raykar, S. J., 2016, "Analysis of Surface Roughness in Hard Turning Using Wiper Insert Geometry," *Procedia CIRP*, 41, pp. 841–846.
- [DAV,01] Davim, J. P., 2010, "Surface Integrity in Machining", Springer-Verlag London, eBook ISBN 978-1-84882-874-2 pp. 37-65.

- [DAV,03] Astakhov, V. P., and Davim, J. P., 2008, "Machining: Fundamentals and Recent Advances - Chapter 2: Tools (Geometry and Material) and Tool Wear", Springer-Verlag London, eBook ISBN 978-1-84800-213-5, pp. 29-57, Editor: Davim, J. Paulo.
- DAW,01] Dawson, T. G., and Kurfess, T. R., 1995, "TOOL LIFE , WEAR RATES , AND SURFACE QUALITY IN HARD TURNING", Georgia Institute of Technology.
- [DEA,01] Deaconescu, T., 1999, "Prelucrări cu fluide și suspensii abrazive," Editura Universității Transilvania din Braşov, Braşov, România, ISBN: 973-98797-4-8.
- [DEN,02] Denkena, B., Grove, T., and Maiss, O., 2016, "Influence of Hard Turned Roller Bearings Surface on Surface Integrity after Deep Rolling," *Procedia CIRP*, 45, pp. 359–362.
- [DIN,01] Diniz, A. E., and de Oliveira, A. J., 2008, "Hard Turning of Interrupted Surfaces Using CBN Tools," *J. Mater. Process. Technol.*, 195(1–3), pp. 275–281.
- [ELB,01] Elbah, M., Yallese, M. A., Aouici, H., Mabrouki, T., and Rigal, J. F., 2013, "Comparative Assessment of Wiper and Conventional Ceramic Tools on Surface Roughness in Hard Turning AISI 4140 Steel," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, 46(9), pp. 3041–3056.
- [ELM,02] Elmunafi, M. H. S., Kurniawan, D., and Noordin, M. Y., 2015, "Use of Castor Oil as Cutting Fluid in Machining of Hardened Stainless Steel with Minimum Quantity of Lubricant," *Procedia CIRP*, 26, pp. 408–411.
- [FER,01] Ferreira, R., Carou, D., Lauro, C. H., and Davim, J. P., 2016, "Surface Roughness Investigation in the Hard Turning of Steel Using Ceramic Tools," *Mater. Manuf. Process.*, 31(5), pp. 648–652.
- [FER,02] Ferreira, R., Řehoř, J., Lauro, C. H., Carou, D., and Davim, J. P., 2016, "Analysis of the Hard Turning of AISI H13 Steel with Ceramic Tools Based on Tool Geometry: Surface Roughness, Tool Wear and Their Relation," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, 38(8), pp. 2413–2420.
- [GAI,01] Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., Figueira, L., and Paulo Davim, J., 2009, "Machinability Investigations in Hard Turning of AISI D2 Cold Work Tool Steel with Conventional and Wiper Ceramic Inserts," *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 27(4), pp. 754–763.
- [GAI,02] Gaimon, C., 2008, "The Management of Technology: A Production and Operations Management Perspective," *Prod. Oper. Manag.*, 17(1), pp. 1–11.
- [GRE,01] Gregory, M. J., 1995, "Technology management: a process approach," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 209, pp. 347–356.
- [GRI,01] Griffiths, B.J., 1987, "Mechanisms of White Layer Generation With Reference to Machining and Deformation Processes," *J. Tribol.* 109(3), pp. 525–530.
- [GRZ,01] Grzesik, W., Wanat, T., Rech, J., 2006, "Comparison of surface finish produced in hard machining using different cutting and abrasive tools," *Transactions of NAMRI/SME*, 34, pp. 421–428.
- [HAS,01] Hashimoto, F., Chaudhari, R. G., and Melkote, S. N., 2016, "Characteristics and Performance of Surfaces Created by Various Finishing Methods ( Invited Paper )," *Procedia CIRP*, 45, pp. 1–6.
- [ISL,01] Islam, S., Khandoker, N., Izham, M., Azizi, T., and Debnath, S., 2017, "Development of a Low Cost MQL Setup for Turning Operations," *MATEC Web Conf.*, 95.
- [KAG,01] Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J. 2013, "Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0," *Final Rep. Ind. 4.0 WG*, (April), p. 1- 82.
- [KHA,01] Khan, M. M. A., and Dhar, N. R., 2006, "Performance Evaluation of Minimum Quantity Lubrication by Vegetable Oil in Terms of Cutting Force, Cutting Zone Temperature, Tool Wear, Job Dimension and Surface Finish in Turning AISI-1060 Steel," *J. Zhejiang Univ. A*, 7(11), pp. 1790–1799.
- [KHE,01] Khellaf, A., Aouici, H., Smaiah, S., Boutabba, S., Yallese, M. A., and Elbah, M., 2017, "Comparative Assessment of Two Ceramic Cutting Tools on Surface Roughness in Hard Turning of AISI H11 Steel: Including 2D and 3D Surface Topography," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 89(1–4), pp. 333–354.



- [KLO,01] Klocke, F., Brinksmeier, E., and Weinert, K., 2005, "Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Processes," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, 54(2), pp. 22–45.
- [KLO,02] Klocke, F., and Kratz, H., 2005, "Advanced Tool Edge Geometry for High Precision Hard Turning," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, 54(1), pp. 47–50.
- [KON,03] König, W., Klinger, M., and Link, R., 1990, "Machining Hard Materials with Geometrically Defined Cutting Edges - Field of Applications and Limitations," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, 39(1), pp. 61–64.
- [KUN,01] Kundrák, J., Karpuschewski, B., Gyani, K., and Bana, V., 2008, "Accuracy of Hard Turning," *J. Mater. Process. Technol.*, 202(1–3), pp. 328–338.
- [NEU,03] Neugebauer, R., Hippmann, S., Leis, M., and Landherr, M., 2016, "Industrie 4.0 - From the Perspective of Applied Research," *Procedia CIRP*, 57, pp. 2–7.
- [PAU,01] Paul, I. D., Bhole, G. P., and Chaudhari, J. R., 2014, "A Review on Green Manufacturing: It's Important, Methodology and Its Application," *Procedia Mater. Sci.*, 6(Icmpc), pp. 1644–1649.
- [RAH,01] Rahim, E. A., Ibrahim, M. R., Rahim, A. A., Aziz, S., and Mohid, Z., 2015, "Experimental Investigation of Minimum Quantity Lubrication (MQL) as a Sustainable Cooling Technique," *Procedia CIRP*, 26, pp. 351–354.
- [SAN,04] Sankaranarayanan, R. N., R. J. H., J., S. K., and Krolczyk, G. M., 2021, "A Comprehensive Review on Research Developments of Vegetable-Oil Based Cutting Fluids for Sustainable Machining Challenges," *J. Manuf. Process.*, 67(November 2020), pp. 286–313.
- [SCH,02] Schroder, C., 2015, "The Challenges of Industry 4.0 for Small and Medium-Sized Enterprises," Friedrich-Ebert-Stiftung, D-53175 Bonn, Germany, 2015; pp. 1–28, ISBN: 978-3-95861-543-4 (November), pp. 1–28.
- [SHA,04] Sharif, S., Sadiq, I. O., Yusof, N. M., and Mohruni, A. S., 2017, "A Review of Minimum Quantity Lubrication Technique with Nanofluids Application in Metal Cutting Operations," *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, 7(2), p. 587.
- [SHA,05] Sharma, J., and Sidhu, B. S., 2014, "Investigation of Effects of Dry and near Dry Machining on AISI D2 Steel Using Vegetable Oil," *J. Clean. Prod.*, 66, pp. 619–623.
- [STE,02] Stephenson, A.D., and Agapiou, J.S., 2016, "Metal Cutting Theory and Practice - third edition," Taylor & Francis Group, LLC, pp. , ISBN: 978-1-4665-8753-3.
- [TAI,01] Tai, B. L., Stephenson, D. A., Furness, R. J., and Shih, A. J., 2014, "Minimum Quantity Lubrication (MQL) in Automotive Powertrain Machining," *Procedia CIRP*, 14, pp. 523–528.
- [TON,01] Tonshoff, H. K., Arendt, C., and Ben Amor, R., 2000, "Cutting of Hardened Steel," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, 49(2), pp. 547–566.
- [VAR,01] Varaprasad, B., and Srinivasa, R. C., 2016, "INVESTIGATION OF FORCES, POWER AND SURFACE ROUGHNESS IN HARD TURNING WITH MIXED CERAMIC TOOL," *J. Adv. Manuf. Technol.*, 10(1), pp. 107–120.
- [ZHA,25] Zhang, Y., Li, C., Yang, M., Jia, D., Wang, Y., Li, B., Hou, Y., Zhang, N., and Wu, Q., 2016, "Experimental Evaluation of Cooling Performance by Friction Coefficient and Specific Friction Energy in Nanofluid Minimum Quantity Lubrication Grinding with Different Types of Vegetable Oil," *J. Clean. Prod.*, 139, pp. 685–705.
- [WAR,01] Warren, A. W., and Guo, Y. B., 2006, "On the Clarification of Surface Hardening by Hard Turning and Grinding," *Trans North Am Manuf Res Inst SME*, 34(April), pp. 309–316.
- [WAR,02] Warren, A. W., and Guo, Y. B., 2008, "Nanoindentation Characterization of Ultrafine-Grained Surface Layer by Turning Versus Grinding," 2008 Second Int. Conf. Integr. Commer. Micro Nanosyst., (November), pp. 251–256.
- [WEI,01] Weinert, K., Inasaki, I., Sutherland, J. W., and Wakabayashi, T., 2004, "Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, 53(2), pp. 511–537.



## **Scurt rezumat al tezei de doctorat (versiune în română)**

Cercetarea desfășurată a urmărit determinarea condițiilor tehnologice și economice pentru care procesul de aşchiere de strunjire dură poate înlocui procesul de rectificare, atât la operațiile de degroşare cât și de finisare, cu îndeplinirea cerințelor din ce în ce mai stricte legate de economia verde, protecția mediului, a operatorilor și de sustenabilitate. Simpla înlocuire a rectificării, care este o tehnologie foarte poluantă, este un mare pas înainte, iar provocările care decurg din această schimbare de tehnologie pot fi depășite prin implementarea soluțiilor prezentate. Dar simpla înlocuire a rectificării cu strunjirea dură nu atinge potențialul maxim de sustenabilitate, astfel că s-a propus înlocuirea lichidelor de răcire-ungere poluante, bazate pe uleiuri minerale, cu lichide bazate pe uleiuri vegetale, prin tehnici moderne care reduc consumurile de energie și materiale. Efectele pozitive ale aplicării uleiurilor vegetale, în special al uleiul de porumb, ca lichid de aşchiere sunt prezentate atât din punct de vedere cantitativ cât și calitativ, validând astfel un nou lubrifian prin derularea unor cercetări experimentale organizate și efectuate cu maximă rigoare științifică.

Fabricația verde și digitalizarea sunt tendințe actuale în industrie. Industria 4.0, care cuprinde aceste tendințe, este astăzi un pilon principal în dezvoltarea strategiilor companiilor și de aceea este de mare interes atât din punct de vedere academic cât și practic. Această a patra revoluție industrială integrează noutatea tehnologică cu tehnologia informației la nivele din ce în ce mai înalte.

## **Brief summary of the doctoral thesis (english version)**

The research aimed to determine the technological and economic conditions for which the hard turning process can replace the grinding process, both for roughing and finishing operations, with the fulfillment of the increasingly stringent requirements related to green economy, environmental and human protection and sustainability. The simple replacement of grinding, which is a very polluting technology, is a big step forward, and the challenges arising from this technological change can be overcome by implementing the presented solutions. But simply replacing grinding with hard turning does not reach its maximum potential for sustainability, thus it has been proposed the replacement of polluting cutting fluids, based on mineral oils, with based on vegetable oils based cutting fluids, through modern techniques that reduce energy and material consumption. The positive effects of the application of vegetable oils, especially corn oil, as cutting fluid are presented both quantitatively and qualitatively, thus validating a new lubricant by conducting organized and carried out with the utmost scientific rigor experimental research.

Green manufacturing and digitalization are current trends in industry. Industry 4.0, which includes these trends, is today a major pillar in the development of companies' strategies and is therefore of great interest both academically and practically. This fourth industrial revolution integrates technological innovation with information technology at ever higher levels.