

TEZA DE ABILITARE

PROCESE DE FABRICAȚIE ECOLOGICĂ ÎN
CONTEXTUL TRANZIȚIEI LA PRODUCȚIA
DURABILĂ



ENVIRONMENT-FRIENDLY
MANUFACTURING PROCESSES IN CONTEXT
OF TRANSITION TO SUSTAINABLE
PRODUCTION

Conf. dr. ing. Domnița-Florina FRĂȚILĂ

Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca

Facultatea Construcții de Mașini, Departamentul Ingineria Fabricației

CLUJ-NAPOCA, 2019

CUPRINS

Rezumat	5
Abstract	7
SECȚIUNEA I. Realizări academice și profesionale	
I.1 Studii	9
I.2 Sumar de activitate	10
I.3 Relevanța activității și impactul rezultatelor științifice obținute	12
<i>I.3.1 Activități didactice</i>	12
<i>I.3.1 Activități de cercetare</i>	15
SECȚIUNEA II. Rezultate obținute în cercetarea științifică	
CAPITOLUL 1. Fabricația și mediul înconjurător	
1.1 Introducere	22
1.2. Interacțiunea activităților industriale cu mediul înconjurător	28
1.3. Ecologia industrială	29
1.4. Concluzii	32
CAPITOLUL 2. Procese de fabricație ecologice	
2.1. Noțiuni generale privind producția durabilă	33
2.2. Tehnologii de fabricație sustenabile	35
2.3. Aspecte ecologice ale mediilor de aşchiere	37
2.4. Prelucrarea uscată și pseudo-uscată	44
2.5. Așchiera criogenică	50
2.6. Așchiera cu jet dirijat de înaltă presiune	52
CAPITOLUL 3. Evaluarea sustenabilității proceselor de fabricație	
3.1. Ecoproiectare axată pe evaluarea ciclului de viață	54
3.2. Conceptul LCA	55
3.3. LCA pentru procesele de fabricație	58
CAPITOLUL 4. Analiza ecologică comparativă a prelucrării pseudo-uscate și prelucrării convenționale la frezarea roților dințate	
4.1. Introducere	61
4.2. Metodologia de evaluare	62
<i>4.2.1. Producția de materiale</i>	63

4.2.2. Prepararea mediilor de aşchiere.....	64
4.2.3. Producerea sculelor aşchietoare.....	65
4.2.4. Construcția mașinii-unelte	65
4.2.5. Îndepărtarea materialului	66
4.2.6. Procesul de curățare	66
4.3. Etape de evaluare	67
4.3.1. Definierea obiectivelor	67
4.3.2. Inventarul fluxurilor ciclului de viață.....	68
4.3.3. Evaluarea impactului ciclului de viață	69
4.3.4. Interpretarea ciclului de viață	69
4.4. Studiu de caz: LCA la frezarea roților dințate cu modul mic	70
4.5. Concluzii	75
 CAPITOLUL 5. Studiu privind condițiile optime de aşchiere, ungere și răcire la frezarea frontală a AlMg₃	
5.1. Introducere	77
5.2. Proiectarea experimentelor utilizând metoda Taguchi	80
5.3.1 Metoda Taguchi	80
5.3.2 Proiectarea experimentelor	81
5.3.3 Procedura experimentală	82
5.3. Analiza și interpretarea rezultatelor	84
5.3.1 Analiza calității suprafeței și a puterii consumate	84
5.3.2 Analiza temperaturilor în zona de aşchiere	88
5.4. Concluzii	91
 CAPITOLUL 6. Investigații privind influența metodei de răcire și lubrifiere asupra calității suprafeței și a temperaturii de aşchiere la strunjirea AISI 1045	
6.1. Introducere	92
6.2. Proiectarea experimentelor	92
6.3. Rezultate	95
6.4. Analiza și interpretarea rezultatelor	98
6.5. Concluzii	101
 CAPITOLUL 7. Influența condițiilor de aşchiere asupra eficienței procesului de strunjire ecologică a oțelului aliat 42CrMo4	
7.1. Introducere	102
7.2. Metoda de investigație	105
7.3. Interpretarea rezultatelor	107
7.3.1. Analiza rugozității suprafeței	108

7.3.2 Analiza încărcării mașinii-unelte	110
7.4. Optimizarea parametrilor de așchiere	111
7.5. Analiza formei de așchiilor	112
7.6. Concluzii	117

CAPITOLUL 8. Analiza forțelor de așchiere la strunjirea uscată și pseudo-uscată

8.1. Introducere	119
8.2. Componentele forței de așchiere	120
8.3. Factorii care influențează mărimea forțelor de așchiere	121
8.3.1 Influența materialului prelucrat	122
8.3.2 Influența adâncimii de așchiere și a avansului	123
8.3.3 Influența vitezei de așchiere	123
8.3.4 Influența geometriei sculei așchietoare	124
8.3.5 Influența lichidelor de așchiere	125
8.4. Determinarea forței de așchiere la strunjirea AISI 1045	125
8.5. Interpretarea rezultatelor	127

CAPITOLUL 9. Analiza potențialului de sustenabilitate al fabricației aditive

9.1. Introducere	131
9.2. Probleme ecologice ale AM	133
9.2.1 Energie	133
9.2.2 Materiale	134
9.2.3 Ciclul de viață	135
9.2.4 Managementul deșeurilor	136
9.3. Potențialul de sustenabilitate al AM	137
9.4. Metodologia de cercetare propusă	138
9.5. Studiu de caz	140
9.6. Rezultate și analize	143
9.7. Concluzii	147
Bibliografie	149

SECȚIUNEA III. Perspective de dezvoltare ale carierei științifice și profesionale

III.1 Dezvoltarea activității educaționale	163
III.2 Dezvoltarea activității de cercetare	164
III.3 Corelarea activității de cercetare cu cea educațională	165
III.4 Cadrul de dezvoltare viitoare a carierei	165

ABSTRACT

This work presents my scientific and professional concerns and results of the researches published after obtaining the PhD degree in 2003 on the subject of ecological manufacturing techniques, with the work named ***Research on the ecological machining processes in manufacturing engineering*** (Supervisor: Acad. Prof.dr.ing. Csaba Gyenge).

The habilitation thesis, ***Environment-Friendly Manufacturing Processes in Context of Transition to Sustainable Production***, focuses on the achievements that prove the author's ability to conduct a scientific activity in the industrial engineering, and specifically in the green manufacturing area. The personal achievements are integrated in a larger area of the current status of the scientific research in the domain.

The work is structured in ***three sections***. ***The first one*** presents the evolution of my professional and academic career. ***The second one*** comprises a sum of research results, representing the core of my scientific work done over the last years. ***Chapters 1-3*** of thesis present the recent developments in the field of environment-friendly techniques and sustainable production, highlighting the importance of the sustainable manufacturing technologies in achieving sustainable development objectives. Particularly, the machining processes constitute an important manufacturing activity that contributes to the growth of the global economy. Research and new developments in machining processes have improved manufacturing performances through higher process productivity, greater parts quality, advanced tool materials, while environmentally and health-friendly technologies are becoming increasingly important for achieving cleaner, healthier, and safer manufacturing processes.

One of the main environmental pollution sources related to machine building industry is the huge amount of cutting fluids which are supplied during the machining processes. In order to avoid the problems induced by cutting fluids usage, considerable progress has been recently made in the field of ***Near Dry Machining (NDM)***, called also ***Minimal Quantity Lubrication (MQL)***. Converting conventional processes to MQL method imposes new tasks classification within the tribological system in order to guarantee the process safety and product quality.

Chapter 4-8 are focused on investigating various aspects of machining process from an ecological perspective and concern the evaluation of ***Dry Cutting (DC)*** and ***Near Dry***

Machining (NDM) effects on gear milling, turning and milling efficiency, while machining several materials (AISI 1045, 42CrMo4, stainless steel AISI 314L, aluminum alloy AlMg₃) and give an overview on some requirements to be considered for successful application of these environmental-friendly methods into industrial practice. Therefore, the research is mainly focused on evaluation of *DC* and *NDM* effects on process efficiency, with respect to surface quality, cooling effect, cutting forces, chips' shape and environment damage by comparing them with conventional *Flood Cooling (FC)*.

Furthermore, the comparative analysis of environmental performance of *DC*, *NDM* and *FC* is performed using *Sima Pro 7.1.5 software* and the *EcoInvent1.5 database*, including combined *Life Cycle Assessment (LCA)*. Taguchi method for mixed level parameter design was used for the experiments' design to optimize cutting parameters. Analysis of variance *ANOVA* was used to determine the effect of machining parameters on process responses.

Chapter 9 gives a survey on sustainability issues related to *Additive Manufacturing (AM)*. *AM* technologies allow developing and manufacturing very complex shaped parts and functional products with a high level of customization, being a great alternative to *Traditional Manufacturing (TM)* methods like injection molding, die-casting or machining. Due to the importance of cleaner production in the field of manufacturing processes, sustainability of *AM* processes needs to be assessed in order to make easier its acceptance and implementation in the industry. Thus, the manufacturers can improve their competitiveness and profitability by considering the ecological aspects during the manufacturing step of a product.

The third section of habilitation thesis describes the career development and evolution plan for short and medium term, taking into consideration three main directions: the *professional, scientific* and *academic activity*. I am going to continue the research-development-scientific innovation activity through an interdisciplinary approach of sustainable production domain, aiming to establish academic and industrial partnerships. In the educational area, the purpose is to improve the teaching tools and the editorial visibility, to increase the quality of teaching-learning process, to adapt the teaching demand to the work market evolution, to improve the delivering and learning process by focusing it on the student through interactive activities.

REZUMAT

Lucrarea prezintă o sinteză a preocupărilor și rezultatelor științifice și profesionale ale autoarei, publicate ulterior obținerii titlului de doctor în domeniul *Inginerie Industrială*, în anul 2003, cu teza de doctorat ***Cercetări privind tehnologiile de prelucrare ecologice în construcția de mașini*** (Coordonator: Acad. Prof.dr.ing. Csaba Gyenge).

Teza de abilitare cu titlul ***Procese de fabricație ecologice în contextul tranziției la producția durabilă*** se concentrează, în principal, pe realizări care atestă abilitatea autoarei de a conduce cercetarea științifică în domeniul *Inginerie industrială*, cu aplicații în domeniul fabricației ecologice. Realizările personale sunt prezentate în contextul stadiului actual al cercetării științifice din domeniul menționat.

Teza, structurată în ***trei secțiuni***, prezintă în ***prima parte*** evoluția carierei prin realizările academice și profesionale obținute. ***A doua secțiune*** cuprinde o serie de rezultate relevante ale cercetării, care reprezintă nucleul activității științifice efectuate pe parcursul ultimilor ani. ***Capitolele 1-3*** din teza de abilitare prezintă evoluțiile recente în domeniul tehnicilor ecologice și al producției durabile și subliniază importanța tehnologiilor de producție sustenabile în atingerea obiectivelor dezvoltării durabile. În special procesele de prelucrare constituie o activitate importantă de producție, care contribuie la creșterea economiei globale. Cercetările și noile evoluții în procesele de prelucrare au îmbunătățit performanțele proceselor de producție prin creșterea productivității procesului, îmbunătățirea calității pieselor, materialele avansate ale sculelor, în timp ce aspectele ecologice devin din ce în ce mai importante pentru obținerea unor procese de producție mai curate și mai sigure.

Una dintre principalele surse de poluare ale mediului, generate de industria construcțiilor de mașini, este cantitatea mare de fluide de aşchiere utilizate în timpul proceselor de prelucrare. În direcția evitării problemelor cauzate de consumul acestora, s-au înregistrat recent progrese considerabile în domeniul *prelucrării uscate (Dry Cutting-DC)* și *pseudo-uscate (Near Dry Machining - NDM)*, numită de asemenea și *aşchiere cu ungere și răcire minimală (Minimal Quantity Lubrication – MQL)*. Înlocuirea proceselor convenționale cu metode ecologice de prelucrare impune regândirea sarcinilor în cadrul sistemului tribologic, pentru a garanta siguranța procesului și calitatea produsului fabricat.

Capitolele 4-8 se axează pe investigarea diferitelor aspecte ale proceselor de prelucrare dintr-o perspectivă ecologică și se referă la evaluarea efectelor aşchierii uscate (*DC*) și a

tehnicienilor de prelucrare pseudo-uscată (*NDM*) asupra eficienței prelucrării prin frezare și strunjire a mai multor materiale (AISI 1045 , 42CrMo4, oțel inoxidabil AISI 314L, aliaje de aluminiu –AlMg₃) și oferă o privire de ansamblu asupra anumitor cerințe care trebuie luate în considerare pentru aplicarea cu succes a acestor metode ecologice în practica industrială. Prin urmare, cercetările se axează în principal pe evaluarea efectelor *DC* și *NDM* asupra eficienței procesului, în ceea ce privește calitatea suprafețelor prelucrate, efectul de răcire, forțele de așchiere, forma așchiilor și degradarea stării mediului înconjurător, în comparație cu procesarea cu răcire și ungere convențională (*Flood Cooling - FC*).

Analiza comparativă a performanțelor de mediu ale *DC*, *NDM* și *FC* s-a realizat cu ajutorul soft-ului *Sima Pro 7.1.5* și al bazei de date *EcoInvent1.5*, inclusiv prin evaluarea combinată a ciclului de viață (*Life Cycle Analysis - LCA*). *Metoda Taguchi* a fost utilizată pentru proiectarea experimentelor și pentru optimizarea parametrilor de așchiere. Analiza varianței *ANOVA* a fost, de asemenea, folosită pentru a determina efectul parametrilor de prelucrare asupra rezultatelor proceselor.

Capitolul 9 conține un studiu privind problemele de sustenabilitate asociate proceselor de fabricație aditivă (*Additive Manufacturing - AM*). Tehnologiile *AM* permit dezvoltarea și fabricarea unor piese foarte complexe și a unor produse funcționale personalizate, fiind o alternativă excelentă la metodele tradiționale de fabricare (*Traditional Manufacturing - TM*), cum ar fi turnarea, injecția, sau prelucrarea substractivă. Datorită importanței unei producții curate în domeniul proceselor de fabricație, este necesar să se evalueze sustenabilitatea proceselor *AM*, pentru a facilita acceptarea și implementarea lor în industrie. În plus, producătorii își pot îmbunătăți competitivitatea și rentabilitatea, luând în considerare aspectele ecologice în timpul fazei de fabricație a unui produs.

Secțiunea III cuprinde planul de dezvoltare al propriei carierei profesionale, științifice și academice. Aceasta secțiune descrie planul de evoluție al carierei pe termen scurt și mediu și vizează trei direcții: *activitatea profesională*; *activitatea științifică și activitatea academică*. Activitățile de cercetare-dezvoltare-inovare științifică vor fi continuate printr-o abordare interdisciplinară a domeniului fabricației durabile, având ca perspectivă configurarea unor parteneriate atât în mediul academic cât și cu mediul industrial. În plan didactic, obiectivul vizează creșterea calității activităților de predare-învățare, adaptarea permanentă a conținutului disciplinelor de predare la cerințele angajatorilor, îmbunătățirea activităților de transmitere și asimilare a informațiilor în cadrul procesului de învățământ centrat pe student, prin activități didactice de tip interactiv.

SECȚIUNEA I. Realizări academice și profesionale

Este cunoscut faptul că *activitățile didactice și de cercetare* sunt componentele esențiale și complementare ale unei cariere academice, oferind oportunități de a crea și de a transmite cunoștințe noi, pentru o educație academică de înaltă calitate și pentru un viitor profesional de succes al studenților.

În cea mai mare parte, activitatea mea profesională s-a desfășurat în cadrul *Departamentului de Ingineria Fabricației (DIF) / Catedra TCM* din cadrul *Facultății Construcții de Mașini* de la *Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca*, unde am participat la activități diverse, de natură didactică, științifică, de cercetare, de colaborare cu instituții de învățământ sau firme din domeniul *Inginerie Industrială* și la activități de management academic. Doresc să îmi dezvolt în continuare cariera în cadrul colectivului *DIF* și îmi propun să rămân implicată în activitățile de până acum, pe care voi încerca, totodată, să le dezvolt și să le extind.

În ceea ce privește planul de evoluție al carierei vor fi prezentate succinct elemente relevante din activitățile desfășurate anterior, iar în *Secțiunea III* câteva dintre etapele pe care doresc să le parcurg, având la bază rezultatele obținute până în prezent.

I.1 Studii

Studii universitare:

1991-1996 - *Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca*, Facultatea Construcții de Mașini.

Studii de licență la specializarea *Tehnologia Construcțiilor de Mașini*. Proiect de diplomă: *Analiza reperului sanie pentru ghidaj cu bile cu ajutorul pachetului de soft-uri DFMA*, UTC-N, Iunie 1996.

Studii postuniversitare:

1996-1997 - *Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca*, Facultatea Construcții de Mașini.

Studii aprofundate la specializarea: *Proiectare Asistată a Tehnologiilor Moderne* (secția în limba germană). Lucrare de dizertație: *Cercetări privind unele metode de obținere a produselor ecologice*, UTC-N, Iunie 1997.

1997-2003 - **Doctorand cu frecvență** la *Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca*, Facultatea Construcții de Mașini, Catedra TCM.

2003 - titlul de **Doctor** în domeniul *Inginerie Industrială*, cu lucrarea *Cercetări privind tehnologiile de prelucrare ecologice în construcția de mașini* (Coordonator: Acad. Prof.dr.ing. Csaba Gyenge) / O.M. Nr. 5663 din 15 decembrie 2003.

I.2 Sumar de activitate

• De la începutul carierei academice, în anul **2001**, am parcurs toate etapele academice până la gradul de conferențiar:

- 2001-2005 - **Asistent** la Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, Facultatea Construcții de Mașini, Catedra T.C.M.
- 2005-2009 - **Șef lucrări** la Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, Facultatea Construcții de Mașini, Catedra TCM/ Departamentul Ingineria Fabricației.
- 2009 - prezent - **Conferențiar universitar** la Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, Facultatea de Construcții de Mașini, Departamentul Ingineria Fabricației.

Posturile, ocupate prin concurs, au conținut pe linia de predare discipline din domeniul *Tehnologiilor de fabricație*. Acesta este principalul domeniu în care am dobândit cunoștințe tehnice și științifice și am dezvoltat o serie de competențe. În prezent predau **cursuri**, respectiv **laboratoare** și/sau **proiecte** la disciplinele:

- *Bazele ingineriei industriale* (în limbile română, germană, engleză) la specializările Inginerie Industrială Cluj-Napoca și Bistrița, TCM germană și TCM engleză;
- *Tehnologia fabricării produselor și Tehnologii de fabricație* la specializarea Inginerie Economică Industrială Bistrița;
- *Tehnologii de prelucrare prin așchiere II* la specializarea TCM germană,
- *Proiectare pentru mediu* la specializarea TCM Zalău;
- *Metode competitive de proiectare* la specializarea de master Procese de Producție Inovative și Management Tehnologic (în limba germană).

• **Recenzent** pentru următoarele reviste:

- *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies* (<http://www.springer.com/engineering/production+engineering/journal/170>)
- *Materials & Manufacturing Processes Journal* (<http://www.tandfonline.com/toc/lmmp20/>)
- *Journal of Cleaner Production* (<http://www.journals.elsevier.com/journal-of-cleaner-production/>)
- *Tribology International* (<http://www.journals.elsevier.com/tribology-international/>)
- *Journal of Machining Science and Technology* (<http://www.tandfonline.com/toc/lmst20/>)
- *Proceedings of the Romanian Academy. Series A: Mathematics, Physics, Technical Sciences, Information Science* (<https://acad.ro/proceedings.htm>)
- *Scientific Research and Essays* (<http://www.academicjournals.org/SRE>)

- **Membră** a comitetelor editoriale ale revistelor:
 - *Open Engineering (formerly Central European Journal of Engineering)* (<https://www.degruyter.com/view/j/eng>)
 - *International Journal of Materials Forming and Machining Processes* (<http://www.igi-global.com/journal/international-journal-materials-forming-machining/69666>)
 - *International Journal of Applied Management Sciences and Engineering* (<http://www.igi-global.com/journal/international-journal-applied-management-sciences/68203>)
 - *Journal of Mechanics & Industry Research* (<http://www.sciknow.org/journals/show/id/jmir>)
- **Membră** a comitetului de organizare al Conferinței Internaționale bienale *Modern Technologies in Manufacturing (MTeM)* în perioada 2001-2017 și membră în comitetul științific al aceleiași conferințe în 2017 (<http://www.mtem.utcluj.ro/>).
- **Membră** a *DAAAM International Association* ca membră a *Young Researches' and Scientists' Committee 2005*. (www.daaam.info).
- Din 2004 **membră** a *Asociației Universitare de Ingineria Fabricației (AUIF)*. (<http://eng.upt.ro/auif/index.php>).
- **Expert evaluator UEFISCDI** în competițiile: *Joint Applied Research Projects (PCCA) din cadrul Planului Național de Cercetare, Dezvoltare și Inovare 2007-2013, PNII, Black Sea ERA – NET* și în cadrul Programului *Capacități, Subprogramul "Cooperări bilaterale - Programul de cooperare bilaterală România – Austria" din cadrul Planului Național de Cercetare, Dezvoltare și Inovare 2007-2013, PN-II*.
- **Expert evaluator** pentru *National Science Centre (Narodowe Centrum Nauki)* Polonia, în cadrul competițiilor *SONATA 8* și *Preludium 8*, 2015-2016 (<https://osf.opi.org.pl>).
- **Membră** a comisiei de selecție *DAAD-Studienstipendien (Master)*, 2018.
- **Membră** în: *Consiliul Facultății Construcției de Mașini* (2012-2016), *Comisia de admitere la master* la Facultatea Construcției de Mașini (2010-2018), *Comisii de concurs pentru posturi didactice* în cadrul DIF, *Comisii de susținere referate* în cadrul pregătirii doctoranzilor, *Comisia de evaluare și modificare a planurilor de învățământ* ale programelor de licență *Tehnologia Construcțiilor de Mașini - TCM* (licență) și *Inginerie Virtuală și Fabricație Competitivă –IVFC* (master).
- Am participat la întocmirea dosarelor de acreditare *Inginerie Virtuală și Fabricație Competitivă* (master) 2007 și de evaluare periodică *ARACIS* pentru programele

Tehnologia Construcțiilor de Mașini în limba germană (licență) 2017, precum și a dosarelor pentru includerea în *Registrul Național al Calificărilor din Învățământul Superior* (RNCIS) 2018 a programelor de licență TCM.

I.3 Relevanța activității și impactul rezultatelor științifice obținute

I.3.1 Activități didactice

Relevanța activității și impactul rezultatelor științifice obținute s-au reflectat în cărțile, capitolele de carte și articolele publicate și în dezvoltarea a patru noi discipline incluse în planurile de învățământ ale specializării TCM (licență) *Bazele ingineriei industriale, Proiectare pentru mediu*, respectiv *Metode competitive de proiectare și Dezvoltare durabilă* la programul de master *Procese de producție inovative și management tehnologic (PPIMT)*.

În cadrul activităților didactice am acordat o deosebită atenție modului în care se realizează diseminarea adecvată a noțiunilor asociate proceselor de fabricație, atât în cazul disciplinelor *Tehnologii de prelucrare prin așchiere, Tehnologia fabricării produselor și Tehnologii de Fabricație*, dar mai ales în cazul disciplinei *Bazele ingineriei industriale*, disciplină care se regăsește în planul de învățământ al specializării Inginerie industrială în anul I (semestrul 2), când studenții au în general un bagaj limitat de cunoștințe din domeniul disciplinelor tehnice de specialitate.

Proiectare pentru mediu, o altă disciplină pe care o predau, se adresează studenților specializării TCM și beneficiază de experiența pe care o dețin în domeniu, atât prin prisma temei tezei de doctorat, lucrare axată pe problematica reducerii impactului ecologic al proceselor de fabricație, cât și prin întreaga activitate științifică/de cercetare desfășurată în cei peste 20 de ani de activitate. Lucrările de laborator la această disciplină se desfășoară sub forma unor studii de caz, pentru realizarea cărora studenții au posibilitatea de a utiliza soft-uri dedicate, ce permit analiza impactului ecologic al produselor/proceselor (*SimaPro, Design for Environment*) și de a accesa baze de date destinate aceluiași scop.

Pe aceeași direcție se încadrează și cursul pe care îl predau la disciplina *Metode competitive de proiectare*, concentrându-se asupra implementării principiilor *Ingineriei Concurente* în proiectarea proceselor de producție și în dezvoltarea de procese și produse inovative.

În anul 2003 am publicat cartea *Ingineria fabricației* (coautor) la Editura Alma Mater din Cluj-Napoca, în 2007 la Editura Casa Cărții de Știință Cluj-Napoca, o carte de *Ecoproiectare* (coautor) și în anul 2008 ca unic autor, la Editura U.T. PRESS Cluj-Napoca, cartea *Umweltfreundliche Zerspanung (Așchiera ecologică)*.

Recent am publicat la Editura UTPress suporturi de curs în format electronic pentru disciplinele *Bazele ingineriei industriale/Grundlagen der Fertigungstechnik / Manufacturing Fundamentals* (în limbile română, germană și engleză), *Tehnologii de fabricație, Tehnologii de prelucrare prin așchiere 2 / Spanende Fertigung* (în limbile română, germană). De asemenea am elaborat suporturi de curs pentru disciplinele *Proiectare pentru mediu* (https://tcm.utcluj.ro/wp-content/uploads/2019/03/Fratila-D_Exercitii-BF-QEP-2018.pdf), *Metode competitive de proiectare* (https://tcm.utcluj.ro/wp-content/uploads/2019/03/Fratila-D_Suport-de-curs-MCP-deutsch-2018.pdf) și un îndrumător cu probleme și întrebări (https://tcm.utcluj.ro/wp-content/uploads/2019/03/Fratila-D_Exercitii-BF-QEP-2018.pdf) pentru disciplina *Bazele ingineriei industriale*, materialele disponibile în format electronic pe site-ul Departamentului Ingineria Fabricației.

Cărțile, suporturile de curs și îndrumătoarele publicate au drept scop îmbunătățirea activității didactice și profesionale, iar temele abordate au vizat domeniul tehnologiilor de fabricație și cel al proiectării sustenabile a produselor și proceselor, domenii importante din pregătirea studenților ca viitori ingineri. Acestea dovedesc capacitatea de transpunere sub forma unor materiale didactice a cunoștințelor și elementelor dobândite în cadrul activităților de cercetare și documentare.

Ca responsabil cu activitatea de laborator la disciplinele *Tehnologia fabricării produselor, Bazele inginerie industriale* am elaborat în colectiv fascicule de lucrări destinate uzului didactic. După adaptarea conținutului lor la noile programe analitice, conform planurilor de învățământ adoptate în sistemul de învățământ Bologna, acestea au fost publicate în îndrumătorul de lucrări de *Tehnologii de fabricație* (Editura UT PRESS, 2010).

Menționez, de asemenea, faptul că desfășor activități de îndrumare a studenților de la secțiile IEI și TCM și a studenților masteranzi în vederea elaborării proiectelor de diplomă respectiv a lucrărilor de dizertație, căutând să propun teme de natură să contribuie la îmbunătățirea pregătirii profesionale a absolvenților. O parte dintre studenții cu care colaborez în acest sens, au abordat, de asemenea, teme propuse de diferite firme din domeniul Inginerie Industrială.

Doresc să subliniez faptul că acumularea experienței didactice din ultimii ani se dovedește extrem de importantă nu numai sub aspectul instrumentelor de transmitere a cunoștințelor către studenți, ci și al interacțiunii cu aceștia pe plan uman. Pe parcursul fiecărui an de studiu am primit reacții pozitive din partea studenților, atât în ceea ce privește conținutul cursurilor, cât și din punct de vedere al manierei de comunicare și relaționare.

Competențele didactice au fost puse în evidență de metodele de predare, care se bazează pe învățarea prin descoperire, prin interacțiune și problematizare și, totodată, prin metode moderne de expunere (proiector, calculator, prezentări PowerPoint și filme scurte pentru exemplificarea sau simularea diferitelor procese de prelucrare). Noțiunile, însușite de studenți la cursurile pe care le susțin, asigură, prin exemplele concrete prezentate, asimilarea cunoștințelor necesare proiectării și realizării practice a proceselor de fabricație.

Am urmărit în permanență dezvoltarea de noi competențe profesionale prin participarea la diferite cursuri, workshop-uri, seminarii de specialitate și programe internaționale de schimburi academice. Cele mai relevante sunt: *Central European Exchange Program for University Studies-CEEPUS* (Rețelele RO-01, PL-13), *Kooperation NANO'05 Symposium*, noiembrie 2005 Wiener Neustadt, Austria, *Open Academic Seminar la University of Oldenburg, Germania* (octombrie, 2005). *3D Image Processing, Bio-handling, Force Sensors, Mobile Autonomous Microrobots, Summer school la Fondation Suisse pour la Recherche en Microtechnique Neuchâtel, Elveția* (noiembrie 2005). *MicroHandling & Biomedical Applications, Open Academic Seminar. CEMOP/UNINOVA-Portugal, (Lisabona, Portugalia, mai 2006)*. *Emerging electronic materials and devices for micro-technology applications. Training in Microtehnologii la Scuola Superiore Sant'Anna, Pontedera (Pisa, Italia, mai 2006)*, *Summer school: Highlights in Micro technology, iulie 2006, Neuchâtel, Switzerland. Organizat de Fondation Suisse pour la Recherche en Micro technique (FSRM), Institute of Micro technology of the University of Neuchâtel, Switzerland și University of Besançon, France., Seminar "Forscherin Sein- erfolgreiche Karrieren in der Wissenschaft", Viena, Austria, First MINOS - EURONET Strategy Forum on the Impact of Converging Technologies: High technologies, innovation policy and regional development, București România*. În continuarea perfecționării pe această direcție am participat în noiembrie 2010 la cursul *Microfabrication Processes*, organizat la Institutul National de Cercetare-Dezvoltare pentru Microtehnologie (IMT-București) în colaborare cu FSRM (Neuchatel – Elveția).

Amintesc, de asemenea, participarea la: *seminarul de formare pentru implementarea sistemelor eficiente de asigurare și de îmbunătățire a calității în instituțiile de învățământ superior din România*, desfășurat în 2008 la Sinaia, școlile de vară *Sommekurs: Deutsch im Ländle von Porsche und Schiller*, Universität Hohenheim (Stuttgart 5-27 august 2013, 3-27 august 2015), *seminarul de formare continuă Deutsch als Wissenschaftssprache im Kontext von Dhoch3: Grundlagen, zentrale Inhalte und Anwendungsszenarien*, București, 13-14 decembrie 2018.

I.3.2 Activități de cercetare

Alături de activitatea didactică, cercetarea științifică a reprezentat o componentă importantă a activității mele, care a debutat cu perioada în care am ocupat poziția de doctorand cu frecvență în cadrul *Catedrei TCM*.

Capacitatea de a lucra în echipă, de a coordona proiecte de cercetare-dezvoltare și eficiența colaborărilor profesionale și științifice reies, pe de o parte din proiectele de cercetare pe care le-am coordonat sau în care am fost membră și pe de altă parte din activitățile în cadrul *Laboratorului de Cercetare pentru Tehnologii Neconvenționale și Fabricație Competitivă* de la DIF.

Participarea la cursul *How to write a Competitive Proposal from Framework 7*, organizat în 2007 la București de *Romanian Association of Research Managers and Administrators (RARMA)*, în colaborare cu *Hyperion Ltd (Irlanda)* m-a ajutat în dezvoltarea aptitudinilor de elaborare a propunerilor de proiecte de cercetare și a abilităților în ceea ce privește coordonarea activităților unei echipe de cercetare și posibilitățile de derulare a managementului unor proiecte cu o tematică de cercetare complexă.

Am încercat dezvoltarea de direcții noi de cercetare în cadrul activităților științifice desfășurate, direcții ce acoperă subiecte din domeniul fabricației, cu un accent special pe proiectarea și fabricația ecologică. De-a lungul celor peste 20 de ani de activitate, principalele direcții de cercetare abordate au fost:

- *Metode și tehnici ecologice de fabricație în construcția de mașini;*
- *Ecoproiectare, proiectarea pentru mediu a produselor și proceselor;*
- *Evaluarea impactului ecologic al proceselor de fabricație prin modelare matematică;*
- *Metode și instrumente avansate de fabricație și asamblare în micro tehnologii.*

În ceea ce privește capacitatea de transfer al cunoștințelor și rezultatelor către mediul științific, economic sau social și de diseminare a propriilor rezultate științifice am avut în vedere următoarele aspecte:

- pentru publicarea de cărți și capitole în cărți am optat pentru edituri recunoscute CNCSIS, precum *UTPress, Alma Mater, Casa Cărții de Știință*, respectiv edituri internaționale de prestigiu ca *Elsevier și Springer*.
- pentru publicarea în jurnale științifice m-am orientat spre reviste cotate ISI (Thompson Reuter): *Journal of Cleaner Production, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Materials and Manufacturing Processes, Proceedings of Romanian Academy- Series A*.
- participarea la o serie de conferințe naționale și internaționale (*MTeM; CosME, ICaMeS, DAAAM*).

Am fost **director /responsabil** al proiectelor:

- *Research and Training Network ASSEMIC-Advanced Methods and Tools for Handling and Assembly in Micro technology*. EC FP6 Marie Curie RTN. Contract finanțat de Uniunea Europeană. Director: Assoc.prof. Werner Brenner (Vienna University of Technology – Institute of Sensor and Actuator Systems); perioada de derulare: 2004-2007; beneficiar: Uniunea Europeană.
- *Cercetări privind introducerea tehnicilor de așchiere ecologică în construcția de mașini*. Contract tip AT cu Ministerul Educației și Cercetării, Tema nr.9 (Cod 175/2003) - Contract Nr. 33523/2003; beneficiar: Ministerul Educației și Cercetării (CNCSIS). Perioada de derulare: 2003, Buget: 24.00 Euro.
- *Cercetărilor privind producerea de noi preparate agroalimentare sau para-farmaceutice competitive pe bază de legume, sare și extracte naturale din flora spontană prin implementarea unor metode de procesare*. Programul AGRAL, Subprogram S5 INDAL/2004-2006, realizat în parteneriat cu S.C. Minesa Cluj-Napoca. Perioada 2004-2006. Buget UTCN: 10.700 Euro.

Am fost **membră** în următoarele **proiecte naționale**:

- *Cercetări privind optimizarea etapelor ciclului de viață a produselor și prelucrarea prin așchiere ecologică a acestora*. Contract de tip A cu Ministerul Educației și Cercetării (Nr. 1546/2007-2008); beneficiar: Ministerul Educației și Cercetării (CNCSIS); Director proiect: Prof.dr.ing. Olimpia Roș; perioada de derulare: 2007-2008; Buget: 185400 lei.

- *Instalație Pilot pentru studiul experimental al etanșărilor frontale cu impulsuri.* Contract Tip AT cu Ministerul Educației și Cercetării, Tema nr.14, Cod CNCISIS 156/2003; beneficiar: Ministerul Educației și Cercetării (CNCISIS). Director: Conf.dr. ing. Marius Pustan; perioada de derulare: 2003.
- *Cercetări privind introducerea proiectării ecologice în construcția de mașini.* Contract de tip A cu Ministerul Educației și Cercetării (Tema 40/1998-1999); beneficiar: Ministerul Educației și Cercetării (CNCISIS); Director: Prof.dr.ing. Olimpia Roș; perioada de derulare: 1998-1999.
- *Modernising of teaching and scientific research concerning the environmental aspects in the construction of machines.* Proiect TEMPUS AC-JEP-13578-98: Network of leading centre on continuing education for industry. Contract Nr. 7 IP 051249, dintre ETH Zurich și UT Cluj-Napoca, încheiat între Swiss Național Science Foundation and Process Engineering, UT Cluj-Napoca și UP București. Director: Prof.dr.ing. Csaba Gyenge perioada de derulare:1997-1998.
- *Asigurarea echității sociale prin extinderea accesului la studii universitare.* Domeniu vizat: Creșterea echității sociale, în vederea incluziunii sociale și sporirea accesului la învățământul superior (inclusiv cele privitoare la consilierea și orientarea în carieră. Cod de înregistrare CNFIS-FDI-2016-0010 (ASESUN). Durata proiectului: august-decembrie 2016. Coordonator grup țintă.
- *Dezvoltarea posibilităților de prelucrare a materialelor compozite avansate prin tăiere de precizie cu jet de apă.* PN-III-P2-2.1-BG-2016-0216 Director: Ioan Alexandru Popan (UTC-N). Partener: SC TRAMBUS SRL.

Am fost /Sunt **membră** în următoarele **proiecte internaționale**:

- *Umweltgerechte Zerspanung durch den Einsatz der Minimalschmiertechnik beim Wälzfräsen.* Director: Dr. Thomas Emmer (Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Maschinenbau, IFQ); perioada de derulare: 1999-2001.
- *Improvement of Industrial Production Industrial Production through Integration of Macro, Micro- and Nanotechnologies.* EC FP6 Thematic priority: Nanotechnologies and Nanosciences, knowledge-based multifunctional materials and new production processes and devices (NMP). Coordonator proiect: Dr.Ana Almansa, ARCS Seibersdorf Research GmbH Austria; perioada de derulare: 2006-2009.
- *Tools and Technologies for the Analysis and Synthesis of Nanostructures.* EC FP6 Thematic priority: Nanotechnologies and Nanosciences, knowledge-based multifunctional materials and new production processes and devices (NMP). Coordonator project: Prof.

Jerzy Mielczarski, Institute National Polytechnique de Lorraine Franța; perioada de derulare: 2005-2007.

- *Adm-ERA-Reinforcing Additive Manufacturing research cooperation between the Central Metallurgical Research and Development Institute and the European Research Area.* FP7 European Project, Grant No. 295016, Durata: 3 ani (2012-2014), Finalizat, Buget 496.634 €, (Responsabil UTCN: Prof. Nicolae Bâlc), <http://www.fp7-admera.org/>
- *Boosting the scientific excellence and innovation capacity in additive manufacturing of the TUC-N.* Horizon 2020: Proiect European AMaTUC, Grant Agreement No. 691787, Perioada 2016 –2018, buget 999.443 Euro, Coordonator: Prof. Nicolae Bâlc, www.amatuc.com
- *Directional Composites through Manufacturing Innovation,* Horizon 2020: DiCoMi-No. 778068/RISE-2017, 2017–2021, buget 1.426.500 Euro, Responsabil UTCN: Prof. Nicolae Bâlc, www.dicomi.eu.

O descriere sumară a obiectivelor câtorva dintre proiectelor menționate anterior și a contribuțiilor personale este prezentată în cele ce urmează.

Un proiect, pe care l-am coordonat ca director, este *Cercetări privind introducerea tehnicilor de aşchiere ecologică în construcția de mașini.* Printre obiectivele proiectului s-au numărat:

- *Examinarea conceptuală a produselor pentru a se reliefa incidența acestora asupra mediului înconjurător;*
- *Evaluarea consumului de resurse (tipul, cantitatea și calitatea materiilor prime, respectiv a materialelor auxiliare) ce concură la realizarea unui produs, pentru a se găsi o alternativă mai puțin poluantă sau nepoluantă de fabricație;*
- *Examinarea unor etape din ciclul de viață al produselor în vederea determinării impactului ecologic și stabilirii unor modalităților de valorificare (recuperare, reutilizare, reciclare) a produselor uzate sau a unor posibilități de tratare a produselor uzate care nu pot fi valorificate;*
- *Analizarea proceselor de fabricație în vederea găsirii unor soluții de reducere a potențialului poluant al acestora.*

Doresc să evidențiez implicațiile acestui proiect în dezvoltarea de produse ecologice și în implementarea proceselor de producție bazate pe tehnici ecologice, subiect de actualitate tehnico-științifică imediată, activitățile de cercetare fiind continuare în

proiectul *Cercetări privind optimizarea etapelor ciclului de viață al produselor și prelucrarea prin aşchiere ecologică a acestora*.

Proiectul la care am participat în calitate de responsabil UTC-N, Programul AGRAL, realizat în parteneriat cu S.C. Minesa Cluj-Napoca, s-a derulat în perioada 2004-2006 și s-a concentrat asupra *cercetărilor privind producerea de noi preparate agroalimentare sau parafarmaceutice competitive pe bază de legume, sare și extracte naturale din flora spontană prin implementarea unor procese de procesare*. Proiectul a avut ca principale obiective:

- *Determinarea structurii optime a liniei tehnologice de procesare a preparatelor enumerate anterior;*
- *Elaborarea proiectului pentru linia tehnologică, proiectarea modelului funcțional;*
- *Experimentarea în ansamblu a liniei tehnologice și elaborarea documentației tehnice pentru realizarea prototipului liniei tehnologice integrate.*

Experiența profesională acumulată în alte instituții decât cea în care lucrez m-a ajutat să mă dezvolt atât din punct de vedere didactic cât și al cercetării. Reamintesc stagiile de documentare și cercetare desfășurate la: • *ETH Zürich* Elveția (1998, bursă de cercetare în cadrul proiectului TEMPUS AC-JEP-13578-98: *Network of leading centre on continuing education for industry*), • *Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg* Germania, *Fakultät für Maschinenbau, IFQ* (noiembrie 2000 - iunie 2001, bursă doctorală prin Oficiul Național al Burselor de Studiu în Străinătate (ONBSS); februarie-septembrie 2005, stagiul de cercetare post doctorală finanțat de *Katholischer Akademischer Austauschdienst –KAAD, Bon*) • *Austrian Research Centre Seibersdorf –ARCS*, Viena, Austria (octombrie 2005–ianuarie 2007, bursă Marie Curie în *Research and Training Network ASSEMIC*).

În continuarea colaborării cu *Otto von Guericke Universität– Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung Magdeburg*, începută în anul 2000 în cadrul unui stagiul de cercetare susținut financiar printr-o bursă guvernamentală, obținută prin *Oficiul Național al Burselor de Studiu în Străinătate (ONBSS)*, în anul 2005 am participat la un *stagiul de cercetare post doctorală* la același institut. Finanțarea a fost asigurată de *Katholischer Akademischer Austauschdienst (KAAD) Bonn*. Activitățile de cercetare desfășurate pe durata acestui stagiul au vizat: *implementarea tehnologiilor și proceselor ecologice în practica industrială și analiza impactului tehnologic, economic și social al acestora*.

EC-FP6 Marie Curie - *Research and Training Network ASSEMIC-Advanced Methods and Tools for Handling and Assembly in Micro technology* este unul dintre cele mai importante

proiecte de cercetare la care am participat. Contractul, finanțat de Uniunea Europeană având un buget total de 2.760.000 euro, a fost coordonat de Assoc.prof. Werner Brenner de la Vienna University of Technology – Institute of Sensor and Actuator Systems și s-a derulat în perioada 2004-2007. Am participat la acest proiect în perioada octombrie 2005 – ianuarie 2007, ca responsabil UTC-N, *ER (Experienced Researcher)* într-un colectiv internațional la *Austrian Research Centre Seibersdorf (ARCS)*. Pentru ocuparea acestei poziții s-a derulat o competiție externă, competiție pe care am câștigat-o și ca urmare am lucrat la ARC Seibersdorf, cu contract de muncă. În mod concret, responsabilitățile mele au fost axate pe: *analiza și dezvoltarea unor strategii de creștere a eficienței micro asamblării, automatizarea micro asamblării pentru producerea MEMS, micro asamblarea MEMS prin lipire folosind procese ce au la bază metode și instrumente pentru dozarea fără contact la nivel micro a adezivilor specifici acestor tehnologii și dezvoltarea unui stand experimental (ca prototip de laborator) pentru micro asamblare.*

Activitatea mea la ARCS s-a bucurat de aprecierile Dnei Ing. Fiz Dr. Ana Almansa (coordonator științific al proiectului ASSEMIC), o parte dintre rezultatele obținute fiind menționate în raportul anual de cercetare al institutului (*ARCS Annual Report for ASSEMIC-Advanced Methods and Tools for Handling and Assembly in Micro technology 2006*), și de asemenea diseminate în comunitatea științifică cu prilejul unor manifestări științifice internaționale de prestigiu dintre care menționez: *IPAS 2006* (Bad Hofgasstein, Austria), *IASTED 2006* (Honolulu, USA), *ISAM 2007* (Ann Arbor, USA), *4M 2007* (Borovets, Bulgaria). Prin specificul său - *Research and Training Network*- acest proiect mi-a permis, pe lângă desfășurarea activităților de cercetare, și participarea la numeroase training-uri și seminarii de specialitate.

Pe durata stagiului din Austria pe lângă activitățile din proiectul ASSEMIC am făcut parte din echipele de cercetare ale altor două proiecte europene, în care ARCS era coordonator sau partener. Primul dintre acestea, proiectul *Improvement of Industrial Production through Integration of Macro-, Micro- and Nanotechnologies* a constituit o acțiune coordonată, având ca scop stabilirea unei platforme tehnologice europene (PTE) privind Macro-, Micro- și Nanofabricația și a unei agende de cercetare strategice. Aceste obiective au fost realizate prin:

- *Înființarea grupurilor de experți și implicarea actorilor cheie, inclusiv companii industriale, furnizori de tehnologie, entități decizionale, platforme și organisme de finanțare, etc, în sprijinirea înființării unei PTE pe Macro- Micro- și Nanofabricație;*

- *Evaluarea tehnologiilor și analiza comparativă a celor mai bune practici cu contribuții cheie la definirea de teme de cercetare strategică pentru Agenda Macro- Micro- și Nanofabricație;*
- *Diseminarea, în strânsă coordonare cu organizatorii celor mai relevante evenimente europene în domeniul Micro- și Nanotehnologii;*
- *Exploatarea de tehnologii și a potențialului industrial prin îmbunătățirea metodelor de producție pentru introducerea unor noi produse și procese;*
- *Comunicare și consultanță pentru organismele decizionale, organisme de finanțare și platforme (CE, ministere naționale, Eureka, ManuFuture, etc).*

Alt proiect internațional la care am participat *Tools and Technologies for the Analysis and Synthesis of Nanostructures*. a avut ca obiectiv dezvoltarea unor noi instrumente de manipulare și control, dispozitive pentru caracterizare și/sau manipulare la nivel molecular și atomic. Printre cele mai reprezentative rezultate se numără crearea unui prototip multifuncțional de caracterizare a reactivității termice, chimice și biologice. Acesta constă din dezvoltarea de chip-uri, care încorporează o serie de sonde inteligente cu actuatori integrați și complet adresabili, cu capacitate mare de analiză și sinteză a datelor. Contribuția personală în cadrul acestui proiect a vizat tehnologiile de microasamblare a chip-urilor amintite anterior.

Articolele, publicate în reviste de specialitate și în volumele unor manifestări științifice, dovedesc capacitatea de sinteză, încadrarea problematicii abordate în domeniul *Inginerie Industrială* și demonstrează nivelul tehnico-științific dobândit:

- 13 articole indexate în reviste/în volumele unor manifestări științifice indexate ISI Thomson Reuters (11 de la ultima promovare, 11 în reviste, 9 ca prim/unic autor);
- 29 articole in extenso publicate în reviste și volumele unor manifestări științifice indexate în baze de date internaționale, (9 de la ultima promovare, 16 ca prim autor);
- 21 articole in extenso publicate în reviste și volumele unor manifestări științifice neindexate.

SECȚIUNEA II. Rezultate obținute în cercetarea științifică

CAPITOLUL 1

FABRICAȚIA ȘI MEDIUL ÎNCONJURĂTOR

1.1 Introducere

Industria încearcă să devină sustenabilă prin schimbări în design-ul de produs, reciclarea materialelor, recuperarea resurselor, procese de producție inovative, în scopul de a îndeplini obiectivul de *dezvoltare industrială durabilă*. *Procesele de producție* se numără printre factorii care pot contribui în mod semnificativ la *dezvoltarea durabilă*. Din păcate, există încă o lipsă de practici de implementare, în ceea ce privește procesele de fabricație în contextul tranziției la dezvoltarea industrială durabilă.

Direcțiile de cercetare în domeniul proceselor de fabricație inovative și sustenabile se concentrează pe capacitatea de a echilibra interacțiunile complexe dintre nevoia de dezvoltare și efectul progresului tehnologic asupra mediului, precum și pe modalitățile practice de realizare a stabilității ecologice și a dezvoltării industriale durabile. Acestea includ studii axate pe evaluarea efectelor dăunătoare ale producției de energie convențională, deprecierea resurselor naturale, schimbările climatice, consumul de materiale și impactul proceselor de fabricație asupra mediului înconjurător.

Un instrument practic de implementare a principiilor practice ale proiectării ecologice este *Ingineria concurentă*, aceasta reprezentând un mediu nou de proiectare și dezvoltare al produselor și proceselor, în care toate persoanele responsabile pentru dezvoltare și producție sunt implicate încă din primele etape ale concepției produsului. 70-80% din costurile unui produs sunt generate în stadiile incipiente de dezvoltare, atunci când se stabilește configurația produsului și se iau decizii în ceea ce privește alegerea proceselor de fabricație și a materialelor din care produsul va fi realizat. Pentru ca produsul final să fie

competitiv este absolut esențial ca aceste costuri să fie estimate în momentul luării acestor decizii.

Dezvoltarea de noi produse, pentru a satisface cerințele de consum și pentru a le lansa pe piață cât mai curând posibil, devine un element cheie care permite accesul și menținerea pe piață a companiilor. Pentru a rămâne competitive și a se dezvolta, întreprinderile trebuie să ofere clienților noile lor produse în mod rapid și continuu. În același timp, companiile trebuie să asigure costuri de producție reduse, un nivel înalt de calitate al produselor și, mai nou, un impact ecologic redus asupra mediului. [Bha 99, Gra 94].

Suplimentar, domeniile industriale care desfășoară activități de producție resimt presiunea tot mai mare generată de crizele financiare, concurența globală, cererea pieței, legislația tot mai strictă în ceea ce privește calitatea mediului înconjurător. Este deja bine cunoscut faptul că dezvoltarea durabilă reprezintă acel model de dezvoltare care satisface nevoile prezentului fără a compromite posibilitatea generațiilor viitoare de a răspunde propriilor nevoi. Adoptarea conceptului de dezvoltare durabilă în procesele de producție oferă industriei de o cale eficientă pentru a obține o mai bună performanță economică, ecologică și socială. Problemele globale de mediu cauzate de consumul de resurse naturale și poluarea creată prin fabricarea și consumul de produse tehnice, au condus la creșterea presiunii economice și celei datorate reglementărilor de mediu tot mai restrictive, care se aplică atât producătorilor cât și utilizatorilor [Bre 05, Fik 96, Nie 03, Wes 08, You 97].

În scopul dezvoltării industriale durabile este necesară o abordare la toate nivelurile și a tuturor aspectelor, inclusiv în ceea ce privește procesele de prelucrare. În acest fel, evaluarea sustenabilității tehnicilor de prelucrare ecologice este nu numai o metodă pentru sprijinirea proiectării tehnologice, ci și un instrument al procesului decizional.

Promovarea *producției durabile* se poate realiza printr-o îmbunătățire a tehnologiilor de prelucrare prin intermediul unor procese alternative de prelucrare ecologică. Aceste procedee trebuie prezentate comparativ în raport cu performanțele procedeelelor convenționale. S-a constatat că tehnologiile ecologice de prelucrare au un potențial ridicat de a reduce costurile și de a îmbunătăți competitivitatea prin reducerea consumului de resurse. Prin urmare, generând mai puține deșeuri și consumând mai puțină energie, impactul social și ecologic va fi mai redus. Aceste constatări confirmă că tehnicile de prelucrare alternative oferă condiții pentru îndeplinirea câtorva dintre piloni producției durabile, cât și rezultate superioare proceselor de prelucrare convenționale.

Creșterea gradului de conștientizare a problemelor legate de sustenabilitate în procesele de prelucrare, în special în cazul procesării materialelor avansate, prelucrări la care se identifică răcirea și ungerea pe bază de lichide de aşchiere ca element de bază al proceselor non-sustenabile, au condus la necesitatea desfășurării unor activități de cercetare și dezvoltare pentru identificarea unor metode/mecanisme alternative de răcire și/sau de ungere [Bre 06, Gra 00]. În afară de problemele de mediu și de sănătate, 15-20% din costurile totale de prelucrare sunt legate de lichidele de ungere și răcire. Prin urmare, tehnologiile de prelucrare alternative, bazate pe studiile și progresele înregistrate, în ceea ce privește lubrifiții, se dovedesc necesare. Alternativa durabilă la prelucrarea convențională cu cantități mari de lichid de aşchiere sunt tehnicile ecologice de prelucrare, oferind o îmbunătățire a performanțelor procesului, sistemului și produsului final prin aplicarea conceptului 6R: *reducere, reutilizare, recuperare, reciclare, recondiționare, reproiectare*.

Nivelul de sustenabilitate al unui produs se exprimă prin indicii de durabilitate (*PSI – Product Sustainability Index*) prin luarea în considerare a următorilor șase factori majori contributivi:

- 1. Impactul ecologic al produsului :* • factorul ciclului de viață (inclusiv durata de viață utilă a produsului), • efectul ecologic (inclusiv emisii, toxicitate, etc), • impactul regional și global (de exemplu, emisii de CO₂, distrugerea stratului de ozon, etc);
- 2. Impactul social al produsului:* • siguranța operațională, • efecte asupra sănătății, • impact social (calitatea vieții, nivelul de confort, etc.);
- 3. Funcționalitatea produsului:* • durata de viață, • construcția modulară, • ușurință în utilizare, • mentenanță, • ergonomie, • fiabilitate, • eficiență funcțională;
- 4. Utilizarea și economicitatea resurselor produsului:* • eficiență energetică, • utilizarea surselor regenerabile de energie, • utilizarea rațională a materialelor, • vandabilitatea / valoarea de piață, • instalare / costuri de instruire a personalului (training-uri), • costurile operaționale (costul forței de muncă, costurile de capital, etc);
- 5. Prelucrabilitatea produsului;* • metode de fabricație, • asamblare, • ambalare, • transport, • depozitare;
- 6. Reciclabilitatea/Recondiționarea produsului:* • dezasamblare, • reciclabilitate, • eliminare, • recondiționare/reutilizare.

Accentul principal în identificarea și definirea diferitelor elemente care contribuie la *sustenabilitatea proceselor de fabricație* cade pe stabilirea unei metodologii unitare bazate pe standarde științifice pentru a evalua gradul de durabilitate al unui proces de fabricație.

Figura 1.1 indică factorii importanți de influență care afectează sustenabilitatea unui proces de prelucrare: • *consumul de energie*, • *costurile de fabricație*, • *impactul asupra mediului*, • *siguranța operațională*, • *sănătatea personalului*, • *managementul deșeurilor*.

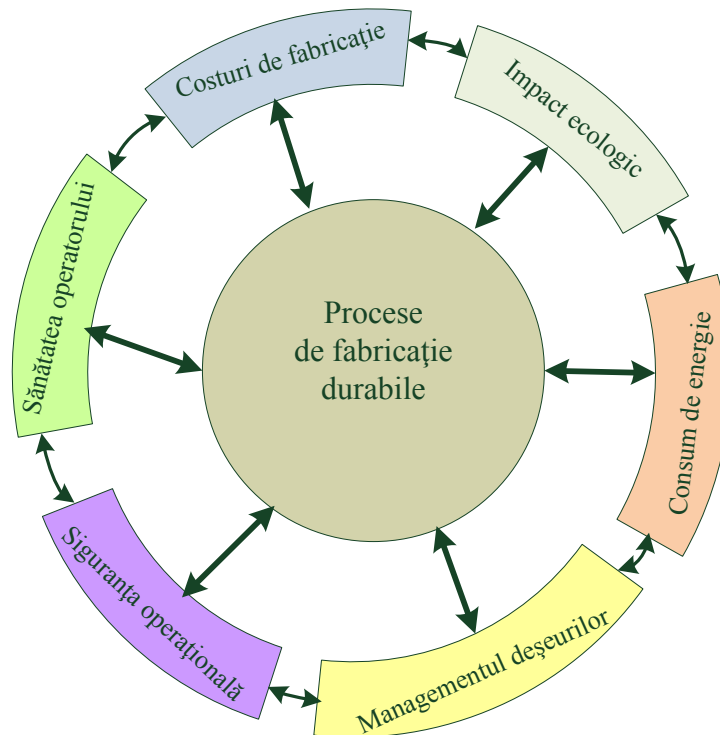


FIGURA 1.1. Factori majori care afectează sustenabilitatea unui proces de prelucrare.

Selectarea și luarea în considerare a acestor șase parametri, în stadiul preliminar de evaluare a sustenabilității, nu restricționează includerea și a altor parametri semnificativi, cum ar fi cerințele legate de aspectul sau funcționalitatea produsului, care afectează procesul de luare a deciziilor și sunt legate de costurile de prelucrare și de consumul de energie, dar care este de așteptat să aibă un efect secundar asupra sustenabilității procesului de prelucrare.

Toți cei șase parametri menționați au niveluri diferite de așteptare, așa cum este indicat în *Tabelul 1.1*, dar este evident că acești factori nu pot atinge simultan nivelurile optime din cauza implicațiilor tehnologice, a celor legate de costuri și a interacțiunilor semnificative între aceștia, care necesită de multe ori compromisuri.

Măsurarea și cuantificarea efectului factorilor contributivi, prezentați în *Tabelul 1.1*, reprezintă o provocare tehnică semnificativă, pentru utilizarea într-un model de

optimizare. Astfel, doar o soluție optimizată ar fi practică, și acest lucru ar implica combinații de niveluri minime și maxime ale acestor parametri, realizabile în cadrul constrângerilor impuse. Nivelul atins este relativ și specific fiecărui caz analizat.

TABELUL 1.1. Factori măsurabili ai sustenabilității în procesele de așchiere [Fra14]

Factor măsurabil	Nivel dorit
Consum de energie	Minim
Ecologicitate	Maxim
Costurile prelucrării	Minim
Siguranță operațională	Maxim
Sănătatea personalului	Maxim
Reducerea deșeurilor	Maxim

▪ *Consumul de energie*

În timpul operațiilor de prelucrare nivelul consumului de putere poate fi evaluat în raport cu valorile teoretice, pentru a calcula eficiența utilizării energiei. Studii semnificative [Cla 08, Dav 15, Raj 10] au fost efectuate în acest domeniu pentru a monitoriza consumul de energie și pentru a evalua eficiența energetică. Economia de energie în procesele de fabricație este unul dintre factorii care influențează sustenabilitatea și care trebuie luat în considerare pentru întreaga durată de funcționare a echipamentelor de producție, cu economii semnificative pe termen lung. Pentru orice de operație de prelucrare, consumul de energie poate fi măsurat în timp real. Dacă operația este efectuată pe aceeași mașină de la furnizori diferiți sau pe două mașini diferite, consumul de energie poate varia, din cauza diferențelor dintre echipamente sau din cauza condițiilor de prelucrare în procesele de fabricație. Aplicarea de fluide de răcire și lubrifianți adecvați, selecția corectă a sculelor, condițiile de așchiere, combinațiile de materiale sculă-semifabricat cât și facilitarea îmbunătățirii condițiilor de tribologice pot reduce consumul de energie într-un proces de prelucrare.

Prin urmare, în industrie stabilirea unui standard pentru consumul de energie este relativ complexă. Consumul minim de energie este, însă, de dorit din punct de vedere al standardelor/cerințelor globale privind energia. În cazul proceselor de prelucrare prin așchiere, există un nivel minim de energie realizabil pentru fiecare operație de prelucrare. În evaluarea sustenabilității consumului de energie/putere, se anticipează că sursele preferate de energie sunt cele ecologice din resurse regenerabile. În cazul în care resursele regenerabile de energie sunt disponibile din abundență și sunt utilizate în industrie pe scară largă, tipul sursei de energie poate fi inclus în procesul de evaluare a sustenabilității sistemului.

▪ *Costurile de fabricație*

Costurile de producție implică o serie de cheltuieli începând de la activitățile de planificare ale procesului, până când reperul prelucrat este transferat la următoarea stație de lucru, inclusiv de timpii de așteptare. Într-o operație de prelucrare, rata de îndepărtare a materialul depinde de condițiile de așchiere selectate și de capacitatea mașinilor-unelte și a sculelor folosite. Criteriul de alegere corespunzătoare a mașinilor unelte și a sculelor ar putea facilita, în general, o operație de prelucrare eficientă din punct de vedere al costurilor. Numeroase soft-uri sunt în prezent disponibile pentru optimizarea costurilor de prelucrare prin selectarea unor condiții de prelucrare corespunzătoare. În plus, există alți factori care pot influența direct sau indirect costurile, determinați de efectele asupra mediului și sănătății operatorului și aspecte legate de siguranța procesului. Componentele de cost pentru reciclarea și reutilizarea de materiale auxiliare, cum ar fi lichidele de așchiere trebuie, de asemenea, să fie luate în considerare în costul total de prelucrare, alături de costul sculelor.

▪ *Impactul asupra mediului*

Factorii de bază care contribuie la poluarea mediului înconjurător, cum ar fi emisiile rezultate sau utilizarea de materiale toxice, inflamabile sau explozive, contribuie la impactul proceselor asupra mediului înconjurător. Parametrii măsurabili au fost definiți și sunt actualizați în permanență. Seria de standarde ISO 14000 a fost concepută pentru a ajuta întreprinderile să îndeplinească și să își îmbunătățească sistemele de management de mediu. Motivația implementării acestor standarde poate veni din necesitatea de a gestiona mai bine conformarea cu reglementările de mediu, din căutarea modalităților de creștere a eficienței procesului, din cerințele clientului sau din presiunile comunității.

▪ *Siguranța operațională*

Nivelul de nesiguranță al interacțiunii operatorului cu echipamentele în timpul unei operații de prelucrare și proiectarea ergonomică a interfeței echipamentelor sunt în centrul atenției, alături de respectarea cerințelor de siguranță reglementate. În general, aspectele de siguranță în legătură cu un proces de fabricație pot fi împărțite în două categorii: securitatea personalului și siguranța muncii. Date statistice privind respectarea/încălcările acestor reglementări și măsurile corective asociate, sunt în curs de revizuire și actualizare.

▪ *Sănătatea personalului*

În evaluarea aspectelor privind de sănătatea personalului, elementele care contribuie la durabilitatea procesului de prelucrare se bazează pe respectarea cerințelor impuse

companiilor și de reglementarea aplicării legislației specifice privind emisiile și deșeurile rezultate din operațiile de prelucrare și de impactul lor asupra forței de muncă expusă direct. Cele mai multe fluide pentru prelucrarea metalelor, utilizate ca medii de răcire și lubrifianți, conțin cantități mari de substanțe chimice adăugate pentru a spori performanțele de prelucrare. În timp, containerele utilizate pentru stocarea lichidelor de așchiere devin un mediu ideal pentru dezvoltarea bacteriilor dăunătoare. Există modalități de a evita aceste probleme, dar momentan niciuna dintre aceste metode nu este utilizată în practică din cauza insuficienței informațiilor și a metodologiilor de aplicare.

- *Managementul deșeurilor*

Reciclarea și eliminarea tuturor tipurilor de deșeuri rezultate, în timpul și după procesul de fabricație sunt contabilizate în această categorie. Generarea de „zero deșeuri” în mediul înconjurător este condiția ideală pentru produse și procese, deși nu este încă fezabilă tehnologic. Cu toate acestea, eforturile de a găsi mijloace de reducere sau eliminare deșeurilor continuă.

1.2. Interacțiunea activităților industriale cu mediul înconjurător

Revoluția industrială a transformat atât societatea și cât și interacțiunea acesteia cu mediul, sporind volumul de resursele naturale utilizate, ritmul de dezvoltare de noi produse și procese, dar și volumul de deșeuri. Astfel s-au produs modificări permanente prin epuizarea resurselor, modificarea habitatelor naturale și poluarea cauzată de produsele secundare nedorite rezultate din procesele de producție și de produsele eliminate la sfârșitul ciclului lor de viață utilă.

Recent, preocupările privind calitatea mediului înconjurător au determinat industria prelucrătoare să-și asume un rol proactiv în dezvoltarea proceselor de producție curate și în proiectarea produselor reciclabile. Obiectivul este modelul de dezvoltare industrială durabilă, unde deșeurile rezultate dintr-un proces devin materie primă pentru alt proces, într-un ciclu care imită ecosistemele naturale.

Presiunea generată de necesitatea de a-și îmbunătăți în mod semnificativ performanțele de mediu se accentuează asupra tuturor sectoarelor industriale. Inițial au fost vizate industria chimică și industria grea, însă în prezent problemele de mediu constituie o îngrijorare pentru companiile de toate dimensiunile din toate sectoarele industriale.

Evoluția în timp și răspunsul sectorului industrial la presiunile de mediu în creștere sunt rezumate în *Figura 1.2*. Pe măsură ce industriile progresează de la *Stadiul I* la *Stadiul III* se constată o renunțare la practicile tradiționale și adoptarea unor noi moduri de abordare.

	STADIUL I	STADIUL II	STADIUL III
	înainte de 1970	1970-1980	1980-2010
Abordare generală	Reactivă	Cooperantă	Proactivă
Amenințări ecologice	foarte limitate	limitate la arii, zone specifice	pericole ecologice în toate domeniile și la toate nivelurile
Management Control	Remediere	Inspecție	Audit de mediu
Poluare Deșeuri	Deșeurile nu constituie o problemă	Control la sfârșitul procesului	Inovare Evaluarea ciclului de viață
Legislație	Câteva reglementări	Control al emisiilor și deșeurilor	Control integrat al poluării Reglementări recuperare produse

FIGURA 1.2. Reacția sectorului industrial la problemele de mediu [Tip 93, Tip 94].

În domeniul asigurării calității, erorile/defectele de fabricație au fost considerate consecințe ale design-ului inefficient al produselor sau proceselor. La fel, poluarea și deșeurile pot fi privite ca un indiciu că resursele au fost utilizate incomplet sau inefficient [Por 95]. Așa cum inovația poate îmbunătăți calitatea produselor, reducând în același timp costurile, similar există oportunități de reducere a poluării și a deșeurilor, prin măsuri inovative implementate în proiectarea produselor și proceselor de producție, ceea ce va conduce la economii substanțiale și la o mai bună competitivitate.

1.3. Ecologia industrială

Ecologia industrială urmărește optimizarea ciclului industrial complet, pornind de la materii prime și semifabricate până la produsele finite, respectiv la eliminarea acestora la sfârșitul ciclului de viață. Factorii de optimizare includ consumurile de resurse și energie și costurile [Gra 94]. În *ecosistemele naturale* există o interdependență semnificativă a organismelor, deșeurile produse de unul constituind sursa de energie pentru altul, într-un ciclu continuu.

Din păcate analogia ecosistemelor industriale cu cele naturale nu este perfectă, în cazul acestora fiecare proces putând fi considerat fie independent fie interconectat cu alte elemente ale sistemului de fabricație. Ecosistemele industriale au fost clasificate în trei categorii principale:

- *Sisteme tip I*

Sistemele de tip I (*Figura 1.3*) constituie categoria cea mai primitivă, în care fluxul de resurse este liniar, iar ecosistemul nu are nici o preocupare pentru consumurile de resurse și producția de deșeuri. Numeroase repere/componente confecționate din hârtie, materiale plastice și metalice, care se pretează a fi reciclate, sunt asamblate în produse care ajung direct la consumatori, sunt utilizate și apoi sunt direcționate spre depozitele de deșeuri. În multe cazuri, materiile prime sunt exploatate nerațional, apoi sunt procesate prin metode intensiv consumatoare de energie, iar deșeurile sunt colectate într-un mod care face improbabilă recuperarea sau reciclarea acestora [Gra 94].

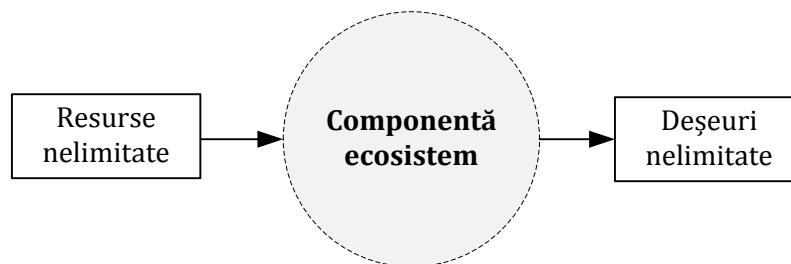


FIGURA 1.3. Sistem tip I, liniar

- *Sisteme tip II*

Sistemele industriale sunt forțate în prezent să evolueze de la modul de funcționare liniar (tip I) la modelul semiciclic de tip II (*Figura 1.4*).

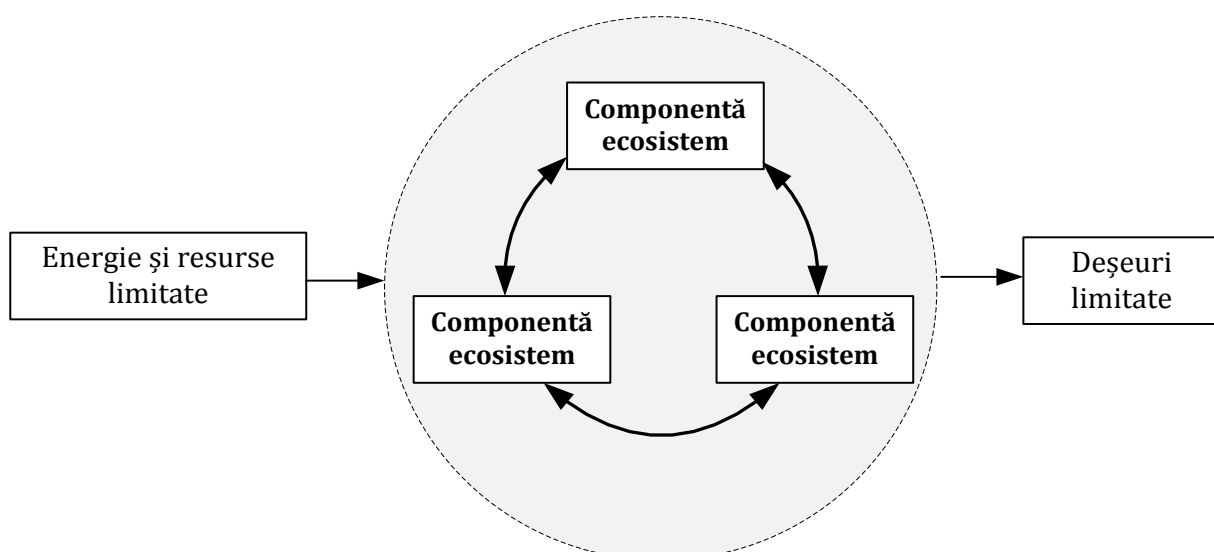


FIGURA 1.4. Sistem tip II, parțial ciclic.

Se poate considera că procesele industriale sunt constituite din patru componente principale: *extragerea materiilor prime* (procesare primară), *fabricație* (procesare secundară), *utilizare* (consum) și *procesarea deșeurilor*. În măsura în care în cadrul sistemului se activează se desfășoară într-o manieră ciclică sau se organizează fluxuri ciclice în întregul ecosistem industrial, modul de funcționare devine mai puțin perturbator pentru sistemele externe.

Deșeurile industriale trebuie considerate produse secundare/reziduuri pentru care nu s-a găsit o modalitate eficientă de utilizare. Pe măsură ce se reușește optimizarea proceselor și consumurilor de materialele, cantitățile de deșeurii și consumul de energie ar trebui să se diminueze.

- *Sisteme tip III*

Un sistem de tip II este mult mai eficient decât un sistem de tip I, dar nu este sustenabil pe termen lung, deoarece fluxurile sunt orientate într-o singură direcție. Pentru a fi durabile, ecosistemele biologice au evoluat pentru a fi aproape complet ciclice, atunci când sunt luate în considerare perioade de timp suficient de lungi. Noțiunile de *resurse* și *deșeurii* nu mai pot fi clar definite, deoarece deșeurile rezultate de la o componentă a sistemului reprezintă resurse pentru alta.

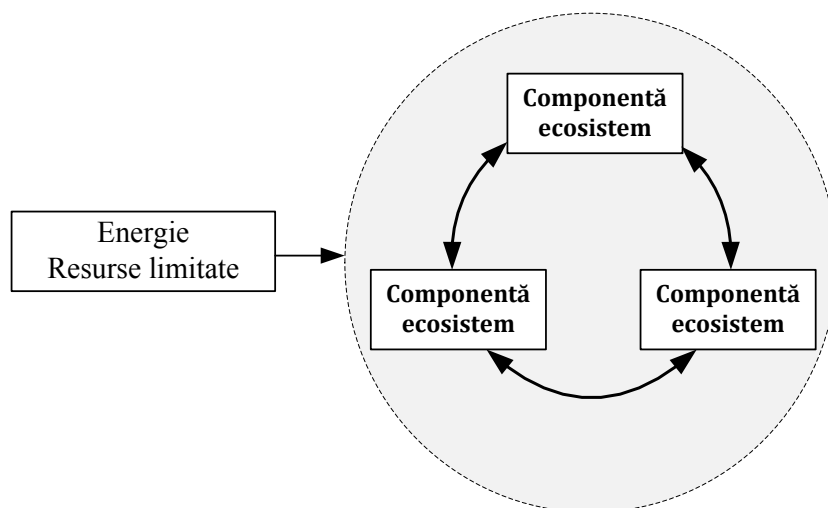


FIGURA 1.5. Sistem tip III, complet circular.

Figura 1.5 prezintă un sistem de tip III caracterizat printr-o ciclicitate completă. Cea mai importantă caracteristică a acestui tip de sistem este că permite dezvoltarea durabilă. Acesta ar trebui să devină modelul activităților industriale în cadrul unei economii circulare.

Punctul de plecare pentru tranziția la o dezvoltare durabilă a fost proiectarea *produselor ecologice*. Această abordare a fost ulterior extinsă la *procesele* și *facilitățile* utilizate în fabricarea acestor produse. Inițial, atenția s-a concentrat asupra proceselor chimice, în special a celor din care rezultă produse secundare toxice, însă interesul s-a extins pentru a include multe dintre procesele de producție curente, inclusiv procesele de prelucrare mecanică.

Cele trei componente de bază ale unui sistem industrial, *produse*, *proces* și *echipamente de fabricație*, nu sunt independente [Dew 94], deoarece echipamentele de producție sunt la rândul lor produsul unui alt proces (*Figura 1.7*);

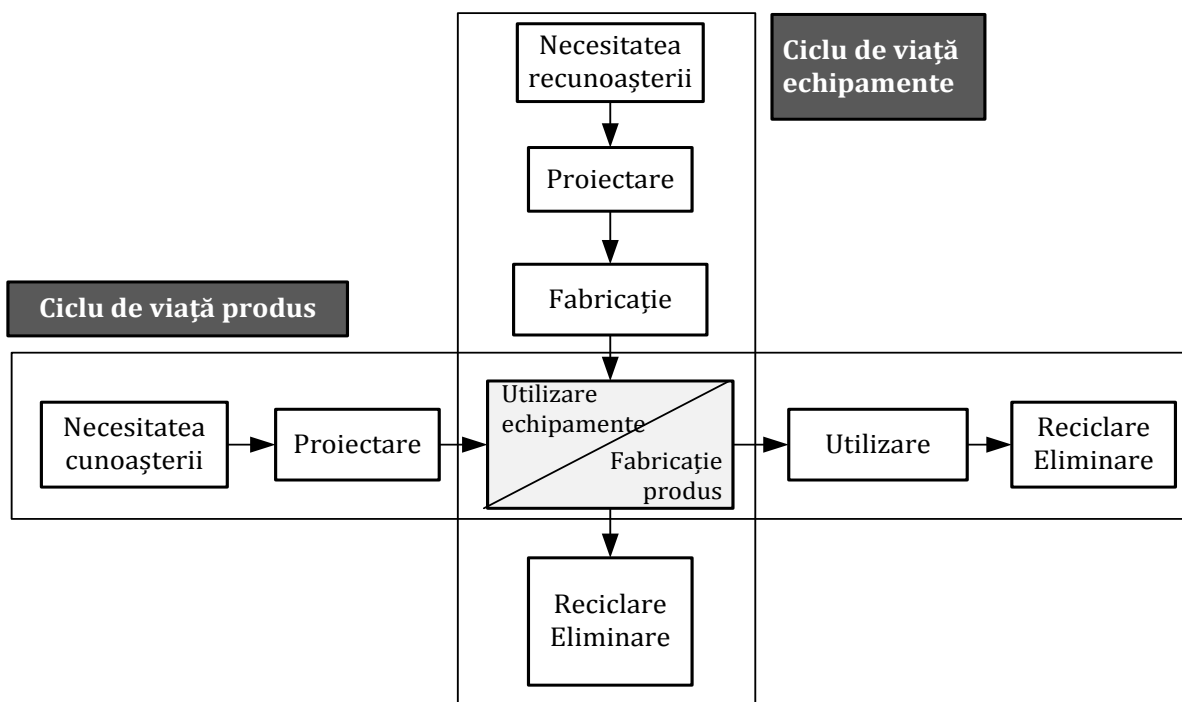


FIGURA 1.6. Interferența ciclurilor de viață ale produsului și proceselor [Dew 94].

1.4. Concluzii

Inițial caracterizată printr-un consum mare de resurse și cantități relative mici de deșeuri, industria prelucrătoare a evoluat rapid, având în prezent un efect semnificativ asupra mediului. În ultimii ani, răspunsul industriei la problemele de mediu s-a schimbat, de la o poziție *reactivă*, la un angajament în direcția reducerii impactului proceselor de fabricație asupra mediului înconjurător. Acest lucru se realizează prin dezvoltarea unor procese îmbunătățite, denumite generic *fabricație ecologică* (*Green manufacturing – GM*), a căror implementare îmbină avantajele de natură ecologică cu cele economice.

CAPITOLUL 2

PROCESE DE FABRICAȚIE ECOLOGICE

2.1. Noțiuni generale privind producția durabilă

Sustenabilitatea (durabilitatea) reprezintă un concept legat de asigurarea continuității mai multor aspecte ale societății: *economic, social, instituțional și ecologic* [Pig 10]. Conceptul de *dezvoltare durabilă* a fost lansat în anii '80 ca reacție la efectele distructive asupra mediului și la nivel social, cauzate de progresele tehnic și economic. Una dintre primele formulări ale acestui concept s-a bazat pe următorul principiu: pentru ca un model de dezvoltare să fie durabil, trebuie să țină seama de factorii sociali și ecologici, precum și de factorii economici, resursele consumate, avantajele/dezavantajele pe termen lung ale soluțiilor alternative [Pus 09, Zar 11].

Noțiunea de *producție durabilă* se referă la crearea de produse și/sau servicii, utilizând procese și sisteme de producție nepoluante, simultan cu conservarea resurselor naturale și a energiei. Un astfel de model de dezvoltare ar trebui să fie viabil și din punct de vedere economic, sigur pentru mediul înconjurător, sănătos pentru angajați și atrăgător pentru consumatori și comunitate [Pus 10a, Wes 08].

Convențional, proiectarea proceselor de producție are trei nivele, constând în: *idee* (dezvoltarea de noi produse), *CAD (Computer Aided Design)* și *CAM (Computer Aided Manufacturing)*. Principiile de bază ale proiectării iau în considerare următoarele componente ale proceselor de fabricație: *costurile de producție, consumul de energie și resurse, gestionarea deșeurilor, impactul asupra mediului, sănătatea muncitorilor și siguranța operațională* [Jaw 07, Kun 06, Raj 08].

Și în industria construcțiilor de mașini, companiile se află în prezent sub presiunile tot mai mari generate de competiție și de necesitatea de îmbunătățire a performanțelor ecologice, în condițiile unor de reglementări de mediu tot mai restrictive [Mar 07, Pus 10b, Wes 00, Wes 08]. Industria prelucrătoare investighează noi metode pentru a spori performanța proceselor și pentru a reduce costurile de producție, pe lângă preocupările

crescânde privind mediul (Figura 2.1), dar analizează și modalitățile adecvate de a le implementa [Byr 93, Byr 04].

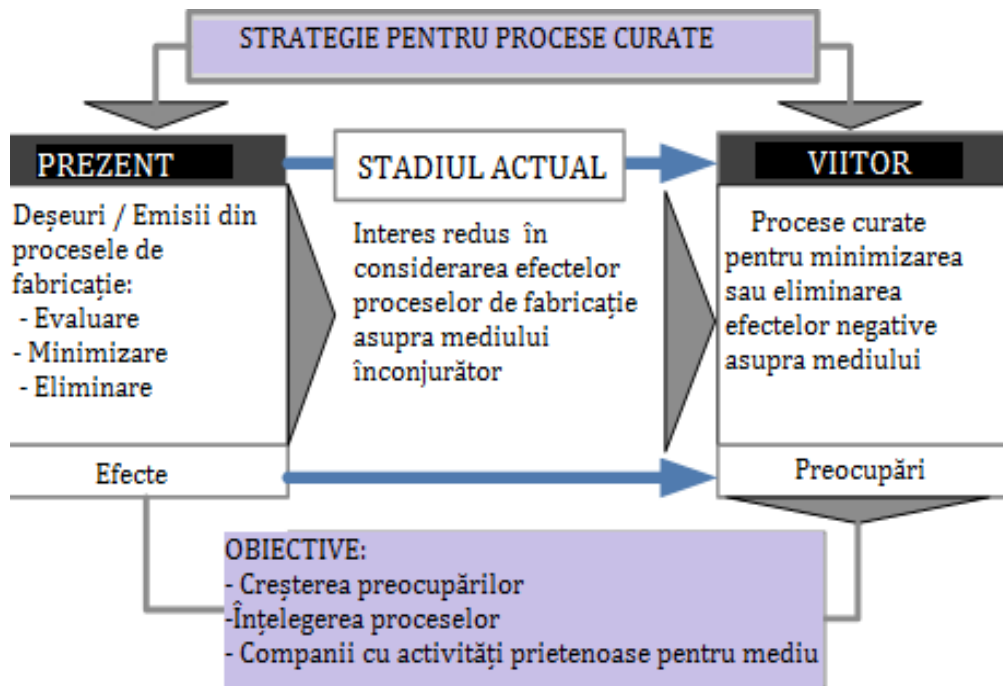


FIGURA 2.1. Strategia de creștere a performanțelor ecologice ale proceselor de fabricație.

Astfel, companiile au potențialul de a reduce costurile și de a-și îmbunătăți performanțele de mediu, chiar dacă volumul producției rămâne constant sau este diminuat. Acest lucru este posibil prin implementarea principiilor sustenabilității în procesele de fabricație [Dah 04, Gra 00, Jaw 07], așa cum este prezentat în Figura 2.2.

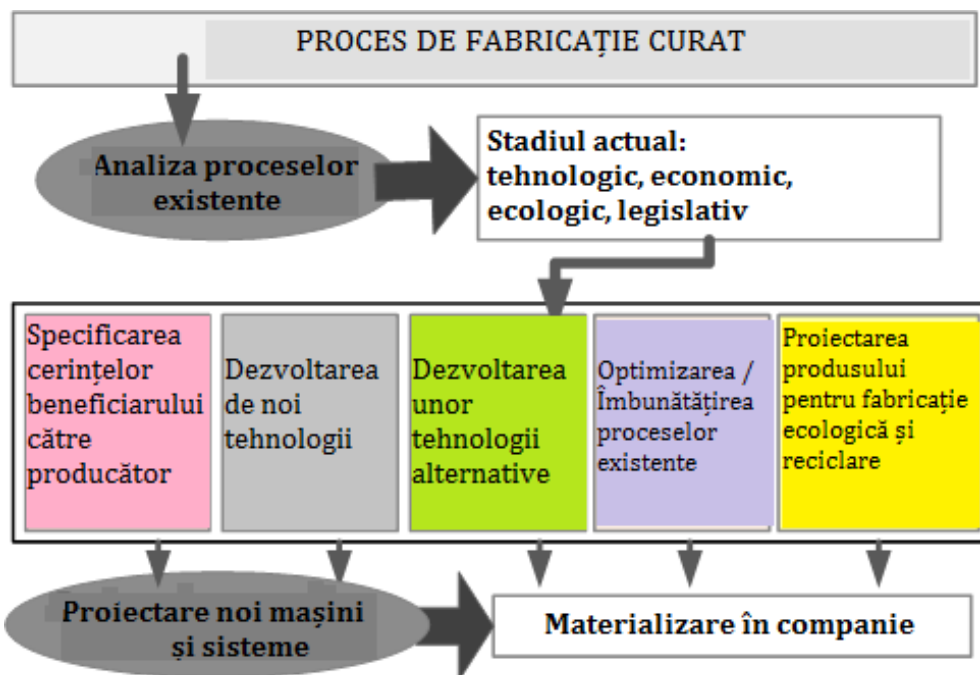


FIGURA 2.2. Implementarea proceselor de fabricație curate.

O modalitate de a obține dezvoltarea industrială durabilă este adoptarea unor practici de producție durabile precum [Kae 03, Mar 08]:

- *Utilizarea eficientă a resurselor (materiale, apă, energie);*
- *Îmbunătățirea performanțelor de mediu, sănătate și siguranță;*
- *Adoptarea metodelor de inginerie durabilă;*
- *Minimizarea deșeurilor (reducerea cantității de deșeuri generate și creșterea gradului de reciclare al deșeurilor sau a ratei de reutilizare a acestora);*
- *Evitarea / îmbunătățirea gestionării lichidelor de așchiere, a lubrifianților și a uleiurilor hidraulice;*
- *Informarea/pregătirea angajaților cu privire la practicile durabile;*
- *Îmbunătățirea condițiilor de muncă.*

2.2. Tehnologii de fabricație sustenabile

În ceea ce privește tehnologiile de fabricație prin prelucrări mecanice, există mai multe modalități de îmbunătățire a performanțelor ecologice. Printre acestea se numără: *reducerea consumului de energie, generarea de mai puține deșeuri, creșterea gradului de reciclare și reutilizare al produselor, utilizarea eficientă a resurselor naturale, utilizarea materialelor reciclabile, reutilizarea componentelor produselor și ale mașinilor-unelte, îmbunătățirea managementului lichidelor de așchiere, așchiilor, lubrifianților/lichidelor hidraulice și implementarea metodelor de evaluare a ciclului de viață* [Hei 02, Kun 06, Jaw 07, Ost 09, Ske 08, Sok 01, Tan 02].

Având în vedere că exploatarea rațională a resurselor naturale (în special a resurselor neregenerabile) este un element cheie al durabilității, principalele resurse care trebuie luate în considerare în procesele de prelucrare sunt: materialele (cel mai adesea metale), fluidele de răcire/ungere, lubrifianții/uleiurile hidraulice, apa și energia.

Procesul de fabricație al unui reper constă din mai multe elemente: *intrări de proces (material, energie, informații, manoperă), procesare, procese de răcire/lubrifiere, curățarea pieselor, pregătirea așchiilor pentru a fi eliminate și interacțiunile acestora* [Pus 10b, Raj 10b, Raj 10, Ram 10], așa cum se arată în *Figura 2.3*.

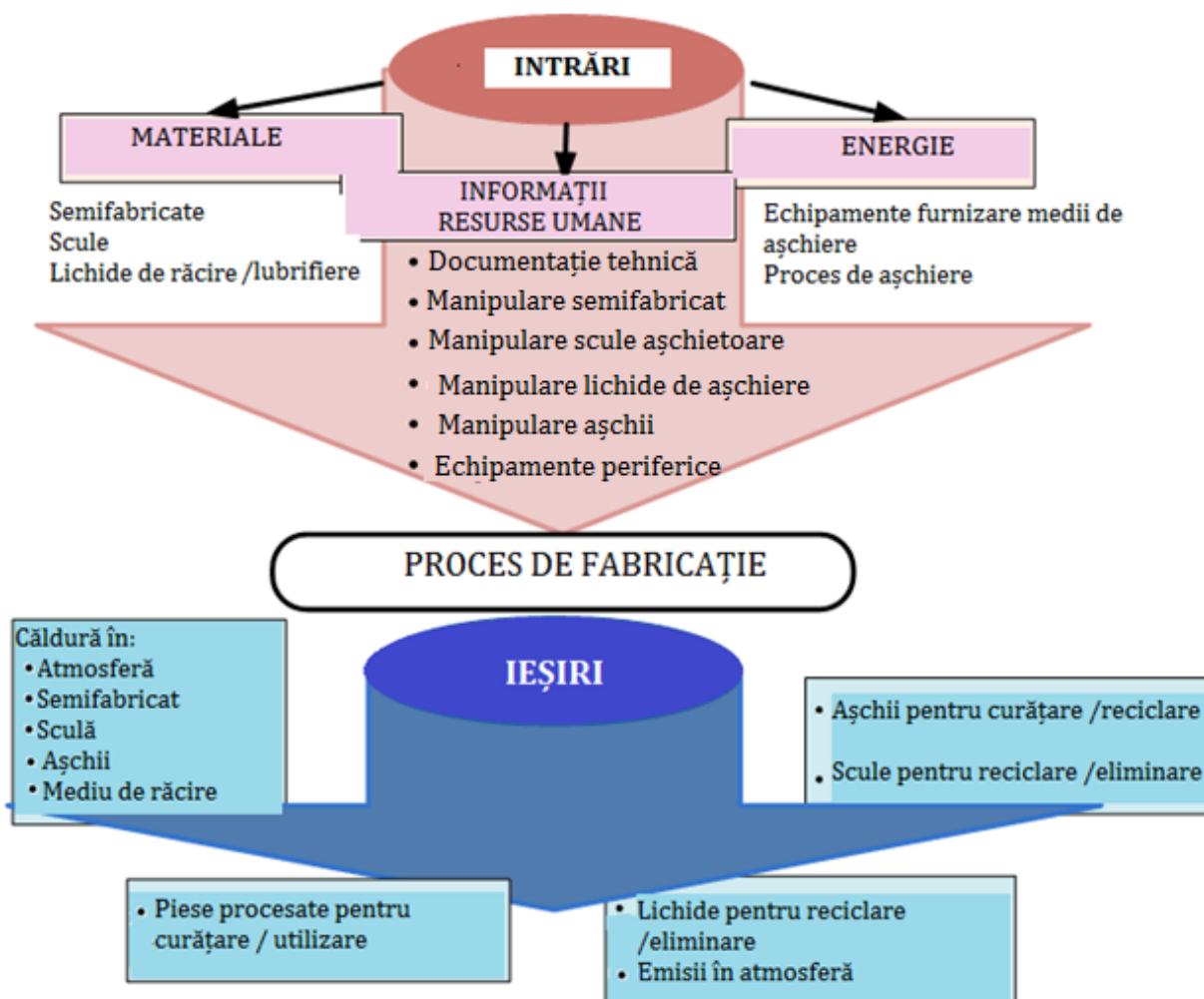


FIGURA 2.3. Intrările și ieșirile unui proces de prelucrare al unui reper.

Consumul de lichide de răcire și ungere reprezintă una din problemele critice legate de impactul de mediu al proceselor de prelucrare. În operațiile de prelucrare se utilizează încă pe scară largă lichide de așchiere convenționale, pentru a reduce căldura generată în zona de așchiere, chiar dacă acestea sunt relativ costisitoare, nefavorabile din punct de vedere ecologic și periculoase pentru sănătate [Byr 93, Dah 04, Mar 04, Raj 08].

Există mai multe modalități de a reduce sau de a evita utilizarea lichidelor de așchiere. Întrebarea care se impune este ce fel de lichide de așchiere și în ce cantitate trebuie să utilizeze în procesele de așchiere și cât de mari sunt costurile acestora. În cazul mediilor de așchiere convenționale, costurile lor de achiziție trebuie să fie crescute, luând în considerare costurile de eliminare, curățarea și uscarea pieselor prelucrate, costurile de mentenanță, costurile de personal și problemele de sănătate care pot apărea. Pe de altă parte, lichidele care aderă la așchii creează probleme cu reciclarea acestora, deoarece procesarea lor ca deșeuri trebuie să includă etapele de *curățare, separare și uscare*. De asemenea, există întotdeauna alte pierderi de lichide de așchiere în procesul de prelucrare

prin vaporizare, aderența la piese, aderența la dispozitive sau subansablurile mașinii-unelte, precum și prin scurgeri (Figura 2.4).

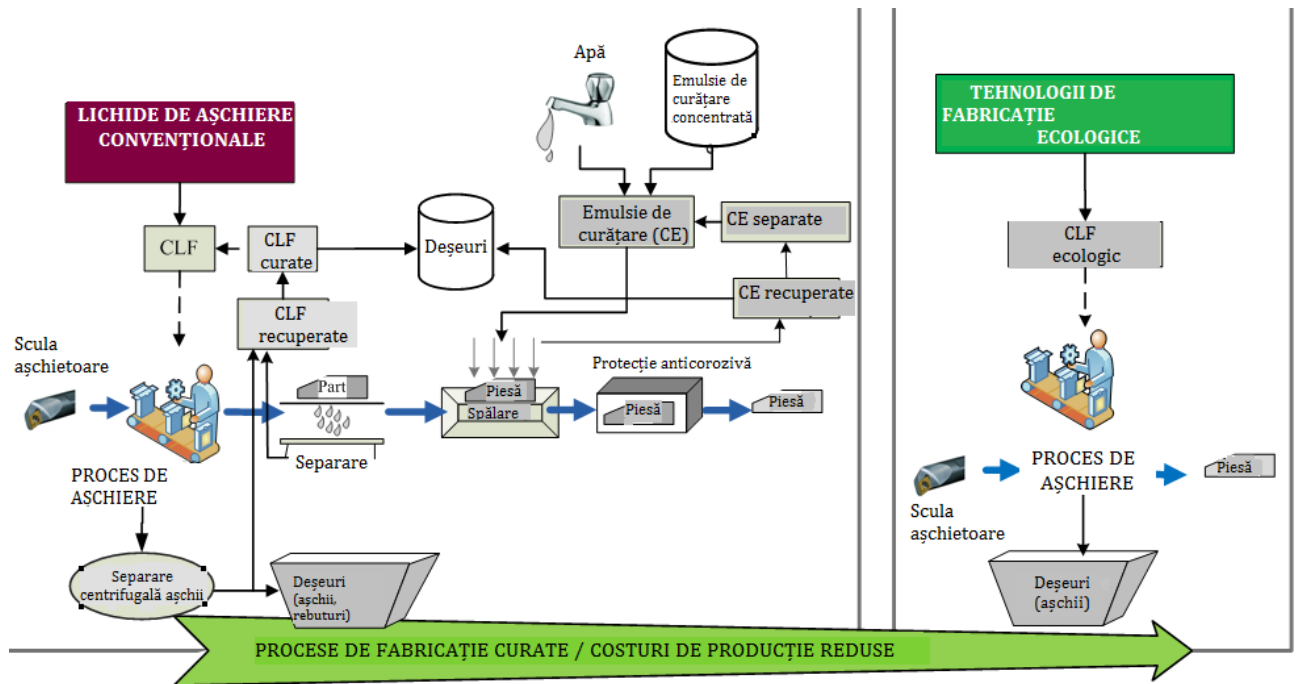


FIGURA 2.4. Compararea proceselor de așchiere convenționale cu cele ecologice.

Astfel, devine evident că tehnologiile de prelucrare care utilizează lichide de ungere și răcire nu sunt sustenabile. Un câștig considerabil pentru proces, din punct de vedere al sustenabilității, îl reprezintă evitarea utilizării mediilor de așchiere prin aplicarea tehnologiilor alternative. Principala problemă pentru procesul de prelucrare durabilă este analiza procesului și înțelegerea modului în care mecanismele de răcire și lubrifiere influențează rezultatele procesului.

Pentru dezvoltarea unor procese de prelucrare curată, trebuie luată în considerare interacțiunea dintre *economie, ecologie și tehnologie*. Așadar una dintre pârghiile care permit creșterea eficienței proceselor de prelucrare, este adoptarea metode inovatoare care să asigure contaminarea minimă a mediului pe lângă stabilitate, fiabilitate și avantaje financiare [Ber 99, Ehr 97].

2.3. Aspecte ecologice ale mediilor de așchiere

Mediile de așchiere sunt printre cele mai frecvent utilizate materiale auxiliare în industria prelucrării metalelor. Acestea ajută la obținerea unor rezultate predictibile în

cea ce privește durabilitatea sculei, calitatea suprafeței și precizia dimensională și facilitează transportului așchiilor.

Lichidele de ungere și răcire au fost introduse în procesele de așchiere cu scopul de a îmbunătăți caracteristicile proceselor tribologice, care apar pe suprafețele de contact dintre semifabricat, sculă și așchie. În anumite condiții, aplicarea unui lubrifianț în procesul de așchiere conduce la o reducere a frecării pe fețele sculei, deci indirect la o reducere a consumului de energie, o durabilitate crescută a sculei și, cel mai important, o îmbunătățire a calității suprafeței piesei prelucrate prin reducerea posibilităților de apariției unei depunerilor pe tăiș [Klo 99].

Cu toate acestea, ele generează anumite probleme în mediul de lucru și deșeuri. Datorită numărului tot mai mare de reglementări, legi și directive care guvernează siguranța activităților industriale și protecția mediului, utilizarea lichidelor de așchiere pune presiuni economice puternice asupra companiilor de producție.

Din cauza multiplelor efecte negative pe care lichidele de așchiere uzate le au asupra sănătății umane și în mediul înconjurător, în procesele de producție moderne se acordă o atenție sporită selectării adecvate a unor medii de așchiere, care, suplimentar, ar fi eficiente și pentru mediul înconjurător. Pe lângă cerințele tribologice obișnuite, noile medii de așchiere trebuie să satisfacă cerințele de protecție a mediului stabilite fie de reglementările interne, fie de standardele internaționale (de ex. ISO 14 000).

Parametrii procesului (adâncimea de așchiere, avansul și viteza de așchiere) sunt factori care influențează semnificativ atât formarea prafului metalic, cât și a vaporilor de lichid. Lichidele de așchiere vaporizate au concentrații mari de aerosoli și pot rămâne în mediul de lucru pentru o lungă perioadă de timp, fiind ușor de inhalat. Cantitatea de aerosoli/praf în atmosfera de lucru crește odată cu creșterea nivelului parametrilor menționați mai sus, cele mai mari valori fiind înregistrate pentru combinația care asigură cea mai mare rată de îndepărtare a materialului.

În practică nu este întotdeauna posibilă atingerea obiectivului de reducere a consumului de lichide de așchiere prin simpla eliminare a răcirii și ungerii [Gan 10, Gra 00, Kal 97, Mar 08]. Motivul este că simultan cu suprimarea mediilor de așchiere nu mai sunt asigurate nici sarcinile fluidelor de așchiere: *reducerea temperaturii în zona de așchiere, reducerea frecării și transportul/evacuarea așchiilor, curățarea sculelor, a semifabricatelor și a dispozitivelor de fixare*. În cazul absenței mediilor de așchiere, aceste sarcini trebuie să fie

compensate sau preluate de alte elemente în procesul de prelucrare [Dah 04, Gan 10, Pau 07, Tos 10].

O renunțare totală la utilizarea lichidelor de aşchiere nu va fi posibilă în viitorul apropiat. Acest lucru depinde de procesele de fabricație utilizate, de materialele prelucrate, de materialele sculelor și de modul de alimentare a zonei de prelucrare cu lichid de aşchiere.

În procesele de aşchiere mediile de ungere sau răcire se utilizează, în general, sub formă de emulsii (amestec de ulei-apă) sau uleiuri, în funcție de: *operația de prelucrare, sarcinile de prelucrare, parametrii de proces, materialele sculelor aşchietoare și materialele semifabricatelor* [Elh 01]. Ambele categorii asigură transportul / evacuarea eficientă a aşchiilor. Uleiurile sunt utilizate în mod obișnuit atunci când gradul de lubrifiere necesar este ridicat, pentru a reduce forțele de frecare și aderența la interfața dintre scula aşchietoare și semifabricat, în timp ce emulsiile sunt de obicei utilizate atunci când este necesar un grad ridicat de răcire pentru îmbunătățirea eficienței procesului, datorită caracteristicilor bune de transfer termic [Fra 09, Ram 10, Ram 08, Say 09, Shi 06].

În ciuda multiplelor avantaje obținute de procesele de prelucrare, utilizarea lichidelor de aşchiere prezintă probleme de mediu și generează *deșeuri solide, lichide sau gazoase* care reprezintă potențiale pericole pentru operatori și mediul înconjurător [Kol 04]. Poluarea, care poate apărea pe scară largă și pe termen lung din cauza proceselor de prelucrare, conduce la consecințe directe asupra mediului. Este necesară luarea unor măsuri directe și imediate în vederea înțelegerii pericolelor create de procesele de prelucrare și analizarea impactului acestora asupra mediului.

Majoritatea proceselor de prelucrare folosesc compuși chimici sub formă de lichide de răcire, lubrifianți, electroliți, lichide dielectrice și aditivi anticorozivi. Aceste produse chimice pot fi transportate de o varietate de agenți într-o diversitate mare de forme. Utilizarea mediilor de aşchiere în timpul operațiilor de procesare generează pericole ecologice majore [Sni 94]. Expunerea directă muncitorilor și contactul intensiv al operatorilor mașinilor-unelte cu aceste medii poate cauza afecțiuni dermatologice și respiratorii [Aam 95]. Cauza este atribuită atât componentelor inițiale ale acestora cât și de produselor de reacție și particulelor generate în timpul procesului [Gre 95]. Efectele înregistrare pot fi:

- *Efecte acute.* Sunt de scurtă durată și apar destul de rapid, de obicei în timpul expunerii sau după o expunere unică sau pe termen scurt la o substanță periculoasă.

• *Efecte cronice.* Se dezvoltă pe o perioadă de timp care se poate extinde pe mai mulți ani. Efectele cronice asupra sănătății sunt cauzate de expuneri prelungite sau repetate la substanțe periculoase, rezultate din procesele de prelucrare. Astfel de efecte pot avea ca rezultat boli care evoluează progresiv, latent, sunt adesea ireversibile și care pot rămâne nediagnosticsate de mulți ani.

Comparația efectelor a trei tipuri de medii de aşchiere utilizate în prelucrarea mecanică este prezentată în *Tabelul 2.1*. Caracteristicile diferite ale acestor medii de aşchiere sunt determinate de capacitatea lor termică și de debit. Chiar dacă utilizarea aerului comprimat ca mediu de răcire este considerat un avantaj din punct de vedere ecologic, cele mai multe efecte ale lichidelor convenționale în prelucrarea mecanică sunt diminuate prin utilizarea aerului comprimat.

TABELUL 2.1. Efectele diferitelor medii de aşchiere.

Mediu de aşchiere	Efect de răcire	Efect de ungere	Efect de degajare/transport aşchii
EMULSIE	Excelent	Bun	Excelent
ULEI	Bun	Excelent	Bun
AER COMPRIMAT	Redus	Nu există	Redus

Managementul și mentenanța corecte ale mediilor de aşchiere îmbunătățite sunt măsuri pe termen scurt care pot fi implementate imediat în producție. În continuare atenția se concentrează asupra reducerii cantității de lichide de aşchiere utilizate și asupra modificării mediilor de aşchiere (de ex. înlocuirea emulsiilor cu uleiuri). Aceste măsuri necesită o analiză detaliată a condițiilor limită și înțelegerea interacțiunii complexe care leagă *procesul, scula, semifabricatul și mașina-unealtă*.

În majoritatea situațiilor, o operație de prelucrare fără lichide de aşchiere (aşchiere uscată) va fi acceptată numai dacă poate fi egalată sau depășită calitatea produsului obținută la prelucrarea cu ungere și răcire convențională. Implementarea în practică a aşchierii uscate necesită măsuri adecvate pentru a compensa funcțiile primare ale fluidelor de aşchiere.

De-a lungul anilor procesele de fabricație au fost elaborate și analizate sistematic și științific. În multe cazuri s-a încercat obținerea unei eficiențe maxime simultan cu asigurarea unor condiții de producție economice. Sarcina de fabricare a unui produs prin utilizarea de materii prime, material și energie intră în mod inevitabil în conflict cu argumentele privind emisiile și deșeurile rezultate. Studiul complex al utilizării mediilor de

ungere și răcire arată în mod clar că este esențială *regândirea proceselor de fabricație*. Aspectele ecologice trebuie să fie luate acum suplimentar în considerare.

În multe cazuri, procesele de producție curente nu sunt adecvate și produc substanțe care poluează aerul, apa și solul (*Figura 2.5*) [Sok 01]. În căutarea soluțiilor și modalităților de îmbunătățire a proceselor de prelucrare, este esențial ca abordarea convențională să fie înlocuită cu metode noi care să producă contaminări minime ale mediului prin utilizarea unor tehnologii adecvate, care să ofere fiabilitate ridicată și condiții economice acceptabile.

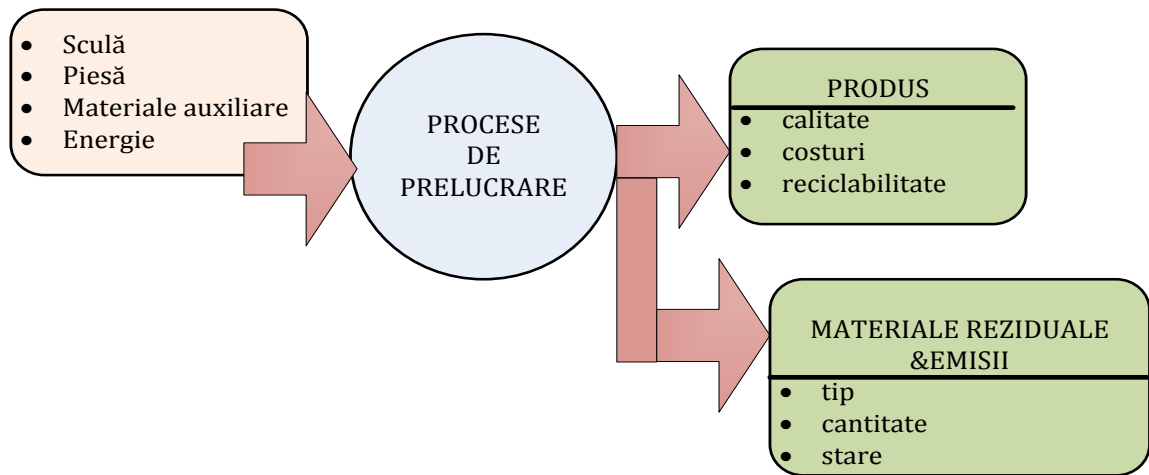


FIGURA 2.5. Intrările și ieșirile proceselor de fabricație.

Sculele, semifabricatele, materialele auxiliare și energia sunt considerate variabile de intrare în proces. Pe de o parte, procesul de lucru are ca rezultat un produs care demonstrează caracteristicile necesare în ceea ce privește *calitatea, eficiența economică* și, din ce în ce mai mult, *ecologicitatea*. Pe de altă parte, rezultă și materiale reziduale nedorite (deșeuri) și emisii. Caracteristicile lor, în ceea ce privește tipul, cantitatea și starea, sunt influențate tipul de proces.

Sistemele de producție sunt simultan un mare consumator de resurse, dar și un mare producător de deșeuri și emisii. Așadar, procesele de fabricație reprezintă, și o sursă de perturbare a echilibrului sistemului natural. Când acest sistem devine incapabil să-și reînnoiască resursele proprii și să asimileze emisiile și deșeurile produse prin activități industriale, atunci apar dezechilibre care influențează membrii comunității și generațiile viitoare. O parte dintre deșeurile depozitate vor suferi un proces de biodegradare sau alte schimbări care le vor face mai puțin dăunătoare. Problemele grave apar atunci când depozitele de deșeuri cresc într-un ritm mai rapid decât capacitatea naturală de neutralizare a lor, cu consecințe asupra echilibrului natural. Fenomenul este invers în ceea ce privește resursele naturale. Consumul de produse și bunuri depășește capacitatea de

reînnoire a resurselor din care acestea sunt fabricate. În industria construcțiilor de mașini, așa cum s-a menționat și anterior, cele mai mari probleme apar ca urmare a utilizării lubrifianților și a fluidelor de așchiere. Companiile mari au dezvoltat și implementat concepte ecologice pentru utilizarea adecvată a mediilor de ungere și răcire. Întreprinderile mici și mijlocii sunt deocamdată departe de a-și propune asemenea obiective. Creșterea costurilor de eliminare a deșeurilor impune totuși tuturor companiilor să implementeze o strategie de management al mediilor de așchiere adaptată propriilor structuri de producție. Comportamentul ecologic al unei companii este, influențat într-o măsură considerabilă de factori externi, cum ar fi legislația și opinia publică, ambele putând avea un impact economic substanțial.

Diferite probleme sunt asociate cu utilizarea fluidelor de așchiere. Accentul trebuie însă pus pe aspectele ecologice și economice ale consumului acestora și pe efectele negative ale contactului direct al operatorilor cu ele la locul de muncă.

- *Consumul și caracteristicile lichidelor de așchiere.* Fluidele de așchiere trebuie considerate un mediu care asigură o interacțiune între mașina-unealtă, semifabricat și scula așchietoare. Prin urmare, trebuie să demonstreze o serie de caracteristici diferite care le permit să satisfacă o mare varietate de cerințe. Prioritatea privind funcțiile și cerințele pe care trebuie să le îndeplinească mediile de ungere și răcire variază în funcție de operația de prelucrare pentru care sunt utilizate.

- *Compoziția.* În conformitate cu cerințele speciale ale diferitelor metode de prelucrare și ale cuplului de materiale semifabricat-sculă folosit, mediile de așchiere au o mare varietate de compoziții. Ele își schimbă compoziția în timpul utilizării în industria prelucrătoare. Când sunt noi, lichidele de așchiere reprezintă doar un risc mic. Substanțele secundare care se formează în lichidele de răcire și lubrifiere în timpul utilizării includ produșii de reacție, corpurile străine și microorganismele.

Pentru a adapta fluidele de așchiere și a extinde posibilitățile lor de aplicare, se adaugă agenți care schimbă atât caracteristicile fizice cât și chimice ale fluidelor de bază. Categoriile de substanțe adăugate sunt: • *aditivi anti-uzură care favorizează formarea unui film de lubrifianț (aditivi AW);* • *aditivi de înaltă presiune, așa numiți aditivi EP;* • *aditivi anticorozivi;* • *agenți antispumare;* • *agenți pentru evitarea formării ceței;* • *agenți de dispersare.* Alți aditivi cum ar fi: agenți de emulsionare, biocide și agenți de colorare pot fi adăugați, de asemenea, la fluidele solubile în apă [Sok 01].

• **Caracterizarea mediilor de așchiere.** Lichidele de așchiere pot fi eliminate după utilizare, fie în cadrul companiei unde au fost folosite, fie în exterior, printr-o companie specializată în eliminarea deșeurilor. În funcție de conținut și modul de eliminare, rezultatul poate fi poluarea solului, a apei și / sau a aerului.

Lichidele de așchiere insolubile în apă trebuie înlocuite periodic. Completarea rezervorului pentru a compensa pierderile trebuie să asigure menținerea nivelului lichidului de așchiere în rezervor. Mediile de așchiere pe bază de apă (emulsiile) cauzează probleme mult mai mari. Emulsia din circuitul de răcire al mașinii unelte trebuie schimbată în mod regulat, ceea ce înseamnă că există o cantitate mare de lichid care trebuie eliminat. Pentru a recicla emulsiile, fazele de apă și de ulei trebuie mai întâi separate.

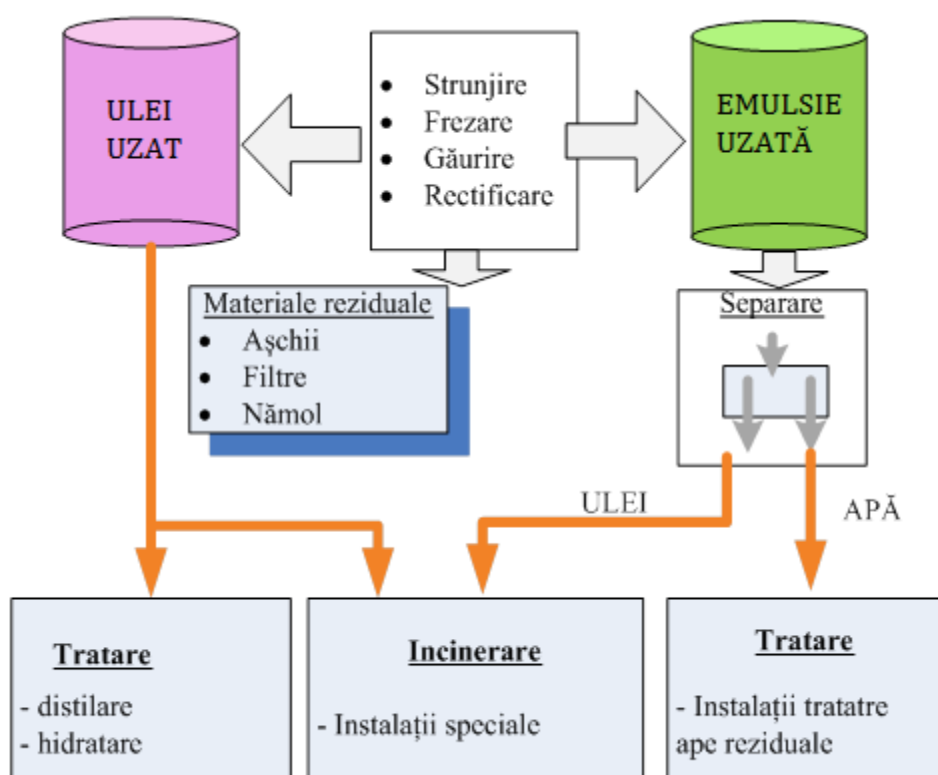


FIGURA 2.6. Eliminarea lichidelor de așchiere.

Neutralizarea și eliminarea controlată a uleiurilor și a emulsiilor uzate devine tot mai importantă. Există acum diverse opțiuni pentru companiile interesate să trateze aceste materiale, indiferent dacă aceste activități se desfășoară în cadrul companiei sau sunt externalizate (Figura 2.6).

Întregul sistem tehnologic este influențat în mod complex de utilizarea mediilor de așchiere. Criteriile de alegere și evaluare ale lichidelor de așchiere sunt: • rezultatele

prelucrării (calitatea suprafeței); • consumul de energie (forțele de așchiere); • eficacitatea procesului (uzură minimă a sculei); • productivitatea (timp de operare minim); • siguranța procesului (ruperea așchiei).

Pe lângă problemele menționate anterior, referitoare la utilizarea lichidelor de așchiere, există și alte probleme ecologice care trebuie avute în vedere, cum ar fi: pierderile de lichide de așchiere în timpul procesului de prelucrare, consum de apă pentru curățarea piesei și a așchiilor sau depozitarea lichidelor de așchiere folosite. Pentru a evita unele dintre problemele de mai sus, se poate opta pentru [Sok 01]:

- *așchiera uscată (prelucrare fără utilizarea lichidului de așchiere);*
- *tehnica de așchiere cu lubrifiere minimală;*
- *acoperirea sculelor cu materiale dure;*
- *fabricația ecologică: utilizarea lichidelor ecologice biodegradabile; dezvoltarea și aplicarea mediilor de așchiere cu conținut redus de poluanți.*
- *utilizarea uleiurilor multifuncționale (hidraulice, de ungere și răcire).*

În plus, contaminarea așchiilor și a rebuturilor rezultate face dificilă reciclarea acestora, iar semifabricatele trebuie curățate înainte de a trece la următoarea etapă a procesului. Astfel de operații de curățare nu adaugă plusvaloare piesei prelucrate, dimpotrivă pot accentua poluarea produsă în sistemul de fabricație.

Presiunea reglementărilor de mediu a condus la o analiză critică a utilizării convenționale a lichidelor de așchiere în procesele de prelucrare. Studiile efectuate pe această temă au arătat că, pe lângă impactul asupra mediului, costurile fluidelor de așchiere reprezintă 10-17% din costurile totale de producție, în timp ce costurile de prelucrare pot fi de doar aproximativ 2-4% [Grz 08, Kop 97, Kun 06, Pfe 94, Wei 04]. În acest context așchiera uscată sau pseudo-uscată pot conferi procesului de fabricație atât avantaje de ecologice, cât și economice.

2.4. Prelucrarea uscată și pseudo-uscată

Preocupările legate de costurile lichidelor de răcire și de problemele de mediu datorate utilizării unor cantități mari de lichide la prelucrarea metalelor au condus la noi tendințe în domeniu: așchiera uscată și tehnica de așchiere pseudo-uscată (lubrifiere și răcire minimală).

Trecerea la *așchiera uscată (Dry Machining –DM)*, procesul de fabricație efectuat în absența mediilor de așchiere, este abordarea cea mai radicală, care elimină toate problemele legate de utilizarea mediilor de așchiere. Așchiera uscată este posibilă datorită evoluțiilor recente ale materialelor sculelor așchietoare, dar prezintă noi provocări în ceea ce privește asigurarea calității, îndepărtarea așchiilor din zona de așchiere și proiectarea mașinilor-unelte. Fezabilitatea adoptării așchierii uscate în cazul proceselor de așchiere cu muchii așchietoare definite este sintetizată în *Tabelul 2.2*.

TABELUL.2.2. Posibilități de aplicare a așchierii uscate. [Wec 96]

Material piesă	Procese de așchiere cu scule cu muchii definite					
	Strunjire	Frezare	Găurire	Filetare	Alezare	Găurire adâncă
Oțeluri tratate termic	●	●	▲	▲	▲	▲
Oțeluri de construcție	●	●	▲	▲	▲	▲
Aliaje neferoase	●	●	●	●	●	■
Fonte	●	●	●	▲	▲	▲

● posibilă
 ▲ în curs de dezvoltare
 ■ imposibilă deocamdată

Așa cum se arată în *Figura 2.7*, rolul fluidului de așchiere devine mai critic în cazul proceselor de prelucrare cu scule cu muchii nedefinite geometric, din cauza energiilor specifice mari necesare pentru îndepărtarea materialului.

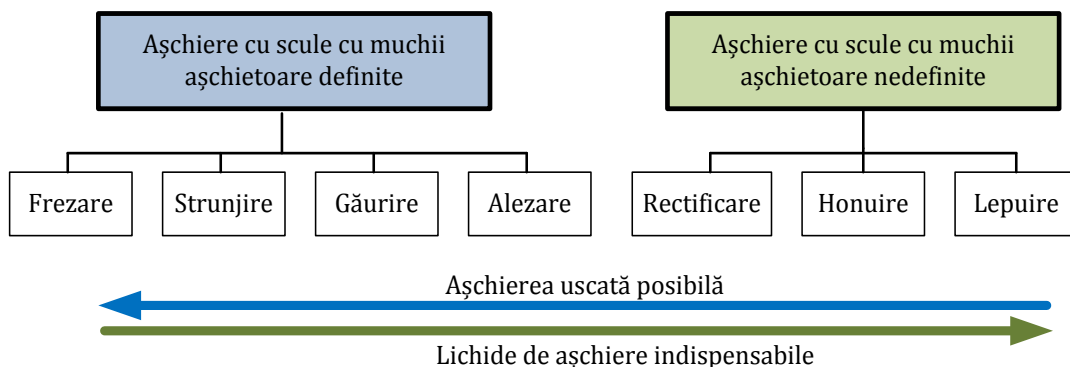


FIGURA 2.7. Necesitatea mediilor de așchiere în procesele de prelucrare. [Zie 94]

Prelucrarea pseudouscată/aproape uscată (Near Dry Machining-NDM), atunci când procesul se desfășoară în prezența unei cantități foarte mici de lubrifianți, de 10-150 ml/h, dispersată și dirijată în zona de așchiere în formă de ceață. Implementarea NDM, numită și

lubrifiere cu cantități minime de lichide de așchiere (*Minimal Quantity Lubrication - MQL*) reprezintă o alternativă la metoda convențională de ungere și răcire și poate conduce la o reducere semnificativă a costurilor de producție. Utilizând sisteme de lubrifiere minimală, funcția de lubrifiere este asigurată de un jet de ceață fină de ulei, iar funcția de răcire de un jet de aer comprimat [Hei 94]. Principiul acestei metode este prezentat schematic în *Figura 2.8*.

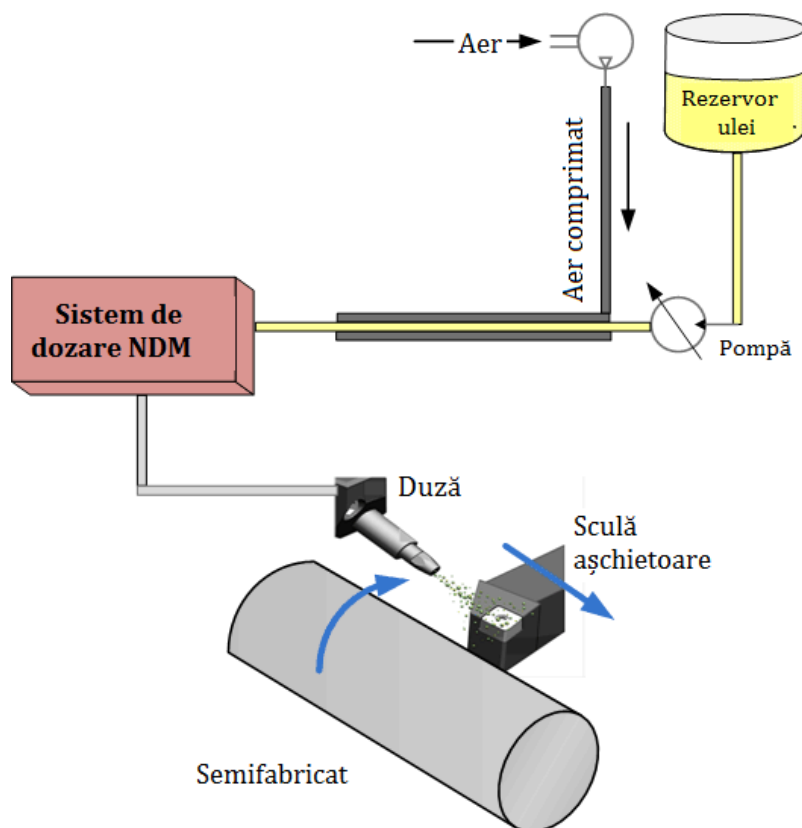


FIGURA 2.8. Principiul așchierii cu ungere și răcire minimală.

Pentru rezultate optime din punct de vedere tehnologic și economic, așchiera pseudo-uscăta trebuie considerată ca un sistem constituit din următoarele componente: echipamentele de dispersie, mediul de așchiere, setările parametrilor de proces, sculele așchietoare și mașina-unealtă.

Mediile de așchiere la prelucrarea metalelor sunt de obicei *esteri sintetici* (uleiuri vegetale modificate chimic) și *alcooli grași* [Sut, 00], având proprietăți excelente de lubrifiere, dar unele aplicații încă utilizează emulsii sau apă. Uleiul vegetal este considerat potențial candidat pentru înlocuirea uleiurilor minerale convenționale. Are performanțe foarte bune, proprietăți excelente de lubrifiere, biodegradabilitate (*Tabelul 2.3*) și sunt ecologice [Tan 02, Wei 04].

TABELUL 2.3. Caracteristicile lichidelor de așchiere MQL. (Sursa: Fuchs Petrolub AG)

Esteri sintetici (uleiuri vegetale modificate chimic)	Alcool gras (alcool produs din materii prime natural sau uleiuri minerale)
	<ul style="list-style-type: none"> - toxicologic inofensiv - nivel scăzut de pericol - biodegradabilitate bună
<ul style="list-style-type: none"> - Proprietăți foarte bune de lubrifiere - Rezistență bună la coroziune - Capacitate de răcire mai redusă - Vaporizează cu reziduuri - Punct de aprindere și fierbere ridicate cu vâscozitate redusă 	<ul style="list-style-type: none"> - Proprietăți reduse de lubrifiere - Capacitate de răcire mai bună datorită evaporării - Puține reziduuri - Punct de aprindere și fierbere joase, cu vâscozitate relative mare

Mediile de așchiere sunt dispersate și dirijate într-o cantitate foarte mică spre zona de prelucrare, cu sau fără ajutorul unui mediu de transport (aer comprimat), în acest scop fiind dezvoltate numeroase tipuri de sisteme de dozare, disponibile în comerț.

În cazul sistemelor fără aer, o pompă livrează mediul de așchiere sub forma unei succesiuni rapide de picături dozate cu precizie. În cazul sistemelor de dozare cu înaltă presiune, mediul este atomizat pentru a forma picături extrem de fine alimentate în zona de formă de aerosoli, utilizând aer comprimat la presiune de 4-6 bari (Figura 2.9). Sistemele de dozare pot fi cu *alimentare externă* cu una sau mai multe duze amplasate separat în zona de așchiere sau *alimentare internă* a prin canalele integrate în corpul sculei. O influență importantă asupra rezultatelor procesului au: *numărul, direcția și amplasarea duzelor* sistemului de dozare.

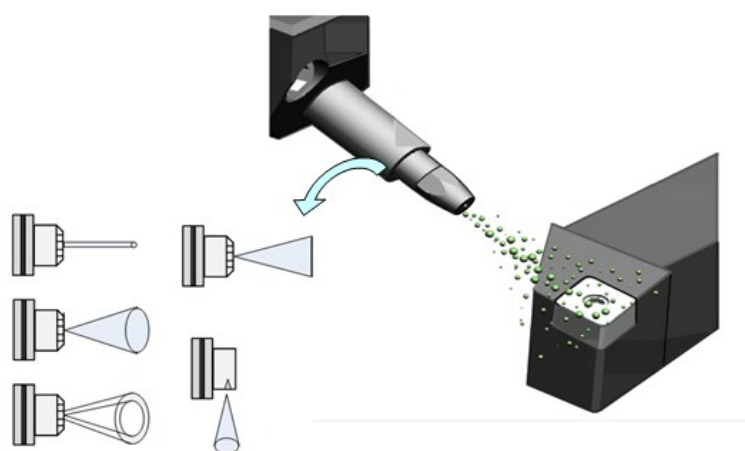


FIGURA 2.9. Duze pentru dispersia mediului de așchiere.

Trebuie făcută o distincție între *ungerea minimală (MQL)* și *răcirea minimală (MQC - Minimal Quantity Cooling)*, în funcție de tipul și funcțiile principale ale mediului de așchiere.

Atunci când sunt necesare proprietăți bune de lubrifiere se recomandă utilizarea uleiurilor ca lichide de aşchiere, funcția lor fiind de a reduce frecarea și aderența dintre piesă, aşchii și scule și, astfel, cantitatea de căldură generată prin fricțiune. Aceasta este considerată strategia de ungere minimală. Mai puțin frecvent decât uleiurile, se utilizează emulsii și apă aditivată, atunci când este esențială o răcire mai eficientă a sculei aşchietoare și / sau semifabricatului. Această abordare este considerată tehnica de răcire minimală [Wei 04].

Există mai multe domenii de aplicare pentru *DM* și *MQL*, implicând o gamă largă de combinații de materiale și procese, așa cum este prezentat în *Tabelul 2.4*.

TABELUL 2.4. Aplicabilitatea *DM* și *MQL*

Proces	Material	Aluminiu		Oțel		Fontă
		Aliaje turnate	Aliaje forjate	Oțel înalt aliat	Oțel de construcții	GG20-GGG70
Găurire		MQL	MQL	MQL	MQL, DM	MQL, DM
Alezare		MQL	MQL	MQL	MQL	MQL
Filetare		MQL	MQL	MQL	MQL	MQL
Găurire adâncă		MQL	MQL	-	MQL	MQL
Frezare		MQL	MQL	DM	DM	DM
Strunjire		MQL, DM	MQL, DM	DM	DM	DM
Frezare roți dințate		-	-	MQL	MQL, DM	DM
Debitare		MQL	MQL	MQL	MQL	MQL
Broșare		-	-	MQL	DM	DM
Rectificare		-	-	MQL	MQL	-

Procesele cu aşchiere discontinu asigură formarea de aşchii scurte de rupere, o bună răcire a muchiilor aşchietoare ale sculei și un bun transport aşchiilor. Tehnicile *MQL* și *MQC* se pretează, de asemenea, pentru operațiile de strunjire, datorită accesibilității bune la zona de aşchiere. Pentru alte procese cu scule cu muchii aşchietoare definite (găurire, filetare, frezare buzunar), aşchiera este greu de realizat fără cel puțin o cantitate mică de lubrifiant. În aceste cazuri se poate genera multă căldură în timpul procesului, iar îndepărtarea aşchiilor este dificilă. *DM* și *MQL* sunt foarte greu de aplicat în procesele de prelucrare cu scule cu muchii aşchietoare nedefinite, datorită energiei specifice mari, a exigențelor sporite privind calitatea pieselor, dar se constată posibilitatea obținerii unor rezultate promițătoare în procesul de rectificare.

Pentru ca așchiera uscată să fie eficientă, funcțiile primare ale mediilor de așchiere din procesul de răcire și ungere convențional ar trebui să fie preluate de alte componente ale sistemului tehnologic sau rezolvate prin alte soluții tehnice. Din cauza frecărilor mai intense și a aderenței mai mari între sculă și așchii, temperaturile în zona de așchiere sunt mai mari și în consecință deformările termice ale sculei și semifabricatului sunt mai mari, ceea ce poate avea efecte negative asupra preciziei de prelucrare și a uzurii sculelor [Dha07, Kel02, Rah02]. În acest sens, cele mai recente abordări se referă la utilizarea acoperirilor metalice, a unor scule cu geometrie modificată [Ahm 10] sau aplicarea unui lubrifianț solid (disulfură de molibden, MoS_2) pe fața de degajare a sculelor din carburi metalice (WC/Co) pentru a crea efectul de autolubrifiere. Utilizarea unor asemenea scule la așchiera materialelor dure determină o reducere semnificativă a forțelor de așchiere, a uzurii sculei și a coeficientului de frecare la interfața cu sculă-așchie.

Eliminarea lichidelor de așchiere anulează în mod evident și “efectul de spălare”, care este benefic pentru transportul așchiilor și captarea prafului din zona de așchiere. Din acest motiv, producătorii de mașini-unelte au dezvoltat sisteme de aspirare pentru îndepărtarea așchiilor [Wei 04].

Soluțiile alternative, pentru compensarea eliminării sau diminuării consumului mediilor de așchiere, includ și proiectarea/reproiectarea mașinilor-unelte. Pentru a fi adecvate pentru *DM*, modificările constructive ale echipamentelor existente ar putea necesita mult efort și costuri ridicate [Mac97, Wei04]. Pentru noile mașini-unelte dezvoltate, posibilitatea de a face modificări substanțiale ale design-ului este mai accesibilă, deoarece cerințele sunt cunoscute de la început. Nu există o soluție practică unică, deoarece echipamentele de producție sunt atât de diferite (de ex. mașini-unelte individuale, celule de fabricație, centre de prelucrare etc.). În producția de masă și în cazul sistemelor flexibile de fabricație, cerințele privind modificările structurilor de producție pot viza următoarele aspecte: *îndepărtarea așchiilor din zona de lucru, compensarea deformărilor termice, integrarea sistemului MQL și măsuri suplimentare de siguranță* [Wei 99, Wei 04].

În concordanță cu cerințele privind prelucrările sustenabile, *DM* și *NDM* se dezvoltă ca alternative viabile la răcirea convențională în procesele de prelucrare. Utilizarea acestor două metode de prelucrare poate asigura creșterea eficienței, datorită evitării mediilor de așchiere uzate, optimizarea procesului de fabricație și îmbunătățirea mediului de lucru. Procedura depinde în mare măsură de caracteristicile procesului de prelucrare, de proprietățile materialelor semifabricatului și sculei.

Tehnica *NDM* oferă o creștere a durabilității sculei de până la 80%, însă sunt necesare studii suplimentare pentru a găsi cel mai bun design al duzei sistemului de dozare și a stabili cantitatea optimă de lichid în zona de așchiere, numărul de duze și amplasarea acestora. În ciuda multiplelor avantaje ale utilizării așchierii pseudouscate, acceptarea sa pe scară largă în practica industrială ar putea fi afectată de următoarele aspecte:

- *Emisii gazoase toxice.* *NDM* ar putea provoca poluare, deoarece pulverizarea uleiului, în fluxul de aer comprimat, determină o cantitate mare de particule în suspensii în aer. Această problemă necesită încapsularea specială a spațiului de lucru, protecție și sisteme de evacuare sau control al particulelor generate.
- *Poluare fonică.* Așchieria pseudouscată necesită un sistem de aer comprimat, care funcționează intermitent în timpul procesului de prelucrare, produce mult zgomot și creează un disconfort.

2.5. Așchieria criogenică

O altă metodă inovatoare de răcire a zonei de așchiere este prelucrarea criogenică (*Cryogenic Machining - CM*). Aceasta este o tehnică eficientă de prelucrare, care utilizează un mediu de așchiere criogenic ca lichid de răcire pentru a reduce temperatura la interfața așchie-sculă, pentru a reduce uzura sculei sau pentru a schimba caracteristicile materialului semifabricatului și pentru a îmbunătăți astfel performanța de prelucrare și calitatea produsului [Ahm 10, Hon 01]. În cadrul studiilor realizate s-au încercat patru abordări: • *prerăcirea semifabricatelor*, • *răcirea criogenică indirectă*, • *pulverizarea mediului de așchiere sub formă de jet criogenic* și • *tratamentul criogenic direct al sculelor așchietoare*.

În mod obișnuit, lichidul de răcire utilizat este un gaz sigur, necombustibil și necoroziv, *azot lichefiat* (Liquid Nitrogen –LN) prin răcire la -196°C . Nu se obișnuiește folosirea aerului ca agent de răcire, deoarece gazele au, în general, proprietăți de răcire relativ slabe în comparație cu lichidele. Performanțe mai bune de răcire au fost obținute prin refrigerarea gazelor, un ajutor suplimentar fiind asigurat de o presiune ridicată a acestora.

Principiul de bază al procesului de așchiere criogenică, care include și producția *azotului lichid*, este prezentat schematic în *Figura 2.10*. LN revine în atmosferă prin evaporarea rapidă în sistemul de prelucrare criogenică, nu lasă reziduuri care să

contamineze piesele, așchiile, mașina-unealtă sau să afecteze operatorul. Astfel, costurile de tratare/eliminare a lichidului de răcire sunt eliminate.

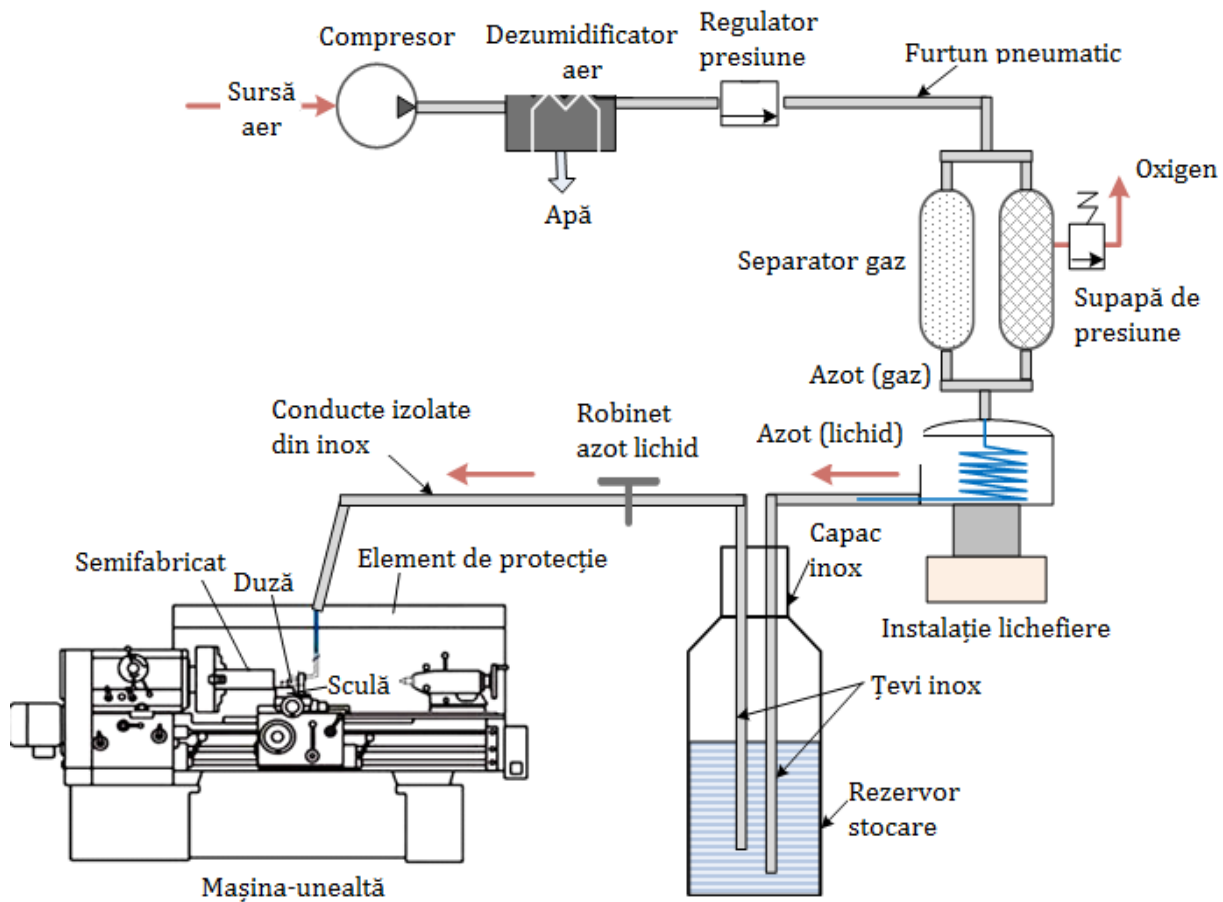


FIGURA 2.10. Schema procesului de așchiere criogenică.

CM poate fi utilizată cu succes în prelucrarea materialelor dure sau a super-aliajelor [Suy 07]. Metoda, utilizată pentru prima dată în industrie în 2003, a fost special dezvoltată pentru strunjire și pentru unele operații de frezare. În prezent este implementată pentru prelucrarea de mare viteză a aliajelor dure în industria aerospațială și construcția de automobile [Pus 10a].

Această tehnică poate fi considerată sustenabilă, fiind o metodă curată, sigură și ecologică. Permite creșterea productivității procesului printr-o rată mai ridicată de îndepărtare a materialului, fără o creștere a uzurii sculei și cu costuri reduse legate de schimbarea frecventă a sculelor așchietoare.

Rezumând, câteva dintre *avantajele CM* sunt: • *reducerea temperaturii interfeței sculă-așchie*, • *creșterea durabilității sculelor*, • *creșterea productivității*, • *creșterea calității produselor*, • *economisirea energiei*, • *nu se generează ceață sau emisii toxice*, • *nu este*

necesară filtrarea mediului de așchiere, • fără așchii sau piese contaminate, • fără costuri de tratate a lichidelor de așchiere. Principalele dezavantaje ale acestei tehnici sunt costurile suplimentare ale echipamentelor și prețul ridicat al producerii LN, care nu este reutilizabil.

2.6. Așchiera cu jet dirijat de înaltă presiune

Chiar dacă se remarcă o tendință de implementare pe scară largă a *DM* și *NDM* (combinat cu cele mai avansate materiale de scule și acoperiri metalice), pentru a reduce consumul de lichide de așchiere [Wei 99, Wei 04], există cazuri când aceste metode nu sunt fezabile. O altă metodă dezvoltată pentru a înlocui ungerea și răcirea convențională, cu menținerea sau chiar creșterea performanței de prelucrare, este *prelucrarea cu jet dirijat de înaltă presiune (High pressure jet assisted machining - HPJAM)*.

HPJAM este o metodă inovatoare de lubrifiere/răcire a interfeței cu sculă-așchie-semifabricat în timpul procesului de așchiere, folosind proprietățile termice și mecanice ale unui jet de emulsie cu presiune extrem de ridicată ($80\text{-}360\text{ MPa}$) direcționat în zona de așchiere, dozarea realizându-se prin intermediul unor duze cu diametru mic ($0.15 - 0.25\text{ mm}$) [Cou 09, Dah 04, Wei 99]. Principiul de bază al *HPJAM* este prezentat în *Figura 2.11*.

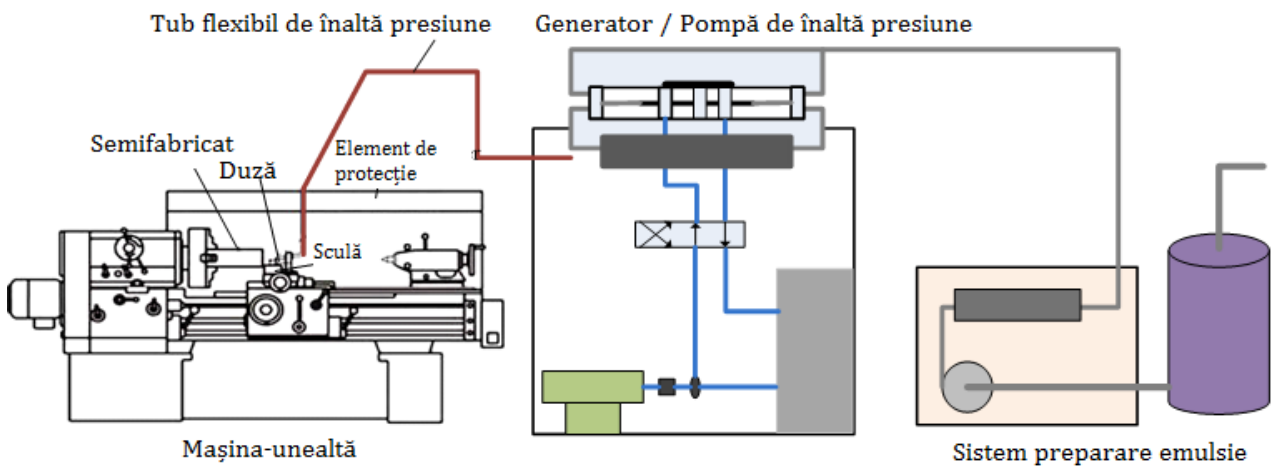


FIGURA 2.11. Schema procedurii de așchiere cu jet dirijat de înaltă presiune.

Comparativ cu metoda convențională de ungere și răcire, debitul de lichid de așchiere este relativ mic în cazul *HPJAM*. Datorită flexibilității mai mari, duzele externe sunt utilizate pe scară largă în comparație cu răcirea prin canalele interne ale sculelor. Având o presiune mare, jetul de lichid de așchiere poate pătrunde mai aproape de zona de forfecare a materialului și o poate răci. Jetul de lichid este direcționat către muchiile așchietoare ale sculei la un unghi mic, direct între fața de degajare a sculei și așchie.

În afară de efectul bun de răcire, această metodă permite controlul condițiilor de frecare dintre fața de degajare a sculei și partea din spate a așchiei, ceea ce duce la îmbunătățirea performanțelor de prelucrare [Wer 92]. Scopul inițial al *HPJAM* a fost o creștere substanțială a ratei de îndepărtare a materialului și a productivității în prelucrarea materialelor avansate ca: oțelurile dure utilizate pentru fabricarea matrițelor, aliajele *Cr-Co* utilizate pentru proteze, aliaje pe bază de *Ti* și *Ni* utilizate la fabricarea turbinelor cu gaz și în industria aerospațială.

Potențialele *beneficii* ale *HPJAM*, acestea se referă la: • *sustenabilitate prin debitul mai redus mediilor de așchiere în comparație cu prelucrarea convențională*, • *forțele de așchiere mai mici*, • *o durabilitate mai mare a sculei*, • *îmbunătățirea semnificativă a capacității de rupere a așchiilor și* • *creșterea productivității procesului prin extinderea gamei operaționale a parametrilor de prelucrare*. Această tehnică permite o creștere de până la 35% atât a vitezei de avans cât și a vitezei de așchiere. Din păcate, există puține investigații în ceea ce privește corelațiile dintre parametrii procesului *HPJAM* (care acționează și interacționează într-o manieră complexă) și performanțele prelucrării.

Dezavantajul metodei constă în investiția inițială mare pentru echipamente. Componentele sistemului includ: o pompă de înaltă presiune alimentată cu apă aditivată sau emulsie, țevi sau tuburi de înaltă presiune, o duză fixată lângă suportul portsculă cu sistem de reglare și ajustare a poziției și un sistem de filtrare. Prin implementarea în practică a acestei metode, trebuie să se ia în considerare un consum relativ mai mare de energie (care este compensat prin rate mai mari de îndepărtare a materialului și o durabilitate mai mare a sculei), zgomotul și emisiile gazoase rezultate prin dispersarea emulsiei.

CAPITOLUL 3

EVALUAREA SUSTENABILITĂȚII PROCESELOR DE FABRICAȚIE

3.1. Ecoproiectare axată pe evaluarea ciclului de viață (*Life Cycle Assessment - LCA*)

Utilizarea mediilor de așchiere este una dintre cele mai importante preocupări, atunci când se analizează problemele legate de procesele prelucrării, având o influență ecologică directă. Ele trebuie analizate în termeni de performanță ecologică și economică. Pe lângă utilizarea lor, există pierderi de lichide de așchiere în sistemul de prelucrare. Suplimentar, apar costuri de eliminare a lichidelor de așchiere convenționale, când au atins limita duratei de viață și trebuie reciclate, tratate sau eliminate.

Cele mai importante alternative la prelucrarea convențională, caracterizată prin lubrifierea și răcirea intensive ale zonei de așchiere, au fost prezentate succint în *Capitolul 2*. Cu toate că aceste tehnici noi (*DM, NDM, CM, HPJAM*) permit reducerea costurilor de producție și diminuează sau evită utilizarea fluidelor de așchiere periculoase pentru mediul înconjurător, este necesar să se analizeze *dacă și în ce situații* pot fi aplicate și performanța acestora din punct de vedere al sustenabilității, prin evaluarea cantitativă și calitativă a impactului asupra mediului. Prin urmare, ar trebui să se găsească echilibrul dintre avantajele și dezavantajele lor, comparativ cu metoda convențională [Cou09, Hon01, Mac97].

În ceea ce privește aplicarea principiilor de sustenabilitate în domeniul proceselor de prelucrare și evaluarea nivelului relativ de sustenabilitate, trebuie stabilite anumite criterii. De obicei, criteriile de evaluare și comparare ale proceselor vizează următoarele aspecte [Pus 10b]:

- *calitatea și integritatea pieselor prelucrate;*
- *costurile procesului de prelucrare;*
- *consumul de resurse și energie;*
- *performanțele de mediu;*
- *performanța în materie de sănătate și siguranță;*
- *producția de deșeuri și costurile de eliminare a deșeurilor.*

În raport cu costurile de prelucrare, diferențele principale sunt cauzate de costul inițial mai ridicat în cazul metodelor alternative, datorită *echipamentelor suplimentare* necesare pentru *sistemele de distribuție a mediilor de așchiere*. Echiparea unei mașini-unelte

pentru *DM, MQL, CM* sau *HPJAM*, incluzând instalarea, sculele, întreținerea, materialele și forța de muncă, mărește costurile totale de producție.

O altă modalitate de a îmbunătăți performanța ecologică a proceselor de fabricație este *reducerea consumului de energie*. Costul de producție total include și consumul de energie electrică, pe durata propriu-zisă de desfășurare a procesului de prelucrare și când mașina-unealtă este în așteptare. Consumul de energie electrică necesar pentru acționarea și controlul dispozitivelor de dozare a lichidelor de așchiere este mic și poate fi neglijat.

Gestionarea corectă a deșeurilor este o altă măsură importantă de sustenabilitate care trebuie luată în considerare. În cazul proceselor de prelucrare, deșeurile sunt reprezentate de lichide de așchiere uzate, scule uzate, așchii și eventuale rebuturi. Atunci când tehnicile alternative de prelucrare ecologice sunt comparate cu prelucrarea convențională, principala variabilă care trebuie evaluată este cantitatea și tipul mediilor de așchiere utilizate. Cantitatea de așchii este aceeași pentru toate metodele de prelucrare, dar principală modalitate de creștere a sustenabilității este de a minimiza contaminarea lor cu lichide de așchiere și de a le compacta pentru a fi ușor de transportat. Curățarea, separarea centrifugală și uscarea așchiilor reprezintă procese suplimentare costisitoare. În plus, în cazul prelucrării convenționale, costurile sunt majorate prin procesul de separare a fazelor de apă și ulei ale lichidelor de așchiere, înainte de a fi eliminate.

3.2. Conceptul LCA

Principalele cauze ale poluării mediului înconjurător și epuizării resurselor sunt reprezentate de procesele de fabricație ale produselor, transportul, consumul și eliminarea acestora. Pentru o implementare reușită a modelelor de afaceri sustenabile, este necesar să se promoveze o schimbare a valorilor economice prin proiectarea ciclului de viață și luarea în considerare atât a deficitului de materii prime, a limitelor mediului înconjurător de a asimila deșeurile și emisiile cât și a nevoilor tot mai mari de consum [Hei 02, Fig 10].

Ca instrument al dezvoltării durabile, proiectarea durabilă vizează *produse, procese și servicii* care răspund nevoilor societății, și asigură *echilibrul dintre interesele economice și calitatea mediului* [Nie 02, Zar 11]. Pentru a evalua efectele unui sistem, proces sau produs asupra mediului, este necesar să se ia în considerare impactul produs în fiecare etapă a ciclului său de viață. Practic, există câteva aspecte care trebuie analizate atunci când discutăm despre sustenabilitate și modalitățile de realizare a acesteia, pe baza înțelegerii

ciclului de viață în ansamblu, de la consumul de materii prime până la eliminarea finală a produsului ca deșeu [Hei 02, Ost 08, Fig 10].

Gândirea ciclului de viață constă în integrarea acestui concept în strategia generală, planificarea și procesul decizional al unei companii, având în vedere aspectele economice, sociale și ecologice. În timp ce sistemele de fabricație tradiționale se concentrează exclusiv pe obținerea de profit prin vânzarea către consumatorii finali a cât mai multor produse, în prezent se pune accentual pe examinarea etapelor și aspectelor ciclului de viață ale produselor și optimizarea lor.

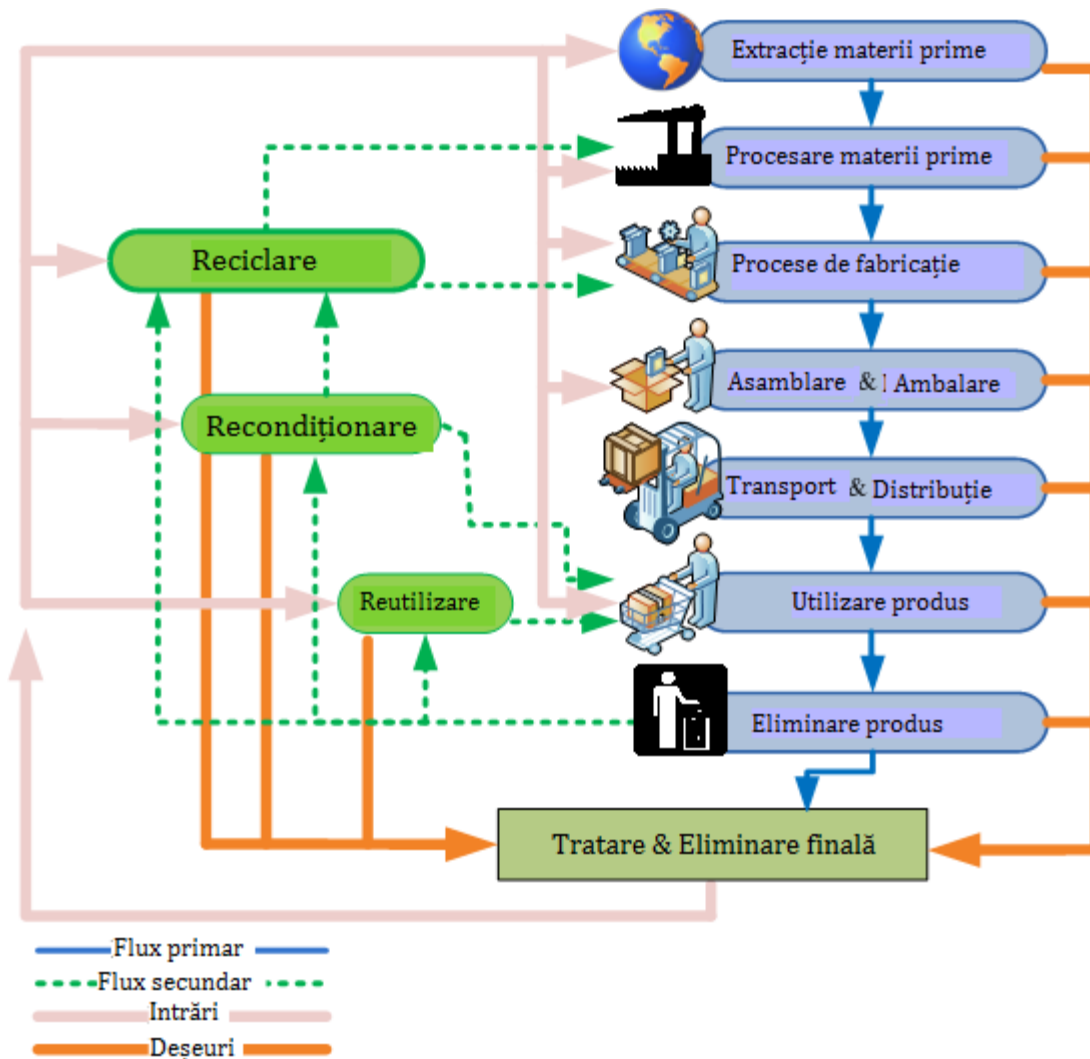


FIGURA 3.1. Etapele ciclului de viață al unui produs.

Figura 3.1 prezintă un ciclu de viață tipic al unui produs și posibile alternative în etapa de sfârșit de viață. Fluxul principal are mai multe faze: • *extracția materiilor prime*, • *prelucrarea primară*, • *fabricarea*, • *asamblarea*, • *transportul și distribuția*, • *utilizarea și* • *scenariul de eliminare a produselor la sfârșitul ciclului de viață*.

Strategiile privind sfârșitul vieții descriu abordarea sau metoda de tratament utilizată atunci când se recuperează valoarea din produse, inclusiv activitățile asociate nu numai cu planificarea și implementarea colectării și procesării produselor uzate, ci și cu posibilele impacturi asupra societății și mediului [You 97]. Strategiile de eliminare la sfârșitul ciclului de viață sunt legate de fluxurile secundare: *reutilizarea, reciclarea și recondiționarea* (atât a produselor, cât și a componentelor lor) [Fig 10].

Reutilizarea constă în colectarea materialelor folosite, a produselor sau a componentelor produselor și distribuirea sau vânzarea lor în această stare uzată. Astfel, identitatea și funcționalitatea produsului original sunt păstrate. Reutilizarea produselor poate fi o soluție ideală ca scenariu la sfârșitul duratei de viață pentru a minimiza impactul asupra mediului, dar nu poate fi considerată strategie principală, deoarece nu ia în considerare nevoile reale ale utilizatorilor sau calitatea produselor.

Reciclarea este procesul de colectare al produselor, pieselor sau materialelor uzate în urma dezamblării, separarea lor pe categorii și procesarea acestora ca produse, componente și/sau materiale reciclate [Fig 10]. Fiind axată pe recuperarea materialelor, reciclarea ar trebui luată în considerare atunci când alte alternative nu sunt viabile din punct de vedere economic. Reciclarea materialelor (atât din reziduurile proceselor de fabricație, cât și din produsele uzate) modifică adesea proprietățile de bază ale acestora, cum ar fi rezistența, densitatea, elasticitatea materialului, etc.

Calitatea materialelor rezultate este determinată de realizarea procesului de reciclare cu sau fără demontare prealabilă. Renunțarea la dezamblare implică utilizarea materialelor reciclate în scopuri mai puțin importante după prelucrare. Dezamblarea poate determina creșterea costului produselor și al materialelor recuperate, dar determină și o creștere a purității materialelor recuperate, o eliminare sigură a deșeurilor periculoase și recuperarea subansamblurilor pentru reutilizare sau recondiționare. Reciclarea contribuie la reducerea poluării, salvarea spațiilor în depozitele de deșuri și conservarea resurselor naturale, dar nu poate fi principala strategie de gestionarea deșeurilor într-o companie.

În timp ce reciclarea implică recuperarea materialului, *refabricarea* conservă identitatea produsului prin revenirea acestuia la o stare aproape identică cu cea inițială. Strategia de refabricare reduce consumul de materii prime și de energie necesar pentru fabricarea de noi produse și, în același timp, păstrează valoarea produsului obținută în timpul proceselor de proiectare și de fabricație. Prin refabricare componentele produselor

sunt recuperate și recondiționate pentru a le reconstrui conform designului lor original [Hei 02]. Pentru a implementa cu succes recondiționarea produselor, ele ar trebui să fi fost proiectate inițial în acest sens, adică să fie ușor de *demontat, curățat, controlat, înlocuit și reasamblat* și să fie *rezistente la uzură*.

3.3. LCA pentru procesele de fabricație

Dacă în trecut industria prelucrătoare a jucat un rol minor în poluarea mediului înconjurător, bazându-se pe o cantitate mare de resurse disponibile și contribuind cu cantități relativ reduse de deșeuri, în prezent, datorită evoluției și progresului său rapid, are un efect semnificativ asupra mediului. În ultimii ani, răspunsul industriei la problemele de mediu a fost un angajament pentru a reduce impactul ecologic al proceselor de fabricație.

Multe procese de prelucrare prin așchiere utilizează instrumente de proiectare adaptate, strategii de fabricație și scule moderne performante. Prin renunțarea la lichidele de așchiere convenționale și prin utilizarea unor metode de prelucrare inovatoare, companiile pot îmbunătăți eficiența procesului de producție, condițiile de lucru și pot obține o imagine mai bună pe piață. Practic, așa cum s-a prezentat în *Capitolul 2*, implementarea acestor procese implică și reproiectarea sau adaptarea mașinilor-unelte și a echipamentelor lor periferice.

LCA pentru procesele de prelucrare alternative ar trebui să se concentreze asupra producției lichidelor și dirijării acestora în zona de așchiere, în timp ce performanța procesului de prelucrare poate fi considerată ca fiind aceeași [Pus 10a, Raj 08, Ske 08]. Analizând schemele metodelor de prelucrare prin așchiere (*Figurile 3.2-3.5*), se poate observa că emulsiile sunt încă folosite în prelucrările convenționale precum și *HPJAM*, iar la *NDM* sunt preferate uleiurile vegetale.

Așchiere cu ungere și răcire convențională

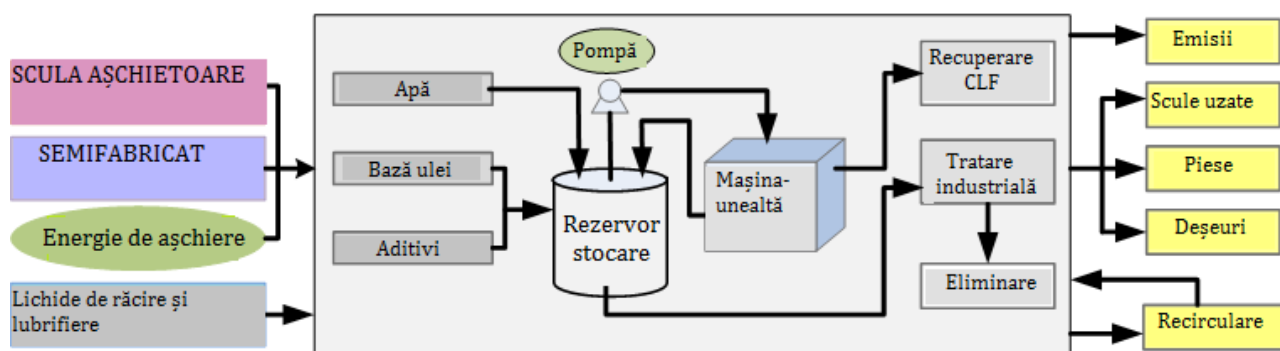


FIGURA 3.2. Diagrama LCA pentru așchieră cu ungere și răcire convențională.

Pe lângă compoziția mediilor de aşchiere și impactul producției acestora asupra mediului, sunt importante cantitățile consumate (rata de consum pentru o perioadă de timp considerată). Există o diferență majoră între sistemele care utilizează emulsii sau ulei (metoda convențională și *HPJAM*), sistemele *NDM* și cele criogenice *CM*. Sistemele convenționale de răcire recirculă lichidele de aşchiere, *NDM* le consumă complet, în timp ce lichidul criogenic se evaporă în timpul utilizării. În acest caz, consumul este determinat de debitul masic al duzei. În cazul sistemelor de ungere și răcire convenționale, rata de consum este determinată de volumul rezervorului mașinii-unelte și intervalul de timp până la înlocuirea completă a lichidului de aşchiere.

Aşchiere pseudo-uscată

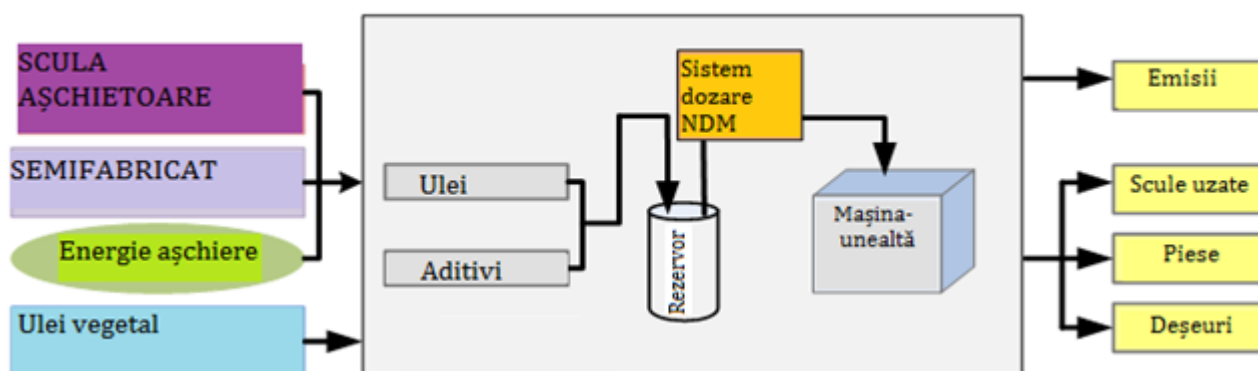


FIGURA 3.3. Diagrama LCA pentru aşchiera pseudo-uscată.

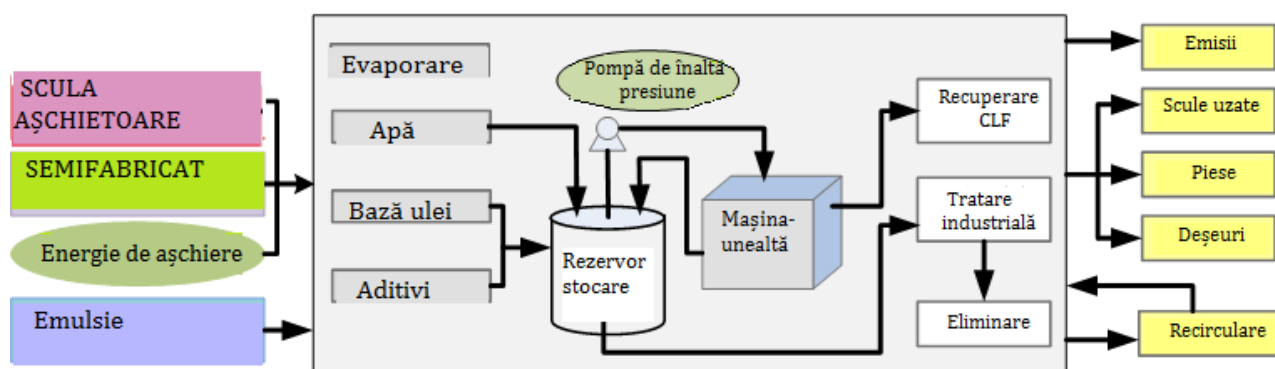


FIGURA 3.4. Diagrama LCA pentru aşchiera *HPJAM*.

Spre deosebire de sistemele care utilizează lichide de aşchiere pe bază de ulei, în cazul prelucrării criogenice, este necesară o sursă suplimentară de energie pentru producția mediului de aşchiere.

Pentru prelucrarea criogenică (*CM*), efectele de lubrifiere și răcire sunt furnizate de azotul lichefiat, care este un mediu stabil, în timp ce lichidele de aşchiere pe bază de ulei nu sunt sau au nevoie de aditivi pentru stabilizare. Producția de *LN* este un proces caracterizat

printr-un consum intensiv de energie și ar putea fi direcționată către o producție durabilă prin alimentarea sistemului de răcire pentru producția de LN cu electricitate generată din surse regenerabile. Costul și emisiile generate pot fi reduse prin captarea oxigenului lichid, care reprezintă un produs secundar al procesului de lichefiere.

Așchiere criogenică

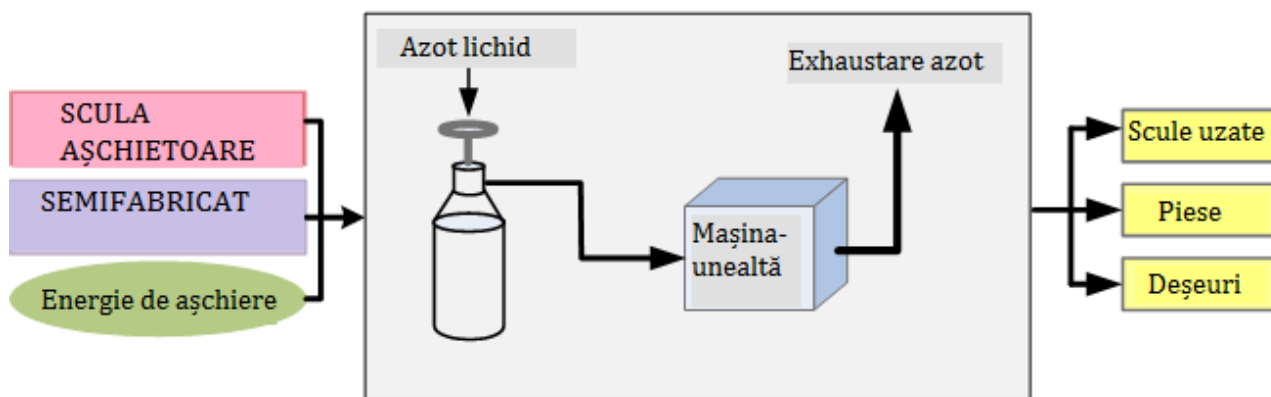


FIGURA 3.5. Diagrama LCA pentru CM.

În timpul proceselor de prelucrare, mediile de așchiere trebuie direcționate în zona de așchiere prin presiune, dintr-un rezervor atașat la mașina-unealtă. Producția de echipamente de alimentare cu medii de așchiere (compresoare, rezervoare, pompe, sisteme de dispersie) poate fi neglijată, deoarece impactul lor este redus în raport cu durata lungă de funcționare.

Prin implementarea cu succes în practică a acestor metode de așchiere, se pot obține avantaje considerabile din punct de vedere ecologic și economic, chiar dacă aplicarea lor pe scară largă și în producția de masă necesită în continuare soluții speciale. Este de așteptat ca numărul tot mai mare de aplicații industriale și activitățile de cercetare din domeniu să conducă, în cele din urmă, la extinderea acestor tehnologii moderne ecologice către producătorii mici și mijlocii. Compromisurile fundamentale privind impactul asupra mediului în ceea ce privește utilizarea metodelor alternative de fabricație în locul celor convenționale demonstrează că tranziția către tehnologii durabile de prelucrare asigură beneficii pentru reducerea poluării mediului.

CAPITOLUL 4

ANALIZA ECOLOGICĂ COMPARATIVĂ A PRELUCRĂRII PSEUDO-USCATE ȘI PRELUCRĂRII CONVENȚIONALE LA FREZAREA ROȚILOR DINȚATE

4.1. Introducere

Reglementările de mediu determină industria prelucrătoare să joace un rol tot mai activ în dezvoltarea proceselor de producție curate și a produselor ecologice. Obiectivul urmărit este modelul de dezvoltare industrială durabilă, unde deșeurile și produsele secundare nedorite dintr-un proces devin materii prime pentru un altul [Fik 01, Koe 96, You 96].

Multe cercetări efectuate în domeniul prelucrărilor prin așchiere s-au concentrat asupra îmbunătățirilor la nivel de proces. Unele dintre aceste îmbunătățiri (inclusiv optimizarea utilizării materialelor, minimizarea utilizării fluidelor de așchiere și reducerea energiei de așchiere) au importante consecințe asupra calității mediului. De exemplu, consumul și eliminarea fluidelor de așchiere pot determina probleme grave de sănătate și de mediu și, în consecință, sunt considerate o direcție de urmat pentru o eventuală îmbunătățire [Sok 01].

Numeroase cercetări au examinat avantajele, dezavantajele și condițiile necesare pentru prelucrarea cu ungere și răcire convențională comparativ cu cele ale așchierii uscate [Byr 93, Gra 00, Gut 01, Sre 00, Sta 02, Sut 02]. S-au efectuat și alte studii pentru a analiza puterea necesară la așchiere, pe baza căreia să se poată estima consumul de energie [Gro 96, Kal 01].

O abordare analitică pentru determinarea impactului proceselor de fabricație asupra mediului, bazată pe evaluarea consumului de energie și a fluxului de materiale este prezentată în [Mun 95].

Intrările și ieșirile asociate proceselor de prelucrare prin așchiere sunt ilustrate în *Figura 4.1*. La intrare ar trebui să se urmărească un consum minim de material, prin

utilizarea, de exemplu, a unor semifabricate cu forme apropiate de cele ale piesei finite. Prelucrarea ar trebui să se desfășoare cu parametrii de process care asigură o durabilitate maximă a sculei. Substanțele periculoase, precum și reziduurile și emisiile trebuie evitate sau cel puțin volumele lor trebuie reduse la minim.

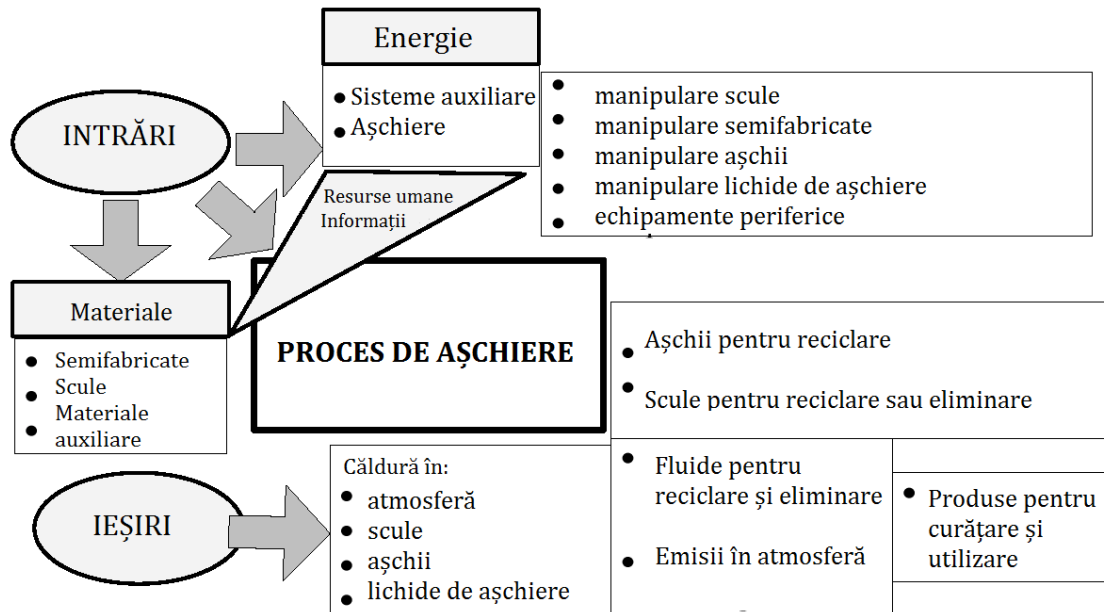


FIGURA 4.1. Intrările și ieșirile unui proces de prelucrare prin așchiere.

În acest context se încadrează *Capitolul 4* al lucrării, în care este prezentată la nivel macro o evaluare comparativă a impactului de mediu al frezării prin rulare a roților dințate cu modul mic, utilizând tehnica de ungere și răcire minimală, respectiv metoda convențională. Comparația include *LCA* pentru trei procese: producția mediilor de așchiere, procesarea așchiilor și producția de energie electrică (necesară pentru îndepărtarea prin procesare a 1 kg de material).

Estimarea impacturilor asupra mediului a fost efectuată utilizând metoda *Eco-indicator 99(H)* inclusă în soft-ul dedicat *SimaPro 7.1*. Rezultatele *LCA* sunt redată sub forma datelor de: caracterizare, evaluare a daunelor, normalizare, ponderare și scor unic.

4.2. Metodologia de evaluare

În orice analiză ecologică este important să fie identificate mai întâi limitele sistemului care urmează să fie examinat. În cazul proceselor de prelucrare, sistemul complex include activități precum pregătirea sculelor, producția de materiale, îndepărtarea materialelor, curățarea, etc. *Figura 4.2* prezintă etapele importante ale unui proces de prelucrare prin așchiere, care vor fi examinate succint pentru o estimare preliminară a

impactului ecologic. Elementele marcate cu culoarea gri au fost omise în aceasta analiză la nivel macro.

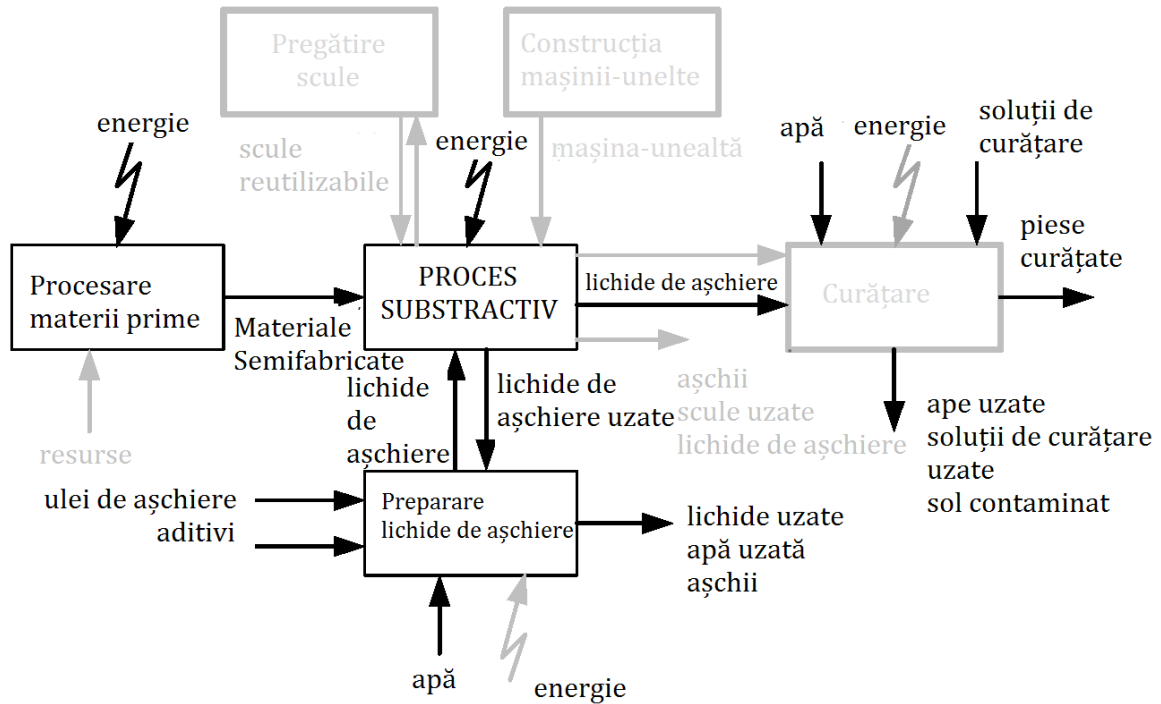


FIGURA 4.2. Pricipalele elemente ale unui proces de aşchiere.

4.2.1. Producția de materiale

Producția de materiale este un element important, datorită implicațiilor sale asupra mediului. Producția de materiale este un proces intensiv consumator de energie și resurse naturale. Obținerea materialelor pare a fi în afara limitelor sistemului tehnologic, însă procesul de fabricație trebuie privit ca un proces care consumă materii prime, transformându-le în produse finite.

În procesul de prelucrare se folosesc adesea cantități mari de materiale. În cele mai multe cazuri, doar o fracțiune din totalul materialului care intră în procesul de producție rămâne sub forma unui produs. Estimativ între 10%-60% din volumul semifabricatelor utilizate la aşchiere se transformă în deșeuri (aşchii) [Kal 01].

Aşchiile și rebuturile pot fi reciclate, procesul de reciclare necesitând cantități mai mici de energie, comparativ cu procesele primare de obținere a materialelor din materii prime noi, aspect ce trebuie luat în considerare la analiza ecologică a proceselor de aşchiere [Cha 93, EPA 95].

4.2.2. Prepararea mediilor de așchiere

Fluidele de așchiere reprezintă un alt element important al proceselor de așchiere, atât din punct de vedere al influenței asupra desfășurării procesului, cât și din punct de vedere al impactului asupra mediului.

Consumul de lichide de așchiere reprezintă una dintre problemele critice legate de impactul asupra mediului al procesului de prelucrare, fiind cunoscut faptul că efectul acestora asupra mediului se manifestă preponderant în etapa de neutralizare și eliminare finală. Deversarea lichidelor uzate are ca rezultat contaminarea solului și a apei [Byr 93, Dah 04]. De asemenea, lichidele care aderă la așchiile metalice creează o problemă pentru reciclare, motiv pentru care așchiile trebuie pregătite în prealabil prin separare, centrifugare, spălare, uscare. Aceste aspecte dovedesc faptul că *NDM* nu este o opțiune, ci o devine o necesitate pentru îmbunătățirea competitivității [Bar 96, Gra 00, Kal 95, Sre 00].

Cele mai populare medii de așchiere sunt uleiurile solubile, diluate în mod obișnuit cu apă (*până la 95%*). Restul de 5% reprezintă o combinație de ulei, emulgatori și aditivi [Bec 94, Chi 94, Ros 94,]. Aditivii sunt utilizați pentru a limita coroziunea, a controla aciditatea și creșterea microbiană, pentru a îmbunătăți capacitatea de lubrifiere și pentru a preveni spumarea.

Cantitatea de lichid de așchiere utilizată anual pe o mașină-unealtă pentru prelucrarea metalelor prin metoda de ungere și răcire convențională se poate estima plecând de la următorul scenariu: *52 săptămâni de lucru pe an, cu 5 zile lucrătoare pe săptămână, un schimb pe zi, lichidele de așchiere sunt circulante* în sistemul de răcire al mașinii-unelte. Se iau, de asemenea, în considerare pierderile prin vaporizare, scurgeri sau aderare la așchii, piese sau subansablurile mașinii-unelte. Estimările arată că aproximativ 10-30% din consumul anual total de lichid de poate fi pierdut prin aceste mecanisme [Byr 03, Kal 01, Ste 97].

În timpul procesării semifabricatului, lichidul de așchiere va prelua impurități, cum ar fi așchii metalice, particule fine de praf etc., care pot fi îndepărtate prin separare și filtrare, însă periodic lichidul de așchiere este înlocuit în totalitate. Costurile de eliminare a lichidelor de așchiere uzate sunt aproximativ egale cu costul lichidului de așchiere de înlocuire [Slu 97]. În cazul *NDM*, lichidele de așchiere sunt complet consumate și, prin urmare, toate aceste costuri sunt evitate [Klo 97].

4.2.3. Producerea sculelor așchietoare

Cu toate ca sculele joacă un rol major în procesele de prelucrare, impactul lor direct asupra mediului este limitat. Datorită durabilității relativ lungi a sculelor, costurile ecologice și întreținerea lor sunt adesea amortizate, prin numărul mare de repere prelucrate cu o sculă. Așadar, contribuția consumului de scule la producerea impactului asupra mediului este nesemnificativă raportat la fiecare reper prelucrat. Alegerea corespunzătoare a sculelor permite creșterea ratelor de îndepărtare a materialului, reducând astfel energia totală de prelucrare necesară [Obe 96].

În prezent, cele mai multe procese de prelucrare prin așchiere folosesc scule din carburi metalice. O mare parte din aceste scule din carburi sunt comercializate sub forma de inserții (plăcuțe interschimbabile indexabile), fixate pe suporturi adecvate. Producția sculelor din carburi necesită materiale și procese energo-intensive. Unele dintre etapele de fabricație, inclusiv sinterizarea, utilizată la fabricarea plăcuțelor așchietoare, depunerea fizică de vapori (*Physical Vapour Deposition - PVD*) sau depunerea chimică de vapori (*Chemical Vapour Deposition - CVD*), utilizate pentru acoperirea carburilor metalice, sunt, de asemenea, energo-intensive [Sta 97]. O alternativă încă populară la sculele din carburi metalice o reprezintă oțelurile rapide. Acestea sunt încă folosite în majoritatea aplicațiilor de găurire, precum și în unele aplicații de frezare, putând fi de asemenea acoperite prin procese *PVD* sau *CVD* [Lah 97]. Așa cum a fost menționat anterior, durabilitatea mare a sculelor, deci prelucrarea unui număr mare de repere până la atingerea limitei de uzură, face ca impactul ecologic al acestora să fie mai mult sau mai puțin ignorat.

4.2.4. Construcția mașinii-unelte

În ciuda rolului esențial pe care mașina-unelte îl joacă în desfășurarea procesului de așchiere, impactul ecologic al acesteia este limitat. Cele mai multe mașini-unelte sunt folosite pe parcursul mai multor ani. Aceste durate lungi de utilizare fac ca impactul fabricației mașinilor-unelte asupra mediului să fie amortizat prin numărul mare de produse fabricate pe durata funcționării. Astfel, impactul mașinilor-unelte asupra mediului raportat la un reper prelucrat este foarte mic [Abe 89].

Efectul mai mare al mașinilor-unelte în procesul de așchiere este legat de eficiența lor energetică. Mașinile-unelte noi sunt mult mai eficiente din punct de vedere energetic decât cele vechi, ceea ce duce la economii de energie în timpul așchierii materialelor.

Îmbunătățirea eficienței ar putea reduce necesarul de energie per unitatea de volum de material eliminat cu aproximativ 50% [Dah 04].

4.2.5. Îndepărtarea materialului

O mare parte a impactului asupra mediului provocat de procesul de aşchiere provine din utilizarea energiei. În estimarea cerințelor energetice pentru îndepărtarea adaosurilor de prelucrare, este adesea folosită *energia specifică de aşchiere*. Chiar dacă energia de aşchiere depinde de mai mulți factori, inclusiv de proprietățile materialului semifabricatului, prezența mediilor de aşchiere, gradul de uzură al sculelor și parametrii de prelucrare, energia specifică poate fi estimată [Kal 95]. Cunoașterea energiei specifice de aşchiere ajută la determinarea cantității minime de energie, necesară pentru îndepărtarea unui anumit volum de material.

În procesele de prelucrare, pe lângă energia necesară pentru îndepărtarea materialului, trebuie asigurată energie suplimentară pentru alimentarea echipamentelor auxiliare (echipamentul de manipulare a semifabricatelor, sistemele de răcire, sistemele de schimbare a sculelor, sisteme de ungere și răcire ale mașinii-unelte, etc.). În cazurile în care există echipamente auxiliare, cerințele energetice ale echipamentului auxiliar pot depăși cerințele uzuale de energie pentru aşchiera efectivă [Dah 04, Fri 05]. Analiza energetică arată modul în care consumul total de energie este distribuit între diferite activități. Consumul de energie pe durata de 1000 de ore de funcționare a mașinii-unelte poate fi determinat folosind: *numărul de ore de funcționare inactivă (în gol)*, *numărul de ore pentru poziționarea și fixarea semifabricatelor și sculelor*, *numărul de ore de prelucrare efectivă*.

Volumul de materialul îndepărtat pe durata a *1000 de ore* de prelucrare poate fi determinat prin estimarea ratei de îndepărtare a materialului. Această estimare este dificilă, deoarece ratele de îndepărtare a materialelor depind de numeroși factori, inclusiv materialul sculei (Rp vs. carburi metalice), materialul piesei (aluminu vs. oțel), configurația piesei (geometrie și rugozitate) și parametrii de prelucrare.

4.2.6. Procesul de curățare

Curățarea este de asemenea importantă în procesul de aşchiere, fiind frecvent menționată atunci când se discută despre impactul asupra mediului. Importanța curățării și impactul ecologic al acestei operații depind în mare măsură de produsele fabricate.

Procesele de curățate sunt diversificate, atât din punctul de vedere al cantității de material utilizate cât și al tipului de curățare, ceea ce face ca analiza calitativă generală a acestor procese să fie dificilă. Curățarea pieselor metalice și a așchiilor a fost caracterizată de-a lungul timpului de consumul unor cantități mari de substanțe chimice, utilizate în diferite situații. În prezent, au fost implementate metode de curățare noi, care folosesc apa ca agent de curățare în locul solvenților [Dam 95, Kir 94]. Prin utilizarea tehnicilor *DM* și *NDM*, produsele de curățare nu mai sunt necesare.

4.3. Etape de evaluare

LCA este un instrument util în scopul evaluării și creșterii sustenabilității. Se utilizează practic în toate disciplinele ingineresti pentru a evalua performanța de mediu a produselor, proceselor sau serviciilor, prin agregarea consumului de energie, a fluxurilor de materiale și a emisiilor poluante [Bad 07, Deb 09, Rus 07] și pentru a opta între alternativele posibile, așa cum este prezentat în [Alk 06, Kro 98, Mcm 04, Ren 08, Vez 06]. *LCA* reprezintă o abordare sistematică, etapizată și constă din: • *definirea obiectivului*, • *inventarierea fluxurilor*, • *evaluarea impactului*, • *interpretarea rezultatelor*.

4.3.1. Definirea obiectivelor

Concret, scopul studiului prezentat în acest capitol este de a compara performanța ecologică a două metode de ungere și răcire implementate la frezarea roților dințate cu modul mic: convențional (Flood Machining-FM) și varianta ecologică *NDM*.

În mod obișnuit, *LCA* include patru etape din ciclul de viață al unui produs: *achiziția de materii prime*, *fabricația*, *utilizarea/mentenanța*, *managementul deșeurilor /reciclarea* [Ekv 04, Her 07, She 09]. Modelul, reprezentând diferitele etape ale ciclului de viață al procesului de prelucrare a unui reper metalic, prezentat în [Pra 03], poate fi adaptat în cazul particular al frezării roților dințate.

Procesul *FM* folosește scule din carburi fără acoperiri metalice, un volum mare de lichide de așchiere și energie pentru a prelucra semifabricatul, iar ieșirile din proces sunt produsul finit, scule uzate, așchii metalice umede, lichid de așchiere uzat și emisii. În cazul procedurii *NDM* se utilizează scule acoperite cu *TiN* și energie pentru a transforma semifabricatul într-o piesă finită, iar produsele secundare rezultate din proces sunt scule uzate, așchii uscate și emisii.

În cadrul analizei *unitatea funcțională* descrie funcția primară îndeplinită de un produs sau un proces și indică în ce măsură această funcție va fi considerată în studiul *LCA* și va fi folosită pentru compararea diferitelor alternative de obținere a unui produs sau de desfășurare a unui proces. Unitatea funcțională permite compararea diferitelor procese considerate ca fiind echivalente din punct de vedere funcțional și determinarea fluxurilor de referință pentru fiecare dintre acestea. În studiul considerat, unitatea funcțională a procesului de prelucrare a fost considerată *așchiera a 1 kg de material*.

4.3.2. Inventarul fluxurilor ciclului de viață

Inventarul ciclului de viață (Life Cycle Inventory-LCI) este procesul de cuantificare al energiei, materialelor și emisiilor (gazoase, lichide sau solide) pe întregul ciclu de viață al unui produs. Acuratețea datelor ce trebuie colectate reprezintă o decizie critică, care trebuie luată încă de la început. Limitarea majoră a oricărei *LCA* este data de indisponibilitatea datelor din inventarul ciclului de viață pentru toate produsele/procesele existente în industria prelucrătoare, date referitoare la producerea energiei electrice și la procesarea deșeurilor.

În acest studiu, baza de date *Eco Invent vl.3* este utilizată ca sursă a datelor de inventar (www.pre.nl/ecoinvent/version1.5.htm, www.ecoinvent.org) datorită numărului mare de procese generice incluse în această bază de date și compatibilitatea cu soft-ul utilizat, *Sima Pro 7.1.-LCA* (<http://www.pre.nl/simapro/>).

Nu include date privind producerea/eliminarea sculelor așchietoare cu sau fără acoperiri metalice și producerea/eliminarea lichidelor de așchiere. Informațiile extrase din baza de date *Ecoinvent 1.5* și alte ipoteze preliminare considerate sunt:

- *prelucrarea deșeurilor metalice. Se pleacă de la premiza că așchiile generate sau eventuale rebuturi sunt acoperite cu lichid de așchiere și alte particule în cazul FM, iar la NDM sunt uscate și pot fi direct reciclate;*
- *datele privind producția de energie electrică corespund Electricity Mix average kWh Europe;*
- *se iau în considerare procesele de producție ale lichidelor de așchiere și scenariile de eliminare a lichidelor uzate;*
- *datele de inventar pentru generarea energiei electrice sunt echivalente pentru Europa.*

4.3.3. Evaluarea impactului ciclului de viață

Faza de *evaluare a impactului ciclului de viață* (*Life Cycle Impact Assessment - LCIA*) reprezintă evaluarea efectelor consumului potențial de resurse și a factorilor poluanți, identificați pe parcursul *LCI*, asupra sănătății umane și a impactului asupra mediului.

LCIA oferă o procedură sistematică pentru clasificarea și caracterizarea tipurilor de efecte asupra mediului. *LCIA* a fost efectuată utilizând una dintre cele mai cunoscute metodologii *LCA*, *Ecoindicator 99* (<http://www.pre.nl/eco-indicator95>), care constă în:

- *Definirea categoriilor de impact* – sunt definite categoriile de impact asupra mediului relevante: substanțe cancerigene, compuși organic/anorganici volatili (*COV*), schimbări climatice, radiații, deprecierea stratului de ozon, ecotoxicitate, acidifierea, eutrofizarea, utilizarea terenurilor, minerale, combustibili fosili;
- *Caracterizarea* – constă în atribuirea rezultatelor *LCI* categoriilor de impact (de exemplu, clasificarea emisiilor de *CO₂* în funcție de schimbările climatice cauzate);
- *Evaluarea daunelor* - categoriile de impact sunt grupate în funcție de efectele produse;
- *Normalizarea* - exprimă impacturile potențiale într-un mod care permite compararea acestora;
- *Ponderarea* – pune în evidență cele mai grave impacturi potențiale.
- *Scorul unic* – rezultă prin însumarea tuturor efectelor determinate anterior. Acest indicatorul este exprimat în puncte (*Pt*) sau milipuncte (*mPt*).

4.3.4. Interpretarea ciclului de viață

Interpretarea ciclului de viață (*Life cycle interpretation-LCI_{in}*) este o tehnică sistematică de identificare, cuantificare și evaluare a informațiilor din rezultatele *LCIA* și prezentarea lor completă și într-o manieră ușor de înțeles în conformitate cu scopul studiului.

4.4. Studiu de caz: LCA la frezarea roților dințate cu modul mic

Obiectivul studiului este de a realiza o comparație la nivel macro a performanțelor de mediu ale *NDM* și *FM* la frezarea roților dințate cu modul mic (Figura 4.3). Pentru realizarea *LCA* este necesară analiza consumului de energie, a producției materialului semifabricatului și a procesării deșeurilor rezultate.

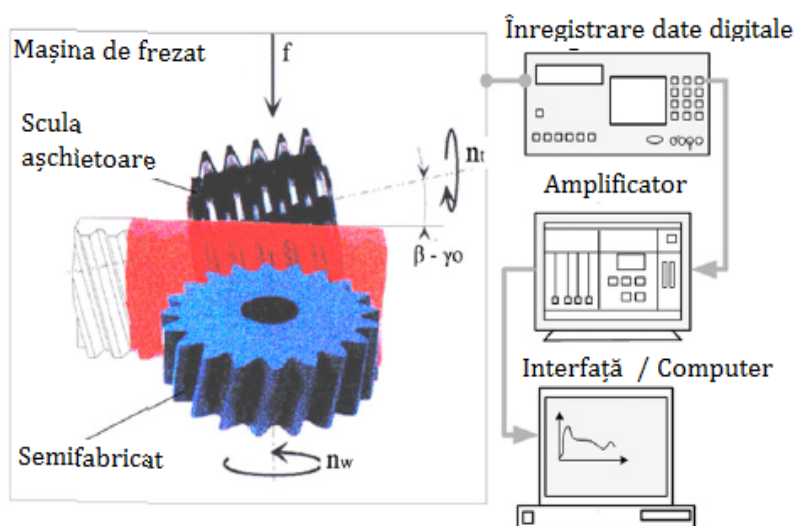


FIGURA 4.3. Schema standului experimental.

Caracteristicile roților dințate prelucrate și condițiile de prelucrare sunt prezentate în Tabelul 4.1. Pentru studiul de caz considerat, consumul de energie a fost calculat pe baza datelor privind consumul de putere.

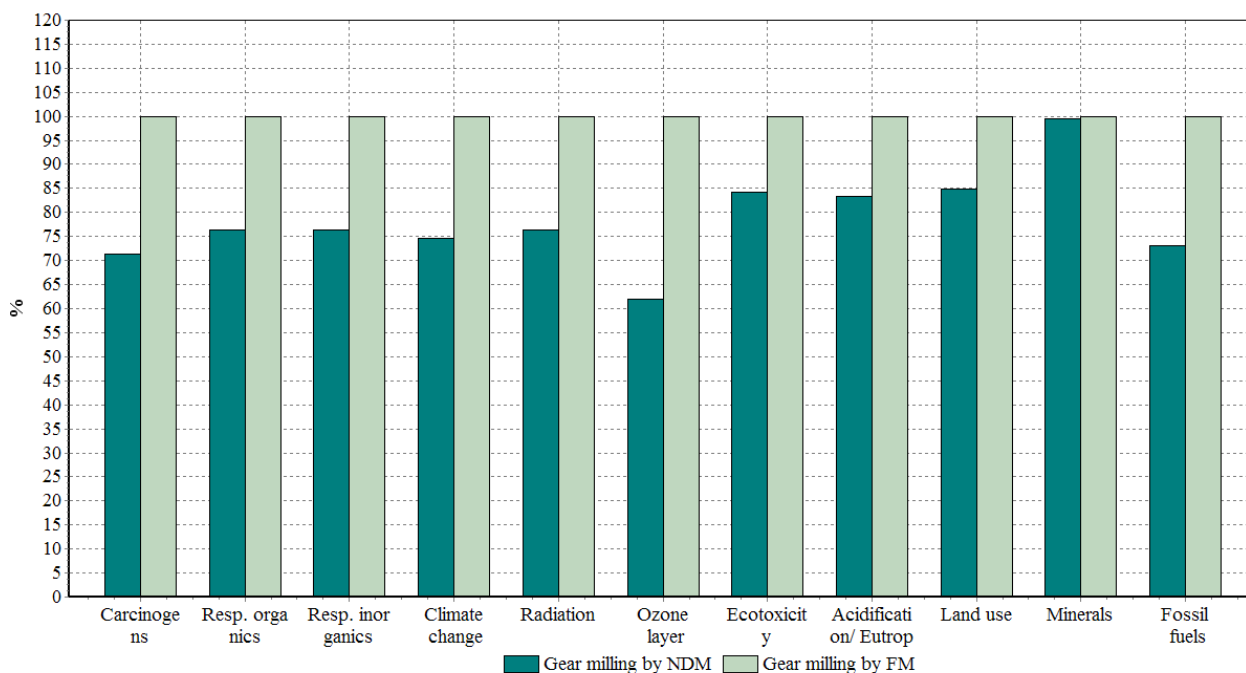
Deoarece unitatea funcțională considerate pentru *LCA* este de 1 kg de oțel 16MnCr5 îndepărtat și pentru a menține coerența analizei, rezultatele analizei consumului de energie sunt extrapolate pentru prelucrarea a 8 roți dințate, echivalentă cu așchiera unui kg de material. Consumul de energie pentru prelucrarea 1 kg de 16MnCr5 este de 0.67 kWh la *FM* (inclusiv consumul pompelor de circulare a lichidului de așchiere) și 0.52 kWh la *NDM* (inclusiv obținerea aerului comprimat).

Rezultă un consum de energie la frezarea roților dințate prin *NDM* cu 8% mai mic decât consumul de energie pentru procesul *FM*. Valorile extrapolate ale consumului de energie reprezintă intrările în procesul de generare al energiei pentru a determina datele *LCI*.

TABELUL 4.1. Caracteristicile roților dințate și condiții de prelucrare.

Proces	Frezare FM	Frezare NDM
Scula	Diametru $\phi 90$ mm Material: EMo5Co5 fără acoperire	Diametru $\phi 110$ mm Material: EMo5Co5 cu acoperire TiN
Semifabricat	Material: oțel aliat 16 MnCr5, Masă: 1032.4 g	
Parametrii roată dințată	Modul 2.75 mm, număr de dinți 37, Diametru $\phi 110$ mm, Lățime roată 19 mm, Greutate roată dințată: 907.8 g	
Parametrii de așchiere	Adâncime: 6.18 mm Viteza de așchiere: 130 m/min Avans: 2.4 mm/rot	
Timp de bază	0.6 min	
Mașina-unealtă	Mașina de frezat: PE 500CC220 CNC	
Lichide de așchiere	Ulei Rotanor 100 L/min (recirculat)	Ulei vegetal 0.4 ml/min (MQL)
Dispozitiv măsurare putere	HIOKI 3165	
Energia / 1 kg material (exhivalent cu prelucrarea a 8 roți dințate)	0.67 kWh	0.52 kWh

Comparația la nivel macro include LCA pentru trei procese: producția lichidelor de așchiere, procesarea așchiilor și producția de energie electrică.

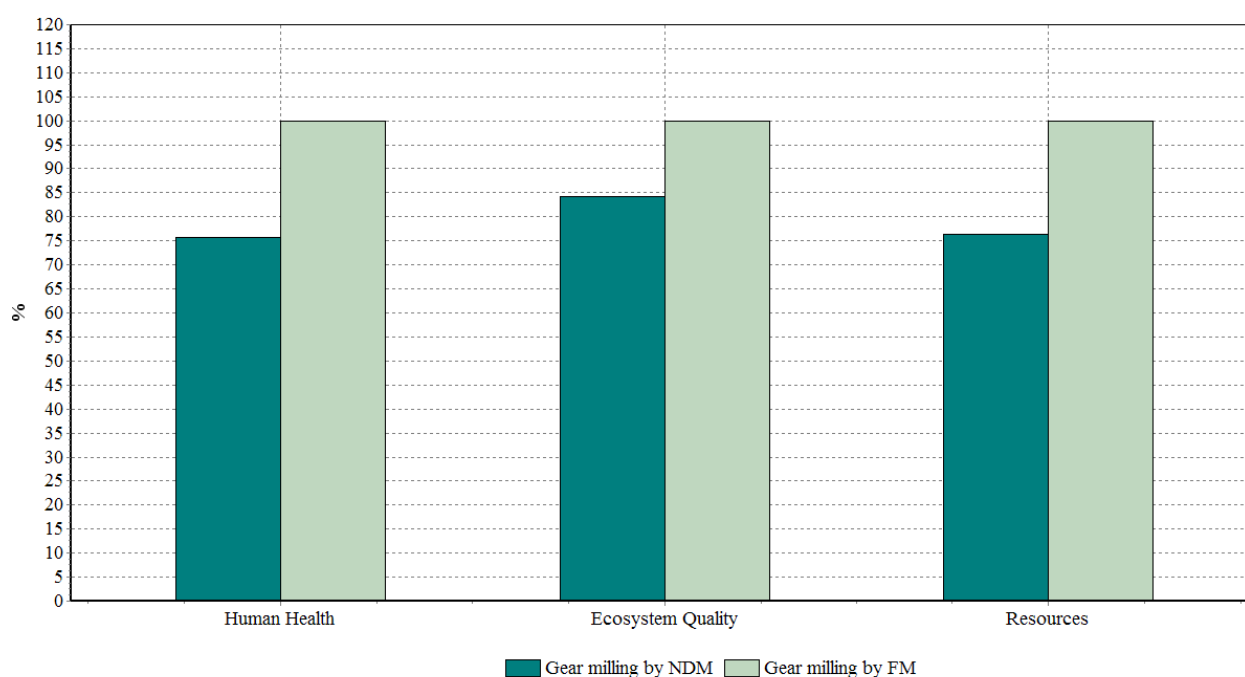


Comparing 1 p 'Gear milling by NDM' with 1 p 'Gear milling by FM'; Method: Eco-indicator 99 (H) V2.05 / Europe EI 99 H/H / characterization

FIGURA 4.4. Diagrama comparativă de caracterizare.

Caracterizarea rezumă LCI pentru cele trei procese menționate, în cazul NDM și FM, și atrinbuie rezultatele celor 11 categorii de impact enumerate în paragraful anterior. Figura 4.4 reprezintă graficul de caracterizare care indică comparativ performanța proceselor pe o scală procentuală, contribuția maximă fiind de 100%, subcategoriile de impact neputând fi comparate între ele. NDM generează un impact cu aproximativ 38% mai mic comparativ cu FM în raport cu categoriilor de impact considerate.

Evaluarea daunelor clasifică în continuare subcategoriile de impact în categoriile principale de impact: *resursele naturale, sănătatea umană și calitatea ecosistemelor*.



Comparing 1 p 'Gear milling by NDM' with 1 p 'Gear milling by FM'; Method: Eco-indicator 99 (H) V2.05 / Europe EI 99 H/H / damage assessment

FIGURA 4.5. Diagrama comparativă de evaluare a daunelor.

Performanța ecologică este prezentată comparativ în Figura 4.5, care arată că frezarea cu NDM comparativ cu FM are un impact mai redus cu 34% asupra sănătății umane, cu 16% asupra calității ecosistemului și cu 35% mai mic în ceea ce privește efectele asupra resurselor naturale.

Normalizarea exprimă efectele potențiale într-un mod care permite compararea diferitelor categorii de efecte. În această etapă, datele sunt scalate raportând emisiile generate la emisiile acceptate în normative pentru un cetățean european de vârstă medie.

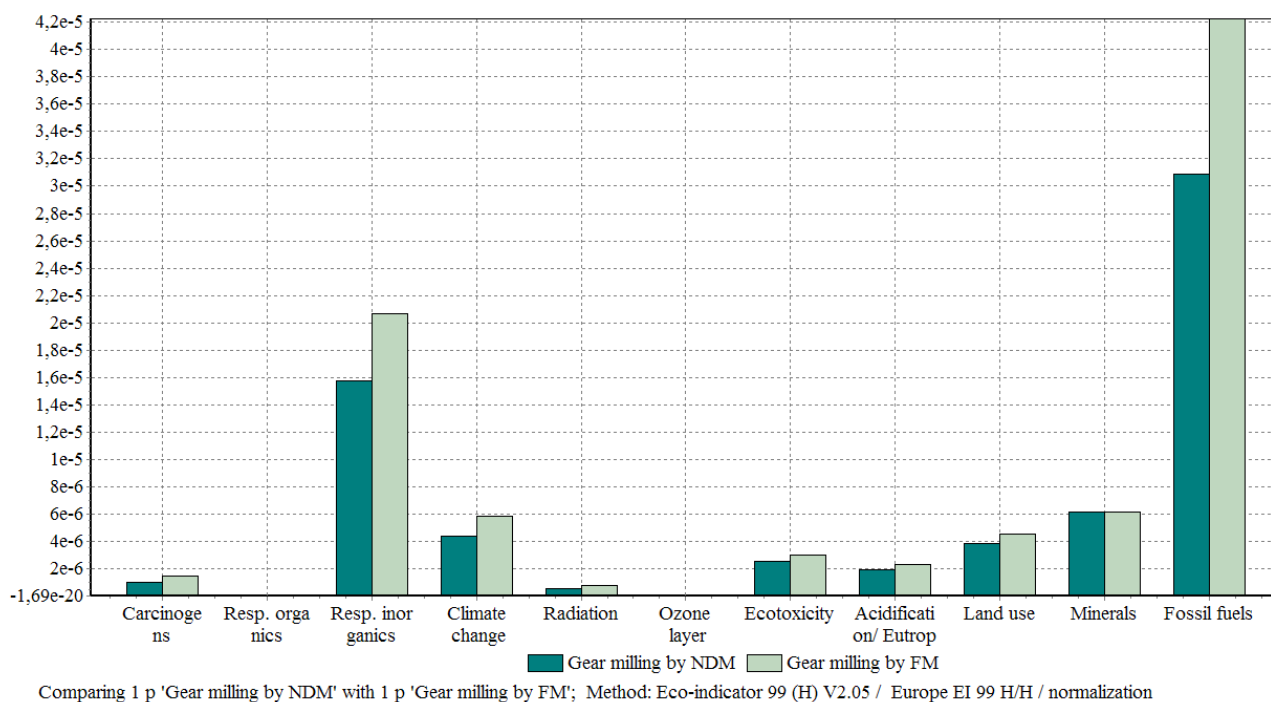


FIGURA 4.6. Diagrama comparativă de normalizare.

Frezarea *FM* generează cu aproximativ 20% mai multe efecte negative asupra calității ecosistemelor și cu 25% mai multe daune asupra sănătății și resurselor umane decât frezarea *NDM*. Această comparație este prezentată grafic în *Figura 4.6*. Distribuția pe categorii de impact arată că cele mai importante efecte au fost înregistrate în ceea ce privește substanțele anorganice volatile și combustibilii fosili.

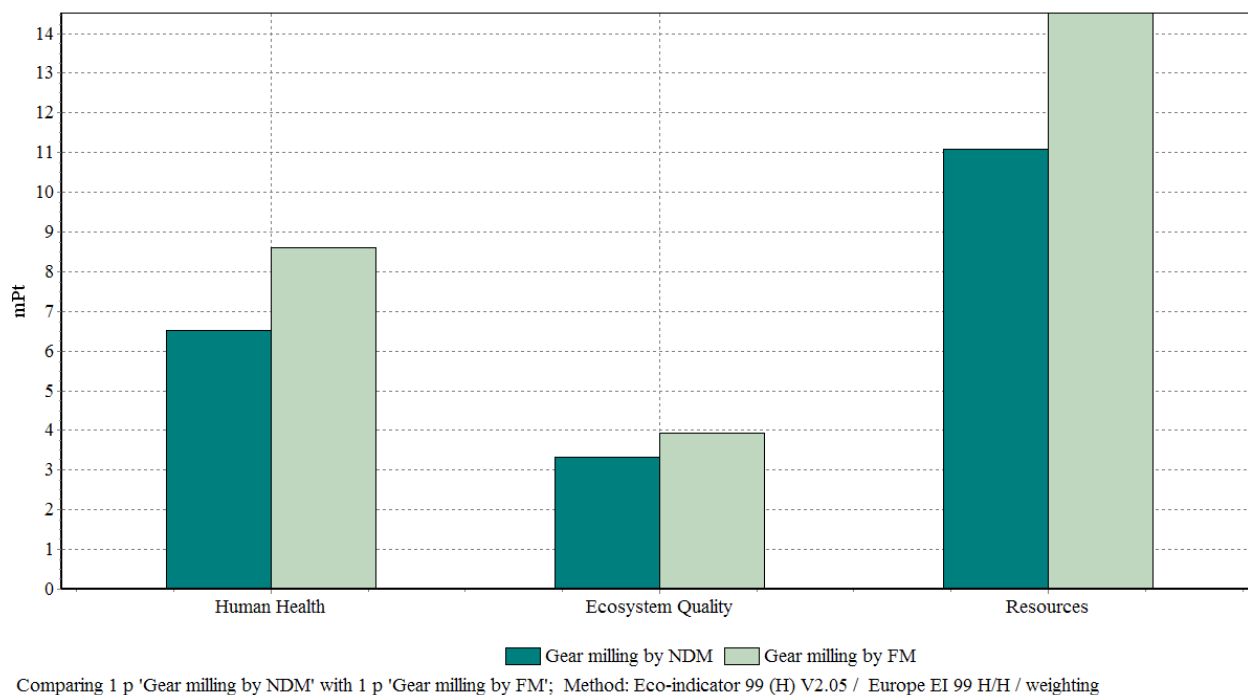


FIGURA 4.7. Diagrama comparativă de ponderare.

Ponderarea evidențiază cele mai nefavorabile efecte poluante potențiale prin atribuirea acestora a unui factor de ponderare mai mare. Astfel, sunt estimate valorile care indică importanța sau impactul relativ al fiecărui element dintr-un grup în comparație cu celelalte.

După cum reiese din *Figura 4.7*, frezarea *NDM* generează efecte asupra mediului cu aproximativ 15-25% mai mici în comparație cu frezarea *NDM* a angrenajelor.

Contribuțiile celor trei procese luate în considerare pentru determinarea impactului total asupra mediului sunt comparate în *Figura 4.8*. Contribuția consumului de lichide de așchiere la *FM* la deteriorarea mediului a înregistrat 2.88 *mPt*, în timp ce pentru procesul *NDM* efectul total este neglijabil. Daunele produse de consumul de energie electrică (inclusiv echipamentele auxiliare) sunt de numai 11.5 *mPt* la *NDM*, comparativ cu 15 *mPt* la *FM*.

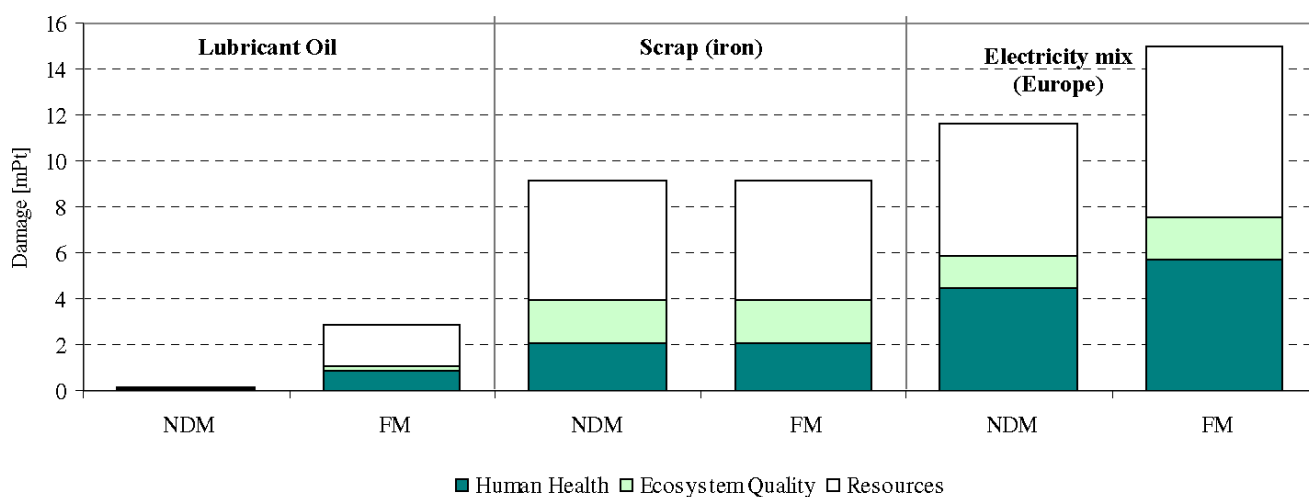


FIGURA 4.8. Contribuția proceselor considerate la *NDM* și *FM*.

Performanța ecologică cumulată este prezentată comparativ prin scorul unic, pentru frezarea *FM* și *NDM* în *Figura 4.9*. Impactul asupra mediului, produs de frezarea *FM*, a fost evaluat la 27 *mPt* (sănătatea umană - 8.61 *mPt*, calitatea ecosistemului - 3.93 *mPt*, resurse - 14.5 *mPt*), fiind mai mare decât impactul procesului *NDM* (20.95 *mPt*).

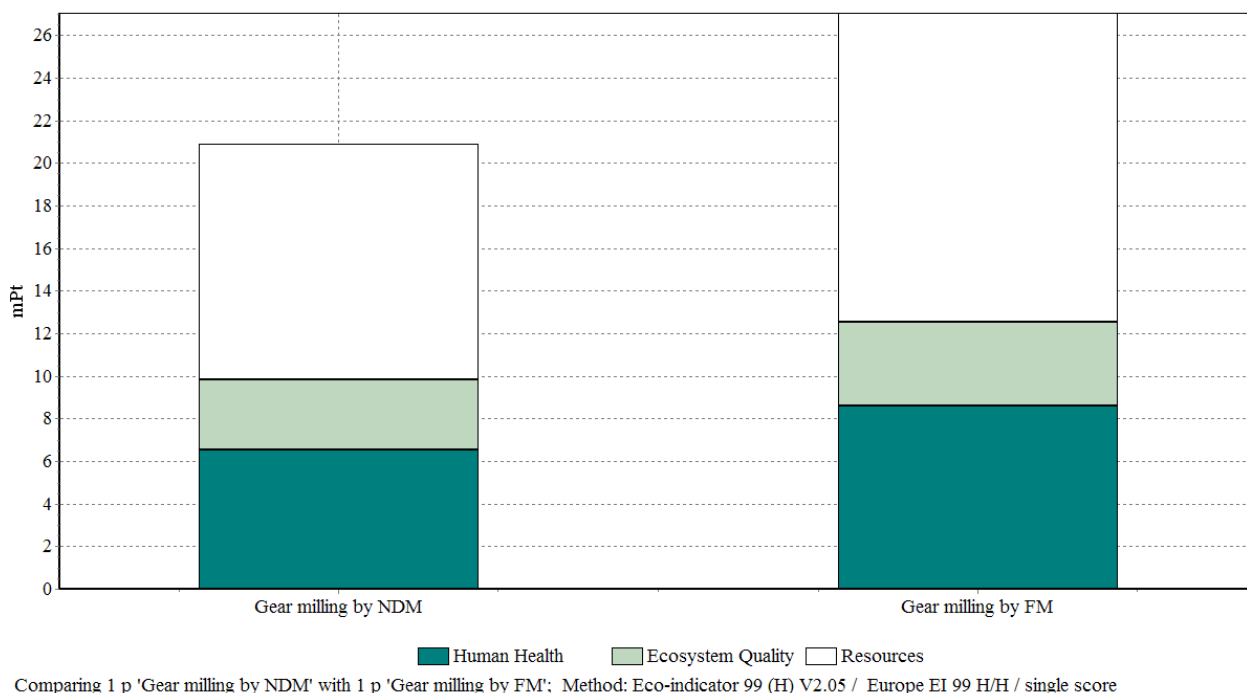


FIGURA 4.9. Diagrama comparativă a scorului unic

4.5. Concluzii

Analiza la nivel macro a proceselor de frezare a roților dințate cu modul mic a evidențiat câteva aspecte importante. Din analiza energiei necesare pentru așchiera materialului, este clar că energia de așchiere efectivă este destul de mică în comparație cu energia ciclului de viață complet.

Un alt aspect este acela că energia consumată pentru producția materialelor este incomparabil mai mare decât energia necesară în procesul de separare a așchiilor. Pentru reciclarea oțelului aliat, energia de producție a materialului și energia necesară pentru îndepărtarea materialului ar putea fi la fel de importante.

În ceea ce privește pregătirea și eliminarea lichidelor de așchiere, problemele sunt cauzate de emisiile lichide și gazoase. Este important de subliniat că pentru procesul de frezare analizat, efectele utilizării energiei prin producția de materiale și procesul de îndepărtare a materialelor au o pondere mult mai mare decât utilizarea lichidelor de așchiere și eliminarea deșeurilor.

Pentru a realiza o evaluare corectă și un impact mai detaliat asupra mediului al proceselor de prelucrare este necesară extinderea analizei la nivel micro, prin luarea în considerare a fabricării sculelor, construcția mașinii-unelte, substanțele de curățare a pieselor și așchiilor.

Analiza efectuată are dezavantajul că rezultatele obținute sunt valabile numai pentru condițiile de prelucrare considerate, neputând fi extrapolate sau generalizate. Acest aspect poate fi rezolvat prin dezvoltarea unui model general de analiză, care să fie valabil pentru orice proces de prelucrare. Studiile viitoare se vor concentra pe completarea evaluării de mediu și o legătură mai strânsă între utilizarea informațiilor despre energie, lichidul de aşchiere (uleiuri și emulsii naturale sau sintetice) și emisiile rezultate din procesele de prelucrare.

Notății

CVD	- Chemical Vapour Deposition (depunerea chimică a vaporilor)
f	- avans [mm/rot]
FM	- Flood Machining (aşchiere cu ungere și răcire convențională)
LCA	- Life Cycle Assessment (Evaluarea ciclului de viață)
LCI	- Life Cycle Inventory (Inventarul ciclului de viață)
LCIn	- Life Cycle Interpretation (Interpretarea ciclului de viață)
LCIA	- Life Cycle Impact Assessment (Evaluarea impactului ciclului de viață)
mPt	- milipuncte
NDM	- Near-Dry Machining (aşchiere pseudo-uscată)
n_t	- turația sculei (rot/min)
Pt	- points
PVD	- Physical Vapour Deposition (depunerea fizică a vaporilor)
TiN	- nitrură de titan

CAPITOLUL 5

STUDIU PRIVIND CONDIȚIILE OPTIME DE AȘCHIERE, UNGERE ȘI RĂCIRE LA FREZAREA FRONTALĂ A AIMg₃

5.1. Introducere

Așa cum s-a prezentat în capitolele introductive, conceptele de *producție durabilă* și *producție curată* se referă la dezvoltarea de produse, procese și servicii, folosind sisteme care nu poluează și conservă resursele naturale și energia. Acest model de producție ar trebui să fie viabil din punct de vedere economic, sigur și sănătos pentru angajați și atrăgător pentru consumatori [Pus 10a].

Creșterea preocupării pentru calitatea mediului și sustenabilitate impulsionează industria să se orienteze spre noul concept de *producție durabilă* [Pus 10b, Zac 05], atenția concentrându-se nu numai pe consumul de energie și eliminarea deșeurilor, dar și asupra costurilor generate de practicile industriale inadecvate [Cla 08, Jaw 07, Pus 10a, Pus 10b].

Pentru a-și menține competitivitatea, majoritatea domeniilor industriale se străduiesc constant să propună soluții care să asigure costuri de producție reduse, o productivitate sporită și o calitate superioară a reperelor prelucrate, [Bal 05, Bra 06, Bre 05]. Ca alternativă, *producția durabilă* pune toate aceste componente pe același nivel, definind *produsul durabil*, bazat pe principiile sustenabilității prezentate în *Figura 5.1*.

În ceea ce privește procesele de prelucrare prin așchiere și aplicarea principiilor ecologice de proiectare, trebuie definite măsurile pentru determinarea nivelului de sustenabilitate al acestora.

Tehnicile de așchiere care permit reducerea consumului de lichide de răcire și lubrifiante sunt posibile prin utilizarea tehnicii ungere și răcire minimală (*MQL*) sau prelucrarea uscată (*DM*) [Att 06, Ito 06, Kel 02, Mar 07, Min 05, San 10, Wei 04].

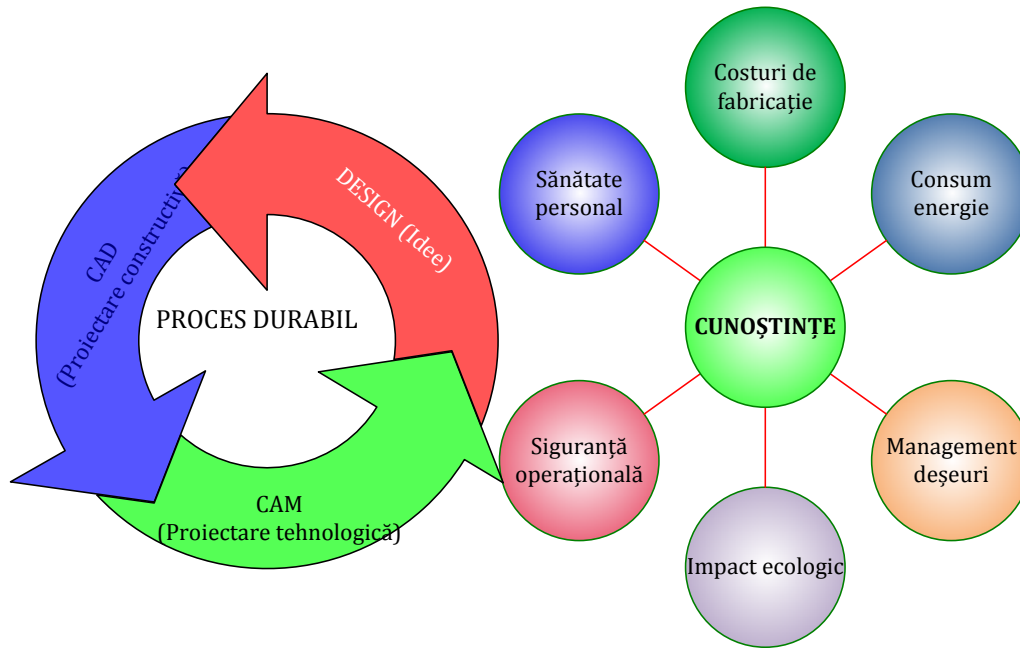


FIGURA 5.1. Componentele producției durabile.

Așa cum s-a prezentat în capitolele anterioare, așchiera uscată este mai puțin recomandată, atunci când este necesară o eficiență mai mare a prelucrării, o calitate superioară a calității suprafeței și în condiții de așchiere severe. Pentru aceste situații, operațiile de prelucrare pseudo-uscată (*MQL*), care utilizează cantități foarte mici de lichide de așchiere, reprezintă alternative ofertante pentru o serie de aplicații practice.

În principiu, fiecare proces de așchiere poate fi convertit de la răcirea și ungerea convențională prin recircularea lichidului de așchiere în sistemul de răcire al mașinii-unelte, la prelucrarea uscată (*DM*) sau la așchiera cu ungere și răcire minimală (*MQL*) [Elh 01]. Datorită flexibilității tehnicii *MQL*, există soluții individuale adecvate pentru o mare varietate de procese de fabricație, utilizându-se la aproape toate procesele mecanice de prelucrare prin așchiere a metalelor: *frezare, strunjire, găurire, prelucrarea găurilor adânci, filetare, broșare, alezare, rectificare* [Bro 98, Dun 97, Kel 02, Pau 07, Rah 02, Wei 02].

Planificarea investigațiilor urmărește, în general, înțelegerea prelucrărilor *DM* și *NDM* în termeni de performanță de prelucrare (*forțele de așchiere, rugozitatea suprafeței, precizia dimensională și forma așchiilor*), în funcție de condițiile tehnologice: *operația de prelucrare, geometria sculei, materialul sculei, materialul semifabricatului, parametrii de proces*, așa cum se arată în Figura 5.2.

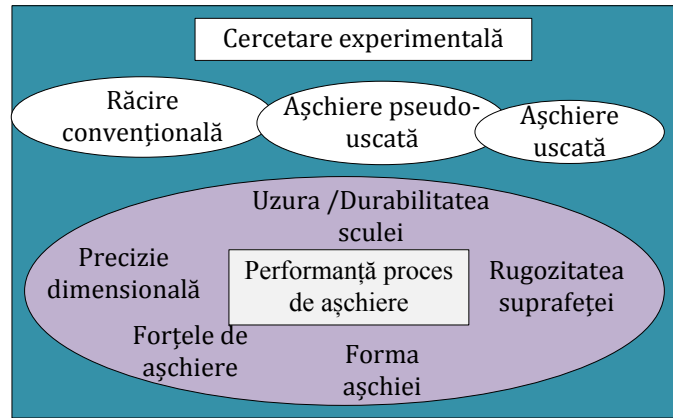


FIGURA 5.2. Elemente de interes în planificarea investigațiilor.

Mediile de răcire și lubrifiții sunt utilizați frecvent în operațiile de prelucrare prin aşchiere, îmbunătățind performanțele de prelucrare, însă trebuie analizate totodată și costurile și riscurile asociate utilizării lor. Un prim aspect urmărit în urma aplicării mediilor de aşchiere este de a controla temperatura de aşchiere, un parametru important pentru procesele de prelucrare din punct de vedere al durabilității sculei și al preciziei dimensionale a piesei. În acest context, este importantă și studierea variației temperaturii de aşchiere corespunzătoare *NDM* și *DM*.

Studiul literaturii de specialitate relevă faptul că trebuie desfășurată în continuare o activitate sistematică de cercetare, pentru a determina condițiile de aşchiere adecvate pentru obținerea unor caracteristici de prelucrabilitate mai bune ale fiecărui material. Variabile care influențează procesele de prelucrare ecologică sunt prezentate în *Figura 5.3*.

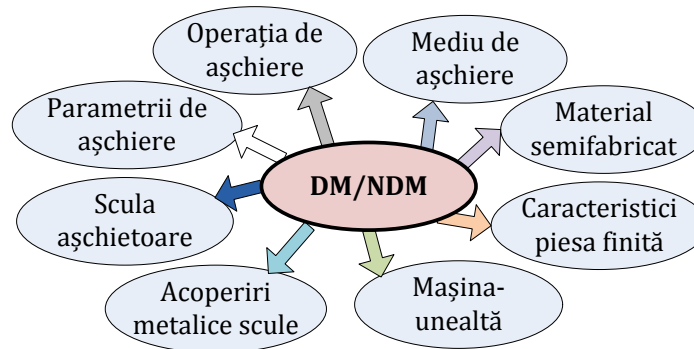


FIGURA 5.3. Variabile de influență la *DC* și *NDM*.

Acest capitol al lucrării prezintă un studiu de caz, privind analiza influenței parametrilor tehnologici și a condițiilor de ungere și răcire, pentru a evidenția beneficiile rezultate din utilizarea tehnicilor de aşchiere ecologică. Investigațiile includ, în afară de frezarea uscată și pseudo-uscătă, și prelucrarea cu răcire și ungere convențională.

5.2. Proiectarea experimentelor utilizând metoda Taguchi

5.2.1 Metoda Taguchi

Metoda Taguchi este o tehnică simplă și robustă pentru optimizarea parametrilor procesului analizat. Scopul analizei este de a investiga modul în care diferiți parametri ai procesului afectează caracteristicile de performanță ale procesului și care variabilă influențează în mod semnificativ rezultatele procesului [Par 96, Pha 89].

Numeroase studii deja realizate se bazează pe *metoda Taguchi*, ca instrument de proiectare a experimentelor în diverse domenii, inclusiv așchieră metalelor: procese de frezare [Gha 04], rectificare [Kwa 05], broșare [Mos 05], strunjire [Yan 98], [Dar 00], [Kop 02], electroeroziune [Lji 09] sau hidroformare [Del 04].

Proiectarea experimentelor propusă de *metoda Taguchi* folosește matricele ortogonale pentru a organiza parametrii de proces și, de asemenea, nivelurile de variație ale acestor parametri. Acest lucru permite testarea doar a unei game limitate de combinații de parametri, în locul verificării tuturor combinațiilor posibile. O astfel de abordare permite determinarea factorilor care afectează cel mai mult rezultatele procesului cu un număr minim de experimente practice, economisind astfel timp și resurse.

Calitatea produsului este, așadar, definită în termeni de "*pierderi*", datorită deviației caracteristicilor funcționale ale produsului de la valoarea țintă. Abaterea dintre valoarea propusă a caracteristicilor de performanță ale unui proces și valoarea măsurată este definită ca o *funcție de pierdere*. Factorii care determină devierea caracteristicilor funcționale ale produselor de la valorile lor țintă, și nu pot fi controlați, sunt numiți *factori perturbatori*, aceștia putând fi clasificați ca factori externi (de ex. erori umane, temperatură mediului ambiant) sau distorsiuni ale procesului de fabricație (de ex. variația parametrilor de proces, deformații). Obiectivul principal este de a asigura fabricarea unui produs de calitate corespunzătoare, la un cost redus, ținând cont de toți factorii perturbatori [Una 91].

Funcția obiectiv pentru experimentele matriceale este *raportul semnal-perturbație* (*signal-to-noise ratio S/N*). Aceasta este folosită pentru a măsura caracteristicile de performanță și contribuția procentuală a parametrilor de proces prin analiza varianței (*Analysis of Variance – ANOVA*). Atunci când caracteristica analizată este continuă, raportul S/N ca funcție obiectiv ar putea fi încadrată într-una dintre următoarele trei categorii: *valoarea nominală* este cea mai bună caracteristică, *valoarea mai mică* este caracteristica

mai bună și valoarea mai mare este caracteristica mai bună [Kwa 05, Pha 89]. Pentru fiecare dintre aceste situații, nivelul optim al unui parametru al procesului este nivelul care determină cea mai mare valoare a transformării raportului S/N .

Urmărirea continuă a reducerii abaterilor de prelucrare de la valoarea țintă a caracteristicilor critice de calitate este un element cheie pentru a obține o calitate ridicată și a reduce costurile [Lin 06, Lof 06]. Prin aplicarea metodei Taguchi se poate reduce în mod semnificativ timpul necesar investigațiilor experimentale, deoarece permite în mod eficient analiza influenței individuale a mai multor factori asupra performanței procesului analizat [Una 91, Pha 88].

Scopul studiului prezentat în capitol este de a optimiza parametrii de frezare și a alege metoda de ungere și răcire cea mai favorabilă pentru a obține o calitate mai bună a suprafeței rezultate. Aceasta înseamnă că funcția obiectiv o reprezintă obținerea unor valori cât mai mici ale rugozității și temperaturii de așchiere, iar raportul S/N se calculează pe baza criteriului caracteristica mai mică este cea mai bună astfel:

$$S/N = 10 \cdot \log \frac{1}{n} \left(\sum y^2 \right), \quad (5.1)$$

unde y reprezintă datele înregistrate și n este numărul de înregistrări.

5.2.2 Proiectarea experimentelor

Conform metodei Taguchi în acest studiu, cu patru factori și trei nivele de variație ale fiecăruia, au fost realizate nouă experimente, iar designul factorial fracțional selectat este o matrice ortogonală standard L_9 [Una 91]. Fiecare rând al matricei reprezintă o secvență de prelucrare și iar succesiunea în care sunt efectuate acestea este aleatorie (Tabelul 5.1).

TABELUL 5.1. Matricea ortogonală L_9 .

Exp. no	P_1	P_2	P_3	P_4	R_1	R_2	R_3
1	1	1	1	1	$T_{1,1}$	$T_{1,2}$	$T_{1,3}$
2	1	2	2	2	$T_{2,1}$	$T_{2,1}$	$T_{2,3}$
3	1	3	3	3	$T_{3,1}$	$T_{3,2}$	$T_{3,3}$
4	2	1	2	3	$T_{4,1}$	$T_{4,2}$	$T_{4,3}$
5	2	2	3	1	$T_{5,1}$	$T_{5,2}$	$T_{5,3}$
6	2	3	1	2	$T_{6,1}$	$T_{6,2}$	$T_{6,3}$
7	3	1	3	2	$T_{7,1}$	$T_{7,2}$	$T_{7,3}$
8	3	2	1	3	$T_{8,1}$	$T_{8,2}$	$T_{8,3}$
9	3	3	2	1	$T_{9,1}$	$T_{9,2}$	$T_{9,3}$

P_1, P_2, P_3, P_4 – parametri

R_1, R_2, R_3 – răspunsuri

$T_{i,j}$ – rezultate experiment i , măsurare j , $i=1 \dots 9, j=1 \dots 3$

În matrice cele trei nivele de variație ale fiecărui parametru P sunt notate de 1, 2 și 3, iar raportul S/N asociat cu răspunsurile este dat de R_1 , R_2 și R_3 .

5.2.3 Procedura experimentală

Prelucrările prin frezare au fost efectuate pe mașina de frezat HAAS TM1 (Figura 5.4). Informații privind procesul de frezare sunt prezentate în Tabelul 5.2.



FIGURA 5.4. Centrul de prelucrare HAAS TM 1

TABELUL 5.2. Informații privind procesul de frezare.

Mașina-unealtă:	HAAS TM1 ($P_W = 4$ kW, $n_{\max} = 4000$ rev/min)
Scula:	Freză frontală - HSS, Φ 20 mm, $z = 4$ dinți
Lichide de așchiere:	- Așchiere uscată - MQL: ulei LUBRIMAX, 0.03 L/h - Răcire convențională: emulsie SAROL 474 EP, 90 L/h recirculată
Semifabricat:	AlMg ₃ (EN AW 5754) Dimensiuni: 160 mm x 265 mm x 20 mm

Aliajele de aluminiu (AlMg₃) sunt utilizate în diferite domenii, în special pentru componente de precizie, în industria construcției de automobile, producția de aparate. Compoziția chimică a aliajului AlMg₃ este prezentată în Tabelul 5.3.

TABELUL 5.3. Compoziția chimică a aliajului $AlMg_3$.

Element	%	Si	Fe	Mn	Mg	Al
		0.4%	0.4%	0.5%	2.6-3.2%	Diferența

Pentru prelucrări s-a folosit o freză frontală din oțel rapid cu compoziție tipică: 18% tungsten, 4% crom, 1% vanadiu, 0.7% carbon și restul fier și o duritate 62-64 HRC. Adăugarea de 5-8% cobalt îi conferă rezistență mecanică mai mare și durabilitate superioară.

Factorii luați în considerare și nivelurile lor de variație sunt indicate în *Tabelul 5.4*, în funcție de condițiile de prelucrare de semifinisare pentru $AlMg_3$ (EN AW 5754) cu scule din oțel rapid. Operațiile de prelucrare au fost efectuate în următoarele condiții de lubrifiere și răcire: *așchiere uscată, lubrifiere cantitate minimă și ungere-răcire convențională*.

TABELUL 5.4. Parametrii de proces și nivelele de variație.

Parametru	Cod	Niveluri		
		1	2	3
Adâncime de așchiere axială a_p [mm]	P_1	0.5	1	1.5
Avans f [mm/dinte]	P_2	0.08	0.1	0.16
Viteza de așchiere v [m/min]	P_3	100.48	150.72	200.96
Debit lichid de așchiere Q[L/h]	P_4	0	0.030	90

Pentru frezarea frontală cu *MQL* se folosește un sistem de lubrifiere, dotat cu o pompă cu piston pentru dozarea cantităților mici de lichid (*Figura 5.5*) care distribuie o cantitate exactă de lubrifianț.



FIGURA 5.5. Frezare plană cu *MQL*.

Aerul comprimat furnizat separat (la o presiune de 5 bari) pulverizează lichidul de așchiere printr-o duză. Setările acestui echipament, recomandate pentru prelucrarea aluminiului, sunt o frecvență a impulsurilor de circa 2 secunde și o viteză de curgere a lubrifiantului de 0.030 L/h, care se mențin constante pe durata prelucrărilor.

Emulsia SAROL 474 EP 15% (debit - 90 L/h) a fost utilizată ca mediu de așchiere pentru FM, respectiv ulei vegetal Lubrimax pentru NDM. Debitul de 0 L/h al fluidului de așchiere corespunde prelucrării uscate.

Obiectivul studiului este de a optimiza parametrii de frezare (adâncimea axială de așchiere a_p [mm], avansul de prelucrare - f [mm/dinte], viteza de așchiere - v [m/min]) și debitul lichidului de așchiere Q [L/h], care permit obținerea unei rugozități bune a suprafeței, un consum de putere cât mai redus și temperaturi joase în zona de așchiere, în condițiile de prelucrare stabilite.

5.3. Analiza și interpretarea rezultatelor

5.3.1 Analiza calității suprafeței și a puterii consumate

Rugozitatea suprafeței plane frezate a fost măsurată de rugozimetrul Mitutoyo model SJ201 (Figura 5.6). Acest dispozitiv permite măsurarea a trei parametri uzuali care definesc rugozitatea unei suprafețe: R_a (media aritmetică a valorilor absolute ale profilului pe lungimea de măsurare), R_z (distanța medie dintre cea mai înaltă proeminență și cea mai mică vale a profilului de rugozitate pe lungime de măsurare) și R_q (rădăcina pătratică medie a suprafeței reale a profilului median).

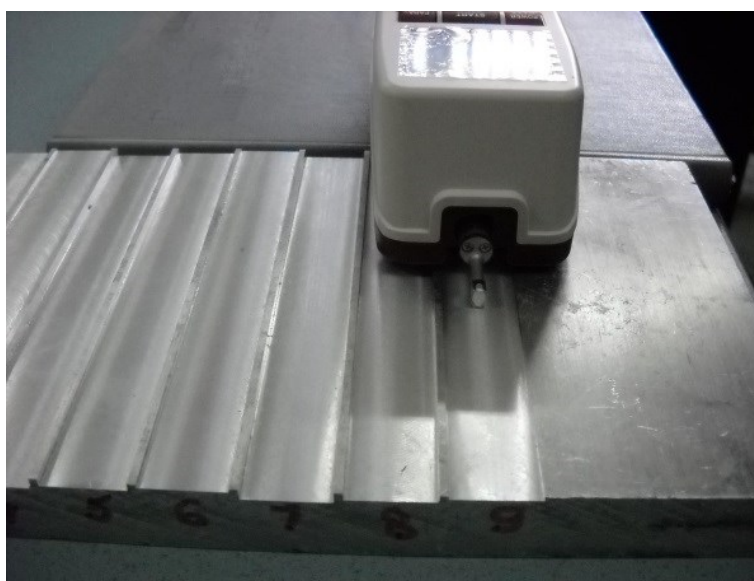


FIGURA 5.6. Măsurarea rugozității suprafețelor frezate.

Acești parametri, care definesc profilul suprafeței, sunt calculați prin intermediul următoarelor relații matematice:

$$R_a = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (5.2)$$

$$R_z = \frac{1}{5} \cdot \sum_1^5 R_{p_i} - R_{v_i} \quad (5.3)$$

unde R_{p_i} , R_{v_i} sunt cea mai înaltă proeminență, respectiv cea mai adâncă cotă pe lungimea de măsurare.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (5.4)$$

Deoarece acești parametri reduc toate informațiile referitoare la profilul măsurat la un singur număr, schimbări mici privind felul în care sunt filtrate datele de profil brute și modul în care se calculează linia mediană și modul de realizare a măsurătorii pot afecta parametrii calculați.

Tabelul 5.4 prezintă valorile măsurate ale rugozității suprafeței (R_a , R_z și R_q). Datorită corelațiilor dintre cei trei parametri, pentru continuarea studiului doar parametrul R_a a fost luat în considerare. rația S/N calculată pentru fiecare nivel al R_a este prezentată în *Tabelul 5.5*.

TABELUL 5.4. Valorile măsurate ale rugozității.

Matricea parametrilor de intrare ai procesului				Valori măsurate ale rugozității								
a_p [mm]	f [mm/dinte]	v [m/min]	Q [L/h]	R_a [μm]			R_z [μm]			R_q [μm]		
				Trial 1	Trial 2	Trial 3	Trial 1	Trial 2	Trial 3	Trial 1	Trial 2	Trial 3
0.5	0.08	100.48	0	1.87	1.85	1.87	10.09	10.34	10.57	2.26	2.19	2.27
0.5	0.1	150.72	0.03	2.98	2.69	2.79	15.52	12.9	15.02	3.66	3.17	3.45
0.5	0.16	200.96	90	4.83	4.24	4.09	20.89	20.62	19.55	5.53	5.04	4.83
1	0.08	150.72	90	2.80	2.64	2.25	15.79	12.91	11.49	3.68	3.09	2.78
1	0.1	200.96	0	2.77	2.73	2.3	14.78	15.58	11.12	3.41	3.42	2.75
1	0.16	100.48	0.03	5.31	4.98	4.57	23.08	20.4	19.82	6.06	5.74	5.27
1.5	0.08	200.96	0.03	2.98	2.58	2.29	15.56	12.56	12.43	3.95	3.13	2.86
1.5	0.1	100.48	90	3.45	3.5	3.38	18.32	18.49	16.88	4.31	4.26	4.12
1.5	0.16	150.72	0	4.35	4.99	4.46	17.74	22.51	19.79	5.06	5.82	5.23

Tabelul 5.5 prezintă consumul de putere P_w pentru fiecare dintre secvențele de prelucrare realizate.

TABELUL 5.5. Valori înregistrate ale consumului de putere.

Matricea parametrilor de intrare și niveluri de variație				Valori măsurate		
a_p [mm]	f [mm/dinte]	v [m/min]	Q [l/h]	P_w [kW]		
				Trial 1	Trial 2	Trial 3
0.5	0.08	100.48	0	0.3	0.25	0.35
0.5	0.1	150.72	0.03	0.5	0.45	0.5
0.5	0.16	200.96	90	0.9	0.8	0.95
1	0.08	150.72	90	0.7	0.6	0.8
1	0.1	200.96	0	1.2	1.2	1.1
1	0.16	100.48	0.03	0.7	0.6	0.65
1.5	0.08	200.96	0.03	1.4	1.3	1.35
1.5	0.1	100.48	90	0.7	0.6	0.6
1.5	0.16	150.72	0	1.6	1.4	1.7

În continuare, analiza influenței parametrilor de proces a fost realizată prin compararea analizei standard și a analizei varianței (ANOVA) bazată pe metoda *Taguchi*. Analiza datelor experimentale se bazează pe analizele ANOVA și *F* (analiza standard). Acestea permit determinarea influenței parametrilor procesului asupra rezultatelor și stabilirea condițiilor optime de prelucrare. Analiza influenței parametrilor de intrare este utilizată pentru a studia tendința fiecăruia dintre factori, așa cum se arată în *Figura 5.6* și *Figura 5.7*.

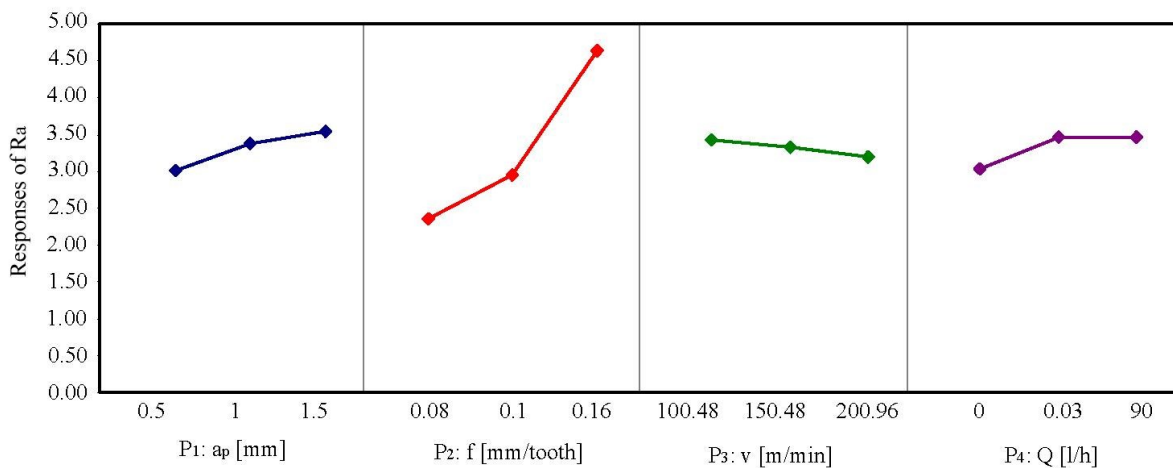


FIGURA 5.6. Influența parametrilor de proces asupra rugozității R_a .

Figura 5.6 ilustrează efectele principale asupra rugozității suprafeței. Se observă că valori mici ale adâncimii de așchiere, viteze mici de avans, viteze mari de așchiere și un debit minim al lichidului de așchiere conduc la rugozități bune ale suprafețelor prelucrate prin frezare. Sunt important de remarcat rezultatele similare obținute prin folosirea *MQL* și metodei convenționale de ungere și răcire. În ciuda debitului foarte scăzut al lubrifianului, *MQL* nu determină o înrăutățire a calității suprafeței.

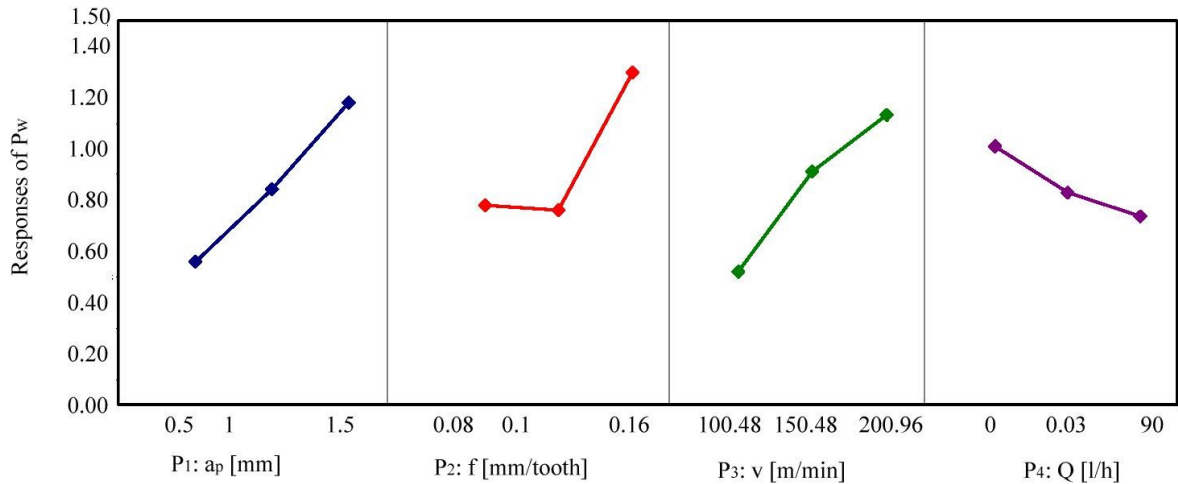


FIGURA 5.7. Influența parametrilor de proces asupra consumului de putere P_w .

Figura 5.7 prezintă influența parametrilor de proces și a nivelurilor acestora asupra consumului de putere P_w . Se poate observa creșterea P_w odată cu creșterea a_p , f și v și scăderea odată cu creșterea debitului de lichid de așchiere Q . Frezarea desfășurată în condiții de ungere și răcire pseudo-uscate nu determină o creștere semnificativă a puterii consumate comparativ cu ungerea și răcirea convenționale.

Performanța procesului de prelucrare (factorul semnificativ ANOVA) pentru fiecare experiment din *matricea ortogonală L9* poate fi determinată prin analiza valorilor înregistrate ale R_a și P_w , prezentate în *Tabelele 5.4 și 5.5*. *Tabelul 5.6* prezintă rezultatele testului ANOVA și F pentru parametrul R_a . Dacă valorile F_z calculate depășesc valoarea $F_{0.05}$, conform datelor din tabelele statistice [Una 91], atunci contribuția parametrilor de intrare este semnificativă.

Deoarece trei dintre valorile calculate F_z sunt mult mai mari decât $F_{0.05}$, factorii de influență sunt clasificați în două niveluri: semnificativi (principala influență) și neglijabili. De exemplu, din punct de vedere al rugozității suprafeței, parametrul semnificativ este viteza de avans, ceilalți parametri având o influență mai redusă asupra R_a .

TABELUL 5.6. Analiza varianței și testul F pentru parametrul R_a .

Factor	DOF	Sz	Vz	F _z -ratio	F _{0.05}	Sz'	P _z [%]
P ₁ : a _p [mm]	2	1.3063	0.6531	8.3855	3.5500	1.1505	3.8800
P ₂ f [mm/dinte]	2	25.5497	12.7748	164.0135	3.5500	25.3939	85.6407
P ₃ : v [m/min]	2	0.2174	0.1087	1.3955	3.5500	0.0616	0.2078
P ₄ : Q [l/h]	2	1.1763	0.5882	7.5513	3.5500	1.0205	3.9671
Error	18	1.4020	0.0779				6.3043
Total	26						100.000

O analiză similară se aplică și pentru evaluarea consumului de putere P_w . Tabelul 5.7 rezumă rezultatele corelate, indicând a_p și v ca factori semnificativi de influență, influențele avansului f și debitului lichidului de așchiere Q fiind mai reduse.

TABELUL 5.7. Analiza varianței și testul F pentru parametrul P_w .

Factor	DOF	Sz	Vz	F _z -ratio	F _{0.05}	Sz'	P _z [%]
P ₁ : a_p [mm]	2	1.779	0.890	147.800	3.550	1.767	40.713
P ₂ : f [mm/dinte]	2	0.411	0.206	34.169	3.550	0.399	9.199
P ₃ : v [m/min]	2	1.695	0.847	140.785	3.550	1.683	38.768
P ₄ : Q [l/h]	2	0.347	0.173	28.815	3.550	0.335	7.992
Error	18	0.108	0.006				3.328
Total	26						100.000

Suplimentar, investigațiile făcute permit stabilirea condițiilor optime de prelucrare pe baza metodologiei *Taguchi* (Tabelul 5.8).

TABELUL 5.8. Condiții optime de prelucrare pentru funcțiile obiectiv R_a și P_w .

Parametru	Răspuns parametru R_a				Răspuns parametru P_w			
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_1	P_2	P_3	P_4
Nivel 1	3.02	2.35	3.42	3.02	0.56	0.78	0.52	1.01
Nivel 2	3.37	2.95	3.33	3.46	0.84	0.76	0.91	0.83
Nivel 3	3.55	4.64	3.20	3.46	1.18	1.03	1.13	0.74

Condițiile optime de frezare plană a aliajului $AlMg_3$ cu freze din oțel rapid, în limitele considerate ale parametrilor de proces, sunt adâncimea minimă de așchiere, viteza minimă de avans, viteza minimă de așchiere și debitul maxim al lichidului de așchiere.

5.3.2 Analiza temperaturilor în zona de așchiere

Un alt parametru analizat a fost temperatura zonei de așchiere. Dezvoltarea unui model adecvat de determinare a temperaturii în zona de așchiere reprezintă o sarcină foarte dificilă datorită numărului mare de parametri interdependenți care afectează performanța procesului: viteza de așchiere, avansul, adâncimea de așchiere, uzura sculei așchietoare, caracteristicile fizice și chimice ale semifabricatelor, tipul de acoperire a sculei, etc. [Elt 08]. Din acest motiv au fost preferate investigațiile experimentale.

În acest sens a fost utilizat un termometru cu infraroșu fără contact *XTempLS*, care permite măsurarea facilă a temperaturii în domeniul de la -35°C - 900°C (Figura 5.8). Dispozitivul are o rezoluție de temperatură de 0.1°C și o precizie IR de $\pm 0.75^\circ\text{C}$. Intervalul de măsurare, egal cu rezoluția diagramei, a fost setat la 20 ms.

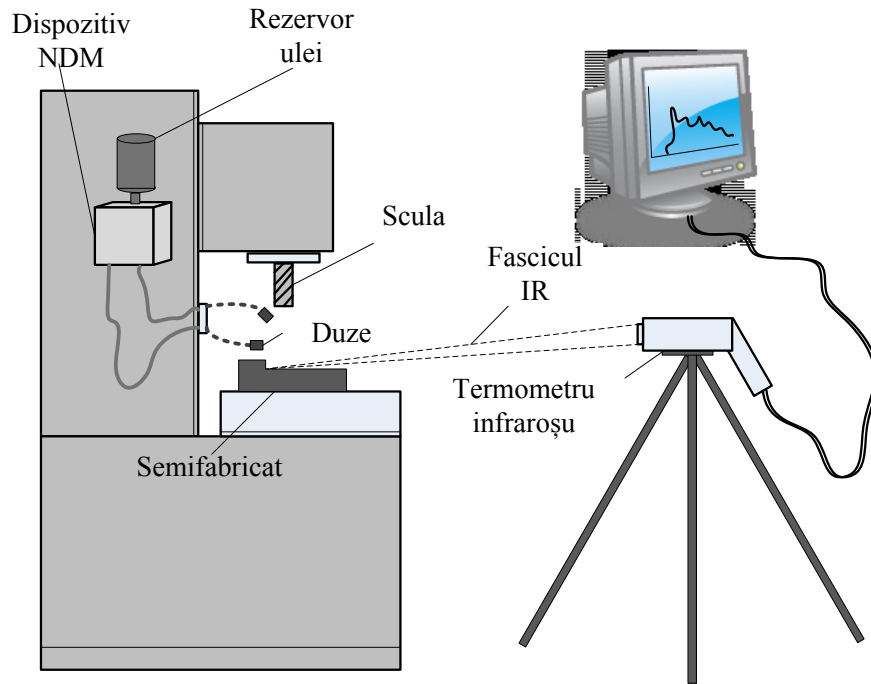


FIGURA 5.8. Stand experimental pentru măsurarea temperaturii la frezare.

Studiul compară efectele mediilor de așchiere la *NDM*, *DC* și *FM*, în ceea ce privește reducerea temperaturii de așchiere prin efectul de răcire, precum și reducerea generării de căldură prin efectul de lubrifiere. Un exemplu de diagramă de măsurare a temperaturii este prezentat în *Figura 5.9*.

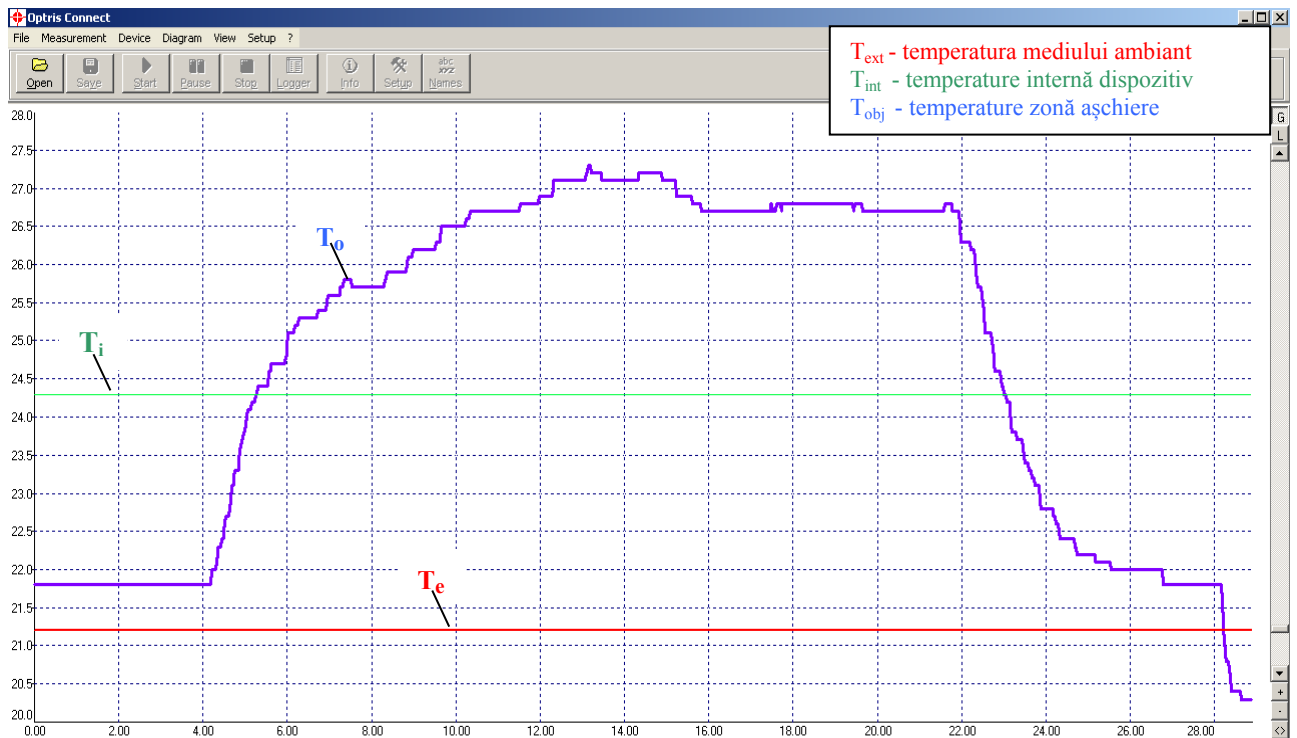


FIGURA 5.9. Măsurarea temperaturilor.
(Experiment 1: $a_p=0.5$ mm, $f=0.08$ mm/dinte, $v=100.48$ m/min, $Q=0$ L/h)

Pentru fiecare combinație a parametrilor de așchiere, temperatura a fost înregistrată continuu, utilizând soft-ul *OptrisConnect*. Au fost măsurate simultan trei de temperaturi: $T_{max-obj}$ - temperatura obiectului (zona de așchiere, fața de degajare a sculei), T_{int} - temperatura internă a dispozitivului și T_{ext} - temperatura mediului ambiant în atelier.

TABELUL 5.9. Temperatura de așchiere la frezare.

a_p [mm]	f [mm/dinte]	v [m/min]	Q [L/h]	$T_{max\ obj}$ [°C]	T_{ext} [°C]	T_{int} [°C]
0.5	0.08	100.48	0	27.3	21.2	24.3
0.5	0.1	150.72	0.030	25.1	21.8	24.7
0.5	0.16	200.96	90	22.4	21.4	24.3
1	0.08	150.72	90	24.3	21.3	24.3
1	0.1	200.96	0	29.5	21.2	24.3
1	0.16	100.48	0.030	26.4	21.7	24.6
1.5	0.08	200.96	0.030	26.9	21.9	24.6
1.5	0.1	100.48	90	25.8	21.4	24.4
1.5	0.16	150.72	0	30.6	21.3	24.4

Rezultatele din *Tabelul 5.9* includ măsurătorile temperaturii zonei de așchiere în timpul frezării frontale a aliajului $AlMg_3$ cu freze din oțel rapid cu acoperire de TiN .

Efectul de răcire depinde în mod evident de tehnica de răcire și de parametrii de așchiere. Rezultatele înregistrate arată că debitul lichidului de răcire nu are o influență semnificativă asupra temperaturilor dezvoltate în zona de așchiere la frezarea aliajului de aluminiu. FM asigură o stabilitate ridicată a procesului prin menținerea constantă a temperaturii în zona de așchiere.

Condițiile de așchiere considerate reprezintă condiții practice uzuale: viteze de așchiere de la $100\ m/min$ la $200\ m/min$ și avansuri de la $0.08\ mm/rot$ până la $0.16\ mm/rot$.

Valorile medii ale temperaturii în timpul procesului de așchiere au variat de la $24.3^\circ C$ la $25.8^\circ C$ la frezarea pseudo-uscătă și se mențin constante la $21.4^\circ C$ în cazul frezării convenționale cu emulsie.

La frezarea uscată a aliajului $AlMg_3$ în condiții de semifinisare se ating temperaturi cuprinse între $27.3^\circ C$ și $30.6^\circ C$. Componenta dominantă a incertitudinii de măsurare în toate testele este emisivitatea așchiei formate.

5.4. Concluzii

Elementul central al acestui studiu a fost determinarea influenței parametrilor procesului (adâncime de așchiere, avans, viteza de așchiere și debitul de lichid de așchiere) asupra procesului de frezare și modul în care afectează rezultatele procesului de prelucrare: rugozitatea suprafeței, temperatura de așchiere și puterea de așchiere.

Rezultatele investigațiilor prezentate în acest capitol confirmă faptul că tehnicile de așchiere uscată sau pseudo-uscată pot fi aplicate cu succes fără a afecta rezultatele procesului de prelucrare din punct de vedere al rugozității și consumului de putere. În toate testele efectuate, puterea consumată a fost influențată în principal de condițiile de așchiere, nu de condițiile de ungere și răcire. Investigațiile trebuie continuate prin analiza suplimentară a durabilității sculei. Cercetările prezentate în acest capitol sunt mai mult decât o metodă experimentală care vine în sprijinul proiectării proceselor tehnologice, și un instrument util în procesului decizional în cazul frezării frontale a aliajelor de aluminiu. Prin rezultatele obținute, studiul prezentat încurajează implementarea tehnicilor ecologice de așchiere în practică.

Notății

ANOVA	- Analiza varianței (Analysis of Variance)
a_p	- adâncimea de așchiere axială [mm]
DOE	- proiectarea experimentelor (Design of Experiment)
DM	- Dry Machining
f	- avansul [mm/dinte]
F_z	- rația F_z
FM	- Flood Machining
L9	- matricea ortogonală
MQL	- lubrifiere minimală
n	- numărul de observații (înregistrări)
NDM	- Near Dry Machining
P_w	- puterea de așchiere [kW]
P_z	- contribuția procentuală a factorului z
S/N	- rația semnal-perturbație (signal to noise ratio)
Q	- debitul lichidului de așchiere [L/h]
R_1, R_2, R_3	- răspunsuri
R_a	- rugozitatea suprafeței prelucrate [μm]
v	- viteza de așchiere [m/min]
V_z	- Variația factorului z
y	- date măsurate
z	- factor z

CAPITOLUL 6

INVESTIGAȚII PRIVIND INFLUENȚA METODEI DE RĂCIRE ȘI LUBRIFIERE ASUPRA CALITĂȚII SUPRAFETEI ȘI A TEMPERATURII DE AȘCHIERE LA STRUNJIREA AISI 1045

6.1. Introducere

Numeroase cercetări au abordat posibilitățile de implementare a metodelor ecologice de așchiere în cazul proceselor de frezare, strunjire, găurire [Att 06, Wei 04, Ito 06, Kel 02, Mar 07] și chiar rectificare [San 10, Ast 06]. Astakov [Ast 08] a investigat efectul picăturilor fine de lichid de așchiere transportate de aerul comprimat direct în zona de lucru a sculei, asigurând efectele de răcire și lubrifiere necesare. Tawakoli și colaboratorii [Taw 07, Taw 09] au arătat că poziția duzei este, de asemenea, un factor important în ceea ce privește aplicarea eficientă a vaporilor de ulei la MQL. Analiza efectuată de Brinkmeister și alții în [Bri 99] și Brunner în [Bru 98] a arătat în plus că tipul de lichid de răcire folosit în timpul procesului *MQL* poate influența considerabil rezultatele procesului.

Publicațiile din domeniu arată necesitatea unor cercetări sistematice pentru a determina condițiile de așchiere adecvate pentru obținerea unor rezultate scontate. Cercetările prezentate în acest capitol contribuie la găsirea condițiilor adecvate de așchiere la strunjirea *AISI 1045*, prin investigarea influenței volumului de lichide de așchiere în zona de contact semifabricat-sculă-așchii, inclusiv așchiera uscată, asupra rugozității suprafețelor prelucrate și căldurii dezvoltate în timpul desfășurării procesului.

6.2. Proiectarea experimentelor

Procedura și metodologia de desfășurare a cercetărilor este similară cu cea prezentată în capitolul anterior, având la baza *metodele Taguchi și ANOVA*. Deoarece scopul studiului de a optimiza parametrii procesului de așchiere ortogonală și volumul lichidelor de așchiere utilizate, se impun ca funcții obiectiv minimizarea rugozității și a temperaturilor de așchiere. Matricea de proiectare a experimentelor este L_9 , caracteristică pentru analiza factorială a 4 factori de influență cu trei nivele de variație pentru fiecare.

Fiecare linie a matricei reprezintă o secvență de prelucrare și indică modul de combinare a parametrilor de proces.

Prelucrările au fost efectuate pe strungul *SPF 1500P*. Câteva caracteristici ale strungului, sculelor și semifabricatelor utilizate sunt prezentate în *Tabelul 6.1*.

TABELUL 6.1. Condiții de desfășurare a prelucrărilor.

Mașina-unealtă:	Strung SPF 1500P, $P_w = 4-5.5$ kW, $n_{max} = 1800$ rot/min
Scula:	Plăcuță: CNGG 120402 PP IC907 Suport plăcuță: PCLNR 2020 K12
Lichide de așchiere:	- Așchiere uscată: - - Ungere și răcire minimală: ulei LUBRIMAX - Răcire convențională: Emulsie Dormer M200 No.1
Semifabricat	Bară laminată: AISI 1045 Dimensiuni: $\varnothing 78$ mm x 500mm

Semifabricatul utilizat a fost o bară de oțel carbon din *AISI 1045*. Compoziția chimică și câteva dintre proprietățile sale mecanice ale materialului sunt prezentate în *Tabelul 6.2*.

TABELUL 6.2. Compoziția chimică și proprietățile mecanice ale *AISI 1045*.

Material semifabricat	Compoziție chimică [%]							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S
AISI 1045	0.47	0.29	0.71	0.18	0.03	-	0.02	0.04
Proprietăți mecanice: duritate 130 HB, rezistența la alungire 290 MPa, rezistența la rupere 477 MPa								

Pentru a compara efectul condițiilor de ungere și răcire asupra calității suprafeței și a temperaturilor de așchiere la strunjirea de finisare a *AISI 1045*, utilizând scule cu plăcuțe din carburi metalice, au fost stabilite câte trei valori ale adâncimii de așchiere, avansului, vitezei de așchiere, prelucrările realizându-se în condiții de așchiere uscată, pseudo-uscată și cu ungere și răcire convențională (*Tabelul 6.3*).

TABELUL 6.3. Parametrii de așchiere și nivelurile de variație ale acestora.

Parametru	Cod	Niveluri		
		1	2	3
Adâncime de așchiere a_p [mm]	P_1	0.25	0.5	1
Avans f [mm/rot]	P_2	0.196	0.226	0.306
Turație ax principal n_w [rot/min]	P_3	250	370	830
Lubricant flow rate Q [L/h]	P_4	0	0.066	60

Debitul lichidului de aşchiere de 0 L/h corespunde strunjirii uscate. Emulsia *Dormer M200 nr.1-15%* (debit de 60 L/h , recirculat) și uleiul vegetal *Lubrimax* au fost utilizate ca lichide de aşchiere pentru strunjirea convențională (Figura 6.1), respectiv strunjirea pseudo-uscată (Figura 6.2).



FIGURA 6.1. Strunjirea cu ungere și răcire convențională a *AISI 1045*.



FIGURA 6.2. Strunjirea pseudo-uscată a *AISI 1045*.

Pentru strunjirea cu *MQL* a fost utilizat un sistem de microdispersie *Lubrimat L60* (Figura 6.3). Pentru acest echipament au fost alese setările recomandate pentru prelucrarea oțelurilor: frecvența pulsului de 1 secundă (0.25 pe scala dispozitivului) și un debit de 0.066 L/h (1.2 pe scala pompei de ulei), setări menținute pentru toate secvențe de prelucrare. Aerul comprimat utilizat pentru dispersarea lichidul de aşchiere are o presiune de 4 bari .



FIGURA 6.3. Echipament LUBRIMAT L60 pentru aşchiere pseudo-uscată.

6.3. Rezultate

Rugozitatea suprafețelor prelucrate prin strunjire a fost măsurată de modelul rugozimetrul *Mitutoyo model SJ201* (Figura 6.4). Pentru acuratețea rezultatelor, măsurătorile au fost repetate de 3 ori pentru fiecare suprafață analizată, fiind considerată media aritmetică a valorilor obținute.

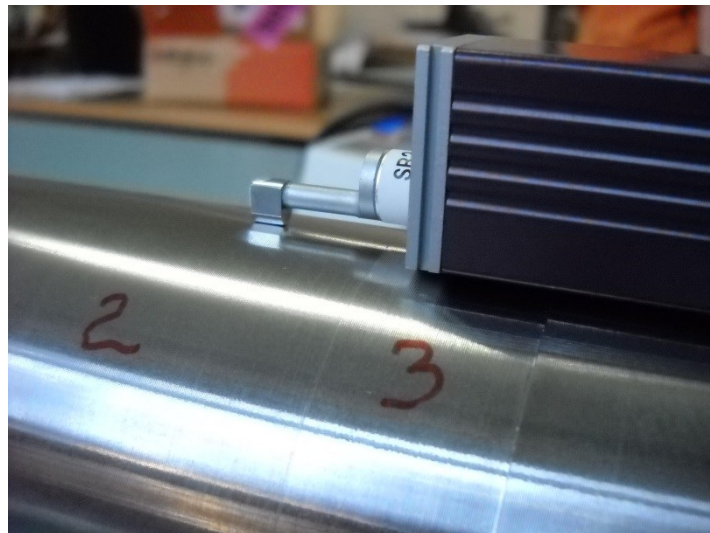


FIGURA 6.4. Măsurarea rugozității.

Tabelul 6.4 prezintă datele înregistrate în urma măsurării rugozității suprafețelor (R_a , R_z și R_q), însă pentru interpretarea rezultatelor, fiind mai uzuală, a fost luată în considerare doar rugozitatea R_a .

TABELUL 6.4. Condițiile de aşchiere și valorile măsurate ale rugozității.

Parametrii de proces				Valorile măsurate ale rugozității								
a_p [mm]	f [mm/rot]	n_w [rot/min]	Q [L/h]	R_a [μm]			R_z [μm]			R_q [μm]		
				Trial 1	Trial 2	Trial 3	Trial 1	Trial 2	Trial 3	Trial 1	Trial 2	Trial 3
0.25	0.196	250	0	3.31	3.95	3.18	18.94	21.47	17.87	3.99	4.71	3.82
0.25	0.226	370	0.066	1.59	1.35	1.5	10.83	9.44	10.32	1.99	1.76	1.87
0.25	0.306	830	60	0.44	0.45	0.41	3.1	4.15	3.51	0.56	0.58	0.52
0.5	0.196	370	60	3.31	3.31	3.38	13.02	15.02	14.17	3.76	3.8	3.85
0.5	0.226	830	0	3.94	4.1	4.11	16.37	17.19	17.04	4.58	4.77	4.77
0.5	0.306	250	0.066	6.17	6.26	6.03	25.02	25.87	25.43	7.17	7.24	7.07
1	0.196	830	0.066	3.27	3.25	3.24	14.4	13.55	14.14	3.75	3.72	3.7
1	0.226	250	60	4.21	4.07	4.09	21.43	19.81	18.85	4.98	4.8	4.81
1	0.306	370	0	6.17	6.15	6.14	27.44	26.47	26.14	7.23	7.19	7.17

Tabelul 6.5 prezintă rezultatele testelor ANOVA și F pentru parametrul R_a . Din punct de vedere al rugozității suprafeței, parametrul semnificativ este adâncimea de aşchiere (influența de 51.81%), însă trebuie luate în considerare și influențele vitezei de aşchiere și a debitului de lichid de aşchiere.

TABELUL 6.5 Analiza varianței ANOVA și testul F pentru rugozitatea R_a .

Factor	DOF	Sz	Vz	F _z -ratio	F _{0.05}	Sz'	P _z [%]
P ₁ : a_p [mm]	2	44.1731	22.0865	922.8361	3.5500	44.1252	51.8149
P ₂ f [mm/rot]	2	5.6150	2.8075	117.3055	3.5500	5.5672	6.5373
P ₃ : n_w [rot/min]	2	18.1525	9.0762	379.2298	3.5500	18.1046	21.2597
P ₄ : Q [L/h]	2	16.7880	8.3940	350.7247	3.5500	16.7402	19.7136
Error	18	0.4308	0.0239				0.6745
Total	26						100.000

Al doilea parametru analizat a fost temperatura zonei de aşchiere. În acest sens a fost utilizat un termometru *XTempLS* cu infraroșu fără contact (Figura 6.5), ale cărui caracteristici au fost precizate în capitolul anterior al lucrării. Evoluția temperaturii pe durata fiecărei secvențe de strunjire a fost înregistrată utilizând soft-ul *OptrisConnect*.

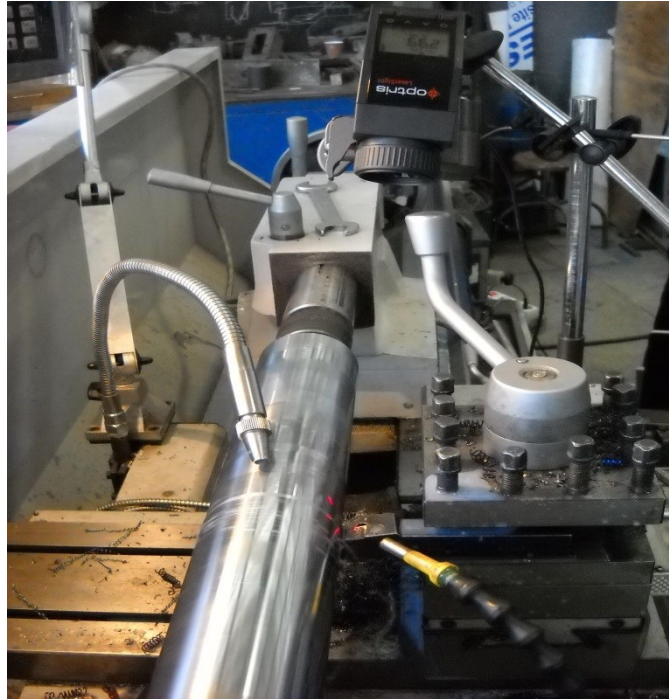


FIGURA 6.5. Înregistrarea temperaturii în zona de așchiere în timpul secvenței de strunjire.

Una din diagramele de monitorizare a temperaturii de așchiere este prezentată în Figura 6.6.

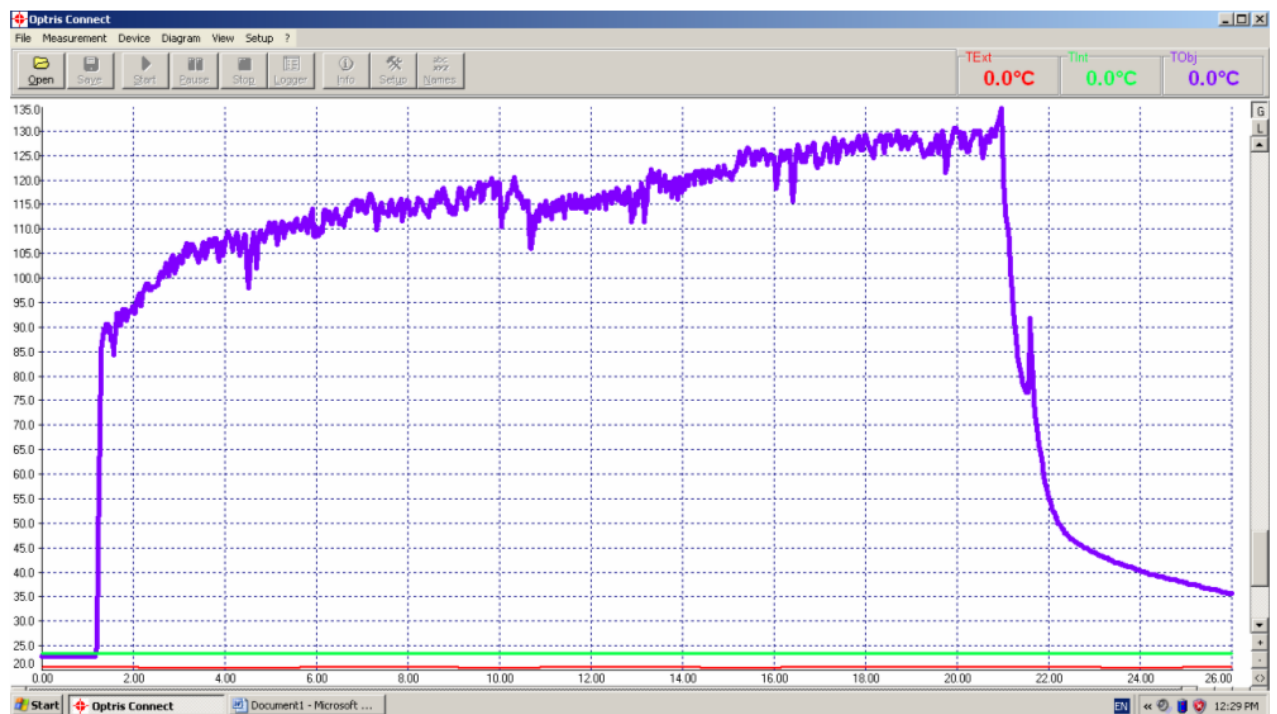


FIGURE 6.6. Diagrama de monitorizare a temperaturii.

Rezultatele înregistrate sunt centralizate în Tabelul 6.6.

TABELUL 6.6. Temperaturile în zona de așchiere.

Exp. no.	Temperatura zonei de așchiere [°C]		
	Trial 1	Trial 2	Trial 3
1	73	75	77
2	75	77	73
3	22	24	20
4	22	24	26
5	110	108	112
6	119	121	117
7	135	133	137
8	35	33	37
9	118	120	116

Efectul de răcire depinde de tehnica de ungere și răcire folosită și de parametrii de așchiere. Se poate remarca o diferență semnificativă a temperaturilor dezvoltate în zona de așchiere în cazul DM, NDM și FM. Metoda convențională de ungere și răcire asigură suplimentar o stabilitate termică mai mare a procesului. Metoda de ungere și răcire și tipul lichidului de așchiere au influență în primul rând asupra componentelor forței de așchiere, respectiv asupra puterii de așchiere. Apar diferențe numai între secvențele de prelucrare pentru care s-au utilizat tehnicile ecologice și cele de răcire/lubrifiere convențională. Prin urmare, se poate concluziona că la strunjirea pseudo-uscătă se remarcă o ușoară reducere a temperaturilor de așchiere comparativ cu cele de la răcirea uscată, însă efectul de răcire nu este satisfăcător.

În ceea ce privește rugozitatea suprafeței, nu există diferențe semnificative între valorile măsurate înregistrate pentru cele trei metode de răcire. Calitatea suprafeței este puternic influențată de avans, dar nu și de cantitatea de lichid de așchiere dirijată în zona de prelucrare.

6.4. Analiza și interpretarea rezultatelor

Optimizarea parametrilor de proces s-a realizat prin compararea analizei standard (F) și a analizei variației ($ANOVA$) care se bazează pe metoda Taguchi. Acestea permit determinarea efectelor principale ale parametrilor procesului și stabilirea condițiilor optime și presupune calcularea următorilor parametri de analiză: S_z - suma pătratelor

asociate factorului z ($z = a_p, f, v, Q$), v_z - variația factorului z , F_z - rația F a factorului z și P_z - contribuția procentuală a factorului z , conform metodei *Taguchi*.

Performanța procesului (factorul semnificativ *ANOVA*) pentru fiecare secvență de strunjire din matricea ortogonală L_9 poate fi determinată pe baza valorilor observate ale R_a , și este prezentată în *Tabelul 6.7*.

TABELUL 6.7. Analiza *ANOVA* și testul F pentru temperaturile din zona de așchiere T .

Factor	DOF	Sz	Vz	F _z -ratio	F _{0.05}	Sz'	P _z [%]
P ₁ : a_p [mm]	2	7080.667	3540.333	885.083	3.550	7072.667	15.226
P ₂ f [mm/rot]	2	780.667	390.333	97.583	3.550	772.667	1.663
P ₃ : n_w [rot/min]	2	1362.667	681.333	170.333	3.550	1354.667	2.916
P ₄ : Q [l/h]	2	37154.66	18577.33	4644.333	3.550	37146.67	79.987
Error	18	72.000	4.000				0.207
Total	26						100.00

Tabelul 6.7 prezintă rezultatele testelor *ANOVA* și F pentru T , indicând debitul lichidului de așchiere (Q) și adâncimea de așchiere (a_p) drept factori semnificativi de influență de 79.98% și respectiv 15.22%, influențele avansului (f) și viteza de așchiere (v) fiind ne semnificative.

Figura 6.7 și *Figura 6.8* indică efectul principal al rației S/N pentru R_a și T . Studiul analizează condițiile optime de prelucrare pe baza metodologiei *Taguchi* (*Tabelul 6.8*).

TABELUL 6.8. Parametrii optimi de așchiere pentru parametrii de răspuns R_a și T .

Parameter	Răspuns parametru R_a				Răspuns parametru T			
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_1	P_2	P_3	P_4
Nivel 1	1.80	3.36	4.59	4.56	57.33	78.00	76.33	101.00
Nivel 2	4.51	3.22	3.66	3.63	84.33	73.33	72.33	109.67
Nivel 3	4.51	4.25	2.58	2.63	96.00	86.33	89.00	27.00

Figura 6.7 ilustrează principale influențe asupra parametrului R_a . Se observă că nivelul minim al adâncimii de așchiere, nivelul maxim al vitezei de așchiere și debitul maxim al lichidului de așchiere rezează combinația ideală pentru obținerea unei rugozități mici a suprafeței strunjite. Al doilea nivel de variație al avansului (0.226 mm/rot) corespunde unei calități superioare a suprafeței.

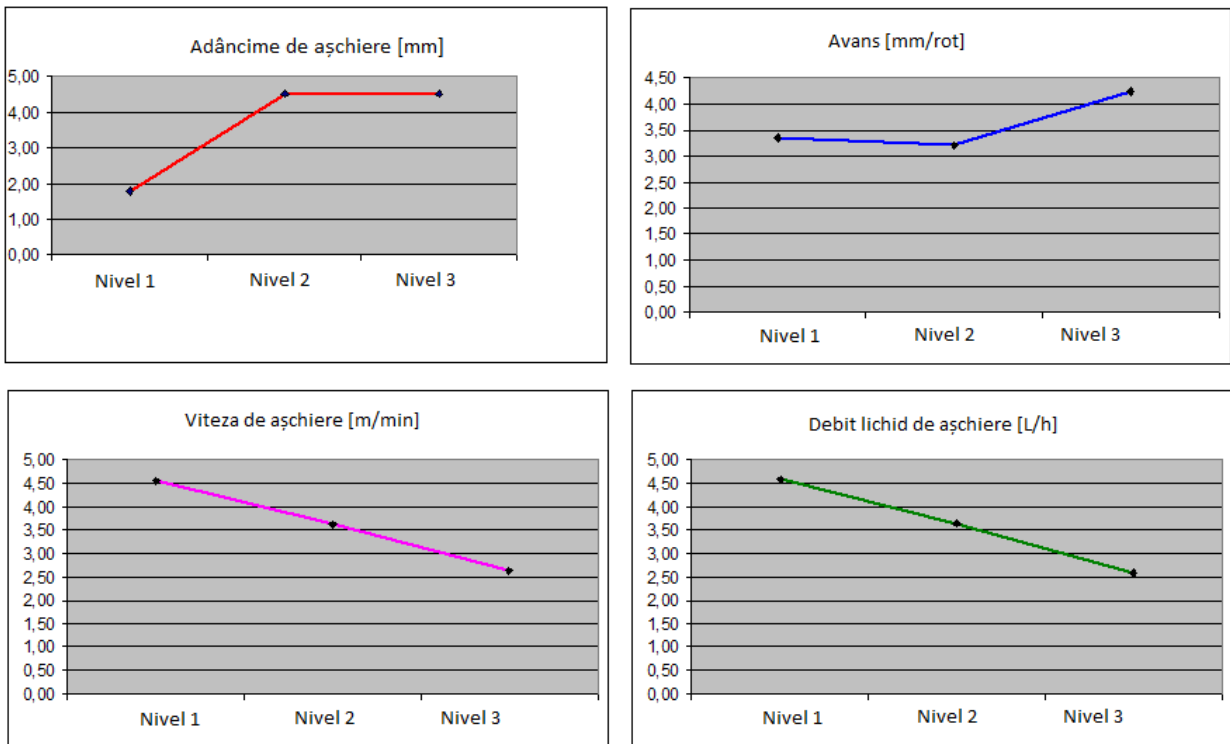


FIGURA 6.7. Rația S/N pentru parametrul R_a .

Figura 6.8 prezintă efectele principale asupra temperaturii în zona de așchiere, T pentru fiecare factor de influență considerat. Se observă că T crește cu a_p , f și v și scade cu creșterea debitului lichidului de așchiere, Q . Condițiile optime de strunjire de finisare ale AISI 1045, sunt adâncimea minimă de așchiere și debitul maxim al lichidului de așchiere.

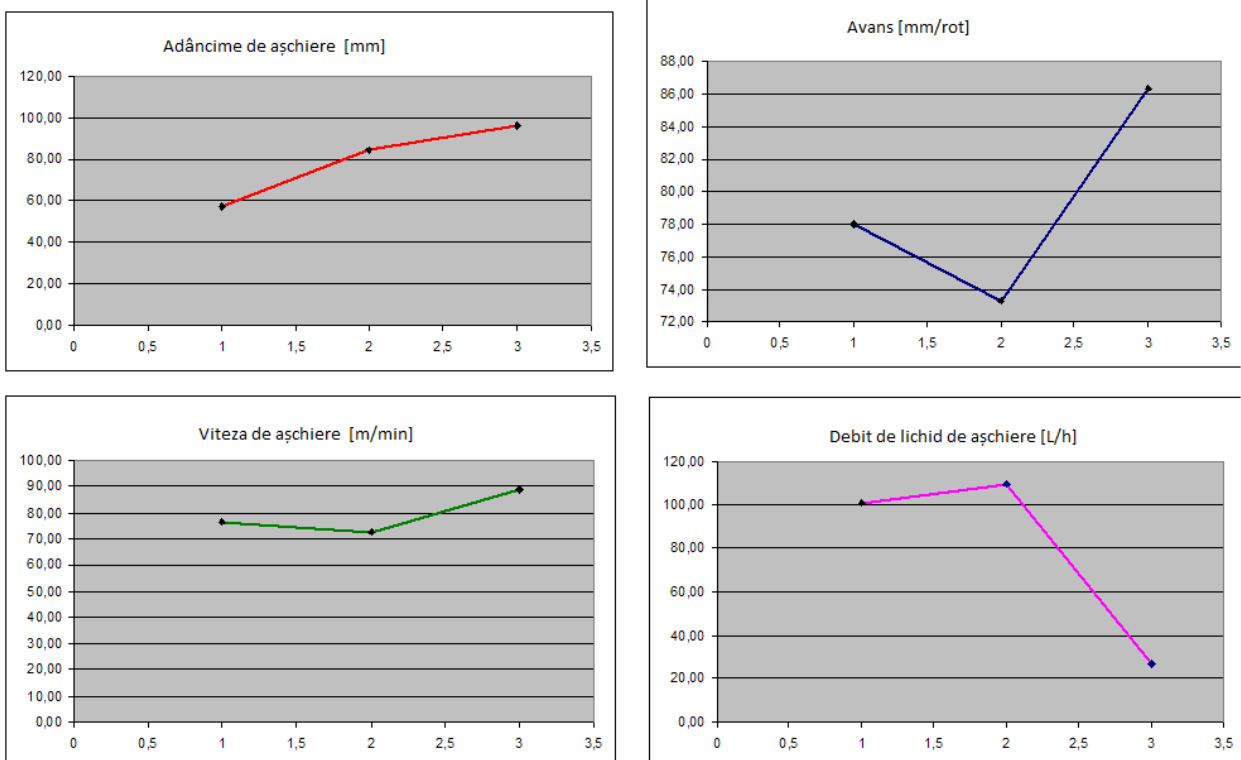


FIGURA 6.8. Rația S/N pentru parametrul T .

Al doilea nivel de variație pentru ceilalți doi parametri (avans și turația semifabricatului) este adecvat pentru obținerea unor temperaturi mai reduse în zone de așchiere. Procesul de strunjire desfășurat în condiții de lubrifiere aproape uscate, *MQL*, determină o creștere a temperaturii de așchiere în comparație cu cea înregistrată la prelucrarea cu ungere și răcire convențională *FC*.

6.5. Concluzii

Proiectarea experimentelor în scopul optimizării parametrilor procesului de strunjire de finisare a oțelului carbon *AISI 1045* a constituit elementul central al acestui capitol. A fost analizată influența parametrilor de proces (adâncimea de așchiere, avans, viteza de așchiere și metoda de ungere și răcire) asupra rugozității suprafeței și temperaturii zonei de așchiere. Rezultatele obținute susțin implementarea cu succes a tehnicilor ecologice de așchiere în condițiile considerate, nefiind însă posibilă o generalizare a concluziilor.

Notății

ANOVA	- analiza varianței
a_p	- adâncimea de așchiere [mm]
DC	- așchiere uscată (Dry Cutting)
DOE	- proiectarea experimentelor
f	- avans [mm/rot]
FC	- răcire convențională (Flood Cooling)
F_z	- rația F a factorului z
i	- numărul secvenței de prelucrare
j	- rezultat măsurare
L_9	- matricea ortogonală
MQL	- lubrifiere minimală (Minimal Quantity Lubrication)
n	- număr de observații
n_w	- turația semifabricatului [rot/min]
P_w	- puterea de așchiere [kW]
P_z	- contribuția procentuală a factorului z
S/N	- rația semnal / perturbație
Q	- debitul lichidului de așchiere [L/oră]
R_1, R_2, R_3	- parametrii de răspuns
R_a	- rugozitatea [μm]
$T_{i,j}$	- rezultatul procesului
v	- viteza de așchiere [m/min]
V_z	- variația factorului z
y	- datele observate
z	- factorul z

CAPITOLUL 7

INFLUENȚA CONDIȚIILOR DE AȘCHIERE ASUPRA EFICIENȚEI PROCESULUI DE STRUNJIRE ECOLOGICĂ A OȚELULUI ALIAT *42CrMo4*

7.1. Introducere

Analiza și caracterizarea procesului de așchiere poate fi dificilă din mai multe motive, rezumate după cum urmează:

- *prelucrarea este însoțită de solicitări extrem de complexe;*
- *rezultatele procesului variază considerabil în funcție de materialele sculei și semifabricatului, de temperatura de așchiere, de lichidele de răcire și de lubrifiere și de vibrații.*
- *pot apărea unele variații chiar pentru aceeași configurație a sistemului tehnologic, spre deosebire de alte procese de fabricație, cum ar fi deformarea la rece și turnarea.*

Așa cum s-a menționat și în capitolele anterioare, în operațiile obișnuite de prelucrare și, în general, în industria prelucrării metalelor, lichidele de așchiere sunt încă folosite în mare măsură în zona de contact între sculă și semifabricat. Prin urmare, lichidul de așchiere este unul dintre factorii care influențează procesul intim de așchiere al metalelor [Ast 12], având un efect semnificativ asupra productivității, economiei și siguranței operațiilor de așchiere.

Din perspectiva factorilor economici și ecologici, abordarea cea mai radicală este în prezent conversia răcirii convenționale (*FM*) în așchiere uscată (*DC*), dar, în unele cazuri, utilizarea lichidelor de așchiere este esențială pentru obținerea preciziei dorite și a calității suprafeței și pentru menținerea durabilității sculei așchietoare. Semifabricatul acumulează o cantitate mare de căldură și, în consecință, conduce la dificultăți în atingerea toleranțelor și la deteriorări ale stratului superficial de material.

Cercetările realizate până în prezent arată că prelucrarea uscată este aplicabilă în cazul diferitelor procese și pentru procesarea mai multor materiale, cum ar fi oțelurile carbon, oțelurile aliate, aliajele de aluminiu, aliajele de magneziu și fontă. Pentru a face *DC*

mai practică, s-au realizat cercetări în vederea îmbunătățirii sculelor așchietoare din punct de vedere al materialelor, geometriei și stratului de acoperire [Kur 13]. Au fost dezvoltate, de asemenea, noi materiale (cum ar fi aliajele de *Ni*, aliajele *Ti*, aliajele *Co-Cr*), utilizate, de exemplu, în industria aerospațială, care sunt extrem de dificil de procesat. În combinație cu viteze mari de așchiere, apar dificultăți serioase. Astfel de aspecte fac practic imposibilă implementarea așchierii uscate în unele operații de prelucrare. Huang a investigat *DC* în [Hua 14] pentru a compara prelucrabilitatea prin frezare a materialului *Ti6Al4V*, cu aplicații în aeronautică, utilizând două tipuri de scule. Efectul *DC* asupra integrității suprafeței și a forțelor de așchiere, la strunjirea oțelului aliat *Inconel 718*, a fost, de asemenea, investigat în [Dev 11].

Având în vedere limitările în implementarea *DC*, s-au dezvoltat tehnici alternative de așchiere, cum ar fi: ungerea și răcirea minimală, așchiera criogenică, așchiera cu jet dirijat la presiune înaltă, descrise în capitolele anterioare [Pus 10a, Pus 10b, Sha 09]. Prin aplicarea acestor metode, se pot înregistra progrese considerabile în direcția tehnologiilor sustenabile [Aro 95].

Astfel, toate problemele asociate cu consumul lichidelor de așchiere pot fi eliminate, fiind simultan obținute numeroase avantaje [Ast 12, Pus10a, Dix 10] cum ar fi: *minimizarea costurilor pentru tratarea așchiilor, evitarea costurilor ridicate pentru achiziționarea și eliminarea fluidelor de așchiere; evitarea echipamentelor necesare pentru circularea, depozitarea, filtrarea, tratarea și transportul lichidelor de așchiere.*

Diniz și Micaroni au efectuat mai multe prelucrări prin strunjire de finisare cu parametri variați de așchiere și diferite tehnici de lubrifiere și răcire pentru determinarea celor mai bune condiții pentru așchiera uscată [Din 02]. Alte studii efectuate sunt prezentate în [Dav 14, Fan 05, Bor 14] pentru analiza influenței diferitelor strategii de lubrifiere și răcire privind performanțele în așchiera mai multor materiale utilizând inserții din carburi cu sau fără acoperiri metalice. În cazul așchierii *AISI-1040*, Islam și colaboratorii săi au analizat în [Isl 06] influența *MQL* asupra temperaturii de așchiere, a formei așchiei și a preciziei dimensionale. Khan și echipa au studiat efectul *MQL* la strunjirea *AISI 9310*, utilizând ulei vegetal ca mediu de așchiere [Kha 09].

DC conduce, evident, nu numai la creșterea semnificativă a temperaturii, determinând uzura mai mare a sculelor, deci la scăderea durabilității sculelor, dar și la dificultăți de formare și evacuare a așchiilor.

Formarea așchiilor este un factor important, mai ales atunci când se urmărește îndepărtarea cu ușurință a așchiilor din zona de așchiere, la procesarea materialelor dificil de prelucrat pe echipamentele *CNC* care permit prelucrarea cu viteze mari. Informațiile referitoare la forma așchiilor pot îmbunătăți productivitatea procesului în cazul în care se urmărește monitorizarea durabilității sculei și precizia dimensională a piesei.

Mecanismul de formare al așchiilor este similar pentru majoritatea proceselor de prelucrare și trebuie studiat pentru a determina parametrii și condițiile de așchiere optime. Cercetarea și practica industrială arată că eliminarea completă a lichidelor de așchiere din procesele de prelucrare ale anumitor materiale sau din anumite procese necesită o selecție adecvată a condițiilor de așchiere [Jaw 93]. Condițiile de formare a așchiilor influențează, de asemenea, *siguranța operatorilor*. Forma de așchiilor este un indice important al procesului de prelucrare, fiind direct sau indirect legată de:

- *natura interacțiunii la interfața așchie-sculă,*
- *energia specifică de prelucrare,*
- *proprietățile și comportamentul materialului semifabricatului în condiții concrete de prelucrare.*

Așchiile produse la prelucrarea majorității metalelor și aliajelor metalice pot fi clasificate, în general, în categorii distincte pe baza formelor lor geometrice: așchii discontinue (fragmentate), așchii continue sub formă de panglică și așchii continue elicoidale. În ceea ce privește posibilitățile de îndepărtare din zona de prelucrare, calitatea suprafeței prelucrate, funcționarea continuă a mașinii și siguranța operatorului, așchiile pot fi împărțite în două clase: *acceptabile* (tubulare, conice, în formă de panglică scurtă, elicoidală, arc scurte etc.) și *inacceptabile* (în formă de panglică lungă, tubulară, conică și elicoidală lungă) [Jaw 93].

Rezistența și duritatea materialelor sunt factori care influențează starea de deformații și solicitări în zona de formare a așchiilor și forma acestora [Jaw 93, Uhl 15]. În afară de proprietățile materialului semifabricatului, parametrii de așchiere și condițiile de răcire și lubrifiere joacă un rol decisiv în determinarea condițiilor de formare și a formei așchiilor, așa cum este demonstrat în [Kha 09]. Materiale precum *Ti-6Al-4V*, aliajul *Y5553* cu aplicații în industria aerospațială au fost studiate în ceea ce privește mecanismul de formare a așchiilor [Cal 15, Den 14, Set 15, Yan 13, Sut 13, Wan 14].

Așchiile rezultate prin prelucrarea materialelor avansate, cum ar fi materialele compozite armate, elastomerii sau materialele ceramice, sunt foarte diferite în ceea ce

privește morfologia, comparativ cu cele rezultate în prelucrarea metalelor. Un nou sistem de clasificare a fost dezvoltat de Shih și colaboratorii săi [Shi 06] pentru a defini 7 tipuri de așchii obținute în urma prelucrării acestor categorii de materiale în diferite condiții de așchiere. Cercetările privind procesele de formare a așchiilor și defectele semifabricatelor la prelucrarea materialelor compozite cu matrice metalică Al/SiCP sunt prezentate în [Dab 09, Shi 14, Zen 15].

7.2. Metoda de investigație

Cercetările prezentate în acest capitol vizează determinarea rugozității suprafeței prelucrate și a încărcării mașinii-unelte (% consum din puterea utilă) la operația de strunjire folosind două tehnici diferite de aplicare a mediului de așchiere (ungerea și răcirea convențională și lubrifierea minimală) și în condiții de așchiere uscată. Următorul obiectiv al studiului a fost analiza influenței condițiilor de așchiere asupra mecanismului de formare a așchiilor pentru a obține forma cea mai favorabilă. Experimentele au fost realizate pe strungul *CNC Lynx 220* ($P_{max} - 15 kW$), prin analiza mai multor secvențe de strunjire exterioară de semifinisare a oțelului aliat *42CrMo4* (Figura 7.1).



FIGURA 7.1. Instantaneu la strunjirea oțelului aliat *42CrMo4*.

În general, acest material este, considerat ca fiind un material dificil de prelucrat datorită rezistenței sale ridicate, ductilității și tendinței ridicate de ecrusare în timpul procesării. Compoziția chimică și proprietățile sale mecanice sunt prezentate în *Tabelul 7.1*.

TABELUL 7.1. Compoziția și proprietățile oțelului aliat 42CrMo4.

Material: 42CrMo4						
Compoziție chimică [%]						
<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>S</i>	<i>altele</i>
0.42	0.25	0.75	1.1	0.22	<0.035	(Pb)
Proprietăți mecanice (TT: călire +revenire)						
Limita de curgere 0,2% $R_{p0,2}$ [N/mm ²]		Rezistența la rupere R_m [N/mm ²]		Alungirea la rupere A_5 [%]		Duritatea HB
min. 650		900-1100		min. 12		255

Semifabricatul utilizat are următoarele caracteristici: lungimea $L=300$ mm, diametrul $d=\emptyset 75$ mm. Scula așchietoare utilizată a fost o plăcuță din carbură cu straturi multiple de acoperiri metalice (CNMG 120408-MP P20), fixată pe suportul (PCLNL 2525 M12). Acoperirea metalică a plăcuței amovibile constă dintr-un prim strat de Al_2O_3 care oferă o rezistență foarte bună la căldură și reduce producerea uzurii crateriale. Următorul stratul din TiCN asigură o rezistență ridicată la uzură și reduce uzura tăișurilor, în timp ce substratul special de carbură asigură o așchiere stabilă și evită propagarea fisurilor.

Parametrii de așchiere recomandați pentru această plăcuță sunt: viteza de așchiere $v = 190-310$ m/min, avans $f = 0.15-0.5$ mm/rot, adâncime de așchiere $a_p = 0.3-4$ mm. Pentru a reproduce așchiera ortogonală, muchia așchietoare a plăcuței este perpendiculară pe direcția avansului și a vitezei de așchiere ($\kappa_r=95^\circ$, $r_\varepsilon=0.8$ mm și $\lambda_s=0^\circ$). Unghiul de degajare al sculei ($\gamma = +15^\circ$ la -6°) influențează în mod semnificativ procesul de deformare plastică la așchiere și deci grosimea așchiei, forțele și temperaturile de așchiere. Plăcuța utilizată are un unghi de degajare negativ de 6° .

Fragmentarea și îndepărtarea așchiilor sunt influențate de utilizarea sculelor cu fragmentator de așchii. Așchiile sunt fragmentate în mod deliberat în segmente mici, de dimensiuni și forme obișnuite, în principal pentru siguranță, confort și reducerea lungimii de contact a sculei cu așchiile. La strunjirea oțelului aliat 42CrMo4, plăcuța utilizată este prevăzută cu un fragmentator de așchii tip MP în formă de fluture, recomandat pentru așchiera medie. Partea interioară a proeminenței fragmentatorului are o înclinare pentru a îmbunătăți performanța de rupere a așchiilor.

A fost luat în considerare și efectul aplicării lichidelor de așchiere. Testele au fost efectuate în trei condiții diferite de ungere și răcire: așchiere uscată, așchiere pseudo-uscată (lichid de așchiere: ulei vegetal Lubrimax, echipament de lubrifiere minimală: Lubrimat L60

Steidle, debit - 0.024 l/h, presiune aer comprimat: 5 bari) și aşchiere cu ungere și răcire convențională (lichid de aşchiere: emulsie SAROL 474EP, debit - 90 l/h).

7.3. Interpretarea rezultatelor

Rezultatele experimentale au fost analizate și interpretate utilizând soft-ul *Design Expert 8.2*, metoda suprafeței de răspuns (*RSM*) și analiza varianței (*ANOVA*). Acestea se bazează pe metode statistice și matematice pentru îmbunătățirea și optimizarea proceselor în situațiile în care unele variabile independente de intrare influențează potențial variabilele de ieșire (răspunsuri). Răspunsurile pot fi calitatea reperului prelucrat sau caracteristicile de performanță ale procesului.

Prin astfel de metode de modelare statistică se pot dezvolta relații aproximative între răspunsuri și variabilele independente ale procesului. Soft-ul *Design Expert* oferă de asemenea un instrument de optimizare, care poate fi aplicat pentru a găsi cea mai bună combinație a variabilelor de proces care conduc la obținerea răspunsului dorit [Mye 02].

Astfel, au fost analizate rugozitatea suprafeței și încărcarea mașinii-unelte pentru a determina influența condițiilor de aşchiere (viteza de aşchiere, avansul, adâncimea de aşchiere și debitul lichidului de aşchiere) și determinate valorile optime ale acestor parametri pentru eficiența maximă a procesului.

O modalitate de a evita realizarea unor serii multiple de teste este utilizarea unui model empiric, a unei analize statistice sau a unui software de simulare. În funcție de numărul de parametri de intrare considerați și de nivelurile de variație ale acestora, a fost generată automat matricea combinațiilor (L_{20}).

Aceasta permite testarea numai a unui număr limitat de combinații de parametri, în locul verificării tuturor combinațiilor posibile, evitându-se inutil consumul de materiale, scule, timp. Parametrii de aşchiere considerați și nivelurile lor de variație și combinațiile utilizate pentru cele 20 de teste efectuate sunt prezentate în *Tabelul 7.2*.

Rezultatele determinării experimentale a rugozității suprafeței și a încărcării mașinii-unelte sunt prezentate în coloanele din dreapta ale aceluiași tabel. Calitatea suprafețelor prelucrate (R_a , R_q , R_z) a fost efectuată cu ajutorul rugozimetrului *Mitutoyo SJ201*. În continuare este analizată numai rugozitatea R_a , deoarece se consideră că ceilalți parametri (R_q , R_z) furnizează informații similare privind profilul suprafeței. Încărcarea este înregistrată și indicată direct pe afișajul mașinii-unelte.

TABELUL 7.2. Matricea L₂₀ – Combinațiile parametrilor de așchiere și valorile rugozității și încărcării mașinii-unelte

Matricea L ₂₀				P1 a _p [mm]	P2 f [mm/rot]	P3 v [m/min]	P4 q _t [L/h]	Rugozitatea suprafeței [μm]			Încărcare MU [%]
P1	P2	P3	P4					R _a	R _q	R _z	
1	1	2	3	0.3	0.15	250	90	1.3	1.53	5.98	9
1	2	2	2	0.3	0.2	250	0.024	2.01	2.29	8.46	11
1	3	3	3	0.3	0.3	300	90	3.5	4.02	13.51	11
2	1	2	3	1	0.15	250	90	1.47	1.71	6.88	22
2	2	3	1	1	0.2	300	0	2.53	2.79	9.46	27
3	1	3	2	2	0.15	300	0.024	1.66	2.05	10.48	47
3	2	1	3	2	0.2	200	90	4.26	4.94	17.3	82
3	3	2	1	2	0.3	250	0	3.68	4.2	14.48	81
1	1	2	1	0.3	0.15	250	0	1.40	1.66	7.20	9
1	2	1	2	0.3	0.2	200	0.024	1.87	2.12	8.60	10
1	2	3	3	0.3	0.2	300	90	1.94	2.17	7.87	11
2	3	1	1	1	0.3	200	0	3.09	3.56	13.6	36
2	1	3	2	1	0.15	300	0.024	1.5	1.77	6.88	22
3	1	1	3	2	0.15	200	90	1.44	1.70	7.64	47
3	2	3	2	2	0.2	300	0.024	1.8	2.05	7.96	60
3	1	2	1	2	0.15	250	0	1.43	1.73	7.28	46
3	2	1	1	2	0.2	200	0	1.77	2.09	8.49	58
3	3	3	3	2	0.3	300	90	2.065	2.54	11.54	83
2	3	1	2	1	0.3	200	0.024	2.8	3.32	13.32	45
2	3	3	3	1	0.3	300	90	3.15	3.63	12.46	47

7.3.1. Analiza rugozității suprafeței

Corelațiile dintre rugozitatea suprafeței (Ra) și parametrii de așchiere sunt date de ecuația liniară (1) și de graficele prezentate în *Figura 7.2* și *Figura 7.3*.

$$Ra = -0.56169 + 0.25637 \cdot a_p + 12.70611 f - 7.64356E-004 \cdot v + 3.93757E-003 \cdot q_t \quad (7.1)$$

Așa cum se observă în *Figura 7.2*, valorile scăzute ale avansului și ale vitezei de așchiere conduc la o temperatură scăzută de așchiere. În ceea ce privește acești doi parametri de așchiere, temperatura este în cea mai mare parte influențată de avans. Viteza de așchiere nu pare să aibă o influență semnificativă asupra calității suprafeței.

Figura 7.3 arată că nivelurile minime ale adâncimii de așchiere și debitului de lichid de așchiere determină o rugozitate scăzută a suprafeței, calitatea suprafeței fiind influențată în același mod de ambii parametri menționați.

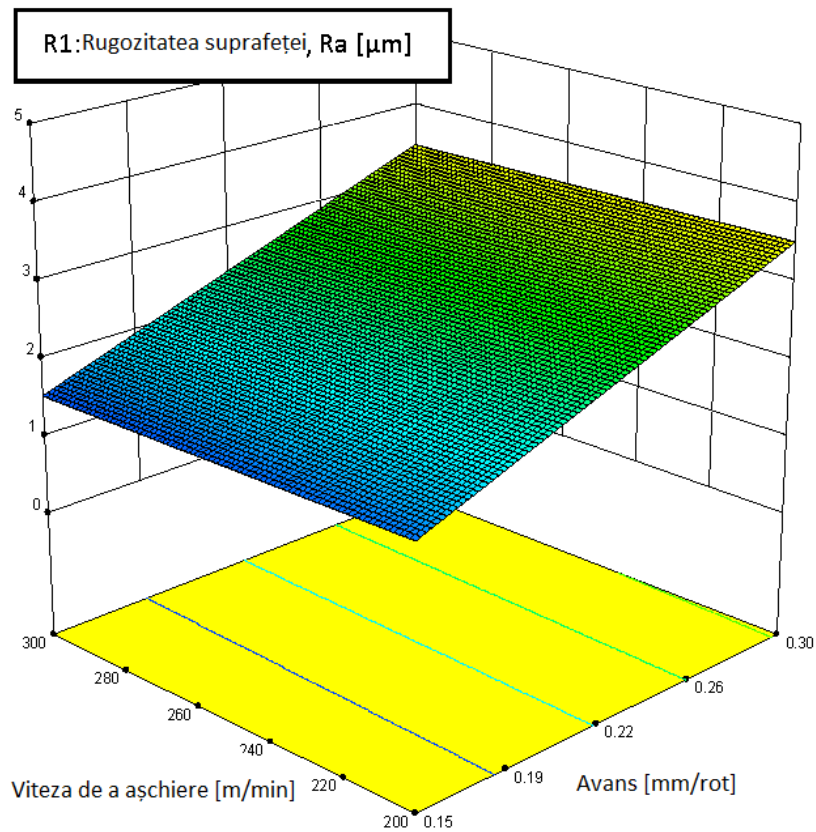


FIGURE 7.2. Influența vitezei de așchiere și a avansului asupra rugozității suprafeței

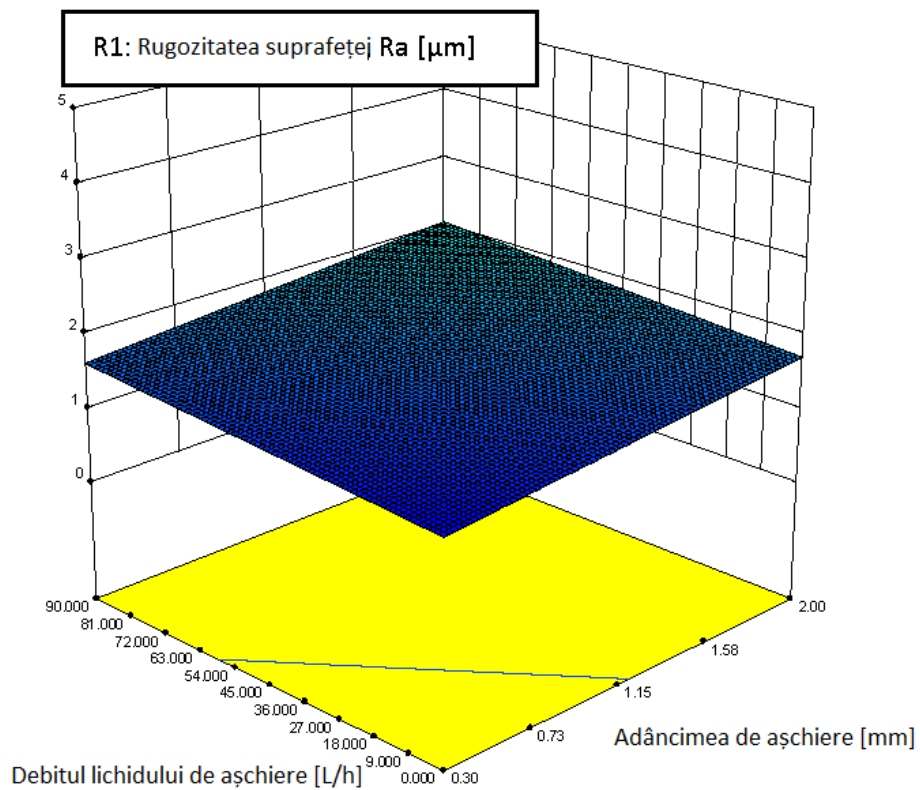


FIGURE 7.3. Influența adâncimii de așchiere și a deblului lichidului de așchiere asupra rugozității R_a

Valorile rugozității suprafeței prelucrate sunt similare la prelucrarea *MQL* și la strunjirea convențională. În ciuda debitului foarte scăzut al lubrifianului, tehnica ecologică nu determină o înrăutățire a calității suprafeței.

Chiar dacă rezultatele sunt puternic influențate de compoziția chimică și de principalele caracteristici mecanice ale materialului semifabricatului, de condițiile de așchiere, de materialul de sculei și de acoperire, rezultatele sunt validate și de alte cercetări. Studiul trebuie continuat prin evaluarea efectelor a prelucrării pseudo-uscate asupra durabilității sculei așchietoare.

7.3.2 Analiza încărcării mașinii-unelte

Corelația dintre încărcarea mașinii-unelte (L) și parametrii de așchiere este dată de ecuația liniară FI (2) și reprezentată de graficele prezentate în *Figura 7.4* și *Figura 7.5*.

$$L = 3.52324 - 13.87177 \cdot a_p + 2.67312 \cdot f + 0.092222 \cdot v - 0.12405 \cdot q_l + 207.87091 \cdot a_p \cdot f + 7.90190E-003 \cdot a_p \cdot v + 4.08926E-003 \cdot a_p \cdot q_l - 0.57367 \cdot f \cdot v + 2.54849 \cdot f \cdot q_l - 9.21042E-004 \cdot v \cdot q_l \quad (7.2)$$

În toate testele efectuate, încărcarea mașinii-unelte (și implicit puterea consumată) este influențată în principal de condițiile de așchiere (avans și de adâncimea de așchiere) și mai puțin de condițiile de ungere și răcire.

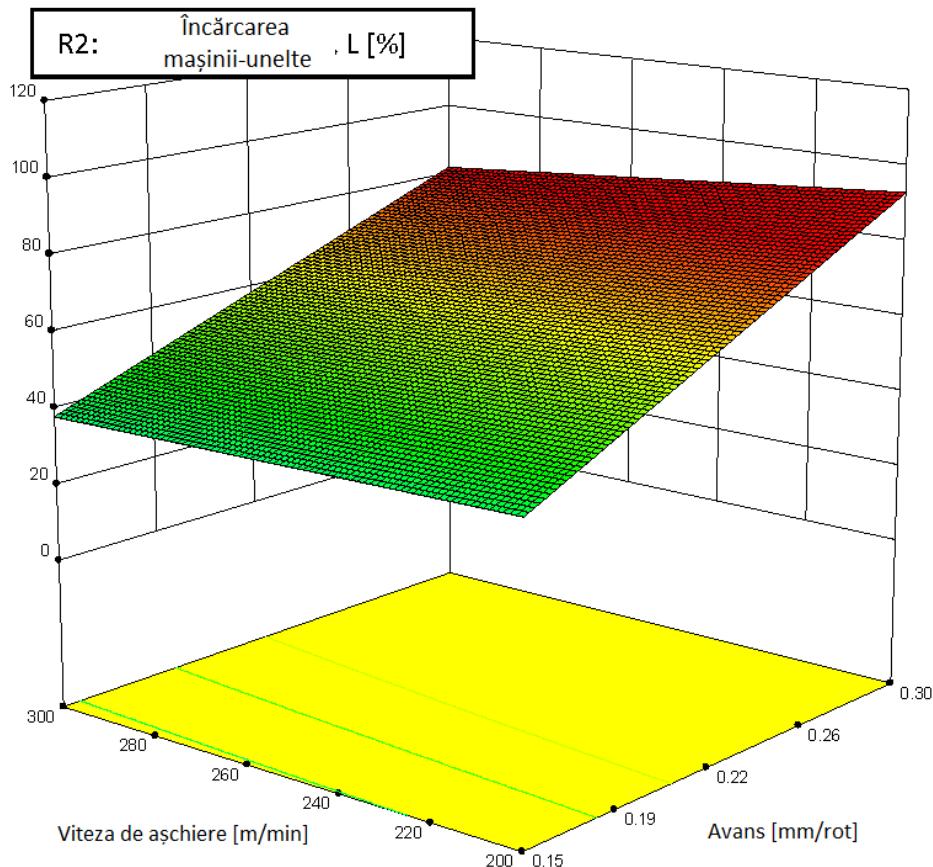


FIGURA 7.4. Influența vitezei de așchiere și a avansului asupra încărcării MU.

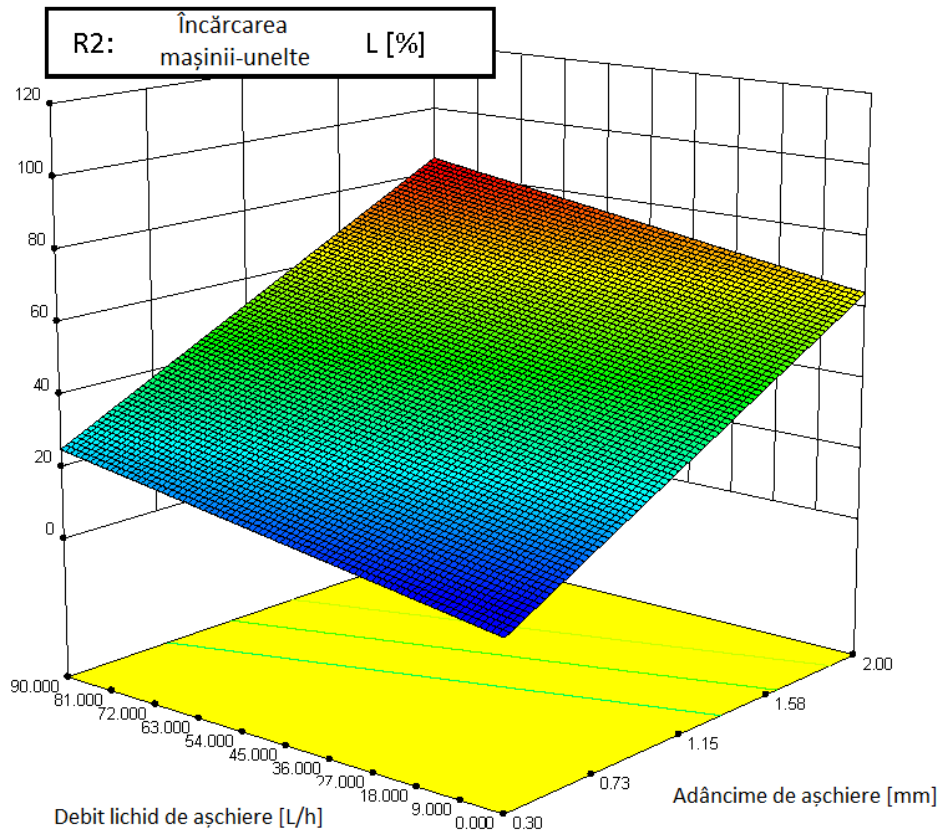


FIGURA 7.5. Influența adâncimii de așchiere și debitului lichidului de așchiere asupra încărcării MU.

Absența sau debitul redus ale lichidului de așchiere (corespunzătoare *MQL* și *DC*) nu duc la creșterea încărcării mașinii-unelte. Aceasta asigură o rezervă de putere, care poate fi valorificată prin utilizarea unor condiții de așchiere mai intense.

7.4. Optimizarea parametrilor de așchiere

După cum s-a menționat anterior, în comparație cu o abordare convențională a cercetării, metoda *RSM* reduce în mod semnificativ numărul de experimente care sunt necesare pentru modelarea funcțiilor de răspuns. Utilizând această metodă, a fost determinată combinația optimă a condițiilor de așchiere (*Figura 7.6*).

Astfel, funcțiile obiectiv stabilite au fost: valori mici ale rugozității și o utilizare optimă a puterii mașinii unelte, rezultatele fiind prezentate în diagramele din *Figura 7.6*. Pentru atingerea obiectivelor propuse, combinația optimă a parametrilor este: *adâncime de așchiere 1.94 mm, avans - 0.15 mm/rot, viteza de așchiere 200 m/min și răcire convențională.*

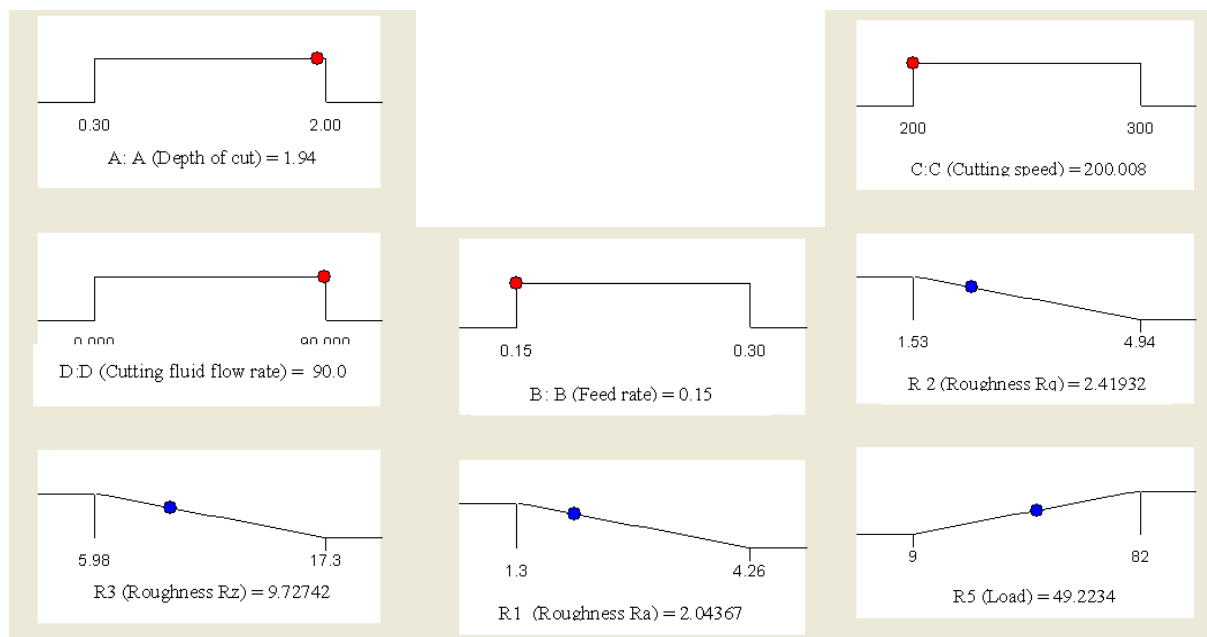


FIGURA 7.6. Optimizarea parametrilor de așchiere

7.5. Analiza formei de așchiilor












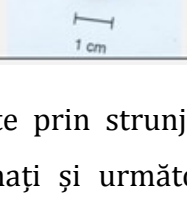
Pentru a analiza fragmentarea și forma așchiilor, au fost colectate așchii după fiecare secvență de prelucrare. Au rezultat diferite tipuri de așchii de diferite forme, mărimi și culori.

Tabelele 7.3, 7.4, și 7.5 prezintă dimensiunea și forma așchiilor rezultate la strunjirea de semifinisare a oțelului aliat *42CrMo4* în diferite condiții de prelucrare.

Așchiile fragmentate sunt, în general, dorite deoarece: sunt mai puțin periculoase pentru operator, nu cauzează deteriorarea suprafeței piesei prelucrate și a diferitelor subansambluri ale mașinii-unelte, pot fi ușor îndepărtate din zona de lucru, ușor manipulate și eliminate după prelucrare.





Producerea așchiilor discontinue favorabile este posibilă prin aplicarea următoarelor principii: selectarea corectă a condițiilor de așchiere (de ex. materialul și geometria sculei așchietoare, valorile vitezei de așchiere și avansului și, într-o oarecare măsură, adâncimea de așchiere, alegerea cuplului de materiale sculă-semifabricat și selectarea corespunzătoare a mediului de prelucrare sau a lichidului de așchiere, care afectează temperatura și frecare pe interfețele sculă-așchie și sculă-semifabricat.

TABELUL 7.3. Influența condițiilor de așchiere asupra formei așchiilor la strunjirea oțelului aliat 42CrMo4. ($a_p=2mm$)

Parametrii și condiții de așchiere				Forma așchiei	
a_p [mm]	f [mm/rot]	v_c [m/min]	q_l [L/h]		
2	0.3	300	90		
		250	0		
	0.2	300	0.024		
		200	90		
			0		
	0.15	300	0.024		
		200	90		
		250	0		









Tabelele prezintă forma așchiilor rezultate prin strunjirea oțelului aliat 42CrMo4, utilizând parametrii de așchiere deja menționați și următoarele condiții de răcire și lubrifiere: DC - 0 L/h, MQL cu ulei vegetal la un debit de 0.024 L/h și convențional cu emulsie SAROL 474EP la debit de 90 L/h.

TABELUL 7.4. Influența condițiilor de așchiere asupra formei așchiilor la strunjirea oțelului aliat 42CrMo4. ($a_p=1mm$)

Parametrii și condiții de așchiere				Forma așchii	
a_p [mm]	f [mm/rot]	v_c [m/min]	q_l [l/h]		
1	0.3	300	90		
		200	0.024		
					
		0.2	300	0	
	0.15				300
		250	90		

Așchiile discontinue au aspectul unor fragmente mici de material, indicând unghiul de degajare negativ al sculei, avans mic și viteze de așchiere reduse. În cazul așchiilor discontinue, se remarcă o zonă zimțată pe suprafața interioară. Suprafața lor interioară are un aspect neted datorită deformării plastice ulterioare, în urma frecării intensive cu plăcuța sculei în condiții de presiune și temperaturi ridicate.

TABELUL 7.4. Influența condițiilor de așchiere asupra formei așchiilor la strunirea oțelului aliat 42CrMo4. ($a_p=0.3\text{ mm}$)

Parametrii și condiții de așchiere				Forma așchiei	
a_p [mm]	f [mm/rot]	v_c [m/min]	q_1 [l/h]		
0.3	0.3	300	90		
					
	0.2	250	0.024		
					
	0.15	250	0		
					

Așchiile continue nefragmentate, sub forma unei benzi lungi cu suprafețe strălucitoare netede, rezultă de regulă la procesarea materialelor ductile, cu avansuri mici și viteze de așchiere mari. Următorul tip de așchii arată ca o panglică lungă, dar suprafața nu mai este netedă și strălucitoare. În anumite circumstanțe (viteze de așchiere reduse, unghiuri negative de degajare), oțelul de înaltă calitate 42CrMo4 tinde să se depună pe tăișul sculei.

Astfel se formează un strat foarte dens de material atașat la fața de degajare a sculei care tinde să acționeze ca un tăiș în sine. După atingerea dimensiunii critice, acest tăiș se desprinde împreună cu așchia și dispăre la viteze mari de așchiere. Așchia se rupe liber și forțele de așchiere vor fi mai mici, dar efectul este o suprafață prelucrată rugoasă.

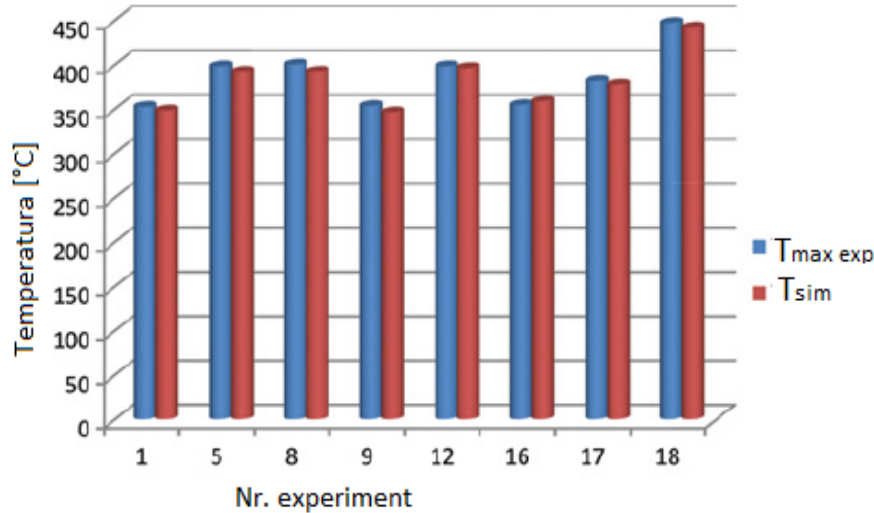


FIGURA 7.7. Compararea rezultatelor practice cu cele obținute prin simulare.

Pe baza Figurii 7.7, la o viteză constantă de așchiere, se pot defini intervalele de variație ale avansului și adâncimii de așchiere (zona hașurată), care asigură formarea unor așchii cu formă favorabilă, pentru materialul semifabricatului, materialul și geometria sculei așchietoare considerate (Figura 7.8).

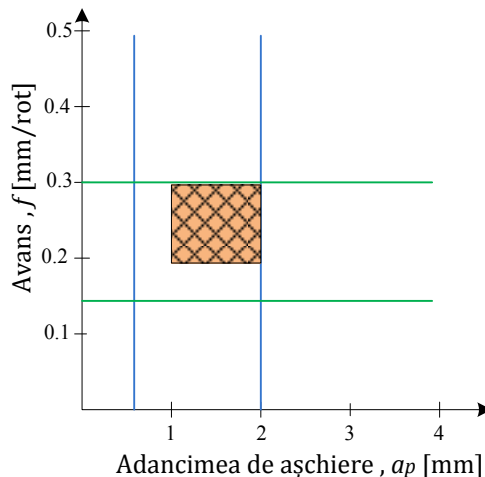


FIGURA 7.8. Zona de formare a așchiilor cu formă favorabilă ($v=ct$).

Eliminarea lichidului de răcire și lubrifiere determină o temperatură de așchiere mai mare și o frecare mai mare între suprafața așchiei și fața de degajare a sculei, ceea ce determină o comprimare mai mare și curbarea așchiei. Suprafața din spate a așchiei după

strunjirea uscată este rugoasă și mată. Culoarea este albastru închis, ceea ce indică în mod clar o temperatură ridicată de așchiere.

Aplicarea *MQL* modifică condițiile de formare a așchii și îndepărtarea acesteia de-a lungul feței de degajare a sculei. Pătrunderea vaporilor de ulei pe suprafețele de contact ale așchii împiedică aderența și schimbă caracterul contactului cu așchie-sculă: fricțiunea se transformă în curgere plastică, ceea ce duce la o compresiune mai scăzută. Suprafețele așchiilor după prelucrarea *MQL* sunt mai netede, ceea ce este rezultatul unei compresii mai mici a așchiilor, precum și al unor condiții mai bune de degajare a așchii.

De asemenea, viteza de așchiere influențează forma așchii. Nu este de dorit să se folosească viteze reduse, deoarece viteza de așchiere influențează productivitatea prelucrării și calitatea suprafeței. Dacă viteza de așchiere trebuie menținută ridicată pentru motivul menționat anterior, schimbarea adâncimii de așchiere și a avansului este soluția pentru controlul formei așchii.

7.6. Concluzii

În cazul absenței lichidelor de răcire/lubrifianților (așchiere uscată, sarcinile lor trebuie preluate de alte componente ale sistemului tehnologic, cum ar fi aspirarea așchiilor, utilizarea tehnicii de răcire minimală (*MQC*) combinată cu *MQL*). În acest sens, cea mai recentă abordare se referă la utilizarea sculelor de înaltă performanță cu acoperire multistrat pentru aplicațiile DC.

Analiza calității suprafeței este esențială în investigarea așchierii metalelor. În acest capitol, studiul experimental al rugozității suprafeței a fost efectuat la așchiera oțelului aliat *42MoCr5*. Soft-ul *Design Expert* a fost utilizat pentru analiza influenței condițiilor de așchiere asupra rugozității suprafeței și a încărcării mașinii-unelte. Din studiu, se concluzionează că adâncimea de așchiere și avansul au cea mai mare influență asupra acestora.

Aplicarea convențională a lichidelor de așchiere nu poate crește în mod eficient calitatea suprafeței doar prin debitul mare al mediului de așchiere folosit. În cazul așchierii *MQL*, fluidul poate pătrunde mai ușor spre interfața de lucru, unde contactul cu sculă-miez este în cea mai mare parte plastic, în condiții de așchiere dificile (viteză de așchiere și viteză de avans mari). Tehnica *MQL* ar putea îmbunătăți semnificativ rugozitatea suprafeței prelucrate pentru anumite combinații ale vitezei de așchiere și avansului.

Forma și mecanismul de formare ale așchii sunt influențate de condițiile de așchiere. În zona avansurilor reduse și medii, influența răcirii și lubrifierii în zona de așchiere asupra modificărilor de formă ale așchii este limitată. O creștere a vitezei de avans și a adâncimii de așchiere duce la o formă mai favorabilă a așchii, care este mai ușor de îndepărtat din zona de așchiere.

Deoarece se urmărește menținerea vitezei de așchiere la valori ridicate pentru a asigura productivitatea procesului, controlul formării așchiilor se poate face prin alegerea adecvată a adâncimii de așchiere și a avansului.

CAPITOLUL 8

ANALIZA FORȚELOR DE AȘCHIERE LA STRUNJIREA USCATĂ ȘI PSEUDO-USCATĂ

8.1. Introducere

Estimarea prin metode analitice sau măsurare a forțelor de aşchiere în timpul proceselor de prelucrare este un element esențial pentru determinarea și controlul condițiilor de desfășurare a procesului. Pentru producătorii de mașini-unelte și pentru utilizatorii acestora, cunoașterea forțelor de aşchiere dezvoltate în procesele de prelucrare, în condiții de procesare date, este un criteriu important al prelucrării materialelor. Măsurarea și predicția forțelor ajută, de asemenea, la optimizarea proceselor de prelucrare.

Ca variabilă dependentă a sistemului tehnologic, forțele de aşchiere au fost investigate de mulți cercetători, inclusiv prin dezvoltarea unor modele analitice adecvate. Aceste modele sunt relații analitice și empirice, care conectează parametrii de prelucrate și forțele de aşchiere [Han 17, Rah 12, Dom 08]. Datorită configurațiilor complexe ale sculelor, condițiilor de aşchiere la procesarea metalelor și a unor tensiuni necunoscute, calculul forțelor de aşchiere teoretice nu conduce la rezultate precise și, prin urmare, a fost necesară măsurarea experimentală a forțelor de aşchiere, așa cum se arată în [Kor 03].

Prin urmare, determinarea experimentală a forțelor de aşchiere în timpul proceselor de prelucrare este una dintre modalitățile de evaluare a prelucrabilității materialelor și de monitorizare a sistemului tehnologic. Astfel, semnalele preluate de dinamometre sunt utilizate pentru monitorizarea forțelor de aşchiere în procesul de prelucrare, pentru a valida astfel modelele analitice și pentru a monitoriza alți parametri de răspuns ai procesului de prelucrare. Amplitudinea forțelor de aşchiere are o influență directă asupra calității suprafeței prelucrate, a preciziei piesei de prelucrat, dar și asupra uzurii sculelor, generării de căldură așa cum este prezentat în [Agu 13, Dom 08, Dav 15, Ert 03, Lo 09, Rah 12, Tet 10, Wan 13, Azo 97, Núñ 06, și Zhan 07].

8.2. Componentele forței de așchiere

Forțele implicate în procesul de așchiere acționează deopotrivă asupra sculelor, piesei, a dispozitivelor de fixare a sculelor și a semifabricatelor, precum și asupra subansamblurilor mașinii-unelte, așa cum se arată în [Sag 17]. Forța totală de așchiere F are o mărime și o direcție variabile în timp, ceea ce face ca ea să nu prezinte nici un interes din punct de vedere practic. În proiectarea constructivă și tehnologică se utilizează componentele forței de așchiere pe direcțiile sistemului de referință cinematic OXYZ (Figura 8.1) pentru calculul elementelor sistemului tehnologic.

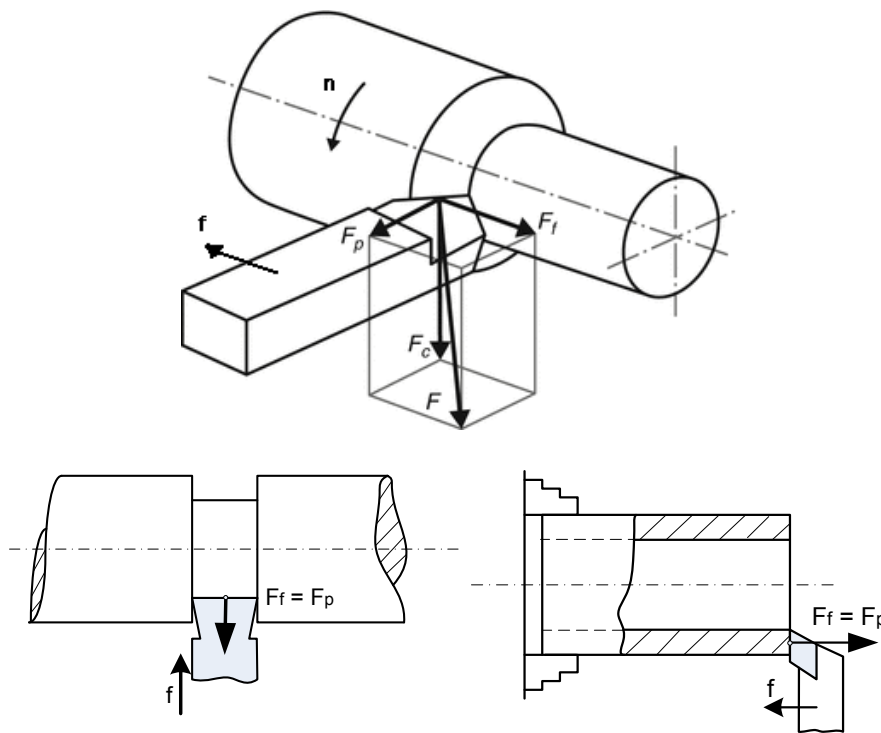


FIGURA 8.1. Componentele forței de așchiere.

Pentru operația de strunjire au fost convenite următoarele componente ale forței de așchiere:

- Componenta principală F_c este orientată în direcția mișcării de așchiere, fiind apropiată ca valoare de forța totală F . Este forța consumată pentru a depăși rezistența la deformare a stratului de material îndepărtat. Componenta F_c determină mărimea cuplului axului principal al mașinii și constituie forța considerată pentru calcularea dimensionarea componentelor active ale mașinii-unelte și a sculei așchietoare. Precizia dimensională și geometrică a piesei sunt influențate de deformarea sistemului tehnologic și de vibrațiile produse de această componentă.

- Componenta de avans F_f reprezintă forța necesară pentru a depăși rezistența la deformare plastică a stratului de material prelucrat și reacția la penetrarea muchiei așchiitoare în piesa de prelucrat. Această componentă reprezintă forța considerată pentru dimensionarea corpului sculei și a elementelor mecanismului de avans.

- Componenta pasivă (radială) F_p este forța necesară pentru a învinge rezistenței la deformare a stratului de material îndepărtat în direcție radială. Această componentă constituie forța de respingere a sculei și reprezintă sursa principală pentru abaterile dimensionale și geometrice ale suprafeței prelucrate împreună cu componenta F_c , generând vibrații în sistemul tehnologic. Componenta F_p soliciță mecanismul de avans, și are ca rezultat amplificarea abaterilor dimensionale și de formă geometrică și creșterea rugozității suprafeței prelucrate.

Toate cele trei componente ale forței de așchiere sunt importante deoarece, în afară de componenta principală tangențială F_c care determină puterea de așchiere, componenta radială F_p și de avans F_f determină erorile dimensionale și de formă ale piesei prelucrate, deformațiile și uzura sculelor. În anumite cazuri, componenta F_f se poate confunda cu componenta radială F_p (de ex. la strunjirea transversală) sau componenta normală F_p poate să se identifice cu componenta de avans F_f (de ex. la strunjirea plană) (Figura 8.1).

Valorile relative ale componentelor forței de așchiere depind de mărimea unghiului de atac κ_r , de materialul prelucrat și de parametrii de așchiere [Vas 11]. În Tabelul 8.1 sunt prezentate câteva exemple care indică corelația dintre componentele forței de așchiere pentru oțeluri și fonte.

TABELUL 8.1. Valori relative ale componentelor forței rezultante. [Vas 11]

Unghi de atac principal κ_r [°]	Oțeluri			Fonte		
	F_f	F_p	F_c	F_f	F_p	F_c
30	0.20	0.80	1	0.30	1.40	1
45	0.30	0.50	1	0.50	1.14	1
60	0.40	0.35	1	0.55	1.00	1
72	0.45	0.30	1	0.60	1.90	1
90	0.50	0.20	1	0.65	0.80	1

8.3. Factorii care influențează mărimea forțelor de așchiere

Utilizarea relațiilor de calcul al componentelor forței de așchiere necesită cunoașterea influenței parametrilor procesului de așchiere asupra acestora. Principalii factori care influențează mărimea forțelor de așchiere sunt: • materialul prelucrat (prin σ_r

sau HB); • adâncimea de așchiere a_p și avansul f ; • viteza de așchiere v_c ; • geometria părții active a sculei; • uzura tăișului sculei și • lichidele de așchiere.

În practică, pentru calculul componentelor forței de așchiere se utilizează relații de tip exponențial, elaborate pe baza unei metodei cvasiempirice. Metoda are la bază ipoteza conform căreia componenta principală (F_c) a forței de așchiere depinde de proprietățile materialului semifabricatului și parametrii tehnologici ai secțiunii așchierii: adâncimea de așchiere a_p [mm], avansul f [mm/rot], lățimea așchierii nedetașate b [mm], grosimea așchierii nedetașate a [mm].

8.3.1 Influența materialului prelucrat

În practică este foarte important să se stabilească influența materialului prelucrat asupra componentei principale F_c a forței de așchiere.

În funcție de rezistența la rupere σ_r sau duritatea HB a materialului semifabricatului, relațiile de calcul ale componentelor forței de așchiere sunt:

$$F_c = C \cdot \sigma_r^{nF_c} \text{ sau } F_c = C_1 \cdot (HB)^{nF_c} \quad (8.1),$$

în care $nF_c = 0.35$ pentru oțeluri cu $\sigma_r < 60 \text{ daN/mm}^2$ sau $nF_c = 0.75$ pentru oțeluri cu $\sigma_r > 60 \text{ daN/mm}^2$.

Din această relație rezultă că forța de așchiere crește odată cu creșterea rezistenței sau a durității materialului prelucrat. Ecuația (8.1) poate fi utilizată pentru determinarea componentei F_c , însă pentru aceasta trebuie cunoscute σ_r și HB și determinate constantele C și C_1 .

Pentru aceasta se pot utiliza datele cunoscute sau determinate pentru un material de referință (de exemplu pentru oțel - OLC 45, iar pentru fontă - Fc 200). În acest caz ecuațiile (8.1) devin:

$$\frac{F_c}{\sigma_r^n} = \frac{F_{c0}}{\sigma_{r0}^n} = C \text{ sau } \frac{F_c}{(HB)^{0.35}} = F_{c0} \cdot \left(\frac{HB}{HB_0}\right)^{0.55} \quad (8.2)$$

unde F_{c0} , σ_{r0} și HB_0 caracterizează materialul de referință, iar prelucrarea se va realiza în aceleași condiții pentru ambele materiale.

8.3.2 Influența adâncimii de așchiere și a avansului

Ținând cont de faptul că $F_f > F_p$, se poate concluziona că influența adâncimii de așchiere este mai mare decât a avansului. Aceasta se explică prin faptul că la creșterea grosimii așchiei, unghiul de forfecare φ crește, ceea ce determină o diminuare a deformațiilor plastice din zona de așchiere. Pe de altă parte, tensiunile nu sunt repartizate uniform pe toată grosimea așchiei, fapt pentru care forța nu crește proporțional cu avansul f . Fenomenul este similar și în cazul adâncimii de așchiere a_p .

Adâncimea de așchiere a_p , influențează asupra componentelor forțelor de așchiere prin aria secțiunii transversale a așchiei ($f \cdot a_p$), coeficientul de frecare la interfața sculă/așchie μ , coeficientul de comprimare al așchiei k_l , aria feței de degajare active a sculei și temperatura la așchiere.

Prin creșterea adâncimii de așchiere, aria secțiunii transversale a așchiei și aria feței de degajare active cresc, μ și k_c scad relativ puțin, iar temperatura la așchiere crește ușor. Forța specifică de așchiere scade vizibil în domeniul adâncimilor mici de așchiere ($a_p < 4 \cdot f$), deoarece în acest domeniu influențează raza de ascuțire a tăișului r_n .

Avansul f influențează prin aceleași mărimi și fenomene ca și adâncimea de așchiere a_p , numai că efectul termic al creșterii avansului este mai mare. Gradientul de creștere al forțelor la creșterea avansului este mai mic, comparativ cu cel de la creșterea adâncimii de așchiere.

8.3.3 Influența vitezei de așchiere

La viteze de așchiere mici ($v_c < 25 \text{ m/min}$), componenta F_c a forței de așchiere se micșorează și nu se formează depuneri pe tăiș. Depunerile pe tăiș cresc progresiv până la 65 m/min , viteza la care se obține un maxim al forței de așchiere, iar unghiul de așchiere δ și deformațiile plastice C_{dp} sunt mai reduse. Odată cu creșterea vitezei de așchiere, forțele de așchiere se micșorează. La viteze mai mari de $70-80 \text{ m/min}$, forța de așchiere începe să scadă din nou, atât datorită efectului termic al vitezei (plastifierea metalului în zona de așchiere) și scăderii coeficientului de frecare μ cât și datorită micșorării intensității deformațiilor plastice.

Viteza de așchiere v_c , influențează asupra componentelor forțelor de așchiere mai complex și în mod diferit, motiv pentru care se impune o analiză pe trei domenii de valori: $v_c < 50 \text{ m/min}$; $50 < v_c < 500 \text{ m/min}$; $v_c > 500 \text{ m/min}$.

În domeniul $v_c < 50$ m/min și pentru materiale ductile, v_c influențează prin intermediul depunerilor pe tăiș, care modifică unghiul de degajare real, coeficientul de frecare μ și coeficientul de comprimare al așchii k_l . Prin creșterea dimensiunilor depunerilor, unghiul de degajare crește iar forțele de așchiere scad.

În domeniul vitezelor uzuale ($v_c = 50-500$ m/min), predomină efectul termic al vitezelor de așchiere. La creșterea vitezei peste 50 m/min crește temperatura, scad depunerile, deformațiile plastice se produc cu eforturi mai mici și coeficienții de frecare sunt mai mici. Această tendință de micșorare a forței de așchiere este mai accentuată pentru valori mici ale unghiului de degajare γ și avansului f , la un domeniu de viteze cuprinse între 50-150 m/min. Pentru viteze cuprinse între 150-500 m/min, tendința de micșorare a forțelor este mai mică, deoarece în acest domeniu μ și k_l scad mai puțin.

În domeniul vitezelor mari de așchiere ($v_c > 500$ m/min) se dezvoltă temperaturi ridicate în zona plastică, materialul este puternic plastifiat, comportandu-se ca un lichid vâscos. Așchiera se realizează cu forțe relativ mici și constante.

8.3.4 Influența geometriei sculei așchietoare

Unghiul de degajare γ , influențează asupra valorilor componentelor F_c , F_f , F_p , prin intermediul deformațiilor plastice și al frecărilor. Prin variația unghiului γ de la valori negative la valori pozitive, se diminuează deformațiile și frecările și scad valorile componentelor F_c , F_f , F_p . Influența este mai mare în domeniul valorilor negative, deoarece este favorizată comportarea ductilă a materialului de prelucrat.

Variația unghiului de înclinare al tăișului λ_T de la valori negative la valori pozitive determină micșorarea deformațiilor plastice și a forțelor de frecare, simultan cu creșterea coeficientului de frecare μ . Unghiul de atac principal κ_r , influențează în mod diferit asupra celor trei componente F_c , F_f , F_p . La prelucrarea oțelurilor, creșterea unghiului κ_r până la 60° duce la scăderea componentei F_c , deoarece scad deformațiile plastice datorită creșterii grosimii așchii și a temperaturii.

Pentru $\kappa_r > 60^\circ$, componenta F_c crește din nou datorită creșterii deformațiilor plastice datorate influenței unghiului de atac secundar și creșterii lungimii tăișului curb de rază r (accentuarea complexității așchierii). Această creștere a componentei F_c este foarte mică la prelucrarea cu viteze mari și în toate cazurile la prelucrarea fontelor. Creșterea unghiului κ_r duce la creșterea componentei F_f și la scăderea componentei F_p .

Raza la vârf a sculei r_n . Creșterea razei r_n , duce la creșterea deformațiilor plastice datorită creșterii lungimii tăișului curb și micșorării unghiului de atac mediu. Componentele F_c , F_p , cresc, iar componenta F_f scade.

8.3.5. Influența lichidelor de așchiere

Mediul de așchiere lichid, prin proprietățile de ungere și răcire de ușurează condițiile de formare a așchiilor, având ca efect și o reducere a forțelor de așchiere cu 40-50% comparativ cu așchiera uscată. La valori mici ale vitezei și avansului influența mediului de așchiere este mai pronunțată. La viteze și avansuri mari, mediul de așchiere lichid devine ineficient din punct de vedere al reducerii forțelor de așchiere, această reducere fiind de 23%. Fenomenul se explică prin accesul mai dificil al lichidului în zona de formare a așchiei.

Uneori, lichidele de așchiere sunt aplicate și în situații când utilizarea lor nu este necesară. În acest sens, prelucrarea fără utilizarea oricărui fluid de așchiere (prelucrare uscată) devine din ce în ce mai populară din cauza îngrijorării în ceea ce privește siguranța mediului și sănătatea muncitorilor. De asemenea, trebuie remarcat faptul că beneficiile mediilor de așchiere nu sunt disponibile în cazul prelucrării uscate. Această metodă este acceptabilă numai atunci când productivitatea proceselor și calitatea pieselor obținute la prelucrarea umedă sunt egale sau depășite [Sre 00].

O alternativă la așchiera uscată și la prelucrarea cu răcire convențională este prelucrarea pseudo-uscată (NDM). Scopul său este de a înlocui sistemele de răcire tradiționale și sistemele de pulverizare a lichidului de așchiere cu un flux de aer comprimat controlat, care transportă cantități minime de ulei în formă de ceață în zona de așchiere, printr-o duză externă sau prin corpul sculei. Acest lucru asigură lubrifierea zonei de așchiere și permite prelucrarea de înaltă performanță [Eki 15, Meh 18].

8.4. Determinarea forței de așchiere la strunjirea oțelului AISI 314L

Așa cum s-a prezentat anterior, diversele studii asupra forțelor de așchiere arată faptul că mărimea acestora este influențată de parametrii: *viteză de așchiere*, *avans*, *adâncime de așchiere*, *unghi de degajare al sculei*, *uzura sculei*. Prin urmare, au fost dezvoltate metode de măsurare a forțelor de așchiere. Măsurarea componentelor forței de așchiere se realizează cu ajutorul dinamometrelor, formate din unul sau mai multe elemente elastice, care sunt solicitate de forța care trebuie măsurată, efectele solicitării fiind sesizate de un traductor, ce furnizează un semnal proporțional cu solicitarea,

respectiv cu forța de măsurat [Wan 13]. Indiferent de construcție și structură, un dinamometru trebuie să îndeplinească următoarele cerințe: • să nu afecteze rigiditatea sistemului tehnologic; • să aibă o sensibilitate ridicată pe un domeniu larg de utilizare; • să aibă o precizie corespunzătoare (eroarea de măsurare sub 5%); • frecvența proprie să fie mai mare decât frecvența forței de măsurat; • să fie ușor de etalonat, utilizat și întreținut.

Studiile au fost efectuate pe strungul SPF 1500 PF. Condițiile de realizare a secvențelor de prelucrare sunt prezentate în *Tabelul 8.2*. Măsurarea componentei principale a forței de așchiere s-a realizat cu dinamometrul *DKM 2011* (și soft-ul aferent *XKM 2000*). Standul de măsurare a forțelor de așchiere la strunjirea exterioară este prezentat în *Figura 8.2*.

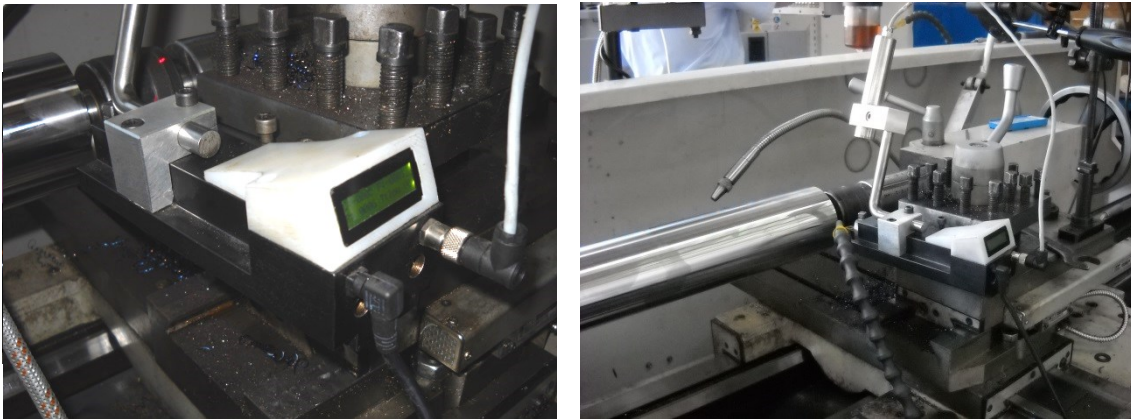


FIGURA 8.2. Măsurarea forțelor de așchiere la strunjire

TABELUL 8.2. Condiții de prelucrare la strunjirea AISI 316L

Mașina-unealtă	SPF 1500P, $P_w = 4-5.5kW$, $n_{max} = 1800$ rot/min				
Scula	Plăcuță: <i>CCMT 09T304E-UM P35</i> , acoperire TiN, Corpul sculei este materializat de dinamometrul <i>DKM 2011</i> , $\kappa_r = 90^\circ$				
Condiții de ungere și răcire	Așchiere uscată - 0 L/h Așchiere pseudo-uscată: ulei vegetal Lubrimax, debit - 0.066 L/h, echipament Lubrimat L 60 Steidle, presiune aer comprimat 5 bari				
Semifabricat	Bara laminată: oțel inox AISI 316L, $\varnothing 60$ mm, $L = 500$ mm				
Compoziție chimică [%]					
<i>C</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Mo</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>
0.03	16.5-18.5	10.5	2-2.5	1	2%
Proprietăți mecanice: durezza Brinell - 130 HB, $R_{p0.2} = 190$ MPa, Rezistența la rupere $R_m = 520$ MPa, Alungire A_5 -30%					

Semifabricatul utilizat a fost o bară laminată din oțel inoxidabil *AISI 316L*. Compoziția chimică și anumite proprietăți mecanice sunt prezentate în *Tabelul 8.2*. Acesta este o variantă cu conținut scăzut de carbon a oțelului inoxidabil 316. Aplicațiile tipice ale acestui material includ: industria aerospațială, fabricarea matrițelor și, în ultimii ani, aplicațiile

medicale pentru fabricarea implanturilor ortopedice. Oțelul aliat 316L se caracterizează prin tendința de ecruisare și prin proprietăți slabe de fragmentare a așchii în timpul prelucrării.

Parametrii de așchiere considerați sunt prezentați în *Tabelul 8.3*. Au fost utilizate trei niveluri de variație pentru adâncimea de așchiere, viteza de avans și turația axului principal. Studiile au fost efectuate în condiții de așchiere uscată și aproape în stare uscată (*Figura 8.3*).

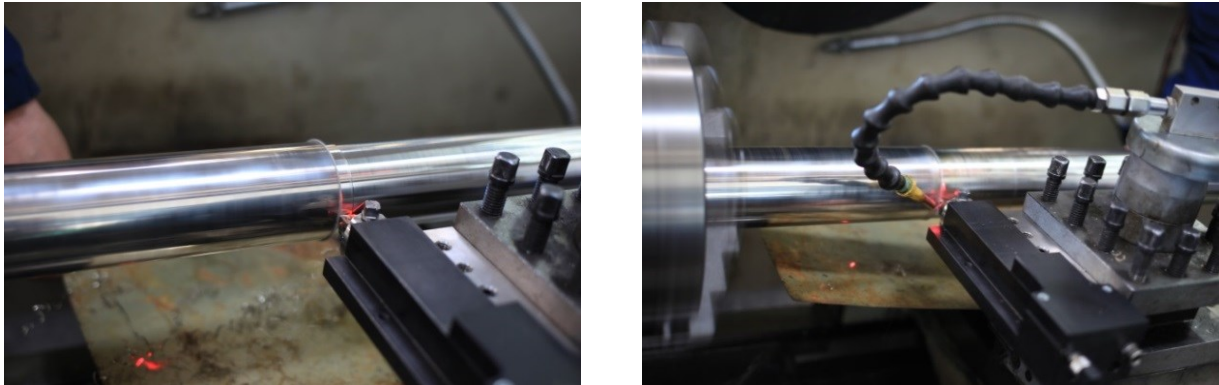


FIGURA 8.3. Strunjirea uscată (stânga) și strunjirea pseudo-uscată(dreapta) a oțelului AISI 316L

TABELUL 8.3 Parametrii de așchiere

Parametrul	Nivel de variație		
Adâncime de așchiere, a_p [mm]	1		
Avans, f [mm/rot]	0.122	0.195	0.320
Turația, n_p [rev/min]	560	830	1220
Viteza de așchiere, v_c [m/min]	105.5	156.4	230
Debit lichide de așchiere, q_l [L/h]	0	0.066	-

8.5. Interpretarea rezultatelor

Datorită caracteristicilor lor ridicate de rezistență la coroziune, oțelurile inoxidabile au în general o aplicație deosebită, în special în procesul de fabricație. Prelucrarea acestor materiale, studiul forțelor de așchiere și puterea necesară așchierii sunt parametri importanți care trebuie evaluați. Relația lor cu alte procese de așchiere variabile este crucială pentru controlul și optimizarea procesului de prelucrare.

Procesul de prelucrare ar trebui să ia în considerare și aspectele ecologice, consumul de energie fiind unul dintre criteriile de evaluare. Astfel, parametrii de așchiere pot fi optimizați pentru a minimiza consumul de energie.

Acest studiu analizează strunjirea oțelului inoxidabil AISI 316L în condiții de aşchiere uscată (fără lichid de aşchiere) și pseudo-uscată (cu cantitate minimă de lichid de aşchiere) cu diferite viteze de aşchiere (105.5, 156.5 și 230 m/min) și avansuri (0.122, 0.195 și 0.32 mm/rot). A fost măsurată componenta principală a forței de aşchiere, forța de aşchiere specifică și consumul de putere al procesului. Un exemplu de protocol de măsurare este prezentat în Figura 8.4, iar valorile înregistrate sunt prezentate în Tabelul 8.4.

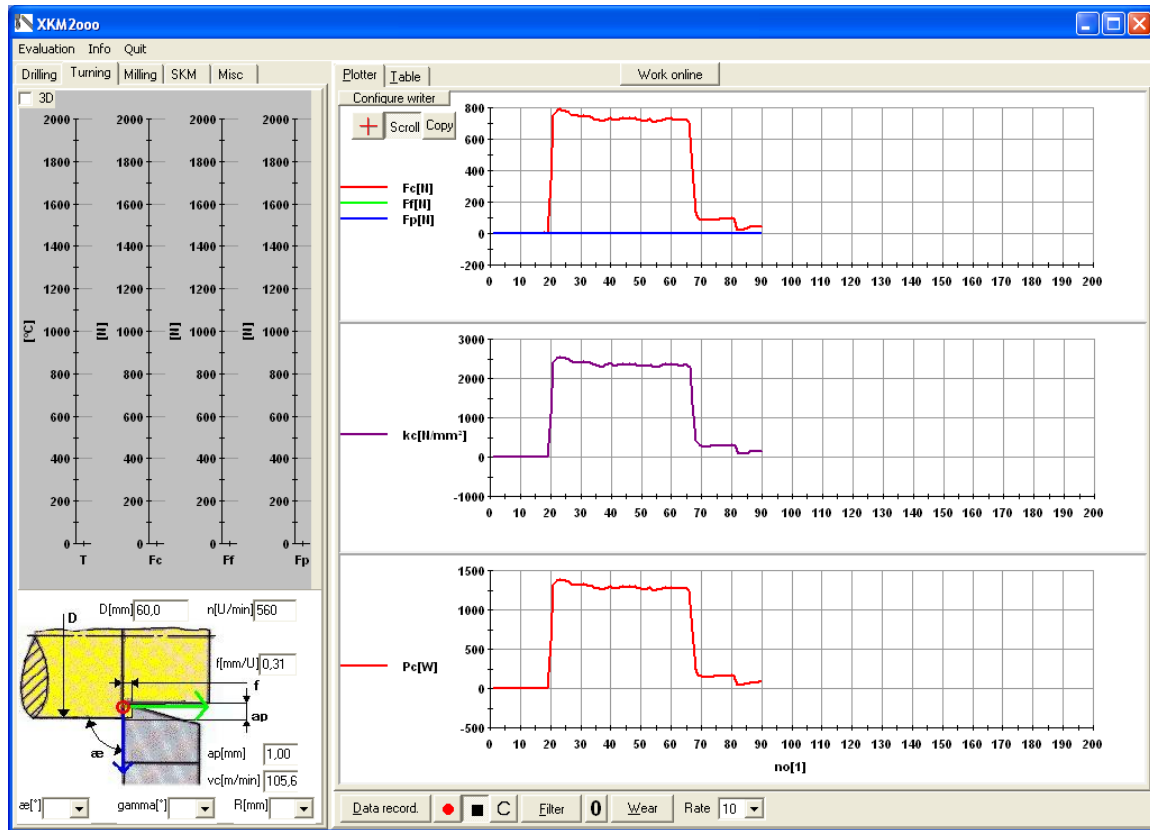


FIGURA 8.4. Protocol de măsurare

TABELUL 8.4. Rezultate înregistrate pentru F_c , k_c și P_c

a_p [mm]	f [mm/rot]	n_p [rot/min]	v_c [m/min]	DC			NDM		
				F_c [N]	k_c [N/mm ²]	P_c [kW]	F_c [N]	k_c [N/mm ²]	P_c [kW]
1	0.122	560	105.6	430	4450	0.765	370	3600	0.610
	0.195	560	105.6	630	3150	1.230	540	2600	0.900
	0.320	560	105.6	800	2500	1.300	730	2400	1.250
	0.122	830	156.5	340	3400	0.800	350	3500	0.850
	0.195	830	156.5	520	2600	1.370	520	2550	1.400
	0.320	830	156.5	710	2400	1.880	700	3500	1.900
	0.122	1220	230	310	3150	1.270	320	3230	1.300
	0.195	1220	230	480	2450	1.800	500	1500	1.950
	0.320	1220	230	620	2050	2.450	640	2080	2.500

Pentru o interpretare mai bună și mai ușoară a rezultatelor, ele au fost prezentate sub formă de diagrame în *Figurile 8.5-8.7*. Acestea redau variația parametrilor de ieșire considerați ai procesului în funcție de viteza de avans și viteza de așchiere.

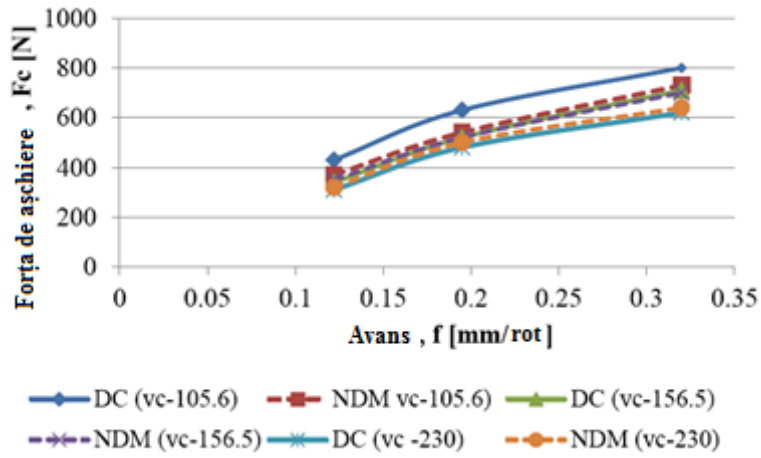


FIGURA 8.5. Variația forței de așchiere în funcție de avans.

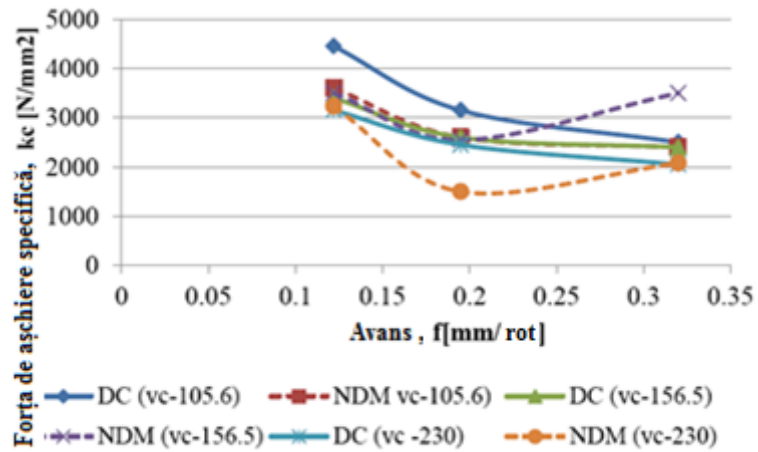


FIGURA 8.5. Variația forței specifice de așchiere în funcție de avans.

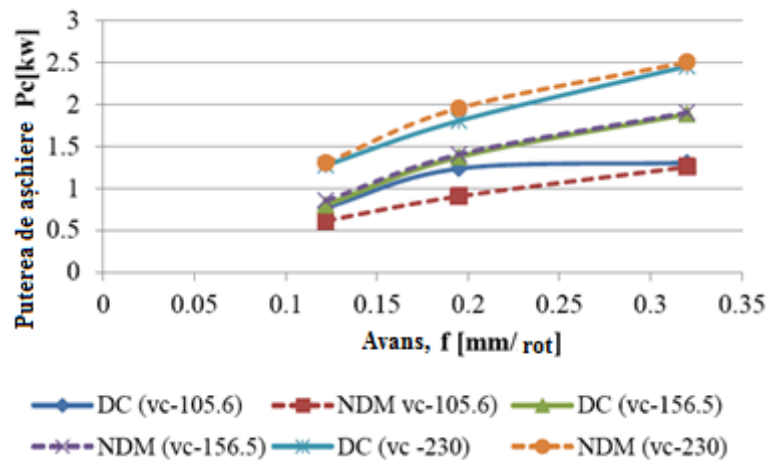


FIGURA 8.7. Variația puterii de așchiere în funcție de avans.

Forțele de aşchiere dezvoltate în timpul prelucrării influențează direct performanțele procesului și costul unitar al reperelor prelucrate. Muchiile aşchietoare ale sculelor utilizate la prelucrarea metaleor și a aliajelor acestora suportă tensiuni mari în timpul procesului de prelucrare. Componenta principală a forței de aşchiere F_c este cu atât mai mare cu cât adâncimea de aşchiere a_p , avansul f și forța de aşchiere specifică k_c sunt mai mari.

S-a constatat că F_c componenta principală a forței de aşchiere este puțin mai mare la viteza de aşchiere mai mică la aşchiera uscată. Pentru viteze mai mari forțele de aşchiere sunt aproape similare, creșterea avansului determină o creștere semnificativă a forțelor în toate cazurile. Cu cât este mai mare viteza de avans, cu atât forțele de aşchiere care acționează asupra sculei și a piesei fabricate sunt mai mari.

Cea mai mare scădere a forței de aşchiere specifice a fost viteza de aşchiere de 156.4 m/min, unde pentru viteza de avans s-au înregistrat aproximativ 50%. Pentru valorile medii ale vitezei de avans și vitezei de aşchiere, condițiile de ungere și răcire nu au nicio influență.

Consumul minim de putere a fost înregistrat pentru secvența de prelucrare efectuată cu viteze mici de aşchiere și avans, în condiții de aşchiere pseudo-uscată.

CAPITOLUL 9

ANALIZA POTENȚIALULUI DE SUSTENABILITATE AL FABRICAȚIEI ADITIVE

9.1. Introducere

Relevanța dezvoltării durabile și, în special, a tehnologiilor ecologice este deja cunoscută. În prezent, companiile sunt forțate să producă și să furnizeze produse ieftine și de calitate, ținând cont în același timp de performanța ecologică. În acest context, este necesară corelarea temelor de cercetare din România cu tendințele internaționale actuale.

În principiu, este necesar să se stabilească aspectele care trebuie luate în considerare pentru aplicarea în practică a noilor tehnici și metode de fabricație, factorii de influență asupra eficienței tehnologiilor durabile și a posibilităților de implementare eficientă a acestora.

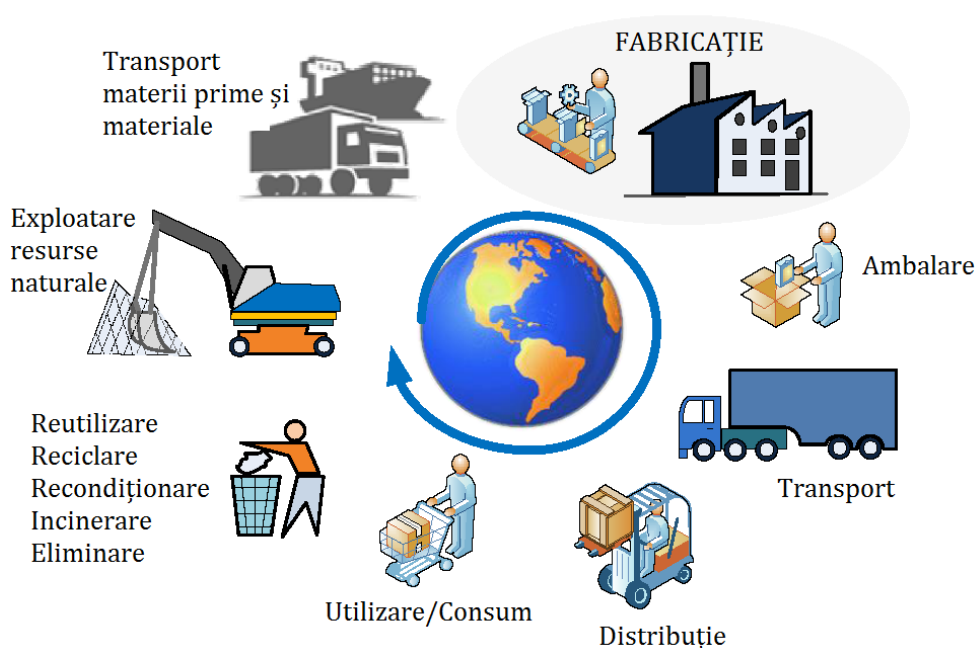


FIGURA 9.1. Etapele ciclului de viață al unui produs [Ros 07].

O analiză cuprinzătoare a sustenabilității trebuie să ia în considerare fiecare etapă a ciclului de viață al produsului, de la materii prime până la eliminarea la sfârșitul vieții produsului, incluzând etapa de *fabricație*, când se consumă cantități semnificative de materiale și energie [Kel 14, Bou 13, Bou 14]. Astfel, producția ecologică constituie un pas către dezvoltarea durabilă (*Figura 9.1*).

Așa cum a fost prezentat în capitolele anterioare, au fost efectuate numeroase investigații în domeniul proceselor de prelucrare subtractive (*SM – Subtractive Manufacturing*), cu privire la impactul asupra mediului, procesele de fabricație fiind evaluate pe baza consumului de energie și materiale. Alte studii au vizat elaborarea unor metodologii pentru evaluarea impactului ecologic al proceselor *SM* [Fal 15, Pus 09, Pus10a, Pus 10b].

Fabricația aditivă (AM) este o tehnologie relativ nouă, care are potențialul de a realiza produse personalizate cu configurație geometrică complexă (piese funcționale și scule), folosind mai puține materiale și producând mai puține deșeuri. *AM* are capacitatea de a construi piese direct din modelele digitale și reprezintă o alternativă la metodele convenționale de fabricație (deformare plastică, turnare sub presiune sau prin injecție, electroeroziune, așchiere) [Bou 14, Fal 15, Kre 13]. Tehnologiile *AM* sunt adecvate în domeniile medicinei, industriei auto și industriei aerospațiale, unde personalizarea, greutatea redusă ale pieselor și circuite scurte de aprovizionare sunt importante din punct de vedere economic [Ber 15].

Studiile realizate au arătat că *AM* poate fi o opțiune viabilă pentru industrie, dar nu este încă acceptată pe scară largă, din cauza lipsei de standarde în domeniu. Astfel, utilizarea *AM* pentru producția de serie este deocamdată îngreunată, deoarece în industrie asigurarea calității depinde de standarde, în selecția proceselor de fabricație și a materialelor [Bau 13, Kri 14].

În ceea ce privește sustenabilitatea *AM*, au fost efectuate puține cercetări. Cele mai multe dintre ele se concentrează pe consumul de energie electrică al mașinilor și echipamentelor. Studiile subliniază corelația dintre sustenabilitate și calitatea designului, deoarece consumul de energie depinde de geometria și orientarea pieselor în spațiul de lucru. Principalele aspecte care trebuie avute în vedere includ: forma și proprietățile mecanice ale piesei fabricate, calitatea suprafeței și costurile [Bae 13, Mut 13, Rat 12, Sre 10, Tab 10, Wit 13].

Practicile actuale, bazate pe experiența umană, trebuie transformate în practici bazate pe știință/cunoaștere prin evaluarea sustenabilității. Este necesară dezvoltarea unor metode de evaluare durabilă a proceselor de producție, pentru a cuantifica un set larg de parametri, utilizând instrumente ca *Proiectarea pentru fabricație și asamblare (DFMA)* și *Evaluarea ciclului de viață (LCA)*.

LCA facilitează dezvoltarea unui model parametric al proceselor de producție, permițând estimarea impactului de mediu al etapei de fabricație prin tehnologiile *AM* a reperelor/produselor. Un astfel de instrument ar putea îmbunătăți proiectarea reperelor, a proceselor și a echipamentelor *AM* pentru a reduce impactul asupra mediului, generat de fluxurile de materiale, deșeuri și consumul de energie.

9.2. Probleme ecologice ale AM

Caracterizarea sustenabilității *AM*, ca parte a producției industriale, este dificil de realizat. Dimensiunea cuantificabilă a unei astfel de analize ar trebui să includă aspectele ecologice ale *AM* referitoare la *consumul de materiale și energie, sănătatea și siguranța operatorilor, transportul și gestionarea deșeurilor*. Principalele aspecte ale proiectării proceselor *AM* care trebuie luate în considerare includ: rezistența și flexibilitatea piesei, calitatea suprafeței, incuziuni, costul materialului, costul mașinii și productivitatea procesului.

Procesele *AM* trebuie să își demonstreze potențialul ecologic, considerând principiile sustenabilității: • *utilizarea eficientă a materialelor și energiei*, • *gestionarea deșeurilor industriale*, • *costurile de producție scăzute*, • *evitarea emisiilor și materialelor toxice*, • *problemele de sănătate și siguranță*, • *impactul redus asupra mediului*, • *eficiența economică*, • *posibilitățile de reparare sau reciclare* și • *disponibilitatea produselor realizate prin AM*.

9.2.1 Energie

În ciuda potențialului său de a sprijini producția curată, *AM* nu poate fi considerată încă o metodă ecologică de producție, din cauza consumului ridicat de energie cauzat de utilizarea proceselor termice sau a laserelor, necesare pentru a topi materialele plastice și metalice sau pentru a solidifica rășinile. Echipamentele *AM* nu sunt, în general, concepute pentru a fi eficiente. Pierderea de energie este considerabilă, iar gestionarea căldurii este ineficientă. La nivelul producției de masă, procesele *AM* ar avea impacturi pe reper mult

mai mari decât în cazul proceselor tradiționale. Acest lucru nu este însă relevant, deoarece tehnologiile AM sunt deocamdată utilizate pentru fabricarea unor loturi mici de piese personalizate [Mut 16].

Dacă piesele sunt fabricate prin procese de fabricație tradiționale sau imprimare 3D, cel mai important factor din punct de vedere al impactului asupra mediului este modul în care sunt utilizate aceste metode. Oricare dintre aceste metode, dacă s-ar fabrica doar un reper pe săptămână, iar echipamentele ar rămâne nefolosite în restul timpului, ar avea un impact mai mare decât același echipament cu un grad de utilizare maxim [Bou 13, Fal 15].

Pentru procesele tradiționale, consumul de materiale și deșeurile reprezintă cea mai importantă sursă de poluare. Pentru AM, consumul de energie electrică este dominat în producerea impactului asupra mediului, deoarece consumul de energie pe unitatea de produs este foarte ridicat în etapa de fabricație. Cea mai bună modalitate de a reduce impactul utilizării energiei la AM este de a reduce timpul de execuție prin luarea în considerare a unor strategii simple: • orientarea pieselor pentru cea mai rapidă imprimare, • imprimarea pieselor tubulare mai degrabă decât solide și (dacă este posibil) • amplasarea simultană a mai multor piese în spațiul de lucru al imprimantei 3D [Bou 13, Fal 15, Mut 16].

9.2.2 Materiale

Reducerea cantității de materiale imprimate este benefică pentru sustenabilitatea AM. AM folosește diferite materii prime pentru a crea prototipuri, piese sau produse funcționale bazate pe *modele digitale 3D*, imprimând straturi succesive de material, dar o cantitate substanțială de materii prime neutilizate rămân în urma proceselor de fabricație aditivă.

Varietatea materialelor utilizate în AM include: metale, polimeri, materiale ceramice sau compozite sub formă de pulberi, fire și lichide. AM utilizează mai multe tipuri de materiale, inclusiv polimeri (materiale plastice) sub formă de granule sau topiți, care nu sunt ideale pentru mediul înconjurător (chiar dacă pot fi reciclate), indiferent de tipul metodei de fabricație. Uneori, produsele secundare din plastic pot fi refolosite, dar adesea proprietățile materialelor sunt alterate, ceea ce face ca aceste materiale să nu mai corespundă pentru fabricarea altor piese.

Deoarece nu toate materialele plastice sunt la fel de poluante, trebuie consultate scale standardizate de *inflamabilitate, toxicitate și reactivitate* pentru alegerea materialelor adecvate [Bou 13, Mut 16]. Utilizarea materialelor de imprimare biodegradabile sau mai recent a nisipului ar putea fi o soluție. Utilizarea *acidului polilactic* sau a *polilactidei (PLA)*,

Poly) are mai multe beneficii decât *ABS*. *PLA* este un poliester alifatic termoplastic biodegradabil derivat din resurse regenerabile (amidon de porumb, rădăcini de tapioca sau trestie de zahăr), este un polimer bio, mai puțin toxic și care necesită temperaturi mai scăzute în imprimare, influențând astfel pozitiv consumul de energie. Datorită acestor proprietăți, *PLA* este un bio-plastic promițător, devenind un material de imprimare *3D* standard.

Chiar dacă toxicitatea poate să nu fie evidentă imediat, aspectele legate de sănătate și siguranță în *AM* ar trebui să fie luate în considerare. De exemplu, produse secundare gazoase toxice sunt emise atunci când materialul plastic este încălzit la temperaturi ridicate și este topit. Calitatea aerului în interiorul spațiilor de lucru *AM* trebuie analizată pentru a evalua impactul emisiilor gazoase și emisiilor de particule ultrafine (*UFP* – *Ultra fine particle*) în mediul industrial. Imprimantele *3D* emit totuși un nivel scăzut de *UFP*, care ar putea avea efecte negative asupra sănătății umane, inclusiv: *modificări ale funcției pulmonare, inflamarea căilor respiratorii, probleme alergice grave, ateroscleroză accelerată, ritm cardiac modificat* [Mut 16].

Materialele utilizate de sistemele de modelare a formei prin depunere de material topit (*FDM- Fused Deposition Modeling*) par a fi netoxice, dezvoltate dintr-o gamă largă de materiale termoplastice disponibile în comerț. Temperaturile de topire ale acestor materiale nu trebuie însă depășite pentru a evita producerea fumului în timpul procesării. Problemele de sănătate cauzate de fum sau de operațiile post-procesare pot fi: *iritații ale pielii, ochilor și ale tractului respirator*.

9.2.3 Ciclul de viață

Impactul produselor asupra mediului implică toate etapele prin ciclul de viață al produsului, pornind de la exploatarea resurselor naturale până la eliminarea produsului [Fal 15, Mut 16].

Transportul și sfârșitul duratei de viață a echipamentelor de fabricație (atât imprimante *3D*, cât și mașini-unelte) reprezintă o mică parte a impactului ecologic, amortizată printr-o utilizare intensă, dar, dacă doar câteva piese sunt fabricate lunar, impactul raportat la numărul de bucăți procesate poate fi semnificativ.

AM poate modifica ciclul de viață al produsului prin scurtarea fluxurilor de aprovizionare și prin reducerea cantității de combustibil consumată pentru expedierea produsele. Producția tradițională vizează zonele cu costuri scăzute ale forței de muncă,

adesea departe de piețele de desfacere ale produselor. Prin intermediul *AM*, producția poate fi transferată aproape de beneficiarul produsului. Această scurtare a lanțului de aprovizionare reduce costurile de transport, poluarea și congestionarea drumurilor [Kre 13].

9.2.4 Managementul deșeurilor

În prezent, tehnologiile *AM* își găsesc aplicabilitatea în tot mai multe sectoare industriale. Starea mediului înconjurător și creșterea economiei globale de consum ar trebui însă să rămână echilibrate. Impactul *AM* asupra mediului va depinde de modul în care aceste metode de fabricație sunt utilizate [Mut 16].

Comparativ cu abordările convenționale, *AM* poate avea beneficii ecologice deoarece nu necesită scule. Astfel, pot fi create piese/produse complexe și inovatoare fără a fi nevoie de scule, care să impună limitări în ceea ce privește configurația geometrică sau complexitatea formei și care prin uzare să se transforme în deșeuri.

Din păcate, posibilitatea de a imprima rapid o serie de variante ale unui produs poate încuraja un nou tip de poluare prin generarea rapidă a deșeurilor. O problemă critică a *AM* este re folosirea și recondiționarea pieselor/produselor fabricate prin aceste procedee.

În prezent nu există aproape nicio informație despre fluxurile de deșeuri asociate cu procesarea prin *AM* a materialelor polimerice și metalice. Unele dintre aceste fluxuri nu adaugă de fapt nici o valoare piesei prelucrate, cum ar fi:

- reîmprospătarea pulberii utilizate la procesele de sinterizare selectivă cu laser (*Selective Laser Sintering – SLS*),
- reutilizarea materialelor pentru construirea structurii de susținere (suporturi) la *FDM*,
- tratamentul termic post-proces pentru reducerea tensiunilor reziduale sau
- pierderile de energie din cauza sistemelor laser și optice ineficiente.

Echipamentele *FDM* pot avea pierderi neglijabile, dar numai dacă modelul piesei fabricate nu are nevoie de material de suport în timpul imprimării. De regulă, imprimantele *3D* risipesc aproximativ 40% din material, fără a calcula materialele suport [Fal 15, Mut 16]. În funcție de geometrie și orientare, suportul ar putea fi mai mare decât piesa propriu-zisă, iar acest tip de deșeu este dificil de reciclat.

Rezumând, imprimantele 3D nu sunt mari producătoare de deșeuri. Deșeurile rezultate nu sunt neapărat reciclabile, dar nici nu sunt importante cantitativ în comparație cu consumul de energie electrică al AM.

9.3. Potențialul de sustenabilitate al AM

În comparație cu metodele de fabricație tradiționale, există unele beneficii în ceea ce privește potențialul de sustenabilitate în implementarea AM pentru producția de piese/produse în industrie [Kel 14, Bou 13]:

- îmbunătățește eficiența utilizării materiilor prime (sub formă de pulbere, lichid sau fire) prin caracteristica sa menționată ca *net shape technology*. Pe lângă eficiența costurilor și libertatea ridicată în proiectare, AM ar putea deveni o metodă de fabricație eficientă din punct de vedere energetic și ecologic, datorită ratei ridicate de utilizare a materialelor;
- poate fi benefică din perspectivă ecologică și prin faptul că elimină utilizarea sculelor, reduce necesarul de materiale și diversitatea materiilor prime necesare, precum și a deșeurilor rezultate din procesele de fabricație;
- permite dezvoltarea de piese sau produse cu performanțe bune, incluzând greutate redusă, proprietăți mecanice bune și repere proiectate optim prin încorporarea canalelor de curgere a gazului, a canale de încălzire sau de răcire;
- produsele fabricate prin AM pot fi cu 50% mai ușoare decât aceleași produse obținute prin metodele de fabricație tradiționale. Performanța produselor finale va fi îmbunătățită și prin creșterea eficienței energetice, reducerea consumului de combustibil pe durata ciclului lor de viață (de ex. prin reducerea consumului de combustibil în industria aerospațială) și prin reducerea emisiilor de poluanți în etapa de distribuție;
- permite fabricarea de piese personalizate în loturi mici la momentul și în locul potrivite (când sunt solicitate de beneficiar și în apropierea acestuia), reducând costurile de transport în cadrul lanțurilor de aprovizionare și poluarea produsă prin transport. Prin urmare, influențele AM pentru sistemele logistice sunt importante, cu pierderi pentru sectorul transporturilor, dar cu consecințe pozitive pentru mediul înconjurător;
- asigură cicluri mai scurte de dezvoltare ale produsului, ceea ce înseamnă: mai puține zile lucrătoare pe reper prelucrat, ceea ce implică indirect un consum mai mic de energie.

9.4. Metodologia de cercetare propusă

Obiectivul studiului constă în evaluarea comparativă a sustenabilității proceselor de fabricație. Un accent deosebit se pune pe evaluarea și modelarea potențialelor efecte asupra mediului ale *AM*. Până în prezent s-au efectuat, în principal, cercetări privind consumul de energie electrică al mașinilor-unelte, având în vedere *consumul în proces și consumul în așteptare*. Un studiu realist trebuie să ia în considerare toate fluxurile de materiale, energie, fluide pentru o evaluare corectă a impactului.

Studiul propune dezvoltarea unei metode de evaluare predictive, pentru evaluarea impactului asupra mediului în ceea ce privește materialele, fluidele și consumul de energie în timpul etapei de fabricație a unei piese/a unui produs, reciclarea materialelor neutilizate și a pieselor. Factorii de decizie în selectarea acestor elemente, nefiind specialiști în aspecte legate de poluarea mediului, au nevoie de o cuantificare clară a impactului, o simplificare a acestuia prin exprimarea cumulată în scoruri unice *LCA* a efectelor consumului de energie și materiale, emisiilor, toxicității, poluării aerului, poluării apei, deșeurilor solide etc. Metodologia scorului unic normalizează și ponderează diferitele impacturi (de ex: *kg de CO₂ și NO_x, ppm particule, etc.*) în unități generice numite "*puncte*". Mai multe puncte înseamnă mai multe efecte și un impact mai mare asupra mediului.

Trebuie realizată o corelație între aspectele tehnologice ale proceselor de fabricație și problemele ecologice asociate. Studiul realizează o comparație cantitativă cuprinzătoare a proceselor tradiționale (de ex. *SM*) și a tehnologiilor *AM* pentru a determina ce metodă este cea mai sustenabilă.

Pot fi luate în considerare șase elemente majore care afectează durabilitatea proceselor de fabricație. *Costurile de producție, consumul de energie și gestionarea deșeurilor* pot fi mai ușor măsurate, în timp ce ultimele trei: *impactul asupra mediului, sănătatea personalului și siguranța operatorilor* sunt dificil de cuantificat. Având în vedere aspectele prezentate mai sus, pentru dezvoltarea unei metode de evaluare a sustenabilității se parcurg mai multe etape, așa cum se arată în *Figura 9.2*.

A. *Definirea limitelor studiului*. Limitele analizei trebuie să fie clar definite. Unele elemente ar putea fi neglijate, altfel ar trebui luate în considerare toate sistemele secundare și tețiere, utilizate la fabricarea unei piese.

B. *Evaluarea fluxurilor*. Trebuie examinate și cuantificate toate fluxurile procesului de fabricație de la materia primă la piesa finită.

C. Conversia fluxurilor de intrare/ieșire în impact asupra mediului.

Modelul ar putea oferi un cadru pentru evaluarea și compararea sustenabilității pentru diferite procese de fabricație, inclusiv AM în cadrul a 4 etape principale.

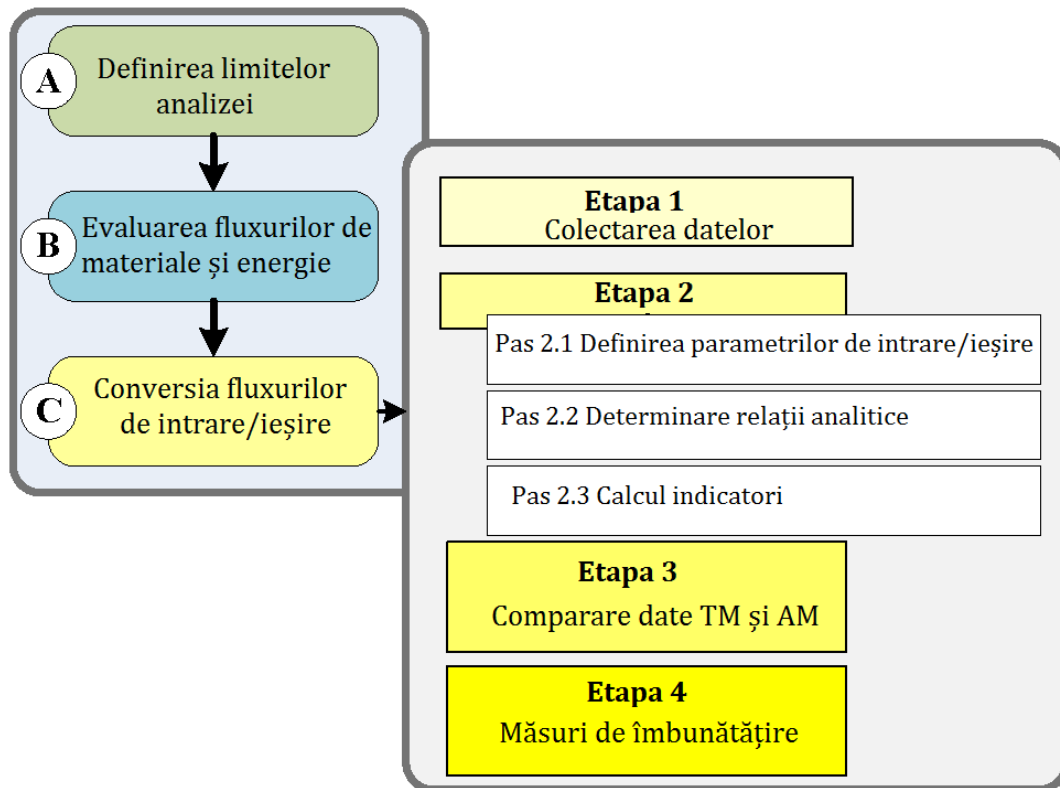


FIGURA 9.2. Etape de studiu.

Etapa 1 implică înțelegerea mecanismului procesului și colectarea datelor relevante.

Etapa 2 constă în:

2.1 *Definirea intrărilor* (utilizarea de materiale, energie și a altor resurse), indicatorii de ieșire de performanță (produs/reper, deșeuri solide, deșeuri lichide, emisii) și valorile lor efective;

2.2 *Determinarea modelelor analitice* utilizate pentru calcularea sustenabilității;

2.3 *Utilizarea datelor specifice procesului de fabricație* și procesarea lor. Sunt luate în considerare date privind inventarul ciclului de viață specific procesului.

Etapa 3 Compararea datelor AM generate în raport cu alte procese de fabricație (de ex. prelucrări mecanice, injecție, turnare, etc.).

Etapa 4 Măsuri de îmbunătățire, pe baza rezultatelor din etapa anterioară.

Modelele analitice de evaluare a sustenabilității fabricației trebuie să acopere aspecte de mediu, economice și sociale și să evalueze intrările și ieșirile unui proces de fabricație la

o stație de lucru. Evaluarea stației de lucru se concentrează pe o singură mașină care efectuează una sau mai multe operații sau un echipament auxiliar care furnizează o funcție specifică sau realizează o anumită activitate cu anumite scule și materiale în anumite secvențe de procesare.

LCA preliminară a *AM*, incluzând consumul de energie, consumul de materiale pentru fabricarea pieselor, pierderile de materiale, emisiile, transportul și eliminarea la sfârșitul duratei de viață a mașinilor și a pieselor, va fi efectuată și comparată cu procesele de fabricație convenționale.

9.5. Studiu de caz

În perspectiva dezvoltării modelului analitic de analiză ecologică, descris anterior, se pleacă de la un studiu de caz, care analizează impactul ecologic a două echipamente de fabricație aditivă (*SLS Sinter Station 2000* și *FDM 1650*) și al unei mașini de frezat CNC (*HAAS-VF2*), luând în considerare numai consumul de materiale și de energie. Acesta constituie primul pas în conceperea metodologiei de elaborare a *LCA* pentru a compara diferite metode de fabricație. Unele elemente ale sistemelor de fabricație vor fi neglijate, iar pentru o evaluare cuprinzătoare a performanței lor ecologice se face prin împărțirea fiecărui proces în elemente individuale ca: pregătirea/utilizarea materialelor, consumul de energie, toxicitatea materialelor și eliminarea deșeurilor. Factorii luați în considerare în ceea ce privește performanța de mediu a proceselor de fabricație sunt rezumați în *Tabelul 9.2*.

TABELUL 9.2. Factori de analiză.

Tehnologie	SLS	FDM	Așchiere (Frezare)
Echipament	<i>Sinter Station DTM-2000</i>	<i>FDM-1650</i>	<i>HAAS-VF 2</i>
Material	Pulbere de poliamidă, ABS, titan, elastomeri, policarbonați	ABS, PLA, PVA, PC, HDPE, nylon, ceară	metale, material plastice (ABS), lemn
Energie	Laser	energie termică	energie mecanică
Operație	nu necesită scule, prelucrare prin depunere succesivă de straturi	nu necesită scule, prelucrare într-o singură fază	necesită scule, prelucrare în mai multe faze
Deșeuri solide	material neutilizate	suporturi	așchii, scule uzate
Deșeuri lichide	Nu	Nu	lichide de răcire, lubrificați
Emisii	Nu	Fum	particule praf/metalice, fum, vapori lichid așchiere
Eliminare	incinerare, depozitare, reciclare	incinerare, depozitare, reciclare	depozitare, reciclare

Consumul total de energie al mașinilor-unelte CNC este dificil de cuantificat și de atribuit diferitelor piese, fabricate în diferite condiții de producție. În cazul echipamentelor CNC, aproximativ 80-85% din energia utilizată pentru prelucrare este constantă, indiferent dacă pe mașina respectivă se realizează prelucrări sau este în așteptare. Astfel, consumul de energie pe piesă este invers proporțional cu rata de îndepărtare a materialului. Mașinile CNC sunt dotate de regulă cu echipamente auxiliare prin a căror utilizare se consumă o cantitate de energie care poate depăși energia de așchiere [Dah 04, Mun 95].

Gradul de utilizare al mașinilor este un factor important în impactul produs asupra mediului. Pentru a obține impacturi reduse, nu este suficient doar ca mașina să prelucreze rapid un reper, ci este necesar și ca aceasta să fie în cea mai mare parte a timpului ocupată cu prelucrarea pieselor. Timpul total de procesare constă în timpul de repaus (*modul stand-by*), timpul de mers în gol (*modul parțial*) și timpul efectiv prelucrare (*modul complet*). În consecință, consumul total de energie al mașinilor-unelte constă din mai multe tipuri de consum: *consumul în stare inactivă (52%), energia de așchiere (7-10% în funcție de condițiile de așchiere), rotația în gol a arborelui principal (20%), deplasarea săniilor/meselor (1%), pompa recirculare a lichidului de așchiere (20%), control numeric, aer comprimat sau lumină* [Dah 04].

Pentru ambele echipamente *AM, Sinter Station 2000 și FDM 1650*, consumul de energie depinde în mod direct de configurația geometrică pieselor, calitatea suprafețelor și timpul de fabricație, care trebuie minimizat pentru fiecare caz. Au fost determinate ratele consumului de energie (*ECR*) pentru fiecare sistem. Pentru echipamentul *SLS*, laser-ul, sistemele de încălzire și răcire sunt cele mai mari surse consumatoare de energie. Energia procesului este împărțită în: energie care nu se utilizează direct pentru procesarea materialului (mișcarea cu rotelor - 15%, mișcarea pistonului motorului pas cu pas - 25% și încălzirea inițială - 37%) și energia de procesare a laserului (16-20%) [Lou 99]. Consumul specific de energie este dificil de estimat din cauza variației densității și a înălțimii structurii construite. În acest studiu de caz, a fost luată în considerare o densitate de imprimare de 100%. Pentru calculul *ECR*, au fost luate în considerare numai principalele procese pentru cele trei metode de fabricare, considerându-se că procesarea materialului se desfășoară în mod continuu.

Indicatorul de evaluare a sustenabilității este calculat pe baza ecuațiilor (9.1) – (9.6). Consumul de energie electrică (*kWh*), consumul de material (*kg*) și consumul de lichid (*l*) sunt convertite în *Pt*, folosind factori de caracterizare (f_{ch}) (<http://www.ecoinvent.org>) în

conformitate cu bazele de date *EcoInvent* și *EcoIndicator 99* (<http://www.ecoinvent.org>, <http://www.pre-sustainability.com>).

$$SI = C_E + C_M + C_F + C_W \quad (9.1)$$

unde SI - indicator de sustenabilitate

CE - contribuția consumului de energie electrică

CM - contribuția consumului de material

CF - contribuția utilizării de fluide

Cw – contribuția deșeurilor

$$C_E = f_{ch-E} \cdot ECR \quad (9.2)$$

$$ECR = \frac{P}{PP} = \frac{P}{q_{mat} + \rho_{mat}} \quad (9.3)$$

unde f_{ch-E} - factorul de caracterizare al energiei electrice

ECR - rata consumului de energie (kWh/kg sau kWh/mm³)

P - energia electrică consumată în timpul procesului de fabricație (kW)

PP - productivitatea procesului (kg material (adăugat sau îndepărtat)/h)

q_{mat} - cantitatea de material adăugată sau eliminată pe oră (cm³/h)

ρ_{mat} - densitatea materialului (kg/cm³)

Conceptul *ECR* este utilizat pentru a facilita compararea proceselor de fabricație, fiind definit ca energia consumată în procesarea unității de material. Pentru procesele substructive, *ERC* este exprimată în *Joule* (sau *kWh*) pe unitatea de volum de material procesat (*J/cm³*, *kWh/cm³*). Pentru procesele *SLS* și *FDM*, *ECR* este de obicei exprimată în *Joule* (sau *kWh*) pe unitatea de masă a materialului adăugat (*kWh/kg*), deoarece densitatea materialului depinde de parametrii procesului.

$$C_M = [e_n + k \cdot (1 - e_n)] \cdot d_p \cdot t_{man} \cdot f_{ch-M} \quad (9.4)$$

$$C_M = (V_{wp} - V_p) \cdot f_{ch-M} \quad (9.5)$$

unde f_{ch-M} – factorul de caracterizare al materialului

e_n – eficiența duzei

k – factor de ponderare pentru a cuantifica impactul pulberii pierdute în comparație cu pulberea topită

d_p – rata de depunere sau îndepărtare a materialului (kg material/h)

t_{man} – timpul de fabricație (h)

ρ_{mat} – densitatea materialului (kg/cm³)

V_{wp} – volumul materialului piesei de prelucrat

V_p – volumul piesei prelucrate

$$C_F = (d_c + d_f) \cdot t_{man} \cdot f_{ch-G} + d_{co} \cdot t_{man} \cdot f_{ch-co} \quad (9.6)$$

unde d_c – fluxul de gaz

d_f – fluxul de gaz de protecție

d_{co} – fluxul de agent de răcire

f_{ch-G} – factor de caracterizare a gazului

f_{ch-co} – factor de caracterizare al agentului de răcire

Analiza *LCA* este realizată utilizând metoda *EcoIndicator 99* și soft-ul *SimaPro 7.1*. Această metodă ia în considerare următoarele categorii de impact: *substanțe cancerigene, substanțe organice volatile, substanțe anorganice volatile, schimbări climatice, radiații, stratul de ozon, ecotoxicitate, acidificare/eutrofizare, utilizarea terenurilor și combustibili fosili*.

Impactul asupra mediului poate afecta *sănătatea umană și ecosistemele* sau se poate manifesta prin *diminuarea resurselor naturale*. Pentru a lua deciziile corespunzătoare legate de procesele de fabricație, aceste aspecte sunt evaluate și cuantificate sub forma unor date concrete "*kg de deșeu*" sau "*kWh consum de energie*", normalizate și ponderate pentru calculul scorurilor unice (<http://www.ecoinvent.org>).

Scorurile sunt exprimate în *puncte Eco-Indicator (Pt)*, care permit compararea impactului cumulat asupra mediului datorat consumurilor de materiale, fluide și energie electrică, care nu au aceeași unitate. O unitate *Pt* reprezintă a 1000-a parte din valoarea admisibilă a poluării anuale pentru unui cetățean european (<http://www.ecoinvent.org>). Valorile sunt mai întâi normalizate în funcție de anii de viață pierduți ajustați pentru persoanele cu dizabilități, pentru pierderea anuală probabilă a speciilor din cauza poluării mediului și pentru pierderea disponibilității resurselor, măsurate în costul financiar al resurselor (<http://www.pre-sustainability.com>).

9.6. Rezultate și analize

Din cauza limitărilor în ceea ce privește materialele care pot fi procesate prin *AM*, în acest studiu nu pot fi luate în considerare aceleași materiale pentru toate procesele considerate în studiul de caz, dar pentru a face o comparație realistă, sunt considerate materiale similare: *ABS P400* pentru *FDM* și frezare și polimer *PA12* pentru *SLS*.

Tabelul 2 indică ECR, calculate pentru fiecare metodă de fabricație. Parametrii de procesare considerați sunt: V - viteza de scanare (mm/sec); W - lățimea (mm); T - grosimea stratului depus (mm); ρ - densitatea materialului (kg/mm³); P - puterea (kW); k - coeficient de randament al procesului (0.6-0.9), PP - productivitatea procesului = $V \cdot W \cdot T \cdot \rho \cdot 3600 \cdot k$ (kg/h). Unele informații utilizate au fost extrase din baze de date specifice și literatura de specialitate.

Performanțele de mediu se calculează pentru 1 kg de material procesat, considerând că se prelucrează o singură piesă pe zi și că echipamentele funcționează în gol în restul timpului. Următoarele ipoteze simplificatoare au fost luate în considerare: aşchierea ABS se face fără răcire/lubrifiere (prelucrare uscată), un consum mediu de material pentru suport de până la 25% din materialul piesei pentru FDM, în cazul FDM și SLS se printează piese cu un grad de umplere 100%. Au fost neglijate postprocesarea, eliminarea pieselor și deșeurile.

Performanțele de mediu ale proceselor, în condițiile și ipotezele menționate anterior, sunt prezentate în Tabelul 9.3 și în Figurile 9.3-9.5.

TABELUL 9.3. Calculul ECR.

	Sinterstation 2000	FDM 1650	HAAS-VF2
Material	Polimer PA12 (100% solid part)	ABS P400 (100% solid part)	ABS P400
Material suport		Terpolimer (mix acid, stiren, butil acrilat)	
Densitate material, ρ (g/cm ³)	polimer pulbere	1.04	1.04
Viteză de scanare, v (mm/sec)	3000	2	
Lățime, W (mm)	0.4	1.4	
Grosime strat, T (mm)	0.15	0.4	
Greutate specifică	1.08	1.05	
K	0.6	0.9	0.9
P (kW)	16.8	1.32	22.4
PP (kg/h)	0.42	0.004	în funcție de parametrii de proces
ECR	40 (kWh/kg)	346.5 (kWh/kg)	$13.9 \cdot 10^{-6}$ (kWh/mm ³)
El pentru energie (kW/h)	0.57	0.57	0.57

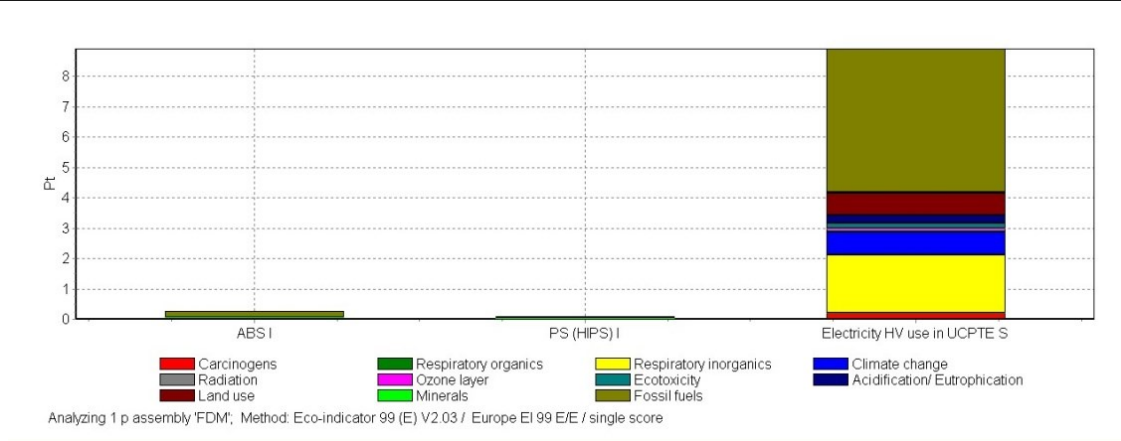


FIGURA 9.3. Indicator de sustenabilitate pentru FDM.

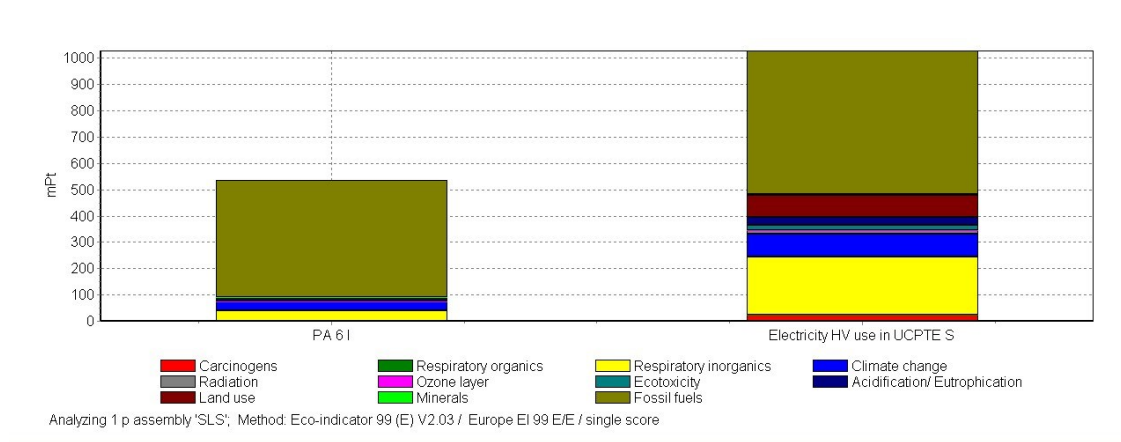


FIGURA 9.4. Indicator de sustenabilitate pentru SLS.

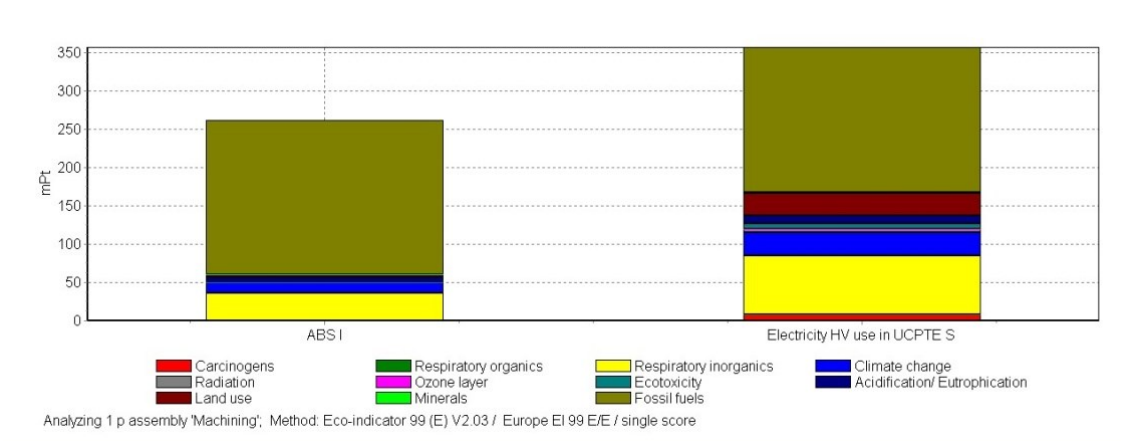


FIGURA 9.5. Indicator de sustenabilitate pentru frezare.

Diagramele din figurile prezentate mai sus arată impacturile individuale pentru procesele FDM, SLS și procesul de frezare. Trebuie remarcat faptul că din cele 11 tipuri de categorii de impact considerate în cazul metodei EcoIndicator 99, în toate cazurile 4 sunt dominante: combustibilii fosili, substanțele anorganice volatile, utilizarea terenurilor și schimbările climatice. La o rată de utilizare maximă, fără a lua în considerare deșeurile (așchii și lichide de așchiere), prelucrarea prin frezare a obținut rezultate bune atât din

punct de vedere al consumului de materiale (260 mPt), cât al consumul de energie (350 mPt), comparativ cu SLS (550 mPt / 1020 mPt) și FDM (0.2 Pt /9Pt) .

Comparația indicatorilor de sustenabilitate ai celor 3 metode de fabricație luate în considerare este prezentată în *Figura 9.6*. Ipoteza că procesele de AM sunt, în general, mai sustenabile decât metodele substructive de fabricație, deoarece nu se pierd atât de multe materiale, nu este confirmată. Consumul mare de energie electrică folosită la procesele AM poate depăși poluarea evitată datorită impactului mai redus prin economia de materiale. Unele imprimante 3D continuă să aibă un impact semnificativ și din cauza materialelor producând circa 40% deșeuri și prin utilizarea de materiale cu toxicitate ridicată.

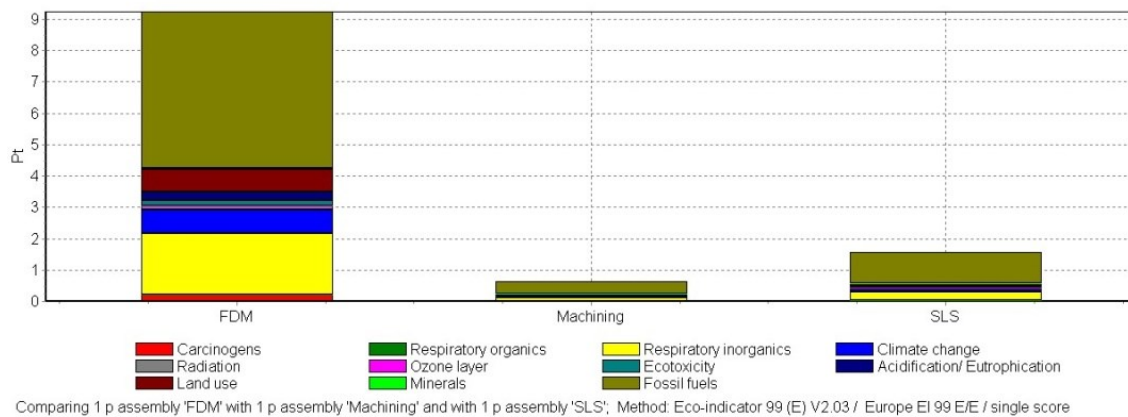


FIGURA. 9.6. Compararea indicatorilor de sustenabilitate pe subcategorii de impact.

Acest studiu de caz indică sustenabilitatea relativă a metodelor de fabricație aditivă și substractivă. După cum arată *Figura 9.7*, impactul metodei FDM pare să fie de 10 ori mai mare decât impactul *frezării* și de 5 ori mai mic decât al SLS. Aceste rezultate pot fi validate doar în cadrul scenariului considerat, fiind influențate de parametrii de proces propuși și de ipotezele simplificatoare descrise.

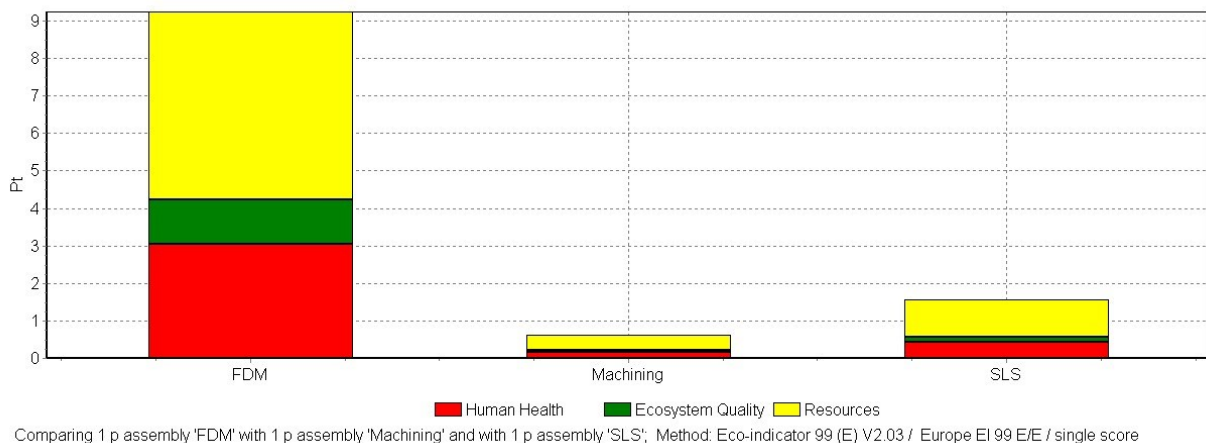


FIGURA. 9.7. Compararea indicatorilor de sustenabilitate pe categorii principale de impact.

În această etapă a studiului nu poate afirma categoric că procesele *AM* sunt mai sustenabile decât prelucrarea mecanică sau invers. Pentru fiecare proces, investigațiile trebuie continuate, deoarece rezultatele pot varia considerabil în funcție de: strategia de fabricație, scenariul de utilizare al mașinilor, timpul de construcție legat de volumul și complexitatea pieselor, orientarea pieselor în spațiul de lucru al mașinii etc.

9.7. Concluzii

Este extrem de necesară o evaluare globală individuală a fiecărei metode de fabricație pentru a realiza o comparație realistă a proceselor. Cercetările prezentate în acest capitol au condus la următoarele concluzii. *AM* are potențialul de a reduce costurile și de a fi mai eficient din punct de vedere energetic decât procesele convenționale. O problemă principală pentru analiza eficienței energetice a *AM* este faptul că echipamentele pentru imprimare *3D* diferă în ceea ce privește consumul de energie, iar consumul de energie depinde de mai multe variabile, inclusiv materialele, gradul de încărcare al mașinii și modelele de tipărire (pattern-urile) utilizate.

Sustenabilitatea *AM* vs. metodele tradiționale (*SM*) este influențată considerabil de rata de utilizare a mașinilor. Un grad mare de ocupare/utilizare efectivă a echipamentelor și consumul de energie de mers în gol amortizează impactul fiecărei mașini. Pentru echipamentele *AM* și *CNC*, consumul de energie electrică are un impact dominant. Utilizarea energiei electrice este în mare măsură dependentă de durata de utilizare a echipamentelor (durata de procesare a pieselor). Ambele tipuri de procese generează o anumită cantitate de deșuri materiale (din materialul original îndepărtat postprocesare, din materialul suport, din pulberea neutilizată la *SLS*), dar pentru *CNC* (la utilizare maximă) devine predominant efectul deșeurilor de materiale și lichide de așchiere.

Impactul și perspectivele studiului sunt rezumate în continuare. Implementarea proceselor *AM* poate întâmpina dificultăți sau imposibilitatea de a compara performanța acestora cu cele ale proceselor tradiționale de fabricație. Deciziile pentru o selecție adecvată a procesului de fabricație și a materialelor pentru aplicații specifice, necesită o cunoaștere și evaluare profunde. Astfel, producătorii tradiționali și deținătorii de echipamente *AM* vor putea lua o decizie în cunoștință de cauză cu privire la tipul de tehnologie adecvată în fiecare situație cu care se confruntă. În plus, producătorii de imprimante *3D* își pot îmbunătăți competitivitatea și rentabilitatea, luând în considerare aspectele ecologice în timpul etapei de fabricație a unui produs.

Elaborarea completă unui instrument complex de evaluare, bazat pe date concrete privind sustenabilitatea, începută cu acest studiu de caz, ar trebui să abordeze nevoile tuturor părților interesate și să faciliteze dezvoltarea și inovarea.

BIBLIOGRAFIE

- [Aam 95] American Automobile Manufacturers Association, *Industrial Metalworking Environment: Assessment and Control*, Dearborn, USA, November 1995.
- [Agu 13] Agustina, B., Bernal, C., Camacho, A.M., Rubio, E.M. (2013). *Experimental Analysis of the Cutting Forces Obtained in Dry Turning Processes of UNS A97075 Aluminum Alloys*. Procedia Engineering, 2013, 694-699. Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2013.
- [Ahm 10] Ahmad-Yazid, A.; Taha, Z.; Almanar, I.P., *A Review of Cryogenic Cooling in High Speed Machining (HSM) of Mold and Die Steels*, Scientific Research and Essays 5(5) (2010) 412-427.
- [Alk 06] Alkaner, S.; Zhou, P. A., *Comparative study on life cycle analysis of molten carbon fuel cell and diesel engines for marine application*, Journal of Power Sources 158 (2006) 188-199.
- [Ame 89] American M. 14th *Inventory of Metalworking Equipment*. American Machinist 133(11) (1989) 91-110.
- [Aro 95] Aronson, R.B., *Why Dry Machining?*, Manufacturing Engineering 114(1) (1995) 33-36.
- [Ast 06] Astakhov V.P. *Tribology of metal cutting*, Elsevier Ltd., Great Britain, 2006.
- [Ast 08] Astakhov, V.P. *Ecological Machining: Near-dry Machining*. Paulo Davim, J., (Ed.), *Machining: Fundamentals and Recent Advances*, Springer-Verlag London Limited, 2008.
- [Ast 12] Astakhov, V.P. *Environmentally friendly near-dry machining of metals*. In *Metalworking Fluids (MWFs) for Cutting and Grinding*, Woodhead Publishing, 2012, 413 pp.
- [Att 06] Attanasio, A., Gelfi, M., Giardini, C., Remino, C., *Minimal quantity lubrication in turning: Effect on tool wear*. Wear 260(3) (2006) 333-338.
- [Bad 07] Badida, M., Vargova, J. *Life cycle assessment (LCA) as a tool for environmental decision-making within the industry*, Annals of MTEM for 2007 and Proceedings of the 8th International Conference Modern Technologies in Manufacturing, Cluj-Napoca, 8 (2007) 473-475.
- [Bae 13] Baechler D., DeVuono J., Pearce, J.M. *Rapid Prototyping J* 19, 118-125 (2013)
- [Bal 05] Baldwin, J.S., Allen, P.M., Winder, B., Keith Ridgway, K. *Modelling manufacturing evolution: thoughts on sustainable industrial development*, Journal of Cleaner Production 13(9) (2005) 887-902.
- [Bar 96] Baradie, M.A.E., *Cutting Fluids. Part II. Recycling and clean machining*, Journal of Materials Processing Technology 56 (1996) 798-806.
- [Bau 13] Baumers, M., Tuck, C., Wildman, R., Ashcroft, I., Rosamond, E., Hague, R. *Transparency Built-In*. J Ind Ecol 17, 418-431 (2013)
- [Bec 94] Becket, G.J.P. *Corrosion: Causes and Cures from Metalworking Fluids*, Ed. Jerry P. Byers, Marcel Dekker, Inc., New York, New York, 1994.
- [Ber 15] Berce, P. et al. *Aplicațiile medicale ale tehnologiilor de fabricație prin adăugare de material / Medical applications of Additive Manufacturing technologies* (Editura Academiei Române, București, 2015)
- [Ber 99] Bert, P.E. *Environmental Issues in Machining, Machining Technology*, Machining Technology Association of the Society of Manufacturing Engineers 10(4) (1999) 123-128.
- [Bha 99] Bhamra, T.A., Evans, S., McAlloone, T.C., Simon, M., Poole, S., Sweatman, A. *Integrating environmental decisions into the product development process: Part 1. The early stages*. Proceedings of the IEEE First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (1999) 329-334.

- [Bor 14] Bordin, A., Bruschi, S., Ghiotti, A. *The effect of cutting speed and feed rate on the surface integrity in dry turning of CoCrMo alloy*. Procedia CIRP 2014, 13, 219-224.
- [Bou 13] Le Bourhis, F., Kerbrat, O., Hascoet, J., Mognol, P. *Int J Adv Manuf Tech* 69(2013), 1927–1939.
- [Bou 14] Le Bourhis, F., Kerbrat, O., Dembinski, L., Hascoet, J., Mognol, P. *Procedia CIRP* 15(2014), 26–31.
- [Bra 06] Bras, B., Isaacs, J.A., Overcash, M. *Environmentally benign manufacturing – A workshop report*, *Journal of Cleaner Production* 14(5) (2006) 527-535.
- [Bre 05] Brent, A.C., Visser, J. K. *An environmental performance resource impact indicator for life cycle management in the manufacturing industry*, *Journal of Cleaner Production* 13(6) (2005) 557-565.
- [Bri 96] Brinksmeier, E., Walter, A. *Einsatzbeispiele für Minimalmengen Kühlschmierung und Trockenbearbeitung*, *Proceedings of the 10th International Colloquium*, Technische Akademie Esslingen (1996) 23–43.
- [Bri 97] Brinksmeier, E., Brockhoff, T. *Minimum quantity lubrication in grinding*. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI/1997. Technical Paper.
- [Bri 98] Brite EuRam III, BE-8210, *Development of New Machining processes for automotive applications*, 1994-1998.
- [Bri 99] Brinksmeier, E., Heinzl, C., Wittmann, M. *Friction cooling and lubrication in grinding*, *CIRP Annals, Manufacturing Technology* 48(2) (1999) 581-598.
- [Bro 98] Brockhoff, T., Walter, A. *Fluid minimization in cutting and grinding*, *Abrasives: Journal of Abrasive Engineering Society*, Oct-Nov 1998, Butler, Pa., 1998.
- [Bru 98] Brunner, G. *Schleifen mit mikrokristallinem Aluminiumoxid*. Dr.-Ing. Diss., Universität Hannover, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2, Nr. 464, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1998.
- [Bym 93] Byrne, G., Scholta, E. *Environmentally clean machining processes - a strategic approach*, *Annals of CIRP* 42(1) (1993) 471-474.
- [Byr 03] Byrne, G., Dornfeld, D., Denkena, B. *Advanced Cutting Technology*, *Annals of the CIRP* 52(2) (2003) 483-507.
- [Cal 15] Çalışkan, H., Küçükköse, M. *The effect of a CN/TiAlN coating on tool wear, cutting force, surface finish and chip morphology in face milling of Ti6Al4V superalloy*. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 50(2015), 304-312.
- [Cas 98] Caspersen, N.I., Sorensen, A. *Improvements of products by means of lifecycle assessment: high pressure cleaners*. *Journal of Cleaner Production* 6(3-4) (1998), 371-80.
- [Cha 93] Chapman, P.F., Roberts, F. *Metal Resources and Energy*, Butterworth and Co., Ltd, Thetford, Norfolk, England, 1993.
- [Chi 94] Childers, J.C. *The Chemistry of Metalworking Fluids*, *Metalworking Fluids*, Ed. Jerry P. Byers, Marcel Dekker, Inc., New York, New York; 1994.
- [Cla 08] Clarens, A.F., Zimmerman, J.B., Keoleian, G.A., Hayes, K.F., Skerlos, S.J. *Comparison of life cycle emissions and energy consumption for environmentally adapted metalworking fluid systems*. *Environmental Science & Technology* 42 (2008), 8534–8540.
- [Com 92] Commission of the European Communities (Brussels), *Towards Sustainability*, COM(92) 23 final vol. 2, 1992.
- [Cou 09] Courbon, C., Kramar, D., Krajnik, P., Pusavec, K., Rech, J., Kopac, J. *Investigation of machining performance in high-pressure jet assisted turning of Inconel718: An experimental study*, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 49 (2009), 1114–1125.

- [Dab 09] Dabade, U.A., Joshi, S.S. *Analysis of chip formation mechanism in machining of Al/SiCp metal matrix composites*. Journal of Materials Processing Technology 2009, 209(10), 4704-4710.
- [Dah 04] Dahmus, J.B., Gutowski, T.G. ASME International mechanical engineering congress and RD&D Expo (2004)
- [Dah 04a] Dahmal, P., Escursell, M. *High pressure jet-assisted cooling: a new possibility for near net shape turning of decarburized steel*, International Journal of Machine-tools and Manufacture 44(1) (2004), 109-115.
- [Dah 04b] Dahmus, I.B., Gutowski, T.G., *An Environmental analysis of machining*, Proceedings of IMECE, ASME International Mechanical Engineering Congress and RD&D Expo, November 13-19, 12 (2004), 1-10.
- [Dal 04] Dalquist, S., Gutowski, T. *Life cycle analysis of conventional manufacturing techniques: Sand Casting*. Proceedings of IMECE 2004, USA, (2004) 631-641.
- [Dam 95] D'Amico E. *Alternatives Finding Way in a Stormy Market*. Chemical Week 157(17) (1995) 53-60.
- [Dar 00] Darwish, S.M. *The impact of the tool material and the cutting parameters on surface roughness of supermet 718 nickel super alloy*. Journal of Materials Processing Technologies 97 (2000) 10-18.
- [Dav 14] Davoodi, B., Hosseini, T., Tazehkandi, A. *Experimental investigation and optimization of cutting parameters in dry and wet machining of aluminum alloy 5083 in order to remove cutting fluid*. Journal of Cleaner Production 2014, 68 (1), 234-242.
- [Dav 15] Davoudinejad, A., Chiappini, E., Tirelli, S., Annoni, M., Strano M. *Finite Element Simulation and Validation of Chip Formation and Cutting Forces in Dry and Cryogenic Cutting of Ti-6Al-4V*. Procedia Manufacturing. Volume 1 (2015), 728-739.
- [Deb 09] De Benedetto, L., Klemeš, J. *The Environmental Performance Strategy Map: an integrated LCA approach to support the strategic decision-making process*, Journal of Cleaner Production 17(10) (2009) 900-906.
- [Del 04] Del Alamo, J., Fernandez, J.C., Hernandez, M., Nunez, Y., Irusta, R., Del Valle, J.L. *Environmental optimization of a hydro-molding process*. Journal of Cleaner Production 12 (2004) 153-157.
- [Den 14] Denkena, B., Stiffel, J.-H., Hasselberg, E., Breidenstein, B. *Chip formation in monocrystalline iron-aluminum*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 2014, 7(2), 71-82.
- [Der 97] D'errico, G.E., *A systems theory approach to modeling of cutting temperature with experimental identification*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 37(2) (1997), 149-158.
- [Dev 11] Devillez, A., Coz, G.L., Dominiak, S., Dudzinski, D. *Dry machining of Inconel 718, workpiece surface integrity*. Journal of Materials Processing Technology 2011, 211, 1590-1598.
- [Dew 94] De Winter, A., Kols, J.A.G. *A methodic approach to the environmental effects of manufacturing*, CIRP 2 - Seminar on Life Cycle Engineering RECY'94, Erlangen, October 1994.
- [Dha 05] Dhar, N.R., Islam, S. *Improvement in machinability characteristics and working environment by minimum quantity lubrication*, CASR Project, BUET, 2005.
- [Dha 07] Dhar, N.R., Ahmed, M.T., Islam, S. *An experimental investigation on effect of minimum quantity lubrication in machining AISI 1040 steel*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 47 (2007) 748-753.
- [Din 02] Diniz, A.E., Micaroni, R. *Cutting conditions for finish tuning process aiming: the use of dry cutting*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 42 (2002) 899-904.
- [Dix 12] Dixit, U.S., Sarma, D.K., Davim, J.P. *Machining with minimal cutting fluid*. In: Environmentally

- Friendly Machining. Springer, United States of America, 2012; 9 pp.
- [Dom 08] Domingo, R., Alvarez, R., Sebastian, M.A. *An Empirical Relationship between Cutting forces and Length in Dry Drilling in Aluminum Alloys*. Proceedings of 19th DAAAM International Symposium- Intelligent Manufacturing & Automation,(2008).
- [Dun 97] Dunlap, C., *Should you Try Dry?* Cutting Tool Engineering 49(1) (1997), 22-33.
- [Ehr 97] Ehrenfeld, J.R., *Industrial ecology: A framework for product and process design*, Journal of Cleaner Production 5 (1-2) (1997), 87-95.
- [Eki 15] Ekinovic, S., Prcanovic, H., Begovic, E. *Investigation of Influence of MQL Machining Parameters on Cutting Forces During MQL Turning of Carbon Steel St52-3*. Procedia Engineering, Volume 132 (2015), 608-614.
- [Ekv 02] Ekvall, T. *Cleaner production tools: LCA and beyond*. Journal of Cleaner Production 10(5) (2002), 403-406.
- [Elh 01] El-Hossainy, T.M. *Tool Wear Monitoring under Dry and Wet Machining*, Materials and Manufacturing Processes 16(2) (2001), 165-176.
- [Elt 08] El-Tamimi, A. M., El-Hossainy, T. M. *Investigating the Tool Life, Cutting Force Components, and Surface Roughness of AISI 302 Stainless Steel Materials under Oblique Machining*, Materials and Manufacturing Processes 23(4) (2008), 427-438.
- [Epa 95] Environmental Protection Agency (EPA). *Profile of the Iron and Steel Industry*, EPA Office of Compliance Sector Notebook Project, EPA/310-R-95-005, Washington D, 1995.
- [Ert 03] Ertekin, Y.M., Kwon Y., Tseng. L. *Identification of common sensory features for the control of CNC milling operations under varying cutting conditions*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 43(9) (2003), 897-904.
- [Fal 15] Faludi, J., Bayley, C., Bhogal, S., Iribarne, M. Rapid Prototyping J 21, 14–33 (2015).
- [Fan 05a] Fang, F.Z., Lee, L.C., Liu, X.D. *Mean flank temperature measurement in high speed dry cutting of magnesium alloy*. Journal of Materials Processing Technology 2005, 167 (1), 119-123.
- [Fan 05b] Fang, G., Zeng, P. *Three-dimensional thermo-elastic-plastic coupled FEM simulations for metal oblique cutting processes*, Journal of Material Prococessing Technologies 168(1) (2005), 42-48.
- [Fav 78] Faville,W.A., Voitik, R.M. *The Falex tapping torque test machine*, Lubrication Engineering 34 (4) (1978), 193-197.
- [Fer 09] Fernández Pariente, I., Guagliano, M. *Influence of Shot Penning Process on Contact Fatigue Behavior of Gears*, Materials and Manufacturing Processes 24(12) (2009), 1436-1441.
- [Fik 96] Fiksel, J. *Design for Environment*, McGraw Hill; 1996.
- [Fra 03] **Frățilă, D.** *Cercetări privind tehnologiile de prelucrare ecologice în construcția de mașini*. Teză de doctorat , Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, 226 pp., 2003.
- [Fra 09a] **Frățilă, D.** *Evaluation of near-dry machining effects on gear milling process efficiency*, Journal of Cleaner Production 17(2009), 839-845.
- [Fra 09b] **Frățilă, D.** *Minimization of metal working fluid ecological impact by NDM*, Environmental Engineering and Management Journal 8(2) (2009), 335-339.
- [Fra 10a] **Frățilă D.** *Macro-Level Environmental Comparison Of Near-Dry Machining And Flood Machining*. Journal of Cleaner Production 18(10-11) (2010), 1031-1039.
- [Fra 10b] **Frățilă, D.,** Radu, A. *Modeling and comparing of steady thermal state at gear milling by conventional and environment-friendly cooling method*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 47(9-12) (2010), 1003-1012.

- [Fra 10c] **Frățiță, D.**, Bâlc, N., Sabou A. *Macro Level Analyse of Ecological Impact of Mechanical Cutting Processes*, Academic Journal of Manufacturing Engineering 8(3) (2010) 37-42. ISSN 1583-7904.
- [Fra 11a] **Frățiță, D.** *Assessment of Cutting Area Temperature to the Face Milling Using Several Cooling Method*. Acta Mecanica Slovaca., 15(1) (2011), 50-54. ISSN: 1335-2393.
- [Fra 11b] **Frățiță, D.**, Caizar, C. *Application of Taguchi method to selection of optimal lubrication and cutting conditions in face milling of AlMg₃*, Journal of Cleaner Production, 19(2011), 640-645.
- [Fra 12a] **Frățiță D.** Caizar C. *Assessment of Cooling Effect and Surface Quality to Face Milling of AlMg₃ using Several Cooling Lubrication Methods*. Journal of Materials and Manufacturing Processes 27/3(2012), pp. 291-296, ISSN 1042-6914(Print), 1532-2475(Online).
- [Fra 12b] **Frățiță D.**, Caizar C. *Investigation of the Influence of Process Parameters and Cooling Method on Surface Quality of AISI-1045 During Turning*. Journal of Materials and Manufacturing Processes 27/10(2012), pp.1123-1128, ISSN 1042-6914(Print).
- [Fra 13a] **Frățiță D.** *Research of Environment-Friendly Techniques Influence on the Accuracy of Gear Processing in the Context of Sustainable Machining*. Proceedings of Romanian Academy, Series A. Volume 14, Number 1/2013, pp.56-63, ISSN 1454-9069.
- [Fra 13b] **Frățiță D.** *Sustainable Manufacturing through Environmentally-friendly Machining*. Chapter in book: *Green Manufacturing Processes and Systems, Materials Forming, Machining and Tribology*, DOI: 10.1007/978-3-642-33792-5_1, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013, pp 1-21, J. P. Davim (ed.).
- [Fra 14] **Frățiță D.** *Environment-friendly manufacturing processes in the context of transition to sustainable production*. Chapter in book: *Comprehensive Materials Processing. Volume 8: Health, Safety and Environmental issues*. Volume Editor: Professor Nabil Bassim, Editor in Chief - Saleem Hashmi, Development editor - Es Collins (Elsevier), Pages 163-175, ISBN: 978-0-08-096532-1.
- [Fra 16] **Frățiță D.** *Numerical and Experimental Approach of Cutting Temperatures to Green Turning of 42CrMo4 Steel*. Journal of Materials and Manufacturing Processes 31/5 (2016), pp.657-666, ISSN 1042-6914.
- [Fra 17] **Frățiță D.**, Rotaru H. *Additive Manufacturing – a sustainable manufacturing route*. MATEC Web of Conference, Volume 94 (2017). The 4th International Conference on Computing and Solutions in Manufacturing Engineering 2016 – CoSME'16, 3-4 november 2016, Braşov.
- [Fra 18] **Frățiță, D.**, Popan, A. *Analysis and optimization of cutting parameters in drilling operation of EM AW-2007 aluminum alloy*. Academic Journal of Manufacturing Engineering, 16(1), pp. 19-26, 2018.
- [Fre 98] Freiler, C. *Ökologische und Ökonomische Aspekte beim Einsatz von Esterölen*, 11th International Colloquium Industrial and Automotive Lubrication, 13.-15. January 1998, Ostfildern. Technische Akademie Esslingen, Band II (1998) 1137-1152.
- [Fri 05] Frischknecht, R, Rebitzer, G. *The ecoinvent database system: a comprehensive web-based LCA database*, Journal of Cleaner Production 13(13-14) (2005), 1337-1343.
- [Gan 10] Ganesha Prasad, M.S., Drakshayani, D.N. *Studies on Passive Cooling Techniques in Dry Machining*, Materials and Manufacturing Processes, 25(6) (2010), 360-369.
- [Gha 04] Ghani, J.A., Choudhury, I.A., Hassan, H.H. *Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters*, Journal of Materials Processing Technology 145 (2004), 84–92.
- [Giu 06] Giudice, F., La Rosa, G., Antonino, R. *Product Design for the Environment: A Life Cycle Approach*, Published by CRC Press. ISBN-0849327229, 2006.
- [Gol 02] Goldwitz, J.A. *Productivity Gains and Environmental Impact of Turning Tools*, Bachelor of Science Thesis in Mechanical Engineering. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge,

Massachusetts, 2002.

- [Gra 00] Graham, I., Dom, K. *Going Dry*, Manufacturing Engineering 124(1) (2000), 72-78.
- [Gra 94] Graedel, T.E. *Industrial ecology: definition and implementation*, Industrial Ecology and Global Change, Cambridge University Press, 1994.
- [Gre 95] Greaves, I.A., Eisen, E.A., Smith, T.J., Pothier, L.J., Kriebel, D., Woskie, S.R., et al., *Respiratory Health of Automobile Workers Exposed to Metal-Working Fluid Aerosols. II. Respiratory Symptoms*, Harvard School of Public Health, Occupational Health Program, Boston, MA, Final Draft, 1995.
- [Gro 96] Groover, M.P. *Fundamentals of Modern Manufacturing*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1996.
- [Grz 00] Grzesik, W.P., Nieslony, P. *Thermal Characterization of the Chip-Tool Interface When Using Coated Turning Inserts*. Journal of Manufacturing Processes 2(2) (2000), 79-87.
- [Grz 08] Grzesik, W., *Dry and Semi-Dry Machining*, Advanced Machining Processes of Metallic Materials (2008), 226-245.
- [Gut 01] Gutowski T., Murphy C., Allen D., Bauer D., Bras B., Piwonka T., Sheng P., Sutherland J., Thurston D., Wolff E. *WTEC Panel Report on Environmentally Benign Manufacturing (EBM)*, International Technology Research Institute, World Technology (WTEC) Division, Baltimore, Maryland; 2001.
- [Gye 89] Gyenge, Cs., Ros, O., Popa, M. *Tehnologia constructiei masinilor unelte*. Atelierul de multiplicare. Institutul Politehnic Cluj-Napoca, 1989.
- [Han 17] Hanief, M., Wani, M.F., Charoo, M.S. *Modeling and prediction of cutting forces during the turning of red brass (C23000) using ANN and regression analysis*. Engineering Science and Technology, an International Journal, 20 (3) (2017), 1220-1226.
- [Hei 02] Heiskanen, E. *The institutional logic of life cycle thinking*, Journal of Cleaner Production 20(2002) 427-437.
- [Hei 94] Heisel, U., Lutz, M., Spath, D., Wassmer, R., Walter, U. *Application of minimum quantity cooling lubrication technology in cutting processes*, Production Engineering, German Academic Society for Production Engineering 2(1) (1994), 49-54.
- [Her 07] Hermann, B.G., Kroeze, C.; Jawjit, W., *Assessing environmental performance by combining life cycle assessment, multi-criteria analysis and environmental performance indicators*, Journal of Cleaner Production 15(18) (2007), 1787-1796.
- [Her 97] Ehrenfeld, J.R., *Industrial ecology: A framework for product and process design*, Journal of Cleaner Production 5(1-2) (1997), 87-95.
- [Hew 96] Hewson, W.D.; Gerow, G.K., *Development of new metal cutting oils with quantifiable performance characteristics*, Lubrication Eng. 52 (1) (1996), 31-38.
- [Hon 01] Hong, S.Y. *Economical and Ecological Cryogenic Machining*, Journal of Manufacturing Science Technology 123(2001), 331-338.
- [Hua 14] Huang, P.L., Li, J.F., Sun, J., Zhou, J. *Study on performance in dry milling aeronautical titanium alloy thin-wall components with two types of tools*. Journal of Cleaner Production 2014, 67, 258-264.
- [Isl 06] Islam, N.R., Islam M.W., Mithu, S. *The influence of minimum quantity of lubrication (MQL) on cutting temperature, chip and dimensional accuracy in turning AISI-1040 steel*. Journal of Materials Processing Technology 2006, 171, 93-99.
- [Ito 06] Itoigawa, F., Childs, T.H.C., Nakamura, T., Belluco W. *Effects and mechanisms in minimal quantity lubrication machining of aluminum alloy*, Wear 260(3) (2006), 339-344.

- [Jaw 07] Jawahir, I.S., Dillon, O.W. *Sustainable manufacturing processes: new challenges for developing predictive models and optimization techniques*, Proceedings of 1st International Conference on Sustainable manufacturing SM1, Montreal, Canada, 2007, 1-15.
- [Jaw 93] Jawahir, I.S., Luttervelt C.A. *Recent developments in chip control research and application*. *Annals CIRP* 1993, 46(2), 659-693.
- [Kae 03] Kaebernick, H., Kara, S., Sun, M. *Sustainable product development and manufacturing by considering environmental requirements*, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 19(6) (2003), 461- 468.
- [Kal 01] Kalpakjian, S., Schmid, S., *Manufacturing Engineering and Technology*, Fourth Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2001.
- [Kal 95] Kalpakjian S. *Manufacturing Engineering and Technology*, Third Edition, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1995.
- [Kal 97] Kalhofer, E. *Dry machining principles and applications*, Proceedings of the 2nd Seminario International de Alta Tecnologia UNIMEP. Julho, Brazil: Santa Barbara D'Oeste, SP, 1997.
- [Kel 02] Kelly J.F., Cotterell M.G. *Minimal lubrication machining of aluminum alloys*, *Journal of Materials Processing Technology* 120(1-3) (2002), 327-334.
- [Kel 14] K. Kellens, R. Renaldi, W. Dewulf, J. Kruth, J.R. Duflou, *Rapid Prototyping J* 20 (2014), 459–470.
- [Kel 96] Kelly, K., Young, P., Byrne, G. *Modeling of surface integrity generation in single point turning*, Proceedings of the 13th Irish Manufacturing Committee Conference, Limerick, (1996), 385-394.
- [Kha 09] Khan, M.M.A., Mithu, M.A.H., Dhar, N.R. *Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid*. *Journal of Materials Processing Technology* 2009, 209, 5573–5583.
- [Kir 94] Kirschner, E.M. *Environment, Health Concerns Force Shift in Use of Organic Solvents*, *Chemical and Engineering News* 72(25) (1994), 13-20.
- [Klo 97a] Klocke, F., Eisenblatter, G. *Dry cutting*, *CIRP Annals Manufacturing Technology* 46(2) (1997), 519-527.
- [Klo 97b] Klocke, F., Eisenblatter, G. *Machinability investigation of the drilling process using minimal cooling lubrication techniques*, *Journal of Production Engineering* 4(1) (1997), 19–24.
- [Klo 98] Klocke, F., Gerschwiler, K. *Trockenbearbeitung - Grundlagen, Grenzen, Perspektiven*. VDI-Bericht 1375 *Trockenbearbeitung prismatischer Teile*, Tagung Aachen, VDI-Verlag, Dusseldorf; (1998), 13–51.
- [Klo 99] Klocke, F., Eisenblatter, G. *Coated tools for metal cutting—features and applications*, *CIRP* 48(2) (1999) 515–525.
- [Koe 96] Koenig, W., Rummenhoeller, D. *Ecological Manufacturing*, *Production Engineering, German Academic Society Engineering* 1(2) (1996), 1-4.
- [Kol 04] Kolominskas, C., Sullivan, R., *Improving cleaner production through pollutant release and transfer register reporting processes*, *Journal of Cleaner Production* 12(7) (2004), 713-724.
- [Kop 02] Kopac, J., Babor, M., Sokovic, M. *Optimal machining parameters for achieving the desired surface roughness in fine turning of cold preformed steel work pieces*, *International Journal of Machining Tool Manufacturing* 42 (2002), 707–796.
- [Kop 97] Kopac, J. *New achievements in cutting techniques*, *Journal of Mechanical Engineering* 43(3-4) (1997), 143-152.
- [Kor 03] Korkut, I. *A dynamometer design and its construction for milling operation*. *Materials & Design*

24(2003), 631-637.

- [Kre 13] M. Kreiger, J.M. Pearce, *ACS Sust Chem Eng* 1, 1511–1519 (2013).
- [Kri 14] Krieger, M.A., Mulder, M.L., Glover, A.G, Pearce, J.M., *J Clean Prod* 70, 90–96 (2014).
- [Kro 98] Krozer, J., Vis, J.C. *How to get LCA in the right direction?* *Journal of Cleaner Production* 6(1) (1998), 53-61.
- [Kue 07] Kuehr, R. *Towards a sustainable society: United Nations university's zero emissions approach*, *Journal of Cleaner Production* 15(13-14) (2007), 1198-1204.
- [Kun 06] Kundrák, J., Mamalis, A. G., Gyáni, K., Markopoulos, A. *Environmentally Friendly Precision Machining*, *Materials and Manufacturing Processes* 21(1) (2006), 29-37.
- [Kur 13] Kuram, E., Ozcelik, B., Bayramoglu, M., Demirbas, E., Tolga Simsek, B. *Optimization of cutting fluids and cutting parameters during end milling by using D-optimal design of experiments*. *Journal of Cleaner Production* 2013, 42, 159-166.
- [Kwa 05] Kwak, J.S. *Application of Taguchi and response surface methodologies for geometric error in surface grinding process*, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45 (2005), 327–334.
- [Lah 97] Lahres, M., Jorgensen, G. *Properties and dry cutting performance of diamond-coated tools*, *Surface and Coating Technology* 96 (1997), 198-204.
- [Laz 02] Lazoglu, I.; Altintas, Y., *Prediction of tool and chip temperature in continuous and interrupted machining*, *International Journal of Machining Tools and Manufacture* 42(9) (2002), 1011-1022.
- [Lin 06] Lindahl, M. *Engineering designers' experience of design for environment methods and tools – requirement definitions from an interview study*. *Journal of Cleaner Production* 14 (5) (2006), 487–496.
- [Lin 09] Lin, Y.C., Wang, A.C., Wang, D.A., Chen, C.C. *Machining Performance and Optimizing Machining Parameters of Al₂O₃-TiC Ceramics using EDM Based on the Taguchi Method*. *Materials and Manufacturing Processes* 24(6) (2009), 667–674.
- [Lji 09] Ljis, M.A.; Mohd Radzi, H.C.D.; Nurul Amin, A.K.M., *The implementation of Taguchi method on EDM process of tungsten carbide*, *European Journal of Scientific Research* 26(4) (2009), 609-617.
- [Lo 09] Lo, K.H., Shek, C.H., Lai, J.K.L. *Recent developments in stainless steels*. *Materials Science and Engineering* 65, 2009, 39 – 104.
- [Lof 06] Lofthouse, V., *Ecodesign tools for designers: defining the requirements*, *Journal of Cleaner Production* 14(15-16) (2009), 1386-1395.
- [Luk 95] Luken, A.R.; Freij, A.C., *Cleaner industrial production in developing countries: market opportunities for developed countries*, *Journal of Cleaner Production* 3(1-2) (1995), 71-78.
- [Luo 99] Luo, Y., Ji, Z., Leu, M.C., Caudill, R. *Inst Electr Electron Eng* 1-6 (1999).
- [Mac 00] Machado, A.R., Diniz, A.E. *Advantages and disadvantages of the use of the cutting fluids*, *Machining Congress*, São Paulo, Brazil, 2000.
- [Mac 97] Machado, A.R., Wallbank, J. *The effect of extremely low lubricant volumes in machining*, *Wear* 210 (1-2) (1997), 76–82.
- [Mai 08] Maider, S.J. *Polluting emissions standards and clean technology trajectories under competitive selection and supply chain pressure*, *Journal of Cleaner Production* 16(1) (2008), 113-23.
- [Maj 05] Majumdar, P., Jayaramachandran, R., Ganesan, S. *Finite element analysis of temperature rise in metal cutting processes*, *Applied Thermal Engineering* 25(14-15) (2005), 2152-2168.

- [Mar 04] Marksberry, P.W. *Environmentally responsible process design for manufacturing in NDM (Near Dry Machining) for nozzle placement and effectiveness*, ASME Journal of Manufacturing Science Engineering (2004), 123-142.
- [Mar 07] Marksberry, P.W. *Micro-flood (MF) technology for sustainable manufacturing operations that are coolant less and occupationally friendly*, Journal of Cleaner Production 15(10) (2007), 958-971.
- [Mar 08] Marksberry, P.W., Jawahir, I.S. *A comprehensive tool-wear/tool-life performance model in the evaluation of NDM (near dry machining) for sustainable manufacturing*, International Journal of Machine Tools and Manufacture 48(7-8) (2008), 878-86.
- [Mcc 01] McCabe, J., Ostraff, M.A. *Performance experience with near dry machining of aluminum*, Lubrication Engineering, 2001.
- [Mcm 04] McManus, M.C.; Hammond, G.P., Burrows, C.R. *Life Cycle Assessment of Mineral and Rapeseed Oil in Mobile Hydraulic Systems*, Journal of Industrial Ecology 7(3-4) (2004), 163-177.
- [Meh 18] Mehta, A., Hemakumar, S., Patil, A., Khandke, S.P., Kuppan, P., Oyyaravelu, R., Balan, A.S.S. (2018). *Influence of sustainable cutting environments on cutting forces, surface roughness and tool wear in turning of Inconel 718*. Materials today. Proceedings, 5(2), Part 2 (2018), 6746-6754.
- [Min 05] Min, S., Inasaki, I., Fujimura, S., Wada, T., Suda, S., Wakabayashi, T. *A Study on Tribology in Minimal Quantity Lubrication Cutting*, CIRP Annals - Manufacturing Technology 54(1) (2005), 105-108.
- [Mos 05] Mos, S.P., Axinte, D.A., Hyde, T.H., Gindy, N.N.Z. *An example of selection of the cutting conditions in broaching of heat-resistant alloys based on cutting forces, surface roughness and tool wear*. Journal of Materials Processing Technology 160 (2005), 382-389.
- [Mun 86] Mundroch, J., Barnes, J.A. *Statistical Tables*, Macmillan, London, 1986.
- [Mun 95] Munoz, A.A., Sheng, P. *An analytical approach for determining the environmental impact of machining processes*, Journal of Material Processing Technology 53 (1995), 736-758.
- [Mye 02] Myers, R.H., Montgomery, D.C. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiment*; Wiley: New York, 2002.
- [Nac 85] Nachtman, E.S., Kalpakjian, S. *Lubricants and lubrication in metalworking operations*, New York, NY: Marcel Dekker Inc., 1985.
- [Nie 02] Nielsen, P.H., Wenzel, H. *Integration of environmental aspects in product development: a stepwise procedure based on quantitative life cycle assessment*, Journal of Cleaner Production 10 (2002), 247-257.
- [Nun 06] Núñez, P.J., Simao, J., Arenas, J.M., De la Cruz, C. *Surface roughness characterization using cutting force analysis, regression and neural network prediction models*. Material Science Forum 256 (2006), 211-216.
- [Obe 96] Oberg, E.; Franklin, D.J.; Holbrook, L.H.; Ryffel, H., *Machinery's Handbook*, 25th Edition, Ed. Robert E. Green, Industrial Press Inc., New York, 1996.
- [Ore 00] Orecchini, F. *The ISO 14001 certification of a machine-process*, Journal of Cleaner Production 8(1) (2000), 61-68.
- [Ost 09] Óstlin, J., Sundin, E., Björkman, M. *Product life-cycle implication for remanufacturing strategies*, Journal of Cleaner Production 17(11) (2009), 999-1009.
- [Pan 03] Pan, Y., Ssaki, T., Ito, N., Ohmori, H., Yamagata, Y., Uehara, Y., et al. *A WLID grinding system with a minimum quantity of liquid*. Key Engineering Materials 293 (2003), 23-28.
- [Par 96] Park, S.H. *Robust Design and Analysis for Quality Engineering*, Chapman & Hall, London, 1996.

- [Pau 07] Paulo Davim, J., Sreejith, P.S., Silva J. *Turning of Brasses Using Minimum Quantity of Lubricant (MQL) and Flooded Lubricant Conditions*, Materials and Manufacturing Processes 22(1) (2007), 45-50.
- [Pfe 94] Pfeifer, T., Eversheim, W., Kanig, W., Weck, W. *Manufacturing Excellence: The Competitive Edge*, Chapman & Hall, 1994.
- [Pha 88] Phadke, M.S. *Quality engineering using design of experiments, quality control, robust design and the Taguchi method*, Wadsworth & Books, California, 1988.
- [Pha 89] Phadke, M.S. *Quality Engineering Using Robust Design*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New York, 1989.
- [Fig 10] Pigosso, D.C.A., Zanette, T., Filho, A.G., Ometto A.R., Rozenfeld, H. *Ecodesign methods focused on remanufacturing*, Journal of Cleaner Production 18 (2010), 21-31.
- [Pop 15] Popan I.A., Bâlc N., Popan A.I., **Frățilă D.** and Trif A. *Surface Roughness Prediction During Dry Turning of Austenitic Stainless Steel AISI 304*. Volume 808 of Applied Mechanics and Materials. Selected, peer reviewed papers from 12th International Conference on Modern Technologies in Manufacturing (MTeM), 14-16 October 2015, Cluj-Napoca, pp.54-59. ISSN 1660-9336.
- [Pop 78] Popa, B., *Solicitarea termică în construcția de mașini*, Editura Tehnică, București, 1978.
- [Pop 94] Popke, H., Emmer, Th., *Umweltschonende Zerspantechnik; Trockenbearbeitung und Minimalschmiertechnik Werkzeuge*. Berlin Verlag (1994), 52-55.
- [Por 95] Porter, M.E. and Van der Linde, C. *Green and competitive: ending the stalemate*, Harvard Business Review, September/October, 1995, 120-134.
- [Pra 03] Prashant, L. *A macro level environment al performance comparison: dry machining process vs. wet machining process*, Sardar Patel University (2003), 8-23.
- [Pra 10] Prashad-Ganesh, M.S., Drakshayani, D.N. *Studies on Passive Cooling Techniques in Dry Machining*, Materials and Manufacturing Processes 25(6) (2010), 360- 369.
- [Pus 09] Pusavec, F., Kopac, J. *Achieving and Implementation of Sustainability Principles in Machining Processes*, Journal of Advances in Production Engineering and Management 3 (2009), 151-160.
- [Pus 10a] Pusavec, F., Krajnik, P., Kopac, J. *Transition to sustainable production – Part I: Application on machining technologies*, Journal of Cleaner Production 18(2) (2010), 174–184.
- [Pus 10b] Pusavec, F., Kramar, D., Krajnik, P., Janez Kopac, J. *Transitioning to sustainable production – part II: evaluation of sustainable machining technologies*. Journal of Cleaner Production 18(12) (2010), 1211-1221.
- [Rad 07] Radonjić, G., Tominc, P. *The role of environmental management system on introduction of new technologies in the metal and chemical/paper/plastics industries*. Journal of Cleaner Production 15 (2007), 1482-1493.
- [Rah 01] Rahman, M., Senthil, Kumar, A. Salam, M.U. *Evaluation of minimal quantities of lubrication in end milling*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Department of Mechanical and Production Engineering, Singapore, Springer-Verlag, 2001.
- [Rah 02] Rahman, M., Kumar, A.S., Salam, M.U. *Experimental evaluation on effect of minimal quantity lubricant in milling*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 42 (2002) 539-547.
- [Rah 12] Rahman, R.A., Sun, S., Wang, G., Dargusch, M.S. *An investigation of cutting forces and cutting temperatures during laser-assisted machining of the Ti-6Cr-5Mo-5V-4Al beta titanium alloy*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 63 (2012), 58-59.
- [Raj 08] Rajesh, S., Karunamoorthy, L., Palanikumar, K. *Fuzzy Modeling and Analysis of Machining Parameters in Machining Titanium Alloy*, Materials and Manufacturing Processes 23(4) (2008), 439-447.

- [Raj 10] Rajemi, M.F., Mativenga, P.T., Aramcharoen, A. *Sustainable machining: selection of optimum turning conditions based on minimum energy considerations*, Journal of Cleaner Production 18(11-12) (2010), 1059-1065.
- [Ram 08a] Ramesh, S., Karunamoorthy, L., Palanikumar, K. *Fuzzy Modeling and Analysis of Machining Parameters in Machining Titanium Alloy*, Materials and Manufacturing Processes 23(4) (2008), 439 -447.
- [Ram 08b] Ramesh, S., Karunamoorthy, L., Palanikumar, K. *Surface Roughness Analysis in Machining of Titanium Alloy*, Materials and Manufacturing Processes 23(2) (2008), 174-181.
- [Ram 10] Rama Kotaiah, K., Srinivas, J., Babu, K.J., Srinivas, K. *Prediction of Optimal Cutting States during Inward Turning: An Experimental Approach*, Materials and Manufacturing Processes 25(6) (2010), 432-441.
- [Ren 08] Renou, S., Thomas, J.S., Aoustin, E., Pons, M.N. *Influence of impact assessment methods in wastewater treatment LCA*, Journal of Cleaner Production 16(10) (2008), 1098-1105.
- [Rob 00] Robèrt, K.H., *Tools and concepts for sustainable development, how do they relate to a framework for sustainable development, and to each other?*, Journal of Cleaner Production 8(3) (2000), 243-54.
- [Rob 02] Robèrt, K.H., Schmidt-Bleek, B., Aloisi de Larderel, J., Basile, G., Jansen, J.L., Kuehr, R. et al. *Strategic sustainable development—selection, design and synergies of applied tools*, Journal of Cleaner Production 10(3) (2002), 197-214.
- [Ros 07] Roș, O., **Frățilă D.** *Ecoproiectare*. Editura Casa Cărții de Știință, Cluj-Napoca, 2007.
- [Ros 94] Rossmore, L.A., Rossmore, H.W. *Metalworking Fluid Microbiology*, Metalworking Fluids, Ed. Jerry P. Byers, Marcel Dekker, Inc., New York, New York, 1994.
- [Rus 07] Rusko, M., Vargova, J., Chovancova, J. *Life cycle assessment and its potential in decision-making process*, Industrial Toxicology, 27th International Symposium Proceedings 27 (2007), 369-373.
- [Sad 16] Sadílek, M., Dubský, J., Sadílková, Z., Poruba, Z. *Cutting forces during turning with variable depth of cut*. Perspectives in Science Volume 7, March 2016, 357-363.
- [Sag 17] Sagar, B., Jagatap, K.R., Lamdhade, G.K., Darade, P.D. *Cutting Forces during Orthogonal Machining Process of AISI 1018 Steel: Numerical and Experimental Modeling*. Materials today. Proceedings. Volume 4, Issue 8, 2017, 8454-8462.
- [San 10] Sanchez, J.A., Pombo, I., Alberdi, R., Izquierdo, B., Ortega, N., Plaza, S., Martinez-Toledan J. *Machining evaluation of a hybrid MQL-CO₂ grinding technology*, Journal of Cleaner Production 18(8) (2010), 1840-1849.
- [Say 09] Sayit, E., Aslantas, K., Çiçek, A. *Tool Wear Mechanism in Interrupted Cutting Conditions*, Materials and Manufacturing Processes 24(4) (2009), 476-483.
- [Set 15] Setti, D., Sinha, M., Gosh, S., Rao, P.V. *Performance evaluation of Ti-6Al-4V grinding using chip formation and coefficient of friction under the influence of nanofluids*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 2015, 88, 237-248.
- [Sha 09] Sharma, V.S., Manu, D., Suri, N.M. *Cooling techniques for improved productivity in turning*. International Journal of Machine Tool and Manufacture 2009, 49 (6), 435-453.
- [She 98] Sherman, J., Bain, C., Huibers, P.D.T., Garcia-Valls, R., Hatton, T.A. *Solvent Replacement for Green Processing*, Environment Health Perspective 106(1) (1998), 253-271.
- [Shi 06] Shie, J.R. *Optimization of Dry Machining Parameters for High-Purity Graphite in End-Milling Process by Artificial Neural Networks: A Case Study*, Materials and Manufacturing Processes 21(8) (2006), 838- 845.

- [Shi 14] Shih, A.J., Luo, J., Lewis, M., Strenkowski, J.S. *Chip morphology and forces in end milling of elastomers*. Transition of ASME 2014, 126, 124–130.
- [Ske 08] Skerlos, S.J., Hayes, K.F., Clarens, A.F., Zhao, F. *Current advances in sustainable metalworking fluids research*, International Journal of Sustainable Manufacturing 1(1-2) (2008), 180-202.
- [Slu 97] Sluhan, W. *Trample Tramp Oil*, Cutting Tool Engineering 49(6) (1997), 87-90.
- [Sni 94] Snig, K.W., Rummen, S. *Ecological Manufacturing*. Production Engineering, German Academic Society Engineering 1(2) (1994), 1-4.
- [Sok 01] Sokovic, M., Mijanovic, K. *Ecological aspects of cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting process*, Journal of Material Processing Technology 9 (2001), 181-189.
- [Sre 00] Sreejith, P.S., Angoi, B.K. *Dry machining: Machining of the future*. Journal of Materials Processing Technology Volume 101, Issues 1–3, 14 April 2000, 287-291.
- [Sre 10] R. Sreenivasan, A. Goel, A., D.A. Bourell *Physics Procedia* 5, 81–90 (2010).
- [Sta 02] Stanford, M., Lister, P.M. *The Future Role of Metalworking Fluids in Metal Cutting Operations*, Industrial Lubricating and Tribology 54(1) (2002), 11-19.
- [Sta 97] Stals, L.M., Nesladek, M., Quaeyhaegens, C. *Current industrial practice critical issues in hard PVD and PA-CVD coatings*, Surface Coating Technology 9 (1997), 230-239.
- [Ste97] Steen, B., *On uncertainty and sensitivity of LCA-based priority setting*, Journal of Cleaner Production 5(4) (1997), 255-262.
- [Str 99] Stroppe, H., *Physik für Studenten der Natur- und Technikwissenschaften*, Fachbuchverlag Leipzig, 1999.
- [Sut 00] Sutherland, J.W., Kulur, V.N., King, N.C. *An Experimental Investigation of Air Quality in Wet and Dry Turning*, Annals of the CIRP 49(1) (2000), 61-64.
- [Sut 13] Sutter, G., List, G. *Very high speed cutting of Ti–6Al–4V titanium alloy – change in morphology and mechanism of chip formation*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 2013, 66, 37-43.
- [Suy 07] Su, Y., He, N., Li, L.; Iqbal, A., et al. *Refrigerated cooling air cutting of difficult-to-cut materials*, International Journal of Machine-tools and manufacture 47(2007), 927-933.
- [Suz 00] Suzuki, Y. *Composite mist effective cooling and lubrication ensured by water and vegetable oil in combination*, Mori Seiki Users 1 (2000), 4-14.
- [Tab 10] Tabone, M.D., Cregg, J.J., Beckman, E.J., Landis, A.E. *Envir Sci Tech* 44 (2010), 8264–8269.
- [Tan 02] Tan, X.C., Liu, F. *A decision-making framework model of cutting fluids selection for green manufacturing*, Journal of Material Processing Technologies 129 (2002), 467-470.
- [Taw 07] Tawakoli, T., Westkämper, E., Rabiey, M., Rasifard, M. *Influence of the type of coolant lubricant in grinding with CBN tools*, International Journal of Machine tools & Manufacturing 45(2007), 734-739.
- [Taw 09] Tawakoli, T., Hadad, M.J., Sadeghi, M.H., Daneshi A., Stöckert, S., Rasifard, A., *An experimental investigation of the effects of work piece and grinding parameters on minimum quantity lubrication-MQL grinding*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 49(2009), 924-932.
- [Tet 10] Teti, R., Jemielniak, K., O'Donnell, G., Dornfeld, D. *Advanced monitoring of machining operations*. CIRP Annals – Manufacturing Technology 59 (2010), 717-739.
- [Tip 93] Tipnis, V.A. *Evolving issues in product life cycle design*, Annals of CIRP 42(1) (1993), 169-173.
- [Tip 94] Tipnis, V.A. *Challenges in product strategy, product planning and technology development for*

- product life cycle design*, Annals of CIRP 43(1) (1994), 57-162.
- [Tos 10] Tosun N., Huseyinoglu, M. *Effect of MQL on Surface Roughness in Milling of AA7075-T6*, Materials and Manufacturing Processes 25(8) (2010), 793-798.
- [Tri 14] Trif A., Borzan M., **Frățilă D.**, A. Popan A., V. Ceclan V., Popescu A. *Research regarding the influence of temperature on carbide inserts in turning process*. Automation in Production Planning and Manufacturing - Scientific conference, 19-21 may 2014, Zilina, Slovakia, 2014, pp. 170-174, ISBN 978-80-554-0878-1.
- [Tri 15] Trif A., Borzan M., Popan A., **Frățilă D.**, Rus A. and Nedezki C. *Researches regarding the Influence of Cutting Regime on Processed Surface in Aluminum Alloys Turning Process*. Volume 808 of Applied Mechanics and Materials. Selected, peer reviewed papers from 12th International Conference on Modern Technologies in Manufacturing (MTeM), 14-16 October 2015, Cluj-Napoca, pp. 15-20. ISSN 1660-9336.
- [Uhl 15] Uhlmann, E., Henze, S., Brömmelhoff, K. *Influence of the Built-up Edge on the Stress State in the Chip Formation Zone During Orthogonal Cutting of AISI1045*. Procedia CIRP 2015, 31, 310-315.
- [Una 91] Unal R., Dean E.B. *Taguchi Approach to Design Optimization for Quality and Cost: an overview*, Proceedings of the International Society of Parametric Analyst 13th Annual, 1991.
- [Vas 11] Vasquez, H. *Measuring cutting forces in machining processes*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/280821670_measuring_cutting_forces_in_machining_processes, 2011.
- [Vez 06] Vezzoli, C., Sciama, D. *Life Cycle Design: From General Methods to Product Type specific guideline and Checklists: a method adopted to develop a set of guidelines/checklist handbook for the eco-efficient design of NECTA vending machines*, Journal of Cleaner Production 1(2006), 1-7.
- [Waa 05] Waage, S.; Geiser, K.; Irwin, F.; Weissman, A.; Bertolucci, M.; Fisk, P., et al., *Fitting together the building blocks for sustainability: a revised model for integrating ecological, social, and financial factors into business decision-making*, Journal of Cleaner Production 13(12) (2005), 1117-1206.
- [Waa 07] Waage, A.S., *Re-considering product design: a practical "road-map" for integration of sustainability issues*, Journal of Cleaner Production 15(7) (2007), 638-649.
- [Wak 98] Wakabayash, T.; Sato, T.; Inasaki, I., *Turning using extremely small amounts of cutting fluids*, JSME International Journal 41(1) (1998), 143-148.
- [Wan 13] Wang, G., Guo, Z., Yang, Y. *Force sensor based online tool wear monitoring using distributed Gaussian ARTMAP network*. Sensors and Actuators 192 (2013), 111-118.
- [Wan 14] Wang, C., Xie, Y., Zheng, L., Qin, Z., Tang, D., Song, Y. *Research on the Chip Formation Mechanism during the high-speed milling of hardened steel*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 2014, 79, 31-48.
- [Wec 91] Weck, M., Eversheim, W., König, W., Pfeifer, T. *Production Engineering: The Competitive Edge*, Butterworth Heinemann, 1991.
- [Wec 96] Weck, M. *Problems on the way to achieving an oil-free machine tool*, VDI Report 1240, VDI Verlag (1996), 209-232.
- [Wei 04] Weinnert, K., Inasaki, I., Sutherland, J.W., Wakabayashi, T. *Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication*, Annals of CIRP 53(2) (2004), 1-28.
- [Wei 99] Weinert, K., *Trockenbearbeitung und Minimalmengekuhlschmierung - Einsatz in der spanenden Fertigungstechnik*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 1999.
- [Wer 92] Wertheim, R., Rotberg, J., Ber, A. *The influence of high-pressure flushing through the rake face of the cutting tool*, CIRP Annals - Manufacturing Technology 41(1) (1992), 101-106.

- [Wes 00] Westkämper, E., Alting, L., Arnst, G. *Life Cycle management and assessment: approaches and visions towards sustainable manufacturing (keynote paper)*, CIRP Annals – Manufacturing Technology 49(2) (2000), 501-526.
- [Wes 08] Westkämper, E., *Manufuture and Sustainable Manufacturing*, Proceedings of the 41st CIRP Conference “Manufacturing Systems”, Tokyo, (2008), 11-14.
- [Wit 13] B.T. Wittbrodt, A.G. Glover, J. Laureto, J., G.C. Anzalone, D. Oppliger, J.L. Irwin, J.M. Pearce, *Mechatronics* 23, 713–726 (2013).
- [Wor 87] World Commission on Environment and Development, *Our Common Future*, Oxford University Press, 1987.
- [Yan 13] Yan, P., Hilditch, T., Kishawy, H.A., Littlefair, G. *On Quantifying the Strain Rate During Chip Formation When Machining Aerospace Alloy Ti-5553*. Procedia CIRP 2013, 8, 123-128.
- [Yan 98] Yang, W.H.; Tarng, Y.S., *Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method*, Journal of Materials Processing Technologies 84 (1998), 122–129.
- [You 97] Young, P., Byrne G., Cotterel M. *Manufacturing and the Environment*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 13 (1997), 488-493.
- [Zac 05] Zackrisson, M. *Environmental aspects when manufacturing products mainly out of metals and/or polymers*, Journal of Cleaner Production, 13(1) (2005), 43-49.
- [Zar 11] Zarandi, M.H.F., Mansour S., Hosseiniyou, S.A., Avazbeygi, M. *A Hybrid Material Selection Methodology and Expert System for Sustainable Product Design*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology.
- [Zen 15] Zenia, S., Ben Ayed, L., Nouari, M., Delamézière, A. *An Elastoplastic Constitutive Damage Model to Simulate the Chip Formation Process and Workpiece Subsurface Defects when Machining CFRP Composites*, Procedia CIRP 2015, 31, 100–105.
- [Zha 07] Zhang, J.Z., Chen, J.C. *The development of an in process surface roughness adaptive control system in end milling operations*. International Journal of Advanced Manufacturing 31(9-10) (2007), 877-887.
- [www Eind] <http://www.pre.nl/eco-indicator95>
- [www Eiv] <http://www.ecoinvent.org/database/database.html>
- [www Eiv-a] www.pre.nl/ecoinvent/version1.5.htm
- [www Eiv-b] www.ecoinvent.org
- [www PreSus] https://www.pre-sustainability.com/download/EI99_Manual.pdf
- [www Smp] <http://www.pre.nl/simapro/>
- [www Soar] <http://soar.wichita.edu/dspace/bitstream/10057/1146/1/t07028.pdf>

SECȚIUNEA III: Perspective de dezvoltare ale carierei științifice și profesionale

Intențiile de dezvoltare viitoare a carierei universitare se vor orienta spre cele două direcții de bază: *activitatea didactică (educațională)* și *activitatea de cercetare*. Pentru a profita de avantajele ambelor direcții și pentru a le putea îmbunătăți în mod continuu, acestea nu vor fi abordate independent, ci în mod corelat.

III.1 Dezvoltarea activității educaționale

În ceea ce privește cariera didactică, perspectivele implică angajamentul într-un proces permanent de formare și dezvoltare personală, astfel încât să pot oferi studenților o imagine clară a domeniului în care se încadrează disciplinele pe care le predau. Îmi propun să particip constant la activități de formare, prin care să mențin contactul cu stadiul actual al problemelor științifice și tehnologice în domeniu și să îmi însușesc modalități eficiente de a interacționa constructiv cu studenții.

Activitățile de predare vor viza: • *dezvoltarea de noi cursuri universitare de licență și de master, paralel cu îmbunătățirea celor actuale* și • *dezvoltarea laboratoarelor didactice DIF, prin completarea dotărilor existente cu noi echipamente*, utile nu doar pentru cercetare ci și pentru activitățile didactice. Îmi propun să dezvolt *Laboratorul TCM* și componenta *Laboratorului de Cercetare pentru Tehnologii Neconvenționale și Fabricație Competitivă* axată pe proiectarea și fabricația ecologică.

Dezvoltarea activității educaționale se va baza, de asemenea, pe continua îmbunătățire a metodologiei de predare, prin sprijinirea și implicarea studenților în procesul de învățare și cercetare. Așadar, pentru îmbunătățirea competențelor didactice îmi propun:

- să adaptez metodele de predare actuale și să le diversific prin adoptarea unor metode didactice interactive, bazate pe creativitate colaborativă și parteneriat educațional.
- să implic activ studenții în desfășurarea cursurilor și aplicațiilor, utilizând metode didactice centrate pe învățarea prin descoperire și învățarea în echipă;
- să public cursurile pe care le predau și să le actualizez periodic. Astfel, studenții vor avea acces mai ușor la informație, o informație actuală și în conformitate cu progresele înregistrate în domeniu, la nivel național și internațional;

- să particip la stagii de scurtă durată la universități din țară și străinătate, pentru schimburi de experiență și de informații, utile pentru propria carieră și pentru instituția în care lucrez (la nivel de department și facultate).

III.2 Dezvoltarea activității de cercetare

Dezvoltarea activității de cercetare se va axa, pe dezvoltarea laboratoarelor de cercetare, publicarea și diseminarea rezultatelor cercetării. Concret, pentru a crește relevanța și impactul rezultatelor științifice îmi propun:

- publicarea anual a minim un articol în reviste științifice din domeniul *Inginerie industrială*, indexate *Thompson ISI Reuters*, cu factor de impact minim 0.5;
- publicarea anual a minim un articol în reviste sau proceedings-uri indexate în baze de date recunoscute CNCSIS, ca *SCOPUS*, *Science Direct*, *Ulrichsweb*, *Index Copernicus*, *INSPEC*, etc.;
- participarea la conferințe internaționale, desfășurate în țară și în străinătate, care pe lângă diseminarea rezultatelor, oferă posibilitatea unor schimburi de experiență și informație cu participanți de alte universități/instituții din domeniu, fapt ce duce nu numai la dezvoltarea mea ca cercetător, dar și la creșterea prestigiului departamentului în care lucrez (respectiv al facultății și al universității);
- participarea în echipe de cercetare naționale și internaționale și atragerea fonduri de cercetare prin participarea la competițiile naționale și europene;
- stabilirea de contacte/colaborări cu parteneri industriali din domeniu;
- publicarea unor cărți de specialitate, la edituri naționale recunoscute CNCSIS/CNATDCU sau la edituri din străinătate.

Continuarea direcțiilor de cercetare actuale prin:

- Implementarea în practică a metodelor inovative de proiectare a produselor și proceselor;
- Realizarea de studii privind proiectarea produselor și proceselor de fabricație pentru sustenabilitate;
- Analiza și compararea diferitelor metode de evaluare a impactului asupra mediului;
- Selectarea condițiilor optime de fabricație pe baza pe consumului minim de energie;
- Studiul influenței proprietăților lichidelor de aşchiere ecologice asupra parametrilor cuantificabili ai proceselor de fabricație,

- Modelarea predictivă a proceselor de fabricație pe baza pe performanțelor tehnice și a impactul asupra mediului înconjurător,
- Analiza performanțelor de mediu ale proceselor de fabricație și dezvoltarea de metode analitice pentru determinarea impactului proceselor de prelucrare asupra mediului.

Pe baza experienței anterioare și a direcțiilor de cercetare detaliate anterior, obiectivul pe termen mediu este de a constitui o echipă de cercetare, care să acumuleze experiență în domenii legate de proiectarea tehnologiilor de fabricație avansate și a procesele de producție de sustenabile.

III.3 Corelarea activității de cercetare cu cea educațională

Activitățile de cercetare și de predare pe care le desfășor în prezent sunt corelate, iar acest lucru poate fi un catalizator, pentru ca potențiala echipă de cercetare pe care o voi forma să devină competitivă în competițiile pentru atragerea de fonduri de cercetare.

În cadrul proiectelor viitoare, voi încuraja și voi sprijini studenții masteranzi și doctoranzi să participe la activitatea de cercetare și la diseminarea rezultatelor prin participarea acestora la conferințe, simpozioane, workshop-uri, etc. În acest sens, va fi importantă stabilirea unei sinergii între procesul de predare și activitatea de cercetare, prin inițiative de extindere a angajamentului studenților, masteranzilor și doctoranzilor la oportunitățile de cercetare.

Rezultatele cercetărilor viitoare se vor regăsi în cărțile și articolele pe care le voi publica, precum și în proiectele de cercetare, pe care le voi coordona în cazul obținerii unor clasări favorabile la competițiile organizate pentru finanțarea cercetării. Astfel, vor putea fi desfășurate activități de cercetare de calitate cu rezultate relevante, va fi facilitată realizarea unor studii teoretice și experimentale, care să răspundă cerințelor colaborării cu mediul industrial.

III.4 Cadrul de dezvoltare viitoare a carierei

Cadrul prin care îmi propun dezvoltarea în continuare a carierei se bazează pe un set de valori printre care se regăsesc: *comunicarea, cooperarea, transparența și deschiderea la nou*. Mizez pe susținerea acestor valori și din partea colectivului *Departamentului Ingineria Fabricației* și pe promovarea lor în rândul colaboratorilor.

Consider că planul personal de dezvoltare al carierei profesionale este în concordanță cu planul de dezvoltare al *Facultății Construcții de Mașini* și al departamentului din care fac parte și îmi propun să realizez cât mai multe din obligațiile care îmi revin ca membru al comunității academice din *Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca*.

Doresc să îmi dezvolt în continuare cariera academică și reputația profesională, astfel încât să pot contribui la creșterea vizibilității *Departamentului Ingineria Fabricației* și implicit a *Facultății Construcții de Mașini*.

Principalele instrumente pe care îmi propun să le utilizez în îndeplinirea planului de dezvoltare vor fi atât *menținerea standardelor de excelență* academică și profesională, cât și *colaborarea* nemijlocită cu colegii - cadre didactice și studenții.