



MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
POLITEHNICA București

Centrul Universitar Pitești
Școala doctorală Inginerie Industrială

TEZĂ DE DOCTORAT

- *REZUMATUL EXTINS* -

Contribuții privind dezvoltarea prin cercetare teoretico-experimentală și
modelare numerică a procesului și sistemului de prelucrare prin
frezare plan-frontală a oțelului dur 55NiCrMoV7

Claudiu Ionuț M. MALEA

Conducători științifici:

Prof. univ. habil. dr. ing. Eduard Laurențiu NIȚU
MCF HDR dr. ing. Claudiu BĂDULESCU

Cuprins

	Teză	Rez
<i>Cuvânt înainte</i>	(5)	5
Introducere	(6)	6
Listă figuri	(7)	-
Listă tabele	(15)	-
Nomenclatură	(17)	-
 Partea I. Stadiul actual al cercetării-dezvoltării și aplicațiilor industriale ale prelucrării prin frezare a metalelor dure		
1. Procedee de prelucrare prin frezare a metalelor dure	(23)	7
1.1. Materiale metalice dure	(23)	7
1.2. Procedee de prelucrare prin frezare	(25)	7
1.3. Procesul formării așchiilor la prelucrarea metalelor dure	(27)	7
1.4. Uzura și durabilitatea sculelor așchietoare	(30)	8
1.5. Calitatea suprafețelor prelucrate prin așchiere	(32)	8
1.6. Prelucrabilitatea prin așchiere a metalelor dure	(33)	9
1.7. Aplicații industriale ale procedeelor de frezare a metalelor dure	(35)	9
2. Studii experimentale privind procesele de frezare a pieselor din metale dure	(38)	10
2.1. Elemente ale sistemelor de cercetare experimentală	(38)	10
2.1.1. Tipuri de procedee de frezare studiate	(38)	10
2.1.2. Elemente ale sistemelor tehnologice de prelucrare	(39)	10
2.1.3. Mediul de prelucrare	(42)	11
2.1.4. Sisteme și echipamente de măsurare și înregistrare a parametrilor de proces	(43)	11
2.2. Studiul parametrilor de proces	(46)	11
2.2.1. Forțele de așchiere	(46)	11
2.2.2. Temperaturile din proces	(48)	11
2.3. Studiul morfologiei așchiilor	(49)	12
2.3.1. Caracteristici macroscopice ale așchiilor	(50)	12
2.3.2. Caracteristici microscopice și fizico-mecanice ale așchiilor	(50)	12
2.4. Studiul uzurii și durabilității sculelor	(53)	12
2.4.1. Mecanisme de uzură a sculei	(53)	12
2.4.2. Durabilitatea sculelor așchietoare	(54)	13
2.5. Studiul calității suprafețelor prelucrate	(55)	13
2.5.1. Caracteristici geometrice și macrostructurale ale suprafețelor prelucrate	(56)	13
2.5.2. Caracteristici microstructurale și fizico-mecanice ale straturilor superficiale	(58)	13

3. Studii privind modelarea și simularea numerică a proceselor de frezare	(62)	14
3.1. Etapele modelării și simulării numerice	(62)	14
3.1.1. Strategii de modelare numerică	(63)	14
3.1.2. Definirea geometriei modelelor numerice	(64)	14
3.1.3. Descrierea comportamentului termo-mecanic al materialelor metalice	(65)	14
3.1.4. Descrierea mecanismelor de rupere a materialelor metalice	(68)	15
3.1.5. Constrângerea modelelor numerice	(69)	15
3.1.6. Discretizarea modelelor numerice	(70)	15
3.2. Strategii de validare a modelelor numerice	(71)	16
3.2.1. Validarea modelelor numerice prin analiza forțelor de așchiere	(72)	16
3.2.2. Validarea modelelor numerice prin analiza temperaturilor din proces	(73)	16
3.2.3. Validarea modelelor numerice prin analiza morfologiei așchiilor	(74)	16
3.2.4. Validarea modelelor numerice prin analiza tensiunilor remanente ..	(75)	16
3.2.5. Validarea modelelor numerice prin analiza microdurităților	(76)	16
4. Concluzii privind stadiul actual al cercetării – dezvoltării și aplicațiilor industriale ale prelucrării prin frezare a metalelor dure	(77)	17

**Partea a II-a. Contribuții la cercetarea teoretico-experimentală și
modelarea numerică a procesului de frezare plan-frontală a metalelor dure**

5. Direcțiile, obiectivul principal și metodologia de cercetare-dezvoltare a proceselor de prelucrare prin frezare plan-frontală a metalelor dure	(83)	23
5.1. Direcții de cercetare-dezvoltare	(83)	23
5.2. Obiectivul principal al activității de cercetare-dezvoltare	(83)	23
5.3. Modelarea procesului de frezare plan-frontală a oțelului aliat 55NiCrMoV7	(84)	24
5.4. Metodologia de cercetare-dezvoltare	(86)	25
5.4.1. Planificarea experimentelor	(87)	25
5.4.2. Construirea modelelor numerice	(91)	26
6. Elemente ale sistemului de cercetare experimentală a procesului de frezare plan-frontală a metalelor dure	(93)	27
6.1. Caracteristici ale oțelului aliat 55NiCrMoV7	(93)	27
6.1.1 Compoziția chimică și caracteristici metalurgice	(93)	27
6.1.2 Proprietăți fizico-mecanice	(95)	27
6.1.3. Geometria epruvetelor pentru caracterizarea comportamentului termo-mecanic al oțelului dur	(96)	28
6.2. Elemente ale sistemului tehnologic de prelucrare și ale sistemelor de măsurare din timpul procesului	(98)	28
6.2.1 Forma și dimensiunile semifabricatelor de prelucrat	(98)	28
6.2.2 Elemente ale sistemului tehnologic de prelucrare prin frezare plan- frontală	(99)	28
6.2.3 Sisteme de măsurare în timp real a rezultatelor de proces	(103)	28

6.3. Metode și mijloace utilizate pentru măsurarea unor caracteristici geometrice și structurale ale pieselor prelucrate	(105)	29
6.4. Planificarea măsurării unor caracteristici ale calității suprafețelor prelucrate	(107)	29
6.5. Metodologia de prelucrare matematică a datelor experimentale	(108)	29
7. Rezultate ale cercetării teoretico-experimentale privind influența regimului de aşchiere asupra parametrilor de proces, morfologiei aşchiilor și a calității suprafețelor prelucrate	(110)	30
7.1. Rezultate privind forțele de aşchiere	(110)	30
7.1.1. Standul experimental pentru măsurarea forțelor de aşchiere	(110)	30
7.1.2. Determinarea mărimii forțelor de aşchiere	(111)	30
7.1.3. Influența parametrilor regimului de aşchiere asupra forțelor de aşchiere	(115)	30
7.2. Rezultate privind dimensiunile macroscopice ale aşchiilor	(116)	32
7.2.1. Măsurarea dimensiunilor macroscopice a aşchiilor	(116)	32
7.2.2. Influența parametrilor regimului de aşchiere asupra dimensiunilor macroscopice a aşchiilor	(117)	32
7.3. Rezultate privind temperaturile din proces	(121)	32
7.3.1. Standul experimental pentru măsurarea temperaturilor din proces	(121)	32
7.3.2. Determinarea mărimii temperaturilor din proces	(121)	32
7.3.3. Influența parametrilor regimului de aşchiere asupra temperaturilor din proces	(124)	32
7.4. Rezultate privind rugozitatea suprafețelor prelucrate	(126)	33
7.4.1. Măsurarea rugozității suprafeței prelucrate	(126)	33
7.4.2. Influența parametrilor regimului de aşchiere asupra rugozității suprafeței prelucrate	(127)	33
7.5. Rezultate privind abaterea de la planeitate a suprafețelor prelucrate	(129)	33
7.5.1. Măsurarea abaterii de la planeitate a suprafețelor prelucrate	(129)	33
7.5.2. Influența parametrilor regimului de aşchiere asupra abaterii de la planeitate a suprafeței prelucrate	(129)	33
7.6. Rezultate privind microduritatea straturilor superficiale	(131)	33
7.6.1. Măsurarea microdurității stratului superficial	(131)	33
7.6.2. Influența parametrilor regimului de aşchiere asupra microdurității stratului superficial	(132)	33
8. Rezultate ale cercetării teoretico-experimentale privind frezarea de degroșare și de semifinisare	(135)	34
8.1. Procedura de măsurare a parametrilor de proces	(135)	34
8.2. Analiza formei geometrice a aşchiilor	(136)	35
8.3. Analiza temperaturii din proces	(138)	35
8.4. Analiza forței de aşchiere	(140)	36
8.5. Analiza morfologiei aşchiilor	(143)	37

9. Rezultate ale cercetării teoretico-experimentale privind uzura sculei	(149)	38
9.1. Procedura de măsurare și analiză a uzurii plăcuțelor așchietoare	(149)	38
9.1.1. <i>Standul experimental, experimente realizate</i>	(149)	38
9.1.2. <i>Mijloace și tehnici de măsurare a uzurii</i>	(150)	38
9.1.3. <i>Metode de evaluare a uzurii</i>	(152)	39
9.2. Analiza unidimensională a evoluției uzurii	(155)	39
9.3. Analiza bidimensională a evoluției uzurii	(156)	39
9.4. Analiza tridimensională a evoluției uzurii	(157)	39
9.5. Analiza tipurilor de uzură a sculei	(159)	40
9.6. Influența uzurii sculei asupra parametrilor de proces și a calității suprafețelor prelucrate	(162)	40
9.6.1. <i>Influența uzurii sculei asupra forței de așchiere</i>	(162)	40
9.6.2. <i>Influența uzurii sculei asupra temperaturii din proces</i>	(162)	40
9.6.3. <i>Influența uzurii sculei asupra calității suprafețelor prelucrate</i>	(163)	41
9.7. Compararea și corelarea rezultatelor	(165)	41
9.7.1. <i>Compararea evoluției parametrilor de uzură ai sculei</i>	(165)	41
9.7.2. <i>Corelarea rezultatelor procesului de frezare cu uzura sculei</i>	(166)	41
10. Modelarea și simularea numerică a procesului de frezare	(170)	42
10.1. Construcția modelelor numerice tridimensionale	(170)	42
10.1.1. <i>Definirea geometriei modelelor numerice</i>	(170)	42
10.1.2. <i>Constrângerea modelelor numerice</i>	(172)	42
10.1.3. <i>Discretizarea modelelor numerice</i>	(173)	43
10.2. Caracterizarea comportamentului termo-mecanic al oțelului dur 55NiCrMoV7	(174)	43
10.2.1. <i>Încercări la tracțiune și la forfecare monotonă la diferite temperaturi</i>	(175)	43
10.2.2. <i>Încercarea la tracțiune dinamică</i>	(176)	43
10.2.3. <i>Determinarea valorilor parametrilor legilor de comportament</i>	(177)	43
10.2.4. <i>Definirea comportamentului materialului în modelul numeric</i>	(182)	44
10.3. Validarea modelelor numerice	(183)	45
10.3.1. <i>Validarea modelelor numerice prin analiza forțelor de așchiere</i>	(183)	45
10.3.2. <i>Validarea modelelor numerice prin analiza temperaturilor din proces</i>	(184)	45
10.3.3. <i>Validarea modelelor numerice prin analiza dimensiunilor așchiilor</i>	(185)	45
10.3.4. <i>Concluzii privind validarea modelelor numerice</i>	(186)	45
11. Concluzii finale și contribuții principale la dezvoltarea și modelarea numerică a procesului și sistemului de frezare plan-frontală a oțelului dur 55NiCrMoV7	(188)	46
Lista lucrărilor publicate, rezultate în cadrul cercetărilor științifice din programul de studii universitare de doctorat	-	51
Bibliografie (selectivă)	(193)	53
Listă anexe	(209)	59

Cuvânt înainte

Studiul procesului de frezare plan-frontală a oțelului dur 55NiCrMoV7, axat pe aprofundarea mecanismelor de formare a așchiilor și de uzare a sculei așchietoare și pe stabilirea influenței regimului de așchiere asupra principalelor rezultante din proces, reprezintă *motivația principală* și *direcția* studiilor de doctorat, finalizate prin această teză de doctorat.

Cercetările din cadrul programului de doctorat au constat în analiza critică a literaturii științifice din domeniul temei, elaborarea și aplicarea unei metodologii de cercetare, dezvoltarea sistemului de cercetare experimentală, desfășurarea de cercetări teoretice și experimentale pentru identificarea și analiza dependențelor dintre regimul de așchiere sau a uzurii plăcuțelor așchietoare și parametrii de proces, parametrii de calitate ai suprafeței prelucrate sau dimensiunilor macroscopice ale așchiilor. De asemenea, s-au dezvoltat modele numerice pentru simularea procesului de frezare plan-frontală, care au impus determinarea comportamentului termo-mecanic al oțelului dur 55NiCrMoV7. O parte dintre rezultatele acestor cercetări au fost comunicate la manifestări științifice sau au fost publicate în lucrări științifice.

Cu o deosebită considerație exprim profunde mulțumiri *conducătorilor științifici* ai prezentei teze de doctorat, domnului prof. univ. dr. ing. Eduard Laurențiu NIȚU și domnului maître de conférences dr. ing. Claudiu BĂDULESCU. Doresc să îmi exprim recunoștința pentru sprijinul constant, îndrumarea, înțelegerea și încrederea deplină pe tot parcursul elaborării tezei de doctorat.

Exprim sincere mulțumiri membrilor *Comisiei de îndrumare și integritate academică*: doamnei prof.univ.dr.ing. Daniela Monica IORDACHE, domnului conf.univ.dr.fiz. Cătălin Marian DUCU, domnului conf.univ.dr.ing. Alin Daniel RIZEA și domnului prof.univ.dr.ing. Bogdan CHIRIȚĂ. În egală măsură doresc să mulțumesc și domnului prof.univ.dr.ing. Ștefan TABACU pentru sprijinul acordat în înțelegerea funcționalității și utilizării unor echipamente de cercetare.

Adresez mulțumiri colegilor din Centrul Regional de Cercetare - Dezvoltare pentru materiale, procese și produse inovatoare destinate industriei de Automobile (CRC&D-Auto) din Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București - Centrul Universitar Pitești, în special domnului CSII dr.fiz. Denis Aurelian NEGREA, pentru sprijinul în realizarea imaginilor de microscopie electronică. De asemenea, adresez mulțumiri colegilor de la Institut de Recherche Dupuy de Lôme (IRDL) din École Nationale Supérieure de Techniques Avancées (ENSTA), mai ales domnului dr.ing. Camille CAISSO, pentru sprijinul acordat la realizare încercărilor dinamice pe bare cu presiune de tip Hopkinson.

Adresez mulțumiri doamnei Prof.univ.dr.ing. Oana DODUN-DES-PERRIES de la Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, domnilor Prof.univ.dr.ing. Sever Gabriel RACZ de la Universitatea „Lucian Blaga” din Sibiu, Prof.univ.dr.ing. Liviu Daniel GHICULESCU și Prof.univ.dr.ing. Adrian Constantin CLENCI de la Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București pentru comentariile și recomandările adresate în cadrul *Comisiei de evaluare și susținere publică a tezei de doctorat*.

Exprim profunda mea recunoștință familiei mele, colegilor din departamentul de Fabricație și Management Industrial din Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București - Centrul Universitar Pitești, pentru sprijinul moral și înțelegerea oferite pe perioada desfășurării studiilor de doctorat.

Activitățile din cadrul studiilor doctorale s-au desfășurat la Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București - Centrul Universitar Pitești (CRC&D-Auto și DFMI) și la ENSTA (IRDL) Brest, conform Contractului de codirecție internațională de doctorat încheiat între cele două instituții (la momentul semnării între Universitatea din Pitești și ENSTA Bretagne), începând cu 01.05.2021. Stagiile de doctorat efectuate la ENSTA Brest (aprilie-iulie 2022 și 2023) au fost finanțate de CAMPUS FRANCE, prin dosarele cu numerele 134654Z și 114422T, în urma câștigării prin competiție națională de proiecte doctorale organizată de Institutul Francez din România a unei Burse a Guvernului Francez în anul 2021 (BGF2021).

Claudiu Ionuț MALEA

Introducere

Cu toate că noile tehnologii de fabricație, precum prelucrarea aditivă, electroeroziunea și prelucrarea laser, au cunoscut o dezvoltare rapidă, prelucrările prin așchiere rămân indispensabile datorită preciziei, flexibilității și eficienței lor în numeroase aplicații industriale, precum cea auto, aerospațială, petrolieră etc. Un interes major îl prezintă frezarea metalelor dure în industria ștanțelor și matrițelor, unde materialele utilizate depășesc durități de 45 HRC.

Studiul proceselor de așchiere, în special al așchierii metalelor dure, este esențial pentru îmbunătățirea productivității, calității suprafețelor și durabilității sculelor așchietoare. Cercetările actuale sunt orientate către optimizarea regimului de așchiere și utilizarea unor materiale avansate pentru scule și a diferitelor medii de lucru, dezvoltarea unor metode predictive și strategii adaptive de prelucrare, dezvoltarea de modele numerice etc. În acest context, cercetarea-dezvoltarea proceselor de frezare a metalelor dure rămâne un domeniu de interes major pentru industria modernă, susținând inovarea și sustenabilitatea proceselor de fabricație.

Activitățile de cercetare-dezvoltare din cadrul programului de doctorat se concentrează pe cercetarea procesului de frezare plan-frontală în mediu de prelucrare uscat a oțelului dur 55NiCrMoV7, utilizat în industria ștanțelor și matrițelor.

* * *

În prima parte a tezei de doctorat, pe baza analizei critice a stadiului actual al cercetării-dezvoltării proceselor și sistemelor de frezare a metalelor dure, se prezintă mai multe concluzii importante și relevante: clasificarea metalelor dure; tipuri de sisteme tehnologice de prelucrare și echipamente de cercetare utilizate; prelucrabilitatea metalelor dure; medii de prelucrare folosite; caracteristici ale parametrilor de proces la prelucrarea acestor metale; mecanisme de formare a așchiilor și aspecte caracteristice ale morfologiei acestora; mecanisme de uzură și tipuri de uzură ale sculelor așchietoare; criterii de stabilire a durabilității sculelor așchietoare; aspecte ale calității suprafețelor prelucrate și aspecte legate de modelarea și simularea proceselor de frezare.

În a doua parte a tezei de doctorat, pe baza datelor și concluziilor desprinse din analiza stadiului actual, se formulează direcțiile și obiectivul principal al activităților de cercetare-dezvoltare din cadrul doctoratului: *dezvoltarea prin cercetare teoretico-experimentală și modelare numerică a procesului și sistemului de prelucrare prin frezare plan-frontală a oțelului dur 55NiCrMoV7*.

În continuarea tezei de doctorat se elaborează metodologia de cercetare-dezvoltare pe baza căreia se realizează standuri experimentale pentru studiul procesului de frezare pentru: studiul forțelor de așchiere, studiul temperaturilor din proces și pentru studiul uzurii plăcuțelor așchietoare. Se utilizează tehnica planurilor experimentale, metoda suprafețelor de răspuns și metodologia ANOVA pentru stabilirea influenței regimului de așchiere asupra parametrilor de proces, dimensiunilor macroscopice ale așchiilor și a calității suprafețelor prelucrate. Se realizează o analiză aprofundată pentru frezarea de degroșare și de semifinisare, în legătură cu temperaturile din proces și forțele de așchiere la frezarea cu un singur dinte și o analiză aprofundată a morfologiei așchiilor detașate în urma prelucrării în aceste condiții. Se dezvoltă un studiu privind influența uzurii plăcuțelor așchietoare (stabilită prin trei strategii de analiză a uzurii: unidimensională - *VB*, bidimensională - *WA* și tridimensională - *WV*) asupra parametrilor de proces și a calității suprafețelor prelucrate. Este caracterizat comportamentul termo-mecanic al oțelului dur 55NiCrMoV7, pe baza legii constitutive Johnson-Cook și a legii de rupere a materialului, pentru care s-au realizat diferite încercări cvasi-stactice și dinamice la tracțiune sau forfecare. În final, sunt dezvoltate două modele numerice ale procesului de frezare plan-frontală, pentru un regim de frezare de degroșare și de semifinisare, iar simulările realizate cu acestea au permis analiza fenomenelor asociate formării așchiilor: forțele de așchiere, temperaturile maxime din proces și dimensiunile macroscopice a așchiilor.

La finalul tezei se prezintă concluziile finale și contribuțiile principale aduse la dezvoltarea procesului și sistemului de frezare plan-frontală a oțelului dur 55NiCrMoV7, importanța științifică și practică a tezei de doctorat, precum și perspective ale dezvoltării proceselor și sistemelor de frezare a metalelor dure.

Se menționează faptul că, acolo unde nu sunt indicate unitățile de măsură ale unor mărimi, acestea sunt exprimate astfel: lungimile în milimetri (mm), masa în kilograme (kg) și temperaturile în grade Celsius (°C).

Partea I.

Stadiul actual al cercetării-dezvoltării și aplicațiilor industriale ale prelucrării prin frezare a metalelor dure

1. Procedee de prelucrare prin frezare a metalelor dure

1.1. Materiale metalice dure

Din grupa H fac parte o serie variată de fonte cu duritate ridicată, încadrate în subgrupele H1 și H2, și o serie importantă de oțeluri utilizate mai ales în industria ștanțelor și matrițelor, care sunt încadrate în subgrupele H3 și H4. Metalele dure din subgrupa H3 au o duritate de peste 45 HRC, în timp ce metalele extradure din subgrupa H4 au durități de peste 55 HRC. Astfel, în această categorie pot fi incluse totalitatea materialelor și aliajelor metalice a căror duritate poate fi crescută intenționat, prin tratamente termice de călire-revenire, pentru a le schimba proprietățile, în special cele legate de duritatea acestora. Această clasificare a metalelor cu durități de peste 45 HRC este în bun acord cu cercetările prezentate în literatura de specialitate [7,8], cu clasificările utilizate în industria ștanțelor și matrițelor [9] sau cele ale producătorilor de scule așchietoare [4,10,11].

În funcție de aplicațiile cărora le sunt destinate aceste aliaje, în general pentru diverse *scule*, mai ales din industria de ștanțe și matrițe, acestea pot fi clasificate conform standardelor americane – AISI/ SAE, în funcție de domeniul de aplicare [1,16] astfel:

- *Oțeluri pentru scule rezistente la șocuri.*
- *Oțeluri pentru scule destinate prelucrărilor prin deformare la rece.*
- *Oțeluri pentru scule răcite în apă.*
- *Oțeluri pentru scule destinate prelucrărilor prin deformare la cald.*
- *Oțeluri pentru scule cu destinație specială - 55NiCrMoV7/ AISI L6.*
- *Oțeluri rapide pentru scule.*

1.2. Procedee de prelucrare prin frezare

Metoda prelucrării prin așchiere este una dintre cele mai răspândite la nivel global, fiind posibilă prelucrarea unei game mari de materiale metalice, ceramice, polimeri și compozite. Principalele procedee de prelucrare sunt strunjirea, frezarea, găurirea și rectificarea, deosebindu-se în mod principal prin cinematică, forma sculei și modalitatea de formare și evacuare a așchiilor. Frezarea este un procedeu de așchiere cu particularitatea că mișcarea principală este realizată de scula așchietoare, numită freză, iar deplasarea relativă a acesteia față de semifabricat se poate realiza în orice direcție. Prin frezare se pot realiza piese cu suprafețe plane, suprafețe profilate, suprafețe cu forme complexe sau suprafețe cilindrice [17].

Sculele așchietoare se aleg în funcție de procedeul de generare a suprafeței și de materialul piesei de prelucrat. Valorile parametrilor regimului de așchiere se stabilesc în funcție de materialul de prelucrat, scula utilizată, condițiile de prelucrare stabilite (degroșare, semifinisare, finisare) și calitatea prescrisă suprafeței de realizat, în raport cu rigiditatea mașinii-unelte [12,18], în ordinea: adâncime de așchiere, avans pe dinte, viteză de așchiere, pentru o durabilitate T_p impusă sculei.

1.3. Procesul formării așchiilor la prelucrarea metalelor dure

Prelucrările prin așchiere constau în îndepărtarea unui adaos de prelucrare cu ajutorul unei scule așchietoare pentru realizarea suprafeței prescrisă în documentația tehnologică. Adaosul de prelucrare este îndepărtat sub formă de așchii, iar modul de formare a acestora și morfologia lor depinde esențial de tipul de material prelucrat. La prelucrarea materialelor din grupele P – oțeluri moi, M – oțeluri inoxidabile, S – oțeluri speciale rezistente la temperatură și șocuri și H – oțeluri dure și extradure, așchiile se formează sub forma unor planuri de forfecare [21,22]. Pentru materialele din grupa K –

fonte, așchiile au aspect sfărâmicios. La prelucrarea materialelor din grupa H, în special cele cu durități peste 60 HRC, așchiile pot avea, de asemenea, aspect sfărâmicios. Pentru grupa N – nemetale și aliaje din cupru, magneziu și aluminiu așchiile au o formă continuă.

Formarea așchiilor la prelucrarea prin așchiere ortogonală a unui oțel 100Cr6 cu o duritate de 730 HV [25,26], distingându-se următoarele stadii:

I – *Faza inițială de contact*: tăișul sculei V intră în contact cu piesa și solicită materialul la compresiune, determinând formarea unei fisuri pe suprafața materialului, punctul P. Se generează astfel planul de forfecare ce cuprinde punctele V și P, la un unghi de forfecare α în raport cu viteza de așchiere.

II – *Faza deformării plastice*: adaosul de prelucrare este comprimat, distanța dintre punctele P și V se micșorează, iar grosimea așchiei în formare scade între aceste două puncte. Temperatura locală atinge valori mari și materialul poate suferi transformări de fază (în acest exemplu, structură de martensită).

III – *Faza de inițiere a formării micro-așchiei*: datorită vitezelor mari de deformare distanța dintre punctele P și V se micșorează din ce în ce mai mult, iar materialul comprimat se deformează în jurul punctului P.

IV – *Faza de formare a micro-așchiei*: distanța dintre punctele P și V dispare aproape complet, lăsând impresia că această micro așchie se poate detașa. În schimb, se formează o nouă fisură la nivelul suprafeței și procesul se repetă într-un alt plan de forfecare, formându-se un nou volum de material. Acest ciclu se repetă până când scula iese din așchiere și formează o așchie completă.

Studiul morfologiei așchiilor este obiectivul mai multor lucrări științifice [28,30,31]. Procesul de formare a așchiilor și forma acestora este analizată prin intermediul unor indicatori, dintre care se remarcă: p_c - pasul între vârfuri, t_p - înălțimea vârfurilor, t_v - înălțimea văilor, α - unghiul de forfecare și β este unghiul de bombare, precum și gradului de segmentare a așchiilor, G [32], definit prin ecuația:

$$G = \frac{t_p - t_v}{t_p} \quad (1.3.1)$$

1.4. Uzura și durabilitatea sculelor așchietoare

Uzura sculelor așchietoare este determinată de solicitările termo-mecanice din timpul proceselor specifice formării așchiilor (vezi §1.3). La prelucrarea metalelor dure prin frezare uzura sculei așchietoare este factor determinat pentru eficiența prelucrării, care influențează deopotrivă calitatea suprafeței generate [33,34].

Standardul ISO 8688-1: 1989 (E) [35] descrie posibilitățile de uzare a muchiilor așchietoare, modalitatea de evaluare a uzării prin măsurarea anumitor defecte ce pot apărea pe acestea, dar și o bună parte a valorilor limită admise pentru criteriile de uzare. Aceste uzări pot fi de tipul: uzură abrazivă pe fața de așezare - VB ; uzură abrazivă pe fața de degajare - KT ; ciobire - CH ; fisurare - CR ; uzură prin exfoliere - FL ; deformare plastică - PD ; uzură catastrofală - CF și uzură adezivă - BUE .

Durabilitatea sculei este unul dintre cei mai importanți indicatori de măsurare a performanței proceselor de așchiere, ce afectează direct costul de fabricație. Este definită ca fiind durata de utilizare continuă, în aceleași condiții de prelucrare, până ca scula să atingă un criteriu de uzură [19]. De asemenea, durabilitatea poate fi definită și prin volumul de material îndepărtat până la atingerea unui criteriu de uzură.

1.5. Calitatea suprafețelor prelucrate prin așchiere

Calitatea suprafețelor prelucrate se referă la starea suprafețelor și proprietățile straturilor superficiale rezultate în urma generării acestora prin așchiere și la influența pe care o au acestea în exploatarea pieselor obținute. Pe lângă precizia dimensională a suprafețelor prelucrate, alte două elemente principale descriu calitatea suprafețelor. Primul se referă la caracteristicile geometrice și macrostructurale, exprimate prin topografia suprafețelor prelucrate. Acestea sunt caracterizate, în

special, prin parametrii de rugozitate, care sunt determinați conform standardului ISO 4287:1997 (E/F) [40]. Principalul parametru ce caracterizează rugozitatea este media aritmetică a profilului, R_a . Al doilea element se referă la caracteristicile microstructurale ale straturilor superficiale și proprietățile fizico-mecanice ale acestora. Dintre acestea, cel mai des utilizate sunt duritatea stratului superficial, caracterizată prin duritatea Vickers (descrișă în standardul ISO 6507-1:2018 (E) [41]) și tensiunile remanente.

1.6. Prelucrabilitatea prin așchiere a metalelor dure

Noțiunea de prelucrabilitate, în limba engleză *machinability*, a apărut pentru prima dată în lucrarea lui Taylor [39] din 1907, în care este prezentată și corelația între durabilitatea sculelor așchietoare și viteza de așchiere utilizată în prelucrare. Prelucrabilitatea prin așchiere se poate defini, într-o manieră simplă, prin ușurința de îndepărtare a adaosului de material de către scula așchietoare în procesul de așchiere [43]. În realitate, noțiunea de prelucrabilitate este mult mai complexă, fiind influențată de mai mulți factori, iar pentru evaluarea acesteia sunt utilizați mai mulți parametri [42].

Prelucrarea suprafețelor funcționale ale pieselor realizate din metale dure (definite în §1.1) prezintă mai multe dificultăți, de aceea cercetările care vizează prelucrabilitatea acestora sunt numeroase [7,8,43,45]. Alături de aceste metale cu durități de peste 45 HRC se remarcă și o altă categorie de materiale greu de prelucrat, cum sunt aliajele de nichel, crom sau titan, care în literatura de specialitate au terminologiile *Iconel*, *Hastelloy*, *Stellite* sau *super-alloys*. Aceste materiale sunt catalogate ca fiind dificil de prelucrat, deși nu au neapărat durități de peste 45 HRC [8,46].

1.7. Aplicații industriale ale procedeelor de frezare a metalelor dure

Oțelul **55NiCrMoV7** poate avea o duritate crescută până la 60 HRC și are o rezistență ridicată la solicitările termice. De aceea, acesta poate fi utilizat realizarea matrițelor care sunt încălzite pentru operații de forjare sau de injecție a maselor plastice. Această aplicabilitate a rezultat ca urmare a cercetărilor referitoare la utilizarea lui la fabricarea diferitelor tipuri de matrițe.

Lippold și alții [56] au utilizat o matriță din oțelul **55NiCrMoV7** cu o duritate de 51 HRC pentru o operație de deformare volumică la cald pentru a deforma piese din oțel 42CrMo4 la o temperatură de 1050°C pentru 500 cicluri de prelucrare. Ei au concluzionat că matrița realizată din acest material prezintă o rezistență mecanică bună și integritate dimensională ridicată atunci când sunt utilizate la mai multe cicluri de prelucrare.

Sengül și alții [57] au comparat eficiența matrițelor cel mai des utilizate în industrie, care sunt realizate din oțeluri de tipul X38CrMoV5-3, X37CrMoV5-1, X40CrMoV5-1, **55NiCrMoV7**, 32CrMoV12-28, X35CrMoV5-1 și X38CrMoV5-3 și sunt utilizate pentru forjarea la cald. Ei au utilizat diverse metode de optimizare multicriteriale în care au fost utilizate 7 criterii de selecție: duritatea, tenacitatea, rezistența la uzură la temperaturi înalte, rezistența la rupere, prelucrabilitatea, conductivitatea termică și costul de producție. Din acest studiu a rezultat că matrițele realizate din oțelurile X38CrMoV5-3 și **55NiCrMoV7** au printre cele mai bune caracteristici de exploatare, având o rezistență ridicată la uzare, fiind astfel foarte potrivite pentru aplicațiile de forjare la cald.

2. Studii experimentale privind procesele de frezare a pieselor din metale dure

Stadiul actual al cercetărilor experimentale privind procesele de frezare a pieselor din metale dure, sintetizat în acest capitol, include și un studiu realizat de autorul tezei de doctorat [14]. Sunt prezentate principalele elemente ale sistemelor de cercetare experimentală utilizate în procesele de frezare. Sunt descrise principalele caracteristici ale parametrilor de proces, ale morfologiei așchiilor detașate, ale mecanismelor de uzare a sculelor și particularități ale calității suprafețelor prelucrate la frezarea metalelor dure. Astfel, cercetările prezentate permit alegerea unor metode și mijloace adecvate pentru realizarea studiilor doctorale și stabilirea unor caracteristici relevante pentru cercetare și industrie.

2.1. Elemente ale sistemelor de cercetare experimentală

2.1.1. Tipuri de procedee de frezare studiate

Procedeele de prelucrare prin așchiere au cunoscut multe îmbunătățiri în ultimii 100 de ani, de la prelucrarea convențională cu viteze mici de așchiere, la prelucrări complexe sau/ și cu viteze mari de așchiere. Această evoluție a fost determinată, în principal, de dezvoltarea sculelor așchietoare cu geometrii complexe, fabricate din materiale extra dure, și a cinematicii mașinilor-unelte, în special a celor comandate numeric [61]. O parte dintre aceste direcții de dezvoltare, specifice procedeelor de frezare, sunt următoarele:

- Prelucrarea prin așchiere în medii uscate [62], ce se pretează foarte bine pentru așchieria metalelor dure cu durități de peste 45 HRC [43]. Astfel, nu mai sunt necesare operații ulterioare de tratament termic, electroeroziune sau rectificare, ceea ce conduce la un avantaj economic.
- Prelucrarea cu viteze mari de așchiere [7].
- Prelucrările prin frezare elicoidală [63].
- Frezarea după o traiectorie toroidală [64].

2.1.2. Elemente ale sistemelor tehnologice de prelucrare

• Utilaje folosite la prelucrarea prin frezare a metalelor dure

Pentru prelucrarea metalelor dure, sistemele tehnologice de prelucrare trebuie să îndeplinească unele caracteristici specifice, în special legate de rigiditatea acestora. La proiectarea mașinilor-unelte utilizate la prelucrarea metalelor dure sunt urmărite mai multe criterii, cum ar fi: utilajul să fie rigid, să poată avea o productivitate cât mai mare cu o precizie de prelucrare mărită, dar și un cost de producție cât mai scăzut [42]. De aceea sunt utilizate mașini-unelte cu rigiditate mare, corpul acestora fiind realizat din fontă cu o capacitate ridicată de a suporta vibrațiile [60] ce pot apărea în procesele de așchiere.

• Scule utilizate la prelucrarea prin frezare a metalelor dure

Oțelurile rapide pentru scule - HSS prezintă cea mai mică duritate, au cea mai mare tenacitate și sunt utilizate în prelucrarea oțelurilor cu durități mici. Carburile metalice au aplicabilitate largă la prelucrările prin așchiere și pot avea sau nu acoperiri de materiale pentru creșterea durității acestora. Există și scule din carburi metalice în combinație cu materiale ceramice cu acoperiri sau fără acoperiri - CERMET. Sunt utilizate scule din materiale ceramice, nitruură cubică de bor - CBN sau din diamante sintetice - PCD, ce prezintă și cea mai mare duritate cu cea mai mică tenacitate [19].

• Portscule utilizate pentru orientarea și fixarea frezelor la prelucrarea metalelor dure

În prelucrările prin frezare a metalelor dure se utilizează, de obicei, port-freze hidraulice sau cu tehnologii prin fretare, când zona de orientare și fixare a sculelor se încălzește pentru permite o asamblare prin presare. Cel mai des utilizate dispozitive de orientarea și fixarea sculelor utilizate la frezarea metalelor dure sunt port-frezele pentru scule modulare utilizate la prelucrare suprafețelor

plan-frontale, port-freze mecano-hidraulice cu pensete de precizie sau port-freze cu sistem de fretare, ce sunt utilizate pentru frezele cilindro-frontale.

2.1.3. Mediul de prelucrare

Prelucrările prin aşchiere pot fi realizate în diverse medii de prelucrare: mediu uscat, cu aport mic de lichide de răcire, cu uleiuri biovegetale, cu lichid de răcire-ungere la presiuni înalte, cu soluții criogenice sau hibride.

2.1.4. Sisteme și echipamente de măsurare și înregistrare a parametrilor de proces

Interesul privind cercetările experimentale pentru monitorizarea vibrațiilor, uzurii sau durabilității sculelor este la nivel mondial [103]. În cazul prelucrărilor prin frezare, cercetările actuale sunt orientate, în ordine descrescătoare, spre studiul forțelor, emisiilor acustice vibrațiilor, temperaturii, energiei și puterea necesară din timpul procesului.

• Sisteme și echipamente utilizate pentru măsurarea **forțelor** în procesele de frezare

Soluții de dinamometre cu mărci tensometrice au fost dezvoltate de mai mulți cercetători [109,110,112,114], acestea putând măsura forțe de până la ± 50 kN. În cele mai multe cazuri pot fi măsurate forțele în sistemul de măsurare după cele trei direcții X, Y și Z, dinamometrul fiind staționar [111] și montat direct pe masa mașinii-unelte. S-au dezvoltat soluții de dispozitive elastice cu inele octogonale [115] dispuse la 90° două câte două la jumătatea dispozitivului [114] sau în colțurile dispozitivului [115]. De asemenea, există soluții de dispozitive staționare [113] construite cu materiale piezoelectrice.

• Sisteme și echipamente utilizate pentru măsurarea **temperaturilor** în procesele de frezare

Tehnica termografică permite determinarea temperaturii la nivelul sculei aşchietoare [121], în câmp termografic, prin utilizarea camerelor termografice [63,74,122], sau punctiform, prin utilizarea pirometrelor [90]. Dezavantajul utilizării acestor metode de măsurare a temperaturilor este că, în cazul folosirii mediilor răcire-ungere, câmpul de observare este obturat de prezența acestor medii, care reduc căldura degajată în proces. Metodele de măsurare a temperaturilor prin contact utilizează tehnici termoelectrice cu termocupluri.

2.2. Studiul parametrilor de proces

2.2.1. Forțele de aşchiere

Unul dintre cei mai importanți parametri analizați în procesele de frezare este forța de aşchiere. Aceste studii sunt realizate pentru a stabili rezistența materialului la formarea aşchiilor, dar și pentru permite alegerea mașinilor-unelte cu rigidități suficient de mari pentru realizarea preciziei de prelucrare. Studiul forțelor de proces este utilizat, deopotrivă, la stabilirea caracteristicilor sculelor aşchietoare, cum ar fi materialul din care sunt fabricate acestea care trebuie să aibă o duritate suficient de mare și o integritate dimensională bună și a geometriilor favorabile reducerii solicitărilor din timpul aşchierii. De asemenea, studiul forțelor de aşchiere permite orientarea procesului de aşchiere (alegerea valorilor parametrilor regimului de aşchiere) pentru a asigura o durabilitate mare a sculei și o calitate corespunzătoare a suprafeței prelucrate.

De exemplu, în studiile experimentale prezentate în lucrarea [125] forțele de aşchiere au fost măsurate utilizând un dinamometru cu material piezoelectric și analizate la nivel global, pentru întreg procesul de frezare. S-a evidențiat astfel evoluția forțelor de aşchiere în sistemul de măsurare X, Y și Z, care prezintă o zonă inițială și una de final a aşchierii, în care forțele de aşchiere cresc sau descresc în funcție de nivelul de solicitare a sculei. Zona centrală a aşchierii se prezintă ca o importantă zonă de stabilitate, în care poate fi observată amplitudinea forțelor de aşchiere. În această zonă de stabilitate se realizează analizele avansate a forțelor maxime sau se observă evoluția forțelor pe câte un dinte ce formează o singură aşchie sau pentru o rotație completă a frezei aflată în procesul de frezare.

2.2.2. Temperaturile din proces

Analiza temperaturilor de proces este foarte importantă în evaluarea proceselor de frezare, deoarece temperaturile generate în proces o influență directă asupra calității suprafețelor prelucrate

și asupra uzurii și durabilității sculelor așchietoare [62]. Prin utilizarea metodelor și tehnicilor prezentate în subcapitolul §2.1.4 se pot măsura temperaturile din procesul de frezare și fluxurile de temperatură în timpul procesului de frezare.

2.3. Studiul morfologiei așchiilor

Analiza morfologiei așchiilor [130] generate reprezintă o altă cale de investigare a mecanismelor și intensității proceselor de așchiere, deoarece oferă parametri măsurabili care permit determinarea indirectă a gradului de uzare a sculelor sau a calității suprafețelor prelucrate. Morfologia așchiei se referă la forma și dimensiunile așchiilor, împreună cu caracteristicile structurale ale materialului din așchie. Aceasta oferă informații importante privind mecanismul de separare a materialului și integritatea suprafeței prelucrate, fiind un mijloc de apreciere a performanței procesului de frezare [31,131]. Principalele aspecte legate de morfologia așchiei sunt prezentate după cum urmează.

2.3.1. Caracteristici macroscopice ale așchiilor

Principalele caracteristici geometrice macroscopice ale așchiilor rezultate în procesul de frezare sunt raza de ondulare sau diametrul așchiilor, înălțimea acestora [132], dar și lungimea așchiei deformate atunci când sunt utilizate echipamente tomografice specializate [133].

2.3.2. Caracteristici microscopice și fizico-mecanice ale așchiilor

Pentru procesele de așchiere a metalelor dure este acceptat faptul că modelul de formare a așchiilor este cel al planurilor de forfecare [24], iar forma microscopică a așchiilor detașate are aspectul unor dinți de fierăstrău (*saw-tooth*, în limba engleză).

Principalele caracteristici microscopice dimensionale ale așchiilor, evidențiate în cercetările analizate, sunt: pasul dintre planele de forfecare, înălțimea dinților de fierăstrău, adânciturile și media dintre acestea [32,136]. Un exemplu cu aceste caracteristici microscopice ale așchiilor se prezintă în figura 2.3.1 [28,30,137].

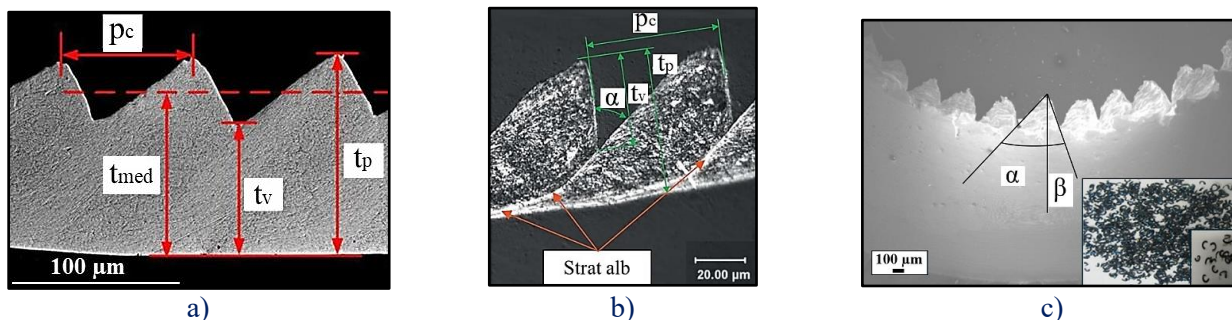


Figura 2.3.1. Parametrii de segmentare ai așchiilor, adaptat din lucrările [28,30,137].

2.4. Studiul uzurii și durabilității sculelor

2.4.1. Mecanisme de uzură a sculei

Uzura abrazivă de tip *VB* are o evoluție progresivă [144], caracterizată prin mai multe stadii, figura 2.4.1, și este criteriul de uzare cel mai des utilizat în exploatarea sculelor așchietoare. Majoritatea lucrărilor științifice [143–145] analizează această uzare a frezelor, de tip *VB* de pe fața de așezare. Însă, pentru înțelegerea mecanismelor de uzare a sculei sau/ și a influențelor acesteia asupra calității suprafețelor prelucrate, acest tip de analiză poate fi insuficient [143]. De aceea, studiul unei arii uzate a unei fețe a sculei sau a volumului de material îndepărtat de pe sculă reprezintă o direcție nouă de cercetare [142].

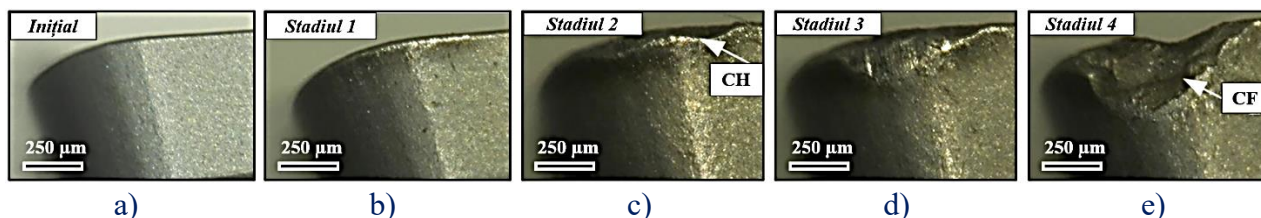


Figura 2.4.1. Analiză optică a evoluției uzurii abrazive VB de pe fața de așezare [144]:
a) muchie la stare inițială; b) stadiul 1 de uzare; c) stadiul 2 de uzare cu apariția ciobiturilor, CH ; d) stadiul 3 de uzare cu ciobituri proeminente; e) stadiul 4 de uzare de tip catastrofal, CF .

2.4.2. Durabilitatea sculelor așchietoare

Principalul criteriu de uzură utilizat pentru determinarea durabilității sculelor așchietoare este uzura abrazivă de pe fața de așezare, VB . Producătorii de scule așchietoare utilizează, de asemenea, acest criteriu de uzură pentru durabilitatea sculelor așchietoare. De exemplu, firma SANDVIK COROMANT [149] recomandă ca uzura maximă pentru o plăcuță amovibilă din carbură metalică cu acoperiri, utilizată pentru frezarea oțelurilor dure să fie de $VB = 0,2$ mm.

2.5. Studiul calității suprafețelor prelucrate

Calitatea suprafețelor prelucrate prin așchiere este determinată de precizia dimensională, caracteristicile geometrice și macrostructurale ale suprafețelor prelucrate și caracteristicile microstructurale și fizico-mecanice ale straturilor superficiale asociate acestora (vezi §1.5).

2.5.1. Caracteristici geometrice și macrostructurale ale suprafețelor prelucrate

Suprafețele prelucrate prin așchiere prezintă caracteristici geometrice macrostructurale distincte. La frezarea pieselor din metale dure, pe suprafețele prelucrate, pot apărea mai multe tipuri de defecte (vezi §1.5). Guimaraes MCR și colaboratorii [154] au evidențiat faptul că, la frezarea cilindro-frontală a unui oțel NiCr23Fe cu un avans pe dinte de 0,3 mm/dinte, pe suprafața prelucrată apar urme de tipul unor șanțuri superficiale, cauzate de evacuarea succesivă a așchiilor. Aceste șanțuri superficiale au aspect uniform atunci când muchiile tăietoare ale plăcuței sunt noi sau au o uzare de tip VB de până la 0,2/ 0,3 mm, în funcție de materialul prelucrat (vezi §2.4).

În legătură cu parametrul de rugozitate R_a acesta este influențat astfel:

- scade odată cu creșterea vitezei de așchiere;
- crește odată cu creșterea razei la vârful sculei;
- crește odată cu creșterea uzurii sculei, VB .

2.5.2. Caracteristici microstructurale și fizico-mecanice ale straturilor superficiale

Prelucrările prin așchiere sunt însoțite de fenomene termice și mecanice în suprafața prelucrată și în vecinătatea ei. Datorită degajării de căldură, în straturile din imediata vecinătate a suprafeței prelucrate pot apărea transformări de fază ale materialului prelucrat. Pe de altă parte, lucrul mecanic necesar formării așchiilor produce deformări plastice eterogene la nivelul suprafeței prelucrate. Aceste două cauze principale conduc la modificări ale microdurităților și la generarea tensiunilor remanente în straturile superficiale ale suprafeței prelucrate prin frezare [163,164]. Din aceste motive, caracteristicile microstructurale și proprietățile fizico-mecanice ale straturilor superficiale prelucrate prin frezare sunt frecvent analizate în studiile de specialitate.

3. Studii privind modelarea și simularea numerică a proceselor de frezare

În acest capitol se prezintă o sinteză privind stadiul actual al cercetărilor în simularea numerică a proceselor de frezare, ce include și un studiu realizat de autorul tezei de doctorat [170]. Sunt descrise succint tehnicile de modelare și simulare și se prezintă diferite tipuri de legi de comportament termo-mecanic al materialelor prelucrate. Aceste două aspecte sunt prezentate din perspectiva studiilor existente și permit o mai bună poziționare în alegerea strategiei de simulare și a legii de comportament pentru materialul studiat.

3.1. Etapele modelării și simulării numerice

3.1.1. Strategii de modelare numerică

• Integrarea numerică

Durata de calcul necesară pentru simularea unor experiențe prin lansarea modelelor numerice dezvoltate este relativ mare datorită faptului că sunt probleme complexe și sunt necesare diferite scheme de discretizare a timpului de calcul. Astfel, există două scheme de integrare numerică a timpului pentru problemele statice sau dinamice și acestea sunt discretizări de tip implicit sau explicit.

• Strategia de modelare

Modelele de simulare numerică trebuie să fie capabile să abordeze probleme pentru care deformările produse în timpul simulării sunt mari. De asemenea, aceste modele trebuie să integreze fenomene tribologice, aspecte legate de producere și schimb de căldură, iar toate acestea trebuie să dea naștere unui model cu un timp de simulare rezonabil și adaptat studiilor parametrice. Sunt dezvoltate o multitudine de modele bidimensionale [186,187] ce sunt capabile să îndeplinească aceste condiții, cu rezultate promițătoare și un timp de calcul relativ scăzut. Cu toate acestea, dezvoltarea și utilizarea modelelor tridimensionale reprezintă o preocupare mai mare a cercetărilor recente [177,188].

3.1.2. Definirea geometriei modelelor numerice

Există modele bidimensionale și tridimensionale pentru definirea unor geometrii mai complexe, ce sunt mult mai adecvate simulării proceselor efective - pot fi utilizate geometrii ale sculelor puse la dispoziție de către producătorii de scule [177]. În absența acestor informații, aceste geometrii complexe a sculelor așchietoare pot fi obținute prin scanare [176], urmând ca acestea să fie utilizate în realizarea modelelor de simulare numerică [199].

3.1.3. Descrierea comportamentului termo-mecanic al materialelor metalice

Temperaturile din procesele de așchiere pot atinge valori de până la 1000°C, iar vitezele de deformare pot depăși valori de 10⁶ s⁻¹ [173], fapt ce impune o caracterizare experimentală a materialului utilizat în condiții de solicitare similare realității. Astfel, o gamă largă de încercări mecanice este necesară pentru a caracteriza comportamentul materialului de prelucrat. În funcție de tipul modelului ales, se definesc și tipurile de încercări asociate, precum și condițiile experimentale necesare (temperatura, viteza de solicitare, tip de solicitare etc.).

Lalwani [206] a introdus legea de curgere a materialelor Johnson-Cook [37] în modelul analitic Oxley în 2009, definită în ecuația (3.1.1). Acesta este un model termo-elasto-vâsco-plastic, ai cărui parametri se identifică frecvent prin încercări simple monotone și dinamice la diferite temperaturi [203,207].

$$\bar{\sigma} = \underbrace{(A + B \cdot \varepsilon_{pl}^n)}_{\text{deformare}} \underbrace{\left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varepsilon}_{pl}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)}_{\text{viteza de deformare}} \underbrace{\left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_t - T_r}\right)^m\right)}_{\text{temperatura}} \quad [MPa] \quad (3.1.1)$$

unde: A este limita de elasticitate a materialului, în MPa; B este modulul de ecruisare, în MPa; C este coeficientul vitezei de deformare; T_t este temperatura de topire a materialului, în °C; m este coeficientul de dilatare termică.

Dincolo de caracterizarea comportamentului neliniar al materialului modelat, în cadrul simulării aşchierii este necesară şi cunoaşterea următorului set de parametrii pentru a putea modela concret fenomenele fizice ce însoţesc formarea şi desprinderea aşchiei, printre care cei mai importanţi sunt următorii: densitate, ρ [kg/m³]; comportamentul elastic: modulul lui Young, E [MPa] şi coeficientul lui Poisson, ν [-], conductivitate termică, κ [W/m°C]; fracţia de transformare a lucrului mecanic de deformare în căldură [-]; căldura specifică, c_p [J/kg°C]; şi comportamentul plastic al materialului caracterizat printr-un model de comportament.

3.1.4. Descrierea mecanismelor de rupere a materialelor metalice

Într-un model de simulare realizat prin metoda elementelor finite, iniţierea formării aşchierii are loc atunci când parametrul scalar ω_s depăşeşte valoarea 1 [213], aşa cum este prezentat în ecuaţia (3.1.2).

$$\omega_s = \int_0^{\varepsilon_{pl}^s} \frac{d\varepsilon_{pl}}{\varepsilon_{pl}^s(\theta_s, \dot{\varepsilon}_{pl}^s)} \quad (3.1.2)$$

unde: ω_s este parametrul scalar; ε_{pl}^s este deformaţia plastică echivalentă; θ_s este tensiunea de forfecare relativă; $\dot{\varepsilon}_{pl}^s$ viteza echivalentă de deformare plastică.

Evoluţia deteriorării materialului este definită de un criteriu [202] exprimat cu ecuaţia (3.1.3).

$$\sigma_D = (1 - D)\bar{\sigma} \quad (3.1.3)$$

unde: σ_D este tensiunea ce caracterizează deteriorarea materialului; D este evoluţia deteriorării şi este un parametru ce variază între valoare 0 şi 1.

Un alt criteriu de determinare a evoluţiei deteriorării este cel al energiei disipate la rupere [217] exprimat prin ecuaţia (3.1.4).

$$G_f = \int_{\varepsilon_{pl}^0}^{\varepsilon_{pl}^f} L_{dis} \bar{\sigma} d\varepsilon_{pl} = \int_0^{u_{pl}} \bar{\sigma} du_{pl} \quad (3.1.4)$$

unde: G_f este energia disipată.

3.1.5. Constrângerea modelelor numerice

• Condiţiile la limită

În procesele de frezare este necesar ca semifabricatul să fie fixat rigid cu elemente de orientare şi fixare, iar scula să poată realiza mişcarea de rotaţie şi de translaţie pentru a îndepărta surplusul de material sub formă de aşchii. Pentru îndeplinirea acestor considerente în modelul de simulare este necesară definirea acestor limitări, pentru o apropiere considerabilă în raport cu experimentul realizat. Cele două tipuri de condiţii la limită sunt de tip mecanic şi termic.

• Contactul şi frecarea dintre suprafeţe

Astfel, în construirea modelului numeric este importantă selectarea corespunzătoare a legii care defineşte comportamentul de frecare. Cea mai cunoscută lege de comportament este legea lui Coulomb [187,218], exprimată prin ecuaţia (3.1.5). remarcabilă prin simplitatea acesteia.

$$\mu = \frac{\tau_t}{\sigma_n} \quad (3.1.5)$$

unde: μ este coeficientul de frecare; τ_t este efortul tangenţial; σ_n este efortul pe direcţie normală la suprafaţă.

3.1.6. Discretizarea modelelor numerice

Pentru eficientizarea modelelor numerice se urmăreşte simplificarea geometriilor reale ale semifabricatelor şi, mai ales, ale sculelor utilizate în experimente. Aceste modele se discretizează (în engleză: *mesh*), împărţind domeniul modelat într-o reţea de elemente ce sunt denumite elemente

finite. Acestea sunt definite de un număr de noduri. Elementele unidimensionale sunt utilizate pentru obiecte lungi cu un profil constant, cele bidimensionale sunt utilizate pentru obiecte plane, iar cele tridimensionale sunt utilizate pentru obiecte volumice, cu geometrii complexe. Elementele bidimensionale și tridimensionale pot fi de ordinul I sau de ordinul II [202].

3.2. Strategii de validare a modelelor numerice

3.2.1. Validarea modelelor numerice prin analiza forțelor de așchiere

Pentru simularea procesului de frezare de conturare [175], rezultatele forțelor de așchiere pot fi prezentate ca o evoluție la nivelul formării unei singure așchii. Pentru validarea modelului numeric, forța obținută din simularea numerică este trasată și suprapusă cu forța de așchiere măsurată experimental. Rezultatele din simularea numerică pot fi influențate de mărimea elementelor utilizate în definirea modelului, iar diferențele obținute pot fi puse pe seama unor decalaje a datelor sau a filtrelor utilizate pentru datele obținute experimental.

3.2.2. Validarea modelelor numerice prin analiza temperaturilor din proces

Prin simularea modelelor numerice ale proceselor de așchiere se poate analiza câmpul de temperatură generat în semifabricat, sculă sau așchie. În acest scop modelul numeric trebuie să prezinte caracteristici similare cu cele necesare și pentru determinarea forțelor de așchiere prezentate în subcapitolul anterior. În analiza proceselor de frezare, valorile de temperatură rezultate în urma încălzirii semifabricatului, a sculei sau a așchiilor pot fi măsurate experimental prin utilizarea termocupleurilor sau a camerelor termografice (vezi §2.1.4). Aceste metode de măsurare, deși limitate în analiza evoluției temperaturilor de proces, oferă o bază solidă pentru validarea modelelor numerice.

3.2.3. Validarea modelelor numerice prin analiza morfologiei așchiilor

Simularea numerică a proceselor de așchiere permite, deopotrivă, obținerea morfologiei așchiilor. Având în vedere acest lucru, modelul numeric trebuie să aibă o geometrie și un comportament de material bine definite, dar mai ales o discretizare foarte fină pentru a putea reproduce fidel geometria așchiilor rezultate. Experimental, morfologia așchiilor este relativ ușor de analizat, prin metode macroscopice - *microscopie optică* [176,233] sau microscopice - *microscopie electronică* [88].

3.2.4. Validarea modelelor numerice prin analiza tensiunilor remanente

Validarea modelelor numerice poate fi realizată și pe baza analizei tensiunilor remanente [178,234] rezultate pentru anumite condiții de așchiere în suprafața prelucrată sau în stratul superficial al acesteia. Pentru ca analiza tensiunilor remanente să fie posibilă este necesar ca în modelul numeric să fie definit comportamentul plastic al materialului studiat cât mai bine din punct de vedere termomecanic. De altfel, sunt necesare și alte aspecte termice ce trebuie să fie incluse obligatoriu în model, cum ar fi coeficientul de dilatare termică, transferul de căldură, cât și o discretizare a modelului foarte fină în zonele de interes unde sunt realizate aceste măsurători. Tensiunile remanente superficiale din suprafața prelucrată sunt determinate experimental, frecvent, prin difracție cu raze X [58], care este o tehnică nedistructivă. Pentru determinarea tensiunilor remanente din stratul superficial al piesei prelucrate, la diferite adâncimi față de suprafața prelucrată, se utilizează difracția cu raze X combinată cu polizarea electro-chimică sau găurirea incrementală [50], care sunt tehnici distructive.

3.2.5. Validarea modelelor numerice prin analiza microdurităților

Simularea numerică a procesului de așchiere permite și obținerea unor hărți de distribuție a microdurității pe suprafața prelucrată sau în straturile din vecinătatea acesteia. Pentru a fi capabil să determine valorile de microduritate un model numeric trebuie să aibă caracteristici similare precum cele descrise pentru tensiunile remanente din subcapitolul anterior. Un model numeric nu este capabil să ofere informații direct de microduritate, ci ca o dependență de deformația plastică echivalentă - ϵ_{pl}^S [179,235] care, în programul de modelare și simulare numerică ABAQUS, apare ca PEEQ.

4. Concluzii privind stadiul actual al cercetării – dezvoltării și aplicațiilor industriale ale prelucrării prin frezare a metalelor dure

Analiza stadiului actual al cercetării - dezvoltării din domeniul prelucrărilor prin frezare a metalelor dure, cât și a aplicațiilor industriale asociate, prezentate în primele trei capitole ale tezei de doctorat a permis desprinderea unor concluzii relevante și importante. Această evaluare a literaturii și cercetărilor recente, evidențiază necesitatea și tendințele actuale în domeniul prelucrărilor prin frezare a metalelor dure, subliniind importanța continuării cercetărilor în acest domeniu. Principalele concluzii desprinse sunt după cum urmează.

- Materialele prelucrate prin aşchiere sunt grupate în şase categorii principale. fiind clasificate în funcţie de proprietăţile lor distincte conform ISO 513:2012, ca materiale feroase sau neferoase, metalice sau nemetalice, cu durităţi scăzute sau foarte mari. Există şi o altă grupă distinctă de materiale ce este definită de către producătorii de scule ca non-ISO, din care fac parte orice alte materiale ce nu sunt incluse în standardul menţionat, dintre care fac parte mai ales materialele compozite (vezi §1.1).

- Grupa de oţeluri dure şi extradure este una din cele şase grupe ale standardului ISO 513:2012 şi este notată cu H. Aceste oţeluri au fost supuse unor operaţii de tratament termic de călire pentru a avea o duritate de peste 45 HRC. Această grupă este împărţită în mai multe categorii, dintre care două o reprezintă oţelurile cu duritate crescută. Din prima categorie de oţeluri dure fac parte cele cu duritatea cuprinsă între 45 şi 55 HRC, din care face parte şi oţelul de scule cu destinaţie specială **55NiCrMoV7**. Cea de-a doua categorie cuprinde oţelurile extradure cu o duritate de la 55 HRC până la aproximativ 68 HRC (vezi §1.1).

- Frezarea plan-frontală este cel mai utilizat procedeu de frezare, prin care se obţin suprafeţe plane. Deopotrivă, se utilizează alte procedee de frezare pentru realizarea suprafeţelor profilate sau complexe. Parametrii regimului de aşchiere la frezarea plan-frontală sunt: adâncimea de aşchiere - a_p în mm, lăţimea de aşchiere - a_e în mm, avansul pe dinte - f_z în mm/dinte şi viteza de aşchiere - v_c în m/min (vezi §1.2).

- La prelucrarea metalelor dure (cele din grupa H), aşchiile se formează sub forma unor benzi de forfecare, iar pentru oţelurile ce depăşesc 60 HRC aşchiile pot avea un aspect sfărâmiçios. Formarea aşchiilor la prelucrarea oţelurilor din metale dure se realizează în patru faze: faza iniţială de contact, faza de deformare plastică în care se formează planul de forfecare la un unghi α , faza de iniţiere a micro-aşchiei, faza de formare a micro-aşchiei. Acest ciclu se repetă pentru fiecare aşchie detaşată (vezi §1.3).

- Mecanismul de forfecare asociat formării aşchiilor la prelucrarea metalelor dure determină trei zone de forfecare: zona primară de forfecare - în zona de pătrundere a tăişului sculei în piesă, zona secundară de forfecare - între aşchie şi sculă şi zona terţiară de forfecare - între sculă şi suprafaţa piesei prelucrate. Aşchiile detaşate pot fi caracterizate morfologic prin mai mulţi parametrii dimensionali, unghiulari sau adimensionali, printre care gradul de segmentare a aşchiilor detaşate - G (vezi §1.3).

- Există mai multe tipuri de uzură specifice plăcuţelor aşchietoare utilizate la frezarea plan-frontală, care sunt prezentate în standardul ISO 8688-1: 1989 (E): uzare abrazivă pe faţa de aşezare - VB , uzare abrazivă pe faţa de degajare - KT , ciobire - CH , fisurare - CR , exfoliere - FL , deformare plastică - PD , uzare catastrofală - CF . Dintre acestea cel mai des utilizată în evaluarea uzării sculei este cea abrazivă de pe faţa de aşezare de tip - VB . Un alt tip de uzură, ce nu este prezentat în standardul menţionat, este uzura adezivă - BUE . Aceste tipuri de uzuri pot fi utilizate în definirea criteriilor de uzare pentru stabilirea durabilităţii sculelor aşchietoare (vezi §1.4).

- Evoluția teoretică a uzării sculei așchietoare se prezintă sub forma a trei stadii principale: stadiul I de tasare a muchiei așchietoare, cu uzuri de până la 0,05 mm; stadiul II de stabilitate a procesului și integritate dimensională a muchiei așchietoare; stadiul III de uzare accentuată, de peste 0,2 mm, până la atingerea unor uzuri catastrofale (vezi §1.4).

- Calitatea suprafețelor prelucrate este caracterizată prin indicatori referitori la starea suprafețelor și proprietățile straturilor superficiale. Aceștia cuprind precizia dimensională, caracteristici geometrice și macrostructurale, caracteristici microstructurale ale straturilor superficiale și proprietăți fizico-mecanice ale acestora. La nivelul suprafețelor prelucrate prin așchiere pot apărea oxizi sau defecte de suprafață cum sunt: microfisuri, macrofisuri, microcondensări ale materialului de bază, goluri, porozități sau incluziuni (vezi §1.5).

- Prelucrabilitatea materialelor prin așchiere este definită ca ușurința cu care adaosul de material este îndepărtat de către sculă și este influențată de factori indirecti și factori direcți. Factorii indirecti ce influențează prelucrabilitatea sunt în legătură cu materialele semifabricatelor și sculelor, geometriile acestora, elemente ale sistemului tehnologic de prelucrare și parametrii regimului de așchiere. Factorii direcți ce influențează prelucrabilitatea se referă la mecanismul de formare a așchiilor sau parametrii de proces. Evaluarea prelucrabilității se realizează pe mai multe căi: evaluarea durabilității sculelor așchietoare, criterii de calitate a suprafețelor prelucrate sau criterii de eficiență în îndepărtarea așchiilor și formarea preferențială a acestora (vezi §1.6).

- Există o gamă largă de produse din metale dure, care necesită prelucrări prin frezare, în special din industria ștanțelor și matrițelor. Piese realizate din metale dure pot fi de tipul matrițelor pentru injecția maselor metalice sau plastice, poansoane de tăiere, cuțite de debitat, matrițe pentru extrudare, matrițe pentru ștanțare etc. Dintre oțelurile ce pot prezenta durițăți de peste 45HRC face parte și oțelul **55NiCrMoV7**. Acesta a fost utilizat în studii pentru realizarea matrițelor de forjat la cald, rezultând o foarte bună funcționalitate în exploatare a matrițelor, constând într-o rezistență mecanică bună, rezistență ridicată la uzare și integritate dimensională ridicată după multe cicluri de lucru (vezi §1.7).

- Studiile de cercetare - dezvoltare a produselor din industria ștanțelor și matrițelor sunt orientate către procedee moderne de prelucrare prin frezare. Dintre acestea se remarcă frezarea în medii uscate, frezarea cu viteze sau avansuri mari de așchiere, frezarea după traiectorii elicoidale sau toroidale. În funcție de tipul suprafeței rezultate se remarcă frezarea plan-frontală pentru realizarea suprafețelor plane, frezarea profilată pentru realizarea unor conturi sau a buzunarelor și frezarea complexă pentru realizarea suprafețelor tridimensionale (vezi §2.1.1).

- Sistemele tehnologice de prelucrare utilizate la frezarea metalelor dure trebuie să aibă caracteristici specifice. Mașinile-unelte trebuie să aibă rigiditate ridicată și flexibilitate mare. Necesitatea realizării unor suprafețe complexe, specifice pieselor utilizate în industria ștanțelor și matrițelor, impune utilizarea de utilaje cu 3+2 axe sau 5 axe comandate numeric, roboți poliarticulari sau mașini-unelte de tip hexapod. Sculele așchietoare pot fi realizate din carburi metalice, materiale ceramice în combinație cu carburi ceramice - CERMET, materiale ceramice de tipul nitrurii cubice de bor - CBN sau diamante sintetice - PCD. Cel mai des sunt utilizate cele din carbură metalică cu acoperiri metalice sau din nitrură cubică de bor. Portsculele utilizate la frezarea plan-frontală trebuie să aibă toleranțe mici ale bătaii radiale, maximum 5 μm, și o rezistență ridicată la încovoiere, torsiune sau flambare (vezi §2.1.2).

- Prelucrările prin frezare se realizează în diferite medii de prelucrare cum sunt: uscat, cu aport mic de lichide de răcire, cu uleiuri biovegetale, cu lichid de răcire-ungere, cu soluții criogenice sau hibride. Există și studii care abordează prelucrarea oțelurilor dure cu aport suplimentar de căldură prin tehnici laser sau prin inducție etc. Frezarea oțelurilor dure se realizează frecvent în medii uscate de prelucrare, costurile de producție putând să scadă cu până la 11%. Există cercetări realizate pe oțelul de tipul **55NiCrMoV7** cu o duriță de 48 HRC în medii criogenice (vezi §2.1.3).

- Direcțiile actuale de implementare a digitalizării și conceptului de Industrie 4.0 necesită realizarea de sisteme tehnologice de prelucrare ce poate să îndeplinească funcții de autoînvățare, autoadaptare, autodecizie și, nu în ultimul rând, de autoexecutare. Pentru acest lucru este necesară

monitorizarea fabricației. Dintre cele mai utilizate sisteme de monitorizare în procesele de frezare fac parte cele referitoare la forțe, vibrații sau temperaturi (vezi §2.1.4).

- Măsurarea forțelor în procesele de frezare se realizează prin utilizarea dinamometrelor cu material piezoelectric sau cu mărci tensometrice pe cele trei direcții de măsurare X, Y și Z. Aceste tipuri de dispozitive pot măsura și momentele de torsiune în funcție de sistemul de montare a lor, care poate fi staționar - montat direct pe masa mașinii-unelte sau rotativ - montat pe arborele principal al mașinii-unelte (vezi §2.1.4).

- Forțele de proces pot fi măsurate în sistemul de măsurare în direcțiile X, Y și Z sau în sistemul efectiv al sculei. Analiza acestora poate fi efectuată pe întreg procesul de prelucrare sau la formarea unei singure așchii. La frezarea oțelurilor dure se remarcă că la creșterea vitezei de așchiere forțele de așchiere descresc, iar la creșterea avansului pe dinte forțele de așchiere cresc. Pentru regimuri de așchiere de finisare și semifinisare forțele ating valori de 200 N, în timp ce pentru regimuri de așchiere de degroșare forțele tind să depășească 1200 N (vezi §2.2.1).

- Pentru măsurarea temperaturilor de proces cel mai des sunt utilizate camerele termografice și termocuplurile. Prin tehnica termografică pot fi observate temperaturile pe întreg procesul de așchiere sau pot fi înregistrate valorile maxime. Această tehnică este limitată de imposibilitatea observării zonelor de contact dintre sculă, așchie și piesă, unde temperaturile sunt cele mai ridicate. Termocuplurile sunt utilizate pentru măsurarea valorilor de temperatură la formarea așchiilor, prin montarea lor pe semifabricat sau a celor din sculă, prin montarea lor în plăcuțele amovibile ale frezelor modulare (vezi §2.1.4).

- Valorile parametrilor regimului de așchiere au o influență semnificativă asupra temperaturilor din proces. Odată cu creșterea vitezei de așchiere la prelucrarea oțelurilor cu duritate ridicată temperaturile cresc. La viteze de așchiere mici, de până la 100 m/min, temperaturile au valori de până la 300°C, iar pentru viteze ce depășesc 300 m/min valorile de temperatură ajung până la 800°C. Pentru regimuri de așchiere de degroșare la prelucrarea oțelurilor dure temperaturile depășesc chiar și 1000°C. Geometria sculei așchietoare are, de asemenea, o influență semnificativă asupra temperaturilor din proces. De exemplu, odată cu creșterea razei de pe muchia plăcuței temperaturile tind să descrească (vezi §2.2.2).

- Analiza morfologiei așchiilor generate reprezintă o altă cale de investigare a mecanismelor și intensității proceselor de așchiere. La nivel microscopic, se pot realiza măsurători de gabarit ale așchiilor detașate pentru a stabili influența parametrilor de așchiere asupra acestora. La frezarea plan-frontală a oțelurilor dure cu un regim de așchiere de finisare pentru lățimi de așchiere sub 15 mm și viteză de așchiere de până la 400 m/min așchiile se ondulează pronunțat. La viteze intermediare de așchiere, de 1200 m/min așchiile devin alungite, iar la viteze foarte mari de 2400 m/min acestea devin sfărâmicioase (vezi §2.3.1).

- Căldura transferată în așchii determină modificarea culorii lor, datorită nivelurilor diferite de oxidare a acestora, fiind un indicator microscopic pentru stabilirea influențelor parametrilor regimului de așchiere. La frezarea metalelor dure se constată că oxizilor de tipul FeO, Fe₃O₄ sau Fe₂O₃ le sunt asociate culori de albastru, mov închis sau auriu roșiatic. Astfel, pentru viteze de așchiere mai mici, de până la 250 m/min, culorile așchiilor pot avea un aspect de maro deschis schimbându-se până la un albastru și mov închis pentru viteze de până la 350 m/min (vezi §2.3.1).

- Aspectul microscopic al așchiilor detașate la frezarea metalelor dure este cel al dinților de fierăstrău, fiind determinat de mecanismul de formare a așchiilor, sub forma planurilor de forfecare. În funcție de parametrii regimului de așchiere, aspectul așchiilor poate varia de la continuu la foarte zimțat. La frezarea plan-frontală cu viteze de până la 400 m/min așchiile sunt continue, sub forma unor dinți de fierăstrău, iar la viteze foarte mari, de peste 2000 m/min, acestea se segmentează și devin întrerupte (vezi §2.3.2).

- Aspectul microscopic al așchiilor poate fi caracterizat prin parametri dimensionali, cum sunt pasul dintre planele de forfecare, înălțimea dinților de fierăstrău, adânciturile și media dintre acestea sau unghiuri, cum sunt unghiul de forfecare sau unghiul de bombare (vezi §2.3.2).

• La nivel microstructural așchia prezintă mai multe zone influențate mecanic prin deformare plastică. Grăunții din zona primară de forfecare a așchiei detașate la frezarea oțelurilor dure sunt puternic alungiți în direcția unghiului de forfecare. Grăunții din zona secundară de forfecare sunt extrem de deformați și devin inteligibili, iar acest strat puternic deformat plastic apare de culoare albă la observarea pe un microscop electronic, de unde și denumirea de *white layer*. Acest strat este influențat în mod special de geometria sculei așchietoare: odată cu creșterea razei muchiei așchietoare mărimea stratului alb deformat plastic crește. De asemenea, în aceste două zone de forfecare durezza crește spre centrul zonei de forfecare în zona primară și către extremitatea exterioară a așchiei în zona secundară de forfecare (vezi §2.3.2).

• Uzarea sculelor așchietoare este cauzată, în principal, de degajarea căldurii în procesul de frezare și de discontinuitatea acestuia, care produce șocuri termo-mecanice. Degajarea de căldură este determinată de deformațiile plastice din așchie, frecarea dintre sculă și așchie pe fața de degajare a sculei și frecarea dintre sculă și piesă pe fața de așezare a sculei. Mecanismele de uzare a sculelor așchietoare la frezarea metalelor dure sunt: abraziune, care determină uzura de pe fața de așezare VB și pe cea de pe fața de degajare KT , ciobire CH și fisuri CR datorate vibrațiilor sau exfolieri FL în cazul sculelor cu acoperiri. La frezarea oțelurilor dure uzura de tip aderare de material BUE este mai rar întâlnită, dar pot fi întâlnite difuzii de fier pe suprafețele sculelor așchietoare (vezi §2.4.1).

• Principalul criteriu de uzură utilizat pentru determinarea durabilității sculelor așchietoare este uzura abrazivă de pe fața de așezare, VB , acesta fiind utilizat și de către producătorii de scule așchietoare utilizează. Cercetările privind determinarea evoluției uzurii VB în funcție de timp sau de volumul de material îndepărtat sunt numeroase (vezi §2.4.2).

• Precizia dimensională a pieselor prelucrate la frezarea plan-frontală a metalelor dure este influențată de precizia geometrică și de rigiditatea mașinii-unelte, alături de forțele de așchiere. Planeitatea suprafeței prelucrate este un parametru dimensional al pieselor din metale dure prelucrate prin frezare, care face obiectul cercetărilor experimentale (vezi §2.5).

• Pe suprafețele pieselor din metale dure prelucrate prin frezare pot apărea mai multe tipuri de defecte: urme de tipul unor șanțuri superficiale, porozități sau goluri de material. Acestea sunt mai pronunțate la prelucrările de degroșare sau când muchiile sculei sunt mai uzate (vezi §2.5.1).

• Rugozitatea suprafeței prelucrate este unul dintre cei mai analizați indicatori de calitate la cercetarea proceselor de frezare a metalelor dure. Din cercetările studiate a rezultat că valorile parametrului de rugozitate R_a sunt influențate astfel: scad odată cu creșterea vitezei de așchiere, cresc odată cu creșterea razei la vârful sculei, cresc odată cu creșterea uzurii sculei, VB (vezi §2.5.1).

• Prelucrarea prin frezare a metalelor dure determină modificări importante ale caracteristicilor stratului superficial și ale proprietățile fizico-mecanice din acestea, motiv pentru care aceste aspecte sunt frecvent analizate în studiile de specialitate (vezi §2.5.2).

• În imediata vecinătate a suprafeței frezate apare un strat puternic deformat plastic (MAZ - Mechanical Affected Zone) care, la microscopul electronic, apare sub forma unui strat alb (WL - White Layer) datorat faptului că temperaturile ajung în zona de austenitizare a materialului ($T = 840^{\circ}\text{C}$). Sub acest strat influențat mecanic este un alt substrat ce este afectat termic (HAZ - Heat Affected Zone), în care temperaturile sunt sub nivelul de austenitizare al materialului. Grosimea stratului deformat plastic crește odată cu creșterea razei sculei așchietoare, a uzurii muchiilor așchietoare, a avansului pe dinte și scade odată cu creșterea durezza metalului dur prelucrat (vezi §2.5.2).

• Microdurezza stratului superficial este un alt parametru de calitate analizat frecvent la cercetarea proceselor de frezare a metalelor dure. Din cercetările studiate a rezultat că microdurezza stratului superficial crește odată cu creșterea adâncimii de prelucrare și cu creșterea razei muchiei sculei așchietoare. Totodată, microdurezza scade pe măsura îndepărtării de suprafațe piesei, spre materialul de bază (vezi §2.5.2).

• Tensiunile remanente din stratul superficial sau în substraturi ale pieselor din metale dure fac obiectul studiului în cadrul cercetărilor proceselor de frezare plan-frontală. S-a constatat că tensiunile

remanente rezultate sunt de compresiune, iar mărimea acestora este influențată de raza muchiilor așchietoare utilizate și de uzura acestora (vezi §2.5.2).

- Există puține lucrări de cercetare referitoare la frezarea pieselor din oțelul de scule speciale **55NiCrMoV7**, mai ales în medii uscate (vezi §1.1 și §2.1 - §2.5).

- Simularea proceselor de frezare este din ce în ce mai utilizată în cercetare datorită, pe de o parte, faptului că cercetările experimentale sunt costisitoare și consumatoare de timp și, pe de altă parte, creșterii exponențiale din ultimii ani a capacității de calcul numeric (vezi §3.1).

- Dezvoltarea unui model numeric necesită o etapă de modelare, o etapă de simulare și o etapă de validare. Parametrii de ieșire rezultați din simulare pot fi: forțe de așchiere, temperaturi din zona de formare a așchiilor, tensiuni remanente, durități din substraturile pieselor prelucrate sau aspecte geometrice referitoare la morfologia așchiilor (vezi §3.1).

- Modelele numerice pentru simularea proceselor de frezare sunt dezvoltate, în general, printr-o schemă de integrare explicită ce rezolvă probleme dinamice specifice acestor prelucrări. Cea mai des utilizată strategie în dezvoltarea acestor modele de frezare este cea cu discretizare, ca în metoda elementelor finite și formulare Lagrangiană (vezi §3.1.1).

- Pentru obținerea unui bun compromis între durata de calcul și precizia rezultatelor, la simularea proceselor de frezare se utilizează modele bidimensionale sau tridimensionale simplificate. În cercetările studiate s-a remarcat definirea unor zone de degradare între așchia nedetașată și restul semifabricatului, zone în care este definit și comportamentul de rupere a materialului. Pentru obținerea unor rezultate cât mai precise este necesar ca geometriile modelelor dezvoltate să fie cât mai apropiate de cele reale (vezi §3.1.2).

- Deoarece temperaturile din procesele de frezare pot atinge valori de până la 1000°C, iar vitezele de deformare sunt de 10^6 s^{-1} , comportamentul materialului este considerat termo-elasto-vâsco-plastic. Pentru modelarea acestuia pot fi utilizate mai multe legi de comportament care, în principal, stabilesc o dependență de deformare, viteza de deformare și de temperatură. În cele mai multe simulări este utilizată legea de comportament Johnson-Cook. Pentru determinarea valorilor coeficienților acestei legi este necesară realizarea unor încercări de solicitare similare cu cele reale: încercări la tracțiune monotonă și dinamice la temperatură ambiantă și la temperaturi ridicate, precum și încercări la forfecare la diferite temperaturi (vezi §3.1.3).

- În utilizarea metodei elementelor finite pentru simularea procesului de frezare poate fi definită o zonă de rupere a materialului direct din geometrizarea modelului. Această zonă de degradare presupune o etapă de inițiere a formării așchiei și o etapă de evoluție a acestei deteriorări. Printre cele mai utilizate modele de inițiere a ruperii așchiilor se regăsesc modelele Cockcroft-Latham sau Johnson-Cook (vezi §3.1.4).

- Definirea corectă a modelului numeric necesită definirea unor constrângeri. Acestea se referă la faptul că semifabricatul trebuie să fie fixat rigid, iar scula să poată realiza mișcarea de rotație și de translație necesară în formarea așchiilor. Astfel, se definesc două tipuri de condiții la limită mecanice și termice. Legea de frecare cea mai des utilizată în definirea contactului dintre suprafețe este legea lui Coulomb (vezi §3.1.5).

- Geometriile modelelor numerice sunt discretizate printr-o rețea de elemente finite ce permit aproximarea și rezolvarea ecuațiilor diferențiale din care sunt alcătuite acestea. Pentru obținerea unui bun compromis între un timp de calcul cât mai scurt și rezultate precise ale simulării, în zona așchiei rețeaua de elemente este fin discretizată, în timp ce în celelalte zone discretizarea este grosieră. Durata de calcul se poate reduce semnificativ și prin scalarea fictivă a masei materialului, dar există riscul apariției unor erori (vezi §3.1.6).

- Validarea modelelor este un pas important în dezvoltarea modelelor numerice realizate prin metoda elementelor finite. Această validare se referă la compararea rezultatelor obținute din simularea numerică cu cele rezultate experimental în condiții similare. Pentru procesele de frezare se pot compara forțele de așchiere pe cele trei direcții X, Y și Z sau temperaturile din proces, reprezentând principalele metode de validare a simulărilor. Există și alte posibilități de validare a

modelelor numerice, bazate pe compararea morfologiei așchiilor, tensiunilor remanente sau microdurețea din substraturile suprafețelor prelucrate. Validarea se pot realiza după un singur criteriu sau prin combinarea mai multor criterii dintre cele enunțate (vezi §3.2).

- Erorile care apar în rezultatele obținute prin simulare pot proveni de la complexitatea geometriilor, definirea imprecisă a comportamentului de material sau includerea unor parametrii suplimentari, mai ales când există și interacțiuni termice ce sunt necesar de definit, calitatea discretizării, condiții la limită incorect definite sau chiar unele limitări ale programului utilizat pentru modelarea și simularea procesului de frezare. Diferențe de până la 15% între rezultatele simulărilor și cele obținute experimental sunt acceptate pentru validarea unei simulări (vezi §3.2).

- Compararea forțelor rezultate din simularea procesului de frezare cu cele măsurate experimental se poate realiza la nivel global sau ca valori maxime ale acestora. Pentru o analiză mai detaliată a procesului se pot compara forțele rezultate la formarea fiecărei așchii. Pot exista diferențe între rezultatele simulării și cele obținute experimental datorită unor decalaje a datelor experimentale sau a filtrelor utilizate în interpretarea experimentelor (vezi §3.2.1).

- Analiza temperaturilor din procesele de frezare poate fi realizată atât în semifabricat, cât și în sculă sau așchia formată. Temperaturile măsurate experimental cu camerele termografice sau cu termocupluri pot fi utilizate pentru validarea simulărilor realizate (vezi §3.2.2).

- Morfologia așchiilor rezultate din simulare trebuie să aibă o formă și dimensiuni de gabarit similare cu cele obținute din experimente. Chiar și la nivel microscopic acestea pot prezenta elemente de comparație, mai ales prin gradul de segmentare, dar pentru a obține acest lucru discretizarea modelului numeric trebuie să fie foarte fină (vezi §3.2.3).

- Tensiunile remanente din substraturile suprafețelor prelucrate reprezintă și acestea o altă metodă de validare a modelelor numerice. Valorile experimentale pot fi obținute direct de pe suprafețele prelucrate prin metode nedistructive de difracție cu radiații X sau în substraturile suprafețelor prelucrate prin metode distructive - difracție cu radiații X și îndepărtarea straturilor prin polizare electro-chimică sau prin găurire incrementală. Pentru obținerea tensiunilor remanente prin simulare este nevoie de o discretizare foarte fină în zonele de analiză, dar mai ales utilizarea unei legi de comportament termo-mecanic al materialului bine definită (vezi §3.2.4).

- O altă metodă de validare a modelelor numerice constă în compararea hărților de distribuție a microdurețților. Rezultatele obținute din simularea numerică sunt prezentate ca deformare plastică echivalentă și, ulterior, sunt calculate valorile de microdurețte (vezi §3.2.5).

- Există un număr relativ mic de lucrări științifice care au abordat dezvoltarea modelelor numerice, mai ales tridimensionale, pentru studiul proceselor de frezare a oțelurilor dure (vezi §3.1 și §3.2).

Partea a II-a.

Contribuții la cercetarea teoretico-experimentală și modelarea numerică a procesului de frezare plan-frontală a metalelor dure

5. Direcțiile, obiectivul principal și metodologia de cercetare-dezvoltare a proceselor de prelucrare prin frezare plan-frontală a metalelor dure

5.1. Direcții de cercetare-dezvoltare

Pe baza datelor și concluziilor desprinse din analiza stadiului actual, se consideră a fi de actualitate următoarele direcții de cercetare-dezvoltare privind procesul și sistemele de frezare a metalelor dure:

(1) **creșterea gamei de materiale** utilizate în cercetarea proceselor și sistemelor de frezare a metalelor dure.

(2) **aprofundarea și extinderea cunoștințelor despre fenomenele specifice procesului de frezare a metalelor dure**, prin analiza interdependențelor dintre parametrii de proces (forțe și temperaturi), parametrii ce definesc calitatea suprafețelor prelucrate (rugozitate, microduritate etc.), parametrii ce caracterizează forma și dimensiunile așchiilor, parametrii ce caracterizează uzura sculei și caracteristicile materialului prelucrat, parametrii regimului de așchiere, caracteristicile materialului și geometria sculei așchietoare.

(3) **dezvoltarea modelelor numerice pentru simularea proceselor de frezare** în vederea aprofundării cunoștințelor despre fenomenele specifice procesului de așchiere și a reducerii costurilor de cercetare și fabricare.

5.2. Obiectivul principal al activității de cercetare-dezvoltare

Pornind de la direcțiile de cercetare-dezvoltare privind procesele și sistemele de frezare a metalelor dure, menționate anterior, se stabilește *obiectivul principal* al activității de doctorat: **dezvoltarea prin cercetare teoretico-experimentală și modelare numerică a procesului și sistemului de prelucrare prin frezare plan-frontală a oțelului dur 55NiCrMoV7.**

Pentru realizarea matrițelor, după obținerea semifabricatelor, sunt necesare prelucrări prin frezare, găurire, dar și operații de tratament termic, în special de suprafață. Utilizarea unui aliaj cu duritate ridicată încă din faza de semifabricat asigură eliminarea operațiilor de tratament termic și, implicit, a unor costuri, dar și reducerea duratelor de fabricație. Aliajul propus pentru acest studiu este *oțelul aliat 55NiCrMoV7*, tratat termic încă din etapa de realizare a semifabricatului, având o duritate de peste 45 HRC. Acest oțel este utilizat în industria ștanțelor și matrițelor, în special pentru matrițe utilizate în operații de forjare și extrudare pentru aliaje din aluminiu, magneziu, zinc etc., dar și pentru matrițe utilizate la prelucrarea prin deformare plastică la cald. Acest oțel are o foarte bună rezistență la coroziune și șocuri termice, datorată alierii sale cu Ni și Cr în proporții considerabile.

La prelucrarea matrițelor, suprafețele plane pe care se închid matrița activă și matrița pasivă trebuie să fie realizate cu abateri de planeitate de doar câțiva micrometri și rugozități mici. În cazul realizării matrițelor din metale dure, asigurarea condițiilor tehnice ridicate pentru suprafețele plane se face cu dificultate. Deoarece aceste suprafețe se realizează prin *procedeul de frezare plan-frontală*, în cadrul cercetărilor se va studia procesul de așchiere asociat acestuia.

Pentru îndeplinirea obiectivului principal al activității de doctorat se stabilesc **trei obiective specifice**:

(1) **Stabilirea influenței parametrilor regimului de așchiere asupra unor rezultate ale procesului de frezare plan-frontală.** Se urmărește determinarea unor corelații sau funcții de proces între principalii parametri de ieșire ai procesului de frezare plan-frontală (rezultate: forță de așchiere, dimensiuni macroscopice ale așchiilor, temperatura din proces, rugozitate, abateri de planeitate și microduritate) și parametrii regimului de așchiere (ca parametrii de intrare în proces). Totodată, se analizează influențele pe care regimurile de așchiere de degroșare și de semifinisare le au asupra unor

parametrii de ieșire (rezultante: forță de așchiere, temperatura din proces și morfologia așchiilor) la frezarea plan-frontală.

(2) **Stabilirea influenței uzurii plăcuțelor așchietoare asupra unor rezultante ale procesului de frezare plan-frontală.** Se determină unele corelații între principalii parametri de ieșire ai procesului de frezare plan-frontală (rezultante: forță de așchiere, temperatura din proces, rugozitate și microduritate) și diferiți parametri de uzură a sculei (parametrii unidimensionali, bidimensionali sau tridimensionali).

(3) **Realizarea unor modele numerice pentru simularea procesului de frezare plan-frontală.** Este vizată dezvoltarea unor modele numerice tridimensionale, cu identificarea aceluia care conduce la cel mai bun compromis între durata de calcul și precizia rezultatelor, pentru diferite mărimi-rezultat al simulării (forțe, temperaturi, formă așchie etc.). Acestea se utilizează pentru simularea procesului de frezare plan-frontală în scopul analizării detaliate a unor fenomene specifice procesului de așchiere.

5.3. Modelarea procesului de frezare plan-frontală a oțelului aliat 55NiCrMoV7

Semifabricatele utilizate în cadrul cercetărilor sunt de formă paralelipipedică, cu dimensiuni stabilite în funcție de obiectivul vizat: studiul parametrilor de proces, studiul calității suprafețelor prelucrate sau studiul uzurii plăcuțelor amovibile. Astfel, sunt definite trei planuri experimentale (vezi §5.4), pentru care sunt asociate semifabricate specifice (vezi §6.2.1). Pentru **planul experimental I** a fost definit semifabricatul **SF1**, pentru **planul experimental II** s-a definit semifabricatul **SF2** și pentru **planul experimental III** semifabricatul **SF3**.

În cercetarea - dezvoltarea procesului de așchiere prin frezare plan-frontală se utilizează modele de tip intrare - ieșire, cu unele constrângeri. Astfel, procesul de frezare plan-frontală este caracterizat prin, figura 5.3.1:

- **parametri de intrare**, care pot fi grupați în *caracteristici ale semifabricatului* (proprietăți fizico-mecanice, comportament termo-mecanic, dimensiuni etc.), *caracteristici ale sculei așchietoare* (proprietăți ale materialului plăcuțelor amovibile, geometria plăcuțelor etc.), *mediul de prelucrare* și *parametrii ai regimului de așchiere* (adâncimea de așchiere, lățimea de așchiere, lungimea de așchiere, avansul pe dinte și viteza de așchiere).

- **parametri de ieșire (rezultante ale procesului)**, care pot fi grupați în *caracteristici de proces* (forța de așchiere, morfologia așchiilor și temperatura de proces), *calitatea pieselor prelucrate* (rugozitatea, abaterile de la planeitate și microduritatea suprafețelor prelucrate) și *uzarea plăcuțelor amovibile*.

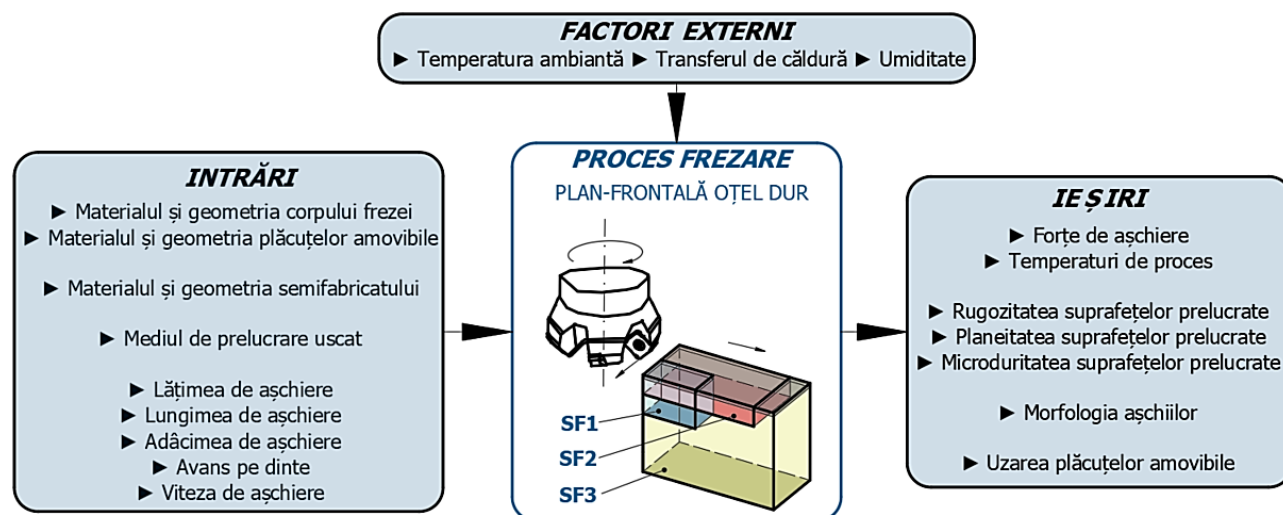


Figura 5.3.1. Schema modelării procesului de frezare plan-frontală.

Desfășurarea procesului de frezare plan-frontală are loc cu anumite *constrângeri*, cum sunt: temperatura și umiditatea mediului ambiant, transferul de căldură etc.

Pentru a reduce numărul de experiențe au fost variați parametrii ce sunt considerați a avea o influență importantă asupra procesului, după cum urmează:

- *adâncimea de așchiere* - a_p [mm];
- *avansul pe dinte* - f_z [mm/dinte];
- *viteza de așchiere* - v_c [m/min].

Aceștia sunt și principalii parametri ai regimului de așchiere ce pot avea efecte semnificative în procesul de așchiere sau la nivelul suprafețelor frezate. Variația acestor parametri are ca scop determinarea combinațiilor care conduc la reducerea influenței negative a forțelor de așchiere sau a temperaturilor din proces asupra calității suprafețelor prelucrate sau morfologiei așchiilor.

5.4. Metodologia de cercetare-dezvoltare

Metodologia de cercetare-dezvoltare este concepută ca sistem de referință pentru acțiunile întreprinse în vederea îndeplinirii obiectivului principal al activității de doctorat. Aceste acțiuni sunt grupate în cinci etape principale, cuprinzând activități specifice de realizat.

- (A) Cercetările teoretico-experimentale pentru analiza procesului de așchiere
- (B) Cercetările teoretico-experimentale pentru analiza calității suprafețelor prelucrate
- (C) Cercetările teoretico-experimentale pentru analiza proceselor de frezare de degroșare și semifinisare
- (D) Cercetările teoretico-experimentale pentru analiza uzării sculei așchietoare
- (E) Modelarea și simularea procesului de frezare plan-frontală

5.4.1. Planificarea experimentelor

Pentru realizarea activităților specifice **primului obiectiv specific** s-a utilizat un plan experimental compus centrat, cu 14 experimente și 6 repetări în centrul planului. Cele 20 de experimente ale planului experimental compus centrat sunt prezentate în tabelul 5.4.1.

Tabelul 5.4.1. Planul experimental compus centrat cu variabile normalizate și naturale.

Nr. exp.	Cod exp.		Variabile independente normate			Variabile independente naturale		
	I	II	a_p [mm]	f_z [mm/dinte]	v_c [m/min]	a_p [mm]	f_z [mm/dinte]	v_c [m/min]
1.	1.1	2.1	1	1	1	2	0,2	150
2.	1.2	2.2	1	1	-1	2	0,2	90
3.	1.3	2.3	1	-1	1	2	0,1	150
4.	1.4	2.4	1	-1	-1	2	0,1	90
5.	1.5	2.5	-1	1	1	1	0,2	150
6.	1.6	2.6	-1	1	-1	1	0,2	90
7.	1.7	2.7	-1	-1	1	1	0,1	150
8.	1.8	2.8	-1	-1	-1	1	0,1	90
9.	1.9	2.9	0	0	0	1,5	0,15	120
10.	1.10	2.10	0	0	0	1,5	0,15	120
11.	1.11	2.11	0	0	0	1,5	0,15	120
12.	1.12	2.12	-1	0	0	1	0,15	120
13.	1.13	2.13	1	0	0	2	0,15	120
14.	1.14	2.14	0	-1	0	1,5	0,1	120
15.	1.15	2.15	0	1	0	1,5	0,2	120
16.	1.16	2.16	0	0	-1	1,5	0,15	90
17.	1.17	2.17	0	0	1	1,5	0,15	150
18.	1.18	2.18	0	0	0	1,5	0,15	120
19.	1.19	2.19	0	0	0	1,5	0,15	120
20.	1.20	2.20	0	0	0	1,5	0,15	120

Acest plan experimental este utilizat în două etape distincte. **În prima etapă**, asociată **planului experimental I**, s-a utilizat *standul experimental elastic* pentru măsurarea forțelor de așchiere.

În **a doua etapă**, asociată **planului experimental II**, este utilizat *standul experimental rigid*, sunt înregistrate temperaturile din proces.

În **a treia etapă** a cercetărilor experimentale - **analiza detaliată procesului de frezare pentru două regimuri de așchiere diferite**, experimentul 2 pentru degroșare și experimentul 7 pentru semifinisare.

Activitățile specifice **celui de-al doilea obiectiv specific** s-au realizat în cea de-a **patra etapă de cercetări** experimentale, căreia îi este asociat **planul experimental III**. Experimentele sunt realizate pe un stand experimental similar celui utilizat pentru planul experimental II: *stand experimental rigid* și înregistrarea temperaturilor din proces. S-a utilizat regimul de așchiere din tabelul 5.4.2, stabilit pe baza concluziilor desprinse după primele etape de cercetare experimentală.

Tabelul 5.4.2. Parametrii regimului de așchiere utilizați pentru planul experimental III de studiu a uzării sculei.

a_p [mm]	f_z [mm/dinte]	v_c [m/min]
1	0,2	120

Au fost planificate 27 de experimente, asociate prelucrării a 27 de semifabricate (vezi §6.2.1), în una sau mai multe treceri, cărora le corespunde un timp de prelucrare cumulat de 65,07 minute (vezi §9.1.1). Prin realizarea acestor experimente se urmărește depășirea valorii asociate uzării critice a sculei, VB , de 0,2 mm (vezi §2.4).

Pentru fiecare experiment s-a utilizat un semifabricat distinct, care a fost prelucrat în una sau mai multe treceri, timpii de prelucrare cumulați (T_p) ai acestora fiind prezentați în tabelul 5.4.3.

Tabelul 5.4.3. Experimentele pentru studiul uzării sculelor și timpii de prelucrare asociați.

Nr. exp.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Cod. exp.	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	3.10	3.11	3.12	3.13
T_p [min]	0,03	2,41	4,82	7,23	9,64	12,05	14,46	16,87	19,28	21,69	24,10	26,51	28,92	31,33
Nr. exp.	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Cod. exp.	3.14	3.15	3.16	3.17	3.18	3.19	3.20	3.21	3.22	3.23	3.24	3.25	3.26	3.27
T_p [min]	33,74	36,15	38,56	40,97	43,38	45,79	48,2	50,61	53,02	55,43	57,84	60,25	62,66	65,07

5.4.2. Construirea modelelor numerice

Pentru îndeplinirea celui de-al **treilea obiectiv specific** al cercetărilor doctorale, s-au construit două modele numerice cu geometrii caracteristice unui regim de așchiere de degroșare, respectiv, unui regim de așchiere de semifinisare.

Modelarea și simularea proceselor de frezare plan-frontală a metalelor dure este realizată în programul ABAQUS 2022 Explicit, frecvent utilizat (vezi §3.1) în acest scop, pus la dispoziție de ENSTA Bretagne, Institutul de cercetare Dupuy de Lôme - IRDL din Brest, Franța în cadrul mobilităților de doctorat din perioadele aprilie-iulie din anii 2022 și 2023.

Pentru modelarea și simularea proceselor de frezare, se parcurg următoarele etape: *modelare numerică, simulare numerică și validarea modelului numeric*.

6. Elemente ale sistemului de cercetare experimentală a procesului de frezare plan-frontală a metalelor dure

6.1. Caracteristici ale oțelului aliat 55NiCrMoV7

Oțelul utilizat în aceste cercetări este oțelul aliat 55NiCrMoV7, cu o duritate de peste 45 HRC, ce se regăsește în standardul românesc SR EN ISO 4957:2002 [13], adaptat din ISO 4957:1999. Pentru acesta sunt prezentate simbolizările echivalente în câteva standarde internaționale.

6.1.1 Compoziția chimică și caracteristici metalurgice

• Compoziția chimică

Compoziția chimică astfel determinată este prezentată în tabelul 6.1.1.

Tabelul 6.1.1. Compoziția chimică a oțelului 55NiCrMoV7.

Element chimic		C	Fe	Si	Ni	Cr	Mn	Mo	V	S	P
ISO 4957:1999 [13]	min.	0,50	96,05	0,10	1,50	0,80	0,60	0,35	0,05	0,02	0,03
	max.	0,60	94,35	0,40	1,80	1,20	0,90	0,55	0,15		
Valori oferite de producător [58]		0,56	-	-	1,70	1,10	-	0,50	0,10	-	-
Valori efective (wt%)		0,56 (ISO)	94,483	0,496	1,717	1,174	0,963	0,3	0,103	0,2	0,004
Eroarea de măsurare (%)		-	0,07	0,01	0,008	0,004	0,005	0,001	0,002	-	-

• Analiza microstructurală

Structura metalografică este una specifică unui oțel înalt aliat supus unui tratament termic de călire și revenire, respectiv, o structură aciculară foarte fină, caracteristică martensitei formate în urma tratamentului termic de călire - revenire. De asemenea, se evidențiază particule foarte fine de carburi aliate de crom, molibden și vanadiu, care sunt dispersate uniform în matricea de martensită

Din analiza statistică a formei și dimensiunilor acestor grăunți, realizată cu softul MATLAB, rezultă că: i) mărimea medie a grăunților este de 139,25 μm^2 ; ii) grăunții sunt puternic alungiți, în special a celor cu diametre echivalente mici; iii) nu este evidențiată o orientare preferențială a grăunților, aceștia fiind relativ uniform distribuiți, asigurând o bună izotropie materialului.

• Analiza de faze

Prin analiza difractogramei de radiații X s-a constatat prezența unei singure faze de material de Ni-Cr-Fe.

6.1.2 Proprietăți fizico-mecanice

• Proprietăți fizice

O parte importantă a proprietăților fizice ale oțelului 55NiCrMoV7 sunt indicate în literatura de specialitate [58,236] și sunt prezentate în tabelul 6.1.2.

Tabelul 6.1.2. Proprietățile fizice a oțelului 55NiCrMoV7 indicate în literatură [58,236].

Proprietate fizică	Notare	Unitate de măsură	Valoare
Densitate	ρ	kg/m ³	7800
Conductivitate termică	κ	W/m°C	36
Căldura specifică	c_p	J/kg°C	460
Temperatura de topire	T_t	°C	1490
Frația de transformare a lucrului mecanic de deformare în căldură			0,5

• Proprietăți mecanice

Proprietăți mecanice determinate sunt prezentate în tabelul 6.1.3.

Tabelul 6.1.3. Proprietățile mecanice a oțelului 55NiCrMoV7 efective.

Proprietate mecanică	Notare	Unitate de măsură	Valoare
Duritate	-	HV	477,4±3
Rezistență mecanică maximă	σ_m	MPa	1369,5±15
Deformația relativă maximă	ε_r	%	8,5±0,5
Modul lui Young	E	MPa	203334±100
Coeficientul lui Poisson	ν	-	0,28±0,03

6.1.3. Geometria epruvetelor pentru caracterizarea comportamentului termo-mecanic al oțelului dur

Pentru încercările la tracțiune, la temperatura ambiantă a fost utilizată o epruvetă conform DIN EN ISO 6892-1 [238]. Epruveta a fost proiectată ca să poată fi orientată și fixată între bacurile mașinii de încercat cu o zonă calibrată de 75 mm × 12,5 mm și a fost prelucrată prin electro-eroziune.

Pentru caracterizarea comportamentului neliniar sunt realizate și alte încercări de tracțiune monotone conform DIN EN ISO 6892-1 [238].

Pentru identificarea mecanismelor de rupere sunt realizate încercări de forfecare pe o epruvetă definită conform ASTM B 831-05 [239].

Încercarea dinamică este realizată la temperatură ambiantă, cu o viteză de deformare de 2000s⁻¹, pe o mașină cu bară de tip Hopkinson cu presiune ce asigură solicitări la viteze mari, din domeniul celor de așchiere. Epruveta necesară este cilindrică, cu filete M14 × 20 mm la capete, și zonă investigată de Ø2,6 mm × 15 mm conform ASTM E8/E8M-13a [241].

6.2. Elemente ale sistemului tehnologic de prelucrare și ale sistemelor de măsurare din timpul procesului

6.2.1 Forma și dimensiunile semifabricatelor de prelucrat

Pentru *planul experimental I* a fost definit SF1 cu dimensiunile 40 mm × 20mm × 50 mm.

Planul experimental II a necesitat definirea SF2 cu dimensiunile 40 mm × 85mm × 20 mm.

Pentru *planul experimental III* a fost definit SF3 de 40 mm × 100 mm × 100 mm.

6.2.2 Elemente ale sistemului tehnologic de prelucrare prin frezare plan-frontală

Pentru realizarea experimentelor de frezare plan-frontală a fost utilizat o mașină-unealtă cu comandă numerică DMG MORI ecoMill70 [242] cu 3+2 axe comandate numeric.

În cercetările experimentale realizate a fost utilizată același tip de sculă, o freză modulară cu un diametru Ø50 mm și cinci dinți așchietori. Corpul frezei este de la SANDVIK COROMANT, model 345-050Q22-13H [243], iar plăcuțele amovibile utilizate în acest studiu au codul 345R-1305M-PM 1130 [244], fiind specifice prelucrărilor oțelurilor dure și procedeele de semifinisare.

Pentru orientarea și fixarea sculei de frezat plan-frontală pe arborele mașinii-unelte s-a utilizat o portsculă de la SANDVIK COROMANT, modelul A1B05-40 22 035 [245].

Semifabricatele utilizate cele definite pentru *planurile experimentale I, II și III*.

Pentru studiul forțelor de așchiere din *planurile experimentale I și III* a fost utilizată o menghină cu auto-centrare KESER SZ65 [246]. Pentru studiile asociate *planurilor experimentale II și III* a fost folosit un alt sistem de orientare și fixare, respectiv, o menghină mecano-hidraulică NOVA GRUP NGV MH 125 [247].

6.2.3 Sisteme de măsurare în timp real a rezultatelor de proces

Studiul forțelor de așchiere a necesitat utilizarea unui dinamometru cu captori elastici cu mărci tensometrice. Dinamometrul utilizat în aceste studii este produs de ME-MEßSYSTEME, modelul K3D160 [248]. Semnalele de tensiune electrică sunt transmise către captorii cu mărci tensometrice și revin către modulul de la NATIONAL INSTRUMENTS NI9237 [249].

Pentru a analiza deplasările dinamometrului în timpul procesului de frezare a fost utilizată o cameră rapidă de la PHOTRON, modelul FASTCAM Mini UX50 [250].

Măsurarea temperaturilor din procesul de frezare s-a realizat prin tehnica termografică,

utilizând o cameră termografică OPTRIS PI400i [251] și programul PIX Connect.

Sistemul de înregistrare a valorilor de temperatură este format din modulul NI9210 [252]. Termocuplurile utilizate sunt de tip K cu punctul de joncțiune în teacă.

6.3. Metode și mijloace utilizate pentru măsurarea unor caracteristici geometrice și structurale ale pieselor prelucrate

Rugozitatea a fost măsurată printr-o metodă de contact, cu un palpator cu vârf de diamant, utilizând rugozimetrul MITUTOYO SJ210 [253].

Măsurătorile au fost realizate pe o mașină de măsurat în coordonate TESA Micro-Hite 3D [254].

Pentru analiza dimensiunilor de gabarit ale așchiilor obținute în cadrul prelucrărilor din *planul experimental I* s-a utilizat un microscop optic OLYMPUS SZ61 [255], dotat cu o cameră OLYMPUS LC35 montată pe acesta.

Pentru analiza morfologiei așchiilor, în special analiza formei zimțate a acestora, (vezi §8.4) a fost utilizat pe microscopul electronic de baleiaj HITACHI SU5000.

Măsurătorile de microduritate au fost realizate pe un durimetru INNOVATEST, model Falcon500 [257].

6.4. Planificarea măsurării unor caracteristici ale calității suprafețelor prelucrate

Pe piesele realizate în cadrul planurilor experimentale II și III au fost măsurate unele caracteristici ale calității suprafețelor prelucrate. Pentru piesele realizate în cadrul planului experimental II, măsurătorile sunt realizate în zona de stabilitate a procesului și de angajare completă a sculei în frezare, iar caracteristicile măsurate în legătură cu calitatea suprafețelor prelucrate sunt cele ce urmează.

- Rugozitatea suprafeței, R_a , conform ISO 4287:1997 (E/F) [40].
- Abaterea de la planeitate a suprafeței, PL .
- Microduritatea suprafeței prelucrate, HV , conform DIN EN ISO 6507-01 [41].

Pentru piesele realizate în cadrul planului experimental III caracteristicile măsurate în legătură cu calitatea suprafețelor prelucrate sunt cele ce urmează.

- Rugozitatea suprafeței, R_a .
- Microduritatea suprafeței prelucrate, HV .

6.5. Metodologia de prelucrare matematică a datelor experimentale

Procedura aplicată este una iterativă, figura 6.5.1, urmărind obținerea unui model matematic care să reprezinte corect datele experimentale, iar forma acestuia să fie cât mai simplă și ușor de utilizat practic.

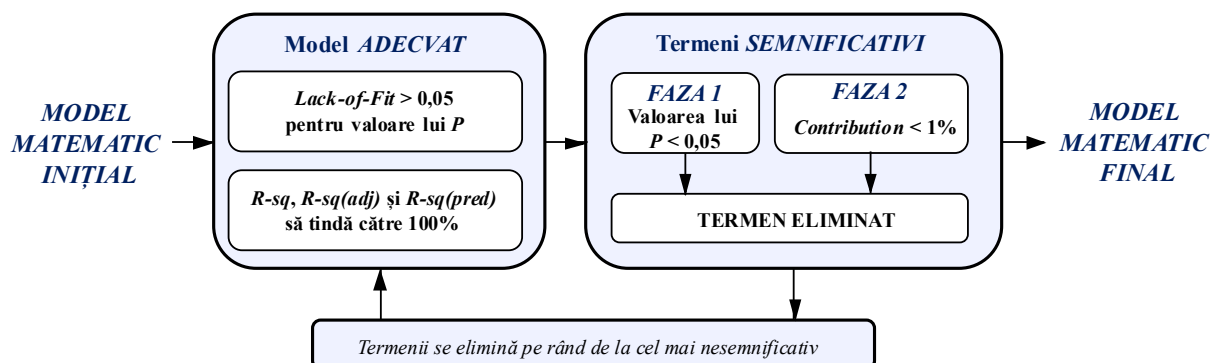


Figura 6.5.1. Schema cu etapele stabilirii modelului matematic final.

7. Rezultate ale cercetării teoretico-experimentale privind influența regimului de aşchiere asupra parametrilor de proces, morfologiei aşchiilor și a calității suprafețelor prelucrate

Obiectivul cercetărilor prezentate în acest capitol este de a determina influența parametrilor regimului de aşchiere asupra unor *parametri de proces*: forțele de aşchiere - F_{cmax} și temperaturile din proces - T_{max} ; *dimensiunile macroscopice ale aşchiilor*: diametrul maxim de ondulare - d_c și înălțimea maximă - h_c și *calitatea suprafețelor prelucrate*: rugozitatea suprafețelor prelucrate - R_a , planeitatea suprafețelor prelucrate - PL și microduritatea straturilor superficiale - HV . Experimentele s-au realizat pe baza unui plan experimental compus centrat (vezi §5.4.1), în care nivelurile de variație ale parametrilor regimului de aşchiere acoperă o plajă largă de regimuri de aşchiere, de la degroșare la semifinisare. Determinarea funcțiilor de proces care exprimă legătura dintre rezultatele procesului și parametrii de regimului de aşchiere, s-a realizat cu ajutorul metodei suprafețelor de răspuns și a metodei de analiză statistică a varianței ANOVA - *Analyse of variance* (vezi §6.5). Studiul prezentat în acest capitol include și elemente publicate ale autorului [262,263].

7.1. Rezultate privind forțele de aşchiere

7.1.1. Standul experimental pentru măsurarea forțelor de aşchiere

Experimentele s-au realizat pe baza *planului experimental I*, utilizând semifabricatul SF1 pe care s-au realizat toate cele 20 de experimente (vezi §5.4.1). Pentru măsurarea forțelor de aşchiere s-a folosit un dinamometru cu mărci tensometrice, model K3D160.

7.1.2. Determinarea mărimii forțelor de aşchiere

Pentru a ușura analiza forțelor de aşchiere, în conformitate cu cercetările din literatura de specialitate [264,265], s-a stabilit ca la prelucrarea datelor să se utilizeze un filtru ce ia în considerare o evoluție aproximativ mediană a semnalului înregistrat. Filtrul utilizat a fost filtrul de tip Savitzky-Golay [266] pe o perioadă de 90 de puncte.

Conform schemei de prelucrare utilizate scula intră/iese progresiv din aşchiere, existând o zonă de stabilitate a procesului, în zona mediană a semifabricatului, în care dinții sculei aşchiază pe toată lățimea de aşchiere - a_e . Din zona centrală de stabilitate a procesului s-au utilizat valorile maxime din zece rotații complete succesive ale sculei, zona investigată, adică 50 valori = 5 dinți $\times$ 10 rotații, pentru determinarea valorilor maxime ale componentelor forței de aşchiere în sistemul de măsurare.

Forța de aşchiere F_c a fost determinată ca rezultată a celor trei forțe componente măsurate F_x , F_y și F_z cu ecuația (7.1.1):

$$F_c = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (7.1.1)$$

7.1.3. Influența parametrilor regimului de aşchiere asupra forțelor de aşchiere

S-a obținut un model ce prezintă un echilibru de complexitate și precizie cu 7 grade de libertate (*degrees of freedom - DF*), ecuația (7.1.2).

$$F_{cmax} = -459,2 + 284a_p + 1775f_z + 6,218v_c - 0,01821v_c^2 + 2055a_p f_z - 1,007a_p v_c - 12,5f_z v_c \quad (7.1.2)$$

Pentru a obține forțe de aşchiere minime, trebuie să se prelucreze cu adâncimi mici de aşchiere și avans pe dinte mic. Această abordare, deși duce la forțe de aşchiere mai mici - cu solicitări limitate asupra sculelor aşchietoare, poate avea un impact negativ asupra productivității prelucrărilor, deoarece volumul de material îndepărtat pe unitatea de timp este redus semnificativ.

Tabelul 7.1.1. Centralizarea datelor experimentale pentru planul experimental compus centrat.

Nr. exp.	Cod exp.		Variabile independente normate				Variabile independente naturale				Planul experimental I			Planul experimental II			
	I	II	a_p [mm]	f_x [mm/dinte]	v_c [m/min]	a_p [mm]	f_x [mm/dinte]	v_c [m/min]	$F_{c_{max}}$ [N]	d_c [mm]	h_c [mm]	T_{max} [°C]	R_a [μm]	PL [mm]	HV [HV/0,2]		
1.	1.1.	2.1.	1	1	1	2	0,2	150	1128,1	6,03	5,52	263,7	0,418	0,021	774,46		
2.	1.2.	2.2.	1	1	-1	2	0,2	90	1293,5	6,10	5,38	305,8	0,447	0,025	779,57		
3.	1.3.	2.3.	1	-1	1	2	0,1	150	730,2	5,79	5,54	260,9	0,227	0,011	732,69		
4.	1.4.	2.4.	1	-1	-1	2	0,1	90	813,3	5,90	5,47	302,7	0,429	0,020	756,55		
5.	1.5.	2.5.	-1	1	1	1	0,2	150	589,8	2,73	6,55	188,1	0,486	0,020	763,49		
6.	1.6.	2.6.	-1	1	-1	1	0,2	90	687,5	2,92	6,38	193,6	0,363	0,013	732,85		
7.	1.7.	2.7.	-1	-1	1	1	0,1	150	390,1	2,70	5,82	182,7	0,349	0,011	731,87		
8.	1.8.	2.8.	-1	-1	-1	1	0,1	90	420,1	2,88	5,72	191,9	0,380	0,013	726,89		
9.	1.9.	2.9.	0	0	0	1,5	0,15	120	771,6	4,63	6,19	222,1	0,345	0,030	731,66		
10.	1.10.	2.10.	0	0	0	1,5	0,15	120	776,4	4,68	6,17	232,8	0,338	0,028	735,88		
11.	1.11.	2.11.	0	0	0	1,5	0,15	120	774,4	4,64	6,14	228,9	0,356	0,028	732,69		
12.	1.12.	2.12.	-1	0	0	1	0,15	120	531,9	2,85	6,10	184,2	0,240	0,024	740,6		
13.	1.13.	2.13.	1	0	0	2	0,15	120	1011,5	6,02	5,49	257,9	0,244	0,030	758,15		
14.	1.14.	2.14.	0	-1	0	1,5	0,1	120	600,8	4,55	5,80	233,8	0,370	0,024	708,15		
15.	1.15.	2.15.	0	1	0	1,5	0,2	120	934,4	4,70	5,98	235,1	0,442	0,030	732,96		
16.	1.16.	2.16.	0	0	-1	1,5	0,15	90	799,8	4,74	6,21	235,6	0,446	0,019	734,12		
17.	1.17.	2.17.	0	0	1	1,5	0,15	150	714,6	4,61	6,35	192,8	0,427	0,014	730,67		
18.	1.18.	2.18.	0	0	0	1,5	0,15	120	775,8	4,63	6,20	225,9	0,344	0,027	734,44		
19.	1.19.	2.19.	0	0	0	1,5	0,15	120	779,7	4,67	6,21	227,8	0,332	0,030	737,34		
20.	1.20.	2.20.	0	0	0	1,5	0,15	120	774,4	4,64	6,24	215,9	0,347	0,027	731,05		

7.2. Rezultate privind dimensiunile macroscopice ale așchiilor

7.2.1. Măsurarea dimensiunilor macroscopice a așchiilor

Pentru caracterizarea dimensională la scară macroscopică a așchiilor detașate se definesc doi parametri dimensionali: diametrul maxim de ondulare - d_c și înălțimea maximă - h_c [262].

7.2.2. Influența parametrilor regimului de așchiere asupra dimensiunilor macroscopice a așchiilor

A rezultat un nou model matematic, cu 5 grade de libertate (*degrees of freedom* - DF), care este adecvat și prezintă un echilibru între complexitate și precizie:

$$d_c = -1,902 + 5,958a_p - 1,455f_z - 0,002267v_c - 1,028a_p^2 + 1,85a_pf_z \quad (7.2.1)$$

Cea mai mică valoare a diametrului maxim de ondulare a așchiei detașate se obține la valori minime ale adâncimii de așchiere și avansului pe dinte și valori maxime ale vitezei de așchiere ($a_p = 1$ mm, $f_z = 0,1$ mm/dinte, $v_c = 150$ m/min), iar cea mai mare valoare se obține la valori maxime ale adâncimii de așchiere și avansului pe dinte și valori minime ale vitezei de așchiere ($a_p = 2$ mm, $f_z = 0,2$ mm/dinte, $v_c = 90$ m/min).

A rezultat următorul model matematic, cu 7 grade de libertate:

$$h_c = 2,535 + 4,309a_p + 40,95f_z - 0,04242v_c - 1,273a_p^2 - 89,3f_z^2 + 0,000185v_c^2 + 7,5a_pf_z \quad (7.2.2)$$

Cea mai mică valoare a înălțimii maxime a așchiei detașate se obține la valori maxime ale adâncimii de așchiere și avansului pe dinte și valori medii ale vitezei de așchiere ($a_p = 2$ mm, $f_z = 0,2$ mm/dinte, $v_c = 120$ m/min), iar cea mai mare valoare se obține la valori minime ale adâncimii de așchiere și valori maxime ale avansului pe dinte și vitezei de așchiere ($a_p = 1$ mm, $f_z = 0,2$ mm/dinte, $v_c = 150$ m/min).

7.3. Rezultate privind temperaturile din proces

7.3.1. Standul experimental pentru măsurarea temperaturilor din proces

În experimente s-au utilizat 10 semifabricate SF2 (vezi §6.2.1). Pentru măsurarea temperaturilor din proces s-a utilizat tehnica termografiei, utilizând camera cu termoviziune OPTRIS PI400i (vezi §6.2.3).

7.3.2. Determinarea mărimii temperaturilor din proces

Calibrarea camerei termografice a constatat în încălzirea unui eșantion din oțelul prelucrat într-un cuptor cu rezistență electrică până la o temperatură de 500°C. Ecuația de calibrare (7.3.1) a fost determinată cu modulul *cftool* din MATLAB.

$$T_c = -1,503 \cdot 10^{-13}w_c^4 + 1,764 \cdot 10^{-9}w_c^3 - 6,708 \cdot 10^{-6}w_c^2 + 0,054w_c + 94,166 \quad (7.3.1)$$

unde: T_c este temperatura, în °C; w_c este media valorilor de radiație termică (infraroșie) a zonei investigate asociate imaginilor înregistrate cu camera termografică, în W/m².

Valoarea temperaturii maxime din proces a fost determinată ca medie aritmetică a vârfurilor de temperatură maxime înregistrate, de exemplu 263,7°C în experimentul 2.1.

7.3.3. Influența parametrilor regimului de așchiere asupra temperaturilor din proces

A rezultat următorul model matematic, cu 4 grade de libertate:

$$T_{max} = 222,39 + 45,05a_p - 14,14v_c + 13,44f_z^2 - 8,65a_pv_c \quad (7.3.2)$$

Din analiză rezultă că, pentru obținerea unor temperaturi cât mai mici în procesul de așchiere, trebuie să se prelucereze cu adâncimi de așchiere mici, cu un avans pe dinte de valoare medie și cu viteze de așchiere mari. Deși această strategie contribuie la reducerea temperaturilor din proces, aceasta poate influența negativ durabilitatea sculei deoarece vitezele mari de așchiere pot accelera uzura sculei.

7.4. Rezultate privind rugozitatea suprafețelor prelucrate

7.4.1. Măsurarea rugozității suprafeței prelucrate

Pentru analiza rugozității suprafețelor prelucrate s-a analizat doar parametrul de rugozitate R_a .

7.4.2. Influența parametrilor regimului de așchiere asupra rugozității suprafeței prelucrate

Model matematic rezultat, cu 8 grade de libertate (*degrees of freedom* - DF), este exprimat prin ecuația următoare (7.4.1):

$$R_a = 0,34509 + 0,0401 f_z - 0,0158 v_c - 0,10523 a_p^2 + 0,05877 f_z^2 + 0,08927 v_c^2 + 0,01113 a_p f_z - 0,04037 a_p v_c + 0,04088 f_z v_c \quad (7.4.1)$$

Rugozitatea minimă a suprafeței prelucrate se obține la valori minime ale adâncimii de așchiere și valori medii ale avansului pe dinte și vitezei de așchiere ($a_p = 1$ mm, $f_z = 0,15$ mm/dinte, $v_c = 120$ m/min), iar rugozitatea cea mai mare rezultă la valori medii ale adâncimii de așchiere și valori maxime ale avansului pe dinte și ale vitezei de așchiere ($a_p = 1,5$ mm, $f_z = 0,2$ mm/dinte, $v_c = 150$ m/min).

7.5. Rezultate privind abaterea de la planeitate a suprafețelor prelucrate

7.5.1. Măsurarea abaterii de la planeitate a suprafețelor prelucrate

Pentru măsurarea abaterii de la planeitate a suprafețelor prelucrate s-a utilizat o metodă de contact directă.

7.5.2. Influența parametrilor regimului de așchiere asupra abaterii de la planeitate a suprafeței prelucrate

A rezultat un nou model matematic, cu 6 grade de libertate (*degrees of freedom* - DF), care este adecvat și prezintă un bun echilibru între complexitate și acuratețe:

$$PL = -0,1674 + 0,0232 a_p - 0,08 f_z + 0,002967 v_c - 0,000012 v_c^2 - 0,00015 a_p v_c + 0,001167 f_z v_c \quad (7.5.1)$$

Pentru a obține abateri minime de la planeitate, trebuie utilizate valori minime ale parametrilor regimului de așchiere. Această strategie nu convine din punctul de vedere al productivității, care este minimă. Însă, utilizarea unei viteze de așchiere mai mari poate conduce la valori acceptabile ale abaterii de la planeitate, ceea ce îmbunătățește productivitatea prelucrării.

7.6. Rezultate privind microduritatea straturilor superficiale

7.6.1. Măsurarea microdurității stratului superficial

Pentru măsurarea microdurității stratului superficial al pieselor prelucrate s-a utilizat metoda de măsurare Vickers.

7.6.2. Influența parametrilor regimului de așchiere asupra microdurității stratului superficial

A rezultat un nou model matematic, cu 7 grade de libertate (*degrees of freedom* - DF), care este adecvat:

$$HV = 732,15 + 10,57 a_p + 12,72 f_z + 22,57 a_p^2 - 6,25 f_z^2 + 3,4 a_p f_z - 8,07 a_p v_c + 5,55 f_z v_c \quad (7.6.1)$$

Cea mai mare valoare a microdurității stratului superficial se obține la prelucrarea cu valori maxime ale adâncimii de așchiere și ale avansului pe dinte și cu viteze de așchiere minime ($a_p = 2$ mm, $f_z = 0,2$ mm/dinte, $v_c = 90$ m/min). Această combinație de valori ale parametrilor regimului de așchiere este avantajoasă și din punctul de vedere al productivității prelucrării.

8. Rezultate ale cercetării teoretico-experimentale privind frezarea de degroșare și de semifinisare

Obiectivul acestui studiu este de a analiza în detaliu și comparativ procesele de frezare de degroșare și frezare de semifinisare, în vederea înțelegerii mecanismelor și fenomenelor asociate formării și detașării așchiilor. Sunt analizate aspecte macroscopice și microscopice ale așchiilor detașate, în raport cu evoluția temperaturilor din proces și a forțelor de așchiere. Cele două procese analizate corespund experimentului 2, respectiv, 7 din planul experimental prezentat în subcapitolul §5.4.1 și analizat în capitolul §7. Studiul prezentat în acest capitol include și elemente publicate ale autorului [262].

8.1. Procedura de măsurare a parametrilor de proces

Standul experimental utilizat în acest studiu este prezentat în figura 8.1.1. Acesta este similar celui folosit pentru analiza forțelor de așchiere, având montată suplimentar camera cu termoviziune OPTRIS PI400i, utilizată la studiul temperaturilor de proces.

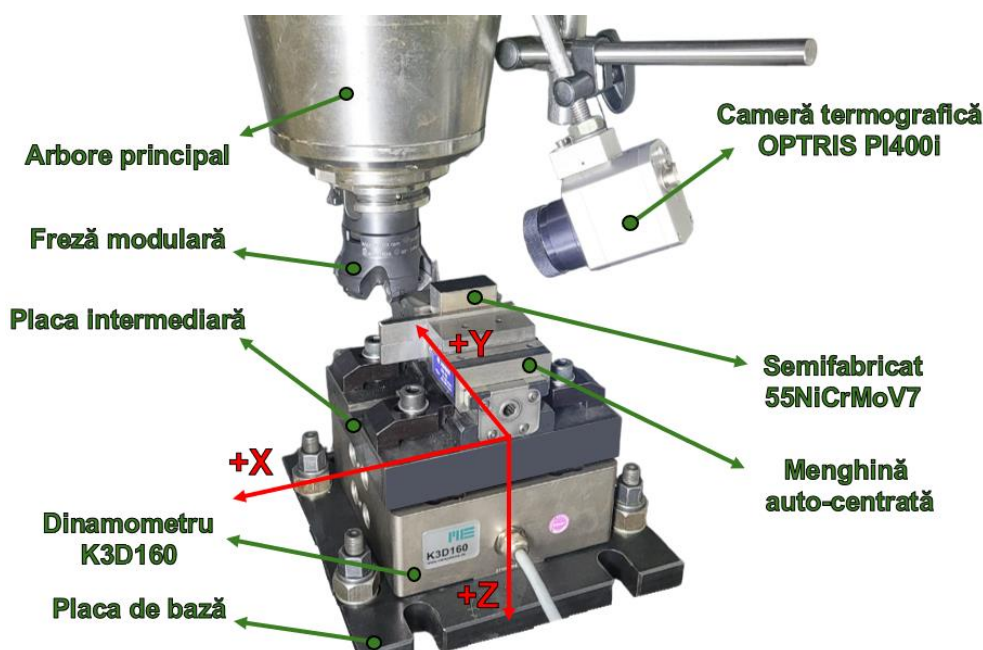


Figura 8.1.1. Standul experimental utilizat în experimentele de degroșare și semifinisare [262].

Valorile parametrilor regimului de așchiere, asociate prelucrărilor de degroșare și de semifinisare au fost:

- pentru degroșare (*experimentul 2*): $a_p = 2$ mm, $f_z = 0,2$ mm/dinte și $v_c = 90$ m/min;
- pentru semifinisare (*experimentul 7*): $a_p = 1$ mm, $f_z = 0,1$ mm/dinte și $v_c = 150$ m/min.

Pentru analiza evoluției forței la așchieria de către un dinte al frezei, forța de așchiere determinată în sistemul de măsurare a fost descompusă în componentele specifice sistemului de prelucrare al sculei: F_t - forța tangențială, pe direcția vitezei de așchiere; F_r - forța radială, pe direcția razei sculei; F_p - forța de pătrundere, pe direcția axială a sculei, figura 8.1.2a și b. Legătura dintre componentele forței de așchiere în sistemul de prelucrare al sculei și cele în sistemul de măsurare este dată de relațiile:

$$\begin{cases} F_t(\Phi) = -F_x \sin(\Phi) + F_y \cos(\Phi) \\ F_r(\Phi) = F_x \cos(\Phi) + F_y \sin(\Phi) \\ F_p(\Phi) = F_z(\Phi) \end{cases} \quad (8.1.1)$$

8.2. Analiza formei geometrice a așchiilor

La prelucrarea semifabricatului, adaosul de material este îndepărtat sub formă de așchii. Dimensiunile așchiei detașate diferă de dimensiunile așchiei teoretice. Așchia teoretică, specifică procesului de frezare plan-frontală, este caracterizată prin următorii parametri geometrici: lățimea așchiei - l_c , grosimea așchiei - t_c și lungimea așchiei - L_c , figura 8.2.1c. Lățimea așchiei este dependentă de adâncimea de așchiere - a_p și de unghiul de atac principal - K , iar grosimea așchiei este dependentă de avansul pe dinte f_z și de unghiul de atac principal - K . Lungimea așchiei depinde de diametrul frezei - D_c , și de lățimea radială de așchiere - a_e [262].

$$t_c = f_z \cdot \sin K \text{ [mm]}; l_c = \frac{a_p}{\sin K} \text{ [mm]} \quad (8.2.1)$$

Pentru analiza la scară microscopică a așchiilor detașate la frezarea de degroșare, respectiv, de semifinisare s-au realizat micrografii optice ale acestora ca în figura 8.2.1. Zonele notate cu A reprezintă începutul așchiei, iar zonele notate cu B sfârșitul așchiei [262].

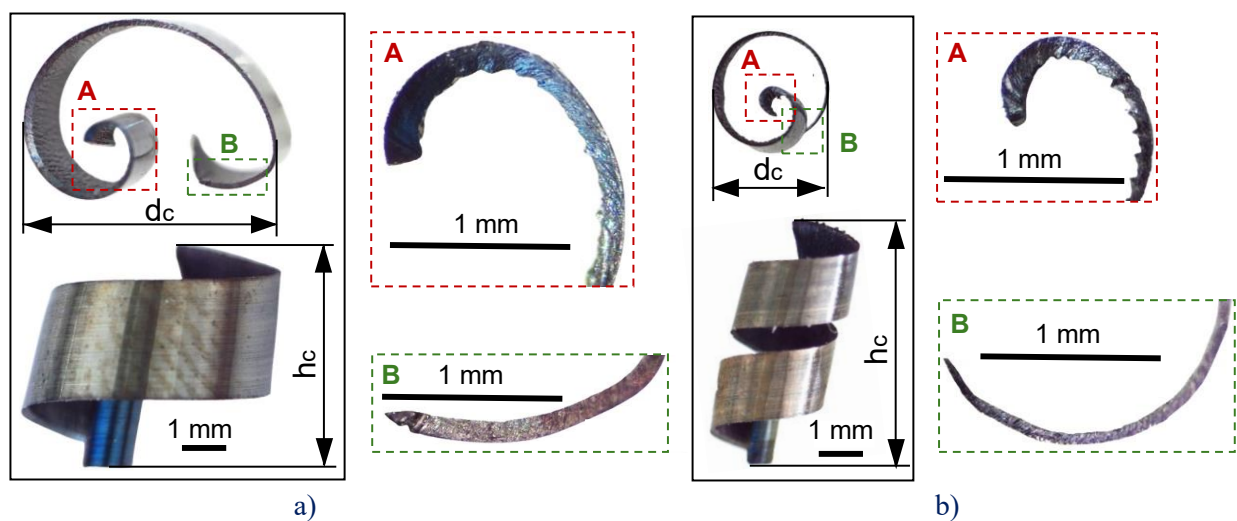


Figura 8.2.1. Micrografii optice ale așchiilor detașate pentru regimul de așchiere de [262]:
a) degroșare; b) semifinisare.

8.3. Analiza temperaturii din proces

Colorarea diferită a așchiilor din cele două experimente este în concordanță cu rezultatele obținute la măsurarea temperaturilor în așchii: la degroșare a rezultat o temperatură maximă în așchii de 305,8°C din figura 8.3.1, în timp ce la semifinisare temperatura maximă din așchii a fost de 182,7°C [262].

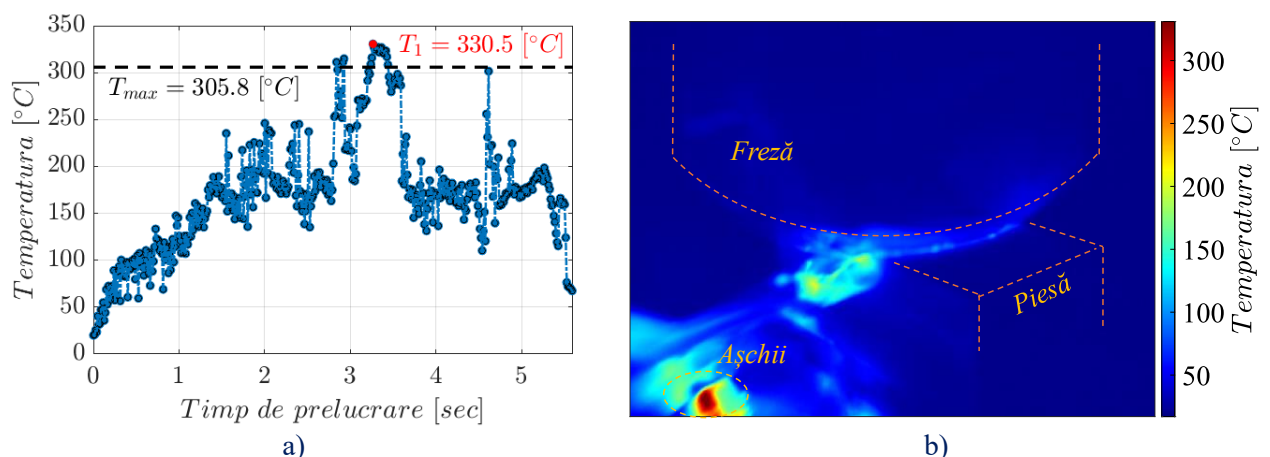


Figura 8.3.1. Temperaturile maxime din așchii la frezarea de degroșare [262]: a) evoluția temperaturilor din așchii pentru întregul experiment; b) imaginea termografică asociată punctului T_1 .

8.4. Analiza forței de așchiere

Evoluțiile componentelor forței de așchiere sunt corelate cu intensitățile proceselor de deformare mecanică din zona de forfecare a materialului prelucrat și a celor tribologice care au loc la interfațele sculă-așchie și sculă-piesă. Schema de lucru utilizată, în care formarea așchiei începe de la grosimea maximă către cea minimă (vezi figurile 8.4.2c și 8.4.2d) și variația foarte mică a grosimii așchiei teoretice la începutul prelucrării, au ca efect desfășurarea cu intensitate maximă a procesului de așchiere în prima sa parte [262].

Forța de așchiere tangențială - F_t este determinată, în principal, de efortul necesar pentru deformarea adaosului de prelucrare și producerea desprinderii acestuia, în zona tăișului sculei [262].

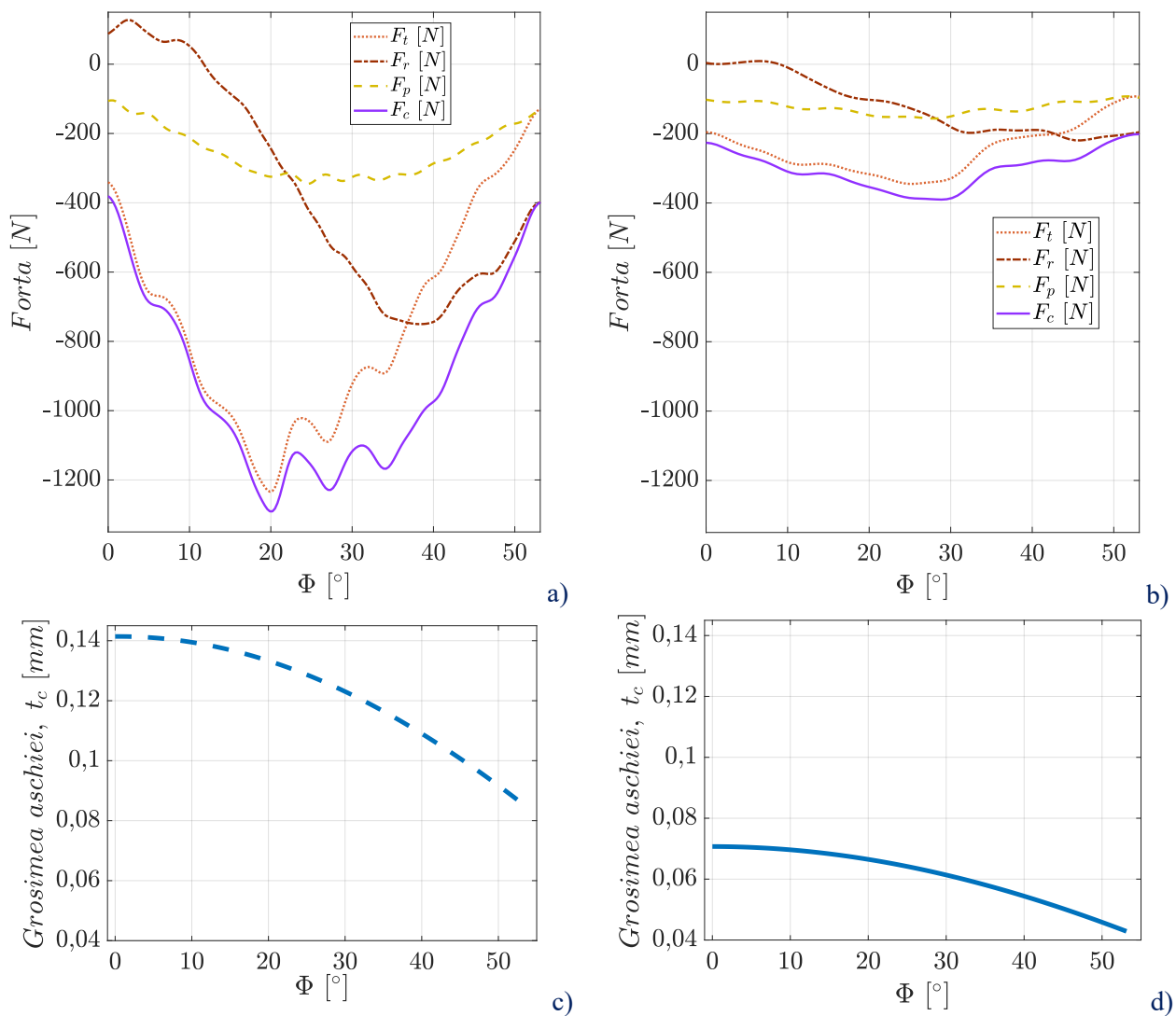


Figura 8.4.2. Evoluția componentelor forței de așchiere în sistemul de prelucrare al sculei [262]:

a) degroșare; b) semifinisare și evoluția grosimii așchiei pentru: c) degroșare; d) semifinisare.

Forța radială - F_r este determinată de frecarea sculă-semifabricat (la începutul procesului), de frecarea dintre materialul îndepărtat de pe semifabricat (așchia în curs de formare) și sculă (fața de degajare a acesteia) și de procesul de deformare plastică prin care se formează așchia (în zona feței de degajare a sculei) [262].

Forța de pătrundere - F_p este determinată de frecarea dintre sculă și suprafața prelucrată (piesa rezultată) și are o evoluție relativ uniformă [262].

Din analiza anterioară rezultă că forța tangențială de așchiere - F_t are rol major în formarea și îndepărtarea așchiei și este principala componentă a forței de așchiere - F_c [262].

8.5. Analiza morfologiei așchiilor

Pentru așchiile rezultate în cele două experimente s-au realizat micrografii MEB globale și detaliate ale acestora. Micrografii de ansamblu, frontale și laterale, cu marcarea zonelor care sunt detaliate, A, B și C în vedere frontală, respectiv, E, F și G în vedere laterală, se prezintă în figura 8.5.1 pentru așchia rezultată la degroșare.

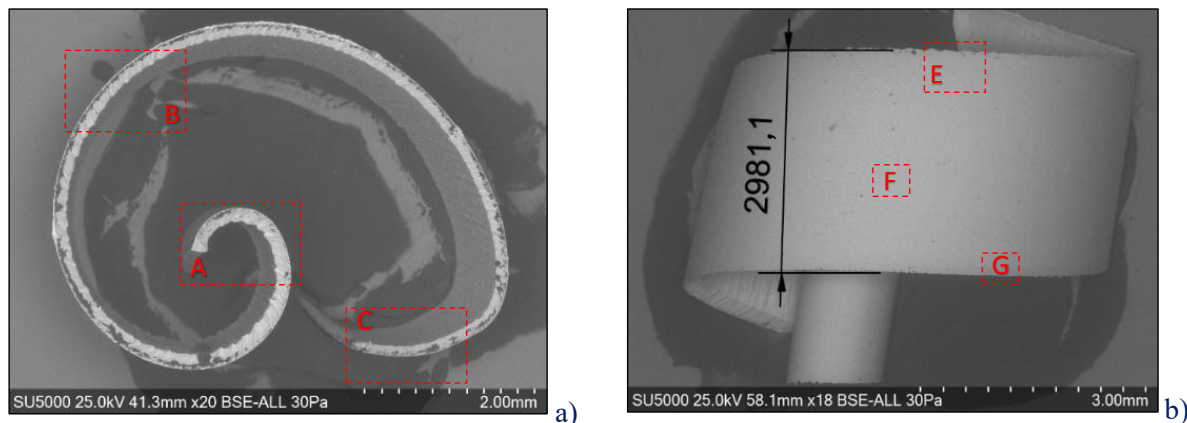


Figura 8.5.1. Micrografii MEB de ansamblu ale așchiei detașate la degroșare (*experimentul 2*), cu evidențierea zonelor detaliate [262]: a) vedere frontală; b) vedere laterală.

Pentru a analiza evoluția modului de segmentare a așchiilor în lungul așchiei s-au măsurat următorii parametri de segmentare a așchiei: pasul între planele de forfecare - p_c , dimensiunea vârfurilor dinților așchiei - t_p , dimensiunea văilor dinților așchiei - t_v , unghiul de forfecare - α și unghiul de bombare - β , pentru fiecare dintre cele două experimente. Au fost calculate valorile medii ale parametrilor de segmentare a așchiilor.

Analiza evoluției acestor parametri permite evidențierea următoarelor aspecte:

- toate valorile celor cinci parametri analizați sunt mai mari pentru așchiile detașate la degroșare, decât cele detașate la semifinisare [262];
- toate valorile parametrilor dimensionali de segmentare a așchiilor au o evoluție descrescătoare, din zona de început a așchiei spre zona de sfârșit a așchiei, fapt determinat de scăderea grosimii așchiei, atât a celei teoretice, cât și a celei detașate [262];
- valorile parametrilor unghiulari de segmentare a așchiilor au o evoluție diferită în lungul așchiei: în timp ce unghiul de forfecare - α are valori ridicate în zona de început a așchiei (A), scade în zona mediană a acesteia (B) și crește din nou către zona de final a așchiei (C), unghiul de bombare - β are o evoluție inversă, cu valori mai scăzute la începutul așchiei, valori maxime în zona mediană și din nou valori mai mici în zona de final a așchiei [262];
- unghiul de forfecare - α are valori sub 45 de grade în cazul așchiilor de semifinisare, ceea ce înseamnă că mecanismul de formare a așchiilor este de deformare prin forfecare, în timp ce în cazul degroșării valorile de peste 45 de grade ale unghiului de forfecare - α arată că deformarea așchiilor nu are loc doar prin deformare de forfecare [262].

Pentru analiza cantitativă a segmentării așchiei s-a evaluat și indicatorul gradul de segmentare a așchiei - G , definit cu ecuația 1.3.1 (vezi §1.3). Reprezentarea grafică a valorilor acestui indicator de-a lungul așchiei, scoate în evidență următoarele aspecte:

- valorile gradului de segmentare a așchiilor - G sunt mai mari în cazul așchiilor de semifinisare, în care s-a arătat că mecanismul de formare a așchiilor este de deformare prin forfecare [262];
- gradul de segmentare a așchiilor are valori relativ apropiate în zona de început, respectiv, de final al așchiei, dar valorile din zona mediană a lungimii așchiei sunt diferite de acestea: mai mici în cazul așchiilor de degroșare - rezultate la un regim de așchiere mai intens, respectiv, mai mari în cazul așchiilor de semifinisare - rezultate la un regim de așchiere mai puțin intens [262].

9. Rezultate ale cercetării teoretico-experimentale privind uzura sculei

Obiectivul acestui capitol este de a identifica strategia adecvată pentru măsurarea uzurii sculei. Diferite norme și standarde [35], dar și studii științifice (vezi §2.4), propun caracterizarea uzurii părții active a sculei printr-o valoare scalară (unidimensională) ce reprezintă distanța între tăișul sculei și punctul cel mai îndepărtat din zona uzată a plăcuței. Această manieră de măsurare a uzurii nu este întotdeauna cea mai pertinentă. Astfel, în acest capitol este abordată măsurarea uzurii sculei prin raportare la suprafețele uzate (bidimensional) și prin măsurarea volumului uzat al sculei (tridimensional). De asemenea, au fost realizate diferite corelări între cele 3 strategii de determinare a uzurii și diferiți parametri ce caracterizează procesul de așchiere: forța de așchiere rezultantă, temperatura maximă din proces și unele caracteristici ale calității suprafețelor prelucrate. Finalitatea acestui studiu constă în identificarea parametrului cel mai pertinent ce caracterizează uzura sculei.

9.1. Procedura de măsurare și analiză a uzurii plăcuțelor așchietoare

9.1.1. Standul experimental, experimente realizate

Standul experimental utilizat în acest studiu cuprinde elemente prezentate în §6.2: centrul de prelucrare DMG MORI ecoMill70, menghina mecano-hidraulică NOVA GRUP NGV MH125, scula formată din capul de frezat 345-050Q22-13H și plăcuțele amovibile 345R-1305M-PM 1130 de la SANDVIK COROMANT și camera cu termoviziune OPTRIS PI400i.

Dimensiunile semifabricatului au fost stabilite astfel: lungimea de prelucrare - l_f , de 100 mm; lățimea de prelucrare - a_e , de 40 mm; înălțimea semifabricatului - h_f , de 100 mm. Pentru acest studiu au fost realizate și prelucrate 27 de semifabricate.

Parametrii regimului de așchiere utilizați în acest studiu au fost aleși în urma observațiilor desprinse din cercetările anterioare (vezi §7 și §8): adâncimea de așchiere - a_p de 1 mm; avansul pe dinte - f_z de 0,2 mm/dinte; viteza de așchiere - v_c de 120 m/min.

Experimentele au fost realizate folosind aceleași muchii pentru fiecare dintre cele cinci plăcuțe ale frezei.

9.1.2. Mijloace și tehnici de măsurare a uzurii

Geometria plăcuței așchietoare, disponibilă pe pagina de internet a producătorului SANDVIK COROMANT [244] se prezintă în figura 9.1.1.

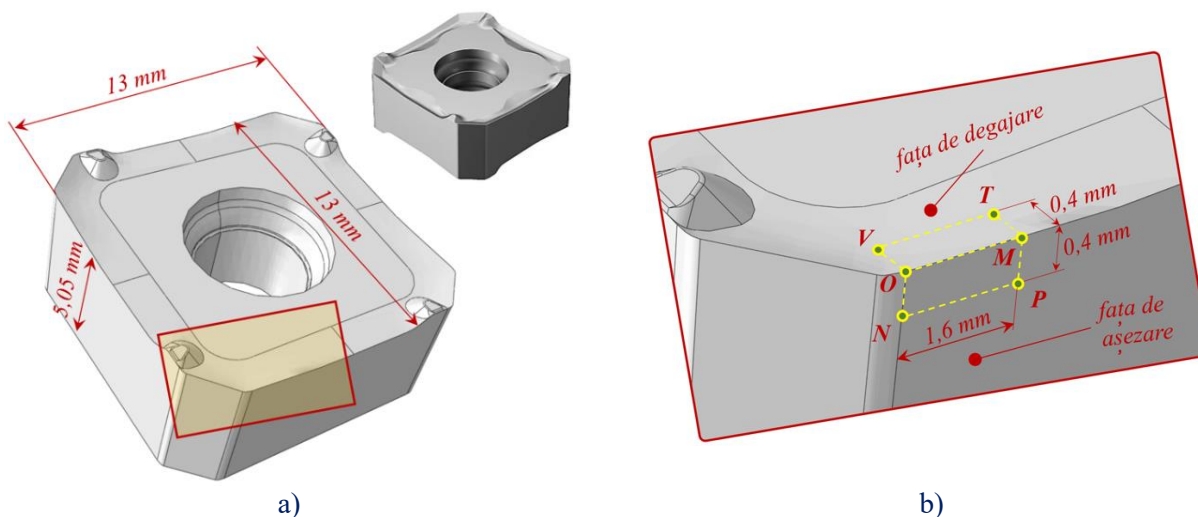


Figura 9.1.1. Geometria plăcuței așchietoare. a) geometria și dimensiunile plăcuței așchietoare; b) poziționarea și dimensiunile zonelor investigate pentru determinarea uzurii.

Analizele prin microscopie electronică au fost realizate pentru o plăcuță aşchiitoare nouă şi pentru 5 experimente asociate unor timpuri de utilizare ai plăcuțelor:

- Experimentul 3.0: $T_p = 0,03 \text{ [min]}$;
- Experimentul 3.4: $T_p = 4 \cdot 2,41 \text{ [min]} = 9,64 \text{ [min]}$;
- Experimentul 3.10: $T_p = 10 \cdot 2,41 \text{ [min]} = 24,10 \text{ [min]}$;
- Experimentul 3.18: $T_p = 18 \cdot 2,41 \text{ [min]} = 43,38 \text{ [min]}$;
- Experimentul 3.24: $T_p = 24 \cdot 2,41 \text{ [min]} = 57,84 \text{ [min]}$;
- Experimentul 3.27: $T_p = 27 \cdot 2,41 \text{ [min]} = 65,07 \text{ [min]}$.

9.1.3. Metode de evaluare a uzurii

După timpuri de utilizare a frezei definiți anterior au fost realizate mai multe micrografii prin microscopie optică, pentru a evidenția modul de uzare a plăcuțelor aşchiitoare. Dintre acestea au fost selectate micrografiile realizate la o mărire de $\times 60$ în care sunt observabile fețele de aşezare ale celor cinci plăcuțe.

Au fost delimitate zonele de uzură contururi folosind diferiți algoritmi implementați în softul de procesare MATLAB R2023 prin intermediul funcției *imcontour*.

Aplicând această strategie de determinare a uzurii s-au identificat zonele uzate și evoluția acestora în funcție de timpul de prelucrare. Mai mult decât atât, a putut fi determinată într-o manieră cantitativă evoluția zonelor considerate uzate.

9.2. Analiza unidimensională a evoluției uzurii

Parametrul des folosit pentru caracterizarea intensității uzurii sculei este uzura abrazivă de pe fața de aşezare a plăcuțelor aşchiitoare, caracterizată prin lățimea maximă a zonei uzate - VB .

Cea mai solicitată plăcuță, z_{c4} , prezintă o uzare VB de 0,236 mm, de până la trei ori mai mare față de celelalte plăcuțe. Se poate distinge o tendință atipică în evoluția uzării acestei plăcuțe fapt datorat, poziționării imprecise a acesteia în locașul din capul de frezat sau/ și a orientării și fixării succesive a acesteia pentru realizarea observațiilor și a micrografiilor.

9.3. Analiza bidimensională a evoluției uzurii

Un alt parametru al uzurii sculei, dar care este puțin utilizat în cercetări, este definit de aria suprafeței uzate - WA .

Pentru toate plăcuțele aşchiitoare, parametrul de uzură WA are o evoluție crescătoare. Forma acestor evoluții este apropiată de cea clasică a uzurii (vezi §1.4) pentru plăcuțele z_{c1} , z_{c2} și z_{c3} . Însă, evoluția parametrului de uzură bidimensional WA este diferită de evoluția parametrului de uzură unidimensional VB : valorile parametrului de uzură VB rămân într-o zonă de stabilitate relativă, în special pentru plăcuțele z_{c1} și z_{c3} , în timp ce valorile parametrului WA prezintă creșteri continue. Evoluția parametrului WA pentru plăcuța z_{c4} este diferită în raport cu cele pentru plăcuțele z_{c1} , z_{c2} și z_{c3} , evidențiind o uzare mai intensă a acesteia, dar este asemănătoare ca formă evoluției parametrului de uzură VB al acesteia.

9.4. Analiza tridimensională a evoluției uzurii

O abordare modernă a analizei uzurii sculei aşchiitoare constă în identificarea volumului de material îndepărtat de pe sculă - WV [142]. În acest scop se pot utiliza diferite tipuri de echipamente de scanare tridimensională a suprafețelor uzate ale sculei, în care porțiuni de materialul acesteia sunt desprinse din volumul inițial delimitat de geometria sculei aşchiitoare.

Formele tridimensionale ale uzurii au fost determinate pentru plăcuța z_{c4} . Valorile acestor diferențe de volum și evoluția lor în timp, asociate diferiților timpii de prelucrare (24,1 minute, 43,38 minute, 57,84 minute și 65,07 minute), se prezintă în figura 9.4.1.

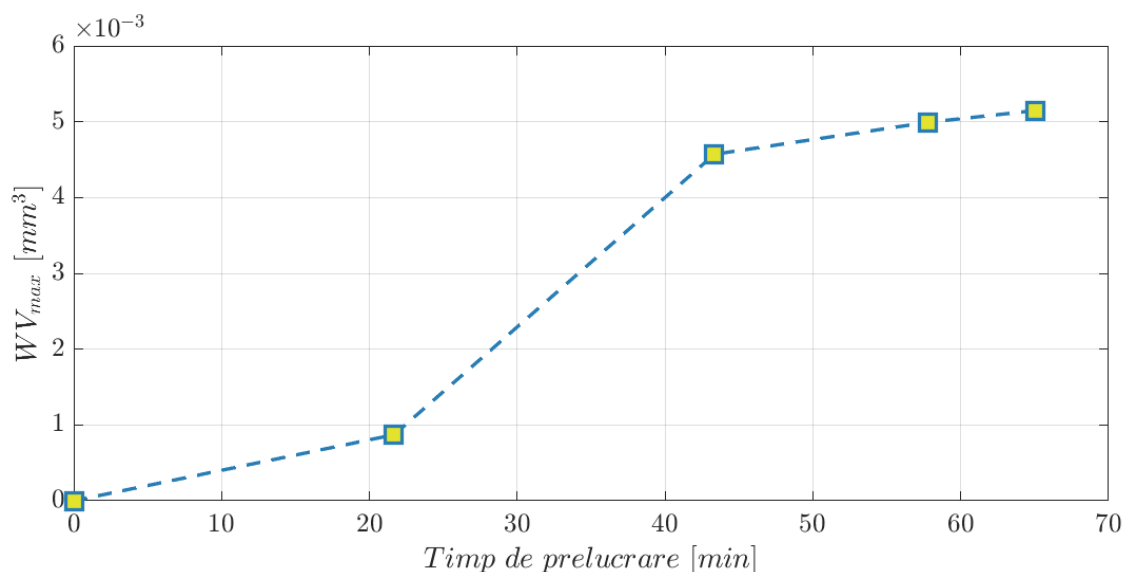


Figura 9.4.1. Evoluția uzurii volumice WV a plăcuței z_{c4} în funcție de timpul de prelucrare.

9.5. Analiza tipurilor de uzură a sculei

Pentru a înțelege mecanismele de uzură a plăcuțelor așchietoare și a putea explica diferențele dintre evoluțiile celor trei tipuri de uzuri analizate anterior (unidimensională - VB , bidimensională - WA și tridimensională - WV) s-au realizat analize detaliate pe plăcuța z_{c4} , cea pentru care uzura a fost cea mai intensă. Aceste analize s-au realizat pe baza microgafiilor obținute prin microscopie electronică cu baleiaj - MEB și spectrometrie de fluorescență cu radiații X cu dispersie după energie - EDS.

9.6. Influența uzurii sculei asupra parametrilor de proces și a calității suprafețelor prelucrate

9.6.1. Influența uzurii sculei asupra forței de așchiere

Se constată o evoluție aproape constantă a forței maxime de așchiere în primele trei experimente: 659,2 N în experimentul 3.0 (momentul inițial, freză cu muchii noi), 660,5 N în experimentul 3.4 (freza utilizată 9,64 minute) și 662,8 N în experimentul 3.10 (freza utilizată 24,1 minute). Ulterior, forța maximă de așchiere are o creștere constantă: la 702,8 N în experimentul 3.18 (freza utilizată 43,38 minute), la 729,9 N în experimentul 3.24 (freza utilizată 57,84 minute) și la 742,9 N în experimentul 3.27 (freza utilizată 65,07 minute).

9.6.2. Influența uzurii sculei asupra temperaturii din proces

Evoluția temperaturii maxime din proces după diferite momente de utilizare a sculei se prezintă în figura 9.6.2b. În momentul utilizării unei freze noi (experimentul 3.0) temperatura maximă din proces este de 209,4°C. Apoi, după utilizarea frezei 9,64 minute temperatura maximă are o creștere semnificativă, la 253,2°C, după care creșterea temperaturii odată cu utilizarea frezei este mai mică: 264,5°C după 24,1 minute, 280,1°C după 43,38 minute, respectiv, 292,3°C după 57,84 minute de utilizare a frezei. În final, temperatura maximă din proces crește brusc, până la 321,2°C, fapt care poate fi corelat cu creșterea gradului de uzare a plăcuțelor.

9.6.3. Influența uzurii sculei asupra calității suprafețelor prelucrate

Evoluția rugozității suprafețelor prelucrate după diferite momente de utilizare a sculei se prezintă în figura 9.6.3b. Forma acestei curbe este liniară în raport cu primele 5 experimente (momente de utilizare a frezei), valorile rugozității crescând continuu, odată cu utilizarea frezei și uzura ei, de la valori de 0,375 μm pentru freza nouă, la 0,682 μm pentru o durată de utilizare a frezei de 57,84 minute. Însă, odată cu creșterea semnificativă a gradului de uzare a plăcuțelor așchietoare, durata utilizării freze de 65,07 minute (experimentul 3.27) rugozitatea R_a are o creștere semnificativă, la 0,816 μm .

Evoluția microdurității pieselor prelucrate după diferite momente de utilizare a sculei se prezintă în figura 9.6.4b. Curba de evoluție a microdurității are o alură liniară în raport cu primele 4 experimente (momente de utilizare a frezei), urmată de o aplatizare și o creștere bruscă. Microduritatea piesei prelucrată cu freza nouă (muchii neuzate) este de 701,4 HV/0,2, mult mai mare în raport cu cele a materialului inițial, de 477,4 $\pm$ 3 HV/0,2, ceea ce indică o ecruisare puternică a stratului superficial. Microduritatea crește continuu, odată cu utilizarea frezei și uzura acesteia, ajungând la 778,6 HV/0,2 după o durată de utilizare a frezei de 65,07 minute (experimentul 3.27).

9.7. Compararea și corelarea rezultatelor

9.7.1. Compararea evoluției parametrilor de uzură ai sculei

Analiza evoluției celor trei parametri de uzură a plăcuței așchietoare Z_{c4} , permite evidențierea următoarelor aspecte:

- parametrul de uzură unidimensională VB are o evoluție relativ uniformă ca intensitate pe perioada analizată, această evoluție fiind foarte apropiată de una liniară;
- parametrul de uzură bidimensională WA are o evoluție diferită de parametrul VB , constând într-o evoluție mai puțin intensă în prima parte (până la momentul de prelucrare 24,1 min), urmată de o evoluție aproximativ liniară și mai accentuată, în cea de-a doua parte;
- evoluția parametrului de uzură WV , poate fi caracterizată prin trei zone: prima zonă cu o evoluție mai puțin intensă (până la momentul de prelucrare 24,1 min), a doua zonă cu o evoluție intensă (până la momentul de prelucrare 43,38 min) și a treia zonă, cea de final, cu o evoluție mai puțin intensă decât cea din a doua zonă și chiar decât cea din prima zonă.

9.7.2. Corelarea rezultatelor procesului de frezare cu uzura sculei

Pentru a evidenția și a compara influența celor trei parametri de uzură a sculei, VB , WA , WV , asupra unor rezultate ale procesului de frezare (F_c , T_{max} , R_a și $HV/0,2$) s-a realizat o modelare matematică a acestor dependențe. În acest scop s-au parcurs etapele: 1) normalizarea datelor; 2) reprezentarea grafică a dependențelor și stabilirea tipului ecuației polinomiale care să exprime această dependență; 3) determinarea ecuațiilor polinomiale și analiza acestora. Acestea se prezintă după cum urmează.

În ceea ce privește influența pe care o au mărimile normate ale parametrilor de uzură asupra mărimilor normate ale rezultatelor de proces, apreciată prin mărimea pantei din ecuația polinomială, se constată următoarele:

- parametrul de uzură VB are cea mai mare influență asupra rezultatelor de proces analizate (cu valori ale pantei cuprinse între 0,87 și 1,09), fiind urmat de parametrul de uzură WA (cu valori ale pantei cuprinse între 0,72 și 0,99) și parametrul de uzură WV (cu valori ale pantei cuprinse între 0,68 și 0,90);
- ordinea descrescătoare în care sunt influențate rezultatele de proces de parametri de uzură determinați este: forța de așchiere (cu valori ale pantei cuprinse între 1,09 și 0,9), rugozitatea suprafeței prelucrate (cu valori ale pantei cuprinse între 0,93 și 0,74), microduritatea straturilor superficiale (cu valori ale pantei cuprinse între 0,89 și 0,71) și temperatura maximă din proces (cu valori ale pantei cuprinse între 0,87 și 0,68).

10. Modelarea și simularea numerică a procesului de frezare

Obiectivul cercetărilor prezentate în acest capitol este de a realiza un model numeric simplificat pentru simularea procesului de frezare plan-frontală, pentru două regimuri de așchiere diferite: de degroșare și de semifinisare, ce reprezintă extremele planului experimental prezentat în capitolul §5.4.1. Modelele numerice au fost dezvoltate folosind programul ABAQUS 2022 Explicit și sunt axate pe formarea așchii pe un singur dinte al sculei, pentru a putea analiza fenomenele asociate formării așchii. Pentru definirea comportamentului termo-mecanic al oțelului 55NiCrMoV7 în cadrul modelului numeric s-a utilizat legea constitutivă Johnson-Cook, iar valorile parametrilor acesteia au fost determinate pe baza încercărilor mecanice de tracțiune, monotone și dinamice, dar și de forfecare, la diferite temperaturi. Validarea modelelor numerice s-a realizat prin compararea forțelor de așchiere, a temperaturilor din proces și a dimensiunilor așchiilor rezultate din simularea celor două procese de frezare simulate cu cele obținute experimental [270].

10.1. Construcția modelelor numerice tridimensionale

10.1.1. Definirea geometriei modelelor numerice

Construcția modelelor s-a bazat, într-o prima abordare, pe definirea geometriilor simplificate pentru plăcuța așchietoare și pentru semifabricate. Semifabricatele au fost definite simplificat, pentru a reduce durata de calcul, cu o geometrie ce cuprinde o parte din semifabricatul de bază cu o lățime de 20 mm, așa cum este prezentat în subcapitolul §6.2.1 corespunzător *planului experimental I*.

10.1.2. Constrângerea modelelor numerice

• Condițiile la limită

Suprafața de degajare a plăcuței așchietoare este constrânsă în punctul de referință - OP, ce se regăsește la o distanță de 25 mm de vârful plăcuței - VP, ce reprezintă raza sculei așchietoare, figurile 10.1.1a și b. Condițiile la limită impuse modelului la nivelul suprafeței de degajare a plăcuței sunt: viteza de rotație a frezei - v_c și viteza de avans - v_f . Astfel, gradele de libertate de translație după axele X și Z, dar și rotațiile după X și Y sunt preluate pentru suprafețele de degajare a plăcuțelor. La nivelul semifabricatului, au fost impuse condiții de încadrare a acestuia, pe suprafețele laterale și pe suprafața inferioară. În schimb, volumele definite ca așchie și zonă de separare au gradele de libertate nepreluate.

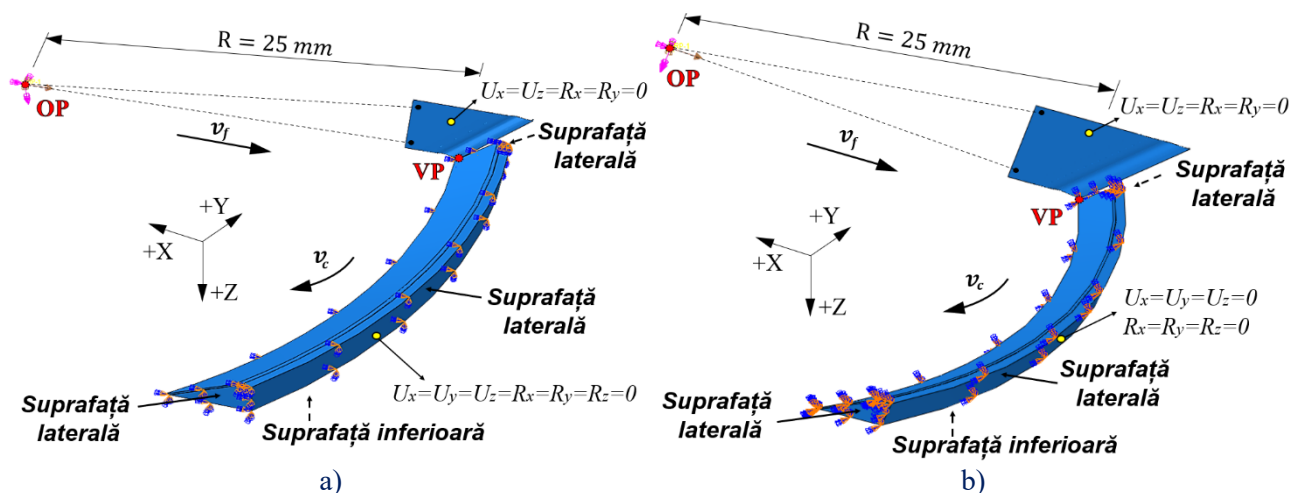


Figura 10.1.1. Condiții la limită: a) modelul numeric pentru frezarea de degroșare;
b) modelul numeric pentru frezarea de semifinisare.

- *Contactul și frecarea dintre suprafețe*

Contactul între sculă și semifabricat a fost modelat folosind legea lui Coulomb, cu o valoare a coeficientului de frecare de 0,2 [226] ce este o valoare specifică frecării dintre două suprafețe aflate în contact (vezi §3.1.5). Pentru ca așchia să se poată forma a fost nevoie să fie definite două tipuri de contact. Prima condiție de contact impusă așchiei este de tipul auto-contact (*self contact*), pentru ca în timpul simulării să nu se întrepătrundă cu ea însăși. Al doilea tip de contact este definit între suprafața de degajare simplificată a plăcuței și suprafețele așchiei. Tipul de contact folosit în acest caz este de tipul suprafață la suprafață (*surface-to-surface contact*), pentru ca aceste suprafețe să nu se întrepătrundă, iar așchia să alunece pe suprafața de degajare a plăcuței.

10.1.3. Discretizarea modelelor numerice

Modelul asociat semifabricatului de degroșare a fost discretizat în ansamblu său cu 60000 elemente de tip paralelipipedic - C3D8T cu 67771 noduri. Modelul pentru semifabricatul de semifinisare a fost definit 36000 elemente de tip paralelipipedic - C3D8T cu 41410 noduri.

Fiind o suprafață nedeformabilă, suprafața de degajare simplificată a plăcuței amovibile a fost discretizată cu 36673 elemente de tip patrulater - R3D4 cu 37309 noduri.

10.2. Caracterizarea comportamentului termo-mecanic al oțelului dur 55NiCrMoV7

10.2.1. Încercări la tracțiune și la forfecare monotonă la diferite temperaturi

Efectuarea încercărilor la tracțiune monotonă la viteza de deformare de referință de $2,22 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ și temperatura ambiantă de 22°C a fost realizată pe o epruvetă normalizată DIN EN ISO 6892-1 [238], cu minim 3 repetări pentru fiecare condiție. Pe zona investigată a fost realizat un codaj aleatoriu (densitate de puncte negre pe fond alb) pentru a măsura câmpurile de deformații folosind corelarea imaginilor numerice - DIC (*Digital Image Correlation*).

Încercările au fost realizate pe o mașină de încercat ISTRON 5969 cu o forță maximă de 50 kN. Sistemul de achiziție al imaginilor utilizat a fost GOM. Frecvența de achiziție a imaginilor pentru această încercare a fost de 1 Hz. Încercarea la tracțiune monotonă a fost realizată cu viteza de deformare de $4,7 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ la temperatura ambiantă, dar și încercările de tracțiune realizate cu viteza de deformare de referință $2,22 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ la temperaturile de 200°C și 400°C .

Încercările de forfecare la viteza de deformare de referință de $2,22 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ și trei temperaturi diferite de 22°C , 200°C și 400°C au fost realizate cu o epruvetă specifică acestui studiu.

Standul experimental utilizat pentru realizarea încercărilor la tracțiune și forfecare monotonă la temperaturi diferite a fost o mașină pentru încercări mecanice ISTRON 1342 cu o forță maximă de 100 kN. Pentru încălzirea epruvetelor a fost utilizat un cuptor mobil CERHEC 1400 ce poate fi încălzit la temperaturi de 1400°C și comandat de la un panou de comandă pentru a stabili temperaturile de încălzire de 200°C sau 400°C . Imaginile zonelor de interes au fost înregistrate utilizând o cameră cinematică standard, monocromă cu un codaj pe 12 biți, de tip RETIGA 6000 cu o frecvență de achiziție de 2 Hz. Mărimea captorului de tip CCD este de $2750 \text{ pixeli} \times 2200 \text{ pixeli}$.

10.2.2. Încercarea la tracțiune dinamică

Încercarea la tracțiune dinamică cu o viteză de deformare de $2 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ la temperatura ambiantă a fost realizată pe o epruvetă cilindrică cu filete M14 la capetele acesteia.

Standul experimental utilizat pentru această încercare a fost de tipul barelor cu presiune de tip Hopkinson. În timpul încercării sunt înregistrate și imaginile cu o cameră ultra-rapidă FASTCAM SA-X2 cu o frecvență de achiziție de 2 MHz. Sunt utilizate simultan și două sisteme de iluminat cu incandescență DEDOLIGHT DLH400DT, figura 10.2.4.

10.2.3. Determinarea valorilor parametrilor legilor de comportament

Pe curbele de tracțiune au fost identificate rezistența mecanică maximă - σ_m a oțelului 55NiCrMoV7 - valoarea $1369,5 \pm 15 \text{ MPa}$ și deformația relativă maximă - ε_r , ce are valoarea de

8,5±0,5%. Domeniul de elasticitate a fost determinat ca zonă liniară a curbei o-a sau o-a'. S-a identificat modulul lui Young - E de 203334±100 MPa, cu valorile tensiunii nominale - σ_{el} și a deformației nominale în direcție longitudinală - ε_{elxx} . Pentru punctele ce delimitează domeniul de elasticitate au fost selectate și valorile de deformație nominală în direcție longitudinală - ε_{elxx} și transversală - ε_{elyy} și a fost identificat coeficientul lui Poisson - ν de 0,28±0,03.

Pornind de la aceste curbe ale încercărilor la tracțiune, realizate cu viteze de deformare cvasi-statice și dinamice și la diferite temperaturi, au fost determinate valorile parametrilor Johnson-Cook, iar rezultatele obținute sunt notate în tabelul 10.2.1, determinate conform metodologiei din lucrarea [271].

Tabelul 10.2.1. Valorile determinate ale parametrilor legii constitutive Johnson-Cook.

A [MPa]	B [MPa]	n [-]	C [-]	m [-]	T_t [°C]	T_r [°C]	$\dot{\varepsilon}_{pl}^0$ [s ⁻¹]
1110	1039	0,38	0,0251	1,43	1490	22	0,000222

Valorile rezultate pentru parametrii legii Johnson-Cook, prezentate în tabelul 10.1.1, au fost validate prin analiza modului de suprapunere a curbei determinată de modelul Johnson-Cook cu cea obținută experimental, colorate cu galben în figura 10.2.1, pentru încercarea realizată la viteza de deformație de referință de $2,22 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ și temperatură de 200°C.

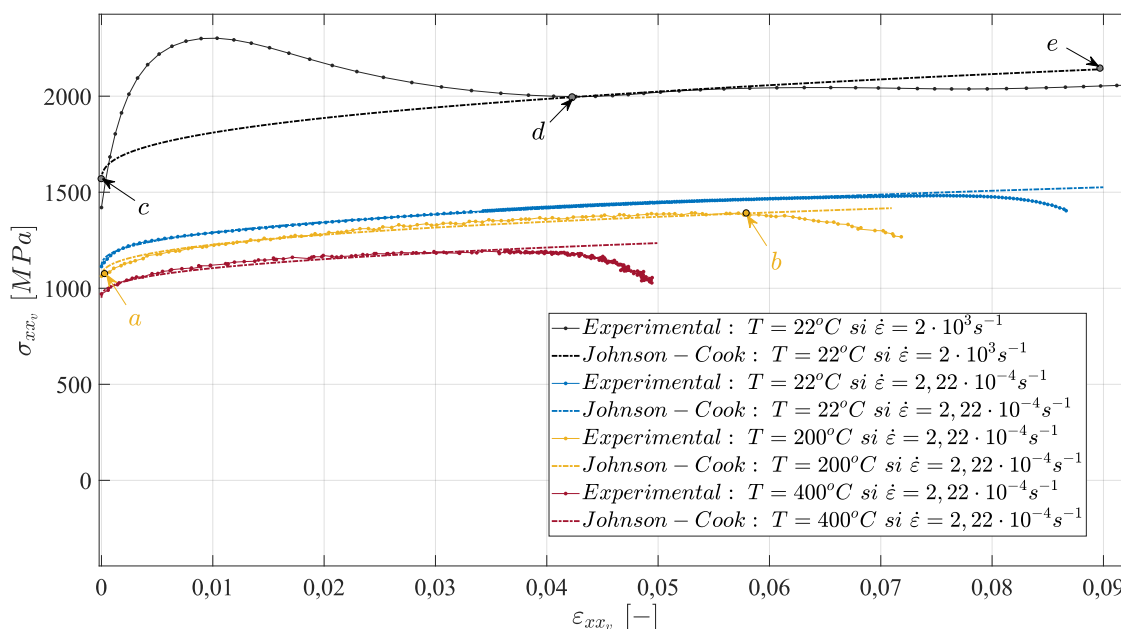


Figura 10.2.1. Validarea valorilor determinate pentru parametrii legii constitutive Johnson-Cook.

Pentru definirea completă a comportamentului materialului la așchiere este necesar să fie determinat și comportamentul de rupere a materialului. Valorile obținute pentru punctul de inițiere al ruperii și pentru deplasarea plastică echivalentă determinate în funcție de temperatură sunt prezentate în tabelul 10.2.2.

Tabelul 10.2.2. Valorile determinate pentru inițierea ruperii materialului și deplasării plastice echivalente în funcție de temperatură.

Temperatura [°C]	ε_{pl}^0 [-]	u_{pl} [mm]
22	0,0784	0,1043
200	0,1931	0,1064
400	0,0836	1,2204

10.2.4. Definirea comportamentului materialului în modelul numeric

În modelul numeric, comportamentul materialului asociat semifabricatului a fost definit prin:

- proprietățile fizice ale oțelului 55NiCrMoV7: densitate, conductivitate termică, căldură specifică, temperatura de topire, fracția de transformare a lucrului mecanic de deformare în căldură, cu valorile prezentate în tabelul 6.1.2 din subcapitolul §6.1.2;

- comportamentul elastic al materialului, prin parametrii elastici: modul de elasticitate și coeficientul al lui Poisson, cu valorile determinate în capitolul §10.2.3;
- comportamentul termo-elasto-vâsco-plastic al materialului, prin legea constitutivă Johnson-Cook, cu valorile parametrilor menționate în tabelul 10.2.1;
- comportamentul de rupere a materialului, prin parametrii deformația plastică inițială și deplasare plastică relativă, cu valorile menționate în tabelul 10.2.2.

10.3. Validarea modelelor numerice

10.3.1. Validarea modelelor numerice prin analiza forțelor de așchiere

Valorile medii ale forțelor de așchiere în direcțiile axelor Y și Z rezultate din simulare au fost comparate cu cele obținute experimental. La frezarea de degroșare, diferențele dintre valorile obținute prin simulare și cele obținute experimental nu sunt foarte mari: 11,3% în direcția axei Y și 6% în direcția axei Z. În schimb, la frezarea de semifinisare, diferențele sunt semnificative: 40,5% în direcția axei Y și 41,2% în direcția axei Z.

10.3.2. Validarea modelelor numerice prin analiza temperaturilor din proces

Compararea valorilor maxime de temperatură din cele două procese de frezare studiate, obținute prin simulare numerică și experimental. Se constată că pentru frezarea de degroșare există o diferență de 4,8% între valorile obținute prin simulare față de cele rezultate experimental, în timp ce pentru frezarea de semifinisare diferențele dintre valorile obținute prin simulare față de cele rezultate experimental sunt de 21,2%.

10.3.3. Validarea modelelor numerice prin analiza dimensiunilor așchiilor

Se constată că la frezarea de degroșare există diferențe de 4,9% pentru diametrul de înfășurare al așchiei, și de 13,2% pentru înălțimea așchiilor, între valorile obținute prin simulare față de cele rezultate experimental. La frezarea de semifinisare diferențele dintre valorile obținute prin simulare față de cele rezultate experimental sunt de 42,6%, pentru diametrul de înfășurare al așchiei, și de 7,6% pentru înălțimea așchiilor.

10.3.4. Concluzii privind validarea modelelor numerice

Pe baza acestor remarci se poate concluziona că modelul numeric simplificat dezvoltat pentru procesul de frezare de plan-frontală este corespunzător pentru simularea prelucrărilor de degroșare, dar nu și pentru prelucrările de semifinisare. Ecarturile mari între valorile rezultate din simulare și cele obținute experimental la frezarea de semifinisare pot avea cauze multiple, dintre care cele mai importante se apreciază a fi:

- utilizarea unei geometrii simplificate a suprafeței de degajare a plăcuțelor așchietoare, care diferă de cea a plăcuței așchietoare reale;
- mărimea elementelor finite utilizate la discretizarea semifabricatului, care influențează mărimea zonei de degradare a materialului;
- valorile parametrilor utilizați pentru definirea comportamentului la rupere a materialului, care au fost determinați pe baza unor încercări la forfecare cu viteză cvasi-statică;
- sistemul experimental pentru măsurarea forțelor de așchiere care, pe de o parte, are o sensibilitate scăzută la măsurarea forțelor mici (forțe de până în 400 N) și, pe de altă parte, induce vibrații. De aceea, prelucrarea semnalului măsurat necesită filtre specifice, iar utilizarea filtrului de tip Savitzky-Golay poate fi îmbunătățită;
- camera termografică utilizată pentru măsurarea temperaturilor, care are o frecvență de achiziție scăzută (80 Hz), ceea ce face posibil ca valorile maxime ale temperaturilor să nu fie înregistrate corespunzător.

11. Concluzii finale și contribuții principale la dezvoltarea și modelarea numerică a procesului și sistemului de frezare plan-frontală a oțelului dur 55NiCrMoV7

(1) În urma analizei critice a stadiului actual al cercetării-dezvoltării și al aplicațiilor industriale privind frezarea metalelor dure, au fost evidențiate concluzii importante, prezentate în capitolul §4.

(2) Pornind de la datele și concluziile rezultate din analiza critică a stadiului actual al cercetării-dezvoltării și al aplicațiilor industriale, s-au identificat direcțiile de cercetare-dezvoltare de perspectivă privind procesele și sistemele de frezare a metalelor dure, prezentate în subcapitolul §5.1.

(3) Corelat cu stadiul actual și direcțiile de cercetare-dezvoltare privind procesele și sistemele de frezare a metalelor dure, s-a stabilit obiectivul principal al activității de cercetare-dezvoltare din cadrul doctoratului (vezi §5.2 și §5.3): *dezvoltarea prin cercetare teoretico-experimentală și modelare numerică a procesului și sistemului de prelucrare prin frezare plan-frontală a oțelului dur 55NiCrMoV7*.

(4) Concluziile relevante privind rezultatele activităților de cercetare-dezvoltare de doctorat întreprinse pentru îndeplinirea obiectivului principal, desfășurate conform metodologiei de cercetare-dezvoltare descrisă în subcapitolul §5.4, sunt prezentate în cele ce urmează.

- Utilizarea **planului experimental compus centrat I**, a metodei suprafețelor de răspuns și a analizei ANOVA pentru funcția de proces *forță de așchiere maximă* - F_{cmax} a condus la determinarea unui model matematic adecvat cu 7 grade de libertate în raport cu parametrii regimului de așchiere (a_p , f_z și v_c). Acest model matematic arată că forțele de așchiere cresc odată cu creșterea adâncimii de așchiere sau a avansului pe dinte, fapt ce se datorează rezistenței crescute la îndepărtarea materialului ca urmare a secțiunii teoretice mai mari a așchiei. Pentru a obține forțe mici de așchiere prelucrările trebuie realizate cu adâncimi de așchiere și avans pe dinte mici, ceea ce conduce la scăderea productivității (vezi §7.1.3).

- Utilizarea **planului experimental compus centrat I**, a metodei suprafețelor de răspuns și a analizei ANOVA pentru funcția de proces *diametrul maxim de ondulare a așchiei* - d_c a permis determinarea unui model matematic adecvat cu 5 grade de libertate în raport cu parametrii regimului de așchiere (a_p , f_z și v_c). Modelul matematic determinat evidențiază faptul că adâncimea de așchiere are cea mai mare influență asupra acestuia. Odată cu creșterea acestui parametru crește lățimea așchiei, determinând creșterea rezistenței materialului și, astfel, mărimea diametrului de ondulare a așchiei (vezi §7.2.2).

- Utilizarea **planului experimental compus centrat I**, a metodei suprafețelor de răspuns și a analizei ANOVA pentru funcția de proces *înălțimea maximă a așchiei* - h_c a condus la determinarea unui model matematic adecvat cu 7 grade de libertate în raport cu parametrii regimului de așchiere (a_p , f_z și v_c). Suprafețele de răspuns reprezentate pe baza acestui model permit desprinderea unor concluzii importante: înălțimea așchiei scade odată cu creșterea adâncimii de așchiere, iar între variabila de răspuns *diametrul maxim de ondulare* - d_c și *înălțimea maximă* - h_c există o relație de inversă proporționalitate. Pentru scăderea intensității de uzare a sculei se recomandă ca cei doi parametri să fie cât mai mici, ceea ce are un impact negativ asupra productivității prelucrării (vezi §7.2.2).

- Utilizarea **planului experimental compus centrat I**, a metodei suprafețelor de răspuns și a analizei ANOVA pentru funcția de proces *temperatură maximă din proces* - T_{max} a permis determinarea unui model matematic adecvat cu 4 grade de libertate în raport la parametrii regimului de așchiere (a_p , f_z și v_c). Acest model matematic arată că temperatura maximă din proces crește odată cu creșterea adâncimii de prelucrare, fiind parametrul cu contribuția cea mai mare în cadrul modelului. Pentru a avea temperaturi maxime din proces cât mai scăzute se recomandă ca adâncimea de așchiere să fie minimă, avansul pe dinte mediu și viteza de așchiere să fie maximă. Însă, această

combinație a parametrilor regimului de aşchiere va avea influențe negative asupra durabilității sculei aşchietoare datorită vitezelor de aşchiere mărite (vezi §7.3.3).

◦ Utilizarea *planului experimental compus centrat II*, a metodei suprafețelor de răspuns și a analizei ANOVA pentru funcția de proces *rugozitatea suprafeței prelucrate* - R_a a permis determinarea unui model matematic adecvat cu 8 grade de libertate în raport cu parametrii regimului de aşchiere a_p , f_z și v_c . Suprafețele de răspuns asociate modelului matematic evidențiază faptul că valorile minime ale rugozității suprafețelor prelucrate se obțin la utilizarea unor valori medii ale avansului pe dinte și a vitezelor de aşchiere (vezi §7.4.2).

◦ Utilizarea *planului experimental compus centrat II*, a metodei suprafețelor de răspuns și a analizei ANOVA pentru funcția de proces *abaterea de la planeitate a suprafeței prelucrate* - PL a condus la determinarea unui model matematic adecvat cu 6 grade de libertate în raport cu parametrii regimului de aşchiere (a_p , f_z și v_c). Suprafețele de răspuns asociate acestui model au scos în evidență faptul că valori minime ale abaterilor de la planeitate se obțin atunci când parametrii regimului de aşchiere sunt utilizați cu valori minime. Această strategie de prelucrare nu este însă favorabilă, deoarece conduce la o productivitate scăzută. Aceasta poate fi îmbunătățită prin mărirea vitezei de aşchiere, rezultând valori acceptabile ale abaterii de la planeitate a suprafeței prelucrate (vezi §7.5.2).

◦ *Utilizarea planului experimental compus centrat II*, a metodei suprafețelor de răspuns și a analizei ANOVA pentru funcția de proces *microduritatea stratului superficial* - HV a permis determinarea unui model matematic adecvat cu 7 grade de libertate în raport cu parametrii regimului de aşchiere (a_p , f_z și v_c). Suprafețele de răspuns trasate cu acest model au scos în evidență faptul că microduritatea stratului superficial crește odată cu creșterea adâncimii de prelucrare sau a avansului pe dinte, ca urmare a ecruisajului puternic ce apare în stratul superficial (vezi §7.6.2).

◦ Analiza aprofundată a proceselor de frezare plan-frontală de degroșare (*experimentul 2*) și de semifinisare (*experimentul 7*) a relevat faptul că aşchiile rezultate au culori diferite, corelate cu temperaturile de la interfața sculă-așchie și, deci, de gradul de oxidare al acestora. Temperatura maximă măsurată în experimentul de degroșare a fost de 305,8°C, în timp ce în experimentul de semifinisare a fost de 182,7°C, explicând diferența de culoare a aşchiilor (un albastru mai intens în experimentul de degroșare). De asemenea, s-a evidențiat că temperatura din aşchii descrește pe măsură ce aşchiile sunt formate, ca urmare a faptului că în zona de forfecare deformarea mecanică scade în intensitate odată cu scăderea grosimii aşchiei teoretice (vezi §8.3).

◦ Analiza forțelor de aşchiere la frezarea cu un singur dinte al sculei pentru degroșare (*experimentul 2*), respectiv, pentru semifinisare (*experimentul 7*) a arătat că forțele de aşchiere maxime la degroșare - F_c sunt de 1293,5 N, fiind de aproximativ 3,3 ori mai mari decât cele de la semifinisare, unde F_c este 390,13 N. Acest raport mare al forțelor de aşchiere dintre cele două experimente se datorează ariei secțiunii aşchiilor teoretice de patru ori mai mari la degroșare față de semifinisare, care determină o creștere accentuată a proceselor mecanice și termice ce au loc la formarea aşchiilor. Pe baza observațiilor privind evoluția forțelor pe parcursul formării unei aşchii de către un singur dinte, s-a remarcat faptul că: *forța de aşchiere tangențială* - F_t este principala componentă a forței de aşchiere - F_c ; *forța radială* - F_r este forța ce acționează simultan în direcția de avans și în direcția perpendiculară pe aceasta în raport cu unghiul de contact al dintelui frezei, având tendința de a deplasa scula lateral și *forța de pătrundere* - F_p este forța ce este orientată în lungul axei sculei și împinge scula în semifabricat, ce influențează uzura sculei. S-a evidențiat faptul că aceste forțe au maxime diferite în funcție de regimul de aşchiere utilizat, de degroșare, respectiv, de semifinisare (vezi §8.4).

◦ Studiul morfologiei aşchiilor a evidențiat faptul că *pasul între planele de forfecare* - p_c , *dimensiunea vârfulor dinților aşchiei* - t_p , *dimensiunea vâilor dinților aşchiei* - t_v , *unghiul de forfecare* - α și *unghiul de bombare* - β sunt mai mari pentru aşchiile de la degroșare față de cele de la semifinisare. Parametrii dimensionali de segmentare au o evoluție descrescătoare, de la începutul spre sfârșitul aşchiei, determinată de scăderea grosimii aşchiilor. Parametrii unghiulari au o evoluție descrescătoare în jumătatea aşchiei pentru α și crescătoare în jumătatea aşchiei pentru β . Aceste evoluții sunt corelate cu evoluția forțelor de aşchiere, care la valori ridicate conduc la unghiuri mici de forfecare și la unghiuri mari de bombare a aşchiilor. *Gradul de segmentare a aşchiilor* - G are valori relativ apropiate în zona de început, respectiv, de final a aşchiei, dar valorile din zona mediană

a lungimii așchii sunt diferite de acestea, fiind mai mare în cazul frezării de semifinisare, când mecanismul de formare a așchiilor este de deformare prin forfecare (vezi §8.5).

◦ Studiul uzării plăcuțelor așchietoare a fost realizat pe baza *planului experimental III*, în care s-au realizat 27 de experimente. Uzarea plăcuțelor așchietoare a fost evaluată la timpii de prelucrare T_p 9,64 min; 24,1 min; 43,38 min; 57,84 min și 65,07 min. S-a constatat că uzurile apar, mai întâi, în zona vârfului plăcuțelor după un timp de prelucrare de aproximativ 43,38 minute. Ulterior, apar uzuri și în alte zone ale plăcuței așchietoare, cum sunt mici variații ale straturilor de oxizi depuși pe suprafețele plăcuțelor, micro-craterare sau prezența unor particule străine (vezi §9.1.3).

◦ Pentru cuantificarea gradului de uzare a plăcuțelor așchietoare s-au utilizat trei strategii de evaluare: analiza uzurii abrazive de pe fața de așezare - VB , care permite determinarea unui parametru scalar - uzură unidimensională; analiza suprafețelor uzate de pe fețele de așezare - WA , care conduce la determinarea unei arii - uzură bidimensională; analiza volumului uzat și îndepărtat din materialul plăcuței - WV , care permite determinarea unui volum - uzură tridimensională (vezi §9.2, §9.3 și §9.4). Analiza uzării plăcuțelor așchietoare în raport cu parametrul scalar VB a evidențiat faptul că la trei plăcuțe, respectiv, z_{c1} , z_{c2} și z_{c3} , uzarea este localizată preponderent către vârful acestora, chiar și după timpul final de prelucrare, ajungând la o valoare de 0,11 mm. În schimb, pentru plăcuța z_{c4} uzura maximă se regăsește în jumătatea tăișului, având o valoare de $VB = 0,236$ mm, dublă față de valoarea măsurată la primele trei plăcuțe, care depășește pragul impus de uzare, de 0,2 mm. Diferența de comportament la uzare a acestei plăcuțe așchietoare în raport cu celelalte trei plăcuțe poate fi explicată prin faptul că aceasta are o montare imprecisă sau o eroare dimensională (vezi §9.2).

◦ Analiza uzării plăcuțelor așchietoare în raport cu parametrul WA s-a realizat pentru cele patru plăcuțe așchietoare și a întărit concluzia anterioară, și anume, că primele trei plăcuțe așchietoare au o uzare asemănătoare, în timp ce a patra plăcuță are o uzare diferită și mai intensă. După timpul final de prelucrare, aria suprafeței uzate are o valoare de sub $0,025 \text{ mm}^2$ pentru primele trei plăcuțe, în timp ce pentru a patra plăcuță aria suprafeței uzate este de $0,197 \text{ mm}^2$, fiind de 16 ori mai mare față de primele trei plăcuțe. Acest lucru arată că utilizarea acestui parametru de uzare a plăcuței așchietoare poate evidenția mai ușor existența unor grade de uzare avansate ale acesteia (vezi §9.3).

◦ Analiza uzării plăcuțelor așchietoare în raport cu parametrul WV s-a realizat doar pentru plăcuța z_{c4} , deoarece procedura de măsurare este complexă, iar timpul necesar determinării volumului de material uzat este foarte mare. S-a constatat că evoluția în timp a acestui parametru de uzură este diferită de cele obținute pentru parametrii VB sau WA , fiind mai apropiată de o evoluție *clasică* (vezi §9.4).

◦ Analiza tipurilor de uzare a sculei s-a realizat pe baza micrografiilor MEB și EDS ale plăcuței uzate z_{c4} la timpii de prelucrare de 24,1 minute și la timpul final de 65,07 minute. După timpul de prelucrare de 24,1 minute s-a observat o tasare pronunțată pe fața de degajare a plăcuței, iar mărimea acestei zone este corelată cu mărimea avansului pe dinte (lățimea) și cu adâncimea de așchiere (lungimea). De asemenea, au fost evidențiate uzări de tip ciobire - CH și exfoliere - FL . După timpul de prelucrare de 65,07 minute tipurile de uzări anterioare s-au accentuat și apar și alte tipuri de uzări, cum sunt fisurare - CR , ce apare pe fața de așezare a plăcuței, și uzură catastrofală - CF , ce apare sub forma unui crater de mărime medie. Prin analiză EDS s-a putut identifica și uzura de tip adeziune - BUE sub formă de micro-așchii depuse pe suprafețele plăcuței și uzura de tip difuzie, evidențiată prin prezența fierului în stratul de acoperire al plăcuțelor (vezi §9.5).

◦ Analiza influenței uzării sculei asupra parametrilor de proces și a calității suprafețelor prelucrate a scos în evidență o serie de tendințe de creștere a valorilor rezultatelor analizate, ca urmare a intensificării fenomenelor din procesul de așchiere odată cu uzarea sculei. Influența uzării sculei asupra forței maxime de așchiere nu este importantă până la timpul de prelucrare de 24,1 minute, aceasta având valori de aproximativ 660 N, dar devine importantă ulterior, forța maximă de așchiere crescând constant până la 742,9 N. Evoluția temperaturilor din proces în raport cu uzarea sculei are o formă similară cu cea a curbei generale de uzură, temperaturile crescând de la $209,4^\circ\text{C}$ până la valori de $321,2^\circ\text{C}$. Influența uzării sculei asupra rugozității suprafeței prelucrate este de tip liniar cu valori crescătoare, de la $0,375 \text{ }\mu\text{m}$ până la $0,816 \text{ }\mu\text{m}$. Evoluția microdurității stratului superficial în raport cu uzarea sculei are formă asemănătoare curbei generale de uzură, cu valori crescătoare, de la 701,4 HV la 778,6 HV (vezi §9.6).

◦ Compararea evoluției celor trei parametri de uzură ai sculei - VB , WA , WV a evidențiat faptul că acestea sunt diferite: uzura unidimensională VB are o evoluție aproape liniară, uzura

bidimensională WA este constantă până la timpul de 24,1 minute are o creștere liniară, în timp ce uzura tridimensională WV (determinată doar pentru plăcuța z_{c4}) are o evoluție foarte apropiată de o curbă clasică de uzură. Pe de altă parte, diferența mare și foarte mare dintre valorile acestor parametri de uzură ai sculei argumentează importanța utilizării parametrului de uzură WA în detrimentul parametrului VB (vezi §9.7.1).

◦ Analiza corelării rezultatelor procesului de frezare (F_c , T_{max} , R_a și $HV/0,2$) cu parametrii de uzură ai sculei (VB , WA , WV) a utilizat un model matematic polinomial de gradul I. A rezultat că cea mai mare influență asupra rezultatelor de proces o are parametrul de uzură VB , urmat de WA și WV , iar coeficienții de determinare, R^2 , au valori cuprinse între 0,778 și 0,998. Ordinea descrescătoare în care rezultatele de proces sunt influențate de parametrii de uzură este: F_c , R_a , $HV/0,2$ și T_{max} (vezi §9.7.2).

◦ La construirea modelelor numerice tridimensionale pentru procesele de frezare de degroșare (*experimentul 2*) și de semifinisare (*experimentul 7*) s-au utilizat geometrii simplificate pentru suprafața de degajare a plăcuței așchietoare și a semifabricatelor. Semifabricatele au fost definite ca o așchie nedetașată dependentă geometric de parametrii regimului de așchiere și de traiectoria vârfului plăcuței așchietoare. Cu această curbă a fost definită zona de separație a așchiei de 0,02 mm pentru degroșare și de 0,01 mm pentru semifinisare, reprezentând 10% din grosimea așchiei teoretice. Strategia de simulare pentru semifabricat a fost de tip Lagrangian, iar suprafața de degajare a plăcuței a fost definită drept corp nedeformabil. Pentru aceste modele, coeficientul de frecare ales a fost conform legii lui Coulomb de 0,2 și au fost definite două tipuri de contact: auto-contact și de tip suprafață la suprafață (vezi §10.1).

◦ Pentru dezvoltarea modelelor numerice s-a determinat experimental comportamentul termomecanic al oțelului dur 55NiCrMoV7. Parametrii specifici comportamentului elastic, modul de elasticitate - E și coeficientul al lui Poisson - ν , s-au determinat pe baza unei încercări cvasi-statice la temperatura ambiantă de 22°C și viteza de deformare de $\dot{\epsilon} = 2,22 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. Comportamentul termo-elasto-vâsco-plastic al materialului a fost descris prin legea constitutivă Johnson-Cook, pentru care au fost determinați în trei etape parametrii de ecruisare A , B și n , parametrul dependent de temperatură m și parametrul dependent de viteza de deformare a materialului - C . Pentru determinarea acestui ultim parametru s-a realizat o încercare de tracțiune dinamică pe bare de tip Hopkinson la o viteză de deformare de $2 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$. Modelul a fost validat prin compararea acestuia cu o curbă determinată experimental, realizată la viteza de deformare de referință de $2,22 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ și temperatura de 200°C. De asemenea, s-a caracterizat comportamentul de rupere a materialului, prin parametrii deformația plastică inițială - ϵ_{pl}^0 și deplasare plastică relativă - u_{pl} . Aceștia au fost determinați utilizând epruvete specifice acestui studiu, care au fost încercate la forfecare cu viteza de deformare de referință și temperaturile de 22°C, 200°C și 400°C (vezi §10.2).

◦ Durata de calcul al simulării proceselor de frezare cu modelele numerice dezvoltate a fost de 50 de minute la degroșare, respectiv, 40 de minute la semifinisare. Rezultatele obținute prin simularea celor două procese de frezare cu privire la forțele de așchiere, temperaturile din proces și mărimile macroscopice a așchiilor sunt similare cu cele obținute experimental doar pentru prelucrarea de degroșare. La simularea frezării de degroșare se obțin rezultate cu diferențe de la 4,8% până la maxim 13,2% față de cele experimentale, în timp la simularea frezării de semifinisare rezultatele obținute au diferențe de la 21,2% până la 42,6% în raport cu cele experimentale. Aceste diferențe majore pot fi puse pe seama mai multor surse de erori: utilizarea geometriei simplificate a suprafeței de degajare a plăcuței; mărimea elementelor finite și a zonei de separare; valorile parametrilor determinați pentru caracterizarea comportamentului de rupere al materialului; stabilitatea scăzută a sistemului experimental pentru măsurarea forțelor, care include și vibrațiile sistemului; capacitatea scăzută a frecvenței de înregistrare a imaginilor de la camera termică (vezi §10.3).

(5) Prin îndeplinirea obiectivului principal al activităților doctorale de cercetare-dezvoltare, teza de doctorat aduce o serie de contribuții, dintre care cele mai relevante sunt evidențiate în continuare.

- Realizarea unui studiu critic privind stadiul actual al cercetării-dezvoltării și al aplicațiilor industriale cu privire la procesele și sistemele de frezare a metalelor dure.

- Dezvoltarea unor standuri experimentale pentru studiul procesului de frezare: studiul forțelor de așchiere, studiul temperaturilor din proces, studiul uzurii plăcuțelor așchietoare, precum și a unui stand experimental pentru determinarea ecuației de calibrare a camerei termografice.

- Stabilirea, prin cercetare teoretico-experimentală, a influenței regimului de aşchiere asupra parametrilor de proces (forţe de aşchiere şi temperaturi din proces), dimensiunilor macroscopice ale aşchiilor (diametrul maxim de undulare şi înălţimea aşchiilor) şi a calităţii suprafeţelor (rugozitatea suprafeţelor prelucrate, abaterea de la planeitate a suprafeţelor şi microduritatea straturilor superficiale), concretizată în determinarea unor funcţii de proces prin metoda suprafeţelor de răspuns şi interpretarea rezultatelor cu metodologia ANOVA.

- Desfăşurarea unor studii teoretico-experimentale privind frezarea de degroşare şi de semifinisare, finalizate prin analiza aprofundată a temperaturilor din proces şi forţelor de aşchiere la aşchiera cu un singur dinte al frezei şi analiza morfologiei aşchiilor detaşate.

- Utilizarea a trei strategii pentru evaluarea uzurii plăcuţelor aşchietoare: pe baza unei mărimi scalare de tipul uzurii abrazive de pe faţa de aşezare - VB (uzură unidimensională); prin raportarea la suprafeţele uzate de pe feţele de aşezare - WA (uzură bidimensională); prin măsurarea volumului uzat şi îndepărtat din materialul plăcuţei - WV (uzură tridimensională), aceasta reprezentând o metodă modernă utilizată în acest scop.

- Determinarea prin cercetare teoretico-experimentală a influenţei uzării plăcuţelor asupra parametrilor de proces (forţe de aşchiere şi temperaturi din proces) şi a calităţii suprafeţelor prelucrate (rugozitatea suprafeţelor prelucrate şi microduritatea straturilor superficiale).

- Determinarea comportamentului termo-mecanic al oţelului 55NiCrMoV7: parametrii specifici comportamentului elastic (E şi ν); parametrii specifici comportamentului termo-elasto-vâsco-plastic asociaţi legii constitutive Johnson-Cook (A , B , C , m şi n); parametrii legii de rupere a materialului (ϵ_{pl}^0 şi u_{pl}), dependenţi de temperatură.

- Dezvoltarea unui model numeric valid, utilizând programul ABAQUS 2022 Explicit, pentru simularea frezării de degroşare şi de semifinisare. Modelul a utilizat geometrii simplificate pentru suprafaţa de degajare a plăcuţei aşchietoare şi a semifabricatelor pentru a reduce durata de calcul a modelului. Simulările realizate cu acest model permit analiza fenomenelor asociate formării aşchiei: forţele de aşchiere, temperaturile din proces şi dimensiunile macroscopice a aşchiilor.

* * *

Prin problematică, modul de abordare şi rezultate, teza de doctorat dezvoltă cunoaşterea proceselor şi sistemelor de frezare plan-frontală a metalelor dure.

Importanţa ştiinţifică a prezentei teze de doctorat este dată de contribuţiile aduse la dezvoltarea cercetărilor teoretico-experimentale şi modelării numerice a proceselor şi sistemelor de frezare plan-frontală a oţelului dur 55NiCrMoV7: determinarea influenţelor regimului de aşchiere sau a uzurii plăcuţelor aşchietoare (evaluată prin parametrii de uzură VB , WA , WV) asupra parametrilor de proces, a calităţii suprafeţelor prelucrate sau a dimensiunilor macroscopice a aşchiilor; determinarea parametrilor legii de comportament Johnson-Cook şi legii de rupere pentru oţelul 55NiCrMoV7; construirea unui model numeric valid pentru simularea procesului de frezare.

Importanţa practică a prezentei teze de doctorat constă în aceea că metodologia, mijloacele şi rezultatele cercetărilor privind frezarea plan-frontală a oţelului dur 55NiCrMoV7, reprezintă un sistem suport util studenţilor de la specializările tehnologice, cadrelor didactice şi de cercetare, specialiștilor şi organizaţiilor industriale, după caz.

Direcţii de cercetare viitoare în legătură cu tema de doctorat pot fi:

- (1) optimizarea mono-obiectiv sau multi-obiectiv a procesului de frezare prin metode clasice, meta-euristice, de învăţare automată, hibride sau alte metode bazate pe inteligenţă artificială;

- (2) studiul microstructurilor straturilor superficiale şi al tensiunilor remanente din piesele prelucrate;

- (3) studiul procesului de frezare în diferite medii de prelucrare;

- (4) continuarea studiului privind determinarea influenţei uzării sculei asupra procesului de frezare prin analiza detaliată a calităţii suprafeţelor prelucrate şi a altor parametrii de proces (vibraţii, semnale acustice etc.);

- (5) continuarea dezvoltării modelelor numerice tridimensionale prin includerea în analiză şi a altor rezultate ale simulării.

Lista lucrărilor publicate, rezultate în cadrul cercetărilor științifice din programul de studii universitare de doctorat

I. LUCRĂRI PUBLICATE ÎN JURNALE INDEXATE ISI

1) *Study on the cutting forces during face milling of a hard steel*, **Claudiu Ionuț Malea**, Eduard Laurențiu Nițu, Claudiu Bădulescu și Daniela Monica Iordache.

Conferința: International Conference on Innovative Manufacturing Engineering and Energy - IManE&E2023, 12-14 oct 2023, Chișinău (on-line).

Jurnal: ACTA TECHNICA NAPOCENSIS, Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering, vol. 66, Issue Special IV, 2023; WOS: 001267255200026.

Lucrare susținută la conferință internațională și publicată în jurnal indexat ESCI - Web of Science.

2) *Analysis of face milling of hard steel 55NiCrMoV7 by studying rough and semi-finished machining and the influence of cutting parameters on macroscopic chip dimensions*, **Claudiu Ionuț Malea**, Eduard Laurențiu Nițu, Daniela Monica Iordache, Ștefan Lucian Tabacu, Aurelian Denis Negrea și Claudiu Bădulescu.

Jurnal: *Materials* – MDPI, 17, 3434, 2024. DOI: 10.3390/ma17143434; WOS: 001277701300001.

Lucrare publicată în jurnal cotelat în ISI Web of Science, Factor de Impact 3.1 - JCR - Q1 (Metallurgy and Metallurgical Engineering)/ Q2 (Condensed Matter. Physics).

II. LUCRĂRI PUBLICATE ÎN JURNALE INDEXATE BDI

1) *Experimental milling studies on hardened steels – a review*, **Claudiu Ionuț Malea**, Eduard Laurențiu Nițu, Monica Daniela Iordache și Alin Daniel Rizea, International Journal of Modern Manufacturing Technologies, ISSN 2067–3604, vol. XIII, No. 2 / 2021.

DOI: 10.54684/ijmmt.2021.13.2.84. Lucrare indexată BDI (Scopus, Index Copernicus)

III. CONFERINȚE INTERNAȚIONALE CU LUCRĂRI PUBLICATE ÎN PROCEEDINGS INDEXAT BDI

1) *A brief review of numerical simulation in process machining*, **Claudiu Ionuț Malea**, Eduard Laurențiu Nițu și Monica Daniela Iordache, IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 1009, 012035, 2021.

Conferința: International Conference on computing and solutions in manufacturing engineering - CoSME'20, 7-10 oct 2020, Brașov (on-line).

DOI: 10.1088/1757-899X/1009/1/012035.

Lucrare susținută la conferință internațională și indexată BDI (IOP Conference Series: Materials Science and Engineering).

2) *Determination of Johnson-Cook material constants for Copper using traction tests and inverse identification*, Daniela Monica Iordache, Eliza Roxana Oprescu, **Claudiu Ionuț Malea**, Eduard Laurențiu Nițu, Mihai Octavian Crăcănel și Claudiu Bădulescu, IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 1182, 012032, 2021.

Conferința: International Conference on Modern Manufacturing Technologies in Industrial Engineering - ModTech 2021, 23-26 iun 2021, On-line edition (Iași).

DOI: 10.1088/1757-899X/1182/1/012032.

Lucrare susținută la conferință internațională și indexată BDI (IOP Conference Series: Materials Science and Engineering).

IV. CONFERINȚE INTERNAȚIONALE FĂRĂ LUCRĂRI PUBLICATE

1) *Développement d'un modèle numérique tridimensionnel pour la simulation du fraisage par surfacage d'un acier dur*, **Claudiu Ionuț Malea**, Claudiu Bădulescu și Eduard Laurențiu Nițu.

Conferința: 2^e Symposium de la Recherche Scientifique Francophone en Europe Centrale et Orientale – SRSF-ECO'2023, 27-28 nov 2023, București.

Lucrare susținută cu poster la conferință internațională.

V. BREVETE DE INVENȚIE

1) *REAZEM MULTIFUNCȚIONAL REGLABIL MODULARIZAT PENTRU CONSTRUCȚIA DISPOZITIVELOR*, Iordache Daniela-Monica, Costea Aurel, **Malea Claudiu Ionuț**, Nițu Eduard-Laurențiu și Rizea Alin-Daniel, Nr. brevet: RO 134685, Octombrie, 2022.

2) *DISPOZITIV ROTATIV PENTRU PRELUCRAREA PIESELOR CU AXE ÎNCRUCIȘATE*, **Malea Claudiu Ionuț**, Costea Aurel, Iordache Daniela-Monica, Nițu Eduard-Laurențiu și Rizea Alin-Daniel, Nr. brevet: RO 134622, Decembrie, 2022.

Bibliografie (selectivă)

1. Maity SR, Chakraborty S. *Tool steel material selection using PROMETHEE II method*. Int J Adv Manuf Technol. 2015 Iun;78(9–12):1537–1547. DOI: [10.1007/s00170-014-6760-0](https://doi.org/10.1007/s00170-014-6760-0).
4. Sandvik Coromant. *Workpiece materials*. Sandvik Coromant; 2024 [citată 22 mai 2024]. Disponibil la: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/materials/workpiece-materials>.
7. Davim JP, editor. *Machining of Hard Materials*. London: Springer London; 2011. DOI: [10.1007/978-1-84996-450-0](https://doi.org/10.1007/978-1-84996-450-0).
8. Patel GCM, Chate GR, Parappagoudar MB, Gupta K. *Machining of Hard Materials: A Comprehensive Approach to Experimentation, Modeling and Optimization*. Cham: Springer International Publishing; 2020. DOI: [10.1007/978-3-030-40102-3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-40102-3).
9. Dormer Pramet. *Die & Molds*. 2021. 2024 [citată 22 mai 2024]. Disponibil la: https://5wyuco84ao39w9tsgkkmnm.blob.core.windows.net/cms/Die_-_Mold_brochure_2021_EN.pdf.
10. Dormer Pramet. *WORKPIECE MATERIAL GROUPS*. 2024. 2024 [citată 22 mai 2024]. Disponibil la: <https://www.dormerpramet.com/cz/en/WMG>.
11. Iscar. *Iscar Tool Advisor New*. 2024 [citată 22 mai 2024]. Disponibil la: <https://www.iscar.com/ITA/materials?lang=EN>.
12. Pokolm. *Technical Manual*. 2024 [citată 22 mai 2024]. Disponibil la: https://forgacsolastechnika.hu/htcm/hun/5_letoltesek/pdf/POKOLM/CATALOG%20Pokolm%20Technical-Manual-2014.pdf.
13. ASRO. *SR EN ISO 4957 Oțeluri pentru scule*. 2002.
14. Malea CI, Nițu EL, Iordache DM, Rizea AD. *Experimental milling studies on hardened steels - a review*. Int J Mod Manuf Technol. 2021 Dec 30;13:84–95. DOI: [10.54684/ijmmt.2021.13.1.84](https://doi.org/10.54684/ijmmt.2021.13.1.84).
16. ASM Handbook Committee, ASM International, editors. *Metals Handbook*. 9th ed. Metals Park, Ohio: American Society for Metals; 1978.
17. Iscar. *Industrealize Die & Mold*. 2024 [citată 22 mai 2024]. Disponibil la: <https://www.iscar.com/newarticles.aspx/countryid/1/newarticleid/2187>.
18. Sandvik Coromant. *Technical Guide: Metal Cutting Technology*. Stockholm: Sandvik Coromant; 2010.
19. Smith GT. *Cutting Tool Technology*. London: Springer London; 2008. DOI: [10.1007/978-1-84800-205-0](https://doi.org/10.1007/978-1-84800-205-0).
21. Gao Y, Huang K, Yang W. *Analytical model of cutting temperature field in workpiece including uncut chip layer*. Int J Adv Manuf Technol. 2020 Apr;107(9–10):3943–52. DOI: [10.1007/s00170-020-05260-7](https://doi.org/10.1007/s00170-020-05260-7).
22. Molnar TG, Berezvai S, Kiss AK, Bachrathy D, Stepan G. *Experimental investigation of dynamic chip formation in orthogonal cutting*. Int J Mach Tools Manuf. 2019 Oct;145:103429. DOI: [10.1016/j.ijmachtools.2019.103429](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2019.103429).
24. Nakayama K, Arai M, Kanda T. *Machining Characteristics of Hard Materials*. CIRP Ann. 1988;37(1):89–92. DOI: [10.1016/S0007-8506\(07\)61592-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61592-3).
25. Poulachon G, Moisan A, Jawahir IS. *On modelling the influence of thermo-mechanical behavior in chip formation during hard turning of 100Cr6 bearing steel*. CIRP Ann. 2001;50(1):31–6. DOI: [10.1016/S0007-8506\(07\)62064-2](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62064-2).
26. Klocke F, König W. *Fertigungsverfahren 1*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2008. DOI: [10.1007/978-3-540-35834-3](https://doi.org/10.1007/978-3-540-35834-3).
28. Singh BK, Roy H, Mondal B, Roy SS, Mandal N. *Measurement of chip morphology and multi criteria optimization of turning parameters for machining of AISI 4340 steel using Y-ZTA cutting insert*. Measurement. 2019 Aug;142:181–94. DOI: [10.1016/j.measurement.2019.04.064](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.064).
30. Zhang S, Guo YB. *An experimental and analytical analysis on chip morphology, phase transformation, oxidation, and their relationships in finish hard milling*. Int J Mach Tools Manuf. 2009 Sep;49(11):805–13. DOI: [10.1016/j.ijmachtools.2009.06.006](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.06.006).

31. Hariprasad B, Selvakumar SJ, Samuel Raj D. *Effect of cutting edge radius on end milling Ti-6Al-4V under minimum quantity cooling lubrication – Chip morphology and surface integrity study*. Wear. 2022 Iun;498–499:204307. DOI: [10.1016/j.wear.2022.204307](https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204307).
32. Liu H, Zhang J, Jiang Y, He Y, Xu X, Zhao W. *Investigation on Morphological Evolution of Chips for Ti6Al4V Alloys with the Increasing Milling Speed*. Procedia CIRP. 2016;46:408–11. DOI: [10.1016/j.procir.2016.03.127](https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.127).
33. Hassan S, Khan SA, Naveed R, Saleem MQ, Mufti NA, Farooq MU. *Investigation on tool wear mechanisms and machining tribology of hardened DC53 steel through modified CBN tooling geometry in hard turning*. Int J Adv Manuf Technol. 2023 Iul;127(1–2):547–64. DOI: [10.1007/s00170-023-11528-5](https://doi.org/10.1007/s00170-023-11528-5).
34. Pereira RBD, Lauro CH, Brandão LC, Ferreira JR, Davim JP. *Tool wear in dry helical milling for hole-making in AISI H13 hardened steel*. Int J Adv Manuf Technol. 2019 Apr;101(9–12):2425–39. DOI: [10.1007/s00170-018-3129-9](https://doi.org/10.1007/s00170-018-3129-9).
35. International Organization for Standardization. *ISO 8688-1:1989 – Tool Life Testing in Milling – Part 1: Single-point Milling*. Geneva: ISO; 1989.
39. Taylor FW. *On the Art of Cutting Metals*. New York: American Society of Mechanical Engineers; 1907.
40. International Organization for Standardization. *ISO 4287: Geometric Product Specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Terms, definitions and surface texture parameters*. Geneva: ISO; 1997.
41. International Organization for Standardization. *ISO 6507-1: Metallic materials - Vickers hardness test - Part 1: Test method*. Geneva: ISO; 2018.
42. Grzesik W. *Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling and Applications*. 2nd ed. Amsterdam, Boston: Elsevier; 2017. ISBN: 978-0-444-63711-6.
43. Davim JP. *Machinability of Advanced Materials*. Great Britain: Wiley; 2014. ISBN: 978-1-84821-396-8.
45. Wojciechowski S, Królczyk GM, Maruda RW, editori. *Advances in Hard-to-Cut Materials: Manufacturing, Properties, Process Mechanics and Evaluation of Surface Integrity*. MDPI. 2020; 13(3), 612;. DOI: [10.3390/ma13030612](https://doi.org/10.3390/ma13030612).
46. Davim JP, editor. *Machining of Titanium Alloys*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2014. (Materials Forming, Machining and Tribology). DOI: [10.1007/978-3-662-43902-9](https://doi.org/10.1007/978-3-662-43902-9).
56. Lippold L, Kazhai M, Bouguecha A, Vucetic M, Hübsch C, Möhwald K. *Prediction and Detection of Wear Mechanisms on an Industry-Oriented Hot Forging Die*. Adv Mater Res. 2016 Aug;1140:91–8. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.1140.91](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1140.91).
57. Şengül Ü, Şengül AB. *Hot forging die material selection using fuzzy multi-criteria decision making methods*. Mater Today Commun. 2024 Mar;38:108352. DOI: [10.1016/j.mtcomm.2024.108352](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.108352).
58. Meusburger. *Meusburger | Material selection assistant*. Material selection wizard; 2024 [citat 4 iunie 2024]. Disponibil la: <https://werkstoff.meusburger.com/material-selection-assistant/>.
60. Davim JP, editor. *Modern Machining Technology: A Practical Guide*. Cambridge: Woodhead Publishing; 2011. ISBN: 978-0-85709-099-7.
61. Davim JP. *Machining*. London: Springer London; 2008. DOI: [10.1007/978-1-84800-213-5](https://doi.org/10.1007/978-1-84800-213-5).
62. Bhirud NL, Gawande RR. *Measurement and prediction of cutting temperatures during dry milling: review and discussions*. J Braz Soc Mech Sci Eng. 2017 Dec;39(12):5135–58. DOI: [10.1007/s40430-017-0869-7](https://doi.org/10.1007/s40430-017-0869-7).
63. Bolar G, Adhikari R, Nayak SN, Joshi SN. *Assessment of ignition risk in dry helical hole milling of AZ31 magnesium alloy considering the machining temperature and chip morphology*. J Manuf Process. 2022 Mai;77:260–71. DOI: [10.1016/j.jmapro.2022.03.023](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.03.023).
64. Wagih M, Maher I, El-Hofy H, Yan J, Hassan MA. *Analysis and development of elliptical tool path in trochoidal milling*. CIRP J Manuf Sci Technol. 2023 Dec;47:168–83. DOI: [10.1016/j.cirpj.2023.10.002](https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.10.002).

74. Liu GJ, Zhou ZC, Qian X, Pang WH, Li GH, Tan GY. *Wear mechanism of cemented carbide tool in high-speed milling of stainless steel*. Chin J Mech Eng. 2018 Dec;31(1):98. DOI: [10.1186/s10033-018-0298-2](https://doi.org/10.1186/s10033-018-0298-2).
88. Li B, Zhang S, Wang R, Fang Y. *Toward understanding of metallurgical behaviours in dry machining of hardened steel: phase transformation and surface oxidation*. J Mater Res Technol. 2019 Sep 1;8(5):3811–21. DOI: [10.1016/j.jmrt.2019.06.042](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.042).
90. Gaitonde VN, Karnik SR, Maciel CHA, Rubio JCC, Abrão AM. *Machinability evaluation in hard milling of AISI D2 steel*. Mat Res. 2016 Mar 1;19(2):360–9. DOI: [10.1590/1980-5373-MR-2015-0263](https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2015-0263).
103. Iliyas Ahmad M, Yusof Y, Daud ME, Latiff K, Abdul Kadir AZ, Saif Y. *Machine monitoring system: a decade in review*. Int J Adv Manuf Technol. 2020 Jun;108(11–12):3645–59. DOI: [10.1007/s00170-020-05620-3](https://doi.org/10.1007/s00170-020-05620-3).
109. Rizal M, Ghani JA, Nuawi MZ, Haron CHC. *An embedded multi-sensor system on the rotating dynamometer for real-time condition monitoring in milling*. Int J Adv Manuf Technol. 2018 Mar;95(1–4):811–23. DOI: [10.1007/s00170-017-1251-8](https://doi.org/10.1007/s00170-017-1251-8).
110. Rizal M, Ghani JA, Nuawi MZ, Che Haron CH. *Development and testing of an integrated rotating dynamometer on tool holder for milling process*. Mech Syst Signal Process. 2015 Feb;52–53:559–76. DOI: [10.1016/j.ymssp.2014.07.017](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.07.017).
111. Gomez M, Schmitz T. *Low-cost, constrained-motion dynamometer for milling force measurement*. Manuf Lett. 2020 Aug;25:34–9. DOI: [10.1016/j.mfglet.2020.07.001](https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2020.07.001).
112. Qin Y, Zhao Y, Li Y, Zhao Y, Wang P. *A novel dynamometer for monitoring milling process*. Int J Adv Manuf Technol. 2017 Sep 1;92(5):2535–43. DOI: [10.1007/s00170-017-0292-3](https://doi.org/10.1007/s00170-017-0292-3).
113. Gomez MF, Schmitz TL. *Displacement-based dynamometer for milling force measurement*. Procedia Manuf. 2019 Jan 1;34:867–75. DOI: [10.1016/j.promfg.2019.06.161](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.161).
114. Uddin MS, Songyi D. *On the design and analysis of an octagonal–ellipse ring based cutting force measuring transducer*. Measurement. 2016 Aug;90:168–77. DOI: [10.1016/j.measurement.2016.04.055](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.04.055).
115. Alipanahi A, Mahboubkhah M, Barari A. *Cross-sensitivity control in a novel four-component milling dynamometer for simultaneous measurement of tri-axial forces and torque*. Measurement. 2022 Mar 15;191:110788. DOI: [10.1016/j.measurement.2022.110788](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110788).
121. Varatharajulu M, Duraiselvam M, Krishna Pradeep GV, Jagadeesh B. *Tool temperature thermographic study on end milling magnesium AZ31 using carbide tool*. Mater Chem Phys. 2023 Feb;295:127077. DOI: [10.1016/j.matchemphys.2022.127077](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.127077).
122. Ramirez-Nunez JA, Trejo-Hernandez M, Romero-Troncoso RJ, Herrera-Ruiz G, Osornio-Rios RA. *Smart-sensor for tool-breakage detection in milling process under dry and wet conditions based on infrared thermography*. Int J Adv Manuf Technol. 2018 Jul;97(5–8):1753–65. DOI: [10.1007/s00170-018-2060-4](https://doi.org/10.1007/s00170-018-2060-4).
125. Gonsalves JA, Nayak SN, Bolar G. *Experimental investigation on the performance of helical milling for hole processing in AZ31 magnesium alloy*. J King Saud Univ Eng Sci. 2022 Jul;34(5):366–74. DOI: [10.1016/j.jksues.2020.10.004](https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.10.004).
130. Liu D, Ni C, Wang Y, Zhu L. *Review of serrated chip characteristics and formation mechanism from conventional to additively manufactured titanium alloys*. J Alloys Compd. 2024 Jan;970:172573. DOI: [10.1016/j.jallcom.2023.172573](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.172573).
131. Yıldırım ÇV, Kivak T, Sarıkaya M, Şirin Ş. *Evaluation of tool wear, surface roughness/topography and chip morphology when machining of Ni-based alloy 625 under MQL, cryogenic cooling and CryoMQL*. J Mater Res Technol. 2020 Mar;9(2):2079–92. DOI: [10.1016/j.jmrt.2019.12.069](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.069).
132. Wagner V, Vissio A, Duc E, Pijolat M. *Relationship between cutting conditions and chips morphology during milling of aluminium Al-2050*. Int J Adv Manuf Technol. 2016 Feb;82(9–12):1881–97. DOI: [10.1007/s00170-015-7490-7](https://doi.org/10.1007/s00170-015-7490-7).
133. Devotta A, Beno T, Löf R, Espes E. *Quantitative characterization of chip morphology using computed tomography in orthogonal turning process*. Procedia CIRP. 2015;33:299–304. DOI: [10.1016/j.procir.2015.06.053](https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.053).

136. Özel T, Ulutan D. *Effects of machining parameters and tool geometry on serrated chip formation, specific forces and energies in orthogonal cutting of nickel-based super alloy Inconel 100*. Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf. 2014 Iul;228(7):673–86. DOI: [10.1177/0954405413510291](https://doi.org/10.1177/0954405413510291).
137. Li B, Zhang S, Fang Y, Zhang J, Liu Z. *Deformation behaviour and texture evolution of martensite steel subjected to hard milling*. Mater Charact. 2019 Oct;156:109881. DOI: [10.1016/j.matchar.2019.109881](https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.109881).
142. Wang D, Yin L, Hänel A, Teicher U, Penter L, Seidel A, Harst S, Ihlenfeldt S. *Cutting performance of binderless nano-polycrystalline cBN and PcBN milling tools for high-speed milling of hardened steel*. Ceram Int. 2023 Nov;49(22):34757–73. DOI: [10.1016/j.ceramint.2023.08.146](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.08.146).
143. Sealy MP, Liu ZY, Guo YB, Liu ZQ. *Energy based process signature for surface integrity in hard milling*. J Mater Process Technol. 2016 Dec 1;238:284–9. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2016.07.038](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.07.038).
144. Hu M, Ming W, An Q, Chen M. *Tool wear monitoring in milling of titanium alloy Ti–6Al–4V under MQL conditions based on a new tool wear categorization method*. Int J Adv Manuf Technol. 2019 Oct;104(9–12):4117–28. DOI: [10.1007/s00170-019-04125-y](https://doi.org/10.1007/s00170-019-04125-y).
145. Sagar CK, Priyadarshini A, Gupta AK, Mathur D. *Experimental investigation of tool wear characteristics and analytical prediction of tool life using a modified tool wear rate model while machining 90 tungsten heavy alloys*. Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf. 2021 Ian;235(1–2):242–54. DOI: [10.1177/0954405420933113](https://doi.org/10.1177/0954405420933113).
149. Sandvik Coromant. *How to do milling in different materials*. 2022 [citat 3 iunie 2024]. Disponibil la: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/pages/milling-different-materials.aspx>.
154. Guimaraes MCR, Fogagnolo JB, Paiva JM, Veldhuis SC, Diniz AE. *Evaluation of milling parameters on the surface integrity of welded Inconel 625*. J Mater Res Technol. 2022 Sep;20:2611–28. DOI: [10.1016/j.jmrt.2022.08.033](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.033).
163. Guimaraes MCR, Fogagnolo JB, Paiva JM, Veldhuis S, Diniz AE. *The impact of the cutting parameters and tool condition on surface integrity when milling Inconel 625*. J Mater Res Technol. 2023 Iul;25:1944–58. DOI: [10.1016/j.jmrt.2023.06.071](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.071).
164. Lajis MA, Amin AKMN, Karim ANM. *Surface integrity in hot machining of AISI D2 hardened steel*. Adv Mater Res. 2012 Apr;500:44–50. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.500.44](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.500.44).
170. Malea CI, Nitu EL, Iordache DM. *A brief review of numerical simulation in process machining*. IOP Conf Ser: Mater Sci Eng. 2021 Ian 1;1009(1):012035. DOI: [10.1088/1757-899X/1009/1/012035](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1009/1/012035).
173. Arrazola PJ, Özel T, Umbrello D, Davies M, Jawahir IS. *Recent advances in modelling of metal machining processes*. CIRP Ann. 2013;62(2):695–718. DOI: [10.1016/j.cirp.2013.05.006](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.05.006).
175. Storchak M, Stehle T, Möhring HC. *Numerical modeling of titanium alloy Ti10V2Fe3Al milling process*. JMMP. 2022 Dec 22;7(1):1. DOI: [10.3390/jmmp7010001](https://doi.org/10.3390/jmmp7010001).
176. Davoudinejad A, Tosello G, Parenti P, Annoni M. *3D finite element simulation of micro end-milling by considering the effect of tool run-out*. Micromachines. 2017 Iun 16;8(6):187. DOI: [10.3390/mi8060187](https://doi.org/10.3390/mi8060187).
177. Lima HV, Campidelli AFV, Maia AAT, Abrão AM. *Temperature assessment when milling AISI D2 cold work die steel using tool-chip thermocouple, implanted thermocouple and finite element simulation*. Appl Therm Eng. 2018 Oct;143:532–41. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2018.07.107](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.107).
178. Lv D, Yu X, Wang Y. *Evaluation of cutting edge K-form factor in milling of 316L stainless steel: a study based on FEM*. Int J Adv Manuf Technol. 2023 Oct;128(11–12):5223–36. DOI: [10.1007/s00170-023-12098-2](https://doi.org/10.1007/s00170-023-12098-2).
179. Ullah I, Akinlabi ET, Songmene V, Kouam J, Sadeghifar M. *A multiscale finite element modeling for predicting the surface integrity induced by thermo-mechanical loads during high-speed milling of Ti-6Al-4V*. CIRP J Manuf Sci Technol. 2024 Sep;52:246–63. DOI: [10.1016/j.cirpj.2024.06.003](https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.06.003).

186. Jamil M, He N, Zhao W, Kumar Gupta M, Mashood Khan A. *Novel approach of cutting temperature measurement in sustainable milling of Ti-6Al-4V alloy*. Measurement. 2023 Iun;214:112837. DOI: [10.1016/j.measurement.2023.112837](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112837).
187. Tcheuhebou Tina SA, Javidikia M, Jahazi M, Songmene V. *The influence of tool geometry parameters on thermo-mechanical loads and residual stresses induced by orthogonal cutting of AA6061-T6: A numerical investigation*. Processes. 2023 Mar 24;11(4):996. DOI: [10.3390/pr11040996](https://doi.org/10.3390/pr11040996).
188. Vovk A, Sölter J, Karpuschewski B. *Finite element simulations of the material loads and residual stresses in milling utilizing the CEL method*. Procedia CIRP. 2020;87:539–44. DOI: [10.1016/j.procir.2020.03.005](https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.005).
199. Płodzień M, Żyłka Ł, Stoić A. *Modelling of the face-milling process by toroidal cutter*. Materials. 2023 Apr 2;16(7):2829. DOI: [10.3390/ma16072829](https://doi.org/10.3390/ma16072829).
202. Kyratsis P, Tzotzis A, Davim JP. *3D FEA simulations in machining*. Cham: Springer International Publishing; 2023. DOI: [10.1007/978-3-031-24038-6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-24038-6).
203. Bakhshan H, Oñate E, Carbonell I, Puigbó JM. *A review of the constitutive modelling of metals and alloys in machining process*. Arch Comput Methods Eng. 2024 Apr;31(3):1611–58. DOI: [10.1007/s11831-023-10026-x](https://doi.org/10.1007/s11831-023-10026-x).
206. Lalwani DI, Mehta NK, Jain PK. *Extension of Oxley's predictive machining theory for Johnson and Cook flow stress model*. J Mater Process Technol. 2009 Iul;209(12–13):5305–12. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2009.03.020](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.03.020).
207. Melkote SN, Grzesik W, Outeiro J, Rech J, Schulze V, Attia H, Arrazola PJ, M'Saoubi R, Saldana C. *Advances in material and friction data for modelling of metal machining*. CIRP Ann. 2017;66(2):731–54. DOI: [10.1016/j.cirp.2017.05.002](https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.002).
213. Quiza R, López-Armas O, Davim JP. *Finite element in manufacturing processes*. In: *Hybrid modeling and optimization of manufacturing*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2012;13–37. DOI: [10.1007/978-3-642-28085-6_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-28085-6_2).
217. Zhang YC, Mabrouki T, Nelias D, Gong YD. *Chip formation in orthogonal cutting considering interface limiting shear stress and damage evolution based on fracture energy approach*. Finite Elem Anal Des. 2011 Iul;47(7):850–63. DOI: [10.1016/j.finel.2011.02.016](https://doi.org/10.1016/j.finel.2011.02.016).
218. Zhou T, He L, Feng Z, Tian P, Du F, Zou Z, Zhou X. *Inverse identification of material constitutive parameters based on co-simulation*. J Mater Res Technol. 2022 Sep;20:221–37. DOI: [10.1016/j.jmrt.2022.07.073](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.073).
226. Xu Y, Yue C, Chen Z, Li M, Wang L, Liu X. *Finite element simulation of residual stress in milling of aluminum alloy with different passes*. Int J Adv Manuf Technol. 2023 Aug;127(9–10):4199–210. DOI: [10.1007/s00170-023-11795-2](https://doi.org/10.1007/s00170-023-11795-2).
233. Ahmed F, Ko TJ, Jongmin L, Kwak Y, Yoon IJ, Kumaran ST. *Tool geometry optimization of a ball end mill based on finite element simulation of machining the tool steel-AISI H13 using grey relational method*. Int J Precis Eng Manuf. 2021 Iul;22(7):1191–203. DOI: [10.1007/s12541-021-00530-0](https://doi.org/10.1007/s12541-021-00530-0).
234. Liu Y, Xu D, Agmell M, Ahadi A, Stahl JE, Zhou J. *Investigation on residual stress evolution in nickel-based alloy affected by multiple cutting operations*. J Manuf Process. 2021 Aug;68:818–33. DOI: [10.1016/j.jmapro.2021.06.015](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.015).
235. Li B, Zhang S, Fang Y, Wang J, Lu S. *Effects of cutting parameters on surface quality in hard milling*. Mater Manuf Process. 2019 Dec 10;34(16):1803–15. DOI: [10.1080/10426914.2019.1675888](https://doi.org/10.1080/10426914.2019.1675888).
238. DIN EN ISO 6892-1: *Tensile test on metals*.
239. ASTM International. *B 831-05: Standard Test Method for Shear Testing of Thin Aluminum Alloy Products*. 2009.
241. E28 Committee. *ASTM E8/E8M-13a: Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM International; 2013.
242. DMG MORI. *ecoMill 70 DMG MORI*. 2022 [citat 3 iunie 2024]. Disponibil la: www.miracnc.cz/en/strojni-vybaveni/ecomill-70-dmg-mori.

243. Sandvik Coromant. *345-050Q22-13H CoroMill 345 face milling cutter*. 2022 [citată 3 iunie 2024]. Disponibil la: www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/pages/productdetails.aspx?c=345-050Q22-13H.
244. Sandvik C. *345L-1305M-PM 1130 CoroMill345 insert for milling*. Sandvik Coromant. 2024 [citată 26 august 2024]. Disponibil la: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb>.
245. Sandvik Coromant. *ISO 7388-1 to arbor adaptor A1B05-40 22 035*. 2022. Disponibil la: www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/pages/productdetails.aspx?c=A1B05-40%2022%20035.
246. Kesel Group. *MACHINE VISE ZS*. 2022 [citată 26 august 2024]. Disponibil la: www.kesel.com/en/clampingsystems/machine-vise-zs/.
247. NOVA GRUP. *Mechanical Vice NGV M125*. 2022 [citată 26 august 2024]. Disponibil la: ngt.novagrup.ro/mechanical-vice-ngv-m125.
248. ME-Meßsysteme GmbH. *K3D160*. 2022 [citată 26 august 2024]. Disponibil la: www.me-systeme.de/shop/en/sensors/force-sensors/k3d/k3d160/k3d160-2kn6.
249. National Instruments. *NI-9237 Bridge Analog Input*. 2022 [citată 26 august 2024]. Disponibil la: <https://www.ni.com/ro-ro/shop/model/ni-9237.html>.
250. Photron. *FASTCAM MINI UX Model UX50 / UX100*. 2022 [citată 26 august 2024]. Disponibil la: photron.com/fastcam-mini-ux/.
251. Optris. *Infrared camera optris PI 400i / PI 450i*. 2022 [citată 26 august 2024]. Disponibil la: <https://optris.com/products/infrared-cameras/precision-line/pi-400i/>.
252. National Instruments. *NI-9210 C Series Temperature Input Module*. 2022 [citată 26 august 2024]. Disponibil la: www.ni.com/ro-ro/support/model.ni-9210.html.
253. Mitutoyo. *SJ-210 – Portable Surface Roughness Tester*. 2022 [citată 26 august 2024]. Disponibil la: www.mitutoyo.com/products/form-measurement-machine/surface-roughness/sj-210-portable-surface-roughness-tester-2/.
254. TESA Technology. *Coordinate Measuring Machines*. 2024 [citată 26 august 2024]. Disponibil la: <http://microtes.cz/Tesa/trisouradnicove-stroje-T.pdf>.
255. OLYMPUS. *Compact Stereo Microscopes SZ61*. 2024 [citată 26 august 2024]. Disponibil la: <https://www.olympus-lifescience.com/en/microscopes/stereo/sz61/>.
257. Innovatest. *FALCON 500*. 2022 [citată 26 august 2024]. Disponibil la: www.innovatest-europe.com/products/falcon-500/.
262. **Malea CI**, Nițu EL, Iordache DM, Tabacu ȘL, Negrea AD, Bădulescu C. *Analysis of Face Milling of Hard Steel 55NiCrMoV7 by Studying Rough and Semi-Finished Machining and the Influence of Cutting Parameters on Macroscopic Chip Dimensions*. 2024; 17(14), 3434. DOI: 10.3390/ma17143434.
263. **Malea CI**, Nitu EL, Badulescu C, Iordache DM. *Study on the Cutting Forces During Face Milling of a Hard Steel*. Acta Tech Napoc Ser-Appl Math Mech Eng. 2023 Oct;66(5):451–60. WOS: 001267255200026.
264. Totis G, Bortoluzzi D, Sortino M. *Development of a universal, machine tool independent dynamometer for accurate cutting force estimation in milling*. Int J Machine Tools Manufacture. 2024 Mai;198:104151. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2024.104151.
265. Zheng Y, Zhao Z, Li H, Xu S, Xu J. *A novel approach for accurate in-situ chatter detection by iterative Vold-Kalman and LMS adaptive filtering of milling signals*. Mechanical Systems and Signal Processing. 2025 Feb;225:112291. DOI: 10.1016/j.ymssp.2024.112291.
266. Savitzky Abraham, Golay MJE. *Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures*. Anal Chem. 1964 Iul 1;36(8):1627–39. DOI: 10.1021/ac60214a047.
270. **Malea CI**, Bădulescu C, Nițu EL. *Développement d'un modèle numérique tridimensionnel pour la simulation du fraisage par surfacage d'un acier dur*. Simpozionului de cercetare științifică francofonă în Europa Centrală și de Est - POSTER. În: București; 2023.
271. Iordache DM, Oprescu ER, **Malea CI**, Nițu EL, Crăcănel MO, Bădulescu C. *Determination of Johnson-Cook material constants for Copper using traction tests and inverse identification*. IOP Conf Ser: Mater Sci Eng. 2021 Oct;1182(1):012032. DOI: 10.1088/1757-899X/1182/1/012032.

Listă anexe

- Anexa. 6.1. Dispozitiv de măsurat forțe pe trei direcții X, Y și Z, model K3D160 ±20kN*
- Anexa. 7.1. Placa de bază a dispozitivului de măsurat forțe*
- Anexa. 7.2. Placa intermediară a dispozitivului de măsurat forțe*
- Anexa. 7.3. Forțe de aşchiere măsurate pentru diferiți parametri ai regimului de aşchiere din planul experimental I*
- Anexa. 7.4. Analiza ANOVA pentru funcția de proces **forța de aşchiere maximă** pentru **modelul inițial** cu 9 grade de libertate*
- Anexa. 7.5. Analiza ANOVA pentru funcția de proces **forța de aşchiere maximă** pentru **modelul final** cu 7 grade de libertate*
- Anexa. 7.6. Mărimile aşchiilor pentru diferiți parametri ai regimului de aşchiere din planul experimental I*
- Anexa. 7.7. Analiza ANOVA pentru funcția de proces **diametrul maxim de ondulare a aşchiei** pentru **modelul inițial** cu 9 grade de libertate*
- Anexa. 7.8. Analiza ANOVA pentru funcția de proces **diametrul maxim de ondulare a aşchiei** pentru **modelul final** cu 5 grade de libertate*
- Anexa. 7.9. Analiza ANOVA pentru funcția de proces **înălțimea maximă a aşchiei** pentru **modelul inițial** cu 9 grade de libertate*
- Anexa. 7.10. Analiza ANOVA pentru funcția de proces **înălțimea maximă a aşchiei** pentru **modelul final** cu 7 grade de libertate*
- Anexa. 7.11. Temperaturi din proces măsurate pentru diferiți parametri ai regimului de aşchiere din planul experimental II*
- Anexa. 7.12. Analiza ANOVA pentru funcția de proces **temperatura maximă din proces** pentru **modelul inițial** cu 9 grade de libertate*
- Anexa. 7.13. Analiza ANOVA pentru funcția de proces **temperatura maximă din proces** pentru **modelul final** cu 4 grade de libertate*
- Anexa. 7.14. Rugozitatea suprafețelor măsurate pentru diferiți parametri ai regimului de aşchiere din planul experimental II*
- Anexa. 7.15. Analiza ANOVA pentru funcția de proces **rugozitatea suprafeței** pentru **modelul inițial** cu 9 grade de libertate*
- Anexa. 7.16. Analiza ANOVA pentru funcția de proces **rugozitatea suprafeței** pentru **modelul final** cu 8 grade de libertate*
- Anexa. 7.17. Abateri de planeitate măsurate pentru diferite regimuri de aşchiere din planul experimental II*
- Anexa. 7.18. Analiza ANOVA pentru funcția de proces **abatere de la planeitate** pentru **modelul inițial** cu 9 grade de libertate*
- Anexa. 7.19. Analiza ANOVA pentru funcția de proces **abatere de la planeitate** pentru **modelul final** cu 6 grade de libertate*
- Anexa. 7.20. Duritatea straturilor superficiale măsurate pentru diferiți parametri ai regimului de aşchiere din planul experimental II*
- Anexa. 7.21. Analiza ANOVA pentru funcția de proces **microduritatea stratului superficial** pentru **modelul inițial** cu 9 grade de libertate*

Anexa. 7.22. Analiza ANOVA pentru funcția de proces **microdureitatea stratului superficial** pentru modelul final cu 7 grade de libertate

Anexa. 9.1. Suportul S1 utilizat pentru orientarea și fixarea plăcuțelor așchietoare, folosită pentru observarea suprafețelor de degajare ale plăcuțelor pe MEB

Anexa. 9.2. Suportul S2 utilizat pentru orientarea și fixarea plăcuțelor așchietoare, folosită pentru observarea suprafețelor de așezare ale plăcuțelor pe MEB

Anexa. 9.3. Forțe de așchiere măsurate la diferite momente de utilizare a frezei

Anexa. 9.4. Temperaturile din proces măsurate la diferite momente de utilizare a frezei

Anexa. 9.5. Rugozitățile suprafețelor prelucrate la diferite momente de utilizare a frezei

Anexa. 9.6. Microdureitățile pieselor prelucrate la diferite momente de utilizare a frezei