

IOSUD – UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI

Școala doctorală de Inginerie Mecanică și Industrială



TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

CONTRIBUȚII LA STUDIUL TEHNOLOGIILOR MODERNE DE GENERARE A SUPRAFETELOR

Doctorand,

Ing. Răzvan-Sebastian CRĂCIUN

Conducător științific,

Prof. univ. dr. ing. Virgil-Gabriel TEODOR

Seria I 4: Inginerie industrială Nr. 105

GALAȚI

2026

IOSUD – UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI

Școala doctorală de Inginerie Mecanică și Industrială



TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

**CONTRIBUȚII LA STUDIUL TEHNOLOGIILOR MODERNE DE GENERARE A
SUPRAFEȚELOR**

Doctorand

Ing. Răzvan-Sebastian CRĂCIUN

Președinte

Prof. univ. dr. ing. habil. Nicușor BAROIU
Decan al Facultății de Inginerie, Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

Conducător științific

Prof. univ. dr. ing. Virgil-Gabriel TEODOR
Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

Referenți științifici

Prof. univ. dr. ing. ec. Dumitru NEDELICU
Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași

Prof. univ. dr. ing. Nicolae IONESCU
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București

Prof. univ. dr. ing. habil. Gabriel-Radu FRUMUȘANU
Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

Seria I 4: Inginerie industrială Nr. 105

GALAȚI

2026

Seriile tezelor de doctorat susținute public în UDJG începând cu 1 octombrie 2013 sunt:

Domeniul fundamental ȘTIINȚE INGINEREȘTI

- Seria I 1: **Biotehnologii**
- Seria I 2: **Calculatoare și tehnologia informației**
- Seria I 3: **Inginerie electrică**
- Seria I 4: **Inginerie industrială**
- Seria I 5: **Ingineria materialelor**
- Seria I 6: **Inginerie mecanică**
- Seria I 7: **Ingineria produselor alimentare**
- Seria I 8: **Ingineria sistemelor**
- Seria I 9: **Inginerie și management în agicultură și dezvoltare rurală**

Domeniul fundamental ȘTIINȚE SOCIALE

- Seria E 1: **Economie**
- Seria E 2: **Management**
- Seria E 3: **Marketing**
- Seria SSEF: **Știința sportului și educației fizice**
- Seria SJ: **Drept**

Domeniul fundamental ȘTIINȚE UMANISTE

- Seria U 1: **Filologie- Engleză**
- Seria U 2: **Filologie- Română**
- Seria U 3: **Istorie**
- Seria U 4: **Filologie - Franceză**

Domeniul fundamental MATEMATICĂ ȘI ȘTIINȚE ALE NATURII

- Seria C: **Chimie**

Domeniul fundamental ȘTIINȚE BIOMEDICALE

- Seria M: **Medicină**
- Seria F: **Farmacie**

Mulțumiri

Doresc să îmi exprim recunoștința profundă față de toți cei care mi-au fost alături pe parcursul studiilor doctorale și care au contribuit, în mod direct sau indirect, la realizarea acestei teze.

Mulțumesc domnului Prof. dr. ing. habil. Virgil Gabriel TEODOR pentru îndrumarea constantă, răbdarea și pentru coordonarea atentă a activității mele atât în cadrul studiilor doctorale, cât și în activitățile extracurriculare. Consilierea dumneavoastră avizată, disponibilitatea și exigența profesională au reprezentat piloni esențiali în dezvoltarea mea științifică și în finalizarea acestei lucrări.

Mulțumiri comisiei de îndrumare, domnului Prof. dr. ing. habil. Viorel PĂUNOIU pentru sprijinul didactic și științific, pentru observațiile constructive și pentru orientarea metodologică care au consolidat valoarea academică a tezei, domnului Prof. dr. ing. habil. DHC Cătălin FETECĂU pentru îndrumarea științifică la nivel academic, pentru clarificările teoretice și pentru contribuțiile la rigoarea analitică a lucrării. Îmi exprim recunoștința pentru disponibilitatea și atenția la detalii a domnilor Conf. dr. ing. Constantin GEORGESCU și Conf. dr. ing. Constantin CĂRĂUȘU, pentru recomandările concrete privind îmbunătățirea structurii și conținutului tezei și pentru sprijinul acordat în pregătirea și prezentarea publică a rezultatelor.

Adresez mulțumiri Prof. dr. ing. habil. Nicușor BAROIU (Decanul Facultății de Inginerie), Prof. dr. ing. habil. Gabriel Radu FRUMUȘANU, precum și celorlalți colaboratori științifici cu care am interacționat direct sau indirect de-a lungul anilor de studiu. Aprecieri deosebite pentru dialogul profesional și schimbul de idei au avut un impact semnificativ asupra dezvoltării mele academice.

Mulțumesc în mod expres domnului Prof. univ. dr. ing. ec. Dumitru NEDELICU (Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași), domnului Prof. dr. ing. Nicolae IONESCU (Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București) și domnului Asist. dr. ing. Teodor Daniel MÎNDRU pentru interesul, observațiile și contribuțiile lor valoroase la îmbogățirea conținutului științific al lucrării.

Adresez, de asemenea, recunoștință membrilor supleanți Prof. univ. dr. ing. habil. Bogdan Alexandru CHIRIȚĂ (Universitatea "Vasile Alecsandri" din Bacău) și Prof. dr. ing. Alina DUȚĂ (Universitatea din Craiova) pentru disponibilitatea de a susține procesul evaluativ și pentru contribuțiile aduse prin discuții și observații constructive.

În final, vreau să îmi exprim recunoștința față de familie și prieteni pentru sprijinul moral necondiționat și pentru încurajările constante pe care mi le-au oferit pe parcursul acestui demers academic.

În mod deosebit, doresc să aduc un omagiu și să îmi exprim profunda recunoștință față de regretatul Prof. dr. ing. Nicolae OANCEA, DHC. Personalitatea sa academică remarcabilă, contribuțiile de excepție în domeniul ingineriei și dedicarea față de formarea noilor generații de specialiști au reprezentat o sursă constantă de inspirație. Deși nu se mai află printre noi, impactul domniei sale asupra mediului academic și asupra comunității științifice rămâne profund și de necontestat. Păstrez cu respect și considerație amintirea unei personalități academice de înaltă ținută, a cărei moștenire intelectuală va continua să ghideze și să motiveze generațiile viitoare.

Atât eu, cât și comisia de îndrumare dorim să dedicăm această teză domnului profesor Nicolae OANCEA.

Cu stimă și recunoștință,

Ing. Răzvan Sebastian CRĂCIUN

Introducere

Teza de doctorat analizează tehnologiile moderne de generare a suprafețelor prin aşchiere, cu accent pe integrarea mașinilor-unelte CNC, strategiilor avansate de programare și metodelor de optimizare a proceselor. Lucrarea îmbină fundamente teoretice, rezultate experimentale și aplicații în medii CAD-CAM, având ca scop obținerea unor suprafețe cu precizie ridicată și calitate superioară, precum și dezvoltarea unor soluții aplicabile în ingineria industrială.

Importanța temei derivă din necesitatea optimizării continue a proceselor de fabricație în industrie precum cea aerospațială, constructoare de autovehicule, energetică, în prelucrarea matrițelor etc. Mașinile-unelte CNC reprezintă elementul central al producției moderne, iar centrele multi-axă permit realizarea de geometrii complexe, dificil de obținut prin metode tradiționale.

Un obiectiv central îl constituie analiza parametrilor de prelucrare și a interacțiunii sculă-material. Cercetarea vizează în special aliajele de aluminiu, evidențiind influența uzurii sculei asupra forțelor de aşchiere și a calității suprafeței. Studiile experimentale completează lacunele din literatura de specialitate prin determinări directe ale forțelor, momentelor și parametrilor de rugozitate (R_a , R_z , R_q), permițând stabilirea unor corelații relevante pentru optimizarea proceselor și controlul calității.

O contribuție originală o reprezintă dezvoltarea metodei punctelor virtuale de contact pentru generarea suprafețelor elicoidale. Aceasta permite definirea precisă a traiectoriilor sculei, optimizarea contactului cu materialul și este validată experimental.

Structura tezei este organizată logic: prezentarea stadiului actual al domeniului, definirea obiectivelor, analiza experimentală a prelucrabilității și rugozității, dezvoltarea metodei propuse și, în final, sintetizarea contribuțiilor și a impactului acestora asupra optimizării proceselor de fabricație.

Pe plan academic, lucrarea extinde cunoștințele privind interacțiunea dintre parametrii de prelucrare, material și sculă, oferind date experimentale și metodologii utile cercetărilor viitoare. Din punct de vedere practic, sunt formulate recomandări pentru îmbunătățirea calității suprafețelor și eficienței proceselor.

În concluzie, această teză de doctorat a fost concepută să furnizeze o analiză complexă și integrată a tehnologiilor moderne de generare a suprafețelor, combinând cercetarea experimentală, dezvoltarea metodologică și implementarea practică în medii CAM/CNC. Rezultatele obținute permit formularea unor recomandări pentru optimizarea proceselor de fabricație, creșterea preciziei și calității suprafețelor și identifică direcții noi de cercetare în domeniul prelucrărilor avansate.

Cuprins selectiv

Capitolul 1. Stadiul actual privind studiul tehnologiilor moderne de generare a suprafețelor	1
1.1. Prezentarea mașinilor-unelte CNC	1
1.2. Tipuri de mașini-unelte CNC dedicate prelucrărilor mecanice	1
1.2.1. Strunguri CNC	1
1.2.2. Mașini de frezat CNC	2
Capitolul 2. Obiective principale, direcții de cercetare și metodologie de cercetare ale tezei de doctorat	4
2.1. Obiective principale	4
2.2. Direcții de cercetare	4
2.3. Metodologie de cercetare	5
Capitolul 3. Contribuții privind studiul prelucrabilității prin aşchiere a unor aliaje de aluminiu	6
3.1. Studiu experimental privind distribuția forței axiale la găurirea duraluminiului 2024-T351	6
3.2. Analiza experimentală a momentului de torsiune și determinarea forței specifice unitare de aşchiere la găurirea aliajului Al7SiMg	9
3.3. Modelarea și predicția forțelor și momentelor de torsiune la găurirea aliajului 2024-T351 prin rețele neuronale	12
3.4. Studiu experimental asupra influenței parametrilor de frezare asupra forței de aşchiere a duraluminiului 2024-T351	18
3.5. Concluzii	22
Capitolul 4. Contribuții experimentale asupra studiului rugozității suprafețelor la prelucrarea prin aşchiere a aliajelor de aluminiu	23
4.1. Studiu experimental și modelare neuronală a rugozității la frezarea aliajelor de aluminiu	23
4.2. Studiu asupra influenței parametrilor de regim asupra calității suprafeței în prelucrarea duraluminiului 2024-T351	27
4.3. Concluzii	29
Capitolul 5. Metoda punctelor virtuale de contact pentru generarea suprafețelor elicoidale	30
5.1. Analiza profilului rotorului din componența unui compresor elicoidal conic	30
5.2. Studiul generării suprafețelor elicoidale cilindrice și de pas constant	33
5.3. Profilarea sculei inelare pentru generarea suprafețelor elicoidale cilindrice utilizand metoda punctelor virtuale de contact	36
5.4. Concluzii	39
Capitolul 6. Concluzii generale și contribuții personale	39
6.1. Concluzii generale	39
6.2. Contribuții personale	39
6.3. Direcții viitoare de cercetare și perspective	40
Lista articolelor științifice publicate	41
Bibliografie selectivă	44

Capitolul 1. Stadiul actual privind studiul tehnologiilor moderne de generare a suprafețelor

1.1. Prezentarea mașinilor-unelte CNC

Mașinile-unelte pot fi definite ca mașini utilizate pentru fabricarea altor mașini, asigurând prelucrarea diverselor materiale în condiții de viteză, precizie și calitate ridicată a suprafețelor. O etapă importantă în extinderea folosirii mașinilor-unelte a fost inventarea calculatoarelor și a automatelor programabile, care a condus la ceea ce astăzi se numește a doua revoluție industrială. Introducerea controlului numeric al mașinilor-unelte a fost realizată în anul 1950 la MIT. Aceste dispozitive de control numeric, permiteau poziționarea precisă a sculelor și automatizarea ciclurilor de găurire. Avantajele erau aduse de faptul că se scurta timpul de prelucrare, dar erau contracarate de costurile foarte ridicate ale componentelor electronice. Ulterior a fost dezvoltată a doua generație de mașini-unelte cu comandă numerică, care permitea deplasarea controlată a sculei în timp ce se realiza așchierea.

Inițial mașinile-unelte cu comandă numerică erau derivate din mașini-unelte universale. Pot fi identificate mașini de frezat, caracterizate de mișcare principală de revoluție, executată de către scula și mișcare de avans executată în plan de către semifabricat.

Pentru a putea fi stabilită geometria piesei, se folosesc două sisteme de referință distincte:

- Primul este sistemul de referință asociat piesei, în care se stabilesc caracteristicile geometrice ale acesteia.
- Al doilea sistem de referință este cel al mașinii-unelte.

De obicei sistemul de referință al mașinii-unelte este un sistem de referință cartezian drept. Sistemul cartezian este un sistem de coordonate euclidian tridimensional alcătuit din trei axe ortogonale X, Y și Z, care se intersectează într-un punct de referință comun, având orientarea fixată astfel încât relația dintre cele trei direcții să respecte regula mâinii drepte: dacă degetul arătător indică direcția pozitivă a axei X, degetul mijlociu indică direcția pozitivă a axei Y, atunci degetul mare arată direcția pozitivă a axei Z [1], [2], [3].

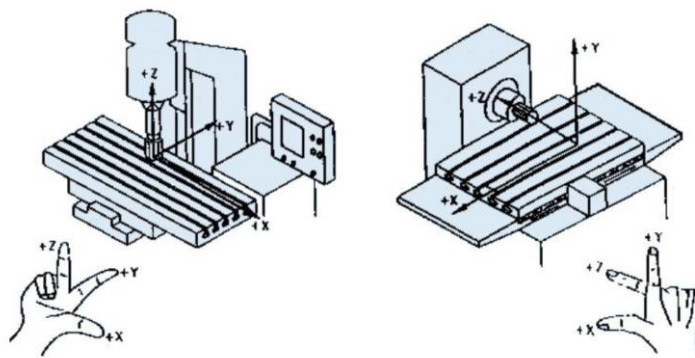


Figura 1.1. Sistemul de coordonate rectangular cartezian [4]

1.2. Tipuri de mașini-unelte CNC dedicate prelucrărilor mecanice

1.2.1. Strunguri CNC [5]

Strungurile CNC sunt unele dintre cele mai utilizate mașini-unelte, permițând prelucrarea unor suprafețe plane, de revoluție sau elicoidale.

Au fost create strunguri CNC specializate, concepute pentru nevoi specifice de prelucrare a pieselor, de exemplu strunguri de detalonat, pentru prelucrarea arborilor cotiți, etc.

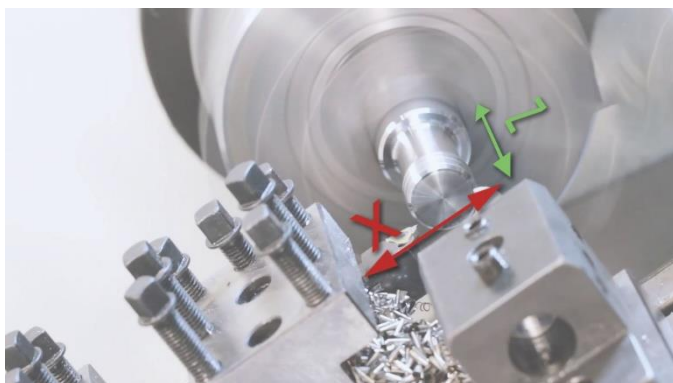


Figura 1.2. Strung cu două axe controlate numeric;
Axele de translație X și Z – Copyright 2023
Foshan Leader Machinery CO., LTD Corporation
[6]

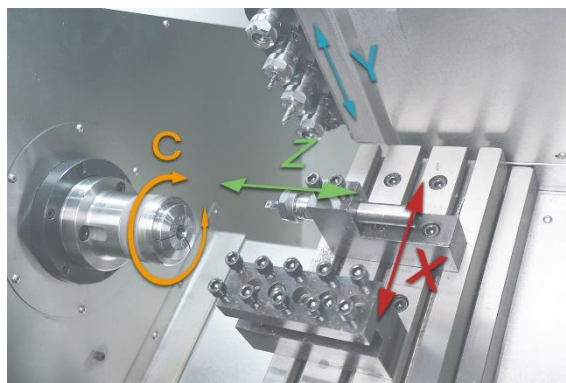


Figura 1.3. Strung cu patru axe controlate numeric; Axele de translație X, Y și Z & Axa de rotație C – Copyright 2023 Foshan Leader Machinery CO., LTD Corporation
[6]



Figura 1.4. Strung vertical VL-100CA
(Fotografie realizată de: Honor Seiki) – © 2001
- 2026 Copyright. MM Industrial Spectrum. [7]



Figura 1.5. Strung orizontal prelucrând un ax cu came – Copyright ©2021 EKO Group. All Rights Reserved. [8]



Figura 1.6. Prelucrarea cu precizie a unei piese complexe pe un strung CNC – Terms of use © 2026, Zintilon Technology Co., Ltd. All Rights Reserved. [9]

Strunjirea se remarcă în mod deosebit prin faptul că asigură o productivitate relativ ridicată [5].

1.2.2. Mașini de frezat CNC

Procedul de prelucrare prin frezare este caracterizat de mișcare principală de revoluție, executată de către sculă și mișcare de avans plană sau spațială după o traiectorie în general perpendiculară pe axa sculei [10].

Rezumatul comparației dintre mașinile-unelte clasice și mașinile-unelte CNC se regăsește în Tabelul 1.1:

Tabelul 1.1. Comparație între mașinile-unelte clasice și mașinile-unelte CNC

Criteriu	Mașini-unelte clasice	Mașini-unelte CNC
Precizie [11]	Limitată, depinde de abilitățile operatorului	Precizie ridicată și repetabilitate
Viteză [12]	Timpi de producție mai mari, sunt necesare ajustări manuale	Producție mai rapidă, continuă, timp minim de staționare
Flexibilitate [11]	Specifică sarcinii, adaptabilitate limitată	Versatilitate ridicată, capabil să facă față mai multor sarcini
Schimbarea sculei [13]	Schimbări manuale de scule, capacitate de înmagazinare limitată a sculelor	Schimbătoare automate de scule, capacitate de înmagazinare mai mare a sculelor
Cost [12]	Cost inițial mai mic, costuri mai mari cu forța de muncă	Cost inițial mai mare, costuri mai mici cu forța de muncă în timp
Pregătirea operatorului [12]	Necesită operatori calificați, cu experiență	Operatori mai ușor de pregătit, activitățile se concentrează pe programare și monitorizare
Siguranță [13]	Risc mai mare datorită interacțiunii operatorului	Design-ul spațiului de lucru este de regulă complet închis, procese automatizate pentru siguranță

Industria mașinilor-unelte CNC trece de la automatizarea discretă la sisteme digitale integrate, cu soluții multi-axiale și hibride care oferă capabilități avansate, dar rămân limitate de costuri, complexitate și răspândire. Mașinile cu cinci axe sunt uzuale pentru prelucrări complexe, iar extensiile la 7–9 axe aduc multifuncționalitate și reduc reparațiile, dar cresc costurile și complică calibrarea și post-procesarea. Prelucrarea hibridă combină procese aditive și subtractive, optimizând materialul și fluxurile, însă menținerea preciziei impune integrare riguroasă și etape suplimentare.

Controlul proceselor evoluează de la corecții reactive la strategii predictive și adaptive, cu metrologie integrată care permite intervenții în timp real și reducerea rebuturilor. Modelele de erori volumetrice și compensările bazate pe matrici de transformare reduc deviațiile, dar necesită echipamente și competențe specializate, limitând aplicabilitatea în întreprinderile mici.

Tehnicile moderne de control al mișcării, inclusiv control predictiv, învățare iterativă, optimizarea traseului sculei și algoritmi avansați, diminuează erorile și uzura sculelor. Integrarea senzorilor și a arhitecturilor IIoT permite monitorizare continuă și mentenanță predictivă, iar simulările 3D și protecțiile software/hardware previn coliziunile, deși depind de date și validări riguroase.

Barierile majore rămân organizaționale: costurile de achiziție și modernizare, pregătirea personalului, întreținerea sistemelor și standardizarea datelor pentru interoperabilitate. În centrele avansate, tehnologii emergente precum inteligența artificială, gemenii digitali și fabricația hibridă sunt implementate acolo unde investițiile sunt justificate. Extinderea pe scară largă necesită automatizare, standardizare, integrarea IoT, dezvoltarea competențelor digitale și optimizarea raportului cost-beneficiu, pentru utilizarea eficientă și durabilă a capacităților tehnologice.

Capitolul 2. Obiective principale, direcții de cercetare și metodologie de cercetare ale tezei de doctorat

Prezenta teză de doctorat, intitulată „*Contribuții la studiul tehnologiilor moderne de generare a suprafețelor*”, este elaborată în contextul dezvoltării accelerate a prelucrării prin aşchiere și al integrării sistemelor CAD-CAM-CNC în procesele industriale. Creșterea cerințelor privind precizia geometrică, calitatea suprafețelor și eficiența energetică impune abordări de cercetare avansate, care depășesc modelele clasice și oferă soluții fundamentate științific, cu aplicabilitate practică.

Analiza domeniului evidențiază provocări majore privind corelarea geometriei sculelor, parametrilor regimului de aşchiere, comportării materialelor și calității suprafețelor generate. În cazul aliajelor de aluminiu, utilizate pe scară largă în industriile aerospațială și constructoare de autovehicule, se impune o abordare sistematică a prelucrabilității, atât din punct de vedere energetic, cât și al calității suprafețelor. Deși aceste materiale prezintă un raport favorabil rezistență-greutate, ele ridică dificultăți specifice la prelucrare, determinate de depunerile pe muchia sculei, variațiile forțelor de aşchiere și influența asupra calității suprafeței. Literatura de specialitate evidențiază lipsa unor seturi coerente de date experimentale și a unor modele numerice capabile să descrie adecvat comportarea la prelucrare, ceea ce justifică alegerea acestor aliaje pentru studiu.

Obiectivul general al tezei îl constituie elaborarea unui cadru metodologic integrat, de natură teoretică, numerică și experimentală, destinat studiului tehnologiilor moderne de generare a suprafețelor, cu accent pe prelucrarea prin aşchiere asistată de sisteme CAD-CAM-CNC. Acest demers permite analiza unitară a procesului, de la modelarea geometrică și cinematică până la evaluarea performanțelor tehnologice și a calității suprafețelor obținute.

2.1. Obiective principale

Pentru atingerea obiectivului general, teza propune o serie de obiective specifice, definite anterior desfășurării studiilor experimentale. Acestea vizează, în principal, analiza comportamentului procesului de aşchiere în cazul aliajelor de aluminiu, prin investigarea parametrilor energetici caracterizați de forțele și momentele de aşchiere, precum și a prelucrabilității materialului. De asemenea, se urmărește evaluarea influenței parametrilor tehnologici și a proprietăților materialului asupra calității suprafețelor generate, exprimată prin indicatori de rugozitate.

Un obiectiv distinct îl constituie dezvoltarea unor modele avansate pentru descrierea și predicția procesului de generare a suprafețelor, capabile să integreze influența simultană a factorilor tehnologici. În acest scop, sunt utilizate metode statistice și numerice moderne, care permit identificarea relațiilor dintre parametrii de intrare și rezultatele procesului, în vederea optimizării regimurilor de prelucrare.

Un alt obiectiv major constă în elaborarea unei metode originale de analiză geometrică a generării suprafețelor, cu aplicabilitate pentru suprafețele elicoidale. Metoda urmărește fundamentarea teoretică a procesului de generare prin înfășurare și dezvoltarea unui instrument matematic și numeric utilizabil în proiectarea sculelor generatoare și în analiza cinematicii procesului.

Direcțiile de cercetare sunt stabilite în concordanță cu aceste obiective, asigurând o abordare coerentă și progresivă a problematicii generării suprafețelor.

2.2. Direcții de cercetare

O primă direcție de cercetare vizează analiza energetică a procesului de aşchiere, prin studierea prelucrabilității și a influenței parametrilor tehnologici asupra solicitării sistemului mașină-sculă-piesă, constituind baza înțelegerii mecanismelor fundamentale ale prelucrării.

A doua direcție este orientată către evaluarea prelucrabilității aliajelor din perspectiva calității suprafețelor generate, cu accent pe corelarea parametrilor procesului cu rugozitatea suprafeței, considerată indicator esențial al performanței tehnologice și funcționale.

O direcție suplimentară o reprezintă modelarea avansată a procesului de generare a suprafețelor, prin metode statistice și numerice moderne, care permit predicția comportării procesului și optimizarea parametrilor tehnologici, constituind suport pentru decizia tehnologică și integrarea în aplicații industriale.

În completare, teza urmărește integrarea metodelor dezvoltate în fluxuri CAD-CAM-CNC, în vederea transferului rezultatelor către aplicații practice, folosind validare prin simulări numerice și aplicații tehnologice, contribuind la creșterea nivelului de automatizare și a calității proceselor.

Prin aceste direcții, se definește cadrul conceptual și metodologic al tezei, structura lucrării fiind concepută astfel încât fiecare capitol să contribuie la realizarea obiectivului general și la asigurarea coerenței demersului științific.

2.3. Metodologie de cercetare

Metodologia utilizată pentru studiul proceselor de generare a suprafețelor prin aşchiere, precum și echipamentele și aplicațiile software implicate în obținerea, preprocesarea, analiza și validarea datelor experimentale și numerice. Cercetarea are caracter mixt, îmbinând formulări teoretice și analitice cu implementări numerice și studii experimentale. Demersul metodologic urmează un flux structurat, care include definirea obiectivelor și a planului experimental, realizarea testelor de găurire și frezare, achiziția și prelucrarea datelor, modelarea numerică și de regresie, validarea rezultatelor și integrarea acestora în medii CAD-CAM-CNC.

Experimental, au fost realizate trei categorii de studii: determinări energetice și dinamometrice în operații de găurire, studii asupra forței medii de aşchiere în frezare și evaluări ale calității suprafețelor prin măsurători de rugozitate. Planificarea experimentelor s-a bazat pe planuri factoriale și ortogonale, permițând evaluarea efectelor individuale și a interacțiunilor dintre parametrii de proces. Pentru fiecare combinație de parametri s-au efectuat repetări în condiții controlate, asigurând repetabilitatea și eliminarea valorilor aberante.

Achiziția datelor s-a realizat cu un dinamometru piezoelectric multicomponent Kistler 9257B, utilizat împreună cu aplicația DynoWare, pentru măsurarea forțelor și momentelor din zona de aşchiere. Determinările energetice suplimentare au fost efectuate cu pendulul Oxford-Airey, iar evaluarea rugozității s-a realizat cu rugozimetrul Mitutoyo SJ-210. Analiza geometrică și inspecția suprafețelor au fost efectuate în GOM Inspect. Operațiile de prelucrare s-au desfășurat pe centrul de prelucrare CNC HAAS VF-1, utilizând scule din carbură sau oțel rapid, acoperite cu AlTiCrN, selectate în funcție de material.

Prelucrarea datelor a inclus exportul în format CSV, preprocesarea în Matlab, identificarea regimului staționar, filtrarea semnalelor și eliminarea valorilor eronate, precum și calculul indicatorilor statistici relevanți. Analiza semnalelor dinamice și ajustarea funcțională au fost realizate cu instrumente dedicate din Matlab, iar pentru rugozitate s-au utilizat curbele Abbott-Firestone și proceduri de mediere pe baza măsurătorilor repetate.

Analiza statistică a inclus aplicarea ANOVA multifactorială și dezvoltarea modelelor de regresie pentru evaluarea influenței parametrilor asupra indicatorilor de rezultat. În completare, au fost dezvoltate rețele neuronale artificiale pentru modelarea comportamentului procesului, cu seturi distincte pentru antrenare, validare și testare și evaluarea performanței prin indicatori statistici adecvați. Pentru analiza semnalelor au fost utilizate metode de identificare a maximelor locale și tehnici robuste de mediere.

Metodologia teoretică și numerică a inclus dezvoltarea algoritmilor pentru metoda punctelor virtuale de contact, implementați în Matlab prin calcul simbolic și numeric. Condiția de înfășurare a fost rezolvată numeric pentru determinarea curbei caracteristice și a profilului sculei. Rezultatele au fost exportate în formate CAD și integrate în CATIA V5R21, fiind ulterior validate prin comparație cu analizele din GOM Inspect. Implementările au fost optimizate pentru eficiență și pentru generarea rapidă a seturilor de puncte reprezentative.

Pe întreg parcursul cercetării s-a asigurat consistența experimentală și rigoarea analitică, prin proiectarea adecvată a experimentelor, aplicarea sistematică a repetărilor și evaluarea critică a rezultatelor. Validarea finală s-a realizat prin corelarea modelelor teoretice, a simulărilor numerice și a datelor experimentale, permițând generalizarea rezultatelor și formularea de recomandări pentru optimizarea regimurilor de prelucrare și integrarea acestora în procese CAD-CAM-CNC.

Capitolul 3. Contribuții privind studiul prelucrabilității prin aşchiere a unor aliaje de aluminiu

Capitolul 3 analizează forțele și momentele de aşchiere în găurirea și frezarea aliajelor de aluminiu, vizând optimizarea parametrilor de prelucrare. Obiectivul este evaluarea influenței parametrilor de regim asupra forței axiale și momentului de torsiune și dezvoltarea unor metode moderne de determinare și modelare aplicabile industrial.

Cercetarea integrează studiile asupra distribuției forței axiale, momentului de torsiune și forței specifice unitare pentru aliajele Al7SiMg și 2024-T351, precum și analiza forței medii pe dinte în frezare, pentru estimarea robustă a solicitărilor mecanice. Experimentele au urmat planuri factoriale, cu repetări și filtrarea valorilor aberante, și au vizat parametrii: diametrul sculei, turația, avansul, viteza și adâncimea de aşchiere.

Capitolul oferă un cadru integrat experimental și numeric, valid și aplicabil industrial, care corelează solicitările mecanice cu calitatea suprafeței și uzura sculelor și susține optimizarea regimurilor de prelucrare și integrarea corecțiilor de profil în CAM-CNC.

3.1. Studiu experimental privind distribuția forței axiale la găurirea duraluminiului 2024-T351

Se bazează pe determinarea distribuției forței axiale în timpul găuririi duraluminiului 2024-T351, realizându-se măsurători pentru trei combinații de parametri de prelucrare, respectiv adâncimea de aşchiere, viteza de aşchiere și avansul. Au fost executate în total 27 de găuri, utilizând burghie cu diametre de 6, 8 și 10 mm, viteze de aşchiere de 50, 60 și 70 m/min și avansuri de 0,1, 0,25 și 0,4 mm/rot. Unul dintre factorii care influențează calitatea și eficiența procesului de prelucrare este menținerea unei forțe de aşchiere constante.

Uniformitatea forței de aşchiere este un aspect important în procesele de prelucrare mecanică, având un impact semnificativ asupra calității pieselor finite, duratei de viață a sculelor aşchietoare și eficienței procesului de fabricație. Aceasta se referă la menținerea unei forțe constante în timpul proceselor de aşchiere, asigurând astfel o prelucrare uniformă și controlată [14].

În experimentul desfășurat s-a monitorizat forța axială la prelucrarea prin burghiere a aliajului 2024-T351 în scopul identificării legăturii dintre parametrii regimului de aşchiere și variația valorii forței axiale.

Materialul prelucrat este duraluminiu 2024-T351, având compoziția chimică dată în Tabelul 3.1. [15]. Aliajul face parte din categoria mai largă a aliajelor cunoscute sub denumirea generică de duraluminiu.

Tabelul 3.1. Compoziția chimică a aliajului 2024-T351

Componentă	Cantitate [%]
Si ≤	0,5
Fe ≤	0,5
Cu	3,8÷4,9
Mn	0,3÷0,9
Mg	1,2÷1,8
Cr	0,1
Zn ≤	0,25
Ti	0,15
Alte elemente ≤	0,05
Al	Restul

Aceste aliaje sunt cunoscute pentru combinația de greutate redusă și rezistență mecanică ridicată. Aliajul este utilizat pe scară largă în diverse industrii datorită proprietăților sale mecanice și rezistenței la coroziune moderate.

Parametrii regimului de aşchiere au fost variați în domeniile recomandate pentru prelucrarea aliajului menționat, pentru fiecare dintre parametri alegându-se câte trei valori, după cum urmează:

- Pentru viteza de aşchiere v s-au folosit valorile de 50, 60, 70 m/min.
- Pentru avansul pe dinte s_d s-au folosit valorile de 0,05; 0,125 și 0,2 mm.
- Pentru adâncimea de aşchiere t s-au folosit valorile de 3, 4 și 5 mm.

Cu aceste trei valori au fost obținute 27 de regimuri de aşchiere distincte.

În Figura 3.1. este prezentată înregistrarea valorilor pentru unul dintre regimurile de aşchiere (cel corespunzător parametrilor $t = 5 \text{ mm}$, $s_d = 0,125 \text{ mm}$, $v = 50 \text{ m/min.}$).

În Figura 3.2. este prezentată zona selectată pentru analiza ulterioară.

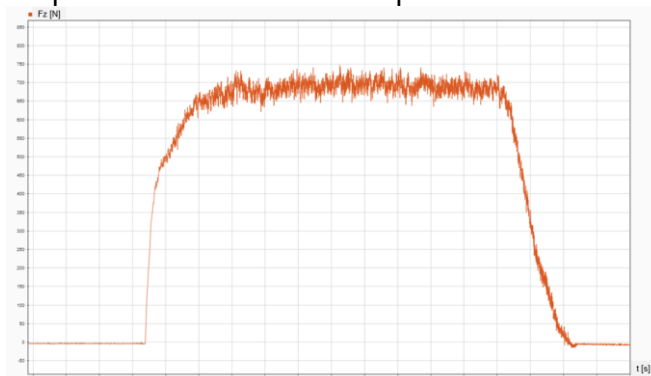


Figura 3.1. Forţa axială măsurată [16]

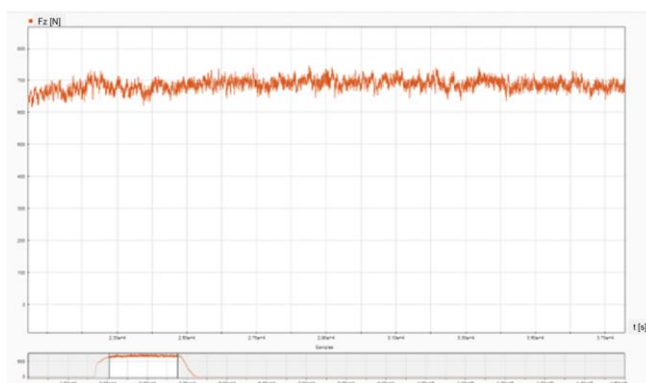


Figura 3.2. Zonă de selecţie [16]

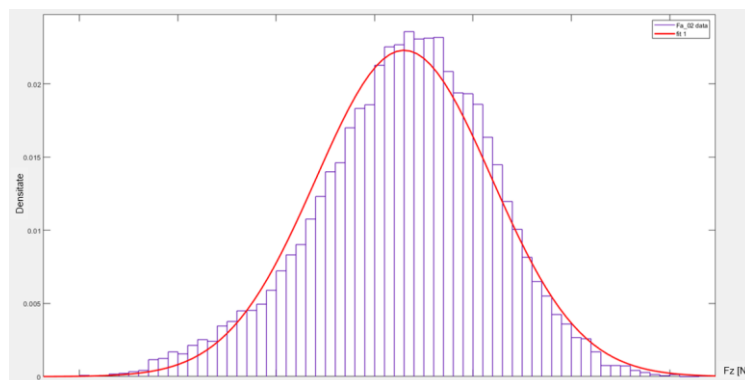


Figura 3.3. Distribuţia valorilor forţei axiale [N] la găurire ($v = 50 \text{ m/min}$; $s_d = 0,125 \text{ mm}$; $t = 5 \text{ mm}$) [16]

Pentru a identifica potenţiala influenţă a fiecăruia dintre parametrii regimului de aşchiere asupra distribuţiei valorilor forţei axiale a fost aplicată analiza multicriterială a varianţei (ANOVA), [17]. Analiza a fost realizată în programul Matlab.

Rezultatele sunt prezentate în Tabelul 3.2.

Tabelul 3.2. Rezultatele analizei ANOVA

Sursă	Sumă pătratică	d.f.	Media pătratică	F (raportul mediilor pătratice)	p (probabilitate)
t	195,75	2	97,876	14,25	0,0023
v	7,24	2	3,621	0,53	0,6094
sd	1.852,85	2	926,423	134,88	0
Eroare	54,95	8	6,868	—	—
Total	2.205,05	26	—	—	—

Valorile obținute pentru probabilitatea de a influența distribuția valorilor forței axiale arată că adâncimea de așchiere și avansul au o influență semnificativă asupra acestui aspect, pe când viteza de așchiere nu influențează distribuția respectivă.

Acest lucru poate fi observat și dacă se reprezintă grafic distribuțiile pentru fiecare dintre cei trei parametri considerați. În Figurile 3.4-3.6 sunt prezentate aceste distribuții.

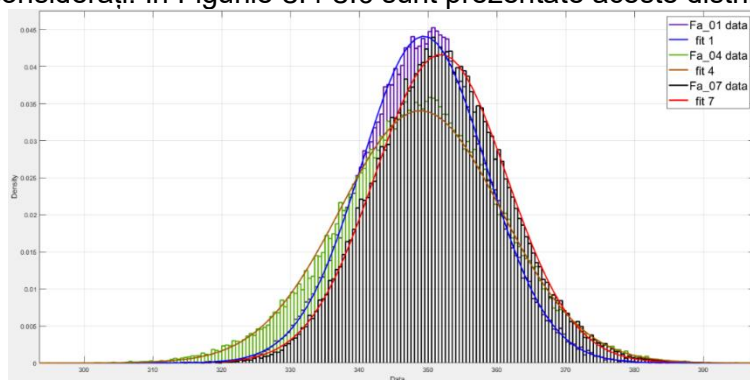


Figura 3.4. Distribuția valorilor forțelor axiale pentru $t = 5$ mm; $sd = 0,05$ mm ($v = 50, 60, 70$ m/min) [16]

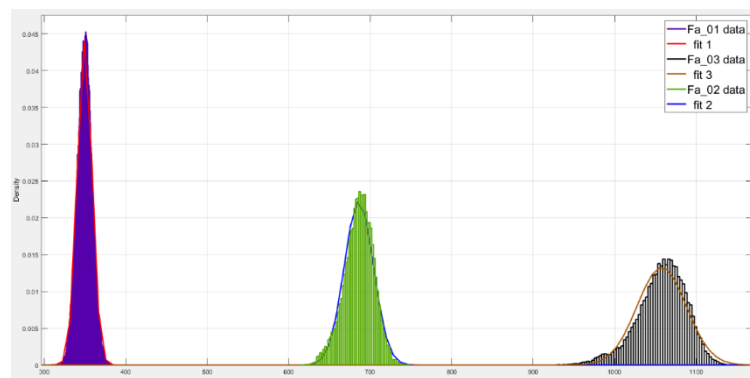


Figura 3.5. Distribuția valorilor forțelor axiale pentru $t = 5$ mm; $v = 50$ m/min ($sd = 0,05; 0,125; 0,2$ mm) [16]

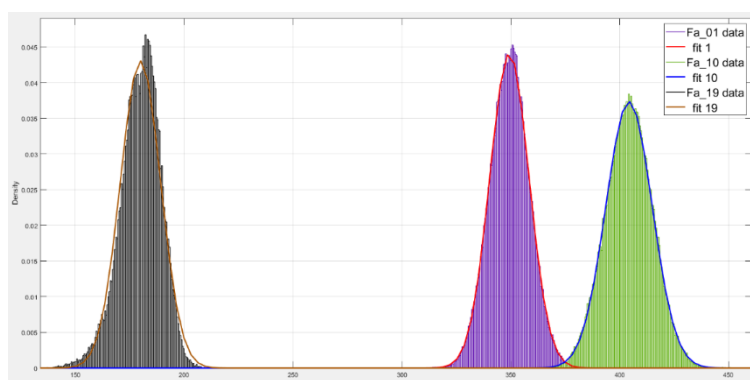


Figura 3.6. Distribuția valorilor forțelor axiale pentru $v = 50$ m/min; $sd = 0,05$ mm ($t = 5, 4, 3$ mm) [16]

Analiza datelor experimentale a demonstrat faptul că atât adâncimea de așchiere cât și valoarea avansului influențează semnificativ distribuția valorilor forței axiale.

Din Figurile 3.5. și 3.6. se poate constata că o valoare mai mică a avansului favorizează o împrăștiere mai mică a valorilor acestei forțe deci o uniformitate mai crescută a forței axiale.

În concluzie, alegerea valorii avansului trebuie să țină seama și de importanța pe care o acordăm acestei productivități în fiecare caz în parte.

Dacă se consideră că menținerea constantă a forței axiale primează atunci se vor alege valori mici pentru avans, compensând eventual cu viteze de așchiere mai mari.

Dacă este importantă productivitatea aşchierii, de exemplu atunci când după găurire urmează să fie realizată o prelucrare de finisare, de exemplu o lărgire, atunci se pot alege valori mai ridicate pentru avans, acceptând o distribuţie mai neuniformă a forţei axiale.

Rezultatele obţinute în studiul anterior, privind distribuţia forţei axiale la găurirea aliajului 2024-T351 evidenţiază influenţa semnificativă a parametrilor regimului de aşchiere asupra stabilităţii procesului şi uniformităţii sarcinii axiale aplicate sculei.

Analiza variaţiei forţei axiale oferă informaţii esenţiale privind precizia procesului şi comportamentul dinamic al sistemului sculă-piesă, însă nu permite, în mod direct, caracterizarea completă a încărcărilor energetice implicate în procesul de găurire. Pentru o descriere riguroasă a solicitărilor mecanice şi pentru estimarea puterii necesare prelucrării, este necesară analiza componentei tangenţiale a forţei de aşchiere, exprimată prin momentul de torsiune al burghiului.

Determinarea momentului de torsiune permite evaluarea forţei specifice unitare de aşchiere, parametru fundamental pentru modelarea procesului, în special în cazul aliajelor cu aşchiabilitate redusă, precum Al7SiMg, pentru care datele din literatura de specialitate sunt limitate. În acest context, studiul următor este dedicat determinării experimentale a momentului de torsiune la găurirea aliajului Al7SiMg, completând analiza forţei axiale şi asigurând o abordare energetică integrată a prelucrabilităţii la aşchiere.

3.2. Analiza experimentală a momentului de torsiune şi determinarea forţei specifice unitare de aşchiere la găurirea aliajului Al7SiMg

Productivitatea unui procedeu de prelucrare prin aşchiere este în strânsă legătură cu mărimea forţei de aşchiere. Pentru calculul forţelor de aşchiere au fost dezvoltate o serie de modele care să permită determinarea acestor forţe în funcţie de materialul prelucrat şi de condiţiile specifice în care se desfăşoară procesul. În mod uzual pentru o aproximare cât mai bună a mărimii forţei de aşchiere se utilizează forţa specifică unitară de aşchiere, care depinde de materialul prelucrat. Pentru materialele uzuale mărimile forţelor specifice unitare de aşchiere sunt prezentate în literatura de specialitate dar, pentru materiale mai rar folosite, de exemplu cele cu aşchiabilitate redusă, valorile respective sunt greu, uneori imposibil de găsit. În această studiu se intenţionează determinarea forţei specifice unitare de aşchiere pentru un aliaj de aluminiu cu conţinut ridicat de siliciu, recunoscut ca fiind dificil de aşchiat. Determinarea valorii acestei forţe se face pornind de la valorile măsurate ale momentului de torsiune la găurire.

Detaşarea aşchiei nominale şi transformarea ei în aşchie propriu-zisă se face sub acţiunea unei forţe exercitată de către scula aşchietoare, denumită forţă de aşchiere [18], [19], [20]. Pe lângă acest aspect, o serie de autori s-au ocupat de analiza stabilităţii procesului de aşchiere prin monitorizarea forţelor care apar în cursul acestuia, [21], [22], [23] şi de influenţa formei muchiei aşchietoare asupra forţelor şi temperaturilor care se dezvoltă în timpul aşchierii [24], [25], [26], [27], [28].

Pentru determinarea componentei principale a forţei de aşchiere se folosesc o serie de metode, dintre care cele mai cunoscute sunt metoda analitică şi metoda cvasi-empirică, [18], [19], [20]. Metoda analitică se bazează pe modelul comprimării plastice a stratului aşchiat şi utilizează ecuaţia politropică a comprimării plastice [18]:

$$\sigma \times l^n = \sigma_0 \times l_0^n \quad (3.1)$$

În modelul prezentat, aşchia nedetaşată este considerată ca fiind o epruvetă izolată supusă la compresie.

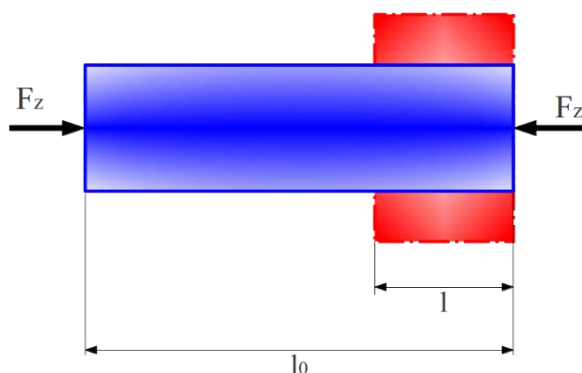


Figura 3.7. Modelul epruvetei izolate [29]

Conform acestui model, momentul de torsiune se calculează cu formula, [18]:

$$M_t = F_z \cdot z \cdot \frac{D}{4 \cdot 10^3} [N \cdot m] \quad (3.2)$$

În ecuația (3.2), M_t este momentul de torsiune, F_z forța pe fiecare dintre muchiile așchietoare principale, z numărul de tășuri ale burghiului și D diametrul burghiului. Forța așchietoare depinde de forța specifică de așchiere prin relația:

$$F_z = \frac{D}{2} \cdot s_d \cdot p_s [N] \quad (3.3)$$

s_d fiind avansul pe dinte iar p_s forța specifică de așchiere.

Forța specifică se determină cu ecuația:

$$p_s = \frac{p_{s1,1}}{a^z} [MPa] \quad (3.4)$$

$p_{s1,1}$ fiind forța specifică unitară iar a grosimea așchiei, conform Figurii 3.8.

Ținând seama de ecuațiile (3.2), (3.3) și (3.4), pentru momentul de torsiune poate fi stabilită ecuația:

$$M_t = \frac{D^2}{8 \cdot 1000} \cdot s \cdot \frac{p_{s1,1}}{a^z} [N \cdot m] \quad (3.5)$$

Dacă se ține seama și de:

$$a = s_d \cdot \sin \kappa \quad (3.6)$$

Pornind de la Figura 3.8, ecuația (3.5) devine:

$$M_t = \frac{D^2}{8 \cdot 1000} \cdot s^{1-z} \cdot \frac{p_{s1,1}}{(\sin \kappa)^z} [N \cdot m] \quad (3.7)$$

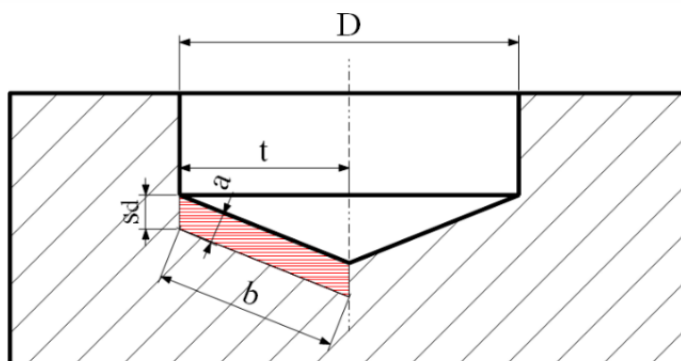


Figura 3.8. Forma așchiei nedetașate [29]

Conform formulei (3.7), pentru determinarea momentului de torsiune este necesară cunoașterea forței specifice unitare de așchiere și a caracteristicilor regimului de așchiere, respectiv avansul s și adâncimea de așchiere $D/2$.

În prezenta analiză se propune determinarea experimentală a forței specifice unitare de așchiere, pe baza valorilor măsurate ale momentelor de torsiune în cazul burghierii pentru un aliaj de aluminiu cu conținut ridicat de siliciu, Al7SiMg. Pentru a putea fi determinați parametrii cu ajutorul cărora se calculează forța axială și momentul de torsiune la găurirea cu un burghiu elicoidal executat din oțel rapid au fost măsurate valorile momentului de torsiune la executarea unei găuri Ø6 folosind diverse valori ale avansului (0,125; 0,16; 0,2; 0,3 mm/rot.).

Pentru cele 3 măsurători a fost calculată valoarea medie a momentului de torsiune, corespunzătoare avansurilor de stabilite, rezultatele fiind prezentate în Tabelul 3.3.

Tabelul 3.3. Valorile momentului de torsiune

s [mm/rot]	M_z [N·mm]	$M_{z,med}$ [N·mm]
0,125	580,6	613,1
	633,3	
	625,2	
0,160	773,6	731,6
	618,0	
	803,2	
0,200	914,4	853,4
	860,9	
	785,0	
0,300	1.214,3	1.154,2
	1.167,5	
	1.080,7	

Rezultatele au fost prelucrate în Matlab și s-a obținut valoarea forței specifice unitare de aşchiere $ps_{1,1} = 489,5$ MPa și valoarea exponentului $z = 0,273$, cu un coeficient de încredere de 95%.

Cu aceste valori se calculează mărimea momentului de torsiune pentru patru valori ale avansului, pentru găuri cu diametre de 6 mm. Valorile teoretice obținute comparate cu valorile efectiv obținute prin măsurare și erorile relative sunt date în Tabelul 3.4 și Figurile 3.9-3.12.

Tabelul 3.4. Valorile măsurate comparativ cu valorile calculate ale momentului de torsiune

s [mm/rot]	M _z [N·mm] măsurat	M _z [N·mm] calculat	Eroare relativă [%]
0,125	613,1	610,8	0,37
0,160	731,6	730,8	0,11
0,200	853,4	859,5	0,71
0,300	1.154,2	1.154,1	0,008

Eroarea relativă pentru fiecare valoare a avansului a fost calculată cu formula:

$$\varepsilon = \frac{|M_{z_măsurat} - M_{z_calculat}|}{M_{z_măsurat}} \cdot 100 [\%] \quad (3.8)$$

$M_{z_măsurat}$ fiind valoarea măsurată a momentului de torsiune iar $M_{z_calculat}$ valoarea acestui moment, rezultată prin calcul.

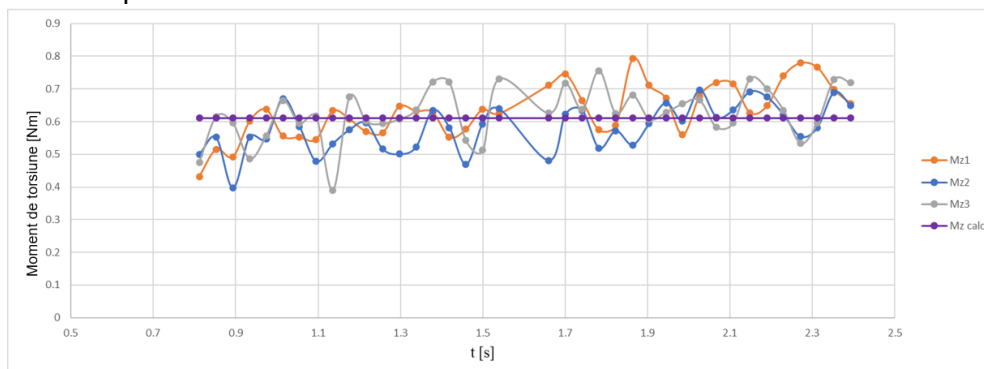


Figura 3.9. Valorile momentelor de torsiune măsurate și calculate pentru $s=0,125$ mm/rot [29]

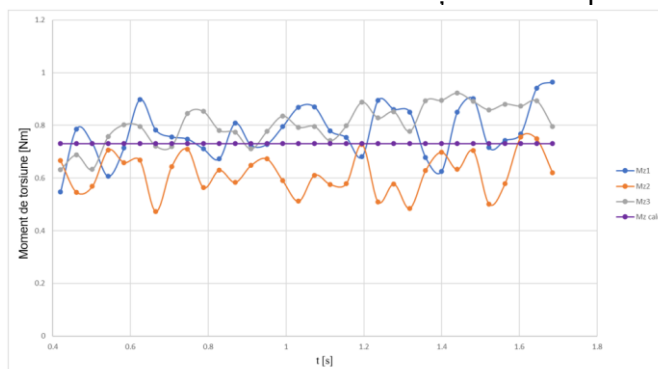


Figura 3.10. Valorile momentelor de torsiune măsurate și calculate pentru $s=0,160$ mm/rot [29]

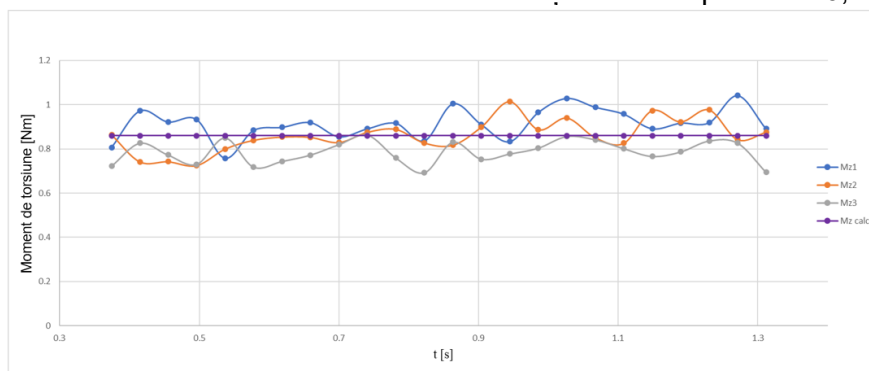


Figura 3.11. Valorile momentelor de torsiune măsurate și calculate pentru $s=0,200$ mm/rot [29]

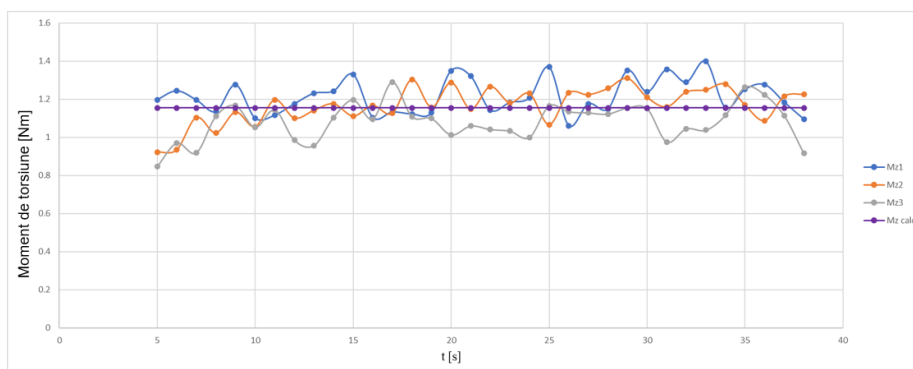


Figura 3.12. Valorile momentelor de torsiune măsurate și calculate pentru $s=0,300$ mm/rot [29]

În concluzie pentru fiecare valoare a avansului s-au făcut câte 3 determinări și a fost calculată valoarea medie a momentului de torsiune, corespunzătoare avansurilor de 0,125; 0,160; 0,200 și 0,300 mm/rot, rezultatele fiind în Tabelul 3.3.

Metoda propusă permite determinarea forței specifice unitare de așchiere, care determină mărimea momentului de torsiune.

3.3. Modelarea și predicția forțelor și momentelor de torsiune la găurirea aliajului 2024-T351 prin rețele neuronale

Duraluminiu 2024-T351 este un aliaj caracterizat de o bună rezistență mecanică, duritate relativ ridicată și rezistență la coroziune folosit frecvent în industria aeronautică, auto, de apărare etc. În acest studiu s-a investigat variația forțelor axiale și momentelor de torsiune la găurirea duraluminiului 2024-T351, analizând valorile măsurate pentru diferite regimuri de așchiere. Au fost colectate date experimentale privind forțele și momentele generate în timpul procesului de găurire, utilizând echipamente specializate, iar aceste date au fost preprocesate și analizate folosind MatLab. Planul experimental a inclus 27 de combinații ale parametrilor regimului de așchiere (adâncimea de așchiere, viteza de așchiere și avansul), pentru care s-au măsurat parametri energetici de așchiere respectiv forța axială și momentul de torsiune. Pe baza acestor date, s-a antrenat o rețea neuronală, utilizând algoritmul de regularizare bayesiană, pentru a prezice valorile optime ale parametrilor energetici de așchiere. Modelul neuronal s-a dovedit a fi eficient, oferind predicții cu o eroare relativă sub 10%, ceea ce indică o bună concordanță între valorile măsurate și cele simulate. În concluzie, rețelele neuronale oferă o alternativă precisă la modelele analitice clasice, fiind mai potrivite pentru materiale cu comportament complex, precum aliajele de aluminiu.

Materialul prelucrat este un duraluminiu, 2024-T351 a cărui compoziție chimică este prezentată în Tabelul 3.1.

Planul experimental stabilit presupune găurirea materialului și măsurarea forței pe direcția axei Z și a momentului de torsiune în jurul aceleiași axe. Au fost variați parametrii regimului de așchiere, fiind selectate câte 3 valori, obținându-se date experimentale pentru adâncimi de așchiere de 5; 4 și 3 mm (corespunzătoare burghiilor cu diametre de 10, 8 și 6 mm), avansuri de 0,1, 0,25 și 0,4 mm/rot., respectiv viteze de așchiere de 50; 60 și 70 m/min.

În total au fost făcute $3 \times 3 \times 3 = 27$ de determinări.

În Tabelul 3.5 sunt prezentați parametrii regimului de așchiere pentru cele 3 diametre de burghie.

Tabelul 3.5. Parametrii regimului de așchiere

Parametri	t = 5 mm								
s [mm/rot.]	0,1			0,25			0,4		
v [m/min.]	50	60	70	50	60	70	50	60	70
Parametri	t = 4 mm								
s [mm/rot.]	0,1			0,25			0,4		
v [m/min.]	50	60	70	50	60	70	50	60	70
Parametri	t = 3 mm								
s [mm/rot.]	0,1			0,25			0,4		
v [m/min.]	50	60	70	50	60	70	50	60	70

Găuririle au fost efectuate pe epruvete de material prelucrate astfel încât să permită realizarea de găuri străpunse fără a pune în pericol dispozitivul de măsurare, Figura 3.13.

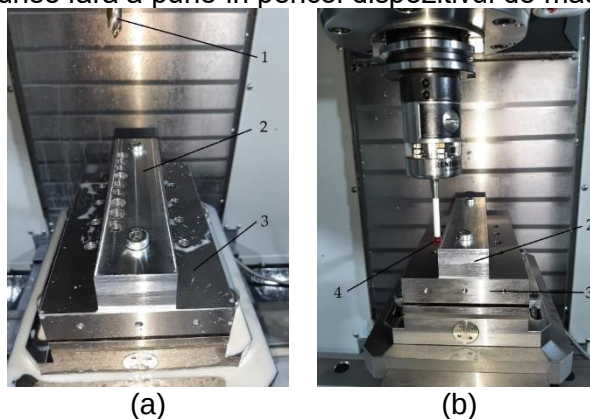


Figura 3.13. Fixarea epruvetei de duraluminu: pe mașina cu comandă numerică (a) și pe dispozitivul de măsurare (b): 1 - burghiu; 2 - epruvetă; 3 - dispozitiv Kistler; 4 - palpator [30]

În Figura 3.14.a este prezentat șirul de valori măsurat, iar în Figura 3.14.b intervalul de valori selectat pentru analiză.

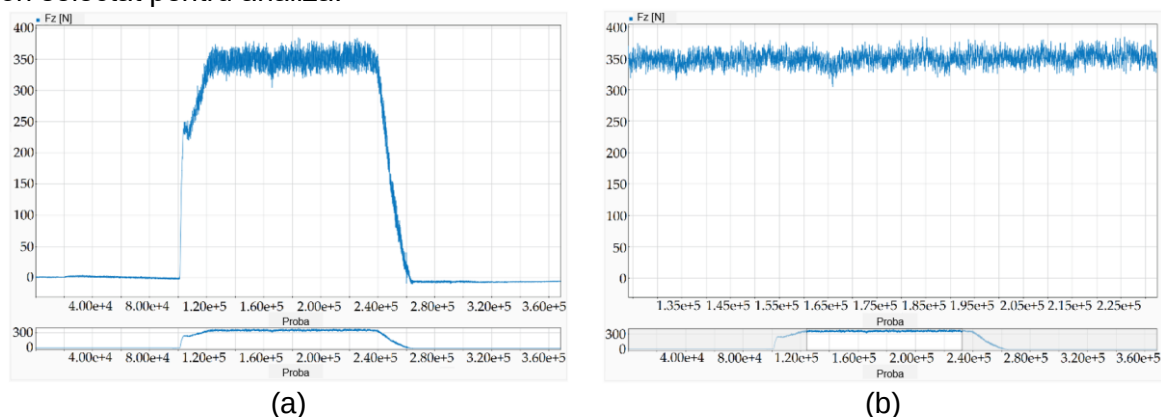


Figura 3.14. Reprezentarea grafică a datelor: (a) măsurate; (b) selectate pentru analiză [30]

În Figura 3.15 este reprezentat graficul pentru frecvența de distribuție a valorilor forțelor axiale măsurate, pentru domeniul selectat pentru analiză (F_{zN_ROI} data) și graficul ecuației de distribuție normale pentru același domeniu (fit_1). Toolbox-ul menționat permite calcularea directă a valorii medii pentru setul de date selectat. În cazul prezentat, corespunzător setului de parametri $t = 5$ mm, $s = 0,1$ mm/rot. și $v_c = 50$ m/min., valoarea medie este pentru $F_z = 349,35$ N, iar pentru $M_z = 1,86$ N·m.

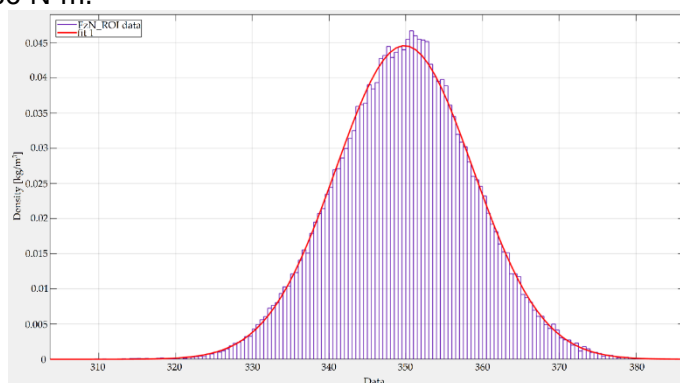


Figura 3.15. Frecvența de distribuție a valorilor forțelor axiale măsurate (în domeniul selectat pentru analiză) [30]

Această preprocesare a fost realizată pentru toate cele 27 de seturi de parametri ai regimului de așchiere.

În Figura 3.16.a sunt prezentate găurile prelucrate, pe imagine fiind marcată numerotarea acestora, conform Tabelului 3.6 în care sunt prezentați parametrii de prelucrare

corespunzătorii fiecărei găuri precum și valorile medii pentru forțele și momentele măsurate. În Figura 3.16.b este prezentat desenul de execuție al epruvetei realizate.

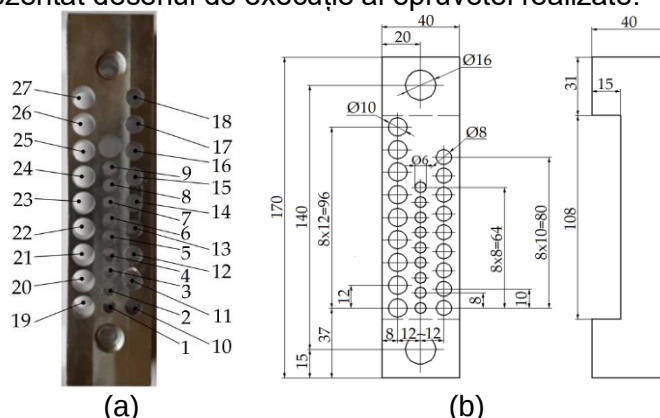


Figura 3.16. Fotografia și desenul epruvetei folosite [30]

Tabelul 3.6. Structura programului de experimentări

Nr. crt.	t [mm]	s [mm/rot.]	v_c [m/min.]	F_z [N]	M_z [N·m]
1.	3	0,1	50	180,47	0,71
2.	3	0,25	50	436,2	1,18
3.	3	0,4	50	690,35	1,86
4.	3	0,1	60	187,51	0,58
5.	3	0,25	60	444,28	1,2
6.	3	0,4	60	704,86	1,85
7.	3	0,1	70	191,19	0,6
8.	3	0,25	70	462,28	1,27
9.	3	0,4	70	700,69	1,88
10.	4	0,1	50	404,73	1,44
11.	4	0,25	50	819,25	2,42
12.	4	0,4	50	1.235,76	3,86
13.	4	0,1	60	419,72	1,22
14.	4	0,25	60	849,16	2,43
15.	4	0,4	60	1.236,58	3,62
16.	4	0,1	70	423,93	1,23
17.	4	0,25	70	851,75	2,56
18.	4	0,4	70	1.227,1	3,66
19.	5	0,1	50	349,67	1,85
20.	5	0,25	50	688,92	3,25
21.	5	0,4	50	1.064,77	4,97
22.	5	0,1	60	349,9	1,54
23.	5	0,25	60	717,74	3,76
24.	5	0,4	60	1.073,97	5,01
25.	5	0,1	70	352,24	1,61
26.	5	0,25	70	735,42	3,32
27.	5	0,4	70	1.090,48	5,87

Pentru interpretarea statistică a rezultatelor obținute experimental, s-a plecat de la planificarea experimentelor prin metoda planurilor ortogonale fracționate (metoda Taguchi), cu scopul de a studia relațiile, care apar între variabilele de intrare (diametrul burghiului, viteza de așchiere și avansul de lucru) și cele de ieșire (forța axială, F_z și momentul de torsiune, M_z), cu ajutorul unor funcții matematice [31]. În acest sens, pentru analiza datelor s-au folosit funcțiile specifice din Matlab.

Scopul final este de a stabili un nivel optim pentru fiecare parametru de intrare, care să conducă la o minimizare a mărimii forței axiale, respectiv, a momentului de torsiune la burghiere, precum și modul în care se manifestă influențele dintre parametri.

În Tabelele 3.7 și 3.8, se prezintă nivelul optim al parametrilor procesului de burghiere, pentru valorile medii ale forței F_z și momentului M_z , din care se extrage nivelul optim al parametrului ce corespunde valorii minime calculată pentru fiecare nivel al aceluși parametru.

Nivelul 1 corespunde adâncimii de așchiere de 3 mm, nivelul 2 adâncimii de 4 mm, iar nivelul 3 celei de 5 mm. În același sens, nivelurile 1, 2 și 3 corespund avansurilor 0,1; 0,25 și 0,4 mm/rot., respectiv vitezelor de așchiere de 50; 60 și 70 m/min.

Tabelul 3.7. Nivelul optim al parametrilor pentru valorile medii ale forței F_z [N]

Nivel	t [mm]	s [mm/rot.]	v_c [m/min.]
1	444,20	317,71	652,23
2	829,78	667,22	664,86
3	713,68	1.002,73	670,56
Delta	385,57	685,02	18,33
Rang	2	1	3

Tabelul 3.8. Nivelul optim al parametrilor pentru valorile medii ale momentului M_z [N·m]

Nivel	t [mm]	s [mm/rot.]	v_c [m/min.]
1	1,24	1,20	2,39
2	2,49	2,38	2,36
3	3,46	3,62	2,44
Delta	1,26	2,42	0,09
Rang	2	1	3

Se observă că, în cazul forței F_z , pentru a obține cele mai mici valori pentru acestea, combinația optimă de prelucrare presupune utilizarea unei adâncimi de așchiere minime, un avans de 0,1 mm/rot. și o viteză de așchiere maximă.

În cazul momentului, combinația optimă de prelucrare presupune adâncime de așchiere de 3 mm, avans de 0,1 mm/rot. și viteză de așchiere de 60 m/min.

Pentru determinarea influenței parametrilor din procesul de burghiere și al interacțiunilor relevante, în cazul analizei forței F_z și a momentului M_z , se analizează valoarea ponderii, $P\%$, din Tabelele 3.9 și 3.10.

Tabelul 3.9. Influența parametrilor regimului de așchiere asupra valorilor medii ale forței F_z [N]

Sursă	Sumă pătratică	d.f.	Media pătratică	F	$P > F$
s	$2,11 \times 10^6$	2	$1,05 \times 10^6$	281,81	0
t	$7,04 \times 10^5$	2	$3,52 \times 10^5$	93,98	0
v	$1,58 \times 10^3$	2	791,8	0,21	0,81
Eroare	$7,49 \times 10^4$	20	$3,74 \times 10^3$		
Total	$2,89 \times 10^6$	26			

Tabelul 3.10. Influența parametrilor regimului de așchiere asupra valorilor medii ale momentului M_z [N·m]

Sursă	Sumă pătratică	d.f.	Media pătratică	F	$P > F$
s	26,38	2	13,19	52,36	0
t	22,46	2	11,23	44,57	0
v	0,03	2	0,02	0,07	0,93
Eroare	5,04	20	0,25		
Total	53,91	26			

Dintre cele 27 de determinări, 25 au fost păstrate pentru antrenarea rețelei neuronale și 2 au fost păstrate pentru verificarea corectitudinii rezultatelor antrenării.

În Tabelul 3.11 sunt prezentate valorile medii măsurate, valorile calculate pe baza diverselor modele precum și erorile relative obținute, pentru două dintre cazurile analizate, respectiv $s = 0,25$ mm/rot., $v_c = 60$ m/min., $t = 3$ mm (Caz 1) și $s = 0,1$ mm/rot., $v_c = 50$ m/min., $t = 5$ mm (Caz 2).

Tabelul 3.11. Valorile măsurate, calculate și erorile relative

Caz 1	Fz [N]	Eroarea [%]	Mt [N·m]	Eroarea [%]
Măsurat	444,28	–	1,198	–
Model 1	512,30	-15,31	1,30	-8,70
Model 2	1.392,72	-213,48	6,70	-263,44
Model 3	756,21	-70,21	1,50	-25,14
Caz 2	Fz [N]	Eroarea [%]	Mt [N·m]	Eroarea [%]
Măsurat	349,67	–	1,854	–
Model 1	401,11	-14,71	1,66	-10,56
Model 2	1.270,84	-459,37	7,39	-298,57
Model 3	369,28	-5,61	1,63	12,16

Ca indicator al preciziei a fost calculată eroarea relativă, folosind ecuația (3.9):

$$Eroarea = \frac{V_m - V_p}{V_m} \cdot 100 [\%] \quad (3.9)$$

În ecuația (3.9) V_m reprezintă valoarea măsurată, iar V_p valoarea calculată corespunzătoare fiecăruia dintre cele trei modele și două cazuri.

Se propune utilizarea unei rețele neuronale pentru modelare, deoarece acest tip de abordare poate oferi rezultate mult mai exacte în cazul problemelor cu grad ridicat de complexitate.

Rețeaua neuronală a fost antrenată folosind 70% dintre seturile de date, respectiv 17 seturi, alese în mod aleatoriu. Acestea sunt datele folosite pentru optimizarea rețelei.

În Figura 3.17 este prezentată histograma erorilor pentru 20 de intervale de frecvență. Este vizibil faptul că majoritatea erorilor se situează în jurul valorilor de $-11,31 \div 9,941$, ceea ce reprezintă o valoare destul de mică.

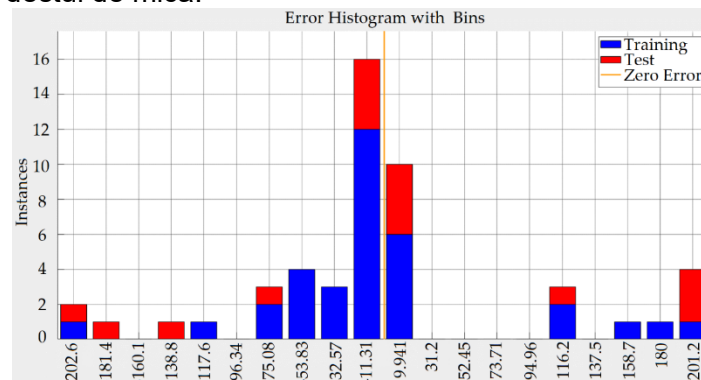


Figura 3.17. Histograma erorilor [30]

Datele efective sunt reprezentate în figură prin simboluri circulare, iar funcția de regresie prin linii, linia de culoare albastră corespunzând datelor de antrenare, iar cea de culoare roșie datelor de testare.

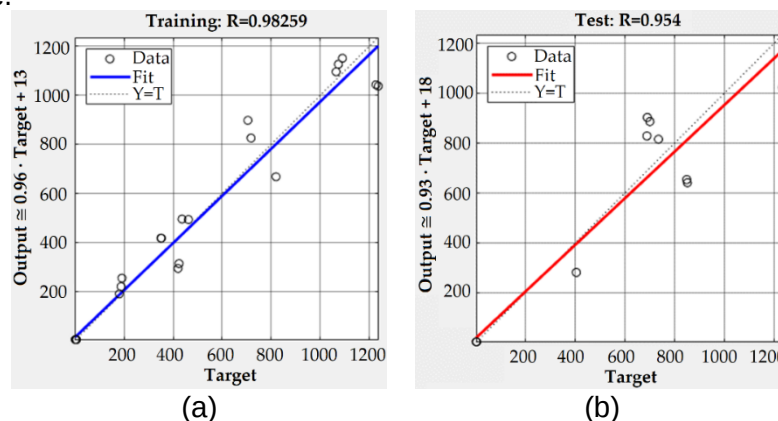


Figura 3.18. Reprezentarea regresiei pentru seturile de date: (a) de antrenare; (b) de testare [30]

După antrenarea rețelei neuronale, aceasta a fost interogată furnizând ca date de intrare cele două seturi de parametri păstrați în acest scop, adică $s = 0,25$ mm/rot., $v_c = 60$ m/min., $t = 3$ mm, respectiv $s = 0,1$ mm/rot., $v_c = 50$ m/min., $t = 5$ mm. Rezultatele returnate de rețea au fost comparate cu valorile măsurate pe dinamometrul Kistler tip 9257B.

În Figura 3.19 este prezentată histograma erorilor tot pentru 20 de intervale de frecvență, erorile fiind concentrate în jurul valorii zero, marcate de linia portocalie care reprezintă Zero Error.

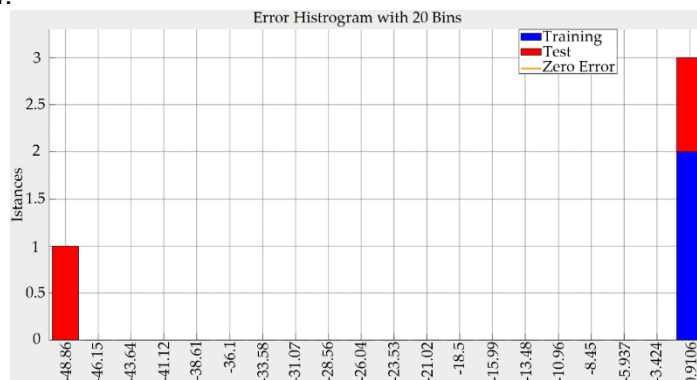


Figura 3.19. Histograma erorilor la interogarea rețelei [30]

Pentru a obține o caracterizare numerică a preciziei de predicție furnizată de rețeaua neuronală, datele obținute prin interogare au fost comparate cu cele măsurate de dispozitivul Kistler tip 9257B.

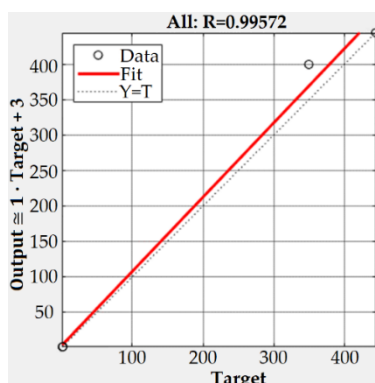


Figura 3.20. Funcția de regresie la interogarea rețelei [30]

Ca indicator al preciziei a fost calculată eroarea relativă. Valorile corespunzătoare celor 4 parametri de ieșire sunt prezentate în Tabelul 3.12.

Tabelul 3.12. Valorile măsurate, prezise și erorile relative

Mărimea	Măsurat	Prezis	Eroarea relativă [%]
F_{Z1} [N]	444,28	487,52	-9,73
F_{Z2} [N]	349,67	333,90	3,07
M_{t1} [N·m]	1,198	1,200	-0,16
M_{t2} [N·m]	1,854	1,769	4,59

Se poate remarca faptul că erorile sunt sub 10%, ceea ce este acceptabil pentru diferențe între datele măsurate și cele obținute pe cale experimentală.

Din analiza datelor măsurate reiese faptul că viteza de așchiere are o influență redusă asupra forțelor axiale și a momentelor de torsiune. Influența parametrilor regimului de așchiere asupra forțelor axiale este prezentată în Figura 3.21.

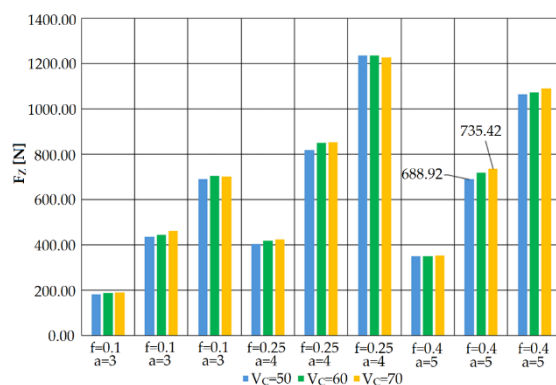


Figura 3.21. Variația forței axiale în funcție de valoarea avansului, s [mm/rot.] și adâncimii de așchiere, t [mm] [30]

În Figura 3.22 este evidențiată influența parametrilor regimului de așchiere asupra momentului de torsiune.

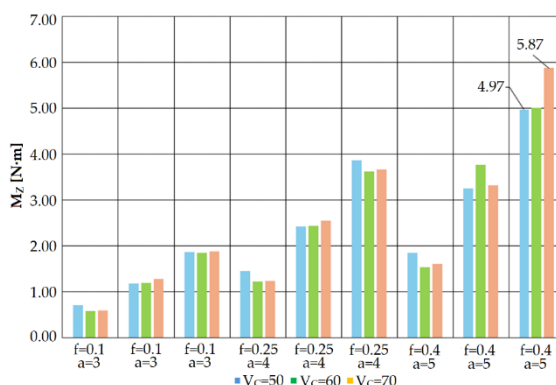


Figura 3.22. Variația momentului de torsiune în funcție de valoarea avansului, s [mm/rot.], adâncimii de așchiere, t [mm] și a vitezei de așchiere, v [m/min.] [30]

Practic, o variație a vitezei de așchiere de la 50 m/min. la 70 m/min., deci de aproximativ 28% duce la o variație a forței axiale de aproximativ 6% (de la 735,4 N la 688,9 N) și o variație a momentului de aproximativ 15% (de la 4,96 N·m la 5,87 N·m).

În concluzie, acest studiu demonstrează importanța utilizării metodelor avansate de modelare, precum rețelele neuronale, în optimizarea proceselor de așchiere și în îmbunătățirea acurateții predicțiilor forțelor și momentelor de torsiune în prelucrarea materialelor complexe.

3.4. Studiu experimental asupra influenței parametrilor de frezare asupra forței de așchiere a duraluminiului 2024-T351

Prezintă un experiment asupra modului în care parametrii principali ai procesului de frezare, respectiv viteza de așchiere, avansul pe dinte și adâncimea de așchiere, influențează valoarea forței medii de așchiere în prelucrarea aliajului de aluminiu 2024-T351. Studiul demonstrează că avansul pe dinte are cea mai mare influență asupra forței de așchiere, urmat de adâncimea de așchiere, în timp ce viteza de așchiere influențează forța într-un mod mai complex, prin efectele sale asupra temperaturii din zona de așchiere și asupra mecanismelor de formare a așchiilor.

În acest studiu, a fost calculată forța medie de așchiere pe dinte la frezare, pornind de la forța specifică de așchiere determinată experimental. Compararea rezultatelor obținute prin calcul cu cele experimentale a permis identificarea unor coeficienți de corecție, esențiali pentru îmbunătățirea preciziei modelării procesului de așchiere. Aceste informații contribuie la dezvoltarea unor metode mai eficiente de prelucrare, având un impact direct asupra calității produselor finite și asupra costurilor de producție.

Utilizarea pendulului Oxford-Airey presupune determinarea diferenței între înălțimea la care se ridică pendulul după detașarea unei așchii cu grosime a și, respectiv, înălțimea la care se ridică pendulul atunci când nu detașează așchie [32]. Ecuația utilizată este [32]:

$$k_c = \frac{G \cdot L \cdot (\sin \alpha - \sin \alpha_0)}{a \cdot b \cdot l} [N] \quad (3.10)$$

Au fost făcute determinări pentru grosimi de aşchie între 0,02 şi 0,6 mm, cu raţie de 0,02 mm. Rezultatele determinărilor sunt prezentate în Tabelul 3.13.

Tabelul 3.13. Rezultatele măsurătorilor unghiurilor de revenire corespunzătoare grosimii aşchiei

t [mm]	α_1 [°]	α_2 [°]	α_3 [°]	α_{med} [°]	k_c [N]
0,02	20	20	22	22,667	20670,66
0,04	22	22	22	22,000	9912,65
0,06	17	17	17	17,000	7677,49
0,08	15	15	15	15,000	6085,25
0,10	15	15	14	14,667	4912,07
0,20	13	14	15	14,000	2500,00
0,30	11	11	9	10,333	1829,29
0,40	7	7	9	7,667	1461,60
0,60	1	1	1	1,000	1277,63

Pe baza acestor valori a fost identificată legea de variaţie a forţei specifice de aşchiere în funcţie de grosimea aşchiei, prin determinarea parametrilor săi. În acest scop a fost utilizat toolbox-ul „curve fitting” din programul Matlab, alegând ca forma generală o dependenţă de tip hiperboloidal [18]:

$$k_c = \frac{k_{C1,1}}{a^z} [N] \quad (3.11)$$

Rezultatele furnizate de programul Matlab în cazul aproximării valorilor prezentate în Tabelul 3.16 sunt: $k_{C1,1} = 651,9 \text{ N}$ şi $z = 0,87$.

Reprezentarea grafică a funcţiei de aproximare este prezentată în Figura 3.23, iar parametrii reflectând calitatea aproximării sunt: $R\text{-square} = 0,9966$, $RMSE = 1132$.

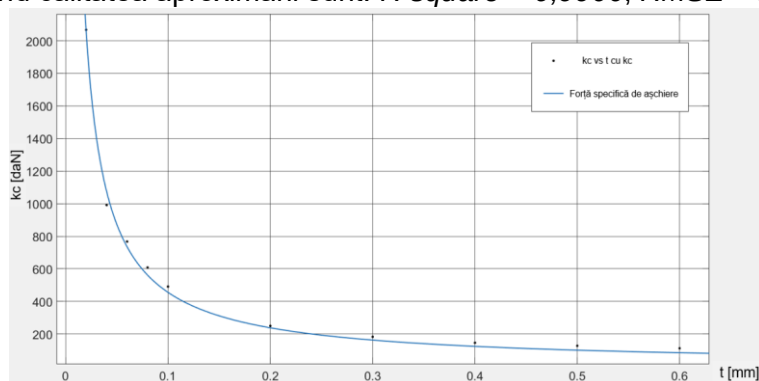


Figura 3.23. Dependenţa k_c în funcţie de adâncimea de aşchiere t [33]

Pentru a putea verifica rezultatele experimentale obţinute cu pendulul Oxford-Airey s-a realizat măsurarea forţelor de aşchiere la frezarea unui eşantion de duraluminu tip 2024-T351. Măsurarea a fost realizată cu dinamometrul Kistler tip 9257B, iar înregistrarea valorilor cu programul DynoWare furnizat odată cu dinamometrul.

Pentru a putea verifica influenţa parametrilor regimului de aşchiere asupra forţelor apărute s-au făcut măsurători cu trei valori ale avansului pe dinte, s_d , respectiv 0,2, 0,1 şi 0,05 mm, şi trei valori ale vitezei de aşchiere, v_c 700, 550 şi 400 m/min. Adâncimea de aşchiere a fost de 3 mm şi lăţimea de contact 3 mm. Aceşti parametri nu au fost modificaţi deoarece influenţa lor este destul de intuitivă, în sensul că odată cu creşterea lor este de aşteptat să crească şi forţa de aşchiere. Pentru prelucrare s-a utilizat o freză cilindrică cu 5 dinţi şi diametrul de 50 de mm. Aceste dimensiuni au permis ca un singur dinte să fie în aşchiere la un moment dat, lucru care a simplificat identificarea modului în care variază forţa de aşchiere odată cu grosimea aşchiei. Pentru fiecare dintre cele nouă combinaţii ale avansului şi vitezei de aşchiere au fost măsurate forţele pe direcţiile X şi Y, Figura 3.24.

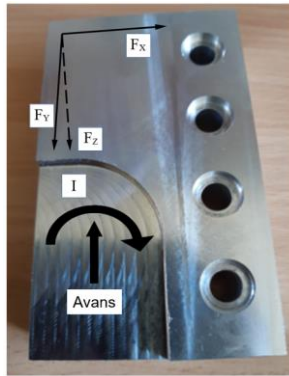


Figura 3.24. Epruveta prelucrată și direcțiile de măsurare a forțelor [33]

Măsurătorile au fost realizate cu o frecvență de 2500 Hz. și din șirul de date obținut a fost selectată zona în care s-au stabilizat forțele de așchiere, prezentate în Figura 3.25. (a) și (b).

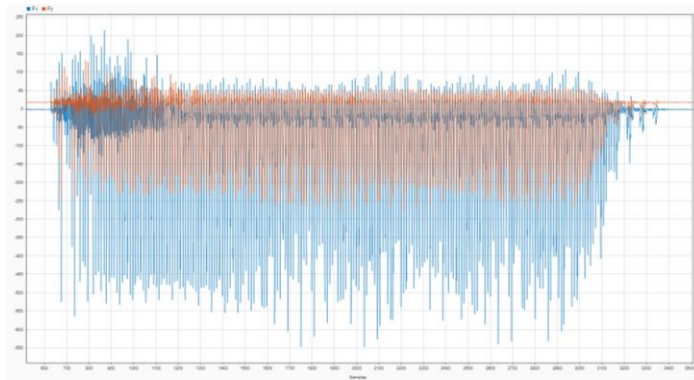


Figura 3.25. (a) Totalitatea valorilor forțelor Fx și Fy măsurate [33]

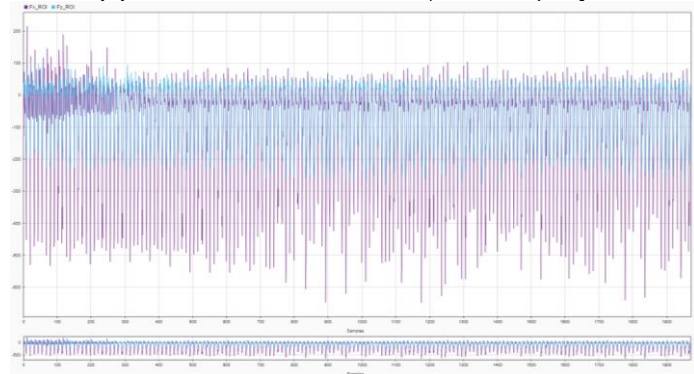


Figura 3.25. (b) Selectarea zonei stabilizate [33]

În continuare s-a lucrat numai cu șirul de valori stabilizate. A fost calculată forța tangențială pe dinte utilizând formula:

$$F_T = \sqrt{F_X^2 + F_Y^2} [N] \quad (3.12)$$

Pentru a calcul forța medie principală pe tăiș au fost identificate maximele locale ale forței tangențiale, utilizând comanda „findpeaks” din programul Matlab și, între două maxime locale a fost calculată valoarea medie, cu ajutorul unei aplicații dedicate, concepută în MatLab. Ulterior, s-a calculat valoarea medie a acestor medii fiind identificată valoarea forței medii pe tăiș.

Valorile calculate, corespunzătoare diverselor combinații ale parametrilor regimului de așchiere sunt prezentate în Tabelul 3.14.

Tabelul 3.14. Forța medie pe tăiș corespunzătoare parametrilor regimului de așchiere

Nr. crt.	v_c [m/min]	s_d [mm]	F_C [N]
1	400	0,2	149,25
2	400	0,1	120,98
3	400	0,05	85,27
4	550	0,2	172,33
5	550	0,1	131,51
6	550	0,05	99,04
7	700	0,2	203,87
8	700	0,1	152,58
9	700	0,05	114,9

Rezultatele experimentale au fost comparate cu cele calculate corespunzător forței specifice de așchiere determinate. Pentru aceasta se calculează: unghiul de contact, grosimea medie a așchiei și coeficienții de corecție corespunzători situației concrete în care se desfășoară procesul.

Unghiul de contact se calculează cu formula:

$$\varphi_S = \arccos\left(\frac{D-2 \cdot a_e}{D}\right) \quad (3.13)$$

$D = 50$ mm fiind diametrul frezei și $t = 3$ mm (unde t se regăsește ca a_e în formulele de calcul) adâncimea de așchiere. Pentru valorile menționate se obține un unghi de contact de $28,36^\circ$.

Grosimea medie a așchiei este dată de:

$$h_m = \frac{360^\circ}{\pi \cdot \varphi_S} \cdot \frac{a_e}{D} \cdot f_z \quad (3.14)$$

Pentru cele trei valori ale avansului se obțin valorile forței medii de așchiere utilizând ecuația:

$$F_C = a_e \cdot h_m^{1-Z} \cdot k_{C1,1} \cdot K_W \cdot K_Y [N] \quad (3.15)$$

unde K_W este coeficient de corecție pentru uzura sculei, care ales egal cu 1,1 având în vedere gradul redus de uzură al sculei, iar K_Y este coeficient de corecție în funcție de unghiul de degajare. Ecuația de calcul pentru K_Y este:

$$K_Y = 1 - \frac{\gamma_a - \gamma_0}{100} \quad (3.16)$$

γ_a fiind unghiul de degajare efectiv al sculei folosite, care în acest caz a fost de 9° , iar γ_0 este unghiul de degajare recomandat pentru așchiera materialului respectiv, pentru aluminiu fiind de 20° . Cu aceste valori se obține un coeficient de corecție $K_Y = 1,1$.

Valorile forței medii calculate analitic și cele măsurate sunt prezentate în Tabelul 3.15.

Tabelul 3.15. Forța medie pe tăiș măsurată (F_{CM}), respectiv calculată (F_{CC})

Nr. crt.	v_c [m/min]	s_d [mm]	F_C [N]	F_{CM_med} [N]	F_{CC} [N]
1	400	0,2	149,25	175,15	159,67
2	550	0,2	172,33		
3	700	0,2	203,87		
4	400	0,1	120,98	135,02	145,91
5	550	0,1	131,51		
6	700	0,1	152,58		
7	400	0,05	85,27	99,74	133,34
8	550	0,05	99,04		
9	700	0,05	114,90		

În Figura 3.26 este prezentată variația forței de așchiere medie în funcție de valoarea avansului, pentru cele 3 viteze de așchiere considerate, iar în Figura 3.27 este prezentată variația forței de așchiere medie în funcție de viteza de așchiere pentru diverse valori ale avansului pe dinte.

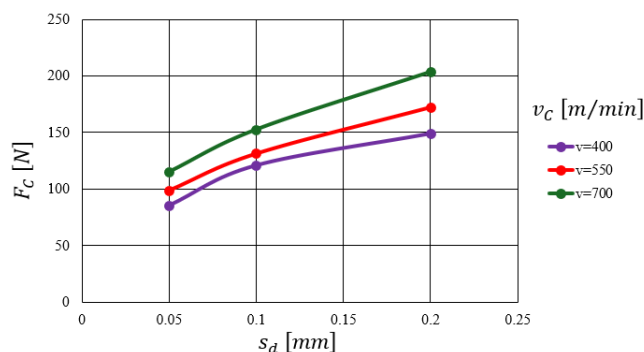


Figura 3.26. Variația forței medii de așchiere în funcție de avans pentru diverse viteze de așchiere [33]

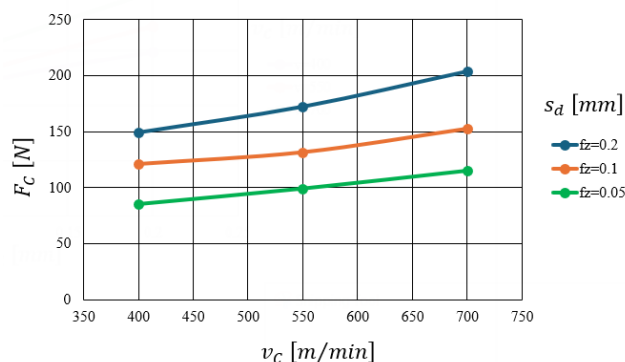


Figura 3.27. Variația forței medii de așchiere în funcție de viteza de așchiere pentru diverse valori ale avansului pe dinte [33]

În concluzie, în acest studiu a fost determinată forța specifică de așchiere la prelucrarea aliajului duraluminiu de tip 2024-T351. Determinarea forței specifice a fost realizată utilizând un pendul Oxford-Airey, iar rezultatele au fost comparate cu valorile măsurate pentru forța medie pe tăișul principal al dintelui la frezare. În scopul comparării valorilor au fost determinate utilizând un dinamometru Kistler tip 9257B, iar înregistrarea valorilor s-a făcut cu programul DynoWare furnizat odată cu dinamometrul. Rezultatele au evidențiat variația forței odată cu modificarea avansului pe dinte și a vitezei de așchiere.

3.5. Concluzii

Capitolul 3 prezintă analiza comportamentului forțelor axiale și al momentelor de torsiune în găurirea aliajelor de aluminiu, evidențiind rolul acestora în stabilitatea procesului, durabilitatea sculei și calitatea suprafeței.

Rezultatele pentru aliajul 2024-T351 arată că avansul și adâncimea de așchiere influențează semnificativ forța axială, în timp ce viteza de așchiere are efect redus. Creșterea avansului și reducerea adâncimii determină creșterea dispersiei forței, fiind necesar un compromis între uniformitate și productivitate. Regimurile optime sunt stabilite prin analiză statistică.

Determinarea momentului de torsiune și a forței specifice unitare, inclusiv pentru aliaje cu așchiabilitate redusă, permite modelarea energetică a procesului. Utilizarea rețelelor neuronale asigură predicții precise ale solicitărilor mecanice și optimizează parametrii de așchiere.

În frezare, forța medie este influențată în principal de avansul pe dinte, urmat de adâncimea de așchiere, în timp ce viteza produce efecte termomecanice. Analiza combinată energetică, dinamometrică și statistică permite determinarea coeficienților de corecție și optimizarea regimurilor.

Capitolul evidențiază interdependența parametrilor de așchiere cu forțele și momentele generate și oferă un cadru experimental și de modelare pentru optimizarea proceselor de prelucrare.

Capitolul 4. Contribuții experimentale asupra studiului rugozității suprafețelor la prelucrarea prin aşchiere a aliajelor de aluminiu

Capitolul 4 analizează parametrii experimentali și modelele predictive pentru rugozitatea suprafețelor obținute prin prelucrare prin aşchiere a aliajelor de aluminiu, vizând identificarea parametrilor de regim cu impact major asupra R_a , R_q și R_z , efectele compoziției asupra depunerilor pe sculă și strategii de optimizare a regimului pentru echilibru între calitate și productivitate.

Două studii complementare au fost incluse: primul pentru AlMgSi0,5 (EN-AW-6060 T6), evidențiind că viteza de aşchiere influențează cel mai puternic rugozitatea și că depunerile pe tăiș cresc cu conținutul de siliciu; datele au fost analizate prin rețele neuronale pentru captarea relațiilor nonliniare. Al doilea studiu, pentru duraluminiu 2024-T351, a folosit freze cilindro-frontale Ø10 mm acoperite AlTiCrN și a demonstrat prin analiză statistică că avansul pe dinte contribuie 38,67%, iar viteza 27,44% la variabilitatea rugozității.

Metodologia comună asigură validitate și robustețe: planuri experimentale, repetabilitate, achiziție precisă, preprocesare și analiză statistică, cu validarea modelelor predictive prin comparație cu măsurători experimentale. Rezultatele permit corelarea rugozității cu parametrii energetici din Capitolul 3, evidențiind legături fizice între solicitările procesului și calitatea suprafeței.

Sinergia celor două studii oferă criterii practice pentru selectarea regimului de aşchiere în funcție de tipul aliajului, confirmă utilitatea metodelor statistice și a rețelelor neuronale în predicția rugozității și susține optimizarea regimurilor integrate în CAM-CNC, furnizând recomandări aplicabile industriei prelucrării aluminiului.

4.1. Studiu experimental și modelare neuronală a rugozității la frezarea aliajelor de aluminiu

Analiza evidențiază calitatea suprafeței prelucrate prin aşchiere depinde de două aspecte principale: precizia dimensională și rugozitatea. În cazul aliajelor de aluminiu, rugozitatea crește odată cu conținutul mai mare de siliciu, fenomen cauzat de depunerile formate pe muchia sculei. Aceasta explică numărul redus de studii dedicate prelucrării acestor materiale, deși importanța lor crește odată cu utilizarea extinsă a aliajelor de aluminiu.

Experimentul a urmărit evaluarea rugozității după frezarea unui aliaj de aluminiu, variind viteza de aşchiere și avansul pe dinte, cu adâncimea de aşchiere constantă și utilizând lichid de răcire. S-au realizat măsurători pentru șapte viteze și opt valori ale avansului, iar datele experimentale au fost utilizate pentru instruirea și interogarea unei rețele neuronale. Rezultatele au arătat că viteza de aşchiere exercită influența cea mai semnificativă asupra rugozității.

Importanța relativă pentru viteza de avans 38,67, iar pentru viteza de aşchiere este 27,44.

În acest studiu, se verifică rugozitatea obținută în urma procesului de frezare a unui aliaj de aluminiu AlMgSi0,5, în condițiile variației vitezei de aşchiere și a avansului pe dinte.

Pentru a putea determina parametrii cu ajutorul cărora se obține suprafața cu cea mai bună rugozitate prelucrată cu o freză cilindro-frontală din carbură folosind diverse valori de viteze de aşchiere și avans pe dinte, s-au măsurat valorile rugozității obținute în urma frezării a zece canale (Figura 4.1) cu o lățime egală cu diametrul frezei cilindro-frontale, aceasta având diametrul de Ø12 mm.

Material supus prelucrării este aliaj de aluminiu AlMgSi0,5 (EN-AW-6060 T6), acesta având o rezistență mecanică ridicată, o rezistență foarte bună la coroziune și este potrivit pentru anodizarea decorativă.

Pentru fiecare suprafață prelucrată valoarea rugozității s-a verificat prin efectuarea a trei măsurători.

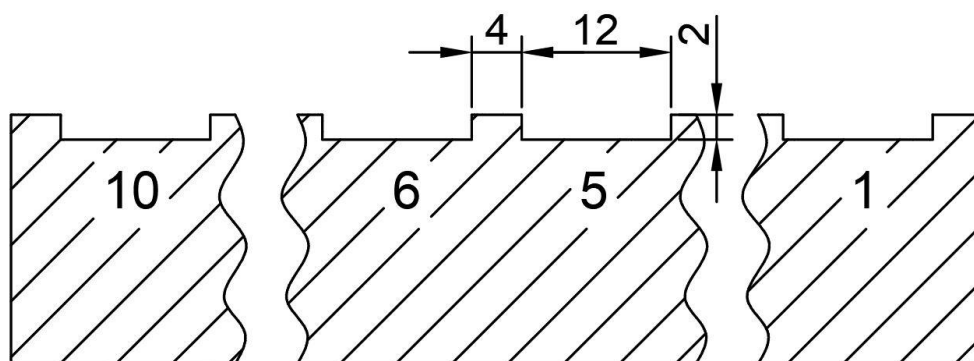


Figura 4.1. Profilul lateral rezultat în urma prelucrărilor [34]

Au fost realizate 10 prelucrări, folosind șapte viteze de așchiere și opt valori ale avansului pe dinte, menținând în același timp adâncimea de așchiere și folosind lichid de răcire. Combinațiile între acești parametri de așchiere sunt prezentate în Tabelul 4.1.

Tabelul 4.1. Parametri de prelucrare

Nr. suprafață	Viteza de așchiere v_c [m/min]	Turația n [rpm]	Avans pe dinte s_d [mm]	Viteza de avans s [mm/min]	Adâncimea de așchiere t [mm]
1.	180	4.775	0,05	955	2
2.	200	5.305	0,06	1.273	
3.	220	5.836	0,07	1.634	
4.	240	6.366	0,08	2.037	
5.	260	6.897	0,09	2.482	
6.	280	7.427	0,10	2.970	
7.	300	7.958	0,11	3.501	
8.	300	7.958	0,03	955	
9.	300	7.958	0,06	2.037	
10.	300	7.958	0,09	2.864	

Pentru fiecare suprafață au fost măsurate câte 3 rugozități cu ajutorul rugozimetrului Mitutoyo SJ-210. Cele trei măsurători au fost făcute astfel: Câte o măsurătoare în apropierea fiecărui capăt al suprafeței prelucrate și a treia măsurătoare a fost realizată pe mijlocul canalul frezat.

Figura 4.2 prezintă procesul de măsurare realizat cu rugozimetrul Mitutoyo SJ-210.



Figura 4.2. Procesul de măsurare [34]

Valorile obținute au fost centralizate în Tabelul 4.2.

Tabelul 4.2. Rugozitatea suprafețelor măsurate

Cod suprafața & Nr. măsurătoare	Înălțimea mediei aritmetice Ra [μm]	Rugozitatea mediei pătratice Rq [μm]	Înălțimea celor zece puncte Rz [μm]
A2_1_01	0,389	0,496	2,518
A2_1_02	0,591	0,699	2,584
A2_1_03	0,522	0,595	2,280
A2_2_01	0,388	0,536	2,565
A2_2_02	0,667	0,820	3,387
A2_2_03	0,528	0,636	2,460
A2_3_01	0,850	1,021	4,113
A2_3_02	0,775	0,875	2,997
A2_3_03	0,613	0,748	3,145
A2_4_01	0,709	0,894	3,618
A2_4_02	0,768	0,902	3,578
A2_4_03	0,778	0,974	3,802
A2_5_01	0,785	0,994	3,854
A2_5_02	0,983	1,212	4,809
A2_5_03	0,832	1,026	4,083
A2_6_01	0,966	1,147	4,015
A2_6_02	1,006	1,170	4,280
A2_6_03	0,657	0,825	3,052
A2_7_01	0,849	1,062	4,558
A2_7_02	0,770	0,912	3,681
A2_7_03	0,776	0,953	3,750
A2_8_01	0,276	0,327	1,441
A2_8_02	0,308	0,345	1,300
A2_8_03	0,303	0,367	1,484
A2_9_01	0,613	0,750	3,164
A2_9_02	0,777	0,942	3,544
A2_9_03	0,624	0,754	3,069
A2_10_01	0,823	1,036	4,176
A2_10_02	0,956	1,118	4,152
A2_10_03	0,798	0,980	4,019

În legătură cu noțiunea de rugozitate se poate defini curba de portanță care descrie suprafața unei piese din punct de vedere al texturii acestei suprafețe. Această caracteristică permite estimarea proprietăților de etanșare și de portanță ale suprafeței.

Curba BAC oferă informații despre cât de rezistentă poate fi suprafața, cât de bine poate reține lubrifiantul și cât de bine poate rezista la uzură.

Cu cât zona curbei este mai apropiată de axa orizontală și mai întinsă, cu atât se poate estima că suprafața este mai netedă.

Conform acestui principiu, în Figura 4.3 se compară profilul raportului de material dintre a 8-a (A2_8_03) și a 10-a (A2_10_03) fantă prelucrată (pentru a treia lor măsurătoare), iar rezultatele arată clar că textura obținută pentru situația A2_10_03, prezentată în Figura 4.3.b), are o suprafață reală de contact mai mare decât cea din Figura 4.3.a).

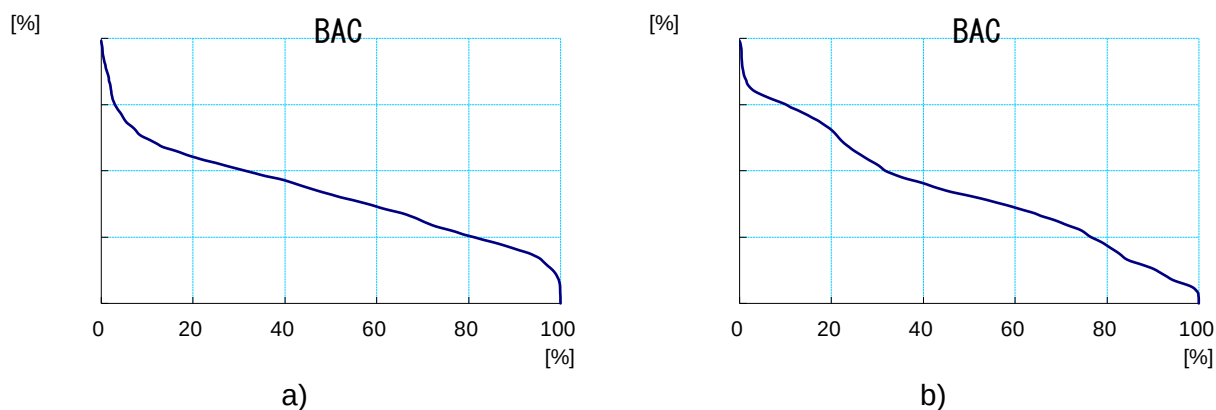


Figura 4.3. Comparația BAC între a 8-a (a) și a 10-a (b) fantă prelucrată [34]

În concluzie acest studiu indică faptul că influența principală în vederea prelucrărilor prin așchiere a aliajelor de aluminiu de tipul $AlMgSi0,5$ este viteza de așchiere. Influența vitezei de așchiere se manifestă și în cazul apariției tăișului de depunere.

Experimentele efectuate au evidențiat faptul că operația de prelucrare a fost dificilă, la viteze mici de așchiere, din cauza formării tăișului de depunere.

Datorită procentului ridicat de siliciu din compoziția chimică al acestui aliaj de aluminiu și în lipsa lichidului de răcire, materialul detașat s-a depus pe tăișul sculei.

În Figura 4.4 este prezentată acumularea de material care crează tăiș de depunere pe muchiile tăietoare ale frezei cilindro-frontale.

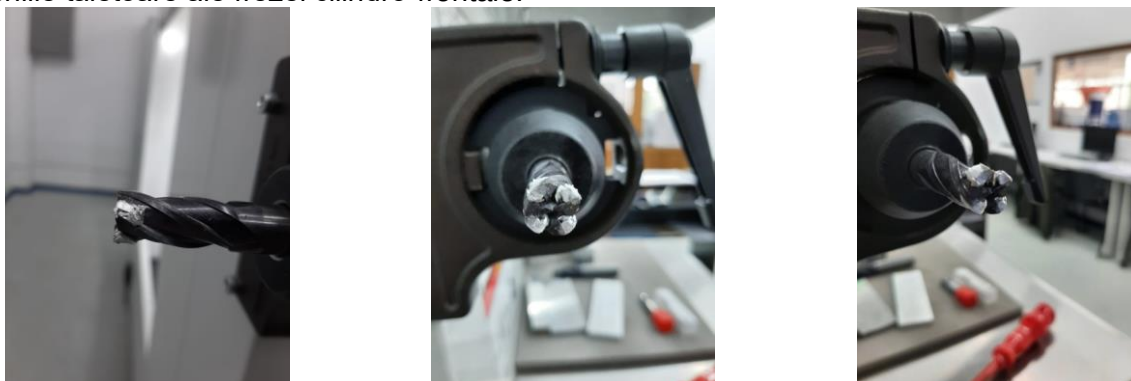


Figura 4.4. Depuneri pe tăiș [34]

În Figura 4.5 sunt prezentate suprafețele prelucrate care prezintă smulgeri de material, cauzate de sudarea acestuia pe suprafața sculei și formarea tăișului de depunere.

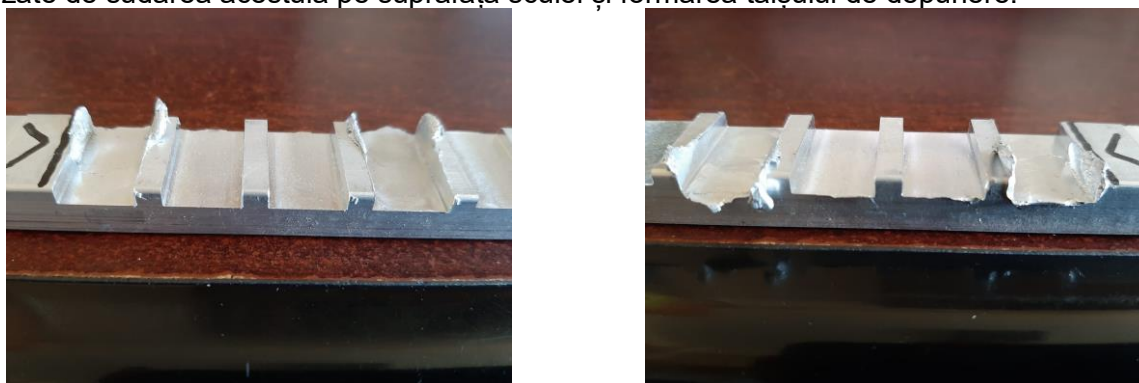


Figura 4.5. Suprafețe cu smulgeri de material [34]

În concluzie rezultatele obținute evidențiază rolul determinant al vitezei de așchiere asupra rugozității suprafeței pentru aliajul $AlMgSi0,5$, precum și influența negativă a depunerilor pe tăișul sculei asociate conținutului de siliciu. Metodologia experimentală aplicată, bazată pe frezare CNC, măsurători repetabile ale rugozității și modelare prin rețele neuronale, oferă un cadru solid pentru analizarea relațiilor complexe dintre parametrii de regim și calitatea suprafeței. Aceste observații justifică extinderea investigației către un aliaj cu relevanță industrială ridicată, respectiv duraluminiul 2024-T351 și către o abordare complementară, centrată pe cuantificarea statistică a influenței parametrilor de așchiere.

4.2. Studiu asupra influenței parametrilor de regim asupra calității suprafeței în prelucrarea duraluminiului 2024-T351

Calitatea suprafeței prelucrate este un indicator important al succesului acestui proces. În acest context, rugozitatea suprafeței joacă un rol esențial, influențând performanța piesei prin caracteristici precum rezistența la oboseală, aderența straturilor de acoperire, rezistența la coroziune și rezistența la uzură a suprafețelor în contact [30].

Acest studiu dorește să identifice și să analizeze influența fiecărui parametru al regimului de așchiere asupra rugozității suprafeței obținute pentru duraluminiul 2024-T351. Înțelegerea acestor relații poate conduce la optimizarea procesului de prelucrare, asigurând atât eficiență, cât și un nivel înalt de calitate a pieselor finite.

Au fost variați parametrii principali ai regimului de așchiere după cum urmează:

- Viteza de așchiere: 180; 215; 280 m/min.
- Avansul pe dinte: 0,05; 0,075; 0,1 mm.
- Lățimea de contact: 1; 2; 3 mm.

Prin variația acestor parametri s-au obținut 27 de seturi de valori cu care au fost prelucrate prin frezare 27 de canale. Pentru fiecare dintre aceste canale au fost măsurate rugozitățile, fiind luați în considerare parametrii R_a , R_q și R_z .

Pentru fiecare canal au fost făcute câte 3 determinări, un în zona corespunzătoare mijlocului lățimii canalului și două în apropierea celor două margini.

În cele ce urmează s-a considerat ca valoare a rugozității media celor trei valori obținute pentru fiecare canal.

În Figura 4.6 este prezentată epruveta fixată pe platoul dinamometrului.

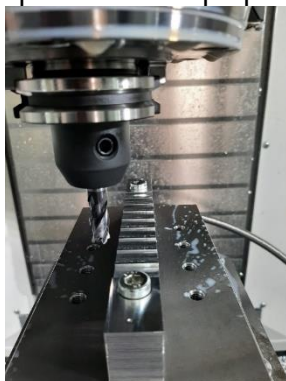


Figura 4.6. Fotografie piesă prelucrată și fixată pe masa dinamometrului multicomponent Kistler [35]

Pentru analiza statistică a datelor obținute s-a utilizat metoda analizei varianței (ANOVA).

După cum este cunoscut [17], ANOVA este o metodă statistică utilizată pentru a compara media mai multor grupuri și a determina dacă există diferențe semnificative între ele.

Rezultatele măsurătorilor efectuate sunt prezentate în Tabelul 4.3.

Tabelul 4.3. Rugozitățile obținute

Nr. crt.	v [m/min]	s _d [mm/dinte]	t [mm]	R _a	R _q	R _z
1	180	0,05	1	0,835	0,979	3,834
2	180	0,075	1	0,963	1,160	4,858
3	180	0,1	1	1,005	1,204	5,030
4	215	0,05	1	0,772	0,927	3,680
5	215	0,075	1	0,914	1,093	4,093
6	215	0,1	1	0,981	1,177	4,920
7	250	0,05	1	0,829	0,986	3,714
8	250	0,075	1	0,967	1,139	4,184
9	250	0,1	1	1,102	1,319	5,250
10	180	0,05	2	0,881	1,087	4,808
11	180	0,075	2	1,141	1,304	4,791
12	180	0,1	2	1,081	1,286	5,296
13	215	0,05	2	1,015	1,217	5,089

14	215	0,075	2	1,061	1,269	4,875
15	215	0,1	2	1,122	1,388	5,880
16	250	0,05	2	1,031	1,279	5,561
17	250	0,075	2	1,208	1,472	6,128
18	250	0,1	2	1,383	1,666	6,758
19	180	0,05	3	0,990	1,173	4,869
20	180	0,075	3	1,200	1,378	5,180
21	180	0,1	3	1,117	1,303	5,176
22	215	0,05	3	1,168	1,428	5,922
23	215	0,075	3	1,173	1,414	5,744
24	215	0,1	3	1,282	1,566	6,670
25	250	0,05	3	1,120	1,354	5,801
26	250	0,075	3	1,315	1,578	6,290
27	250	0,1	3	1,554	1,865	7,325

În Figura 4.7 sunt prezentate rezultatele obținute în urma măsurării rugozității unuiia dintre canalele prelucrate (setul nr. 1).

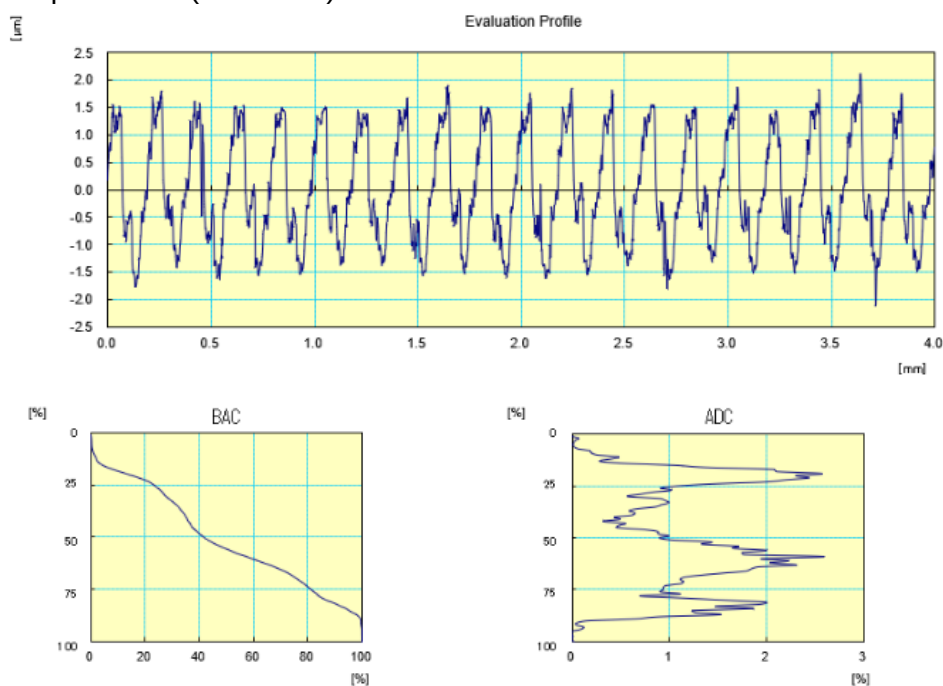


Figura 4.7. Evaluarea profilului, curba de portanță și frecvența de distribuție [35]

Pentru datele obținute s-a aplicat analiza multifactorială a varianței [36], în funcție de parametrii regimului de așchiere.

Rezultatele pentru cele trei criterii de rugozitate sunt prezentate în Tabelele 4.4, 4.5 și 4.6.

Tabelul 4.4. Rezultatele analizei ANOVA - criteriul Ra

Sursă	Sumă pătratică	d.f.	Media pătratică	F	p
ae	0,367	2	0,184	79,64	0
v	0,226	2	0,113	49,025	0
fz	0,103	2	0,052	22,456	0,0005
Eroare	0,113	8	0,002	—	—
Total	0,809	26	—	—	—

Tabelul 4.5. Rezultatele analizei ANOVA - criteriul Rq

Sursă	Sumă pătratică	d.f.	Media pătratică	F	p
ae	0,534	2	0,270	32,000	0
v	0,309	2	0,154	18,297	0
fz	0,183	2	0,091	10,835	0,0006
Eroare	0,169	20	0,008	–	–
Total	1,195	26	0	–	–

Tabelul 4.6. Rezultatele analizei ANOVA - criteriul Rz

Sursă	Sumă pătratică	d.f.	Media pătratică	F	p
ae	10,626	2	5,313	26,200	0
v	4,726	2	2,363	11,650	0,0004
fz	2,877	2	1,438	7,090	0,0047
Eroare	4,056	20	0,203	–	–
Total	22,285	26	–	–	–

Scopul acestui studiu a fost de a determina dacă parametrii procesului de prelucrare influențează rugozitatea obținută. Înțelegerea relațiilor dintre acești parametri poate conduce la optimizarea procesului de prelucrare, asigurând atât eficiență, cât și un nivel ridicat de calitate al pieselor prelucrate.

După cum se observă, probabilitatea este mai mică de 0,05 pentru toate cele trei variabile independente în fiecare dintre cele trei tabele. Se poate concluziona că fiecare dintre parametrii de aşchiere are o influență semnificativă asupra oricăruia dintre cele trei criterii de rugozitate analizate.

4.3. Concluzii

Capitolul 4 prezintă o analiză integrată a factorilor care influențează rugozitatea suprafețelor obținute prin prelucrarea mecanică a aliajelor pe bază de aluminiu, evidențiind relația dintre parametrii de aşchiere și indicatorii de calitate. Rezultatele arată că variabilele dominante sunt viteza de aşchiere și avansul pe dinte, iar adâncimea de aşchiere are o influență secundară, efectele fiind dependente de tipul aliajului și de condițiile de prelucrare.

Pentru aliajul AlMgSi0,5, viteza de aşchiere are influența principală asupra rugozității, iar creșterea conținutului de siliciu favorizează depunerile pe muchia sculei, cu efect negativ asupra calității suprafeței. Modelarea prin rețele neuronale a permis descrierea relațiilor neliniare dintre parametrii regimului și indicatorii de rugozitate, oferind un instrument predictiv pentru optimizarea procesului.

În cazul duraluminiului 2024-T351, s-a evidențiat influența semnificativă a vitezei de aşchiere, avansului și lățimii de contact asupra parametrilor Ra, Rq și Rz, fiind necesară o analiză statistică riguroasă a interdependențelor. Aplicarea analizei varianței a confirmat semnificația acestor factori și necesitatea ajustării lor pentru obținerea unui compromis optim între calitatea suprafeței, durabilitatea sculei și productivitate.

Corelarea rezultatelor privind rugozitatea cu cele referitoare la forțele și momentele de aşchiere evidențiază legătura dintre solicitările mecanice și calitatea suprafeței, permițând formularea unor recomandări pentru optimizarea regimurilor CAM-CNC. Curbele Abbott-Firestone completează analiza prin evaluarea contactului real al suprafeței, a capacității de reținere a lubrifiantului și a rezistenței la uzură.

În concluzie, rugozitatea suprafețelor prelucrate prin aşchiere este determinată de interacțiunea dintre viteza de aşchiere, avansul pe dinte și proprietățile materialului. Utilizarea combinată a metodelor experimentale, analizei statistice și modelelor de învățare automată permite identificarea regimurilor optime, asigurând echilibrul între calitate, durabilitatea sculei și productivitate, cu aplicabilitate practică.

Capitolul 5. Metoda punctelor virtuale de contact pentru generarea suprafețelor elicoidale

Capitolul 5 prezintă metoda punctelor virtuale de contact pentru generarea suprafețelor elicoidale, integrând studii teoretice, numerice și aplicative pentru analiza înfășurării și profilarea sculelor generatoare. Obiectivul este formularea relațiilor geometrice și cinematice ale suprafețelor elicoidale și validarea metodei prin aplicații practice, cu relevanță în proiectarea și fabricarea sculelor așchietoare.

Metoda este aplicată pentru analiza compresoarelor cu melci conici, ale căror performanțe depind de geometria și corecta înfășurare a melcilor. Forma conică și axele dispuse sub un unghi specific permit comprimarea progresivă a fluidului, dar complică profilarea: profilurile melcilor sunt reciproc înfășurătoare, iar contactul corect în secțiunea axială comună este esențial pentru etanșarea camerelor și funcționarea stabilă.

Algoritmul propus determină profilul transversal al unui melc pornind de la forma celuilalt, prin identificarea pozițiilor de contact și verificarea corectitudinii geometrice prin analiza volumelor generate în mișcarea relativă. Astfel, metoda punctelor virtuale de contact demonstrează capacitatea de a susține modelarea teoretică și validarea practică a suprafețelor elicoidale complexe, cu aplicabilitate directă în compresoarele cu melci conici.

5.1. Analiza profilului rotorului din componența unui compresor elicoidal conic

Pentru profilarea unuia dintre elementele active ale compresorului elicoidal se pornește de la modelul numeric al elementului conjugat și de la observația că etanșarea între cele două elemente active se face prin contactul acestora într-un plan determinat de axele lor de rotație. Cele două elemente active sunt reprezentate de melcul interior, dispus în interiorul rotorului exterior, și melcul exterior, care îl cuprinde.

Sunt determinate liniile elicoidale conice care trec prin puncte de pe profilul transversal al unuia dintre elementele active și se determină coordonatele punctelor de intersecție între aceste linii elicoidale și planul de etanșare.

Elementele active ale compresorului elicoidal conic au un număr de lobi diferit. Dacă rotorul interior are Z lobi, rotorul exterior va avea $Z+1$ lobi. Fiecăruia dintre lobi îi corespunde un arc de unghi $\frac{2\pi}{Z}$ pe cercul de bază. Dacă se admite că raza cercului de bază este R_1 se poate calcula valoarea razei ruletei, r , necesară pentru ca aceasta să genereze un număr întreg de lobi atunci când parcurge toată lungimea cercului de bază. Ecuația rezultată este:

$$r = \frac{R_1}{2 \cdot Z} \quad (5.1)$$

În Figura 5.1 sunt prezentate sistemele de referință utilizate la generarea celor două centroide.

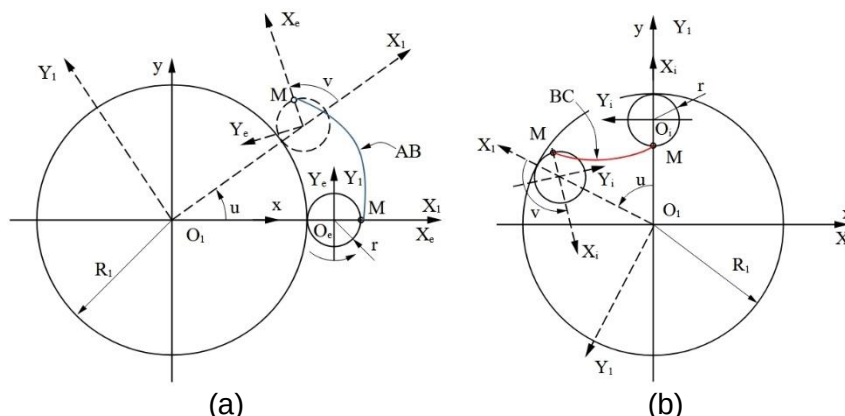


Figura 5.1. Sisteme de referință utilizate la generarea lobilor: (a) exterior și (b) interior [37]

Formele celor doi lobi obținuți matematic sunt prezentați în Figura 5.2.

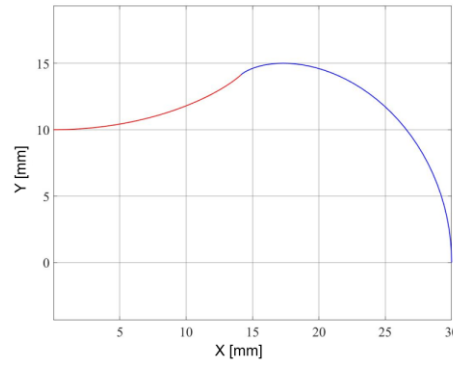


Figura 5.2. Arcele de cicloidă $\widehat{AB}$ (de culoare albastră) și $\widehat{BC}$ (de culoare roșie) [37]

Fiecare dintre punctele profilului cicloidal va genera o linie elicoidală conică de pas constant.

În Figura 5.3 sunt reprezentate liniile elicoidale conice care trec prin câteva puncte de pe profilul transversal al melcului interior.

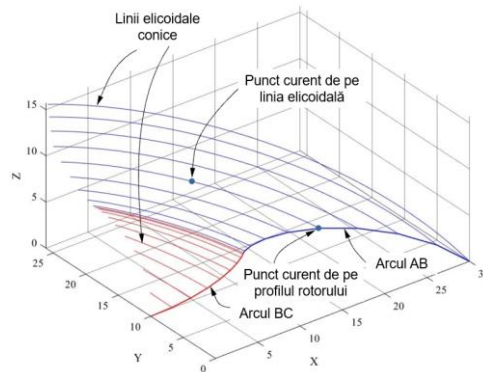


Figura 5.3. Liniile elicoidale conice trasate prin puncte aparținând profilului transversal [37]

În Figura 5.4 sunt reprezentate sistemele de referință asociate celor două rotoare și sistemul de referință fix, $x_0y_0z_0$, care face legătura între celelalte două. După cum s-a precizat mai sus, sistemul de referință asociat rotorului interior este sistemul $x_1y_1z_1$. Sistemul solidar rotorului exterior este sistemul $x_2y_2z_2$.

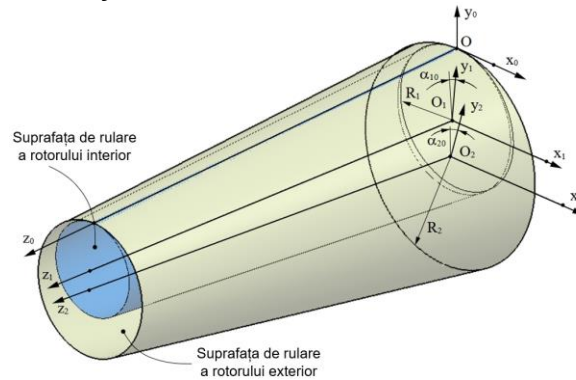


Figura 5.4. Sistemele de referință asociate rotoarelor și sistemul de referință de legătură [37]

Punctul de contact corespunzător unei anumite rotații φ_1 a rotorului interior va avea, în sistemul de referință al melcului exterior, coordonatele date de transformările de coordonate:

$$x_0 = \omega_1(\alpha_{10}) \cdot [x_1 + C_1]; C_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ -R_1 \\ 0 \end{pmatrix}; \omega_1(\alpha_{10}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_{10} & \sin \alpha_{10} \\ 0 & -\sin \alpha_{10} & \cos \alpha_{10} \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

$$x_2 = \omega_1^T(\alpha_{20}) \cdot x_0 + C_2; C_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ R_2 \\ 0 \end{pmatrix}; \omega_1^T(\alpha_{20}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_{20} & -\sin \alpha_{20} \\ 0 & \sin \alpha_{20} & \cos \alpha_{20} \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

rezultând:

$$x_2 = \omega_1^T(\alpha_{20}) \cdot \omega_1(\alpha_{10}) \cdot [x_1 + C_1] + C_2 \quad (5.4)$$

În acest fel, se obțin coordonatele punctelor de pe profilul melcului exterior:

$$\begin{cases} x_2(\varphi_2) = (x_{M2} \cdot \cos(-\varphi_2) - y_{M2} \cdot \sin(-\varphi_2)) \cdot \left(1 - \frac{p_{e2} \cdot (-\varphi_2) \cdot \tan \alpha_2}{R_{M2}}\right) \\ y_2(\varphi_2) = (x_{M2} \cdot \sin(-\varphi_2) + y_{M2} \cdot \cos(-\varphi_2)) \cdot \left(1 - \frac{p_{e2} \cdot (-\varphi_2) \cdot \tan \alpha_2}{R_{M2}}\right) \\ z_2(\varphi_2) = p_{e2} \cdot (-\varphi_2) \end{cases} \quad (5.5)$$

Modelul numeric al golului din rotorul exterior este dat de ecuațiile liniilor elicoidale descrise de punctele aparținând profilului acestui rotor în planul x_2y_2 :

$$\begin{cases} x_2(\varphi_2) = (x_M \cdot \cos \varphi_2 - y_M \cdot \sin \varphi_2) \cdot \left(\frac{H_2 - p_{e2} \cdot \varphi_2}{H_2}\right) \\ y_2(\varphi_2) = (x_M \cdot \sin \varphi_2 + y_M \cdot \cos \varphi_2) \cdot \left(\frac{H_2 - p_{e2} \cdot \varphi_2}{H_2}\right) \\ z_2(\varphi_2) = p_{e2} \cdot \varphi_2 \end{cases} \quad (5.6)$$

Verificarea corectitudinii rezultatelor obținute poate fi făcută prin modelarea urmei lăsată de rotorul interior în timpul mișcării relative față de rotorul exterior.

Această verificare a fost realizată în programul Catia prin simularea funcționării celor două elemente active ale compresorului elicoidal.

Ulterior, se obține un model al cavității rotorului exterior sub forma unui solid, tot în programul Catia și cele două modele sunt suprapuse și comparate în programul GOM Inspect.

În Figura 5.5 este prezentat rezultatul inspecției realizate folosind programul GOM.

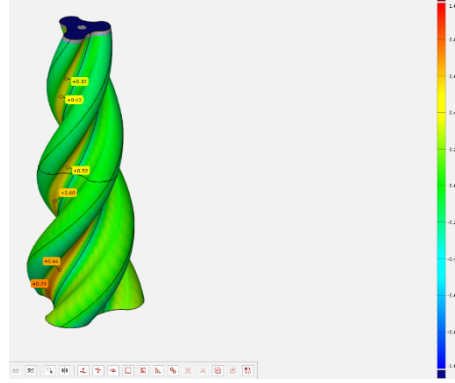


Figura 5.5. Rezultatul comparației între modelul CAD și urma lăsată în timpul mișcării [37]

Modelul CAD al golului rotorului exterior este generat în Matlab pe baza ecuațiilor precedente și, deși suprafața activă este interioară, modelul numeric este exterior pentru a permite compararea cu simulările. Simularea mișcării rotorului interior în CATIA reproduce urma lăsată în golul rotorului exterior; compararea în GOM Inspect arată o bună suprapunere, iar abaterile sunt datorate discretizării și axelor neparalele, fără a afecta suprafețele laterale active.

Algoritmul propus determină profilul unui melc conic pornind de la rotorul conjugat, folosind relații matematice simple și aplicabile oricărei configurații de compresor elicoidal sau mecanisme bazate pe înfășurare. Verificarea numerică confirmă corectitudinea metodei, chiar dacă anumite zone sunt dificil de analizat.

Principiile obținute sunt extinse la sculele delimitate de suprafețe de revoluție, precum: freze disc și scule inelare, pentru generarea suprafețelor elicoidale cilindrice de pas constant.

Metoda tratează înfășurarea ca un contact liniar, conform teoremelor Olivier și Gohman, iar curba caracteristică se definește prin linia de contact unde normalele la suprafețele conjugate coincid.

Implementarea numerică în Matlab permite generarea rapidă a unui set dens de puncte pe curba caracteristică, reducând discretizarea și sporind precizia profilului sculei. Metoda punctelor virtuale de contact se dovedește astfel aplicabilă și pentru sculele de revoluție, oferind un cadru teoretic și numeric robust pentru profilarea suprafețelor elicoidale cilindrice.

5.2. Studiul generării suprafețelor elicoidale cilindrice și de pas constant

Prezintă generarea suprafețelor elicoidale cilindrice și de pas constant poate fi realizată cu scule mărginite de suprafețe periferice primare de revoluție: scule disc, cilindro-frontale, scule cilindrice de rabotat și, mai puțin uzitate, scule inelare.

Contactul între cele două suprafețe poate fi tratat în baza unei teoreme complementare denumită „teorema punctelor virtuale de contact”.

Dacă se acceptă că suprafața elicoidală cilindrică de pas constant, de axă $\bar{V}$ și parametru elicoidal p_e este generată de o curbă plană, aparținând spațiului xy , fie G_{xy} această curbă, care execută o mișcare elicoidală de axă $\bar{V}$ și parametru elicoidal p_e , ecuațiile matematice ale curbei G_{xy} fiind:

$$G_{xy} \begin{cases} x = x(u) \\ y = y(u) \\ z = 0 \end{cases} \quad (5.7)$$

Atunci mișcarea elicoidală a curbei va fi dată de:

$$x = \omega_{3(\varphi)}^T \cdot x(u) + p_e \cdot \varphi \bar{k} \quad (5.8)$$

În ecuația (5.8), $\omega_{3(\varphi)}^T$ este matricea de rotație în jurul axei z , iar $p_e \varphi$ este parametrul de translație în lungul acestei axe.

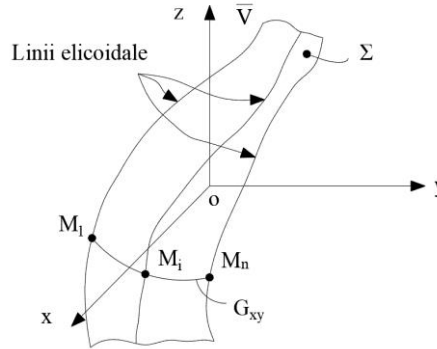


Figura 5.6. Suprafața elicoidală Σ , generatoarea G (în $z = 0$) linii elicoidale pe Σ , punctul curent M_i pe G [38]

În mișcarea (5.8), curba G generează o suprafață elicoidală cilindrică și de pas constant, pasul axial fiind:

$$p = 2\pi \cdot p_e \quad (5.9)$$

Suprafața elicoidală cilindrică și de pas constant generată de curba G_{xy} , în mișcarea (5.8) are, în principiu, ecuații de forma:

$$\Sigma \begin{cases} x(u, \varphi) = x(u) \cdot \cos \varphi - y(u) \cdot \sin \varphi \\ y(u, \varphi) = x(u) \cdot \sin \varphi + y(u) \cdot \cos \varphi \\ z(u, \varphi) = p_e \cdot \varphi \end{cases} \quad (5.10)$$

În ecuațiile (5.10) parametrii independenți care descriu suprafața Σ sunt u și φ .

Contactul între suprafața Σ și suprafața S se face în lungul curbei $C_{\Sigma S}$, denumită curbă caracteristică.

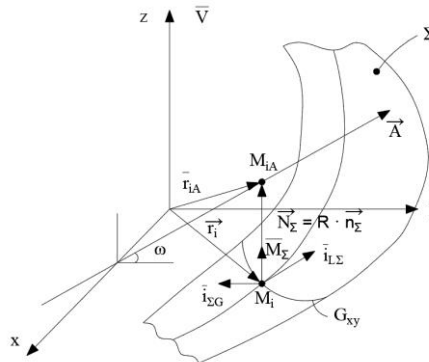


Figura 5.7. Suprafața elicoidală Σ , sisteme de referință, normala la Σ [38]
Se definesc parametrii directori ai normalei la suprafața elicoidală (5.10):

$$\bar{n}_\Sigma = \begin{vmatrix} \bar{l} & \bar{j} & \bar{k} \\ \dot{x}_u & \dot{y}_u & \dot{z}_u \\ \dot{x}_\varphi & \dot{y}_\varphi & \dot{z}_\varphi \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \bar{l} & \bar{j} & \bar{k} \\ \dot{x}_u & \dot{y}_u & 0 \\ \dot{x}_\varphi & \dot{y}_\varphi & p_e \end{vmatrix} \quad (5.11)$$

Sau, după dezvoltări:

$$\begin{aligned} (\bar{n}_\Sigma &= \dot{y}_u \cdot p_e \cdot \bar{l} + (\dot{x}_u \cdot \dot{y}_\varphi - \dot{x}_\varphi \cdot \dot{y}_u) \cdot \bar{k} - \dot{x}_u \cdot p_e \cdot \bar{j}) \\ \bar{n}_\Sigma &= \dot{y}_u \cdot p_e \cdot \bar{l} - \dot{x}_u \cdot p_e \cdot \bar{j} + (\dot{x}_u \cdot \dot{y}_\varphi - \dot{x}_\varphi \cdot \dot{y}_u) \cdot \bar{k} \end{aligned} \quad (5.12)$$

În ecuațiile (5.11) și (5.12), $\dot{x}_u, \dot{y}_u, \dot{x}_\varphi, \dot{y}_\varphi$ sunt derivatele parțiale ale ecuațiilor (5.10), în raport cu parametrii independenți u și φ .

Pentru determinarea formei secțiunii axiale a sculei disc se propune transferul curbei caracteristice în sistemul $x_1 y_1 z_1$, axa y_1 fiind axa de rotație a sculei disc.

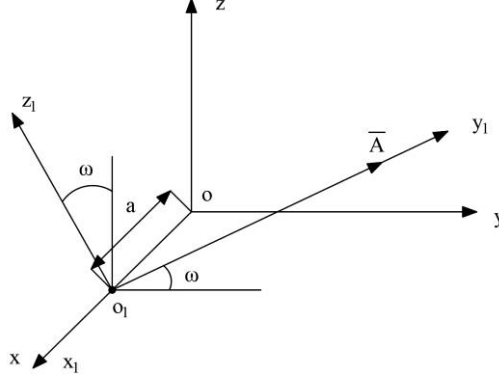


Figura 5.8. Sistemele de referință folosite [39]

Curba caracteristică este transferată în sistemul $x_1 y_1 z_1$, obținându-se ecuațiile dezvoltate:

$$\begin{cases} x_1(\varphi) = x(\varphi) - a \\ y_1(\varphi) = y(\varphi) \cdot \cos \omega + z(\varphi) \cdot \sin \omega \\ z_1(\varphi) = -y(\varphi) \cdot \sin \omega + z(\varphi) \cdot \cos \omega \end{cases}$$

Secțiunea axială a sculei disc este dată de:

$$S.A.: \begin{cases} R = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \\ H = y_1 \end{cases}$$

Curba S.A. fiind o curbă plană, având ca suport planul $x_1 z_1$.

Se propune o aplicație a teoremei complementare pentru determinarea profilului sculei disc generatoare a unei suprafețe elicoidale cilindrice de pas constant având profil circular în planul frontal.

Generatoarea suprafeței Σ este dată de:

$$G_{xy} \begin{cases} x = R - r \cos u \\ y = r \sin u \\ z = 0 \end{cases} ; u \text{ parametru variabil}$$

Suprafața elicoidală Σ este:

$$\Sigma: \begin{cases} x = (R - r \cos u) \cdot \cos \varphi - r \cdot \sin u \cdot \sin \varphi \\ y = (R - r \cos u) \cdot \sin \varphi + r \cdot \sin u \cdot \cos \varphi \\ z = p_e \cdot \varphi \end{cases}$$

Parametrii normalei sunt dați de (5.11), având forma specifică:

$$\begin{aligned} \dot{x}_u &= r \cdot \sin u \cdot \cos \varphi - r \cdot \cos u \cdot \sin \varphi \\ \dot{y}_u &= r \cdot \sin u \cdot \sin \varphi + r \cdot \cos u \cdot \cos \varphi \\ \dot{z}_u &= 0 \\ \dot{x}_\varphi &= -(R - r \cdot \cos u) \cdot \sin \varphi - r \cdot \sin u \cdot \cos \varphi \\ \dot{y}_\varphi &= (R - r \cdot \cos u) \cdot \cos \varphi - r \cdot \sin u \cdot \sin \varphi \\ \dot{z}_\varphi &= p_e \end{aligned}$$

Astfel, $\bar{n}_\Sigma$ devine:

$$\bar{n}_2 = \begin{vmatrix} \bar{l} & \bar{j} & \bar{k} \\ r \cdot \sin(u - \varphi) & r \cdot \cos(u - \varphi) & 0 \\ -R \cdot \sin \varphi - r \cdot \sin(u - \varphi) & R \cdot \cos \varphi - r \cdot \cos(u - \varphi) & p_e \end{vmatrix}$$

Vectorul normală la Σ , în punctul curent M_i , care intersectează axa sculei, va avea ecuația:

$$\bar{N}_{\Sigma} = r \cdot p_e \cdot \cos(u - \varphi) \cdot \lambda \cdot \bar{i} - r \cdot p_e \cdot \sin(u - \varphi) \cdot \lambda \cdot \bar{j} + R \cdot r \cdot \sin u \cdot \lambda \cdot \bar{k}$$

Vectorul de poziție al punctului de intersecție are forma specifică:

$$\bar{r}_{iA} = \bar{N}_{\Sigma} + \bar{r}_i = \bar{r}(u, \varphi) + \lambda \cdot \bar{n}_{\Sigma} = [R \cdot \cos \varphi - r \cdot \cos(u - \varphi) + r \cdot p_e \cdot \cos(u - \varphi) \cdot \lambda] \cdot \bar{i} + [R \cdot \sin \varphi + r \cdot \sin(u - \varphi) - r \cdot p_e \cdot \sin(u - \varphi) \cdot \lambda] \cdot \bar{j} + [p_e \cdot \varphi + R \cdot r \cdot \sin u \cdot \lambda] \cdot \bar{k}$$

Condiția de înfășurare specifică metodei „punctelor virtuale de contact” devine:

$$\begin{cases} a = R \cdot \cos \varphi - r \cdot \cos(u - \varphi) + r \cdot p_e \cdot \cos(u - \varphi) \cdot \lambda \\ t \cdot \cos \omega = R \cdot \sin \varphi + r \cdot \sin(u - \varphi) - r \cdot p_e \cdot \sin(u - \varphi) \cdot \lambda \\ t \cdot \sin \omega = p_e \cdot \varphi + R \cdot r \cdot \sin u \cdot \lambda \end{cases}$$

$$(a - R \cdot \cos \varphi) \cdot R \cdot \sin u + p_e \cdot \tan \omega \cdot (a \cdot \sin(u - \varphi) - R \cdot \sin u) + (R \cdot r \cdot \sin u - p_e^2 \cdot \varphi) \cdot \cos(u - \varphi)$$

$$u \rightarrow \begin{matrix} u_{max} \\ \uparrow \\ u_{min} \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} C.I. \\ \rightarrow \varphi \rightarrow C.C. \end{matrix} \left| \begin{matrix} x = x(u) \\ y = y(u) \rightarrow S.A. \\ z = z(u) \end{matrix} \right| \begin{matrix} R = \sqrt{x_1^2 + z_1^2} \\ H = y_1 \end{matrix}$$

În CATIA V5R21, procesul de creare a modelului solid este ilustrat vizual în figurile următoare: profilul suprafeței, Figura 5.9, suprafața elicoidală prezentată în Figura 5.10 și profilul frezei disc în Figura 5.11.

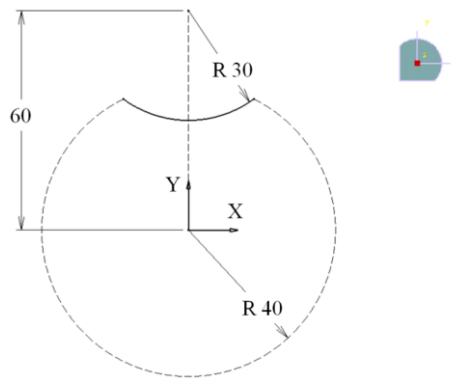


Figura 5.9. Generatoarea suprafeței elicoidale [39]

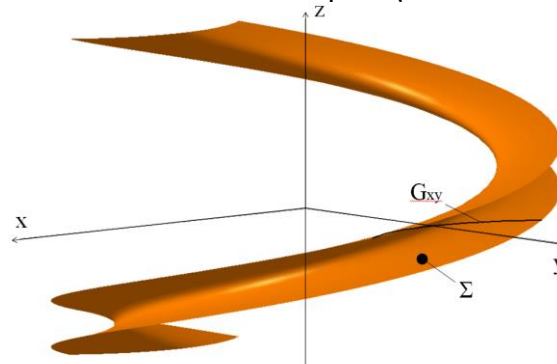


Figura 5.10. Modelul numeric al suprafeței elicoidale [39]

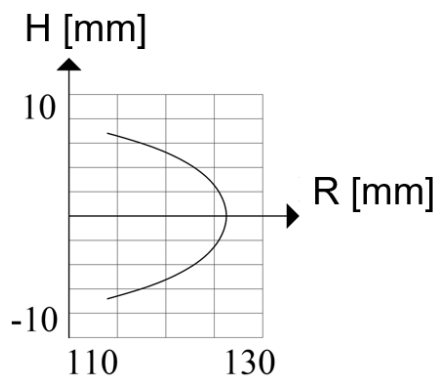


Figura 5.11. Secțiunea axială a frezei disc [39]

Tabelul 5.1 prezintă coordonatele punctelor de pe Curba Caracteristică (CC), Curba Caracteristică a Sculei (CCs) și Secțiunea Axială (AS), după ce profilul suprafeței elicoidale a fost calculat în programul Matlab.

Tabelul 5.1. Coordonatele CC, CCs și AS

Nr. crt. / Coordonate	CC			CCs			AS	
	X	Y	Z	X ₁	Y ₁	Z ₁	R	H
1.	39,80	-3,95	5,76	139,80	-1,54	6,81	139,81	6,81
2.	33,80	-3,84	3,51	133,80	-2,27	4,68	133,82	4,68
3.	30,44	-1,54	1,18	130,44	-0,99	1,67	130,44	1,67
4.	30,00	0,00	0,00	130,00	0,00	0,00	130,00	0,00
5.	30,44	1,54	-1,18	130,44	0,99	-1,67	130,44	-1,67
6.	33,80	3,84	-3,51	133,80	2,27	-4,68	133,82	-4,68
7.	39,80	3,95	-5,76	139,80	1,54	-6,81	139,81	-6,81

Metoda propusă permite profilarea frezelor disc pentru suprafețe elicoidale cilindrice cu pas constant, utilizând tehnica „punctelor virtuale de contact”. Implementarea în Matlab se bazează pe rezolvarea numerică a ecuațiilor simbolice de înfășurare, prin funcția „vpasolve”, ceea ce oferă soluții rapide și precise, chiar pentru forme complexe. Acuratețea metodei este evidențiată atât grafic, prin reprezentarea suprafețelor identificate, cât și numeric, prin coordonatele punctelor curbei caracteristice.

Cadrul algoritmic validat permite extinderea metodei și la sculele inelare, păstrând principiile fundamentale ale înfășurării cu contact liniar și adaptând relațiile geometrice la profilul periferic rectiliniu. Astfel, metoda asigură atât flexibilitate în proiectarea suprafețelor elicoidale cilindrice, cât și eficiență în determinarea profilului sculelor generatoare.

5.3. Profilarea sculei inelare pentru generarea suprafețelor elicoidale cilindrice utilizând metoda punctelor virtuale de contact

Prezintă generarea suprafețelor elicoidale cilindrice cu pas constant care poate fi realizată utilizând scule delimitate de suprafețe periferice primare de revoluție, cum ar fi: freze cilindro-frontale sau scule inelare.

Sculele inelare sunt utilizate pe scară largă în prelucrarea suprafețelor elicoidale de lungă durată, caracterizate printr-un pas relativ mic. Avantajul utilizării acestor scule, delimitate de suprafețe periferice primare de revoluție, constă în productivitatea foarte ridicată cu care are loc prelucrarea prin așchiere [40], [41].

Metoda a mai fost aplicată pentru profilarea sculei disc, în cazul generării unei suprafețe elicoidale cilindrice de pas constant având profil circular în planul frontal [39].

După cum se știe, dacă generatoarea plană a unei suprafețe elicoidale cilindrice de pas constant poate fi descrisă de ecuațiile [42], [43], [44]:

$$G: \begin{cases} x = x(u) \\ y = y(u) \\ z = 0 \end{cases} \quad (5.13)$$

Atunci ecuația suprafeței elicoidale va fi dată de mișcarea:

$$x(u, \varphi) = \omega_3^T(\varphi) \cdot x(u) + p_e \cdot \varphi \cdot \vec{k} \quad (5.14)$$

În care $x(u)$ este matricea formată cu coordonatele x , y și z ale unui punct aparținând generatoarei, $x(u) = \begin{pmatrix} x(u) \\ y(u) \\ z(u) \end{pmatrix}$; $\omega_3^T(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ este matricea de rotație în jurul axei z iar $p_e = \frac{p}{2\pi}$, p fiind pasul elicei [42].

În mișcarea (5.14) se generează suprafața elicoidală Σ , de ecuații [42]:

$$\Sigma: \begin{cases} x(u, \varphi) = x(u) \cdot \cos \varphi - y(u) \cdot \sin \varphi \\ y(u, \varphi) = x(u) \cdot \sin \varphi + y(u) \cdot \cos \varphi \\ z(u, \varphi) = p_e \cdot \varphi \end{cases} \quad (5.15)$$

Dacă se admite că suprafața Σ este generată de o sculă având suprafața periferică primară o suprafață de revoluție, S , atunci contactul între suprafețele Σ și S are loc după o curbă $C_{\Sigma S}$, numită curbă caracteristică [42].

Poziția celor două sisteme de referință utilizate, xyz asociat suprafeței elicoidale și XYZ asociat sculei inelare este prezentată în Figura 5.12.

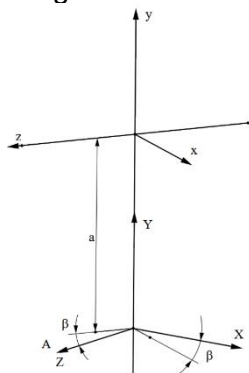


Figura 5.12. Poziția relativă a sistemelor de referință asociat piesei (xyz) respectiv sculei (XYZ) [42]

Metoda a fost aplicată pentru profilarea unei scule destinate prelucrării unei piese de tip „ax al depănătorului”. Axele depănătoarelor sunt piese cilindrice pe suprafața cărora se execută două canale elicoidale de sensuri opuse (stânga respectiv dreapta) pentru a permite schimbarea automată a sensului de deplasare longitudinală a elementului de ghidare.

În mod uzual, aceste canale sunt prelucrate cu freze cilindro-frontale, dar acest lucru implică o productivitate relativ redusă. Prin prelucrarea cu scule inelare, productivitatea este mult crescută.

În Figura 5.13 este prezentată secțiunea axială a unuia dintre canalele prelucrate. Ecuațiile parametrice care descriu generatoarea suprafeței elicoidale care trebuie generată au forma:

$$G: \begin{cases} x = 0 \\ y = u \cdot \cos \alpha \\ z = u \cdot \sin \alpha \end{cases} \quad (5.16)$$

Mișcarea elicoidală este dată de:

$$x = \omega_3(\varphi) \cdot x \quad (5.17)$$

sau, dezvoltat:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ u \cdot \cos \alpha \\ u \cdot \sin \alpha \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ p_e \cdot \varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \cdot \cos \alpha \cdot \sin \varphi \\ u \cdot \cos \alpha \cdot \cos \varphi \\ u \cdot \sin \alpha + p_e \cdot \varphi \end{pmatrix} \quad (5.18)$$

Deci, suprafața elicoidală are ecuațiile:

$$\Sigma: \begin{cases} x = u \cdot \cos \alpha \cdot \sin \varphi \\ y = u \cdot \cos \alpha \cdot \cos \varphi \\ z = u \cdot \sin \alpha + p_e \cdot \varphi \end{cases} \quad (5.19)$$

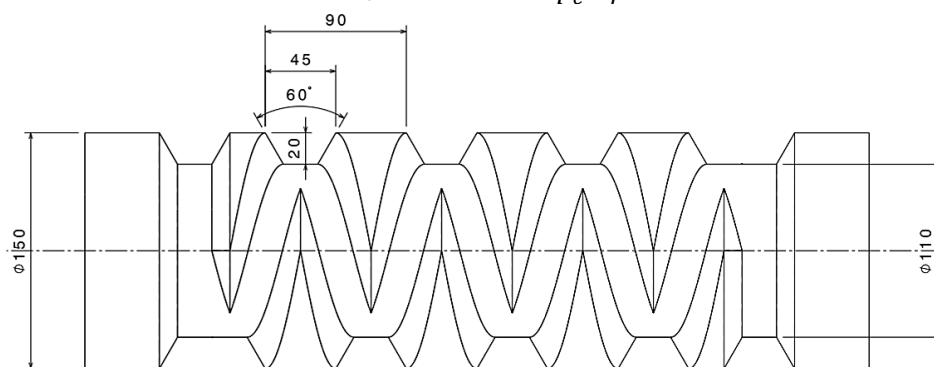


Figura 5.13. Dimensiunile constructive ale reperului „ax depănător” [45]

În Figura 5.14 este prezentată suprafața elicoidală Σ , generatoarea G și curba caracteristică CC . Valorile punctelor identificate pe curba caracteristică sunt prezentate în Tabelul 5.2 iar valorile punctelor corespunzătoare de pe geneatoarea sculei inelare sunt prezentate în Tabelul 5.3.

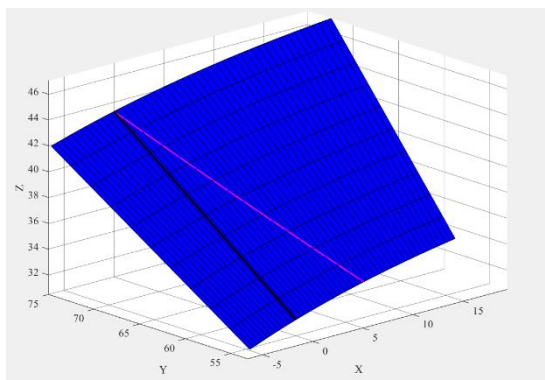


Figura 5.14. Generatoarea G, suprafața Σ și curba caracteristică CC [45]

Tabelul 5.2. Coordonatele punctelor de pe curba caracteristică în sistemul de referință al piesei și al sculei

Sistemul de referință al piesei			Sistemul de referință al sculei		
x	y	z	X	Y	Z
6,445	54,621	33,437	0,058	304,621	34,052
5,824	56,702	34,375	-0,728	306,702	34,858
5,196	58,771	35,327	-1,523	308,771	35,674
4,562	60,829	36,291	-2,327	310,829	36,502
3,921	62,878	37,265	-3,139	312,878	37,339
3,276	64,917	38,250	-3,957	314,917	38,186
2,627	66,948	39,244	-4,781	316,948	39,040
1,975	68,972	40,247	-5,611	318,972	39,903
1,319	70,988	41,258	-6,444	320,988	40,773
0,661	72,997	42,276	-7,282	322,997	41,650
0,000	75,000	43,301	-8,123	325,000	42,533

Tabelul 5.3. Coordonatele punctelor de pe secțiunea axială a sculei

H	R
54,621	34,052
56,702	34,865
58,771	35,707
60,829	36,576
62,878	37,471
64,917	38,390
66,948	39,332
68,972	40,296
70,988	41,279
72,997	42,281
75,000	43,301

În Figura 5.15 este prezentată secțiunea axială a sculei inelare.

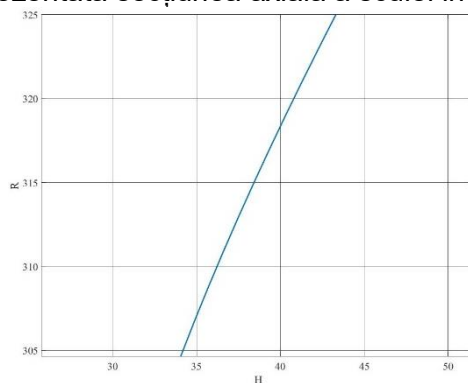


Figura 5.15. Secțiunea axială, SA, a sculei inelare [45]

Studiul prezintă aplicarea metodei punctelor virtuale de contact pentru profilarea suprafețelor elicoidale cilindrice de pas constant. Metoda poate fi utilizată atât pentru curbe generatoare simple, cât și pentru curbe mai complexe și a fost aplicată anterior și pentru profilarea frezelor disc.

Rezultatele evidențiază precizia metodei și posibilitatea de extindere de la probleme de înfășurare plană la probleme spațiale, între suprafețe elicoidale și suprafețe de revoluție.

Originalitatea metodei constă în utilizarea capacității Matlab de a rezolva simbolic ecuațiile, ceea ce permite adaptarea rapidă a programului la diferite tipuri de scule, menținând flexibilitatea și reducând riscul de eroare.

5.4. Concluzii

Capitolul 5 prezintă metoda punctelor virtuale de contact pentru generarea suprafețelor elicoidale, integrând abordarea teoretică, numerică și aplicativă. Conceptul de „puncte virtuale de contact” permite determinarea relațiilor geometrice și cinematice fără formularea explicită a condiției de înfășurare, reducând complexitatea algoritmică și crescând precizia profilului sculei.

Metoda este aplicabilă atât sculelor disc, cât și sculelor inelare, inclusiv pentru profilarea elementelor active ale compresoarelor elicoidale conice. Implementarea numerică în Matlab, cu rezolvarea simbolică și numerică a ecuațiilor de înfășurare, facilitează identificarea curbei caracteristice și determinarea precisă a profilului sculei, păstrând flexibilitatea pentru diverse tipuri de scule și curbe generatoare.

Originalitatea metodei constă în combinarea simplității algoritmice, preciziei determinării profilului și aplicabilității industriale, oferind un cadru unitar pentru proiectarea și fabricarea componentelor mecanice complexe. Astfel, metoda punctelor virtuale de contact devine un instrument adaptabil și esențial pentru integrarea între teorie, simulare numerică și aplicații industriale în generarea suprafețelor elicoidale.

Capitolul 6. Concluzii generale și contribuții personale

6.1. Concluzii generale

Teza de doctorat a vizat aprofundarea generării suprafețelor prin așchiere, combinând analiza teoretică, modelarea numerică și validarea experimentală, cu focus pe aliaje de aluminiu. Rezultatele evidențiază relațiile dintre parametrii de așchiere, geometria sculelor și calitatea suprafețelor, iar modelele numerice dezvoltate depășesc limitele abordărilor clasice.

Un aport esențial îl constituie metoda punctelor virtuale de contact pentru profilarea sculelor elicoidale, integrată în fluxuri CAD-CAM-CNC, care asigură precizie, flexibilitate și transfer direct la aplicații industriale. Teza oferă astfel un cadru metodologic unitar pentru optimizarea proceselor de așchiere și poate fundamenta cercetări viitoare în prelucrarea avansată și integrarea tehnicilor de inteligență artificială.

6.2. Contribuții personale

Contribuțiile personale și originale ale autorului, sunt sintetizate în cele ce urmează:

- Evidențierea influenței parametrilor de așchiere asupra forțelor și momentelor pentru aliajele AlMgSi0,5, Al7SiMg și duraluminiul 2024-T351.
- Aplicarea modelării predictive cu rețele neuronale pentru estimarea precisă a forțelor și momentelor, cu eroare relativă sub 10%.
- Dezvoltarea și implementarea metodei punctelor virtuale de contact pentru profilarea sculelor și generarea suprafețelor elicoidale, inclusiv formularea unei teoreme complementare pentru sculele inelare.
- Crearea de algoritmi Matlab care reduc complexitatea condiției de înfășurare și demonstrează robustețea metodei.
- Integrarea CAD-CAM-CNC în proiectarea, modelarea și desfășurarea experimentelor, valorificând experiența practică.

Contribuțiile constau în obținerea de rezultate experimentale originale pe aliaje de aluminiu și dezvoltarea de metode analitice și numerice avansate, utilizând rețele neuronale și metoda punctelor virtuale de contact, având impact științific și aplicativ în optimizarea proceselor de generare a suprafețelor prin prelucrare mecanică.

6.3. Direcții viitoare de cercetare și perspective

Direcțiile viitoare de cercetare constau în:

- Extinderea metodei punctelor virtuale de contact pentru scule și geometrii complexe, asigurând flexibilitate în generarea suprafețelor.
- Optimizarea multi-obiectiv a proceselor de aşchiere, corelând calitatea suprafeței, productivitatea, durata sculei și eficiența energetică prin algoritmi avansați.
- Control adaptiv în timp real, cu ajustarea automată a parametrilor tehnologici în funcție de estimările online ale forțelor și stării sculei.
- Monitorizare robustă a procesului, prin fuziunea datelor provenite din semnale dinamometrice, vibrații, emisii acustice, curent motor și imagini termice, pentru detectarea timpurie a uzurii și defectelor.
- Modelare predictivă bazată pe AI, prin modele hibride integrate cu cunoștințe fizice, pentru predicția forțelor și rugozității, cu interpretabilitate și generalizare.
- Metodologii experimentale adaptative, utilizând planuri bayesiene pentru selecția optimă a parametrilor și reducerea incertitudinii.
- Extinderea studiului la materiale complexe, incluzând aliaje dificil de prelucrat, materiale compozite sau anisotrope, cu analiza influenței microstructurii asupra prelucrabilității și calității suprafeței.
- Predicția uzurii sculelor și duratei de viață, prin modele avansate ce integrează efectele mecanice, termice și tribologice, validate practic.
- Analiza sustenabilității proceselor, prin evaluarea consumului energetic, eficienței și impactului asupra mediului.
- Modele probabilistice și cuantificarea incertitudinii, pentru robustețea predicțiilor și deciziilor tehnologice.
- Metode inverse de proiectare, utilizând algoritmi de optimizare pentru definirea parametrilor sculelor și procesului.
- Validarea industrială, prin aplicarea metodologiilor pe piese reale complexe și evaluarea impactului asupra productivității, costurilor și calității.
- Standardizare și ghiduri metodologice, pentru experimentare, analiză și raportare, crescând reproducibilitatea și comparabilitatea rezultatelor.
- Instrumente software dedicate, cu implementări eficiente în medii industriale pentru transfer tehnologic și aplicabilitate practică.

Lista articolelor științifice publicate

Articole indexate ISI

1. **Crăciun, R. S.**, Teodor, V. G., Baroiu, N., Păunoiu, V., & Moroșanu, G.-A. (2024). „*Study of cutting forces in drilling of aluminum alloy 2024-T351*”. *Machines*, 12(12), 937. <https://doi.org/10.3390/machines12120937>. **Factor de impact 2,5.**
2. Teodor, V. G., Baroiu, N., Moroșanu, G. A., **Crăciun, R. S.**, & Toniță, V. V. (2025). „*A study of the profiling of the screws in conical screw compressors using the virtual contact point method*”. *Applied Mechanics*, 6(3), 58. <https://doi.org/10.3390/applmech6030058>. **Factor de impact 1,5.**
3. **Crăciun, R. S.**, Afteni, M., Chivu, C., Susac, F., Frumușanu, G. R., & Teodor, V. G. (n.d.). „*Study on the influence of machining parameters on mean cutting force in milling of 2024 T351 aluminium alloy*”.
3.1. Presented at the Innovative Manufacturing Engineering & Energy International Conference (IManEE 2025), Iasi, Romania. **To be published in ISI Proceedings indexed, with Impact factor ~0.2: ACTA TECHNICA NAPOCENSIS SERIES-APPLIED MATHEMATICS MECHANICS AND ENGINEERING.**

Articole indexate BDI

4. **Crăciun, R.-S.**, Moroșanu, G. A., & Teodor, V. G. (2021). „*Improving the quality of small pieces made by rapid prototyping*”. *Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle V, Technologies in Machine Building*, 39, 19–24. <https://doi.org/10.35219/tmb.2021.03>.
5. Moroșanu, G. A., **Crăciun, R.**, & Baroiu, N. (2021). „*Constructive-functional analysis and calculation of flow control valves*”. *Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle V, Technologies in Machine Building*, 39, 29–34. <https://doi.org/10.35219/tmb.2021.05>.
(Autor principal – Autor corespondent)
6. Baroiu, N., Moroșanu, G.-A., Teodor, V. G., **Crăciun, R. S.**, & Păunoiu, V. (2022). „*Use of reverse engineering techniques for inspecting screws surfaces of a helical hydraulic pump*”. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 14(2), 20–29. <https://doi.org/10.54684/ijmmt.2022.14.2.20>.
6.1. Presented at the 10th International Conference on Modern Manufacturing Technologies in Industrial Engineering (ModTech 2022), Mamaia, Romania – **Awarded with the 3rd place.**
7. Teodor, V. G., **Craciun, R. S.**, & Morosanu, G.-A. (2022). „*Customised infill patterns for strenghtened 3D parts*”. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 14(3), 265–269. <https://doi.org/10.54684/ijmmt.2022.14.3.265>. **(Autor principal – Autor corespondent)**
7.1. Presented at the 10th International Conference on Modern Manufacturing Technologies in Industrial Engineering (ModTech 2022), Mamaia, Romania.
8. Moroșanu, G. A., Teodor, V. G., & **Crăciun, R.** (2022). „*Corrective profiling method for tools that generate by enwrapping*”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1235(1), 012020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1235/1/012020>.
8.1. Presented at the 25th edition of Innovative Manufacturing Engineering & Energy International Conference (IManEE 2021), Iasi, Romania <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1235/1/012020>.
9. Baroiu, N., Teodor, V. G., Paunoiu, V., Morosanu, G. A., & **Craciun, R. S.** (2022). „*Study of the enwrapping of the front profiles of the active elements of a three-screw compressor*”. *MATEC Web of Conferences*, 368, 01003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202236801003>.
9.1. Presented at the 7th International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies (NEWTECH 2022), Rennes, France.
10. Morosanu, G. A., Teodor, V. G., Paunoiu, V., **Craciun, R. S.**, & Baroiu, N. (2022). „*Quality characteristics analysis for the assembly of the elements from the construction of a mechanism for adjusting the seats in the automotive industry*”. *MATEC Web of Conferences*, 368, 01011. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202236801011>.
10.1. Presented at the 7th International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies (NEWTECH 2022), Rennes, France.

11. Georgiana Alexandra Moroșanu, Virgil Gabriel Teodor, **Răzvan Sebastian Crăciun***, Nicușor Baroiu, „*Study of the front winding of the rotors of a Roots compressors*”.
11.1. Presented at the 10th Edition of the Scientific Conference organized by the Doctoral Schools of “Dunarea de Jos” University of Galati (SCDS-UDJG 2022), Galati, Romania.
12. Teodor, V. G., Morosanu, G.-A., Baroiu, N., **Craciun, R. S.**, & Paunoiu, V. (2023). „*Profiling of the hob tool for worm shafts deformation*”. Journal of Engineering Studies and Research, 28(4), 131–141. <https://doi.org/10.29081/jesr.v28i4.015>.
12.1. Presented at the 17th International Conference of Constructive Design and Technological Optimization in Machine Building Field (OPROTEH 2022), Bacau, Romania.
13. Teodor, V. G., & **Crăciun, R. S.** (2023). „*Experimental validation of 3D elements with customized infill patterns and optimized structure*”. International Journal of Modern Manufacturing Technologies, 15(3), 180–185. <https://doi.org/10.54684/ijmmt.2023.15.3.180>. **(Autor principal – Autor corespodent)**
13.1. Presented at the 11th International Conference on Modern Manufacturing Technologies in Industrial Engineering (ModTech 2023), Bucharest, Romania.
14. Teodor, V.-G., & **Crăciun, R.-S.** (2023). „*Experimental determination of torque for the drilling of Al7SiMg alloy*”. Annals of “Dunarea de Jos” University of Galati, Fascicle V, Technologies in Machine Building, 41, 43–54. <https://doi.org/10.35219/tmb.2023.1.06>. **(Autor principal – Autor corespodent)**
15. **Crăciun, R. S.**, & Teodor, V. G. (2024). „*Numerical representation of objects – representation of 3D bodies*”. Annals of “Dunarea de Jos” University of Galati, Fascicle V, Technologies in Machine Building, 42. <https://doi.org/10.35219/tmb.2024.1.04>. **(Autor principal – Autor corespodent)**
15.1. Presented at the 12th Edition of the Scientific Conference of Doctoral Schools from „Dunărea de Jos” University of Galati, SCDS-UDJG 2024, Galati, Romania.
16. Teodor, V. G., **Crăciun, R. S.**, & Cotîrleață, A. C. (2024). „*Influence of cutting parameters on the roughness of machined surfaces*”. Annals of “Dunarea de Jos” University of Galati, Fascicle V, Technologies in Machine Building, 42. <https://doi.org/10.35219/tmb.2024.1.02>. **(Autor principal – Autor corespodent)**
17. Teodor, V. G., & **Crăciun Răzvan Sebastian**. (2024). „*Analysis of the distribution of axial force values in drilling, depending on machining parameters*”. Annals of “Dunarea de Jos” University of Galati, Fascicle V, Technologies in Machine Building, 42. <https://doi.org/10.35219/tmb.2024.1.03>.
18. Baroiu, N., Teodor, V. G., Ilie, M., Moroșanu, G.-A., & **Crăciun, R. S.** (2024). „*Roughness, amplitude distribution and bearing area curve during CNC machining of Al7SiMg*”. Annals of “Dunarea de Jos” University of Galati, Fascicle V, Technologies in Machine Building, 42. <https://doi.org/10.35219/tmb.2024.1.01>. **(Autor principal – Autor corespodent)**
19. Baroiu, N., Păunoiu, V., Teodor, V. G., Moroșanu, G.-A., & **Crăciun, R. S.** (2024). „*Aspects regarding the study of hydraulic and mechanical parameters of a “spider crane” system*”. Journal of Engineering Studies and Research, 29(3), 27–38. <https://doi.org/10.29081/jesr.v29i3.003>.
19.1. Presented at the 18th International Conference of Constructive Design and Technological Optimization in Machine Building Field (OPROTEH 2023), Bacau, Romania.
20. **Crăciun, R. S.**, Baroiu, N., Moroșanu, G.-A., & Teodor, V. G. (2025). „*Capability determination for HAAS V1 milling center through the analysis of machined hole diameter’s deviations*”. International Journal of Modern Manufacturing Technologies, XVII(3), 2067–3604. <https://doi.org/10.54684/ijmmt.2025.17.3>.
20.1. Presented at the 13th International Conference on Modern Manufacturing Technologies in Industrial Engineering (ModTech 2025), Zakopane, Poland – **Awarded with the 3rd place**.
21. **Crăciun, R. S.**, Teodor, V. G., Moroșanu, G. A., & Baroiu, N. (2025). „*Ring tool profiling to generate a helical surface, using the virtual contact point method*”. International Journal of Modern Manufacturing Technologies, 17(2), 15–22. <https://doi.org/10.54684/ijmmt.2025.17.2.15>.

- 21.1. Presented at the 13th International Conference on Modern Manufacturing Technologies in Industrial Engineering (ModTech 2025), Zakopane, Poland – **Awarded with the 3rd place.**
22. **Crăciun, R. S.**, Baroiu, N., Oancea, N., & Teodor, V. G. (2025). „*Virtual contact point method. Side mill generating a cylindrical helical surface*”. International Journal of Modern Manufacturing Technologies, 17(1), 130–1365.
<https://doi.org/10.54684/ijmmt.2025.17.1.130>.
- 22.1. Presented at the 12th International Conference on Modern Manufacturing Technologies in Industrial Engineering (ModTech 2024), Kuala Lumpur, Malaysia.
23. **Crăciun, R. S.**, & Teodor, V. G. (2025). „*A review of CNC machine tool types, applications and programming approaches*”. Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle V, Technologies in Machine Building, (43), 25–34.
<https://www.gup.ugal.ro/ugaljournals/index.php/tmb/article/view/9614>. (**Autor principal – Autor corespondent**)
- 23.1. Presented at the 13th Edition of the Scientific Conference organized by the Doctoral Schools of "Dunarea de Jos" University of Galati (SCDS-UDJG 2025), Galati, Romania, with the title *Technologies for processing complex surfaces on CNC machines*.
24. Teodor, V. G., & **Crăciun, S.** (n.d.). „*Study on the machining of aluminium alloy*”.
- 24.1. Presented at the 19th International Conference of Constructive Design and Technological Optimization in Machine Building Field, OPROTEH 2024, Bacău, Romania. To be published in the scientific journal JESR.
25. Virgil Gabriel TEODOR, Nicușor BAROIU, Florin SUSAC, Viorel PĂUNOIU, Georgiana Alexandra MOROȘANU, **Răzvan Sebastian CRĂCIUN***, Marius Corneliu GHEONEA. (2025). „*Graphical profiling of the inner rotor geometry used in a conical helicoidal screw compressor*”.
- 25.1. Presented at the 23rd International Scientific Conference TEHNOMUS, "Ștefan cel Mare" University of Suceava, Romania. Published in Tehnomus Journal, No. 32, 2025 (P – ISSN-1224-029X, E – ISSN-2247-6016) <https://fim.usv.ro/wp-content/uploads/sites/9/2025/12/16.pdf>.

Bibliografie selectivă

- [1] International Standard, "ISO 230-1 - Test code for machine tools — Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions," Mar. 2012.
- [2] J. Vargas, "Spong Robot Dynamics and Control." Accessed: Nov. 03, 2025. [Online]. Available: https://www.academia.edu/28344970/Spong_Robot_Dynamics_and_Control
- [3] Michael Corral, "Vector Calculus," Jan. 2008.
- [4] X. Xu, *Integrating Advanced Computer-Aided Design, Manufacturing, and Numerical Control*. IGI Global, 2009. doi: 10.4018/978-1-59904-714-0.
- [5] L. Zhang and A. D. Calderon, "Research and prospects of CNC lathe," *Cogent Eng.*, vol. 11, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1080/23311916.2023.2299043.
- [6] "Introduction of CNC Lathe." Accessed: Mar. 29, 2025. [Online]. Available: <https://www.smartlathe.com/blogs/introduction-of-cnc-lathe>
- [7] "Specialized on vertical lathes | MM Průmyslové spektrum." Accessed: Mar. 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.mmspektrum.com/clanek/specialized-on-vertical-lathes>
- [8] "What Are CNC Lathe Machines? - Eko Industries." Accessed: Mar. 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.ekoindustries.com/blog/cnc-machine/cnc-lathe>
- [9] "CNC Machining Precision | Complex Parts & Advanced Turning - Zintilon." Accessed: Mar. 29, 2025. [Online]. Available: <https://www.zintilon.com/blog/cnc-lathe-machines-from-simple-turning-to-complex-parts/>
- [10] T. T. Tung, N. X. Quynh, and T. V. Minh, "Development and Implementation of a Mini CNC Milling Machine," *Acta Marisiensis. Seria Technologica*, vol. 18, no. 2, pp. 24–28, Dec. 2021, doi: 10.2478/amset-2021-0014.
- [11] O. A. Aderoba, K. Mpofu, B. Kareem, O. A. Dahunsi, O. O. Awopetu, and I. A. Daniyan, "Upgrading the versatility of conventional machine tools using the mechatronic approach," *Cogent Eng.*, vol. 11, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1080/23311916.2024.2365908.
- [12] N. Patel, "STUDY ON COMPUTER NUMERICAL CONTROL (CNC) TECHNOLOGY," *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2020, [Online]. Available: www.irjet.net
- [13] "Centre verticale de prelucrare (VMC) | Mașini-unelte KNUTH | KNUTH Machine Tools." Accessed: Sep. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.knuth.com/ro/masini-unelte/frezare/centre-verticale-de-prelucrare>
- [14] F. Susac, V. Tabacaru, V. G. Teodor, and N. Baroiu, "Effect of Cutting Parameters on the Hole Quality in Dry Drilling of Some Thermoplastic Polymers," *Materiale Plastice*, vol. 56, no. 1, pp. 245–251, Mar. 2019, doi: 10.37358/MP.19.1.5160.
- [15] "2024 Aluminum Properties, Alloy AA2024 2024T3, 2024T351, 2024T4 Sheet, Plate & Tube." Accessed: Nov. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.theworldmaterial.com/2024-aluminum-alloy/>
- [16] V. G. TEODOR and Crăciun Răzvan Sebastian, "ANALYSIS OF THE DISTRIBUTION OF AXIAL FORCE VALUES IN DRILLING, DEPENDING ON MACHINING PARAMETERS," *Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle V, Technologies in machine building*, vol. 42, Mar. 2025, doi: 10.35219/tmb.2024.1.03.
- [17] R. A. Fisher, "Statistical Methods for Research Workers," *Oliver and Boyd: Edinburgh*, no. 11th Edition Revised, 1925.
- [18] H. Tschätsch, *Applied Machining Technology*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. doi: 10.1007/978-3-642-01007-1.
- [19] C. Picoș et al., *Proiectarea tehnologiilor de prelucrare mecanică prin așchiere*, Editura UNIVERSITAS., vol. 1. Chișinău, 1992.
- [20] C. Picoș et al., *Proiectarea tehnologiilor de prelucrare mecanică prin așchiere*, Editura UNIVERSITAS., vol. 2. Chișinău, 1992.
- [21] G. Frumușanu, Al. Epureanu, and V. Teodor, "Adaptive Optimal Monitoring of the Machining Process," in *Proceedings of the 1st International Conference on Industrial and Manufacturing Technologies (INMAT '13)*, Vouliagmeni, Athens, Greece: WSEAS Press, 2013, pp. 196–201.
- [22] G. Frumușanu, Al. Epureanu, and I. Constantin, "Cutting Process Stability Evaluation by Process Parameters Monitoring," in *Proceedings of the 8th WSEAS International*

- Conference on Non Linear Analysis, Non-Linear Systems and Chaos (NOLASC'09), University of La Laguna, Tenerife, Spain: WSEAS Press, 2009, pp. 345–350.
- [23] G. Frumușanu, I. Constantin, and A. Epureanu, "Experimental Research Concerning Cutting Process Dynamics, Based on Chaos Theory Specific Tools," *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, vol. II, no. 2, pp. 51–56, 2010.
- [24] N. Baroiu, S. Berbinschi, V. G. Teodor, and N. Oancea, "Comparative Study of Drill's Flank Geometry Developed with the CATIA Software," *Annals of "Dunărea de Jos" University of Galați, Fascicle V – Technologies in Machine Building*, vol. I, no. 1, pp. 27–32, 2012.
- [25] N. Baroiu, G.-A. Costin, V. G. Teodor, D. Nedelcu, and V. Tabacaru, "Prediction of Surface Roughness in Drilling of Polymers using a Geometrical Model and Artificial Neural Networks," *Materiale Plastice*, vol. 57, no. 3, pp. 160–173, Sep. 2020, doi: 10.37358/MP.20.3.5390.
- [26] N. Baroiu, V. Teodor, S. Berbinschi, and N. Oancea, "Multi-Flute Helical Drills – The Modeling of a Hyperboloid Sharpening Method of the Back Faces," in *Proceedings of the International Conference on Innovative Technologies (In-Tech 2011)*, Bratislava, Slovakia, 2011, pp. 37–41.
- [27] N. Baroiu, C. Croitoru, S. Berbinschi, V. Teodor, and S. Totolici, "Cutting Force and Torque at Drilling with Curved Cutting Edge Multi-Flute Drill," in *Proceedings of the 1st International Conference on Industrial and Manufacturing Technologies (INMAT '13)*, Vouliagmeni, Athens, Greece: WSEAS Press, 2013, pp. 46–51.
- [28] N. Baroiu, D. Boazu, S. Berbinschi, and V. Teodor, "Modeling and Experimental Research Regarding the Temperature Distribution along Curved Cutting Edges," *Adv. Mat. Res.*, vol. 1036, pp. 259–264, Oct. 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1036.259.
- [29] V.-G. Teodor and R.-S. Crăciun, "Experimental Determination of Torque for the Drilling of Al7SiMg Alloy," *Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle V, Technologies in machine building*, vol. 41, pp. 43–54, Jul. 2024, doi: 10.35219/tmb.2023.1.06.
- [30] R. S. Crăciun, V. G. Teodor, N. Baroiu, V. Păunoiu, and G.-A. Moroșanu, "Study of Cutting Forces in Drilling of Aluminum Alloy 2024-T351," *Machines*, vol. 12, no. 12, p. 937, Dec. 2024, doi: 10.3390/machines12120937.
- [31] M. Brožek, R. Chotěborský, M. Müller, and P. Hrabě, "Optimization of cutting conditions at drilling," in *Proceedings of the International Conference on Economic Engineering and Manufacturing Systems*, Brașov, Romania, 2007, pp. 225–228.
- [32] N. Oancea, N. Căpățînă, and G. M. Neniță, *Bazele aşchierii şi generării suprafeţelor: lucrări de laborator (Basics of cutting and surface generation, laboratory work)*. Galați, 1980.
- [33] R. S. Crăciun, M. Afteni, C. Chivu, F. Susac, G. R. Frumușanu, and V. G. Teodor, "Study on the Influence of Machining Parameters on Mean Cutting Force in Milling of 2024 T351 Aluminium Alloy".
- [34] V. G. Teodor and S. Crăciun, "Study on the machining of aluminium alloy."
- [35] V. G. TEODOR, R. S. CRĂCIUN, and A. C. COTÎRLEAȚĂ, "Influence of cutting parameters on the roughness of machined surfaces," *Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle V, Technologies in machine building*, vol. 42, Mar. 2025, doi: 10.35219/tmb.2024.1.02.
- [36] "MATLAB." Accessed: Nov. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [37] V. G. Teodor, N. Baroiu, G. A. Moroșanu, R. S. Crăciun, and V. V. Toniță, "A Study of the Profiling of the Screws in Conical Screw Compressors Using the Virtual Contact Point Method," *Applied Mechanics*, vol. 6, no. 3, p. 58, Aug. 2025, doi: 10.3390/applmech6030058.
- [38] N. Oancea, *Generarea suprafețelor prin înfășurare. Teoreme fundamentale*. Galați: Dunărea de Jos University Publishing House, 2004.
- [39] R. S. Crăciun, N. Baroiu, N. Oancea, and V. G. Teodor, "VIRTUAL CONTACT POINT METHOD. SIDE MILL GENERATING A CYLINDRICAL HELICAL SURFACE," *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, vol. 17, no. 1, pp. 130–1365, Jun. 2025, doi: 10.54684/ijmmt.2025.17.1.130.

- [40] N. Oancea, V. G. Teodor, N. Baroiu, and F. Susac, "The worm conjugated with an ordered curl of involute cylindrical surfaces," *The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati*, vol. V, pp. 31–40, 2016.
- [41] V. G. Teodor, N. Baroiu, F. Susac, and N. Oancea, "Tangential ring tool - graphical profiling method in CATIA," in *7th International Conference Manufacturing Technology - Pilsen*, Pilsen: University of West Bohemia in Pilsen, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining Technology, 2017.
- [42] G. A. Moroşanu, N. Baroiu, V. G. Teodor, V. Păunoiu, and N. Oancea, "Review on Study Methods for Reciprocally Enwrapping Surfaces," *Inventions*, vol. 7, no. 1, p. 10, Jan. 2022, doi: 10.3390/inventions7010010.
- [43] F. L. Litvin and A. Seireg, "Theory of Gearing," *Journal of Mechanical Design*, vol. 114, no. 1, pp. 212–212, Mar. 1992, doi: 10.1115/1.2916919.
- [44] F. Litvin, A. Funes Aznar, I. Gonzales Perez, and K. Hayasaka, *Noncircular gears*. New York: Cambridge University Press, 2009.
- [45] R. S. Crăciun, V. G. Teodor, G. A. Moroşanu, and N. Baroiu, "RING TOOL PROFILING TO GENERATE A HELICAL SURFACE, USING THE VIRTUAL CONTACT POINT METHOD," *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, vol. 17, no. 2, pp. 15–22, 2025, doi: 10.54684/ijmmt.2025.17.2.15.