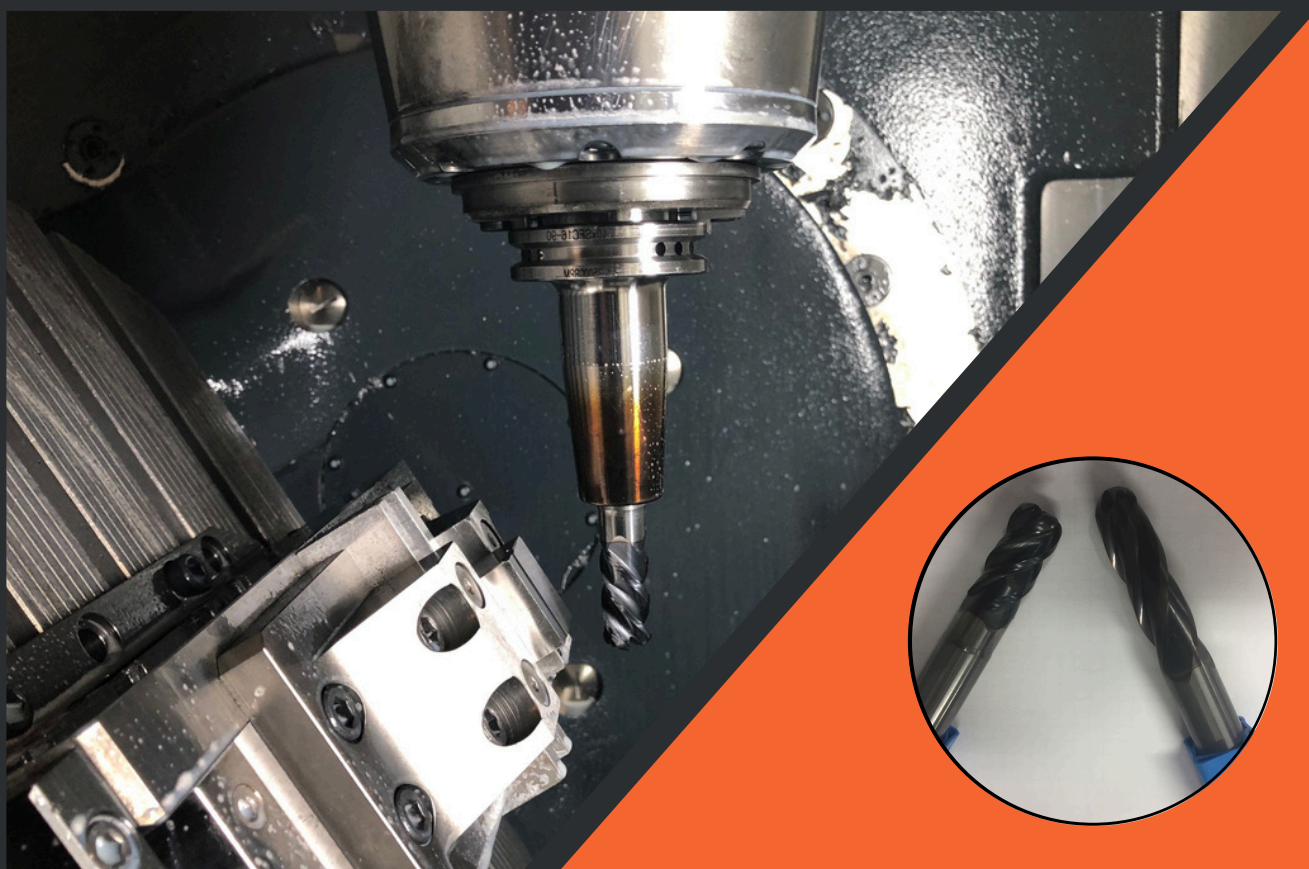


Andrei OȘAN

PRELUCRAREA
SUPRAFETELOR CURBE
COMPLEXE CU FREZE
TOROIDALE



U.T.PRESS
Cluj-Napoca, 2024
ISBN 978-606-737-724-8

2024



Andrei Raul OȘAN

**PRELUCRAREA SUPRAFETELOR CURBE
COMPLEXE CU FREZE TOROIDALE**



U.T.PRESS

Cluj - Napoca, 2024

ISBN 978-606-737-724-8



Editura U.T.PRESS
Str. Observatorului nr. 34
400775 Cluj-Napoca
Tel.: 0264-401.999
e-mail: utpress@biblio.utcluj.ro
<http://biblioteca.utcluj.ro/editura>

Recenzia: Conf.dr.ing. Lucian Butnar
Ș.l.dr.ing. Marius Cosma

Pregătire format electronic on-line: Gabriela Groza

Copyright © 2024 Editura U.T.PRESS

Reproducerea integrală sau parțială a textului sau ilustrațiilor din această carte este posibilă numai cu acordul prealabil scris al editurii U.T.PRESS.

ISBN 978-606-737-724-8

PREFAȚĂ

Prezenta lucrare conține un obiectiv principal, clar, acesta fiind prelucrarea suprafețelor curbe complexe cu frezele toroidale pe centrele cu comandă numerică. Prin susținerea și dezbateră acestui obiectiv, aduce după sine o serie de obiective specifice. Oricare dintre aceste obiective specifice ar putea fi un obiectiv fundamental, dar cumulate aceste obiective țintesc spre atingerea scopului final.

Se pune un semn de întrebare, se pot prelucra suprafețele curbe complexe cu frezele toroidale pe centrele cu comandă numerică? Răspunsul este unul afirmativ! Și nu doar că este afirmativ, dar în unele cazuri s-a dovedit a fi mai potrivită folosirea frezelor toroidale decât folosirea frezelor cu cap sferic.

Sunt avantaje și dezavantaje în folosirea frezelor toroidale, dar totul constă în modul în care sunt utilizate aceste freze în funcție de scopul urmărit. Odată identificate valorile măsurătorilor rugozității suprafeței, acestea au fost valorificate prin crearea rețelelor neuronale artificiale. Este un concept la modă, dar cercetările efectuate în prezenta lucrare dovedesc că este și un concept util. Odată creată baza de date, rețeaua neuronală artificială este capabilă să genereze noi valori ale rugozității suprafeței chiar dacă neuronii de intrare nu sunt cuprinși în baza de date. Consider că acest concept poate economisi mult timp și multă materie primă reducând considerabil costurile de cercetare în obținerea unei calități a suprafeței dorite.

Scopul lucrării a fost atins, rezultatele experimentale arată că rugozitatea suprafețelor prelucrate cu freza toroidală, comparativ cu freza sferică este mai bună și s-au stabilit condițiile de reducere a timpului de bază. Obiectivul îndeplinit, de realizare a unei calități bune a suprafeței sub influența parametrilor de așchiere, cât și a unghiului de înclinare a axei sculei a avut ca obiective secundare monitorizarea uzurii sculei cât și productivitatea celor două tipuri de freze.

Proiectarea cercetării are o strategie de desfășurare cu etape intermediare specifice modelului de cercetare, iar planificarea ei este făcută de specialist programator cu experiență. Validitatea rezultatelor obținute s-a făcut prin metode moderne de măsurare și de interpretare a rezultatelor.

Cercetările experimentale realizate în această lucrare au utilizat procedeele existente de așchiere pe centrele de prelucrare, care au permis

colectarea datelor utilizate. Datele experimentale confirmă cercetările teoretice, precum și importanța acordată testărilor pentru identificarea soluțiilor de reglare a parametrilor procesului de așchiere. În cercetările efectuate s-a ținut cont de cercetările actuale în domeniu, capacitatea maximă a centrelor de prelucrare și a sculelor utilizate.

Rezultatele proprii, coroborate cu datele din literatură, au fost foarte importante în configurarea propriului model de cercetare, lucrarea actuală a evidențiat o serie de factori de influență asupra procesului de prelucrare prin așchiere la centrele de prelucrare.

Ceea ce acest studiu aduce nou este compararea calității suprafețelor prelucrate cu freza toroidală versus prelucrarea cu freza sferică, în scopul obținerii unei calități bune a suprafeței, pe mașini cu comandă numerică Prin abordarea analizei în această lucrare am dorit să analizez diferențele semnificative în ceea ce privește prelucrarea cu cele două tipuri de freze. Această cercetare are un aport în progresul cunoștințelor în domeniu, deoarece aprofundează aspectele tehnologice la prelucrarea prin frezare cu freze sferice și toroidale.

*Dr. ing. Oșan Andrei Raul
Baia Mare, 2024*

CUPRINS

ABREVIERI.....	9
INTRODUCERE	11
1. STADIUL ACTUAL PRIVIND PRELUCRAREA SUPRAFETELOR CU FREZELE SFERICE, COMPARATIV CU PRELUCRAREA SUPRAFETELOR CU FREZELE TOROIDALE	13
1.1. Stadiul actual privind geometria constructivă a sculelor	13
1.2. Stadiul actual privind procesul de frezare	18
1.3. Strategii de prelucrare a suprafețelor complexe	25
1.4. Stadiul actual privind modelarea rezultatelor experimentale	34
1.5. Concluzii de capitol.....	37
2. CONTRIBUȚII TEORETICE PRIVIND PROCEDEUL DE FREZARE CU FREZA TOROIDALĂ.....	38
2.1. Strategii de frezare specifică. Studiu de caz.....	38
2.2. Analiza și alegerea sculei.....	45
2.2.1. Parametrii geometrici ai sculei.....	45
2.2.2. Materialele utilizate la execuția sculelor așchietoare	45
2.2.3. Influența parametrilor geometrici asupra procesului de așchiere.....	46
2.3. Influența regimurilor asupra procesului de așchiere	48
2.3.1. Influența adâncimii de așchiere	48
2.3.2. Influența avansului.....	49
2.3.3. Influența vitezei de așchiere.....	50
2.3.4. Influența parametrilor procesului de frezare asupra rugozității suprafeței	51
2.4. Influența direcției de frezare asupra rugozității.....	53
2.4.1. Frezarea în sensul avansului	54
2.4.2. Frezarea contra avansului	55
2.5. Influența înclinării axei sculei asupra rugozității	55
2.5.1. Efectul unghiului de înclinare a sculei	58

2.6. Concluzii de capitol	62
2.7. Direcții de cercetare	63
3. CONTRIBUȚII PRIVIND METODOLOGIA DE CERCETARE ȘI PROIECTARE A EXPERIMENTELOR	64
3.1. Obiectivul fundamental al cercetării	64
3.2. Proiectarea cercetării	65
3.3. Planificarea cercetării.....	67
3.4. Strategia de desfășurare a cercetării.....	71
3.5. Modul de derulare al cercetării	72
3.6. Proiectarea planului experimental.....	73
3.7. Validarea factorilor care intervin în domeniul procesului de frezare cu freza toroidală și cea sferică	74
3.8. Selectarea și definirea parametrilor de studiu	75
3.9. Selectarea și definirea parametrilor de studiu	76
3.10. Alegerea unei matrici de experiențe	77
3.11. Monitorizarea productivității și uzurii sculei.....	81
3.12. Concluzii de capitol.....	82
4. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND COMPARAREA FREZELOR TOROIDALE CU FREZELE CU CAP SFERIC	83
4.1. Desfășurarea experimentelor.....	83
4.2. Realizarea programelor CAM	86
4.3. Cercetări experimentale privind prelucrarea suprafețelor plane cu frezele toroidale versus frezele sferice	87
4.4. Cercetări experimentale privind prelucrarea suprafețelor sferice concave cu frezele toroidale versus frezele sferice.....	91
4.5. Cercetări experimentale privind prelucrarea suprafețelor sferice convexe cu frezele toroidale versus frezele sferice.....	94
4.6. Cercetări experimentale privind prelucrarea suprafețelor cilindrice concave cu frezele toroidale versus frezele sferice.....	98

4.7. Cercetări experimentale privind prelucrarea suprafețelor cilindrice convexe cu frezele toroidale versus frezele sferice.....	102
4.8. Monitorizarea uzurii sculelor	106
4.9. Analiza productivității în funcție de timpul de bază	111
4.10. Concluzii de capitol	115
5. CONTRIBUȚII EXPERIMENTALE PRIVIND INFLUENȚA PARAMETRILOR REGIMURILOR DE AȘCHIERE ASUPRA RUGOZITĂȚII	117
5.1. Planificarea cercetării modelării datelor	117
5.2. Efectuarea măsurătorilor	118
5.3. Culegerea, centralizarea și analiza datelor experimentale	119
5.4. Identificarea și reprezentarea microscopică a valorilor minime a rugozității	140
5.5. Concluzii de capitol.....	144
6. MODELAREA ȘI OPTIMIZAREA PARAMETRILOR DE PROCES CU REȚEAUA NEURONALĂ ARTIFICIALĂ.....	145
6.1. Stadiul teoretic privind rețelele neuronale artificiale	145
6.2. Implementarea unei rețele neuronale artificiale	155
6.2.1. Crearea unei rețele neuronale artificiale folosind MatLab	156
6.2.2. Aproximare de funcții cu rețeaua neuronală artificială	157
6.3. Compararea aproximărilor.....	164
6.4. Aplicarea rețelei neuronale artificiale	168
6.5. Certificarea predicțiilor rețelei neuronale artificiale	172
6.6. Concluzii de capitol.....	176
7. DISCUȚII GENERALE.....	177
8. CONCLUZII FINALE	179
8.1. Concluzii generale	179
8.2. Originalitatea și contribuții inovative	183
8.3. Direcțiile de cercetare viitoare	186
8.4. Elemente de noutate aduse în cadrul acestei lucrări	186

BIBLIOGRAFIE	188
LISTA FIGURILOR.....	210
LISTA TABELELOR	216
ANEXE.....	218

ABREVIERI

a_e	Adâncimea de aşchiere radială
a_p	Adâncimea de aşchiere axială
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAD	Computer Aided Design
CNC	Computer Numerical Control
CICV-TR	Suprafaţa cilindrică concavă prelucrată cu freza toroidală
CICV-SF	Suprafaţa cilindrică concavă prelucrată cu freza sferică
CICX-TR	Suprafaţa cilindrică convexă realizată cu freza toroidală
CICX-SF	Suprafaţa cilindrică convexă realizată cu freza sferică
D	Diametrul sculei aşchietoare
f_z	Avansul pe dinte
h_{th}	Înălţimea microasperităţilor
H	Duritatea materialului
kl	Coeficientului de comprimare a aşchiei
n	Turaţia aplicată sculei aşchietoare
R	Raza sculei aşchietoare
R_a	Abateră medie aritmetică a profilului
RNA	Reţea neuronală artificială
R_t	Rugozitate totală
SFCV-TR	Suprafaţa sferică concavă prelucrată cu freza toroidală
SFCV-SF	Suprafaţa sferică concavă prelucrată cu freza sferică
SFCX-TR	Suprafaţa sferică convexă prelucrată cu freza toroidală
SFCX-SF	Suprafaţa sferică convexă prelucrată cu freza sferică
SPLN-TR	Suprafaţa plană prelucrată cu freza toroidală
SPLN-SF	Suprafaţa plană prelucrată cu freza sferică
v_c	Viteza de aşchiere
α	Unghiul de aşezare
α_n	Unghiul de aşezare normal
β	Unghiul de ascuţire
ε	Eroarea minimă de prelucrare
ψ	Unghiul de rotaţie al sculei
λ_T	Unghiul de înclinare al tăişului
γ	Unghiul de degajare
χ_r	Unghiul de atac principal

INTRODUCERE

Lucrarea urmărește aducerea unor contribuții științifice la prelucrarea suprafețelor curbe complexe cu freze toroidale pe centre de prelucrare. Aceasta conduce la identificarea regimurilor optime, unde variază viteza de așchiere, avansul pe dinte și înclinarea unghiului axei sculei pentru a obține cea mai bună calitate a suprafeței, atât din punct de vedere al rugozității medii aritmetice R_a , cât și al rugozității totale R_t .

Lucrarea de față are ca scop identificarea și punerea la dispoziție a unor instrumente informatice pentru generarea unei rețele neuronale artificiale. Acestea se bazează pe experimente practice, ce au convingerea că datele obținute experimental sunt corecte și pot fi aplicate în cazuri diferite.

Noile tendințe de globalizare întâlnite în toate domeniile inclusiv în activitatea industrială, au o influență deosebită în ceea ce privește competitivitatea și concurența dintre agenții economici dezvoltând noi tehnici, astfel încât să rămână competitivi pe piață. Utilizarea tot mai pregnantă a procedurii de frezare în mediul industrial local și nu numai, în vederea prelucrării elementelor și dispozitivelor din industria constructoare de mașini, a impus necesitatea creșterii productivității în special prin identificarea parametrilor optimi ai procesului de așchiere.

Motivația pentru acest studiu provine din necesitatea competitivității în industria tehnologică modernă, care implică o linie fină între două cerințe fundamentale, productivitatea și calitatea.

În acest context se subliniază motivarea temei și a cercetării din această lucrare, orientate către studiul prelucrării prin așchiere a suprafețelor complexe cu freze toroidale, pentru a aduce o contribuție semnificativă în implementarea aplicării lor.

Lucrarea intitulată „*Prelucrarea suprafețelor curbe complexe cu freze toroidale pe centrele de prelucrare*” este structurată pe 5 capitole și a fost elaborată ca urmare a cerințelor din mediul industrial.

În capitolul: **Stadiul actual privind prelucrarea suprafețelor cu frezele sferice, comparativ cu prelucrarea suprafețelor cu frezele toroidale**, sunt menționate o serie de lucrări științifice ce abordează prelucrarea suprafețelor cu freze toroidale comparativ cu frezele sferice, dar și o serie de cercetări privind geometria constructivă a frezelor toroidale, cât și poziționarea acestora.

În capitolul: **Contribuții teoretice privind procedeul de frezare cu freza toroidală**, sunt menționate strategiile de frezare

precum și impactul alegerii sculei asupra calității și productivității. În acest capitol mai sunt prezentate și influența regimurilor asupra procesului de așchiere, influența direcției de frezare asupra rugozității, precum și influența înclinării axei sculei asupra rugozității.

În capitolul: **Contribuții privind metodologia de cercetare și proiectare a experimentelor**. Acest capitol conține selectarea și definirea parametrilor de studiu, urmând să se aleagă o matrice de experiență. În acest capitol se stabilește numărul de încercări aferente fiecărei suprafețe, inclusiv numărul de măsurători efectuate fiecărei suprafețe prelucrate.

Capitolul: **Cercetări experimentale privind compararea frezelor toroidale cu frezele cu cap sferic**, se transmite modul de desfășurare al experimentelor, este prezentată mașina unealtă, realizarea programelor CAM, sunt prezentate tipurile de scule, precum și tipurile de suprafețe studiate. În acest stadiu suprafețele sunt prelucrate și pregătite pentru măsurarea rugozității. Tot în acest capitol este evidențiată monitorizarea uzurii sculelor, în funcție de unghiul de înclinare al axei sculei, precum și timpul de bază.

În capitolul: **Contribuții experimentale privind influența parametrilor regimurilor de așchiere asupra rugozității**, debutează cu planificarea cercetării modelării datelor unde este arătat modul de măsurare a suprafețelor și tipurile de rugozități ce urmează a fi monitorizate.

În capitolul: **Modelarea și optimizarea parametrilor de proces cu rețeaua neuronală artificială**, este reprezentat de către rețelele neuronale care pun în evidență funcția de aproximare cât și funcția de prezicere a valorilor rugozității.

În ultima parte a lucrării sunt prezentate **Discuțiile finale, Concluziile, Direcțiile de cercetare**, precum și **Contribuțiile personale**.

Referințele utilizate în vederea documentării numără un total de **232** de lucrări științifice.

1. STADIUL ACTUAL PRIVIND PRELUCRAREA SUPRAFETELOR CU FREZELE SFERICE, COMPARATIV CU PRELUCRAREA SUPRAFETELOR CU FREZELE TOROIDALE

1.1. Stadiul actual privind geometria constructivă a sculelor

În ceea ce privește geometria constructivă a părții așchietoare, aceasta definește scula așchietoare ca un corp geometric independent de procesul de așchiere. În același timp, cunoașterea mărimii parametrilor dintelui așchietor permite reglarea dispozitivelor pentru poziționarea sculei, la operațiile de ascuțire-rectificare, precum și calculul și aprecierea valorilor funcționale ale parametrilor geometrici.

Conform autorilor [1], sistemele CAD/CAM definesc conturul părții așchietoare ai cărei parametrii geometrici constructivi ai sculei D , R , R_r , R_z , a , b și h sunt arătați în figura 1.1.

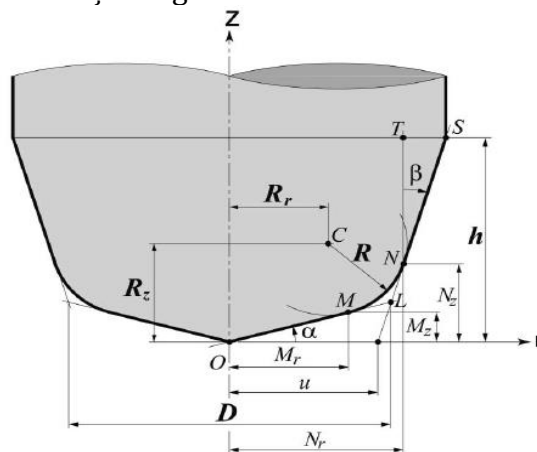


Fig. 1.1 Geometria generală a sculei [1]

Acești șapte parametri geometrici sunt independenți unul de altul, dar cu constrângeri geometrice pentru a crea forme realizabile matematic. Pentru o exemplificare mai coerentă, în figura 1.2 sunt prezentați cei șapte parametrii geometrici în cazul celor trei tipuri de

freze, mai precis freza cilindro-frontală, freza cu cap sferic și freza toroidală.

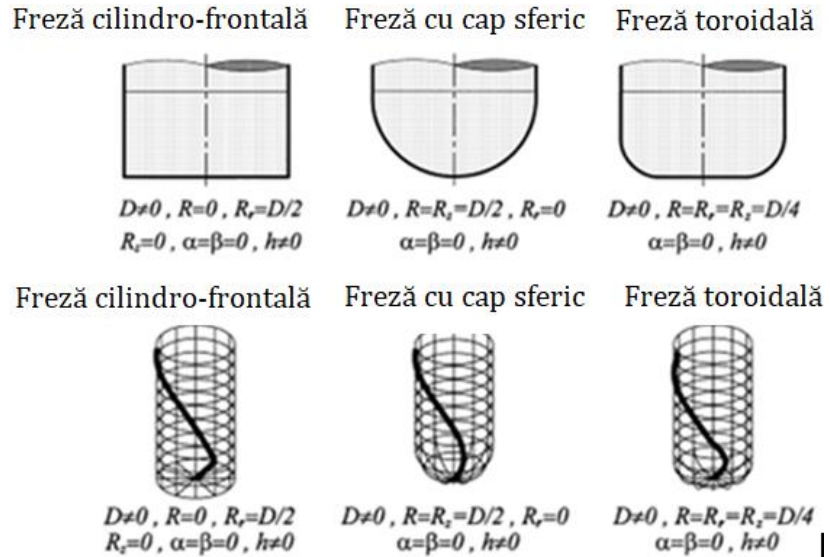


Fig. 1.2. Forma frezei cilindro-frontale, sferice și toroidale [2]

Tăișul se formează atunci când planul de așchiere ce se află perpendicular pe direcția de avans se intersectează cu scula. Acest plan conține suprafața normală și punctul de prelucrare. Figura 1.3a prezintă o freză sferică, o freză cilindro-frontală și o freză toroidală cu rază. Figura 1.3b arată vederile profilului sculei, deoarece sunt înclinate în raport cu suprafața normală. Figura 1.3c conține vederile din față ale frezelor înclinate și profilele lor de așchiere. Tăișul frezei sferice este circular, cu o rază fixă, fără flexibilitate.

Vickers și Quan [3] arată modul în care această rază eficientă poate fi utilizată în diferite situații. Cu toate acestea, la orice moment dat în timp, tăișul propriu-zis, prezentat în figura 1.3c, nu conține raza efectivă care conduce la anumite restricții. Pentru a obține raza efectivă, scula trebuie să se deplaseze perpendicular pe planul de așchiere pentru o distanță aproximativ egală cu raza sculei. Jun și Yang [4] susțin că așchiera cu tăișul inferior a dintelui are ca rezultat o rugozitate crescută a suprafeței în direcția de avans.

Pentru a evita problemele cu freza cilindro-frontală și pentru a asigura o variație a tăișurilor, se recomandă utilizarea frezelor toroidale. De asemenea, rugozitatea suprafeței în direcția avansului este mult mai mică decât cea asociată cu freza cilindro-frontală. Cu toate

acestea, raza de curbura variaza în functie de indicii R , r și B precum sunt arătați în figura 1.4.

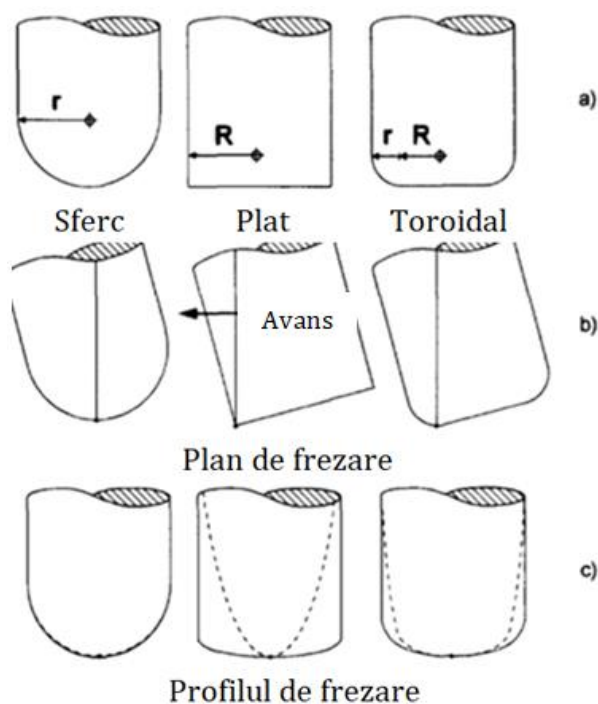


Fig. 1.3 Diferite tipuri de freze monobloc și profilele muchiiilor așchietoare [2]

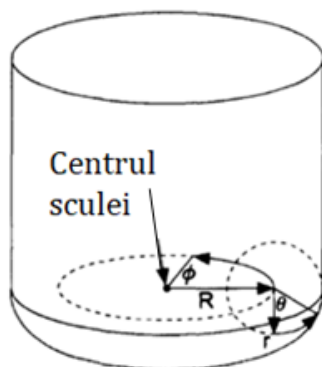


Fig. 1.4 Scula toroidală [2]

Cele trei freze în cauză sunt reprezentate în figura 1.5 și sunt înclinate de unghiul pozitiv în direcția avans. Această înclinare poate fi decisă ca la prelucrarea în cinci axe sau, precum și în prelucrarea în trei axe. În ambele cazuri, această înclinare ajută la reducerea înălțimii așchii prin aducerea curburii sculei mai aproape de curbura suprafeței.

Corpurile frezelor sferice, cilindro-frontale și toroidale în planul normal la direcția de prelucrare este: cerc, elipsă sau toroid.

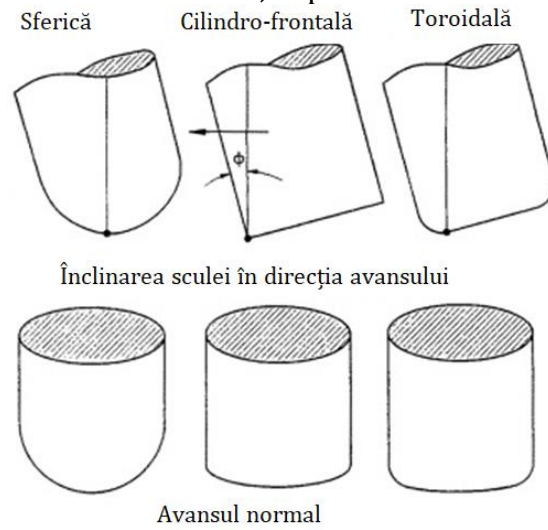


Fig. 1.5 Profilul sculei de-a lungul și în sensul normal de avans [5]

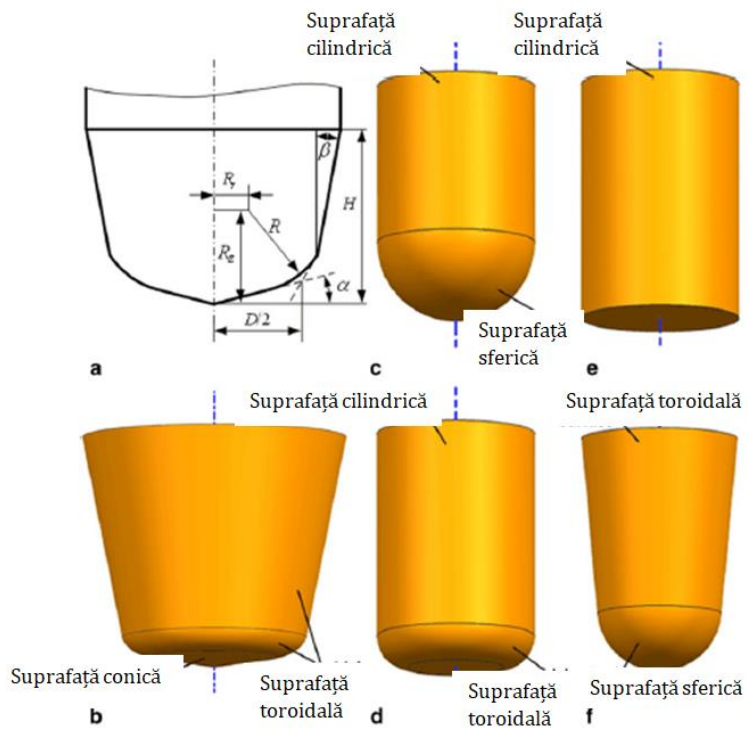


Fig. 1.6 Geometria diferitelor scule monobloc. a) Geometria frezei monobloc; b) Freza generală monobloc; c) Freza sferică; d) Freza toroidală; e) Freza cilindro-frontală; f) Freza sferică cu corp conic [6]

Structura de bază a unei freze toroidale poate fi împărțită în trei secțiuni: coada sculei, suprafața cilindrică și suprafața părții așchietoare. Freza toroidală este o ameliorare a sculei cilindro-frontale cu muchii ascuțite, care conectează tăișul de așchiere cu o singură latură pentru a forma o suprafață de tip toroid. În timpul prelucrării, suprafața de așchiere participantă nu este reprezentată de întregul toroid, ci doar o curbă caracteristică pe care funcționează tăișul.

Cele mai multe muchii de așchiere elicoidale, atât pe periferia lor cât și pe vârful lor, necesită șapte parametri $D, R, R_r, R_z, \alpha, \beta$ și respectiv h , pentru a distinge frezele cilindro-frontale de cele toroidale. Parametrii detaliați ai unei freze toroidale sunt cu $D, R, R_r, R_z, h \neq 0, \alpha = \beta = 0$. Trei zone definesc tăișul, unde parametrii cum ar fi: unghiul de imersie $\kappa(z)$, distanța radială $r(z)$, înălțimea elementară z , raza arcului R și unghiul elicoidal sunt contabilizați în mod diferit.

Conturul unei freze toroidale este derivat din sistemul generalizat al frezelor monobloc. Atribuind anumite valori celor șapte parametri $D, R, R_r, R_z, \alpha, \beta$ și h , definiți într-un instrument generic potrivit [7] poate fi obținută freza toroidală, susțin [8] și [9], în figura 1.7. Pentru a facilita calculele, două zone separate sunt împărțite în suprafața toroidală MN cu unghiuri elicoidale variabile și suprafața cilindrică constantă NS, asemănătoare cu frezele cilindro-frontale.

Viteza de așchiere variază de-a lungul flancului de așchiere din zona MN a unei freze toroidale, ceea ce afectează semnificativ predicțiile forței. Între timp, încărcarea așchiei, grosimea instantanee a așchiei nedeformate și componentele forței de așchiere trebuie identificate pentru a evalua forțele de așchiere care acționează pe fiecare tăiș al conturului frezei.

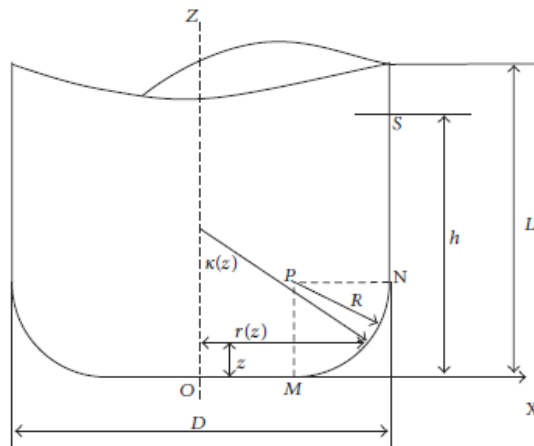


Fig. 1.7 Geometria frezei toroidale [10]

1.2. Stadiul actual privind procesul de frezare

În procesul de frezare, forțele de așchiere au efecte deosebite asupra analizei stabilității, predicției erorilor de prelucrare, calculului puterii de frezare, optimizării uzurii și optimizării parametrilor de așchiere. Prin urmare, este necesar să se stabilească un model adecvat pentru determinarea exactă a forțelor de așchiere.

Pe baza geometriei sculei, se stabilește un model de forță de așchiere semi mecanistă pentru a determina forțele de așchiere prin analizarea faptului că tăișul de așchiere este implicat în procesul de frezare. Pe axa sculei, tăișul de așchiere este discretizat în felii pentru a ține cont de efectul unghiului elicoidal asupra forțelor de așchiere, iar acțiunile de așchiere ale fiecărui element funcționează ca un proces de așchiere oblic.

Prin urmare, întreaga forță de așchiere exercitată asupra piesei de prelucrat poate fi obținută prin integrarea tuturor discurilor de-a lungul tăișurilor așchietoare. În procesul de calcul, judecăm mai întâi numărul de elemente care sunt angajate în așchiere, apoi adoptăm metoda unghiului de pornire/ieșire pentru a determina dacă discul de așchiere curent este implicat. Din cauza suprafeței frezei toroidale și a unghiului de înclinare dintre axul sculei și suprafața piesei de prelucrat, unghiurile de pornire și ieșire în straturi diferite, variază.

X' , Y' și Z' este un sistem de coordonate cu direcția pozitivă X' deviată de coordonatele absolute X cu unghiul λ , iar axa Z' este perpendiculară pe planul de rotație. Referindu-se la acest sistem de coordonate, segmentul de tăiș este considerat ca un instrument de așchiere cu un singur punct, astfel componentele forței de așchiere sunt produse în acest segment în direcția tangențială, radială și axială.

Figura 1.8 prezintă geometria explicită a frezei toroidale în procesul de frezare a suprafețelor plane.

Apariția vibrațiilor în timpul procesului de frezare determină calitatea scăzută a suprafeței prelucrate, și chiar dăunează arborelui mașinii sau sculei. Prin urmare, selectarea parametrilor de așchiere, bazați pe lobul de stabilitate prevăzut, are o importanță deosebită pentru a obține o rată ridicată de îndepărtare a materialului și o calitate ridicată a prelucrării.

Teoriile clasice pot realiza o bună predicție a stabilității prelucrării, pentru procesul de așchiere cu viteză relativ mare. Cu toate acestea, adâncimea de așchiere critică prevăzută de teoriile clasice de așchiere a metalelor este mult mai mică decât valorile experimentale la

viteze mici de aşchiere, deoarece amortizarea suplimentară generată în procesul de aşchiere cu viteză redusă va spori stabilitatea.

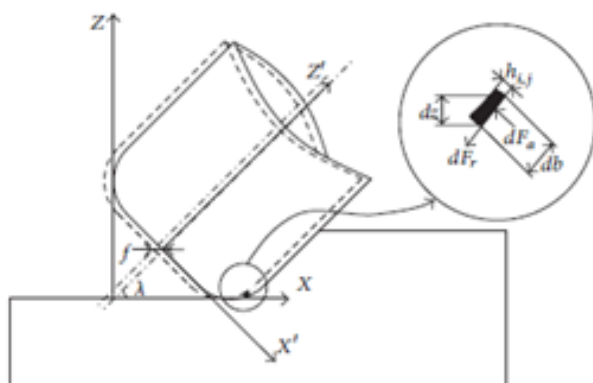


Fig. 1.8 Modelul geometric cu unghiul de avans [10]

În prelucrările pentru industria aeronautică, frezele toroidale sunt folosite frecvent pentru a lăsa o rază între suprafețele perpendiculare, astfel încât apar probleme dinamice [11]. Smith și Dvorak [12], au propus utilizarea unei freze toroidale, la un unghi de 90° pentru a evita ruperea și utilizarea unei freze sferice pentru frezarea razei de intersecție la viteze mici de aşchiere, profitând de efectul de amortizare a procesului.

Alți autori propun combinarea unei variații a vitezei de aşchiere cu viteze mai stabile, cu o creștere predeterminată a mișcării de avans în zonele ce permit asta [13], [14]. Consumând mai puțin timp în zonele compatibile, auto-excitația este redusă. Lee și colab. [15] au efectuat un studiu experimental al influenței orientării unei freze sferice în raport cu suprafața, utilizând frezarea în 5 axe pentru a obține rezultatele care reduc rugozitatea suprafeței.

O altă problemă se datorează geometriei complexe a frezelor toroidale. Atunci când caracteristicile dominante ale sistemului au o rigiditate dinamică scăzută în direcția axei sculei, cum ar fi caracteristicile mașinii-unelte, tipurile de suprafețe subțiri sau modurile de manipulare spațială [16], valoarea unghiului de înclinare al tăişului are o influență puternică asupra calității suprafeței.

Cu cât unghiul de înclinare este mai mic, cu atât mai mare este auto-excitatea acelor caracteristici [17]. Mai mult decât atât, frezele toroidale au un unghi variabil de înclinare al tăişului de aşchiere, precum și parametrii de aşchiere variabili [18].

În ceea ce privește modelele forțelor mecanice, parametrii de frezare pentru frezele toroidale sunt variabili datorită vitezei de așchiere și variației geometriei tăișului. Lamikiz [18], a demonstrat că o relație liniară între parametrii de așchiere și adâncimea de așchiere axială oferă rezultate mai bune decât un set de parametri constanți. Relația dintre acești factori și adâncimea de așchiere introduce o neliniaritate care trebuie rezolvată pentru a calcula diagrama zonelor de stabilitate utilizând un model liniar.

Modificarea condițiilor de așchiere, în vederea obținerii de forme avantajoase de așchii, se poate face cu unele restricții impuse de economicitatea prelucrării. Parametrii regimului de așchiere influențează forma așchiilor prin gradul de deformare suferit de stratul așchiat și așchie. Capacitatea de deformare depinde de temperatura produsă în zona de așchiere. Reducerea vitezei de așchiere duce la obținerea de așchii sfârâmate scurte. La viteze mari de așchiere se formează așchii de curgere cu rază de curbura din ce în ce mai mare. Modificarea avansului poate schimba esențial forma așchiei. Avansurile mici asigură așchii elicoidale lungi. Avansurile medii și mari duc la obținerea de așchii fragmentate, datorită creșterii gradului de deformare plastică.

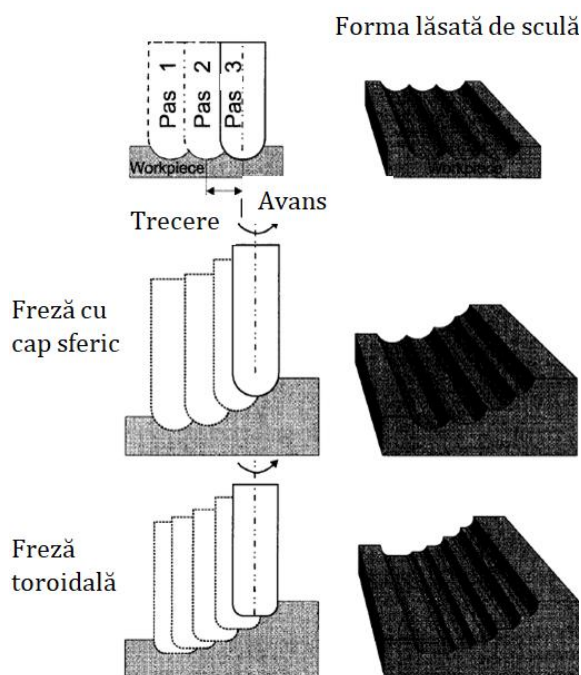


Fig.1.9 Formarea calotelor [19]

Ori de câte ori o suprafață curbată este prelucrată cu freza sferică, sau cu o freză toroidală este lăsată în urmă pe suprafață, forma calotei sferice egală cu raza sculei, precum este reprezentată în figura 1.9. La prelucrarea în 5 axe cele două rotații suplimentare pot înclina scula, astfel încât raza efectivă a sculei să se potrivească, sau să se apropie de cea a razei de curbura a suprafeței. Aplicând această metodă, suprafața dorită poate fi prelucrată mai îndeaproape, rezultând o suprafață mai bună.

Vickers și Quan [3], au derivat expresia pentru înălțimea calotei, h , pentru o freză cilindro-frontală, pe o suprafață concavă sub forma:

$$h=r=\frac{\cos \alpha (r_i - r_c \sin \phi) + \sin \phi \sqrt{r_c^2 \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha (2 r_i r_c \sin \phi - r_i^2)}}{\sin^2 \phi \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (1.1)$$

unde:

r_i este raza de curbură a suprafeței;

r_c = raza de tăiere;

ϕ = unghiul de înclinare;

a_c = jumătate din suprafața transversală;

α = jumătatea unghiului dintre punctele de contact a profilului sculei și a suprafeței.

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{a_c}{r_i} \quad (1.2)$$

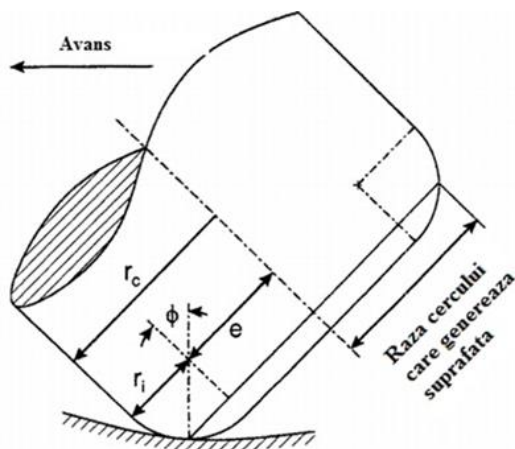


Fig.1.10 Cercul ce generează suprafața piesei de prelucrat folosind freza toroidală [5]

Bedi et al. [5] afirmă că această ecuație poate fi utilizată pentru a calcula înălțimea calotei pentru o freză toroidală, dacă se aproximează profilul frezei ca fiind o elipsă, precum este prezentat în figura 1.10, unde " r_i " este raza de trecere, iar " e " este distanța dintre centrul frezei

și centrul razei. Aceasta indică faptul că, în punctul de contact freza toroidală se comportă precum o freză cilindro-frontală cu rază.

Înălțimea asperității generată de către o freză sferică poate fi obținută cu ajutorul Ec (1.3) conform datelor din figura 1.11.

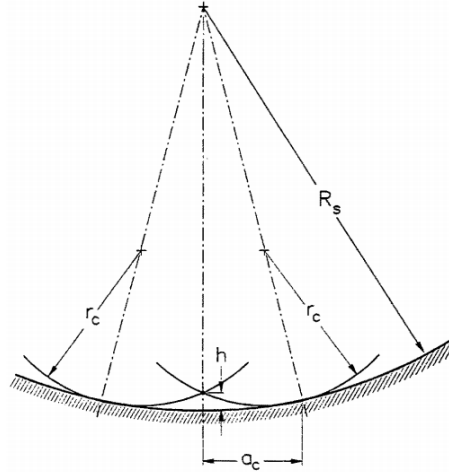


Fig. 1.11 Înălțimea asperității pentru freza sferică [5]

$$h = r_i (r_i - r_c) \cos \alpha - \sqrt{\left(r_c^2 - a_c^2 \left(\frac{r_i - r_c}{r_i} \right)^2 \right)} \quad [3] \quad (1.3)$$

Această ecuație poate fi utilizată pentru a aproxima înălțimea asperității produsă de către o freză toroidală dacă înlocuim "r_c" cu raza efectivă a frezei. Pentru o freză cilindro-frontală, raza efectivă este 0 în timp ce pentru freza toroidală $(r_i \sin\theta + e)/\sin\theta$, iar pentru frezele sferice raza efectivă este "r_c" și este independentă de unghiul de înclinare.

Pentru a demonstra cât de apropiată este aproximația, atunci când se utilizează Ec.(1.3), pentru o freză cilindro-frontală figura 1.12 prezintă înălțimile asperităților calculate folosind Ec.(1.1) și Ec.(1.3), utilizând următoarele date:

$$r_i = 110 \text{ mm}; r_c = 12.7 \text{ mm}; \phi = 10^\circ$$

Abscisa din figura 1.12 este avansul transversal normalizat generat de către diametrul frezei. În această figură se poate observa că, fiind avansul pe trecere de 1/4 din diametrul frezei, ambele prelucrări au aceeași înălțime a așchiei. Pentru un avans pe trecere de 0,4 mm din diametrul frezei, Ec.(1.3) are ca rezultat o înălțime a așchiei de numai 0,007 mm, fiind mai mică decât cea calculată din Ec.(1.1).

Atunci când se prelucrează o suprafață plană, suprafața razei de curbură, r_c , în Ec. (1.3) devine infinit, și înălțimea asperității, h se reduce la:

$$h = r_c \sqrt{r_c^2 - a_c^2} \quad (1.4)$$

Pentru acest caz, media aritmetică, R_a , folosită în mod obișnuit la descrierea rugozității suprafeței, poate fi derivată ca [3]:

$$R_a = \frac{1}{a_c} \left[-\sqrt{(r_c^2 - (r_c - y)^2)(r_c - y) + r_c^2 \gamma} \right] \quad (1.5)$$

unde:

$$y = \frac{1}{a_c} \left[h a_c + \frac{1}{2} a_c (r_c - h) - \frac{1}{2} r_c^2 \beta \right];$$

$$\beta = \sin^{-1} \frac{a_c}{r_c};$$

$$\gamma = \cos^{-1} \frac{r_c - y}{r_c}.$$

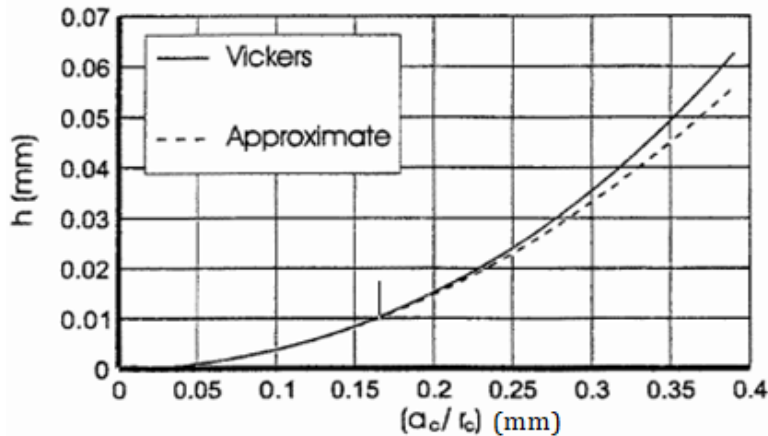


Fig.1.12 Diagrama de calcul a înălțimii asperităților pentru o freză cilindro-frontală [5]

Bedi et al. [5], prezintă în figurile 1.13, 1.14 și 1.15 înălțimea asperității în cazul celor trei tipuri de frezări care utilizează o înclinare de 10° , 5° și $2,5^\circ$. Aceștia au folosit Ec.(1.1) pentru a calcula înălțimea asperității generată în urma prelucrărilor cu freza cilindro-frontală și Ec.(1.3) pentru a afla înălțimea asperității în urma prelucrării cu freza sferică și cea toroidală. În timp ce așchiile generate prin prelucrarea cu freză sferică sunt independente de unghiul de înclinare θ , așchiile produse, atât de freza cilindro-frontală, cât și de cea toroidală sunt necontestabil dependente de unghiul de înclinare.

Așchiile generate de freza toroidală sunt mai mici în cazul în care unghiul de înclinare este mai mic, dar trebuie ținut cont de domeniul lor de aplicare. În ceea ce privește curbura suprafeței, aceasta este influențată de acest unghi, astfel doar suprafețe cu raze mari de curbură pot fi prelucrate la valori mici ale acestui unghi.

Este totuși de remarcat în figurile de mai jos, că limita inferioară a razei de curbură a suprafeței, este mai puțin sensibilă la unghiul de înclinare pentru freza toroidală în comparație cu freza cilindro-frontală. Pentru unghiurile de înclinare $\theta=2,5^\circ$, 5° și 10° , limitele inferioare ale frezei cilindro-frontale sunt de 291, 146 și, respectiv, 73 mm, în timp ce pentru freza toroidală sunt 117, 63 și respectiv 35 mm. Din figurile 1.13, 1.14, 1.15, devine clar că, pentru același unghi de înclinare și dimensiune a frezei, freza toroidală produce așchii care, în înălțime, se află între cele generate de sferică și cilindro-frontală [5].

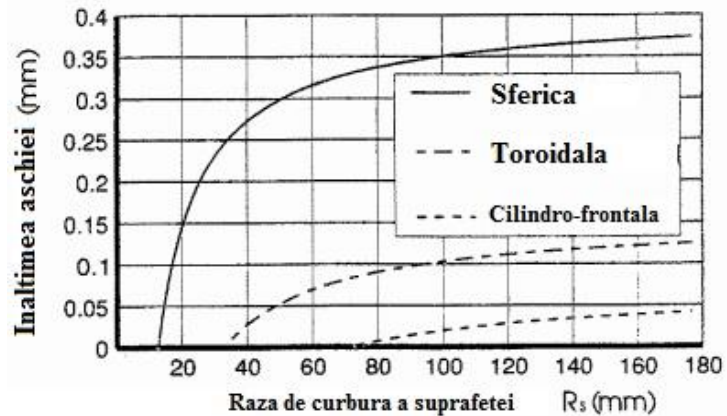


Fig. 1.13 Înălțimile asperităților produsă de cele trei freze pentru $\theta = 10^\circ$ [5]

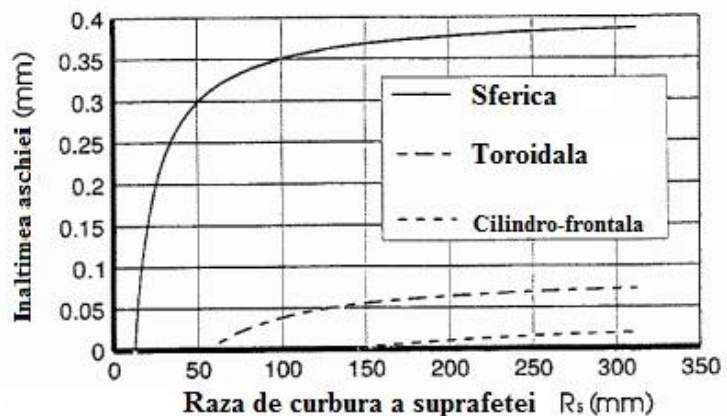


Fig.1.14 Înălțimile asperităților produse de cele trei freze pentru $\theta = 5^\circ$ [5]

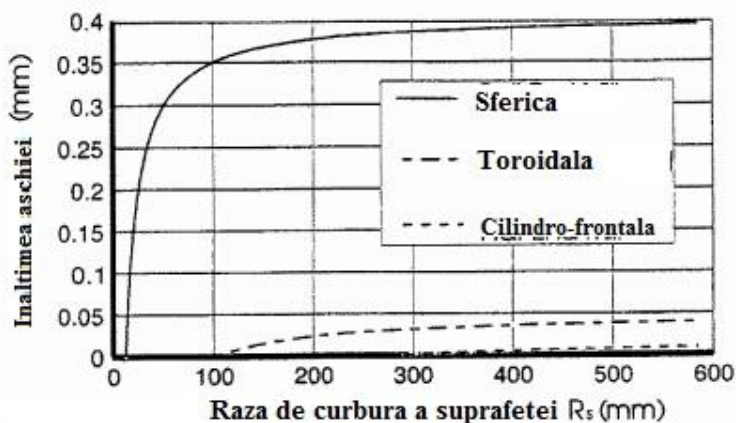


Fig. 1.15 Înălțimile asperităților produse de cele trei freze pentru $\theta = 2,5^\circ$ [5]

În lucrările Li et al, [20], Bedi et al., [5], Vickers & Guan, [3], Baptista & Simoes [21], și Kayal [22], sunt discutate câteva comparații între frezele cilindro-frontale, sferice și cele toroidale având ca scop obținerea unei calități mai bune a suprafețelor matrițelor.

Bedi et al. [5], afirmă faptul că înălțimea asperităților produse de către frezele toroidale se situează undeva între înălțimea asperităților produse de frezele sferice și cele cilindro-frontale. Acesta mai afirmă că, rugozitatea obținută cu frezele cilindro-frontale este mult mai mare decât rugozitatea obținută cu cele sferice sau toroidale, acestea din urmă având valori apropiate.

1.3. Strategii de prelucrare a suprafețelor complexe

Vickers [23], a descris o metodă de prelucrare în cinci axe a suprafețelor curbe complexe cu o freză cilindro-frontală. În metoda lor, scula este înclinată în direcția de avans, ceea ce permite programatorului să selecteze o rază eficientă de frezare pentru o anumită suprafață.

Jensen [24], a extins această lucrare prin schimbarea unghiului de înclinare a sculei în fiecare punct de pe suprafață. Forma frezei a putut fi adaptată mai mult la topologia suprafeței. Lucrarea independentă de Jensen [24] și Bedi [25], a sporit flexibilitatea tehnicii prin extinderea conceptului de potrivire a curburii la freza toroidală.

Figura 1.16 prezintă o secțiune transversală prin axa sculei unei freze toroidale înclinate care prelucrează o suprafață convexă. Punctele

de tangentă dintre freză și suprafață formează un cerc continuu atunci când axa sculei este coliniară cu suprafața normală. Această figură arată că normalele de suprafață la T_1 , T_2 și P sunt coliniare cu raza de colț și axa sculei.

Când aceste condiții sunt îndeplinite, centrul sferei formează un triunghi isoscel cu punctele T_1 și T_2 care pot fi folosite pentru a calcula poziția corectă a centrului sculei. În această lucrare, centrul sculei C , este definit ca punctul de intersecție al liniei care unește cele două centre ale arcurilor colțului și axa sculei. Plasarea adecvată a frezei poate fi determinată prin calcularea razei spațiului sculei folosind următoarea ecuație:

$$R_{ts} = (R-r) \cos\left(\frac{\beta}{2}\right). \quad (1.6)$$

Diametrul cercului de contact dintre cerc și freză, numit diametrul efectiv D_e , poate fi calculat prin:

$$D_e = R \left(\frac{D-2r}{R-r} \right), \quad (1.7)$$

În consecință, pasul unghiular încrucișat maxim va fi:

$$\beta = 2 \sin^{-1} \frac{D_e}{2R}. \quad (1.8)$$

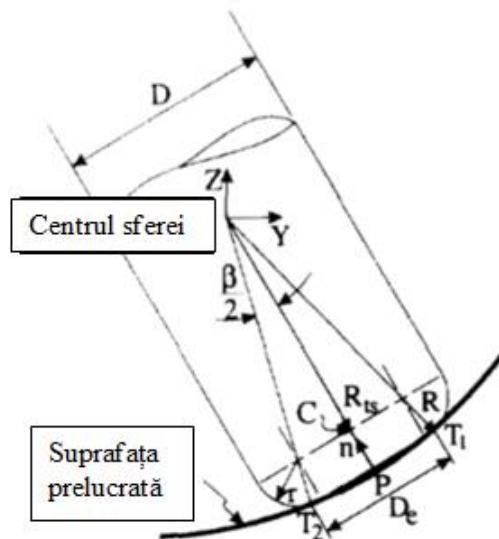


Fig. 1.16 O freză toroidală care prelucrează o suprafață convexă în care tangentă este un cerc complet de diametru D_e [26]

O suprafață sferică convexă poate fi frezată cu același procedeu în cinci axe descris mai sus. Cu toate acestea, în acest caz, procedeul necesită un tip special de freză cu cap radial, numită freză toroidală. O secțiune transversală a poziționării corecte a unei freze toroidale care prelucrează o suprafață concavă este prezentată în figura 1.17.

Freza toroidală utilizată în experimente a constat din două plăcuțe de carbură circulară cu rază r plasate într-un suport de scule cu diametrul D . Când scula se rotește, plăcuțele generează o suprafață de aşchiere toroidală. Cu condiția ca mijlocul frezei să nu fie plin, este posibil să se aşchieze o suprafață sferică pe partea interioară a generatoarei. Trebuie îndeplinite două condiții pentru cercul dorit de tangență dintre sculă și suprafața convexă.

Normalele de suprafață la T_1 , T_2 și P sunt colineare cu razele plăcuțelor și cu axa sculei. Când aceste condiții sunt îndeplinite, centrul sferei formează un triunghi isoscel cu centrele plăcuțelor circulare, care pot fi folosite pentru a calcula poziția corectă a sculei.

Presupunând că scula are două plăcuțe, centrul sculei este definit ca punctul de intersecție al liniei care unește cele două centre ale plăcuțelor și axa sculei.

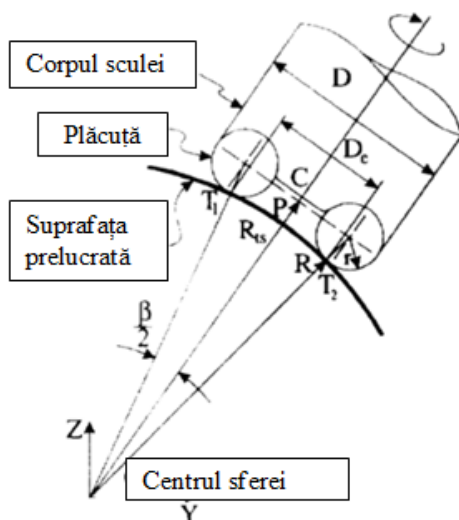


Fig. 1.17 Freza toroidală la generarea unei suprafețe concave [26]

Strategia de poziționare cunoscută și sub numele de „metoda Strutz” în urma căreia scula este înclinată, este cea mai frecventă utilizată în 5 axe. Aceasta a fost implementată în mai multe pachete CAM și s-a dovedit a fi mult superioară față de procedeul folosit cu freza

sferică pe mai multe rânduri. Din aceste motive, este cel mai adecvat etalon pentru alte strategii de poziționare a sculei în prelucrările realizate în 5 axe.

Figura 1.18. arată modul în care metoda de înclinare a sculei funcționează pentru o freză toroidală. Axa sculei este înclinată în direcția de avans cu un unghi ϕ . Acest unghi de înclinare este adesea numit „unghiul Strutz”. Poziția sculei, t_{pos} este calculată, astfel încât scula să fie plasată în contact tangențial cu suprafața în punctul cc.

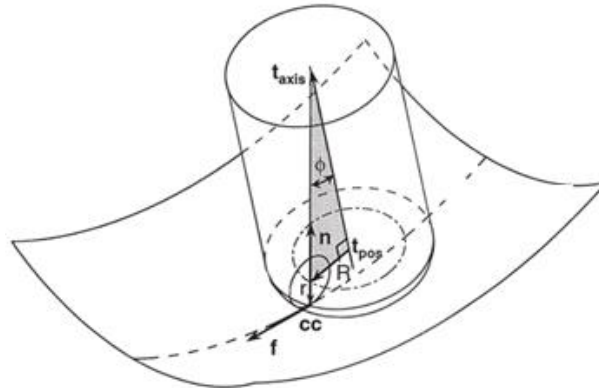


Fig. 1.18 Poziționarea unei freze toroidale înclinate [26]

Metoda axei principale este o modificare a metodei de înclinare a sculei. A fost formulată pentru a explica curbura suprafeței. În metoda axei principale, informațiile despre curbura sunt încorporate în poziția sculei prin modificarea planului axei sculei și prin calcularea unghiului de înclinare pe baza curburii la punctul de contact al sculei, așa cum se arată în figura 1.19.

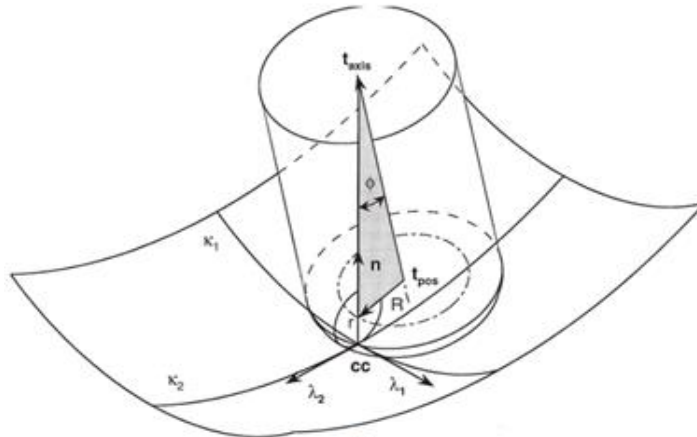


Fig.1.19 Metoda axei principale [26]

Rao și colab. [2], [27], au arătat că înclinarea sculei poate fi optimizată prin înclinarea sculei în direcția curburii minime, astfel încât curbura minimă a sculei să fie egală cu curbura maximă a suprafeței.

Strategiile de poziționare a sculelor discutate anterior, încearcă să maximizeze eliminarea materialului, luând în considerare geometria locală a unui punct de pe suprafață și a unui punct pe sculă.

În 1995, Warkentin și colab. [26], au propus o strategie de poziționare a sculei numită Multi Point Machining (MPM), care se potrivește geometriei frezei cu suprafața, prin poziționarea sculei într-o manieră care maximizează numărul de puncte de contact dintre suprafață și sculă. Autorii au demonstrat potențialul ideii prin utilizarea acesteia pentru a prelucra o suprafață sferică, practic fără alte elemente, într-o fracțiune din timpul necesar tehnicilor convenționale de prelucrare.

În 1998, Warkentin și colab. [28], au discutat despre prelucrări în mai multe puncte ale suprafețelor concave generale. Prin experimentare s-a constatat că, în general, au existat două puncte de contact între sculă și o suprafață concavă. Aceste puncte sunt aproximativ simetrice în raport cu direcția curburii minime a suprafeței, așa cum se arată în figura 1.20.

Distanța w între punctele de contact cc_1 și cc_2 este desemnată de distanța de separare.

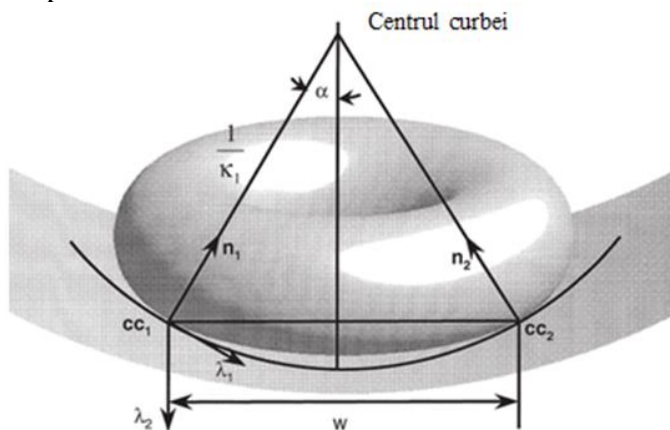


Fig. 1.20 Specificarea unei poziții a unui tăiș toroidal prin MPM [26]

Figura 1.21a prezintă freza în contact tangențial cu punctele cc_1 și cc_2 . Liniile formate de vectorii normali, n_1 și n_2 , la punctele de contact ale sculelor, cc_1 și cc_2 , trec prin centrele plăcuțelor în punctele c_1 și c_2 și intersectează axa sculei în punctele p_1 și p_2 .

Reținem că p_1 și p_2 ar fi în aceeași locație, dacă suprafața era simetrică. Cu toate acestea, pentru majoritatea suprafețelor nu este cazul. Prin urmare, poziția sculei va fi calculată fără a se presupune că p_1 și p_2 se află în aceeași locație.

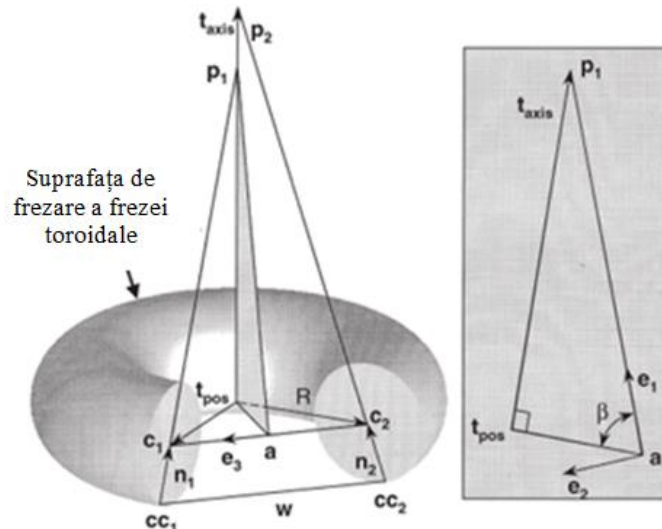


Fig. 1.21 Geometria contactului multi-punct [26]

Spre deosebire de celelalte strategii de poziționare, geometria așchii în MPM este influențată de intervalul de trecere al sculei și de distanța de separare.

Efectele ambelor influențe pot fi combinate într-un singur parametru, și anume raportul de separare (w/χ). Vor fi produse diferite tipuri de așchii în funcție de raportul de separare, așa cum se arată în figura 1.22. Dacă raportul de separare este egal cu unu, așchiile se vor forma numai între punctele de contact ale frezei.

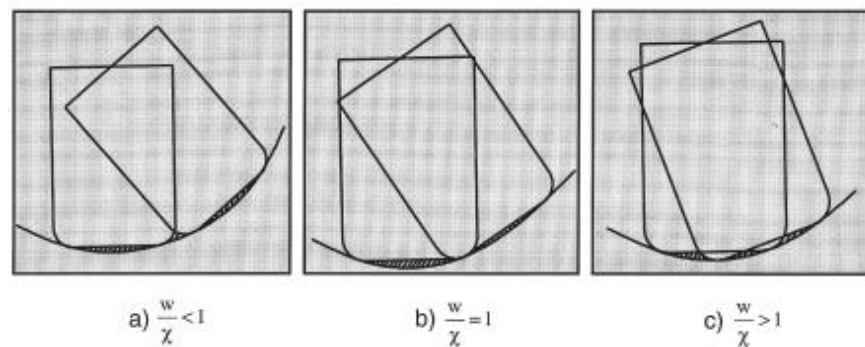


Fig. 1.22 Efectul raportului de separare în prelucrarea în mai multe puncte [29]

Dacă raportul de separare este mai mic decât unu, se vor forma aşchiile între punctele de contact ale aşchierii şi între poziţiile sculei.

În cele din urmă, dacă raportul de separare este mai mare decât unu, aşchiile rezultate vor fi produse datorită combinării celor două mecanisme de formare a aşchiei.

Gray J.P. et al. [29], afirmă faptul că, pentru a determina poziţia sculei printr-un calcul este nevoie ca raza de rulare să fie determinată, astfel, acesta a prezentat în figura 1.23 un exemplu în trei paşi pentru o suprafaţă concavă.

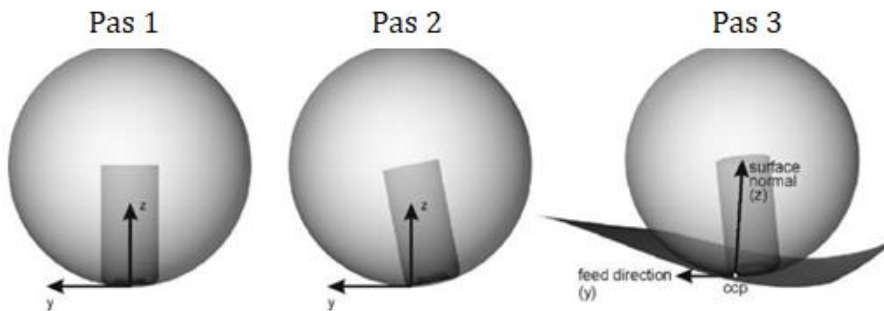


Fig. 1.23 Determinarea poziţiei sculei [29]

În zilele noastre, cercetătorii efectuează studii active privind calitatea suprafeţei introduse prin procesul de frezare al diferitelor orientări ale sculelor. Toh a studiat în frezarea de mare viteză a oţelului întărit şi a obţinut o forţă de aşchiere mare atunci când a utilizat un unghi de înclinare negativ şi rugozitatea minimă a suprafeţei atunci când acesta a fost pozitiv [30].

Gani a stabilit un model geometric al procesului de prelucrare şi a discutat influenţa orientării sculei asupra procesului de aşchiere în frezarea în cinci axe, iar rezultatele au fost verificate experimental [31]. Chen a investigat teoria de frezare în mai multe axe şi a arătat efectul unghiului de înclinare a piesei asupra morfologiei suprafeţei, rugozităţii suprafeţei, micro hidratării şi încărcarea reziduală a oţelului [1].

Daymin a obţinut cea mai bună finisare a suprafeţei atunci când unghiul de înclinare a piesei de prelucrat este de 25° şi tensiunea medie la compresiune a scăzut uşor la un unghi mai mare al piesei de prelucrat [32]. Ko a considerat forţa de aşchiere, rugozitatea suprafeţei şi uzura sculei ca fiind în parametri optimi, atunci când unghiul de înclinare al piesei de prelucrat este de 15° [33].

Aspinwall a studiat influenţa orientării sculei şi a unghiului de înclinare a piesei pe integritatea suprafeţei, rezultatele au arătat o

orientare orizontală descendentă, oferind o rugozitate mai bună a suprafeței. Forța de așchiere și uzura sculei a obținut cea mai mare presiune reziduală de compresie atunci când piesa s-a prelucrat fără unghi de înclinare [34].

Kalvoda a indicat faptul că unghiul de înclinare pozitiv sau negativ a avut un efect redus asupra încărcării reziduale și au furnizat cea mai bună rugozitate a suprafeței atunci când ambele unghiuri au fost negative, dar cel mai rău este atunci când nu există o înclinare [35].

LAN Wei-wen a investigat reglarea unghiului de înclinare dintre axa sculei și suprafața piesei de prelucrat ce poate îmbunătăți în mod eficient condițiile de așchiere, reduce rugozitatea suprafeței și îmbunătățește calitatea suprafeței piesei de prelucrat [36].

Min Fu a studiat reglarea unghiului de înclinare ce poate optimiza condițiile de așchiere, reduce rugozitatea suprafeței și poate asigura cea mai bună calitate a suprafeței atunci când unghiul dintre axa sculei și suprafața verticală a piesei de prelucrat este de 15° [37].

Pentru același traseu de sculă se poate alege adesea o varietate de orientări ale sculelor datorită caracteristicilor sale geometrice. Unghiul de avans și unghiul de înclinare sunt adesea folosite pentru a descrie orientarea sculei, în timp ce se află în programarea efectivă a controlului numeric și postprocesare.

Factorul care influențează poziția de contact de așchiere nu este doar unghiul de înclinare, ci este și unghiul de rotație. Aici sunt patru orientări tipice ale sculei, așa cum se arată în figura 1.24.

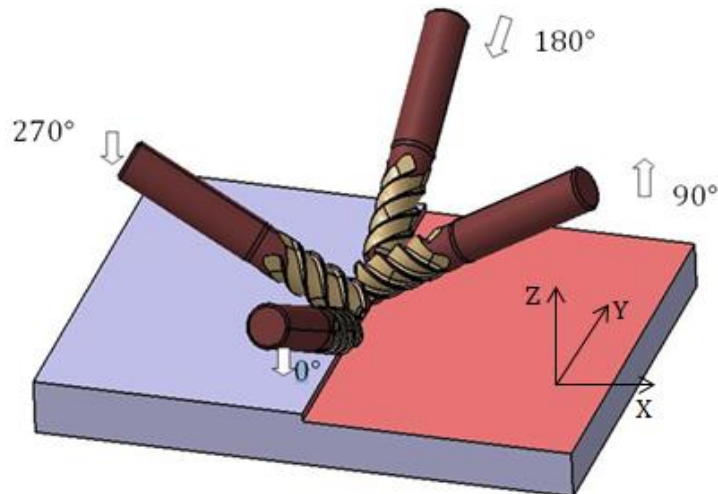


Fig. 1.24 Patru orientări tipice ale sculei [38]

Coordonatele X, Y și Z prezentate în figura 1.24 descriu direcția pasului, direcția de avans și respectiv axa Z a mașinii. Orientările sculelor a, b, c și d reprezintă înclinarea de 30° , unghiul de rotație de 0° , 90° , 180° și, respectiv, 270° de la axa sculei toroidale. Ușor de observat unghiul de înclinare a orientării sculei a și c este 0° , iar unghiul de înclinare al b și d este 0° .

Rezultatele indică faptul că orientările sculei au o mare influență asupra rugozității suprafeței, morfologiei suprafeței și încărcării reziduale, dar puțin asupra micro-hidratării.

Integritatea optimă a suprafeței este obținută atunci când unghiul de rotație se situează în limitele de 0° și 90° , iar unghiul de înclinare este cuprins între 30° și 60° în funcție de rezultatele încercărilor.

Calcularea exactă și alegerea unghiului de înclinare între axul sculei și suprafața piesei de prelucrat nu poate numai să elimine coliziunea, ci și să îmbunătățească condiția de așchiere, dar și să reducă forțele verticale de așchiere. Pe baza metodei propuse, mai multe ilustrații ale zonei de angajare sunt date cu condiția ca adâncimea axială să fie 1mm și șase unghiuri de înclinare să fie 5° , 10° , 12° , 15° , 18° și, respectiv, 20° . Parametrii sculei sunt ilustrați în partea de configurare experimentală. Din figura 1.25 se poate observa că diferite strategii de așchiere au diferite limite de contact care afectează zonele de lucru.

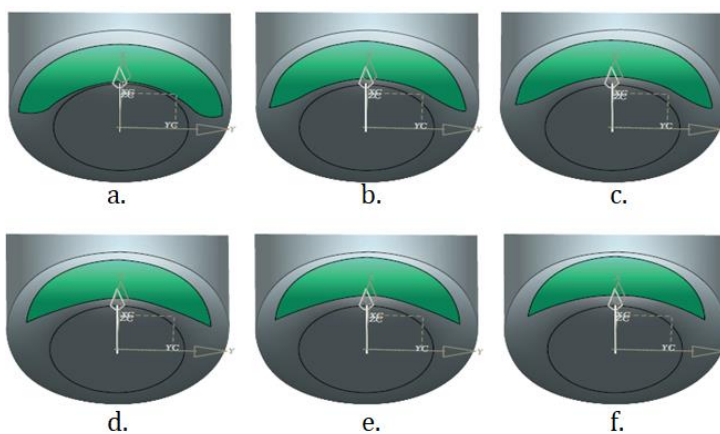


Fig. 1.25 Zona de intersecție dintre sculă și piesă la unghiuri de înclinare diferite (a. unghi 5° , b. unghi 10° , c. unghi 12° , d. unghi 15° e. unghi 18° , f. unghiul 20°) [39]

Obținerea unor rezultate favorabile din punct de vedere al rugozității suprafeței prelucrate, în cazul prelucrărilor cu freze toroidale, este condiționată nu doar de alegerea valorilor optime

individuale ale parametrilor de reglaj ai acestui proces (turația sculei și unghiul de înclinare al axei sculei), ci și de corelarea corespunzătoare a valorilor acestora care să asigure valoarea optimă a parametrului de proces reprezentat de viteza efectivă de așchiere.

1.4. Stadiul actual privind modelarea rezultatelor experimentale

Având în vedere că procesul de așchiere ocupă o pondere însemnată în ansamblul metodelor de fabricație, cercetările privind optimizarea proceselor de prelucrare mecanică prin așchiere necesită o dezvoltare continuă.

Lucrarea [40], definește cercetarea experimentală ca fiind o încercare de a menține un control asupra tuturor factorilor care pot afecta rezultatul unui experiment, în scopul de a determina sau a anticipa ce se va întâmpla. Modelarea geometrică a procesului de așchiere a fost analizată pe parcursul timpului prin utilizarea metodelor analitice sau a celor discrete. Metodele discrete se aplică cu precădere în cazul unor geometrii foarte complexe și sunt destul de lente în comparație cu metodele analitice [41].

Principalele faze ale elaborării unui model matematic sunt prezentate în lucrarea lui Cosma [42], ca fiind următoarele: cunoașterea realității asupra procesului studiat, construirea propriu-zisă a modelului, confruntarea modelului cu realitatea și experimentarea modelului.

Lucrările de referință identificate care utilizează metode discrete sunt: [43] care utilizează metoda vectorială, [44] în care geometria piesei este îmbunătățită prin utilizarea operațiilor booleene, [45] în vederea detectării și eliminării coliziunilor la prelucrările pe mașini cu comandă numerică, [46] care stabilește lungimea tășului aflat în contact, [47] unde este determinată grosimea așchii sau [48] în care este estimată cantitatea de material îndepărtat.

În cazul metodelor analitice, informațiile referitoare la geometria pieselor este folosită împreună cu poziția relativă a sculei, în vederea analizei și simulării procesului [41]. Câteva din lucrările importante care au utilizat metode analitice sunt: [49] care prezintă câteva tehnici de modelare a suprafețelor cu geometrie complexă, [50] unde este analizat procesul de prelucrare a suprafețelor complexe utilizând trei grade de libertate, [51], [52], și [53] propun metode

analitice în vederea simulării mișcărilor sculei în cinci axe, [54] analizează modelarea analitică a grosimii așchii la frezarea cu freze cu cap sferic a suprafețelor complexe, [55] în care este estimată adâncimea de așchiere prin poziționarea axei sculei coincident cu normala la suprafață în acel punct, [56] unde sunt prezentate pe baza unui model de simulare geometrică atât modelarea angajării tăișului cât și textura suprafeței prelucrate.

Pe plan național, lucrarea [57] folosește o metodă analitică în vederea determinării rugozității suprafeței prelucrate prin așchiere.

Un număr însemnat de lucrări, precum [1], [58], [59], [60], [61], [62], folosesc modelarea geometrică în sensul de a obține modele grafice care în fond sunt ecuații matematice ale suprafețelor geometrice și interacțiunile dintre ele, dezvoltate ca aplicații software.

La nivel național și internațional lucrări precum [63] și [64], care au ca tematică modelarea rezultatelor, utilizează un procedeu de modelare matematică a datelor experimentale, având la bază metoda celor mai mici pătrate a cărei metodologie este prezentată în lucrări precum [65], [66], [67] și [68].

Extinderea cercetărilor în direcția obținerii unor modele cu ajutorul cărora poate fi estimată calitatea suprafeței a fost posibilă datorită studiilor regăsite în lucrările autorilor [69] și [70] conform cărora, calitatea suprafeței prelucrate este foarte importantă în stabilirea productivității prelucrărilor.

Buzatu în lucrarea sa [71] prezintă câteva aspecte teoretice originale de modelare a rugozității obținută prin superfinisare bazate pe productivitatea prelucrării, exprimată prin volumul de material prelevat în unitate de timp.

În lucrările [72] și [73] este prezentat un model matematic al durabilității sculei și al rugozității suprafeței pentru operațiile de strunjire.

În lucrarea [74], autorul analizează pe baza unei modelări matematice a datelor experimentale obținute, variația rugozității suprafețelor prelucrate prin așchiere în funcție de o serie de factori, precum parametrii regimului de așchiere și acoperirea sculei așchietoare.

În lucrarea [75], autorii analizează prelucrabilitatea materialului, utilizând metoda strunjirii frontale prin prisma analizei valorii diametrului suprafeței prelucrate în condițiile limitării uzurii sculei la valoarea 0,2 mm. Totodată, în urma modelării matematice a rezultatelor experimentale, se concluzionează că nu există interacțiune între

grupurile de doi sau trei factori independenți luați în considerare (turația, avansul și diametrul găurii executate în semifabricat).

Metoda de modelare matematică a datelor experimentale poate fi utilizată și în cadrul observațiilor asupra altor fenomene, care apar în procesul de așchiere, cum ar fi spre exemplu estimarea uzurii sculei așchietoare [76]. De asemenea, metoda modelării matematice se poate aplica nu doar asupra unui singur parametru al așchierii, ci și global asupra întregului proces, așa cum este prezentat în lucrarea [77].

În ultimii ani, rețelele neuronale artificiale s-au dovedit a fi unele dintre cele mai puternice tehnici de modelare a datelor, fiind utilizate cu succes în diferite domenii de inginerie pentru modelarea relațiilor complexe dificil de descris. Rețelele neuronale artificiale au fost aplicate pe scară largă în modelarea multor operațiuni de prelucrare, cum ar fi strunjirea, găurirea și frezarea [78]. Mai mulți cercetători au folosit rețelele neuronale artificiale pentru a prezice influența parametrilor de prelucrare asupra ratei de producție, a costului de producție sau pentru a prezice influența parametrilor de prelucrare asupra rugozității suprafeței [79], [80], [81], [82], [83], [84], [85], [86], uzura sculei [87], [88], sau forța de așchiere [78], [89], [90], [91], [92].

În ceea ce privește metoda Taguchi, aceasta este o metodă statistică elaborată de către Genichi Taguchi, cu scopul de a îmbunătăți calitatea produselor fabricate, având aplicabilitate în inginerie, biotehnologie, marketing și publicitate. Taguchi recomandă un proces din trei etape: proiectarea sistemului, proiectarea parametrilor și proiectarea toleranțelor. În timp ce proiectarea sistemului ajută la identificarea nivelurilor de lucru al parametrilor de proiectare, prin aceștia din urmă, se caută identificarea nivelurilor de lucru care duc la obținerea celor mai mari performanțe ale produselor/proceselor studiate. În final, este selectată condiția optimă astfel încât factorii care nu pot fi controlați precum vibrațiile, să producă variații minime în performanța sistemului. În proiectarea parametrilor, instrumentele cele mai importante sunt matricele ortogonale, analizele de variație și de zgomot.

Lucrări relevante în care s-au efectuat studiile în baza acestei metode aparțin lui [93], [94], [95], [96], [97], [98], [99], [100], [101] și de asemenea lui [102].

Creșterea performanțelor proceselor de așchiere constituie în continuare un element de atracție pentru cercetători, în vederea elaborării diferitelor modele, care să caracterizeze aceste procese. Suplimentar, comparând procesele de frezare cu alte tipuri de freze

decât cele toroidale, procesele de frezare cu frezele toroidale prezintă o serie de particularități, ceea ce face ca modelele existente să trebuiască adaptate sau înlocuite în totalitate. Acest lucru se datorează complexității procesului de frezare cu frezele toroidale în raport cu alte procedee de frezare, prin apariția unor parametri care influențează acest proces și implicit rezultatele obținute.

1.5. Concluzii de capitol

Freza toroidală este o îmbunătățire a sculei cilindro-frontale cu muchii ascuțite, care unește suprafața de așchiere laterală cu suprafața de așchiere frontală pentru a forma o suprafață de toroid. Așadar, suprafața de așchiere nu este reprezentată de întregul toroid, ci doar o curbă caracteristică pe care funcționează tăișul.

Obținerea unor rezultate favorabile din punct de vedere al rugozității suprafeței prelucrate, în cazul prelucrărilor cu freze toroidale, este condiționată nu doar de alegerea valorilor optime individuale ale parametrilor de reglaj ai acestui proces (turația sculei și unghiul de înclinare al axei sculei), ci și de corelarea corespunzătoare a valorilor acestora care să asigure valoarea optimă a parametrului de proces reprezentat de viteza efectivă de așchiere.

Cercetările prezentate anterior arată lipsa unor abordări detaliate în domeniul prelucrării suprafețelor curbe complexe cu frezele toroidale, concretizând necesitatea abordării cercetării pentru acest tip de freze. De asemenea, acest subiect, necesită dezbateri ale tehnicii experimentale și de modelare a procesului, precum și realizarea unei baze de date experimentale. Toate acestea sunt coroborate și valorificate cu ajutorul unui soft bazat pe generarea rețelelor neuronale ce este capabil de a prezice calitatea suprafețelor prelucrate.

2. CONTRIBUȚII TEORETICE PRIVIND PROCEDEUL DE FREZARE CU FREZA TOROIDALĂ

2.1. Strategii de frezare specifică. Studiu de caz

Frezarea este operația de prelucrare mecanică prin așchiere pe mașini-unelte de frezat, cu scule numite freze. A devenit o tehnologie cheie în fabricarea de matrițe, precum și în componentele aerospațiale și auto. Datorită flexibilității procesului de frezare și a diferitelor variabile implicate, optimizarea procesului de frezare a devenit un aspect fundamental pentru a obține o productivitate și o calitate mai ridicată. Prin urmare, este necesară cunoașterea precisă a procesului de frezare pentru definirea eficientă a operației de prelucrare.

Strategiile de prelucrare sunt asumate de către programator, și deși nu sunt foarte frecvente, câteva pachete software comerciale includ unele dintre ele. Cu toate acestea, studiind literatura de specialitate, nu există lucrare în literatura științifică sau tehnică în care utilizarea strategiilor de prelucrare este justificată din punct de vedere analitic.

O studiere a literaturii științifice, relevă faptul că există multe publicații legate de modelarea forței de prelucrare pentru frezarea laterală, așa cum descriu lucrările prezentate de Wan et. al [103] sau Dang et. al [104]. Cu toate acestea, pentru această cercetare a fost dezvoltat un nou model de către Perez et. al [105]. Acest model se bazează pe grosimea așchii și ne permite să estimăm forțele de așchiere la prelucrarea geometriei variabile. Este posibil să se determine, în fiecare moment, poziția reală a sculei de frezat, grosimea așchii și variația unghiurilor de intrare/ieșire ale tăișului de frezare în piesa de prelucrat.

Unele lucrări se referă la strategiile de prelucrare prin frezare, dar numai din punctul de vedere al definirii strategiilor de traiectorii a sculelor pentru a îmbunătăți calitatea suprafeței prelucrate. Zhang [106], Ramos [107] și Toh [108] sunt câteva exemple de cercetare în acest domeniu.

Fiabilitate, productivitate și rentabilitate sunt cerințele privind așchiera metalelor și sunt din ce în ce mai exigente. În același timp, trebuie garantate rezultate de înaltă calitate. Pentru aceasta, mașinile-unelte moderne și sistemele CAD/CAM fac posibile procedee de frezare tot mai eficiente. Frezarea dinamică este un exemplu reprezentativ,

aceasta reduce timpii de prelucrare, crescând în același timp fiabilitatea, durabilitatea și volumul de material așchiat.

Pentru a putea selecta o strategie optimă de frezare, precum și freza din carbură metalică potrivită, trebuie determinați mai întâi factorii relevanți pentru cazul de prelucrare. Pentru frezarea dinamică, trebuie să fie îndeplinite următoarele condiții de bază: o piesă de prelucrat, respectiv un material, care poate fi prelucrat(ă) dinamic, un sistem CAD/CAM corespunzător, o mașină de frezare dinamică, precum și o sculă adecvată.

a. Materialul prestabilește parametrii de așchiere pentru sculele de frezare. Geometria piesei determină strategia, lungimea tăișului și diametrul sculei.

b. Sistemele CAD/CAM, previn așchiera în plin, precum și coliziunile și calculează toți parametrii importanți.

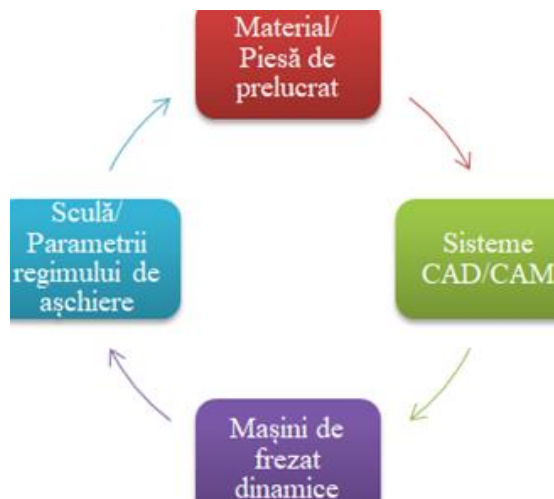


Fig. 2.1 Cele 4 blocuri funcționale ale frezării dinamice

c. Mașină de frezat dinamică trebuie să aibă o turație suficient de mare, precum și o caracteristică de accelerare în curbă. În plus, aceasta ar trebui să dispună de viteze mari de deplasare rapidă și de avans.

d. Scula și parametrii regimului de așchiere. Lungimea tăișului și diametrul sunt prestabilite de geometria piesei. Recomandările optime pentru scule și parametrii regimului de așchiere pentru mașina și sarcina respectivă pot fi determinate.

Potrivit unui experiment realizat de către cei de la Sandvik Coromant, atunci când se utilizează procesul de frezare, se dorește să ne

asigurăm că totul este optimizat și că beneficiem cât mai mult de mașină și scula așchietoare.

Când prelucrăm un semifabricat dorim, să ținem scula așchietoare tot timpul în material, dar aceasta duce la câteva neregularități pe lângă șocul la intrare și vibrații ceea ce duce la scăderea calității suprafeței prelucrate, precum și la creșterea semnificativă a uzuri sculei precum este prezentat în figura 2.2a.

În figura 2.2b. este aplicată o strategie de rulare pentru a intra în semifabricat și a se roti în jurul colțului, aceste modificări de bază vor avea un impact pozitiv asupra procesului de frezare.

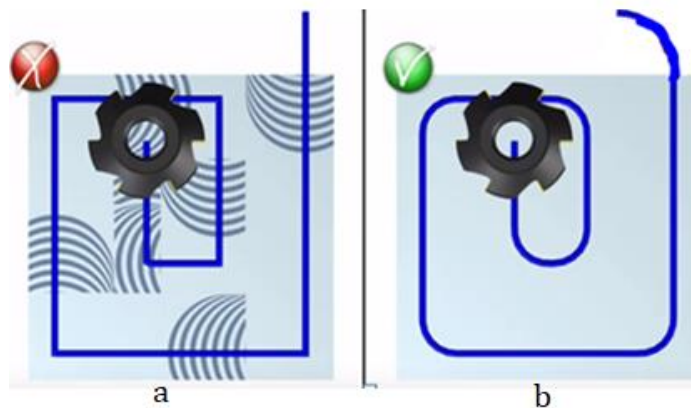


Fig. 2.2 Compararea a două strategii de prelucrare [109]

Datorită utilizării pe scară largă a frezelor cilindro-frontale cu rază la colț și a prelucrărilor pe mașini unelte cu comandă numerică cu mai multe axe, a apărut necesitatea optimizării strategiilor de prelucrare, problemă studiată de către Weinert K., în lucrarea [110].

Strategiile de prelucrare din punct de vedere al tipologiilor proceselor au fost clasificate în lucrarea [111], astfel:

- prelucrări generale prin frezare;
- prelucrări cu viteze mari de așchiere (HSM);
- prelucrări de mare productivitate (HPM);
- prelucrări cu viteze mari de avans (HFM);
- prelucrări cu scule de dimensiuni mici (micro frezări).

În lucrarea [42] este analizată influența strategiei de prelucrare asupra procesului de formare al așchiei (fig.2.3.), utilizându-se atât strategia verticală de jos în sus cât și cea de sus în jos, în concordanță cu diferite valori ale unghiului de înclinare a semifabricatului.

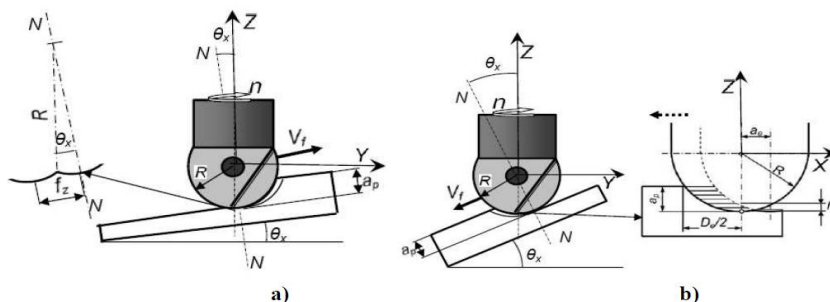


Fig.2.3. Strategii de prelucrare: a) vertical de jos în sus; b) vertical de sus în jos [42]

În lucrarea [112] se prezintă o teorie destul de detaliată însoțită de o serie de aplicații referitoare la tehnicile de modelare a suprafețelor ce urmează a fi utilizate de diferite soft-uri CAD/CAM. Dacă în lucrările [113] și [114] sunt prezentate studii analitice referitoare la prelucrarea suprafețelor complexe utilizând prelucrările în trei axe, în lucrarea [115] autorii extind această teorie prezentând un studiu al prelucrării suprafețelor complexe utilizând prelucrările în cinci axe.

O schemă logică, destinată alegerii strategiei optime de prelucrare, a fost elaborată în lucrarea [116] și constituie un punct de pornire în luarea deciziilor de alegere a unei strategii de prelucrare (fig.2.4.).

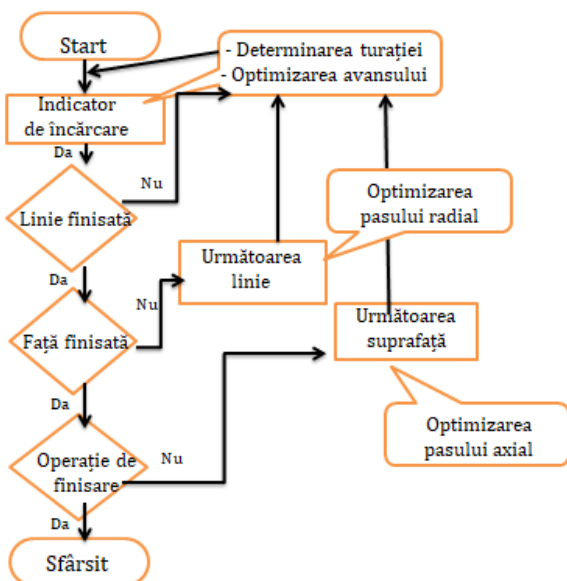


Fig.2.4. Schema logică de alegere a strategiei optime de prelucrare [116]

Schema logică, considerată în lucrarea [117] ca fiind cea mai eficientă în vederea alegerii strategiei optime, este ilustrată în figura 2.5.

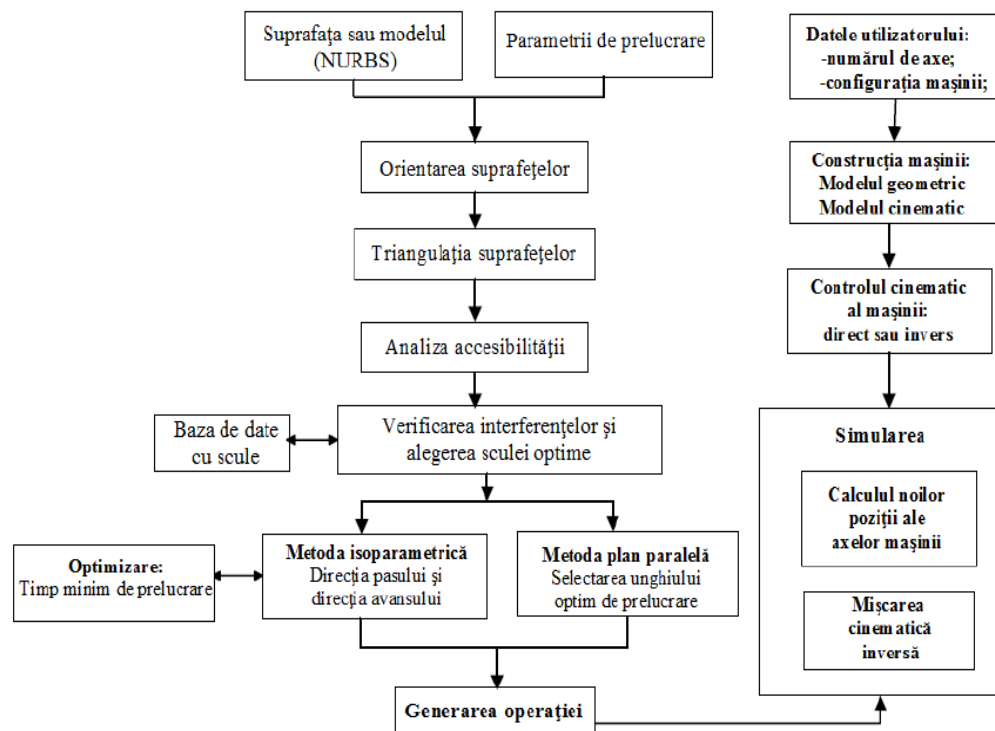


Fig.2.5. Schema logică pentru alegerea strategiei optime de prelucrare [117]

Acest model este unul dintre puținele identificate în literatura de specialitate, care ține seama de orientarea suprafeței. Pe baza acestei scheme logice în lucrarea [117] au fost analizate șase strategii de prelucrare pentru o anumită suprafață în vederea comparării rezultatelor obținute. Strategiile de prelucrare analizate sunt prezentate în figura 2.6.

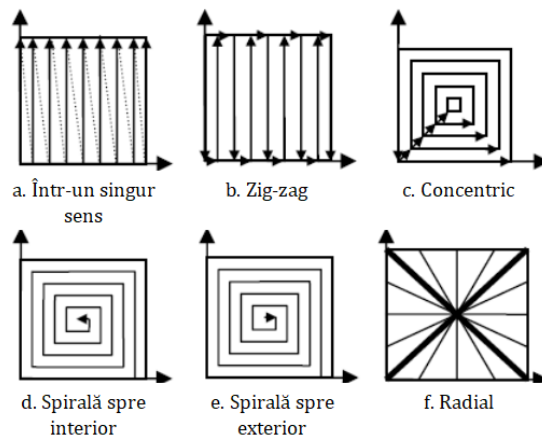


Fig.2.6 Strategii de prelucrare [117]

Prelucrarea suprafețelor complexe, constă în poziționarea sculei așchietoare în diferite puncte din spațiu, definite în funcție de forma suprafeței, forma sculei așchietoare și de orientarea axei sculei așchietoare, în lucrarea [118] autorii identificând două metode, metoda aproximării și metoda interpolării.

În special, la prelucrarea suprafețelor complexe, utilizarea unui anumit unghi între axa sculei așchietoare și suprafața prelucrată poate contribui la obținerea unei calități ridicate a suprafeței prelucrate, deoarece condițiile de așchiere variază în funcție de locul de materializare al contactului dintre tăișul sculei așchietoare și piesă, fapt evidențiat și în lucrarea [119] unde sunt analizate și o serie de strategii de prelucrare. O parte din strategiile existente și utilizate de diferitele programe software au fost analizate și studiate în lucrarea [42].

Prelucrarea unei suprafețe curbe poate fi efectuată după o curbă sau după segmente de dreaptă, alegerea variantei optime în vederea obținerii celei mai bune rugozități, a fost analizată în lucrări precum [120] și [121].

În lucrarea [122], este sugerat faptul că la alegerea unei anumite strategii de prelucrare este esențial a se avea în vedere că utilizarea strategiei de prelucrare vertical de sus în jos, de-a lungul unui perete, are efecte negative asupra procesului, deoarece grosimea așchii are o valoare ridicată în condițiile unei viteze periferice mici. Spre deosebire de strategia de prelucrare verticală de jos în sus, în lungul peretelui, unde grosimea așchii este mai redusă, iar viteza periferică este cea recomandată.

Rugozitatea suprafeței este unul dintre criteriile de evaluare pentru a stabili calitatea produsului și un factor care influențează în mod critic costul de producție. Acest lucru se datorează faptului că rugozitatea suprafeței poate afecta proprietățile tribologice și mecanice ale produsului, cum ar fi frecarea, uzura și oboseala.

Mulți factori de prelucrare contribuie la rugozitatea suprafeței în timpul prelucrării materialelor care pot fi legați de parametrii de frezare, de prelucrabilitatea piesei de prelucrat și de sculele de frezat, de fluidele de lubrifiere. Pentru minimizarea rugozității suprafeței, este necesară selectarea corectă a strategiilor de prelucrare, în special pentru prelucrarea pe o mașină de frezat.

În industria modernă, scopul principal al procesului de fabricație este cum să realizeze produse de înaltă calitate într-un timp scurt și la un cost redus de prelucrare. În prezent, în acest scop sunt utilizate sisteme de producție automatizate și compatibile, împreună cu mașini

de comandă numerică (CNC) care pot produce un produs cu o precizie dimensională mare și un timp de prelucrare redus. Aici, frezarea pe CNC este metoda obișnuită de prelucrare a pieselor cu geometrie complexă a suprafeței.

În contextul prelucrărilor prin frezare, strategia traiectoriei sculei are un impact substanțial asupra calității suprafeței. Aceasta înseamnă că, pentru îndepărtarea aceleiași cantități de material, tipul de selecție a mișcării sculei va produce rezultate semnificative diferite ale rugozității suprafeței.

Mai mult, generarea traiectoriei sculei în cazul suprafețelor cu variații mari de curbură reprezintă o problemă principală în prelucrarea materialelor. Este o sarcină provocatoare și a fost dezbătută de un număr mare de cercetători. Toh [123] a investigat frezarea de mare viteză a unei suprafețe înclinate a piesei de prelucrat folosind o înclinare extremă a unghiului axei sculei.

În ceea ce privește poziționarea piesei de prelucrat, cele mai bune strategii ale traiectoriei sculei și orientarea optimă unghiulară a sculei au fost supuse studiului analitic în lucrările [124], [125], [126], [127]. Majoritatea studiilor au efectuat analiza suprafețelor plane fără complicații. Mai mult decât atât, au fost propuse diferite strategii ale traiectoriilor de rulare pentru frezarea de finisare a unei părți geometrice complexe care conține suprafețe concave și convexe [107].

Rezultatele indică faptul că utilizarea unei orientări verticale descendente a oferit cea mai lungă durabilitate a sculei. Cu toate acestea, în ceea ce privește rugozitatea piesei de prelucrat, orientarea verticală în sus este dorită pentru realizarea calității suprafeței.

În plus, strategia traiectoriei sculei are un efect semnificativ asupra timpului de lucru pentru operația de frezare de mare viteză concentrată pe operațiunile de frezare cu un traseu al sculei în zig-zag [128]. În special, atunci când frezarea are o viteză mare de avans, orientarea traseului zig-zag are o influență semnificativă asupra timpului ciclului de prelucrare.

În mod adițional, caracteristicile optime de frezare ale oțelului de scule, 40CrMnNiMo ar putea fi legate de strategiile traseului sculei atunci când pentru prelucrarea suprafeței de frezat se utilizează freze de oțel rapid [129]. Efectele cele mai influente din gama de condiții de frezare specificate sunt corelate cu viteza de avans, pentru o direcție, cu strategiile de spirală și cu adâncimea de frezare pentru strategia de traseu zig-zag.

2.2. Analiza și alegerea sculei

Există o mare varietate de operații tehnologice care se pot executa prin frezare și corespunzător acestora, diferite tipuri constructive de freze. Din punctul de vedere al detașării așchiei, însă, toate prelucrările prin frezare pot fi înglobate în două sisteme de bază sau combinații ale acestora. Astfel, așchiera se poate realiza cu partea cilindrică sau partea frontală a frezei.

2.2.1. Parametrii geometrici ai sculei

Având în vedere că frezele pot avea dinți atât pe partea cilindrică cât și pe cea frontală, apar niște particularități la definirea unghiurilor constructive. Astfel, în cazul în care tăișul se găsește pe suprafața cilindrică a frezei, unghiurile părții active se măsoară într-o secțiune normală pe dinte și o secțiune radială care este de fapt o secțiune normală pe axa frezei.

Diametrul exterior al frezei este un element constructiv foarte important, influențând grosimea așchiei, numărul și forma dinților sculei, diametrul alezajului frezei, modul de evacuare a căldurii etc.

Frezele cu diametrul mare prezintă și dezavantajul că necesită un timp de pătrundere în material mai mare decât cele cu diametrul mic. Frezele cu diametre mari prezintă însă unele avantaje, prin aceea că asigură o evacuare mai bună a căldurii rezultată în timpul așchierii.

Din cauza avantajelor și dezavantajelor cauzate de dimensiunile frezelor, se recomandă ca pentru finisare să se folosească freze cu diametre mici, acestea sunt sensibile, flexibile și au capacitate mică de așchiere fiind uneori impuse de geometria suprafeței. Pentru operațiile de degroșare sunt recomandate freze cu diametre mari, principalele caracteristici a acestora fiind rigiditatea și capacitatea mare de așchiere.

2.2.2. Materialele utilizate la execuția sculelor așchietoare

Dezvoltarea rapidă a industriei construcțiilor de mașini impune printre altele și realizarea unei game foarte variate de scule de prelucrare prin așchiere sau deformare plastică, de diverse tipodimensiuni și confecționate din materiale dure și extradure cum sunt: carburile metalice, diamantele naturale și sintetice, nitrura cubică de bor etc.

Prelucrarea acestor materiale, în general greu de realizat prin procedeele clasice de aşchiere, impune utilizarea pe scară largă a electrotehnologiilor.

Oţelurile rapide şi super rapide. Descoperirea în 1898 de către Taylor şi White a temperaturilor de călire foarte înalte, a permis mărirea procentajului de wolfram în compoziţia oţelurilor aliate de scule până la 20%, aceste oţeluri căpătând o termostabilitate foarte ridicată şi o rezistenţă ridicată la uzură la cald.

Carburile metalice sinterizate. Punerea la punct de către Karl Schroter şi colaboratorii săi, a procedurii de sinterizare a carburilor dure de wolfram în cobalt, a dus la obţinerea carburilor metalice sinterizate. Vitezele de aşchiere la care pot fi utilizate aceste materiale de scule sunt de 100...300 m/min.

Materiale mineralo-ceramice. Au început să fie folosite pe scară industrială din 1950. Sunt obţinute prin sinterizare, au la bază oxizii de aluminiu Al_2O_3 şi prezintă o serie de avantaje faţă de carburile metalice sinterizate precum termostabilitate ridicată şi rezistenţă la uzură sporită.

Diamantele industriale. Principala proprietate a diamantului este duritatea sa, cea mai ridicată dintre toate materialele. De asemenea diamantul are modulul de elasticitate şi conductivitate termică ridicată şi coeficient de frecare redus. În funcţie de materialele din care sunt construite, sculele aşchietoare se tratează termic, în vederea îmbunătăţirii proprietăţilor fizico-mecanice şi ridicării capacităţii lor de aşchiere.

2.2.3. Influenţa parametrilor geometrici asupra procesului de aşchiere

Unghiul de degajare γ .

Prin creşterea unghiului γ , deformaţiile plastice, forţele de aşchiere, lucrul mecanic, scad, fapt ce determină scăderea temperaturii sculei, ceea ce duce la creşterea durabilităţii sculei. Creşterea exagerată a unghiului γ , duce la creşterea temperaturii sculei datorită scăderii capacităţii termice a acesteia.

Unghiul de degajare γ , influenţează rugozitatea suprafeţei prelucrate prin intermediul deformaţiilor plastice, inclusiv prin fenomenul depunerilor pe tăiş. Cercetările teoretico-experimentale au arătat că pentru condiţii de aşchiere larg utilizate la modificarea lui γ are loc o variaţie mică şi neregulată a rugozităţii.

Fenomenul se explică prin faptul că valoarea unghiului de degajare variază de-a lungul tăişului, micşorându-se în zona curbilinie şi mai ales în partea tăişului secundar unde poate atinge valori negative.

Unghiul de înclinare al tăişului λ_T

Variaţia unghiului λ_T de la valori negative la valori pozitive determină micşorarea deformaţiilor plastice şi a forţelor de frecare simultan cu creşterea coeficientului de frecare μ . În domeniul valorilor negative influenţa unghiului de înclinare asupra deformării materialului este mai mică decât pentru domeniul valorilor pozitive.

Unghiul de înclinare al tăişului λ_T influenţează rugozitatea prin direcţia de curgere a aşchiilor şi prezintă importanţă, când acesta trece de la valori pozitive la valori negative. La operaţiile de finisare prin strunjire, aşchiile nu trebuie să atingă suprafaţa prelucrată, deci se vor folosi cuţite cu $\lambda_T > 0$.

Unghiul de atac principal χ_r .

Unghiul de atac principal χ_r , influenţează temperatura sculei prin mărimea deformaţiilor plastice, forma secţiunii aşchiei, aria activă a feţei de degajare, capacitatea termică a sculei, precum şi durabilitatea sculei. Creşterea unghiului de atac principal duce la creşterea încărcării energetice unitare, deoarece creşte grosimea aşchiei şi scade lăţimea.

Unghiul de atac principal χ_r şi secundar χ'_r influenţează în aceeaşi măsură rugozitatea şi anume cu micşorarea acestor unghiuri, valoarea rugozităţii se micşorează, datorită micşorării lui h calculat.

Cercetările experimentale au arătat că utilizarea cuţitelor cu unghiuri de atac mici nu conduc totdeauna la obţinerea unei rugozităţi bune. La alegerea valorii unghiului de atac principal trebuie să se ţină seama de legătura acestuia cu alţi factori şi anume raza de vârf a sculei r_ε şi avansul pe dinte f_z .

Unghiul de aşezare α .

Acest unghi influenţează mărimea faţetei de uzură de pe faţa de aşezare. Pe baza unor argumente strict teoretice, creşterea unghiului de aşezare conduce la creşterea durabilităţii sculei, ca efect al reducerilor frecărilor între faţa de aşezare a sculei şi materialul de prelucrat.

Prin creşterea unghiului α , raza de rotunjire r_n a tăişului se micşorează, suprafaţa de contact va fi mai mică şi ca urmare deformaţiile plastice se diminuează, iar rugozitatea scade.

Raza de vârf a sculei

Creșterea razei r_ε , duce la creșterea deformațiilor plastice datorită creșterii lungimii tăișului curbă și micșorării unghiului de atac mediu.

Raza la vârf a sculei r_ε are o influență asupra cantității de căldură dezvoltată și modul de repartizare a acesteia. Creșterea razei la vârf a sculei r_ε , duce la creșterea căldurii de așchiere, dar și la creșterea capacității termice a sculei, precum și la creșterea durabilității.

Raza de ascuțire/rotunjire a tăișului r_n .

Creșterea razei de ascuțire a tăișului duce la mărirea lucrului mecanic de deformare plastică și a cantității de căldură și de asemenea crește uzura pe fața de așezare. Acest efect este mai pronunțat la operații de finisare, când sculele au unghiuri de așezare mici și când mărimea razei r_n este comparabilă cu grosimea așchiei.

Prin creșterea razei de ascuțire r_n , rugozitatea crește datorită creșterii deformațiilor plastice și a forței de așchiere. Fenomenul este mai pronunțat la așchii subțiri și trebuie luat în considerare la operații de finisare.

2.3. Influența regimurilor asupra procesului de așchiere

Numeroase studii au fost destinate stabilirii influenței exercitate de parametrii regimului de așchiere asupra unor indicatori de prelucrabilitate, cum ar fi durabilitatea sculelor așchietoare, mărimea forțelor de așchiere, rugozitatea suprafeței prelucrate, temperatura din zona de așchiere etc.

Ditu [130], afirmă că parametrii de reglaj ai sistemului tehnic în cazul frezării prezintă o interdependență între parametrii regimului de așchiere. Acesta este caracterizat de viteza de așchiere v_c , avansul pe dinte f_z , adâncimea de așchiere axială a_p (mm) și adâncimea de așchiere radială a_e cu particularitățile aferente fiecărui tip de operație în parte.

2.3.1. Influența adâncimii de așchiere

Creșterea adâncimii de așchiere contribuie la o mărire a lățimii așchiei, pe ansamblu, încărcarea energetică unitară, menținându-se aproximativ la același nivel.

Influența inițial redusă a creșterii adâncimii de așchiere asupra durabilității sculei așchietoare se datorează menținerii constantă a

încărcării energetice unitare, precum creșterii destul de lentă a temperaturii o dată cu mărirea adâncimii de așchiere.

La depășirea anumitor valori ale adâncimii de așchiere, posibilitățile de evacuare a căldurii din ce în ce mai intense se diminuează, suprafețele prin care se efectuează transmiterea căldurii rămânând aceleași, fapt care generează o accelerare a uzurii sculei. Influența adâncimii de așchiere asupra durabilității este mai mică decât influența avansului.

Rugozitatea suprafeței prelucrate este însă în mică măsură dependentă de mărirea adâncimii de așchiere, de remarcat este însă faptul că la o creștere exagerată a adâncimii de așchiere pot apărea vibrații care conduc la o înrăutățire a rugozității suprafeței.

2.3.2. Influența avansului

În ceea ce privește influența avansului asupra rugozității suprafeței prelucrate, literatura de specialitate prezintă o serie întregă de relații menite să evidențieze corelația geometrică între înălțimea h a asperităților pe de o parte și avans, raza de racordare a vârfului sculei și unghiurile de atac pe de alta parte.

În ceea ce privește deformarea materialului așchiat avansul respectiv grosimea așchiei, influențează mai mult gradul de deformare al materialului. La avansuri mici deformațiile sunt mari, prin creșterea avansului, cresc forțele și căldura la așchiere și gradul de deformare scade. Influența avansului de așchiere asupra lui k , poate fi exprimată printr-o relație de forma:

$$k_1 = \frac{C_2}{f^{x_2}} \quad (2.1)$$

Avansul pe dinte, influențează rugozitatea suprafețelor prelucrate. Prin creșterea avansului rugozitatea crește datorită creșterii lui h calculat. Pentru orice valoare a avansului, valoarea maximă a rugozității se obține la o valoare a vitezei de circa 20 m/min. Pentru valori mici ale avansului ($f < 0,1$ mm/rot) rugozitatea variază foarte puțin, iar prin variația avansului componenta Δh_2 crește din cauza micșorării grosimii așchiei.

Din această cauză, la finisare, nu este necesar a se reduce semnificativ avansul deoarece aceasta nu duce la o îmbunătățire a rugozității și totodată duce la micșorarea productivității, îmbunătățirea

rugozității la finisare se poate obține printr-o mărire a vitezei de așchiere.

2.3.3. Influența vitezei de așchiere

În principiu, creșterea vitezei de așchiere are drept consecințe creșterea încărcării energetice unitare, ridicarea temperaturii în zona de așchiere și reducerea în acest mod a durabilității sculei așchietoare.

S-a constatat în mod experimental, că variația rugozității în raport cu viteza de așchiere se produce după o curbă, care prezintă un maximum de obicei în zona vitezelor relativ scăzute. Explicația prezenței acestui maximum este atribuită apariției tăișului de depunere, a cărui formare și desprindere intermitentă, asociată modificării cvasicontinuă a geometriei părții așchietoare a sculei se reflectă printr-o variație a înălțimii asperităților între limite largi, contribuind finalmente la înrăutățirea rugozității suprafeței.

Rugozitatea suprafeței și starea stratului superficial caracterizată prin deformații plastice și tensiuni interne, sunt puternic influențate de valorile parametrilor regimului de așchiere.

Viteza de așchiere v_c , este factorul care influențează cel mai mult rugozitatea suprafeței.

Viteza de așchiere (v_c), influențează gradul de deformare al materialului prin temperatura la așchiere, forțele de frecare și natura contactului așchii cu fața de degajare. La prelucrarea materialelor care nu au tendința formării depunerilor coeficientul k scade cu creșterea vitezei, la început mai rapid apoi mai lent, datorită modificării condițiilor de frecare dintre așchie și fața de degajare.

La viteze foarte mari de așchiere se produce încălzirea puternică și instantanee a materialului așchiat care curge ca un lichid foarte vâscos, ceea ce corespunde unui coeficient de comprimare plastică aproape unitar ($k_1 \approx 1$).

Pentru domeniul vitezelor mari ($v_c > 50$ m/min) și foarte mari influența lui v_c asupra lui k_1 poate fi exprimată printr-o relație de forma:

$$k_1 = \frac{C_3}{v_c^{x_3}} \quad (2.2)$$

Creșterea vitezei de așchiere duce la creșterea temperaturii și a energiei de deformare a stratului așchiat, respectiv la creșterea intensității uzării în timp.

Considerând o valoare optimă a criteriului de uzură pentru vitezele $v_4 > v_3 > v_2 > v_1$, rezultă $T_4 < T_3 < T_2 < T_1$, adică durabilitatea scade cu creșterea vitezei de așchiere.

Variația durabilității în funcție de viteză este mai complexă. Experimentările au constatat existența mai multor maxime ale durabilității pentru diverse viteze de așchiere.

În domeniul vitezelor mici ($v_c < 50$ m/min) se manifestă influența vitezei de așchiere prin intermediul depunerilor pe tăiș și a forțelor de frecare și mai puțin prin temperatură, iar în domeniul $v_c > 50$ m/min se manifestă influența vitezei de așchiere prin intermediul temperaturii și coeficienților de frecare.

2.3.4. Influența parametrilor procesului de frezare asupra rugozității suprafeței

Rugozitatea suprafețelor rezultate în urma operațiilor de frezare sunt influențate atât de cinematica frezării, cât și de condițiile de așchiere [131], [132], [133], [134].

În lucrarea [135] sunt prezentate efectele parametrilor procesului de așchiere asupra rugozității suprafeței, în cazul utilizării frezelor cilindro-frontale. Factori precum viteza de așchiere, avansul pe dinte și adâncimea de așchiere axială, care definesc procesul de așchiere, pot fi setați în faza inițială, în timp ce factori precum geometria sculei, uzura sculei, formarea așchiei sau proprietățile materialului sculei și semifabricatului sunt necontrolabile [136].

În scopul identificării unui model matematic, pentru estimarea variației rugozității suprafeței prelucrate în cazul frezării cu freze cilindro-frontale, autorii lucrării [137] au considerat că parametri ai procesului de așchiere următorii factori: viteza de așchiere, avansul pe dinte, adâncimea de așchiere radială și adâncimea de așchiere axială. Rezultatele obținute au condus la concluzia că, avansul pe dinte este parametrul cu influența cea mai mare asupra rugozității suprafeței, urmat de adâncimea de așchiere axială, adâncimea de așchiere radială și viteza de așchiere.

În lucrarea [138] este analizată variația forțelor de așchiere în procesul de frezare cu freze cilindro-frontale a unui oțel de scule modificat AISI P20, în funcție de următorii parametri: viteza de așchiere, avansul pe dinte, pasul pe trecere și adâncimea de așchiere. Autorii au concluzionat că o creștere a avansului conduce la creșterea

forțelor de aşchiere, propunând totodată și un model matematic în vederea estimării variației forțelor de aşchiere.

O analiză comparativă a influenței avansului de lucru și a pasului pe trecere, asupra variației rugozității suprafeței, este efectuată în lucrarea [139]. În urma acestei analize, s-a concluzionat faptul că, înălțimea asperităților suprafeței prelucrate este cea mai mare în condițiile în care raportul dintre valoarea avansului pe dinte și a pasului pe trecere se apropie de 1, iar înălțimea asperităților pe direcția avansului joacă un rol mai important asupra topografiei suprafeței, în raport cu înălțimea asperităților rezultate ca urmare a pasului pe trecere.

Analiza variației rugozității suprafeței prelucrate cu freze cilindro-frontale, în funcție de o combinație a parametrilor tehnologici și a celor de proces este efectuată în lucrarea [140]. Luând în considerare influența unor parametri precum viteza de aşchiere, avansul pe dinte, adâncimea de aşchiere axială și a proprietăților materialului prelucrat, asupra rugozității suprafeței rezultate, a fost efectuată o analiză statistică a rezultatelor experimentale în vederea stabilirii influenței individuale a parametrilor procesului asupra rugozității suprafeței. Propunând un model polinomial de ordinul 2, s-a ajuns la concluzia că avansul este parametrul cu cea mai mare influență asupra rugozității suprafeței prelucrate, urmat de viteza de aşchiere, proprietățile materialului prelucrat, în timp ce influența cea mai scăzută o are adâncimea de aşchiere.

Cercetările efectuate pe plan internațional, analizează variația rugozității suprafeței prelucrate cu frezele sferice în funcție de următorii parametri: unghiul de înclinare a axei sculei în raport cu normala la suprafața prelucrată, turația aplicată sculei aşchietoare, avansul pe dinte, adâncimea de aşchiere, pasul pe trecere etc.

În lucrarea [141], este analizată variația rugozității R_z din punct de vedere al următorilor factori: diametrul sculei aşchietoare, viteza de aşchiere, avansul pe dinte și adâncimea de aşchiere. Autorii au concluzionat că influența cea mai mare o are avansul pe dinte în raport de 45%, adâncimea de aşchiere 42%, diametrul sculei aşchietoare 10,78% și viteza de aşchiere 1,68% (fig.2.7).

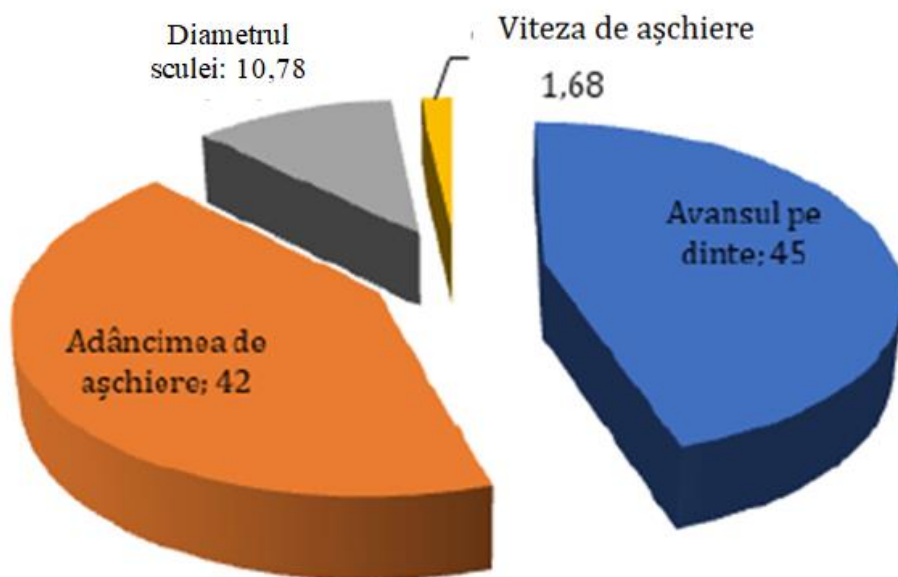


Fig.2.7 Influența parametrilor procesului de strunjire asupra rugozității [141]

Influența unui număr mare de parametri ai procesului de aşchiere, asupra rugozității suprafeței prelucrate este analizată în lucrarea [142]. Metodologia experimentală utilizată în această lucrare consideră rugozitatea suprafeței ca rezultat al procesului, obținut prin variația următorilor parametri: unghiul de înclinare al axei sculei aşchietoare, diametrul sculei, turația, viteza de avans, pasul pe trecere și adâncimea de aşchiere.

Calculul regimurilor de aşchiere trebuie să țină seama de caracteristicile fizico-mecanice ale materialului de prelucrat, ale materialului sculei, precum și a condițiilor de lucru acestea fiind diferențiate de modul de răcire. Pentru a obține o productivitate cât mai mare, ordinea de stabilire a parametrilor regimului de aşchiere sunt: adâncimea de aşchiere, avansul pe dinte și turația.

2.4. Influența direcției de frezare asupra rugozității

Este necesar să se precizeze de la început faptul că noțiunea de calitate a suprafeței prelucrate este legată de precizia prelucrării. La fel de importantă este și noțiunea asupra calității suprafeței, ca fiind o altă latură a preciziei și anume cea care cuprinde și aspectul micro geometric al acesteia.

Unul dintre conceptele de bază pe care trebuie să le înțelegem în orice operație de frezare este direcția de frezare. Aceasta poate fi caracterizată prin modul în care dinții sculei intră în material și formează așchia care este îndepărtată în timpul frezării. Deși multe CNC-uri ne-au obișnuit să specifice întotdeauna frezarea în sensul avansului, există momente, când se preferă frezare în sensul avansului și sunt momente în care se preferă frezarea contra avansului.

Înțelegerea diferențelor este esențială pentru extinderea durabilității sculelor, pentru promovarea calității și optimizarea utilizării timpului mașinii. Viteza dorită, precizia, materialul, eliminarea așchiei, direcția forfecării și construcția frezei sunt doar câteva lucruri pe care trebuie să le luăm în considerare atunci când decidem alegerea metodei de frezare. Cunoașterea și utilizarea corectă a acestor două metode principale de frezare va îmbunătăți calitatea generală a pieselor prelucrate.

2.4.1. Frezarea în sensul avansului

Frezarea în sensul avansului este cea mai des întâlnită metodă de frezare fie că este vorba de planarea unei suprafețe sau de profilare.

În cazul frezării în sensul avansului, relația dintre direcția axului și direcția de avans a frezării se combină astfel încât capătul lat a așchiei să fie îndepărtat mai întâi și capătul îngust îndepărtat ultimul. Aceasta produce un efect de cățărare al sculei pe materialul piesei de prelucrat, așa cum se arată în imaginea 2.8. Distanța liniară a capătului lat al așchiei se numește avans pe dinte.

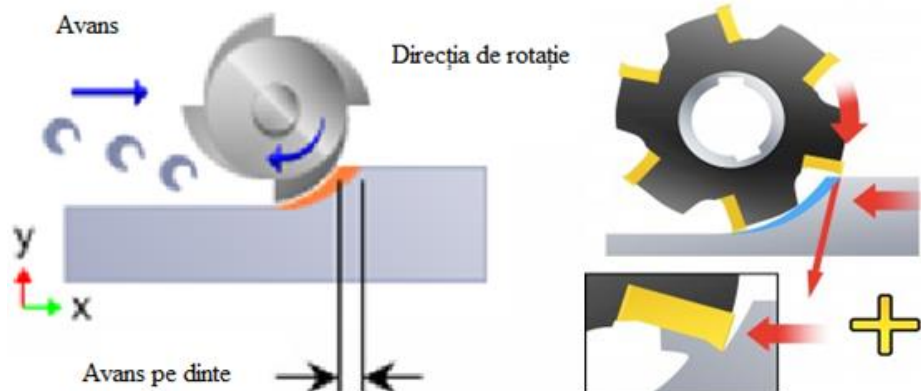


Fig. 2.8. Frezarea în sensul avansului [122]

Frezarea în sensul avansului poate crește durabilitatea sculei cu până la 50%. Este mai populară în utilizare, datorită disponibilității

unor utilaje îmbunătățite și mai rigide, și s-a dovedit a fi cea mai eficientă în marea majoritate a aplicațiilor de frezat.

2.4.2. Frezarea contra avansului

La frezarea contra avansului se produce o creștere treptată a grosimii așchii, deci a apăsării de așchiere și a solicitării dinților, ceea ce asigură o funcționare mai liniștită a mașinii. Dacă, suprafața de prelucrat a piesei prezintă crustă sau oxizi, se produce o uzură mai mică a dintelui sculei, acesta pătrunzând în material pe dedesubtul acestor straturi. Se impune o bună fixare a piesei pe masa mașinii pentru a se evita smulgerea ei în timpul așchierii.

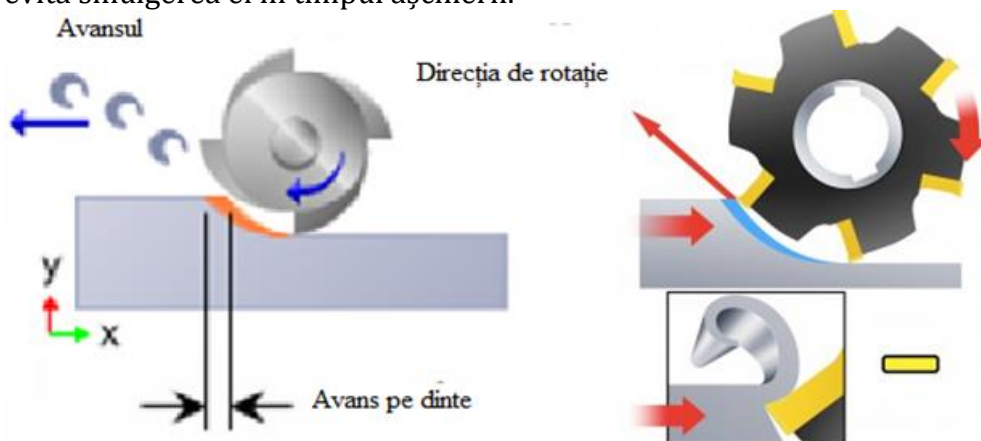


Fig. 2.9 Frezarea contra avansului [122]

Deoarece așchiile sunt aruncate în sus în fața sculei, poate să apară o nouă tăiere a așchiilor, ceea ce poate duce la o finisare superficială a suprafeței. Frezarea contra avansului poate crește uzura sculei, din cauza creșterii frecării între sculă și piesa de prelucrat.

2.5. Influența înclinării axei sculei asupra rugozității

Rugozitatea suprafețelor rezultate în urma operațiilor de frezare sunt influențate atât de cinematica frezării cât și de condițiile de așchiere [143], [144], [145], [146]. În lucrarea [135] sunt prezentate efectele parametrilor procesului de așchiere asupra rugozității în cazul utilizării frezelor cilindro-frontale. Factori precum turația, avansul pe dinte și adâncimea de așchiere, care definesc procesul de așchiere, pot fi setați în faza inițială, în timp ce factori precum geometria sculei, uzura

sculei, formarea așchii sau proprietățile materialului sculei și semifabricatului sunt necontrolabile [147].

Direcția de înclinare a axei sculei și valoarea unghiului la care este înclinată scula așchietoare în raport cu normala la suprafața de prelucrat, este un factor important care determină evoluția rugozității suprafețelor prelucrate. Din acest motiv se impune stabilirea valorilor optime ale înclinării axei sculei, pentru care rugozitatea are valoarea cea mai mică, respectiv evitarea direcțiilor de înclinare și a valorilor unghiulare care determină valori ridicate ale rugozității.

Este evidențiat faptul că, unghiul de înclinare al axei sculei este cel mai important factor de influență asupra rugozității suprafeței. Direcția de înclinare optimă a fost analizată de un număr considerabil de cercetători, dar identificarea unei direcții clare nu a fost posibilă, deoarece opiniile sunt împărțite. Astfel, în lucrarea [21], direcția de înclinare optimă a sculei a fost identificată ca fiind în direcția avansului.

Cercetătorul Tonshoff, în lucrarea [148], indică faptul că cele mai bune rezultate se obțin prin înclinarea semifabricatului cu 15° . Alte lucrări precum [149], indică faptul că valoarea optimă a unghiului de înclinare este situată în intervalul 15° - 20° , în timp ce în lucrarea [150] valoarea optimă indicată este 20° . Ca urmare a acestor analize, este necesară cercetarea acestui proces în vederea identificării atât a valorii optime a unghiului de înclinare, dar și a direcției optime de înclinare. Cercetări precum cele ale lui [151] [152] și [153] analizează cazuri particulare în vederea identificării valorii optime a unghiului de înclinare.

Înălțimea asperităților, care rezultă la prelucrarea suprafețelor complexe, a fost evidențiată și în lucrarea [27], fiind influențată atât de mărimea pasului pe trecere cât și tipul sculei așchietoare utilizată.

Datorită variației formei așchii în funcție de înclinarea axei sculei așchietoare are loc variația forțelor care apar în procesul de așchiere. Analiza variației forțelor de așchiere în funcție de înclinarea axei sculei a fost analizată în lucrările: [154], [155], [156], [157] și [158]. Variația rugozității suprafeței, în cazul în care valoarea unghiului de înclinare al axei sculei nu depășește 20° , este analizată în lucrări precum [159] și [160].

Calitatea suprafeței prelucrate variază chiar și în cazul în care strategia de prelucrare și valoarea unghiului de înclinare rămân neschimbate, dar se schimbă orientarea strategiei de prelucrare în raport cu granițele conturului suprafeței prelucrate, prin rotirea întregii strategii cu un anumit unghi, fapt evidențiat în lucrarea [161].

Optimizarea strategiilor de prelucrare pe mașini unelte cu comandă numerică în 5 axe constituie tema lucrării [162], unde se propune practicarea unui unghi variabil de înclinare al axei sculei pe direcția avansului de prelucrare. În funcție de geometria suprafeței prelucrate. Rezultatele referitoare la rugozitatea suprafeței, obținute pe baza rezultatelor experimentale sunt semnificativ superioare.

Influența unghiului de înclinare al axei sculei, care poate fi aplicat pentru diverse strategii de prelucrare, asupra rugozității suprafeței a fost analizată și în lucrarea [163], unde cea mai bună calitate a suprafeței a fost obținută prin practicarea unor valori scăzute ale unghiului de înclinare.

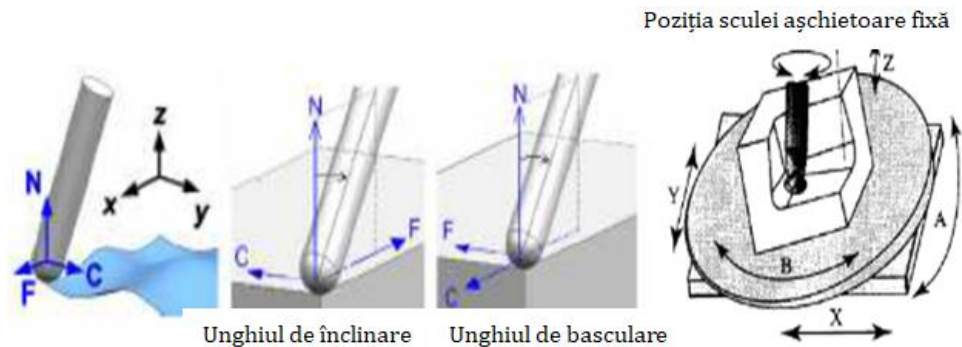
La frezarea în 5 axe, axa sculei este de obicei orientată aproape normal pe suprafață. O freză cilindro-frontală poate fi înclinată la un unghi, astfel încât suprafața prelucrată corespunde îndeaproape cu suprafața de proiectare. Vickers [3], [23], descrie modul de calculare al razei sculei efective în funcție de unghiul de înclinare al sculei.

Jensen și Anderson [24], au aplicat conceptul geometriei diferențiale de poziționare al sculei în 5 axe. Proprietățile de curbură locale sunt folosite pentru a ajuta la o poziție individuală a sculei ce trebuie să fie setată. Prin potrivirea curburilor sculei cu curburile suprafețelor la un punct de contact, cantități în exces sau coliziuni de materiale în vecinătatea unui punct tactil pot fi matematic evitate.

Vickers și colab. [23], au descris o metodă de prelucrare a suprafețelor curbe în cinci axe cu o freză cilindro-frontală. În metodele lor, scula este înclinată în direcția de avans, ceea ce permite programatorului să selecteze o rază eficientă de frezare pentru o anumită suprafață. Jensen și colab. [17], au extins această lucrare prin schimbarea unghiului de înclinare al sculei în fiecare punct de pe suprafață. Lucrarea lui Jensen și colab. [24] și Bedi și colab. [5], au detaliat noi tehnici de prelucrare prin extinderea conceptului de potrivire a geometriei suprafeței finale la raza sculei.

Dacă în lucrările [164], [165] și [59] autorii analizează aceste elemente în situația pentru care unghiurile de înclinare sunt realizate de scula așchietoare, iar semifabricatul rămâne fix (fig.2.10.a), în lucrările [166] și [167] sunt prezentate soluții în care axa sculei rămâne fixă, iar unghiurile de înclinare sunt materializate prin mișcări ale semifabricatului (fig.2.10.b). Desigur, fiecare dintre aceste situații sunt în fapt datorate structurii constructive a mașinilor pe care au fost realizate aceste experimente, obținerea de rezultate diferite se

datorează în special avantajelor sau dezavantajelor privind stabilitatea în proces, pe care cele două modele le prezintă.



a) Înclinarea axei sculei

b) Înclinarea semifabricatului

Fig.2.10 Mișcări specifice prelucrării pe mașini unelte cu 5 axe [168]

2.5.1. Efectul unghiului de înclinare a sculei

Ca parametri importanți de frezare, orientarea sculei are un efect semnificativ asupra preciziei prelucrării CNC cu mai multe axe.

Pentru a economisi timpul de prelucrare, îmbunătățirea calității suprafeței piesei și a durabilității sculei, Toh [108], a identificat și revizuit trei variații principale și a făcut analiza modului de prelucrare a suprafeței plane, intrarea și ieșirea efectuată de mișcarea frezei și înclinarea frezei cu efectele aferente frezării. Ko [33], a încercat să reducă uzura sculei prin controlul unghiului de înclinare între sculă și piesa de prelucrat. Rezultatele simulării au arătat că un unghi de înclinare de prelucrare de 15° a fost suficient de bun din punctul de vedere al prelucrării, iar această valoare a fost verificată printr-un experiment de frezare utilizând frezarea cu freza sferică de mare viteză.

Han [169], a cercetat experimental influența unghiului de înclinare al sculei asupra integrității suprafeței, în special rugozitatea suprafeței și efortul rezidual pentru frezarea cu viteze mari de așchiere. În cele din urmă, unghiurile de înclinare optime ale sculelor, inclusiv unghiul de avans, unghiul de înclinare și metoda de frezare, au fost obținute pentru frezarea în 5 axe cu freza sferică.

Așa cum se arată în figura 2.11 sunt stabilite două sisteme de coordonate pentru a descompune forța de frezare pentru modelul FEM. Sistemul de coordonate XYZ este sistemul de coordonate al sculei. Axa Z este de-a lungul orientării sculei. Axa X este perpendiculară pe axa Z și de-a lungul direcției de avans. Axa Y completează triedrul de sens direct

sau legea mâinii drepte. Sistemul local de coordonate a fost stabilit ca $X'Y'Z'$. Axa X' este de-a lungul direcției de avans. Z' este de-a lungul feței normale. Atât originea sistemului de coordonate al sculei, cât și sistemul de coordonate local sunt situate în centrul sculei.

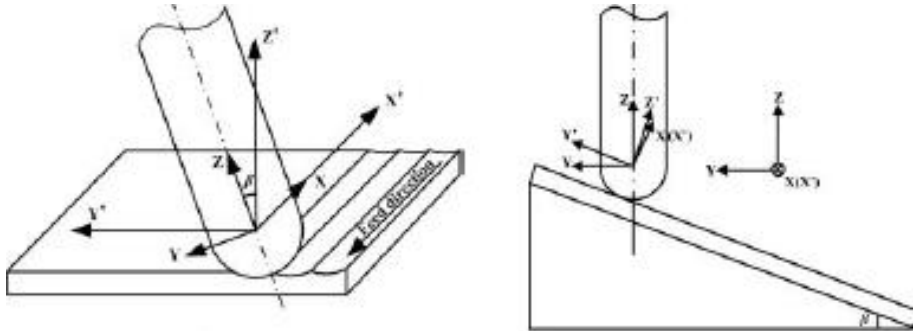


Fig. 2.11 Sisteme de coordonate și unghiuri de înclinare a sculelor

În general, două unghiuri sunt definite în prelucrarea CNC în 5 axe, unghiul de înclinare și unghiul de avans. Când scula se rotește cu un unghi în jurul direcției perpendiculare pe direcția de avans, unghiul este definit drept unghiul de înclinare A. Când scula se rotește cu un unghi în jurul direcției de avans, unghiul este definit ca unghiul de avans a sculei B. Lucrarea discută numai despre unghiul de înclinare la sculei perpendicular pe direcția de avans. Datorită înclinării sculei, sistemul de coordonate local și sistemul de coordonate al sculei nu coincid unul cu celălalt [170].

Zona de angajare se află între suprafața rotită față de laturile de frezare și piesa de prelucrat. Prin direcția vitezei de avans, această zonă de angajare reflectă starea de frezare instantanee a frezei toroidale în contact cu suprafața prelucrată. Figura 2.12 prezintă un exemplu de zonă de angajare în direcții diferite: verticală față de direcția de avans și paralelă cu direcția de avans negativă.

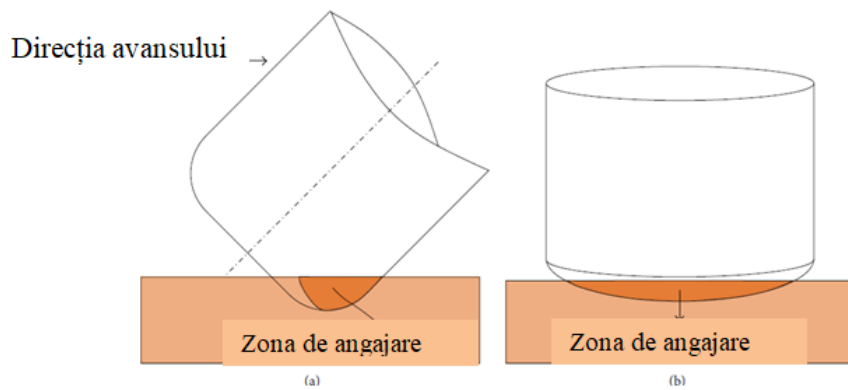


Fig. 2.12 Zona de angajare în direcții diferite ((a) perpendiculară pentru direcția de avans, (b) paralelă cu direcția de avans) [39]

Pentru a obține zona, este definită suprafața de prelucrare care este identificată prin faptul că unghiul de avans este zero.

(1) $A=0$. Vectorul normal al suprafeței de prelucrare este paralel cu orientarea sculei, în timp ce suprafața este suprapusă cu suprafața inferioară a sculei. Prin deplasarea suprafeței de prelucrare egală cu valoarea reziduală de prelucrare de-a lungul direcției vectorului normal de suprafață de prelucrare, se obține suprafața martor.

(2) $A \neq 0$. Vectorul normal al suprafeței de prelucrare este înclinat A din orientarea sculei. Pentru a obține, mai întâi se definește o suprafață aleatorie care este paralelă cu prelucrarea suprafeței și apoi luăm în considerare cel mai apropiat punct la întâmplare, adică punctul tangent al suprafeței de prelucrare și sculă. Apoi, compensăm suprafața de prelucrare prin vectorul său normal cu distanța reziduală, adică suprafața martor ilustrată în figura 2.13.

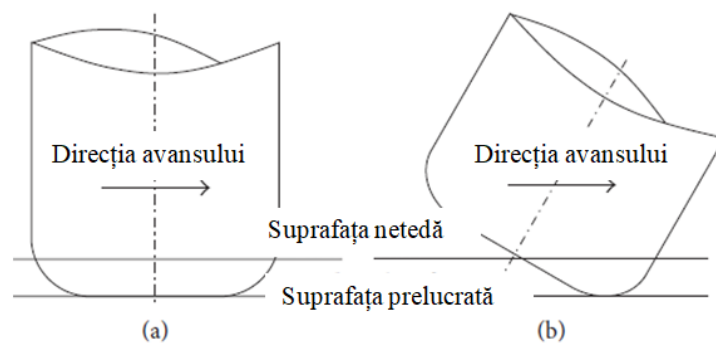


Fig. 2.13 Poziția sculei fără unghi de înclinare (a) $\lambda=0$ și cu unghi de înclinare (b) $\lambda \neq 0$

Exemplele sunt în procesul de frezare și aceeași metodă ce poate fi extinsă și la alte situații de frezare, cum ar fi frezarea laterală asupra suprafețelor libere. Cu toate acestea, unele schimbări privind substituirea limită a angajamentului fac posibilă soluția. După cum s-a menționat mai sus, datele de intrare în software-ul 3D ar trebui să fie însoțite de forma suprafeței care urmează a fi prelucrată, astfel, sunt necesare mai multe modificări ale celui de-al doilea program de dezvoltare bazat pe un software comercial. Exemplele de poziție a regiunii de intersecție în frezarea cu freze sferice cu unghiuri de avans și înclinare împreună cu piesa de prelucrat liber sunt ilustrate în figura 2.14.

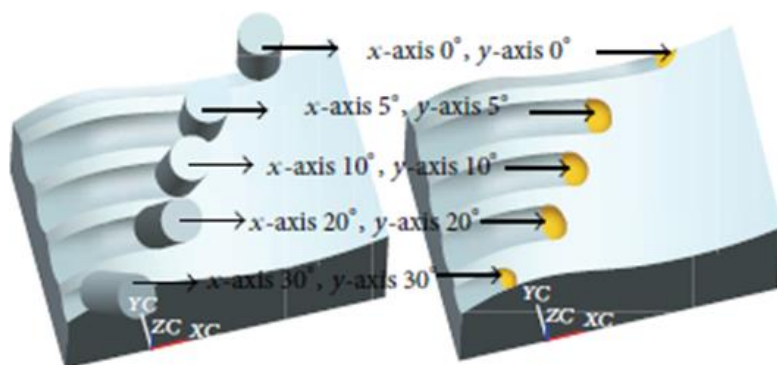


Fig. 2.14 Zona de angajare a sculei și a piesei de prelucrat sub unghiuri diferite de avans și înclinare [39]

Reținem că, pentru freza toroidală, condițiile de frezare variază dramatic de-a lungul tăișului. Astfel, forțele de așchiere măsurate instantaneu la fiecare moment de frezare sunt aplicate pentru a identifica coeficienții. Deoarece forțele medii de frezare obținute prin experimente de la derivarea ecuațiilor de calcul a forței de frezare sunt egale, această concepție poate fi utilizată pentru a face coeficienții forței de frezare. Deoarece materialul de frezare total într-un proces de frezare al unui dinte nu are nici o legătură cu unghiul elicoidal, forțele medii de frezare sunt independente de unghiul elicoidal.

Atunci când procesul de frezare are un unghi de înclinare între sculă și suprafața piesei de prelucrat, acesta are un impact semnificativ asupra forțelor de frezare, dintre care un unghi de pornire-ieșire joacă un rol esențial.

O soluție geometrică a fost reprezentată cu ajutorul software-ului 3D. Se presupune că geometria sculelor este singurul element de intrare, cu condiția ca piesa de prelucrat să aibă o suprafață plană.

Atunci când tipul de frezare este frezarea laterală cu formă complexă a suprafeței, programul dezvoltat poate, de asemenea, să facă posibilă soluția prin adăugarea unor modificări și recondiționare a modelului în timp real.

2.6. Concluzii de capitol

Strategia de prelucrare determină modul de lucru pentru o sculă într-o operație de prelucrare și fixează în principal lățimea și adâncimea frezării și traiectoriile de frezare. O înțelegere aprofundată a performanței sculei de frezat este aplicată în fiecare caz în parte.

În cazul frezelor cilindro-frontale, geometria trebuie hotărâtă atât pentru tăișul principal, cât și pentru tăișul secundar. La aceste freze trebuie să se stabilească, mai întâi care tăiș va prelucra.

Calculul regimurilor de așchiere se îndeplinește în condițiile admiterii unui criteriu determinant, între costul minim sau productivitatea maximă. În mod uzual, calculele se fac în ipoteza obținerii unui cost minim, dar pentru cazurile în care prelucrarea respectivă poate constitui un proces pretențios, se admite ipoteza productivității maxime.

Există diferențe majore între frezarea în sensul avansului și frezarea contra avansului, care produc rezultate diferite.

Înțelegerea diferențelor este esențială pentru extinderea durabilității sculelor, pentru promovarea calității și optimizarea utilizării timpului mașinii.

Suprafețele complexe în general pot fi împărțite în suprafețe concave sau suprafețe convexe. Modelul geometric în cazul acestor prelucrări în care se utilizează, freze cilindro-frontale cu cap sferic poate servi ca punct de plecare pentru stabilirea modelului geometric, în cazul utilizării frezelor cilindro-frontale sau a celor toroidale.

Direcția de înclinare a axei sculei și valoarea unghiului la care este înclinată scula așchietoare în raport cu normala la suprafața de prelucrat, este un factor important, care influențează rugozitatea suprafețelor prelucrate.

Din acest motiv, se impune stabilirea valorilor optime ale înclinării axei sculei, pentru care rugozitatea are valoarea cea mai mică, respectiv evitarea direcțiilor de înclinare și a valorilor unghiulare care determină valori ridicate ale rugozității și implicit calitate scăzută a suprafeței.

2.7. Direcții de cercetare

În urma analizei stadiului actual al procesului de frezare am identificat o serie de direcții de cercetare:

1. Analiza și cercetarea experimentală privind modul în care influențează unghiul de înclinare al axei sculei calitatea suprafeței.
2. Cercetarea experimentală în urma căruia parametri de proces influențează calitatea suprafeței.
3. Identificarea pe baza rezultatelor experimentale ale valorii uzurii sculei în funcție de unghiul de înclinare al axei sculei.
4. Studiarea valorii rugozității asupra diferitelor forme ale suprafețelor prelucrate cu freze toroidale.
5. Analiza și cercetarea experimentală a timpilor de bază la frezare.
6. Centralizarea informațiilor în urma realizării cercetărilor experimentale și crearea unei baze de date.
7. Dezvoltarea unor instrumente practice, inclusiv software, care să ofere informații referitoare la optimizarea procesului de aşchiere la frezarea cu freza toroidală.
8. Compararea calității suprafețelor prelucrate cu freza toroidală versus freza cu cap sferic.

3. CONTRIBUȚII PRIVIND METODOLOGIA DE CERCETARE ȘI PROIECTARE A EXPERIMENTELOR

Este bine cunoscut că, în domeniul tehnologiei prelucrărilor mecanice prin așchiere, ca și în celelalte subdiviziuni ale ingineriei tehnologice s-au făcut și se fac în continuare pași însemnați înainte. Numai astfel se poate avansa în ceea ce privește tehnologiile de prelucrare în vederea generării suprafețelor ale oricărui produs fizic.

În vederea optimizării procesului este necesară dezvoltarea unei metode unitare de cercetare, care presupune o analiză a proceselor tehnologice de prelucrare prin intermediul metodelor matematico-experimentale cu un grad cât mai mare de generalitate.

În privința propriei cercetări teoretice, am urmărit studierea legăturilor dintre diferiți factori și parametri utilizați în cadrul proceselor de așchiere analizate, pe baza cunoștințelor oferite de științele fundamentale, care vizează teoriile așchierii spre a determina modalitățile prin care poate avea loc evoluția acestor procese.

3.1. Obiectivul fundamental al cercetării

Inițializându-se ca punct de plecare stadiul actual al cercetării asupra procesului de frezare cu freze toroidale, implicând diferite tipuri de suprafețe în urma cărora s-au desprins mai multe direcții de cercetare, în baza acestora am selectat un obiectiv fundamental din care la rândul lui reies mai multe obiective specifice.

Obiectivul fundamental al cercetării, setat încă din titlul tezei, este reprezentat de prelucrarea suprafețelor curbe complexe cu freze toroidale, având ca țintă principală obținerea unei calități a suprafeței și a preciziei de prelucrare ridicate, în cadrul procesului de frezare pe mașini cu comandă numerică. Suprafețele complexe sunt reprezentate în cinci cazuri: suprafața concavă cilindrică, suprafața concavă sferică, suprafața convexă cilindrică, suprafața convexă sferică și suprafața plană. Odată cercetat acest proces, următoarea etapă include compararea procesului de prelucrare al suprafețelor, din punctul de vedere al calității suprafeței, utilizând atât freze toroidale cât și freze sferice.

3.2. Proiectarea cercetării

Proiectarea cercetării are ca strategie de desfășurare schema grafică prezentată în figura 3.1, unde sunt prezentate etapele intermediare specifice modelului de cercetare.

Punctul de plecare în ceea ce privește proiectarea cercetării reprezintă prima etapă, o etapă primară în care se analizează în profunzime stadiul actual al cunoașterii asupra procesului de frezare cu freze toroidale. În urma studiului de cercetare efectuat atât pe plan național, cât și pe plan internațional s-au identificat o serie de lipsuri în ceea ce privește cercetările care n-au fost abordate, sau necesită o cercetare mai amănunțită asupra procesului. În paralel, a mai fost nevoie de stabilirea stadiului de cercetare asupra modelării matematice aplicate în diferite cazuri, cât și în cazul procesului de frezare cu freze toroidale. Tendința de dezvoltare continuă a procesului de frezare, obligă apariția de noi concepte, inclusiv implicarea frezelor toroidale în prelucrarea suprafețelor complexe, ceea ce impune noi cercetări în vederea identificării și cunoașterii cât mai exacte a condițiilor în care se desfășoară procesul de așchiere cu freze toroidale.

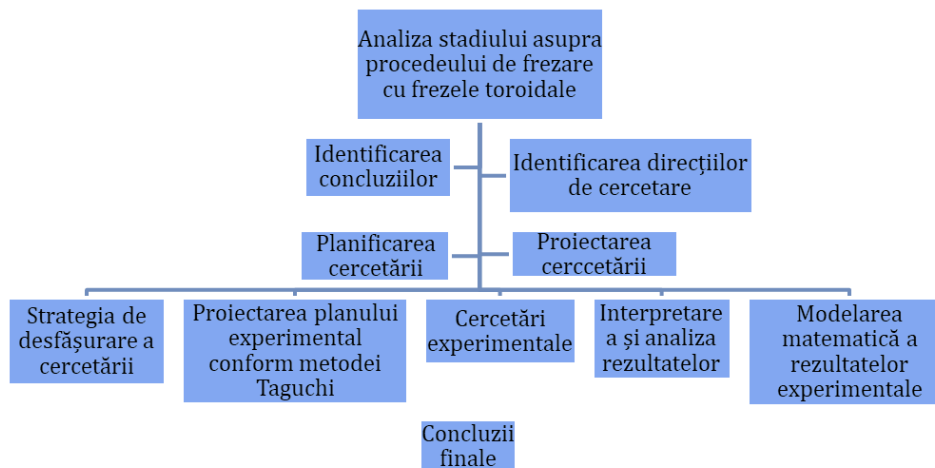


Fig. 3.1 Proiectarea generală a cercetării

Lipsurile privind cunoașterea procesului de frezare cu freze toroidale, în urma efectuării studiului bibliografic, au fost identificate în cazul analizei influenței parametrilor de proces, ai parametrilor tehnologici asupra comportării procesului și a rezultatelor obținute în urma prelucrării cu frezele toroidale. S-a mai observat existența a

puține studii în ceea ce privește determinarea rugozității suprafeței prelucrate și posibilitatea estimării valorii rugozității suprafeței. În cazul unor condiții inițiale date, este destul de redusă ca urmare a numărului redus de cercetări orientate în această direcție.

Pentru identificarea structurii procesului, au fost stabilite inițial variabilele independente specifice procesului de aşchiere cu freze toroidale, utilizate în această lucrare de cercetare: viteza de aşchiere, unghiul de înclinare al axei sculei (direcție și valoare) și avansul pe dinte. Trebuie menționat faptul că viteza de aşchiere este rezultatul combinării turației aplicate sculei aşchietoare și a diametrului sculei aşchietoare utilizată în timpul procesului.

Variabila dependentă specifică analizată în această lucrare a fost rugozitatea suprafeței R_a , respectiv R_t , măsurată atât pe direcția avansului cât și perpendicular pe direcția avansului.

Modelul de proces propus în cadrul acestei lucrări, urmărește modelul tipic analizat în lucrarea [171] și care este prezentat, în forma particularizată, în figura 3.2.

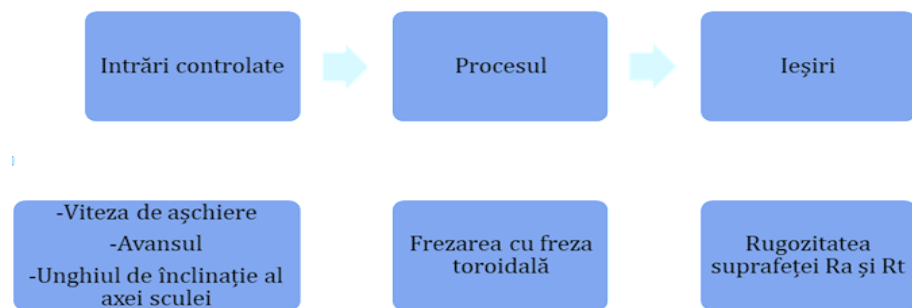


Fig. 3.2. Modelul procesului

În ceea ce privește interpretarea rezultatelor experimentale acestea s-au desfășurat pe baza schemei prezentate în figura 3.3.

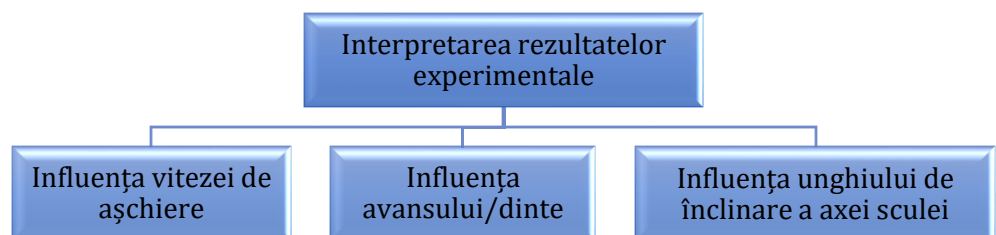


Fig. 3.3. Interpretarea rezultatelor experimentale

Pentru obținerea unei imagini mai concrete, referitoare la calitatea suprafeței prelucrate, măsurarea rugozității se va face atât pentru R_a cât și pentru R_t , cu măsurători efectuate atât pe direcția avansului cât și perpendicular pe direcția acestuia.

Pentru a prelucra datele experimentale, prin utilizarea unui soft de modelare matematică, se poate deduce estimarea valorii rugozității, atât în cadrul intervalului în care s-au încadrat datele de intrare, cât și extrapolat înafara acestui interval. Acest artificiu oferă indicii în ceea ce privește procesul de frezare, fără a fi necesară efectuarea altor experimente, care ar însemna cheltuieli suplimentare (fig.3.4).

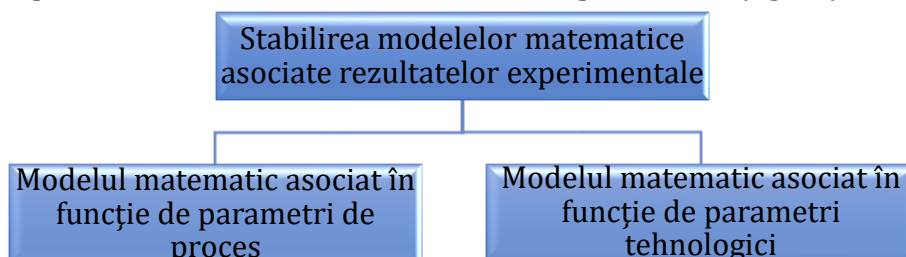


Fig.3.4. Modelarea matematică a rezultatelor experimentale

Ca urmare, în cadrul acestei proiectări inițiale a lucrării de cercetare, trebuie inclusă și această posibilitate, fapt ce implică necesitatea identificării unui program adecvat, util în etapa de modelare matematică a rezultatelor experimentale.

3.3. Planificarea cercetării

Planificarea cercetării se realizează din două direcții, una fiind cea în care cercetătorul are deja experiență și de asemenea există cunoștințe ale literaturii de specialitate, precum și de la obiectivele proiectului, adică la ce întrebări trebuie să răspundă proiectul. Planificarea cercetării reprezintă construcția unui drum între ceea ce deja se știe și ceea ce se urmărește a se cunoaște.

Planificarea este un proces de stabilire a priorităților și de adecvare a acestora la întrebările de cercetare și reciproc. Revizuirea planului de cercetare sub aspectul posibilității de îndeplinire a acestuia, permite recalibrarea scopurilor și metodologiilor și adecvarea acestora din punct de vedere al timpului necesar cercetării.

Planificarea activității de cercetare, are ca scop principal obținerea rezultatelor preconizate în condiții de eficiență maximă.

Drept urmare, alegerea volumului de măsurări se va face pe baza următoarelor considerente:

- Precizia de prelucrare;
- Timpul necesar prelucrării;
- Norma de uzură a sculei.

Dacă numărul de măsurători este prea mic, poate atrage după sine efecte negative în ceea ce privește precizia măsurătorilor, iar dacă numărul de măsurători este prea mare, aduce după sine o încărcare suplimentară a programului de cercetare. Toate datele trebuie corelate astfel încât concluziile să fie complete și corecte.

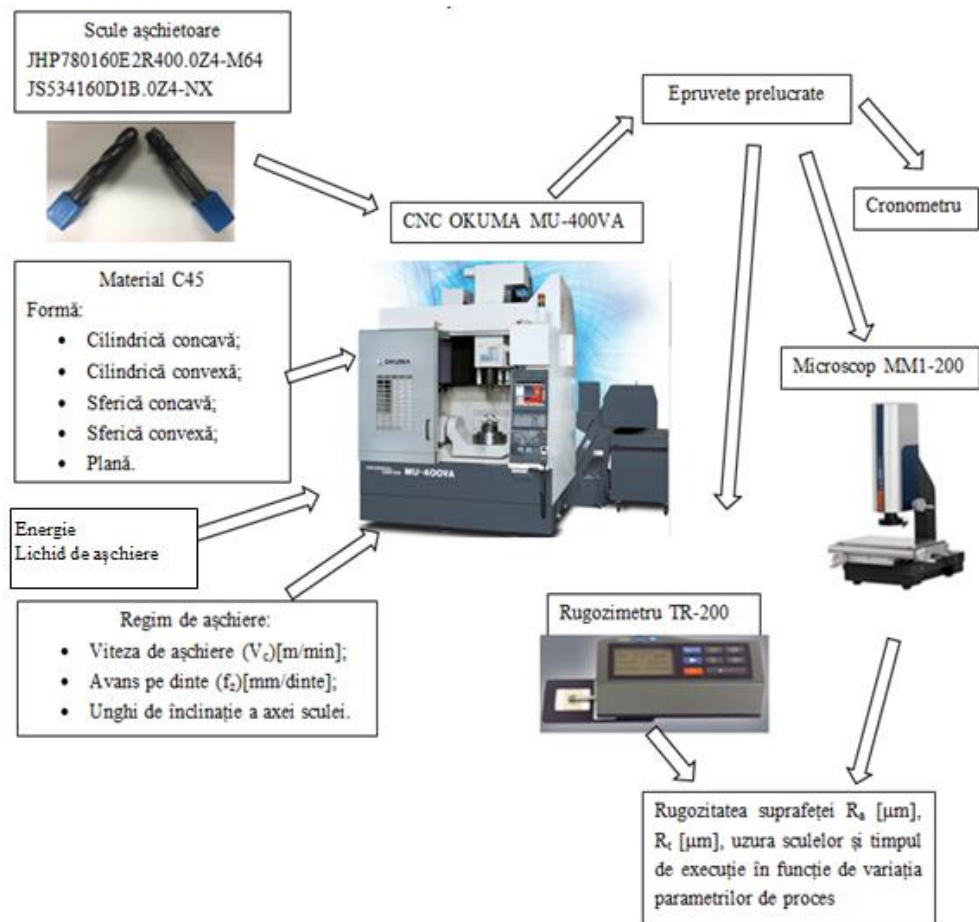


Fig. 3.5 Schema standului experimental

Planificarea propriu-zisă a propriei cercetări, se bazează pe standul experimental propus spre efectuarea testărilor care este

prezentat în figura 3.5. După cum se poate observa din această schemă, materialul semifabricatului utilizat în desfășurarea propriilor cercetări este oțelul C45 al cărui compoziție chimică și caracteristici sunt prezentate în cele ce urmează.

Desfășurarea efectivă a experimentelor va decurge în direcția studiului amănunțit a comportării frezei toroidale asupra etalonului de bază C45, conform obiectivelor propuse asupra suprafețelor complexe, la variația combinațiilor optime ale parametrilor regimului de așchiere, cât și al unghiului de înclinare al axei sculei.

În urma analizei materialului cu ajutorul unui spectrometru, acesta prezintă următoarele componente chimice: Fe 98,6%, C 0,463 %, Mn 0,556%, Si 0,177%, P 0,003%, Cr 0,011%, Mo 0,048%, Ni 0,054%, Al 0,258%, Cu 0,01%, Ti 0,013, etc potrivit concentrațiilor obținute în urma analizei rezultă că materialul este C45 conform ISO 683/18-1996.

Toate caracteristicile funcționale, tehnologice și economice ale materialului sunt necesare pentru a pune în evidență comportarea acestuia, în interacțiunea cu sculele așchietoare și pentru a aprecia posibilitățile de realizare a preciziei dimensionale și a calității prescrise pentru suprafețe. Caracteristicile mecanice ale oțelului C45 sunt prezentate în următorul tabel.

Tab. 3.1 Caracteristicile mecanice ale oțelului C45

Marca oțelului	Caracteristicile mecanice minime					
	Rezistența la tracțiune [daN/mm ²]	Alungire rupere [%]	Gâtuirea rupere [%]	Limita de curgere [daN/mm ²]	Reziliența 30/2 [daJ/vm ²]	Duritate HB
C45	700-840	14		410	39	190-260

Cele două scule așchietoare folosite sunt: freza toroidală **JHP780160E2R400.OZ4-M64** și freza sferică **JS534160D1B.OZ4-NXT**.

Freza toroidală, sau freză cu rază la colț are diametrul de Ø16, cu adâncimea maximă de așchiere de 32 mm. Raza la colț a acesteia este de 4 mm având un număr de 4 dinți, unghiul de degajare radial de 9° și unghiul de degajare axial de 44°. Freza are o formă cilindrică cu stratul de acoperire de tip PVD (Physical Vapor Deposition) fără canale de răcire. Această freză este prezentată în figura 3.6a.

Freza sferică are diametrul de Ø16, cu adâncimea maximă de așchiere de 48 mm. Raza la colț a acesteia este de 8 mm având un număr de 4 dinți cu unghiul de degajare radial de 10°, unghiul de degajare axial de 30° și unghiul tăișului de așchiere al sculei de 90°.

Freza are o formă cilindrică din carbură PVD, fără canale de răcire. Această freză este prezentată în figura 3.6b.

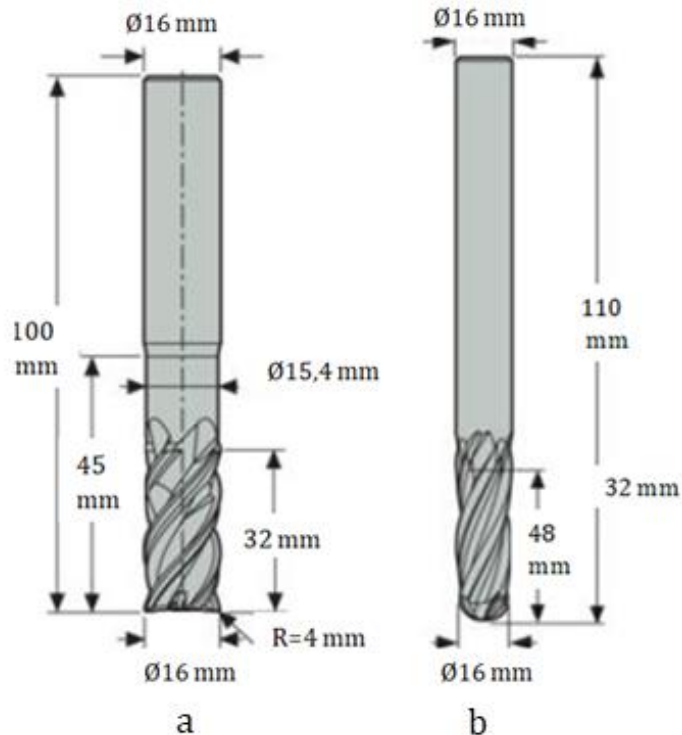


Fig. 3.6 Reprezentarea grafică a celor două freze

Centrul cu comandă numerică utilizat este OKUMA MU-400VA, o mașină unealtă în 5 axe (fig. 3.5).

În ceea ce privește mișcările mașinii, mișcarea pe axa X este executată de către arborele principal, mișcarea pe Y de către masa mașinii, iar mișcarea pe Z tot de arborele principal. În cazul mișcărilor de avans circular după axele A și C realizate de masa mașinii în jurul axei X respectiv în jurul axei Z.

Centrul cu comandă numerică utilizat este **OKUMA MU-400VA**, o mașină unealtă în 5 axe.

Aparatele folosite în scopul analizei calității suprafeței sunt destinate unei evaluări cât mai precise asupra rugozității suprafeței prelucrate și asupra uzurii sculelor, astfel rugozimetrul **TR200**, **Microscopul stereoscopic IOR** și scannerul **Profilm 3D** sunt utilizate în observarea evoluției rugozității, iar microscopul **MM1-200** este utilizat pentru evaluarea optică a uzurii sculelor (fig.3.5).

În baza standului experimental, pot fi îndeplinite principalele cerințe necesare atingerii obiectivelor stabilite și totodată obținerii unor date experimentale, în baza cărora poate fi analizată influența diferiților parametri precum: viteza de așchiere, avansul pe dinte și unghiul de înclinare asupra rugozității suprafeței în cadrul procesului de frezare al suprafețelor complexe utilizând frezele toroidale.

3.4. Strategia de desfășurare a cercetării

Creșterea rolului cunoștințelor în societatea modernă, sub formă de știință, educație, tehnologii, inovații, a contribuit decisiv la constituirea unor noi tehnologii, bazate pe cunoaștere, competitivitate și înaltă calitate, în cadrul acesteia depinzând de capacitatea de a acumula și a utiliza cunoștințe noi. Cercetarea-dezvoltarea a devenit factorul cheie al creșterii competitivității și a dezvoltării industriei prelucrărilor prin așchiere.

Pentru desfășurarea mai rapidă a activității de cercetare este indicat ca numărul experimentelor să fie redus la strictul necesar. În acest sens este necesară stabilirea factorilor de studiat în concordanță cu obiectivele planului experimental propriu. Stabilirea nivelurilor de variație a factorilor se va face în funcție de recomandările producătorilor și de posibilitățile tehnologice ale sculei, mașinii unelte și materialelor de prelucrat.

Așadar, examinarea rezultatelor determinărilor experimentale trebuie ușurată prin alegerea inițială a experimentărilor care trebuie efectuate. La finalizarea seturilor experimentale, sunt colectate datele rezultate în urma măsurărilor realizate asupra rugozității suprafeței, urmând ca acestea să fie supuse unor analize statistice.

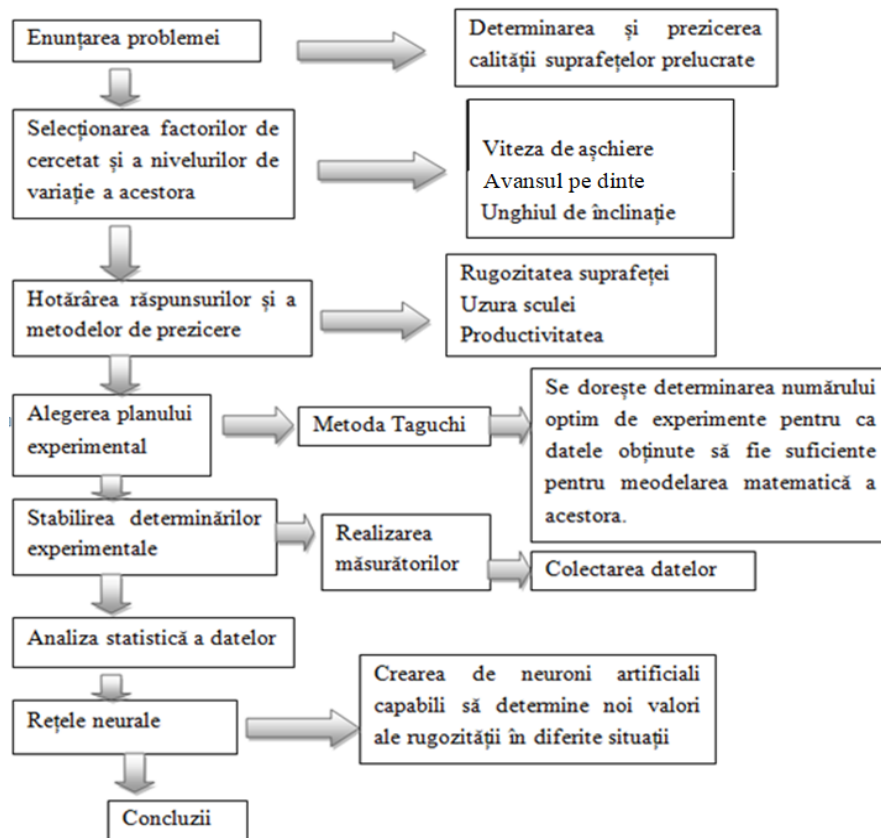


Fig. 3.7 Strategia de cercetare proprie

Scopul analizelor statistice constă în identificarea valorilor optime, verificarea caracterului aleatoriu al datelor experimentale și verificarea normalității distribuției datelor experimentale, cu scopul certificării faptului că valorile obținute sunt valori reale ale procesului studiat.

Așadar, pornind de la aspectele prezentate anterior, strategia de cercetare a lucrării de față va fi desfășurată conform figurii 3.7.

3.5. Modul de derulare al cercetării

În cadrul cercetării experimentale, realizarea experimentelor și valorificarea la maxim a bazei de date obținute în urma măsurătorilor asigurând o productivitate mărită, dar și costul de prelucrare la un nivel minim, fiind de preferat o reducere la minim a erorilor de măsurare, face ca cercetarea să aibă o eficiență maximă.

Având ca scop afirmația expusă mai sus, în realizarea cercetării experimentale în cadrul procesului de prelucrare cu frezele toroidale, dar și compararea prelucrărilor cu freza cu cap sferic, face ca obiectivul urmărit să fie realizarea unei calități a suprafeței cât mai bună sub influența parametrilor regimului de așchiere cât și a unghiului de înclinare a axei sculei. Ca obiectiv secundar se urmărește uzura sculei cât și productivitatea celor două tipuri de freze.

Dezvoltând sub formă matematică rugozitatea aritmetică a suprafeței teoretică R_{at} aceasta este strict dependentă de mai mulți factori cum ar fi: viteza de așchiere v_c , adâncimea de așchiere a_p , avansul pe dinte f_z și unghiul de înclinare al axei sculei θ .

$$R_{at} = f(v_c, a_p, f_z, \theta) \quad (3.1)$$

S-a dovedit experimental că, această valoare teoretică R_{at} este imposibil de atins din cauza erorilor experimentale ε , aceste erori apar în timpul încercărilor, dar rugozitatea poate să fie estimată prin relația R_{aexp} determinată experimental.

$$R_{aexp} = R_{at} + \varepsilon = f(v_c, a_p, f_z, \theta) \quad (3.2)$$

Avantajele utilizării unui sistem de calcul în domeniul planurilor experimentale și analizei factoriale sunt de necontestat. Munca titanică a multor calcule repetate a fost eliminată și a făcut posibilă utilizarea a multor metode statistice, altfel greu de utilizat în practică, pentru un număr mare de cercetători.

La ora actuală, utilizarea calculatoarelor în domeniul planurilor experimentale și a analizei este de neprețuit, și practic ar fi imposibil de programat, realizat și analizat studii experimentale complexe fără ajutorul lor. Cele mai cunoscute și probabil cele mai utilizate programe de statistică sunt: IBM SPSS software, SAS®, Minitab, Professional Statistics, State Graphics, TableCurve, JustNN, MatLabB, Neural Designer, Statistical Data System, MODDE.

3.6. Proiectarea planului experimental

Planul de experimente reprezintă o serie de încercări planificate de înainte, având ca scop determinarea cu un minimum de încercări și maximum de precizie influențele posibile ale parametrilor diferiți, având ca obiectiv optimizarea performanțelor sistemului studiat.

Țîțu [172] afirmă faptul că odată determinat scopului experimental, se presupune o identificare riguroasă a nivelului cel mai favorabil al fiecărui parametru stabilit. Acest nivel are ca scop creșterea performanțelor procesului de așchiere. Pentru a obține o sensibilitate minimă a factorilor necontrolabili autorul transmite existența a trei metode experimentale:

1. Experimentări care se efectuează variind un singur factor o dată;
2. Experimentări cu un plan factorial complet;
3. Experimentări cu un plan factorial fracționat.

Luându-se în considerare destinația metodei Taguchi ce este orientată spre desfășurarea experimentelor, pentru o bună eficientizare a rezultatelor este necesară parcurgerea unor etape obligatorii după cum urmează:

- Identificarea factorilor care intervin în cadrul procesului de așchiere prin frezare cu freza toroidală;
- Selectarea și definirea parametrilor ce urmează a fi studiați;
- Alegerea nivelurilor pentru fiecare parametru;
- Repartizarea parametrilor sub forma unei matrici;
- Realizarea cercetării conform planului de experiențe Taguchi;
- Analiza și interpretarea datelor experimentale.

Toate aceste etape duc la o bună gestionare a experimentelor astfel încât la finalul parcurgerii acestora, datele obținute să transmită cele mai practice, eficiente și reale informații.

3.7. Validarea factorilor care intervin în domeniul procesului de frezare cu freza toroidală și cea sferică

Potrivit ordinii etapelor de parcurgere a proiectării experimentale prin metoda Taguchi, identificarea factorilor care intervin în procesul de frezare reprezintă prima etapă, având un rol de pornire a proiectării experimentelor. În cadrul experimentelor ce doresc a fi realizate, principalii factori de interes sunt:

- Viteza de așchiere - v_c m/min;
- Avansul pe dinte f_z mm/dinte;
- Unghiul de înclinare a axei sculei față de normala la suprafață.

3.8. Selectarea și definirea parametrilor de studiu

Cei trei factori menționați anterior, sunt stabiliți cu scopul de a determina cel mai favorabil nivel, pentru a crește performanțele procesului de frezare și pentru a obține o influență minimă a factorilor necontrolabili și în același timp pentru a obține o calitate a suprafeței cât mai bună.

Selectarea și definirea acestor parametri se face în concordanță cu criteriile tehnologice a mașinii cu comandă numerică, în concordanță cu posibilitățile sculei și nu în ultimul rând cu caracteristicile materialului din care este realizat semifabricatul.

Tab. 3.2. Parametrii de proces și valorile lor atribuite conform producătorului SECO

Denumire freză	Cod freză	a_p [mm]	a_e [mm]	f_z [mm/dinte]	v_c [m/min]
Freza toroidală	JHP780160E2R400.OZ4-M64	1	0,3	0,15	140-160
Freza sferică	JS534160D1B.OZ4-NXT	0,8	0,3	0,08	300-370

Tab.3.3. Valorile proprii ale regimurilor de așchiere

Denumire freză	Unghiul de înclinare a axei sculei [°]			Avansul pe dinte f_z [mm/dinte]			Viteza de așchiere v_c [m/min]		
	15	25	35	0,11	0,12	0,13	80	110	140
Freza toroidală	45		55	0,14	0,15	0,16	170	200	210
				0,17	0,18	0,19			
	15	25	35	0,05	0,06	0,07	280	310	340
Freza sferică	45		55	0,08	0,09	0,10	370	400	430
				0,11	0,12	0,13			

Analizând catalogul și ghidul tehnic, conform producătorului de scule Seco, acesta recomandă valorile aferente vitezei de așchiere, adâncimii de așchiere și avansului pe dinte conform celor prezentate în tabelul 3.2, acestea urmând a fi luate riguros în calcul.

În cele ce urmează, având ca bază tabelul 3.2 se vor stabili valorile proprii necesare desfășurării cât mai vaste a experimentelor astfel încât datele măsurate să acopere o arie cât mai mare, astfel în tabelul 3.3 sunt prezentate valorile proprii ale regimurilor de așchiere.

Pentru a aborda problema prin prisma metodei experimentale și cu un plan factorial complet cercetarea necesită o atenție sporită. După cum bine se poate observa, există trei factori variabili implicați, restul factorilor păstrându-se constanți astfel rezultând un număr de 270 de încercări cu fiecare freză, se cumulează un număr de 540 de încercări experimentale pentru un singur tip de suprafață. Drept urmare, pentru a atinge obiectivul dorit și pentru a determina experimentele care aduc mai multe informații eficiente s-a ales desfășurarea clasificării acestora prin metoda de experimente Taguchi.

Având ca scop principal obținerea unor rezultate cât mai corecte și concludente, în ceea ce privește prelucrarea suprafețelor atât cu freza toroidală cât și cu freza cu cap sferic, s-a decis efectuarea a câte trei măsurători atât paralel pe direcția avansului cât și perpendicular pe aceasta, urmărindu-se rugozitatea mediei aritmetice R_a și rugozitatea totală R_t .

3.9. Selectarea și definirea parametrilor de studiu

Având ca punct de plecare tabelul 3.3 unde sunt prezentate valorile parametrilor de proces fiind în concordanță cu posibilitățile sculelor și ale mașinii unelte, pentru ca desfășurarea planului experimental să se realizeze în condiții de eficiență maximă. Se vor considera trei niveluri reprezentate de valorile minime, medii și valorile maxime ale fiecărui factor de reglaj pentru fiecare freză după cum sunt prezentate în tabelele 3.4 și 3.5.

Tab 3.4. Parametri de reglaj și valorile nivelurilor aferente frezei toroidale

Denumire parametru	Valoarea minimă	Valoarea medie	Valoarea maximă
Viteza de așchiere	80 [m/min]	170 [m/min]	210 [m/min]
Avans pe dinte	0,11 [mm/dinte]	0,15 [mm/dinte]	0,19 [mm/dinte]
Unghiul de înclinare	15°	35°	55°

Tab 3.5. Parametri de reglaj și valorile nivelurilor aferente frezei sferice

Denumire parametru	Valoarea minimă	Valoarea medie	Valoarea maximă
Viteza de așchiere	280 [m/min]	370 [m/min]	430 [m/min]
Avans pe dinte	0,05 [mm/dinte]	0,09 [mm/dinte]	0,13 [mm/dinte]
Unghiul de înclinare	15°	35°	55°

În ceea ce privește adâncimea de așchiere aceasta se va păstra constantă pe toată durata experimentelor fiind de 0,5 mm în ambele cazuri, precum și în cazul lui a_e unde se va păstra valoarea constantă de 0,3 mm. Astfel, adaosul de prelucrare după degroșare și pregătirea suprafeței este constant de 0,5 mm. Drept urmare, pentru a determina efectul celor 3 factori influenți A, B și C, fiecare dintre ei va fi încercat pe 3 niveluri, cu ajutorul unui plan factorial complet ceea ce duce la $3^3=27$ încercări pentru fiecare freză și pentru fiecare suprafață.

Ceea ce a fost mai important s-a stabilit, astfel, am decis numărul de încercări ca fiind de 27 pentru fiecare suprafață ceea ce înseamnă 135 de încercări cu freza toroidală și 135 de încercări cu freza cu cap sferic, însumând 270 de încercări în total urmând etapa în care se va alege o matrice de experiență.

3.10. Alegerea unei matrici de experiențe

Având ca punct de pornire condițiile necesare realizării unui plan de experiențe, ortogonalitatea reprezintă condiția primară în ceea ce privește calcularea efectelor unui factor independent de alți factori.

Prezentând ca obiectiv realizarea unui număr cât mai scăzut de experimente în baza utilizării metodei Taguchi, prin combinarea factorii stabiliți cu ajutorul tabelelor ortogonale, având ca scop determinarea unei matrici de experimente, este nevoie de stabilirea numărului total de grade de libertate (gdl).

Pentru a calcula gradele de libertate, matricea de experiențe trebuie să aibă un număr de grade de libertate cel puțin egal cu numărul total de grade de libertate cerute. Astfel, conform celor 3 factori stabiliți la cele 3 niveluri, gradele de libertate sunt asociate cu: $gdlf=3 \times 3=9$.

Ținând cont de cei trei parametri studiați, se realizează 3 interacțiuni între aceștia: $gdli=3 \times 3 \times 3=27$.

Așadar, numărul gradelor de libertate trebuie să fie de minim 27, matricea trebuie să aibă un număr minim de 27 încercări, drept urmare, aferent celor 3 parametri se formează o matrice de experiență.

Ținând cont de metoda Taguchi, cea mai apropiată matrice este L27 (3^3) unde L27 semnifică cele 27 de coloane ale matricii echivalente cu planul experimental, ce conține 27 de încercări, iar 3^3 reprezintă cele 3 linii cu 3 cifre pentru 3 niveluri precum în figura 3.8.

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 1 & 2 & 3 & 1 & 2 & 3 & 1 & 2 & 3 & 1 & 2 & 3 & 1 & 2 & 3 & 1 & 2 & 3 & 1 & 2 & 3 & 1 & 2 & 3 & 1 & 2 & 3 & 1 & 2 & 3 & 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}$$

Fig. 3.8 Matricea ortogonală în concordanță cu metoda Taguchi pentru alegerea valorilor fiecărui experiment

În tabelele 3.6-3.9 este reprezentat în coloanele 1-3 numărul coloanelor, iar notațiile A, B și C reprezintă parametrii de aşchiere astfel putându-se determina valorile factorilor pentru fiecare încercare. Astfel tabelele 3.6 și 3.7 definesc combinația optimă a valorile factorilor discutați, cu observația de a respecta schema de dispunere în tabele a valorilor parametrilor descriși de metoda Taguchi.

După cum reiese din aceste tabele, cele 27 de încercări pentru fiecare freză în parte respectiv pentru fiecare suprafață, sunt considerate variante optime ale combinațiilor valorilor parametrilor regimului de aşchiere studiați spre a indica nivelul cel mai favorabil al fiecărui factor în parte, pentru a reduce dispersia procesului de aşchiere și obținerea unei calități a suprafeței cât mai bună, dar și observarea nivelului de productivitate dintre cele două tipuri de freze.

Tab. 3.6. Matricea de experiență pentru freza toroidală

Parametrii și Interacțiuni		A	B	C
Parametrul		Viteza de aşchiere [m/min]	Unghiul de înclinare [°]	Avansul pe dinte [mm/dinte]
		1	2	3
Încercarea	1	1	1	1
	2	1	1	2
	3	1	1	3
	4	1	2	1
	5	1	2	2
	6	1	2	3
	7	1	3	1
	8	1	3	2
	9	1	3	3
	10	2	1	1
	11	2	1	2
	12	2	1	3
	13	2	2	1
	14	2	2	2
	15	2	2	3

	16	2	3	1
	17	2	3	2
	18	2	3	3
	19	3	1	1
	20	3	1	2
	21	3	1	3
	22	3	2	1
	23	3	2	2
	24	3	2	3
	25	3	3	1
	26	3	3	2
	27	3	3	3

Fiind aceeași matrice ortogonală de corespondență conform metodei Taguchi, în ambele situații matricea de experiență L27 (3^3) este la fel atât pentru experimentele cu freza toroidală cât și pentru cele cu freza sferică.

Tab. 3.7. Matricea de experiență pentru freza sferică

Parametrii și Interacțiuni		A	B	C
Parametrul		Viteza de așchiere [m/min]	Unghiul de înclinare [°]	Avansul pe dinte [mm/dinte]
		1	2	3
Încercarea	1	1	1	1
	2	1	1	2
	3	1	1	3
	4	1	2	1
	5	1	2	2
	6	1	2	3
	7	1	3	1
	8	1	3	2
	9	1	3	3
	10	2	1	1
	11	2	1	2
	12	2	1	3
	13	2	2	1
	14	2	2	2
	15	2	2	3
	16	2	3	1
	17	2	3	2
	18	2	3	3
	19	3	1	1
	20	3	1	2
	21	3	1	3

	22	3	2	1
	23	3	2	2
	24	3	2	3
	25	3	3	1
	26	3	3	2
	27	3	3	3

Având ca punct de plecare tabelul 3.6 pentru freza toroidală și tabelul 3.7 pentru cea sferică, în tabelul 3.8 respectiv 3.9 sunt prezentate valorile parametrilor aferente fiecărei încercări conform planului de experimente Taguchi.

Tab. 3.8 Valorile parametrilor pentru fiecare încercare cu freza toroidală

Încercarea	Viteza de așchiere [m/min]	Unghiul de încalinare [°]	Avansul pe dinte [mm/dinte]
1	80	15°	0,11
2	80	15°	0,15
3	80	15°	0,19
4	80	35°	0,11
5	80	35°	0,15
6	80	35°	0,19
7	80	55°	0,11
8	80	55°	0,15
9	80	55°	0,19
10	170	15°	0,11
11	170	15°	0,15
12	170	15°	0,19
13	170	35°	0,11
14	170	35°	0,15
15	170	35°	0,19
16	170	55°	0,11
17	170	55°	0,15
18	170	55°	0,19
19	210	15°	0,11
20	210	15°	0,15
21	210	15°	0,19
22	210	35°	0,11
23	210	35°	0,15
24	210	35°	0,19
25	210	55°	0,11
26	210	55°	0,15
27	210	55°	0,19

Tab. 3.9 Valorile parametrilor pentru fiecare încercare cu freza sferică

Încercarea	Viteza de aşchiere [m/min]	Unghiul de înclinare [°]	Avansul pe dinte [mm/dinte]
1	280	15°	0,05
2	280	15°	0,09
3	280	15°	0,13
4	280	35°	0,05
5	280	35°	0,09
6	280	35°	0,13
7	280	55°	0,05
8	280	55°	0,09
9	280	55°	0,13
10	370	15°	0,05
11	370	15°	0,09
12	370	15°	0,13
13	370	35°	0,05
14	370	35°	0,09
15	370	35°	0,13
16	370	55°	0,05
17	370	55°	0,09
18	370	55°	0,13
19	430	15°	0,05
20	430	15°	0,09
21	430	15°	0,13
22	430	35°	0,05
23	430	35°	0,09
24	430	35°	0,13
25	430	55°	0,05
26	430	55°	0,09
27	430	55°	0,13

3.11. Monitorizarea productivității și uzurii sculei

Mi-am propus ca în paralel cu monitorizarea calității suprafeței, în funcție de cele trei variabile, să urmăresc evoluția productivității în prelucrarea celor cinci tipuri de suprafețe, comparativ între frezele toroidale și cele cu cap sferic. Pentru ca datele să fie cât mai exacte și să transpună în realitate date reale, am decis să consider constanți timpii auxiliari, timpii de fixare a semifabricatului, de stabilire a originii semifabricatului astfel să iau în considerare doar timpul în care scula se află în lucru. Acest timp mi-l oferă direct softul CAM, ceea ce oferă un plus de încredere. Productivitatea sau randamentul factorilor de producție, este dată de eficiența combinării acestora în procesele de

realizare ale bunurilor sau de prestare ale serviciilor pentru obținerea maximului de efecte utile cu minimum de resurse [173].

Productivitatea se determină în majoritatea cazurilor prin raportarea rezultatelor realizate într-o anumită perioadă la volumul factorilor de muncă angrenați, eu aleg să fac o statistică în care să țin cont de calitatea suprafeței, de uzura sculei cât și de timpul în care se realizează fiecare reper.

Monitorizarea uzurii sculei se va realiza vizual cu ajutorul microscopului MM1-200 pentru cele trei tipuri de înclinări ale sculei.

3.12. Concluzii de capitol

Având ca punct de plecare obiectivul fundamental al acestei lucrări respectiv cele două obiective specifice ce sunt definite în cadrul acestui capitol, întreaga activitate respectă planul de cercetare experimentală stabilit.

Odată parcurse etapele planului de experimente, conform metodei deja consacrate Taguchi, am constatat că folosind această metodă am redus numărul de experimente. De la 270 de încercări asupra unei singure suprafețe cu un singur tip de freză ceea ce însumează în total 2700 de încercări pentru toate suprafețele cu ambele freze. Astfel, acestea s-au redus la 27 de încercări cu o singură freză, asupra unei singure suprafețe, ceea ce însumează un număr de 270 de încercări asupra tuturor suprafețelor cu ambele freze.

În cele ce urmează, se va urmări efectuarea experimentelor conform planului de experimente, ceea ce conferă o importanță majoră fiecărei informații primite în urma prelucrării suprafeței. Datele de intrare vor fi strict folosite, conform tabelelor prezentate, ceea ce conferă sistemului o rigiditate și o claritate sporită. Cercetările experimentale vor avea ca scop determinarea influenței parametrilor de proces și a parametrilor tehnologici asupra calității suprafeței, în cazul diferitelor tipuri de suprafețe, respectiv diferenței tipului de scule.

4. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND COMPARAREA FREZELOR TOROIDALE CU FREZELE CU CAP SFERIC

Considerând ca punct de pornire informațiile furnizate de către studiile abordate în capitolul anterior, în acest capitol se va proceda spre efectuarea cercetărilor experimentale astfel încât, acestea să fie cât mai cuprinzătoare și să ofere cât mai multe răspunsuri în ceea ce privește prelucrarea suprafețelor complexe cu freza toroidală, dar și comparativ cu freza cu cap sferic. Cercetările experimentale se vor realiza asupra materialului C45, utilizând 5 tipuri de suprafețe, fiecare suprafață fiind degroșată și semifinisată într-un proces anterior, cercetările axându-se doar asupra prelucrării de finisare cu cele două tipuri de freze.

4.1. Desfășurarea experimentelor

Cercetările experimentale s-au realizat în cadrul societății S.C. Ramira S.A, o societate pe acțiuni, cu punctul de lucru în localitatea Baia Mare. Aceasta este o firmă de top responsabilă de realizarea stațiilor robotizate pentru fabricarea caroseriilor auto pentru mai mulți producători de automobile din lume. Aceasta deține în patrimoniul său un număr însemnat de mașini cu comandă numerică atât în 3-4 axe cât și în 5 axe, dar și mașini clasice.

Experimentele se vor realiza pe un centru cu comandă numerică în 5 axe OKUMA MU-400VA. Acesta este un CNC vertical rapid și precis ce oferă o prelucrabilitate simultană superioară în 5 axe



Fig. 4.1 Centrul cu comandă numerică OKUMA MU-400VA

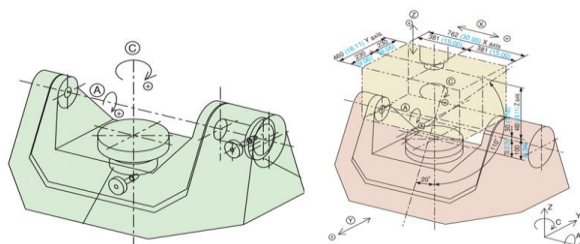


Fig. 4.2 Reprezentarea grafică a spațiului de lucru

Okuma MU-400VA dispune de o masă rotativă care oferă un plus în prelucrarea în 5 axe cât și o poziționare rapidă și precisă și tot odată o rigiditate în a oferi performanțe deosebite, în figura 4.1 este prezentat CNC-ul. Analizând caracteristicile tehnice ale centrului cu comandă numerică OKUMA MU-400VA, aceasta are o greutate de 13000 kg ceea ce-i oferă un plus de rigiditate, capacitatea magaziei de scule fiind de 32 de locașuri.

Turația maximă a arborelui este de 15000 rot/min, iar dimensiunea mesei este de $\varnothing 400$ mm. Potrivit rotirii mesei, rotirea mesei pe axa C se face la 360° , iar rotirea mesei pe axa A se face de la $+20^\circ$ la -110° .

În ceea ce privește caracteristicile fizice ale epruvetelor acestea sunt de 5 categorii. Experimental se va realiza prelucrarea suprafețelor plane, prelucrarea suprafețelor sferice-convexe, prelucrarea suprafețelor sferice-concave, prelucrarea suprafețelor cilindrice-convexe și prelucrarea suprafețelor cilindrice-concave precum sunt ilustrate din figura 4.3.

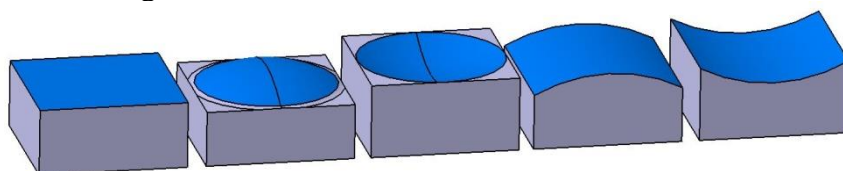


Fig. 4.3 Forma 3D a celor 5 tipuri de suprafețe

Acestea au o lățime de 40 mm, lungime de 40mm și grosimea de 20mm fiind din oțel carbon C45.

Epruveta plană este o suprafață pe care o dreaptă se poate aplica perfect în toate sensurile, aceasta își păstrează dimensiunile laterale, iar în urma prelucrării se modifică doar înălțimea acesteia.

Suprafața sferică-convexă este reprezentată de o adâncitură în partea superioară a plăcuței, aceasta este poziționată în centrul plăcuței

reprezentând distanța de 5mm de la maximul adâncituri sferice la suprafața plană. Forma sferică convexă are diametrul de $\varnothing 85$ mm.

Suprafața sferică-concavă este prezentă tot în partea superioară a plăcuței simetrică față de cele 4 laturi, în centru pătratului, dimensiunea dintre suprafața plană și cel mai înalt punct fiind de 5 mm, iar diametrul acesteia fiind de $\varnothing 85$ mm.

Suprafața cilindrică-convexă este reprezentată de o secțiune de cilindru poziționată vertical cu o adâncime de 5 mm, iar diametrul acestuia având $\varnothing 85$ mm.

Suprafața cilindrică-concavă prezintă o înălțime de formă cilindrică de-a lungul plăcuței cu diametrul de $\varnothing 85$ mm și înălțimea maximă de 5mm.

Înainte de cercetarea experimentală asupra prelucrării suprafețelor, epruvetele sunt frezate lateral pentru a asigura o prindere cât mai rigidă, modul de prindere a acestora se va realiza cu ajutorul unei menghine cu amprentare. Cercetarea se realizează doar asupra prelucrării de finisare a suprafeței, ceea ce înseamnă că prelucrările de degroșare în cazul tuturor suprafețelor se vor executa pe un alt centru cu comandă numerică.

În figura 4.4 sunt prezentate cele două tipuri de freze folosite pentru realizarea experimentelor.



Fig. 4.4. Prezentarea vizuală a celor două freze



Fig. 4.5. Cele 270 de plăcuțe pregătite pentru operația de finisare

În urma operațiilor de degroșare ale fiecărei suprafețe pregătite pentru exemplificare, rezultă 135 de plăcuțe pregătite pentru prelucrarea cu freza toroidală și 135 de plăcuțe pregătite pentru prelucrarea cu freza sferică, precum sunt prezentate în figura 4.5.

Pentru o bună gestionare a datelor, tabelele 4.1-4.10 prezintă o coloană adițională, unde este descris timpul de bază aferent fiecărei prelucrări, acesta fiind strict timpul de lucru în care freza este în așchiere și/sau în timpul poziționări. Se consideră constanți pe toată perioada prelucrărilor timpii auxiliari, timpii de prindere a semifabricatului, de încărcare a programului drept urmare nu vor mai fi luați în considerare.

Făcând referire la regimurile de așchiere, cele trei variabile sunt prezentate în tabele, iar constantă pe toată perioada experimentării este adâncimea de așchiere, aceasta fiind de 0,5 mm ($a_p=0,5$ mm) și adâncimea radială, având valoarea de 0,3 mm ($a_e=0.3$ mm). Experimentele se vor realiza în prezența lichidului de așchiere, modul de prindere al epruvetelor fiind în menghină.

Este necesar de evidențiat faptul că pe toată perioada prelucrării suprafețelor atât cu freza toroidală cât și cu freza sferică, axa sculei își păstrează constant unghiul de înclinare pe toată suprafața.

4.2. Realizarea programelor CAM

Software-ul CAM PowerMILL oferă strategii de programare CNC specializate pentru fabricarea tuturor tipurilor de suprafețe, cu viteze și adaosuri variabile de prelucrare.

PowerMILL este o soluție 3D CAM care rulează pe interfața Microsoft Windows pentru programarea traseului de urmat al sculei pentru mașini de frezat CNC de la 3 la 5 axe, dezvoltate de Autodesk Inc. Software-ul este utilizat în diferite tipuri de aplicații, pentru a determina traseele optime ale sculelor, pentru a reduce timpul și costurile de fabricație, precum și pentru a reduce uzura sculelor și pentru a produce o calitate superioară suprafețelor.

Aria de aplicabilitate a acestui soft cuprinde următoarele industrii producătoare de: aeronave, automobile, articole ceramice, implanturi dentare, proteze medicale, instrumentar medical, industria de încălțăminte, confecționarea de matrițe, materiale plastice, machete și prototipuri, fabricația de scule, etc.

Pentru fiecare epruvetă în parte, realizarea programelor CAM se va face cu ajutorul softului PowerMILL, acesta dă posibilitatea de creare

a sculei, de găsire a celei mai bune strategii astfel că, am decis ca pe fiecare experiment prelucrarea să se facă într-o singură direcție, traiectoriile sculei să fie paralele cu intrările și ieșirile aferente.

4.3. Cercetări experimentale privind prelucrarea suprafețelor plane cu frezele toroidale versus frezele sferice

În ceea ce privește prelucrarea acestui tip de suprafață, putem spune că este cel mai simplu de realizat, fără dificultăți, dar totuși pentru a realiza o calitate a suprafeței cât mai ridicată și pentru a întregi planul experimental a fost nevoie de o planificare riguroasă.

După cum s-a decis în capitolele anterioare, se vor prelucra 27 de suprafețe cu freza toroidală fiind prezentate în tabelul 4.1 și 27 de suprafețe realizate cu freza sferică fiind prezentate în tabelul 4.2.

Pentru o mai bună organizare am notat cu SPLN-TR suprafața plană prelucrată cu freza toroidală și cu SPLN-SF suprafața plană prelucrată cu freza sferică.

Tab.4.1. Desfășurarea prelucrărilor suprafețelor plane cu freza toroidală

Nr.	Viteza de aşchiere [m/min]	Unghiul de înclinare [°]	Avansul pe dinte [mm/dinte]	Suprafața SPLN-TR	Timp [min]
1	80	15°	0,11	SPLN-TR-1	13:13
2	80	15°	0,15	SPLN-TR-2	10:07
3	80	15°	0,19	SPLN-TR-3	08:19
4	80	35°	0,11	SPLN-TR-4	14:17
5	80	35°	0,15	SPLN-TR-5	10:54
6	80	35°	0,19	SPLN-TR-6	08:56
7	80	55°	0,11	SPLN-TR-7	14:35
8	80	55°	0,15	SPLN-TR-8	11:07
9	80	55°	0,19	SPLN-TR-9	09:08
10	170	15°	0,11	SPLN-TR-10	07:04
11	170	15°	0,15	SPLN-TR-11	05:36
12	170	15°	0,19	SPLN-TR-12	04:46
13	170	35°	0,11	SPLN-TR-13	07:34
14	170	35°	0,15	SPLN-TR-14	05:59
15	170	35°	0,19	SPLN-TR-15	05:04
16	170	55°	0,11	SPLN-TR-16	07:44
17	170	55°	0,15	SPLN-TR-17	06:06
18	170	55°	0,19	SPLN-TR-18	05:10
19	210	15°	0,11	SPLN-TR-19	06:01

20	210	15°	0,15	SPLN-TR-20	04:50
21	210	15°	0,19	SPLN-TR-21	04:09
22	210	35°	0,11	SPLN-TR-22	06:26
23	210	35°	0,15	SPLN-TR-23	05:09
24	210	35°	0,19	SPLN-TR-24	04:24
25	210	55°	0,11	SPLN-TR-25	06:34
26	210	55°	0,15	SPLN-TR-26	05:15
27	210	55°	0,19	SPLN-TR-27	04:30

Tab. 4.2 Desfășurarea experimentelor privind prelucrarea suprafețelor plane cu freza sferică

Nr.	Viteza de așchiere [m/min]	Unghiul de înclinare [°]	Avansul pe dinte [mm/dinte]	Suprafața SPLN-SF	Timp [min]
1	280	15°	0,05	SPLN -SF-1	09:16
2	280	15°	0,09	SPLN -SF-2	05:54
3	280	15°	0,13	SPLN -SF-3	04:36
4	280	35°	0,05	SPLN -SF-4	09:02
5	280	35°	0,09	SPLN -SF-5	05:44
6	280	35°	0,13	SPLN -SF-6	04:28
7	280	55°	0,05	SPLN -SF-7	09:39
8	280	55°	0,09	SPLN -SF-8	06:05
9	280	55°	0,13	SPLN -SF-9	04:43
10	370	15°	0,05	SPLN -SF-10	07:26
11	370	15°	0,09	SPLN -SF-11	04:52
12	370	15°	0,13	SPLN -SF-12	03:53
13	370	35°	0,05	SPLN -SF-13	07:14
14	370	35°	0,09	SPLN -SF-14	04:44
15	370	35°	0,13	SPLN -SF-15	03:46
16	370	55°	0,05	SPLN -SF-16	07:42
17	370	55°	0,09	SPLN -SF-17	05:00
18	370	55°	0,13	SPLN -SF-18	03:58
19	430	15°	0,05	SPLN -SF-19	06:37
20	430	15°	0,09	SPLN -SF-20	04:26
21	430	15°	0,13	SPLN -SF-21	03:35
22	430	35°	0,05	SPLN -SF-22	06:26
23	430	35°	0,09	SPLN -SF-23	04:17
24	430	35°	0,13	SPLN -SF-24	03:28
25	430	55°	0,05	SPLN -SF-25	06:51
26	430	55°	0,09	SPLN -SF-26	04:32
27	430	55°	0,13	SPLN -SF-27	03:38

În ceea ce privește programul CAM, pentru a acoperi întreaga suprafață, în cazul prelucrării cu freza toroidală au fost necesare 140 de linii pentru înclinarea de 15°, 142 de linii pentru înclinarea de 35° și

139 pentru înclinarea de 55°. În cazul prelucrării suprafeței cu freza sferică au fost nevoie de 145 de linii la înclinarea de 15°, 143 la înclinarea de 35° și 140 de linii la înclinarea de 55°.

În figura 4.6 sunt prezentate simulări ale traiectoriei frezei toroidale în timpul prelucrării suprafeței plane la cele 3 tipuri de înclinări, iar în figura 4.7 sunt imagini din timpul simulării prelucrării suprafeței plane cu freza sferică în cazul celor 3 tipuri de înclinări.

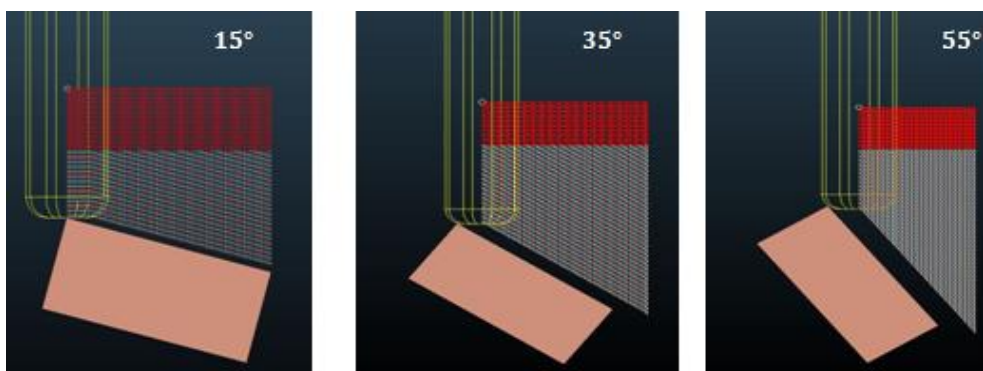


Fig. 4.6 Imagini preluate în urma simulării traiectoriei frezei toroidale în PowerMILL

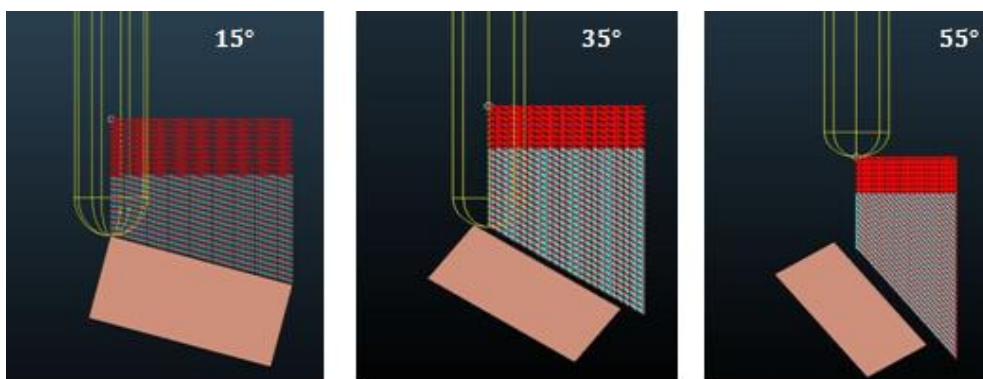


Fig. 4.7 Imagini preluate în urma simulării traiectoriei frezei sferice în PowerMILL

Imaginea cu experimentul practic în sine realizat pe centrul de prelucrare OKUMA MU-400VA este arătată în figura 4.8, iar această figură conține 3 imagini cu freza toroidală ce prelucrează suprafața plană la cele 3 tipuri de înclinări. În figura 4.9 sunt prezentate 3 imagini cu freza sferică în timpul prelucrării suprafeței plane în cazul celor 3 tipuri de înclinări.



Fig. 4.8 Prelucrarea suprafeței plane cu freza toroidală în cazul celor 3 tipuri de înclinări



Fig. 4.9 Prelucrarea suprafeței plane cu freza sferică în cazul celor 3 tipuri de înclinări

La finalul acestor cercetări experimentale, suprafețele plane prelucrate cu cele două tipuri de freze, sunt ilustrate în imaginea 4.10. Astfel, cele 27 de experimente aferente fiecărei freze sunt pregătite pentru expertiza suprafeței cu ajutorul rugozimetrului.



Fig. 4.10 Suprafețele plane prelucrate cu cele două tipuri de freze pregătite pentru măsurare

4.4. Cercetări experimentale privind prelucrarea suprafețelor sferice concave cu frezele toroidale versus frezele sferice

În cadrul acestui subcapitol se vor cerceta experimental realizarea a 27 de suprafețe sferice concave cu freza toroidală, conform tabelului 4.3 și 27 de suprafețe sferice concave prelucrate cu freza sferică confirm tabelului 4.4. Pentru o mai bună organizare am notat cu SFCV-TR, suprafețele sferice concave prelucrate cu freza toroidală și cu SFCV-SF, suprafețele sferice concave prelucrate cu freza sferică.

Tab.4.3 Desfășurarea experimentelor privind prelucrarea suprafețelor sferice concave cu freza toroidală

Nr.	Viteza de așchiere [m/min]	Unghiul de înclinare [°]	Avansul pe dinte [mm/dinte]	Suprafața SFCV-TR	Timp [min]
1	80	15°	0,11	SFCV-TR-1	04:09
2	80	15°	0,15	SFCV-TR-2	03:03
3	80	15°	0,19	SFCV-TR-3	02:24
4	80	35°	0,11	SFCV-TR-4	03:42
5	80	35°	0,15	SFCV-TR-5	02:43
6	80	35°	0,19	SFCV-TR-6	02:08
7	80	55°	0,11	SFCV-TR-7	03:41
8	80	55°	0,15	SFCV-TR-8	02:42
9	80	55°	0,19	SFCV-TR-9	02:08
10	170	15°	0,11	SFCV-TR-10	01:57
11	170	15°	0,15	SFCV-TR-11	01:26
12	170	15°	0,19	SFCV-TR-12	01:08
13	170	35°	0,11	SFCV-TR-13	01:44
14	170	35°	0,15	SFCV-TR-14	01:17
15	170	35°	0,19	SFCV-TR-15	01:01
16	170	55°	0,11	SFCV-TR-16	01:44
17	170	55°	0,15	SFCV-TR-17	01:16
18	170	55°	0,19	SFCV-TR-18	01:00
19	210	15°	0,11	SFCV-TR-19	01:35
20	210	15°	0,15	SFCV-TR-20	01:10
21	210	15°	0,19	SFCV-TR-21	00:55
22	210	35°	0,11	SFCV-TR-22	01:25
23	210	35°	0,15	SFCV-TR-23	01:02
24	210	35°	0,19	SFCV-TR-24	00:49
25	210	55°	0,11	SFCV-TR-25	01:24
26	210	55°	0,15	SFCV-TR-26	01:02
27	210	55°	0,19	SFCV-TR-27	00:49

Tab.4.4 Desfășurarea experimentelor privind prelucrarea suprafețelor sferice concave cu freza sferică

Nr.	Viteza de așchiere [m/min]	Unghiul de înclinare [°]	Avansul pe dinte [mm/dinte]	Suprafața SFCV-SF	Timp [min]
1	280	15°	0,05	SFCV-SF-1	03:27
2	280	15°	0,09	SFCV-SF-2	01:55
3	280	15°	0,13	SFCV-SF-3	01:20
4	280	35°	0,05	SFCV-SF-4	03:48
5	280	35°	0,09	SFCV-SF-5	02:07
6	280	35°	0,13	SFCV-SF-6	01:28
7	280	55°	0,05	SFCV-SF-7	04:43
8	280	55°	0,09	SFCV-SF-8	02:37
9	280	55°	0,13	SFCV-SF-9	01:49
10	370	15°	0,05	SFCV-SF-10	02:37
11	370	15°	0,09	SFCV-SF-11	01:27
12	370	15°	0,13	SFCV-SF-12	01:01
13	370	35°	0,05	SFCV-SF-13	02:52
14	370	35°	0,09	SFCV-SF-14	01:36
15	370	35°	0,13	SFCV-SF-15	01:06
16	370	55°	0,05	SFCV-SF-16	03:34
17	370	55°	0,09	SFCV-SF-17	01:59
18	370	55°	0,13	SFCV-SF-18	01:22
19	430	15°	0,05	SFCV-SF-19	02:15
20	430	15°	0,09	SFCV-SF-20	01:15
21	430	15°	0,13	SFCV-SF-21	00:52
22	430	35°	0,05	SFCV-SF-22	02:28
23	430	35°	0,09	SFCV-SF-23	01:22
24	430	35°	0,13	SFCV-SF-24	00:57
25	430	55°	0,05	SFCV-SF-25	03:04
26	430	55°	0,09	SFCV-SF-26	01:42
27	430	55°	0,13	SFCV-SF-27	01:11

Pentru o mai bună exprimare, în figura 4.11 sunt prezentate 3 imagini din timpul simulării procesului de frezare cu freza toroidală asupra suprafeței sferice concave cu cele 3 tipuri de înclinări, iar în figura 4.12 sunt ilustrate 3 imagini din timpul simulării prelucrării suprafeței sferice concave cu ajutorul frezei sferice în cazul celor 3 tipuri de înclinări.

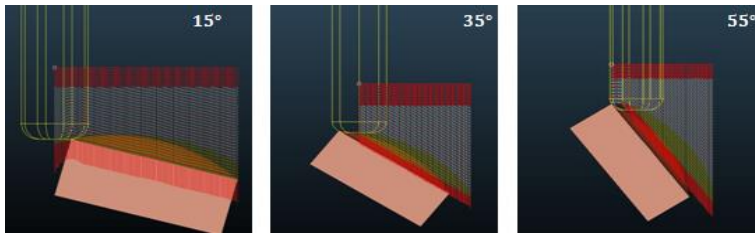


Fig. 4.11 Imagini preluate în urma simulării traiectoriei frezei toroidale în PowerMILL asupra SFCV-TR

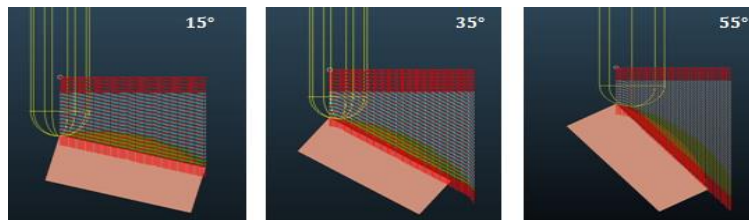


Fig. 4.12 Imagini preluate în urma simulării traiectoriei frezei sferice în PowerMILL asupra SFCV-SF

În figura 4.13 unde sunt prezente 3 imagini din timpul prelucrării suprafeței sferice concave cu freza toroidală în cazul celor 3 tipuri de înclinări, iar în figura 4.14 este evidențiată prelucrarea suprafețe sferice concave cu freza sferică în cazul celor 3 tipuri de înclinări.



Fig. 4.13 Prelucrarea suprafeței sferice concave cu freza toroidală în cazul celor 3 tipuri de înclinări



Fig. 4.14 Prelucrarea suprafeței sferice concave cu freza sferică în cazul celor 3 tipuri de înclinări

La sfârșitul acestui subcapitol sunt descrise cercetările experimentale realizate asupra a 27 de suprafețe prelucrate cu freza toroidală și 27 de suprafețe prelucrate cu freza sferică urmând în capitolele următoare dezbateră calității suprafețelor.



Fig.4.15 Suprafețele sferice concave prelucrate cu cele două tipuri de freze pregătite pentru măsurare

4.5. Cercetări experimentale privind prelucrarea suprafețelor sferice convexe cu frezele toroidale versus frezele sferice

Pe parcursul acestui subcapitol se vor studia experimental realizarea a 27 de suprafețe sferice convexe cu freza toroidală, precum sunt evidențiate în tabelul 4.5 și 27 de suprafețe sferice convexe prelucrate cu freza sferică precum sunt descrise în tabelul 4.6

Pentru ca fiecare experiment în parte să se poată diferenția, am notat cu SFCX-TR suprafețele sferice convexe prelucrate cu freza toroidală și cu SFCX-SF suprafețele sferice convexe prelucrate cu freza sferică.

Tab.4.5 Desfășurarea experimentelor privind prelucrarea suprafețelor sferice convexe cu freza toroidală

Nr.	Viteza de aşchiere [m/min]	Unghiul de înclinare [°]	Avansul pe dinte [mm/dinte]	Suprafața SFCX-TR	Timp [min]
1	80	15°	0,11	SFCX-TR-1	06:05
2	80	15°	0,15	SFCX-TR-2	04:37
3	80	15°	0,19	SFCX-TR-3	03:46
4	80	35°	0,11	SFCX-TR-4	06:06
5	80	35°	0,15	SFCX-TR-5	04:38
6	80	35°	0,19	SFCX-TR-6	03:48
7	80	55°	0,11	SFCX-TR-7	06:43
8	80	55°	0,15	SFCX-TR-8	05:08
9	80	55°	0,19	SFCX-TR-9	04:13
10	170	15°	0,11	SFCX-TR-10	03:10
11	170	15°	0,15	SFCX-TR-11	02:29
12	170	15°	0,19	SFCX-TR-12	02:05
13	170	35°	0,11	SFCX-TR-13	03:13
14	170	35°	0,15	SFCX-TR-14	02:32
15	170	35°	0,19	SFCX-TR-15	02:08
16	170	55°	0,11	SFCX-TR-16	03:35
17	170	55°	0,15	SFCX-TR-17	02:50
18	170	55°	0,19	SFCX-TR-18	02:24
19	210	15°	0,11	SFCX-TR-19	02:41
20	210	15°	0,15	SFCX-TR-20	02:07
21	210	15°	0,19	SFCX-TR-21	01:48
22	210	35°	0,11	SFCX-TR-22	02:43
23	210	35°	0,15	SFCX-TR-23	02:10
24	210	35°	0,19	SFCX-TR-24	01:51
25	210	55°	0,11	SFCX-TR-25	03:03
26	210	55°	0,15	SFCX-TR-26	02:26
27	210	55°	0,19	SFCX-TR-27	02:06

Tab.4.6 Desfășurarea experimentelor privind prelucrarea suprafețelor sferice convexe cu freza sferică

Nr.	Viteza de aşchiere [m/min]	Unghiul de înclinare [°]	Avansul pe dinte [mm/dinte]	Suprafața SFCX-SF	Timp [min]
1	280	15°	0,05	SFCX-SF-1	06:53
2	280	15°	0,09	SFCX-SF-2	04:13
3	280	15°	0,13	SFCX-SF-3	03:12
4	280	35°	0,05	SFCX-SF-4	07:18
5	280	35°	0,09	SFCX-SF-5	04:47
6	280	35°	0,13	SFCX-SF-6	03:49
7	280	55°	0,05	SFCX-SF-7	06:04
8	280	55°	0,09	SFCX-SF-8	03:58

9	280	55°	0,13	SFCX-SF-9	03:00
10	370	15°	0,05	SFCX-SF-10	05:25
11	370	15°	0,09	SFCX-SF-11	03:24
12	370	15°	0,13	SFCX-SF-12	02:38
13	370	35°	0,05	SFCX-SF-13	05:55
14	370	35°	0,09	SFCX-SF-14	04:01
15	370	35°	0,13	SFCX-SF-15	03:17
16	370	55°	0,05	SFCX-SF-16	04:52
17	370	55°	0,09	SFCX-SF-17	03:11
18	370	55°	0,13	SFCX-SF-18	02:32
19	430	15°	0,05	SFCX-SF-19	04:47
20	430	15°	0,09	SFCX-SF-20	03:03
21	430	15°	0,13	SFCX-SF-21	02:23
22	430	35°	0,05	SFCX-SF-22	05:19
23	430	35°	0,09	SFCX-SF-23	03:41
24	430	35°	0,13	SFCX-SF-24	03:03
25	430	55°	0,05	SFCX-SF-25	04:20
26	430	55°	0,09	SFCX-SF-26	02:53
27	430	55°	0,13	SFCX-SF-27	02:20

Pentru prelucrarea suprafeței cu freza toroidală, programul CAM conține în cazul înclinării de 15° un număr de 139 de linii, pentru înclinarea de 35°, 146 de linii, iar pentru înclinarea de 55°, 150 de linii. În cazul frezei sferice, traiectoria pentru toate cele trei înclinări este formată din 149 de linii. În figura 4.16 sunt prezentate 3 imagini cu simularea prelucrării suprafeței sferice convexe cu cele 3 tipuri de înclinări folosind freza toroidală, iar în figura 4.17 sunt reprezentate imaginile din timpul simulării prelucrării suprafeței sferice convexe cu freza sferică cu cele 3 cazuri de înclinări.

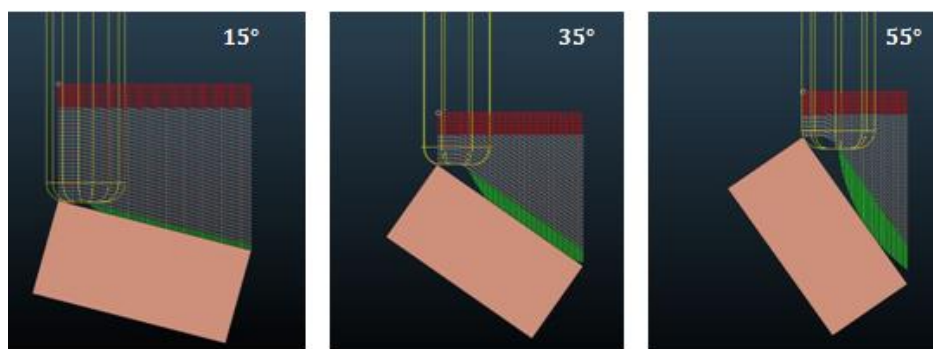


Fig. 4.16 Imagini preluate în urma simulării traiectoriei frezei toroidale în PowerMILL asupra SFCX-TR

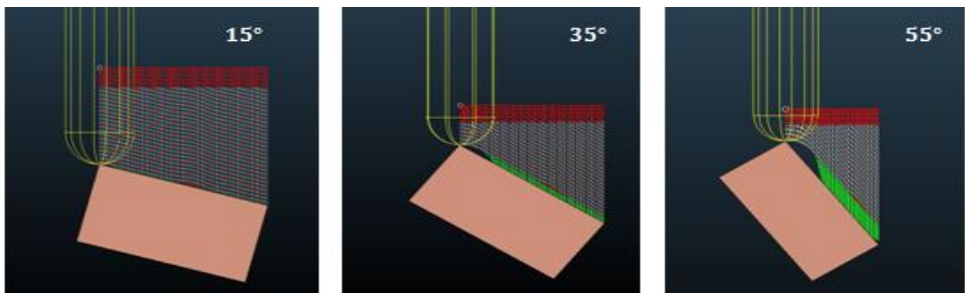


Fig. 4.17 Imagini preluate în urma simulării traiectoriei frezei sferice în PowerMILL asupra SFCX-SF

Experimentul practic s-a realizat pe centrul cu comandă numerică în 5 axe OKUMA MU-400VA, precum este exprimat de figura 4.18, unde sunt prezente 3 imagini din timpul prelucrării suprafeței sferice convexe cu freza toroidală în cazul celor 3 tipuri de înclinări, iar figura 4.19 se focusează pe prelucrarea suprafeței sferice convexe cu freza sferică în cazul celor 3 tipuri de înclinări.



Fig. 4.18 Prelucrarea suprafeței sferice convexe cu freza toroidală în cazul celor 3 tipuri de înclinări



Fig. 4.19 Prelucrarea suprafeței sferice convexe cu freza sferică în cazul celor 3 tipuri de înclinări

La finalul acestui subcapitol sunt evidențiate cercetările experimentale realizate asupra a 27 de suprafețe sferice convexe prelucrate cu freza toroidală și 27 de suprafețe sferice convexe prelucrate cu freza sferică, urmând în capitolele următoare măsurarea rugozității.



Fig. 4.20 Suprafețele sferice convexe prelucrate cu cele două tipuri de freze pregătite pentru măsurare

4.6. Cercetări experimentale privind prelucrarea suprafețelor cilindrice concave cu frezele toroidale versus frezele sferice

Acest subcapitol pune în evidență experimentele practice realizate asupra suprafeței cilindrice concave, 27 realizate cu freza toroidală prezentate de tabelul 4.7 și 27 de suprafețe cilindrice concave realizate cu freza sferică precum sunt prezentate în tabelul 4.8.

Organizarea joacă un rol foarte important asupra realizării experimentelor, astfel am notat cu CICV-TR suprafețele cilindrice concave prelucrate cu freza toroidală și cu CICV-SF suprafețele cilindrice concave prelucrate cu freza sferică.

Tab.4.7 Desfășurarea experimentelor privind prelucrarea suprafețelor cilindrice concave cu freza toroidală

Nr.	Viteza de aşchiere [m/min]	Unghiul de înclinare [°]	Avansul pe dinte [mm/dinte]	Suprafața CICV-TR	Timp [min]
1	80	15°	0,11	CICV-TR-1	17:10
2	80	15°	0,15	CICV-TR-2	13:04
3	80	15°	0,19	CICV-TR-3	10:42
4	80	35°	0,11	CICV-TR-4	16:16
5	80	35°	0,15	CICV-TR-5	12:22
6	80	35°	0,19	CICV-TR-6	10:08
7	80	55°	0,11	CICV-TR-7	16:04
8	80	55°	0,15	CICV-TR-8	12:14
9	80	55°	0,19	CICV-TR-9	10:01
10	170	15°	0,11	CICV-TR-10	09:03
11	170	15°	0,15	CICV-TR-11	07:07
12	170	15°	0,19	CICV-TR-12	06:00
13	170	35°	0,11	CICV-TR-13	08:33
14	170	35°	0,15	CICV-TR-14	06:43
15	170	35°	0,19	CICV-TR-15	05:40
16	170	55°	0,11	CICV-TR-16	08:28
17	170	55°	0,15	CICV-TR-17	06:39
18	170	55°	0,19	CICV-TR-18	05:37
19	210	15°	0,11	CICV-TR-19	07:40
20	210	15°	0,15	CICV-TR-20	06:07
21	210	15°	0,19	CICV-TR-21	05:13
22	210	35°	0,11	CICV-TR-22	07:15
23	210	35°	0,15	CICV-TR-23	05:46
24	210	35°	0,19	CICV-TR-24	04:55
25	210	55°	0,11	CICV-TR-25	07:10
26	210	55°	0,15	CICV-TR-26	05:43
27	210	55°	0,19	CICV-TR-27	04:52

Tab.4.8 Desfășurarea experimentelor privind prelucrarea suprafețelor cilindrice concave cu freza sferică

Nr.	Viteza de aşchiere [m/min]	Unghiul de înclinare [°]	Avansul pe dinte [mm/dinte]	Suprafața CICV-SF	Timp [min]
1	280	15°	0,05	CICV-SF-1	12:27
2	280	15°	0,09	CICV-SF-2	07:49
3	280	15°	0,13	CICV-SF-3	06:02
4	280	35°	0,05	CICV-SF-4	12:34
5	280	35°	0,09	CICV-SF-5	07:52
6	280	35°	0,13	CICV-SF-6	06:04
7	280	55°	0,05	CICV-SF-7	11:04
8	280	55°	0,09	CICV-SF-8	06:56

9	280	55°	0,13	CICV-SF-9	05:21
10	370	15°	0,05	CICV-SF-10	09:55
11	370	15°	0,09	CICV-SF-11	06:24
12	370	15°	0,13	CICV-SF-12	05:03
13	370	35°	0,05	CICV-SF-13	09:59
14	370	35°	0,09	CICV-SF-14	06:26
15	370	35°	0,13	CICV-SF-15	05:04
16	370	55°	0,05	CICV-SF-16	08:48
17	370	55°	0,09	CICV-SF-17	05:41
18	370	55°	0,13	CICV-SF-18	04:28
19	430	15°	0,05	CICV-SF-19	08:49
20	430	15°	0,09	CICV-SF-20	05:47
21	430	15°	0,13	CICV-SF-21	04:37
22	430	35°	0,05	CICV-SF-22	08:53
23	430	35°	0,09	CICV-SF-23	05:49
24	430	35°	0,13	CICV-SF-24	04:39
25	430	55°	0,05	CICV-SF-25	07:49
26	430	55°	0,09	CICV-SF-26	05:08
27	430	55°	0,13	CICV-SF-27	04:06

Referitor la realizarea programului CAM, pentru prelucrarea suprafeței cilindrice concave cu freza toroidală, în cazul înclinării de 15° au fost nevoie de 147 de linii, în cazul înclinării de 35° au fost nevoie de 140 de linii, iar pentru 55°, 138 de linii. În cazul frezei sferice, aceasta a prelucrat suprafața la 15° cu 159 de linii, la 35° cu 162 de linii, iar pentru înclinarea de 55° au fost nevoie de 142 de linii. În figura 4.21 sunt evidențiate trei imagini din timpul simulării traseului sculei toroidale asupra suprafeței cilindrice concave, în cele trei cazuri de înclinări, iar figura 4.22 este constituită din trei imagini cu simularea traseului de urmat de către freza sferică asupra suprafeței cilindrice concave, în cele trei cazuri de înclinări.

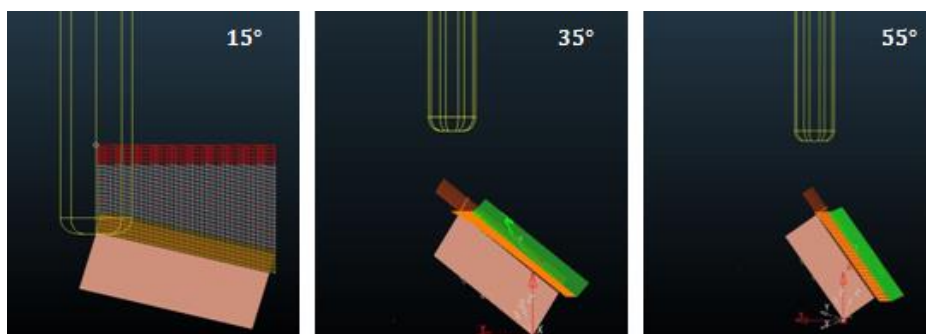


Fig. 4.21 Imagini preluate în urma simulării traiectoriei frezei toroidale în PowerMILL asupra CICV-TR

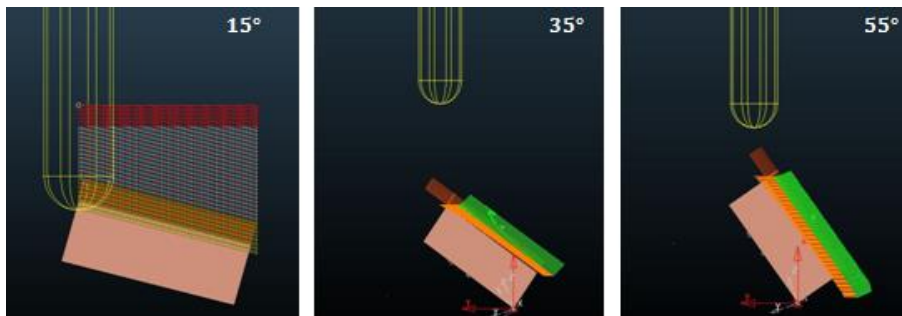


Fig. 4.22 Imagini preluate în urma simulării traiectoriei frezei toroidale în PowerMILL asupra CICV-SF

Imaginea cu experimentul practic în sine realizat pe centrul cu comandă numerică OKUMA MU-400VA este ilustrată în figura 4.23, iar această figură conține 3 imagini cu freza toroidală ce prelucrează suprafața cilindrică concavă la cele 3 tipuri de înclinări. În figura 4.24 sunt 3 imagini cu freza sferică în timpul prelucrării suprafeței cilindrice concave în cazul celor 3 tipuri de înclinări.



Fig. 4.23 Prelucrarea suprafeței cilindrice concave cu freza toroidală în cazul celor 3 tipuri de înclinări



Fig. 4.24 Prelucrarea suprafeței cilindrice concave cu freza sferică în cazul celor 3 tipuri de înclinări

Astfel, la sfârșitul acestui subcapitol sunt prelucrate cu ajutorul frezei toroidale 27 de suprafețe cilindrice concave și cu ajutorul frezei sferice alte 27 de suprafețe cilindrice concave, urmând ca în capitolele viitoare să se realizeze măsurarea rugozității.



Fig. 4.25 Suprafețele cilindrice concave prelucrate cu cele două tipuri de freze pregătite pentru măsurare

4.7. Cercetări experimentale privind prelucrarea suprafețelor cilindrice convexe cu frezele toroidale versus frezele sferice

Pe parcursul cercetărilor se vor realiza 27 de suprafețe cilindrice convexe cu ajutorul frezei toroidale și 27 de suprafețe cilindrice convexe cu ajutorul frezei sferice precum sunt evidențiate în tabelele 4.9 și 4.10.

În ceea ce privește organizarea, am notat cu CICX-TR, suprafețele cilindrice convexe realizate cu freza toroidală și cu CICX-SF, suprafețele cilindrice convexe realizate cu freza sferică.

Tab.4.9 Desfășurarea experimentelor privind prelucrarea suprafețelor cilindrice convexe cu freza toroidală

Nr.	Viteza de aşchiere [m/min]	Unghiul de înclinare [°]	Avansul pe dinte [mm/dinte]	Suprafața CICX-TR	Timp [min]
1	80	15°	0,11	CICX-TR-1	15:37
2	80	15°	0,15	CICX-TR-2	11:54
3	80	15°	0,19	CICX-TR-3	09:45
4	80	35°	0,11	CICX-TR-4	15:31
5	80	35°	0,15	CICX-TR-5	11:47
6	80	35°	0,19	CICX-TR-6	09:38
7	80	55°	0,11	CICX-TR-7	15:53
8	80	55°	0,15	CICX-TR-8	11:51
9	80	55°	0,19	CICX-TR-9	09:42
10	170	15°	0,11	CICX-TR-10	08:15
11	170	15°	0,15	CICX-TR-11	06:30
12	170	15°	0,19	CICX-TR-12	05:30
13	170	35°	0,11	CICX-TR-13	08:08
14	170	35°	0,15	CICX-TR-14	06:23
15	170	35°	0,19	CICX-TR-15	05:22
16	170	55°	0,11	CICX-TR-16	08:12
17	170	55°	0,15	CICX-TR-17	06:27
18	170	55°	0,19	CICX-TR-18	05:26
19	210	15°	0,11	CICX-TR-19	07:00
20	210	15°	0,15	CICX-TR-20	05:36
21	210	15°	0,19	CICX-TR-21	04:47
22	210	35°	0,11	CICX-TR-22	06:53
23	210	35°	0,15	CICX-TR-23	05:28
24	210	35°	0,19	CICX-TR-24	04:38
25	210	55°	0,11	CICX-TR-25	06:57
26	210	55°	0,15	CICX-TR-26	05:32
27	210	55°	0,19	CICX-TR-27	04:43

Tab.4.10 Desfășurarea experimentelor privind prelucrarea suprafețelor cilindrice convexe cu freza sferică

Nr.	Viteza de aşchiere [m/min]	Unghiul de înclinare [°]	Avansul pe dinte [mm/dinte]	Suprafața CICX-SF	Timp [min]
1	280	15°	0,05	CICX-SF-1	10:40
2	280	15°	0,09	CICX-SF-2	06:43
3	280	15°	0,13	CICX-SF-3	05:11
4	280	35°	0,05	CICX-SF-4	10:26
5	280	35°	0,09	CICX-SF-5	06:30
6	280	35°	0,13	CICX-SF-6	04:59
7	280	55°	0,05	CICX-SF-7	10:24
8	280	55°	0,09	CICX-SF-8	06:32

9	280	55°	0,13	CICX-SF-9	05:02
10	370	15°	0,05	CICX-SF-10	08:30
11	370	15°	0,09	CICX-SF-11	05:31
12	370	15°	0,13	CICX-SF-12	04:21
13	370	35°	0,05	CICX-SF-13	08:17
14	370	35°	0,09	CICX-SF-14	05:18
15	370	35°	0,13	CICX-SF-15	04:10
16	370	55°	0,05	CICX-SF-16	08:17
17	370	55°	0,09	CICX-SF-17	05:21
18	370	55°	0,13	CICX-SF-18	04:13
19	430	15°	0,05	CICX-SF-19	07:34
20	430	15°	0,09	CICX-SF-20	04:59
21	430	15°	0,13	CICX-SF-21	04:00
22	430	35°	0,05	CICX-SF-22	07:21
23	430	35°	0,09	CICX-SF-23	04:47
24	430	35°	0,13	CICX-SF-24	03:48
25	430	55°	0,05	CICX-SF-25	07:22
26	430	55°	0,09	CICX-SF-26	04:50
27	430	55°	0,13	CICX-SF-27	03:52

Programele CAM obținute cu ajutorul softului PowerMILL, relevă faptul că, pentru a putea prelucra suprafața cu freza toroidală la înclinarea de 15°, au fost nevoie de 152 de linii, pentru înclinarea de 35°, 153 de linii, iar pentru înclinarea de 55°, 150 de linii. În cazul frezei sferice aceasta a prelucrat suprafața la înclinarea de 15° cu 151 de linii, la 35° cu 150 de linii, iar la înclinarea de 55° s-a prelucrat suprafața cu 149 de linii. În figura 4.26 sunt evidențiate trei imagini din timpul simulării procesului de prelucrare a suprafeței cilindrice convexe cu freza toroidală, în cele 3 cazuri de înclinare, iar în figura 4.27 sunt arătate trei imagini cu simularea prelucrării suprafeței cilindrice convexe cu ajutorul frezei sferice în cele 3 cazuri de înclinare.

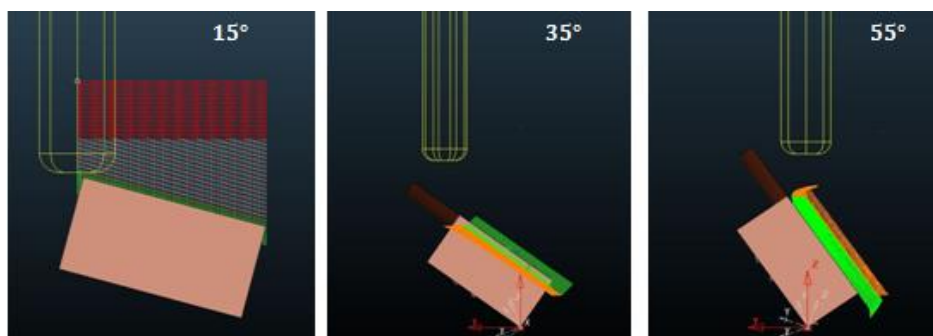


Fig. 4.26 Imagini preluate în urma simulării traiectoriei frezei toroidale în PowerMILL asupra CICX-TR

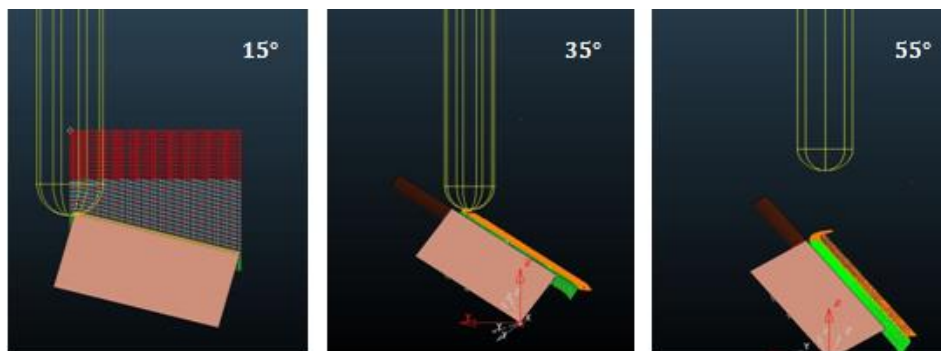


Fig. 4.27 Imagini preluate în urma simulării traiectoriei frezei toroidale în PowerMILL asupra CICX-SF

Experimentul practic s-a realizat pe centrul cu comandă numerică în 5 axe OKUMA MU-400VA, precum este transmis de figura 4.28 unde sunt 3 imagini din timpul prelucrării suprafeței cilindrice convexe cu freza toroidală în cazul celor 3 tipuri de înclinări, iar în figura 4.29 este ilustrată prelucrarea suprafeței cilindrice convexe cu freza sferică în cazul celor 3 tipuri de înclinări.



Fig. 4.28 Prelucrarea suprafeței cilindrice convexe cu freza toroidală în cazul celor 3 tipuri de înclinări



Fig. 4.29 Prelucrarea suprafeței cilindrice convexe cu freza sferică în cazul celor 3 tipuri de înclinări

La finalul acestui subcapitol sunt finalizate 27 de suprafețe cilindrice convexe prelucrate cu freza toroidală și 27 de suprafețe cilindrice convexe prelucrate cu freza sferică, urmând ca în capitolele viitoare să se dezbată calitatea suprafețelor.



Fig.4.30 Suprafețele cilindrice convexe prelucrate cu cele două tipuri de freze pregătite pentru măsurare

4.8. Monitorizarea uzurii sculelor

După cum s-a stabilit în capitolele anterioare, se va urmări pe lângă calitatea suprafeței și o analiză a uzurii sculelor în urma prelucrării celor 270 de tipuri de suprafețe. S-au pus la dispoziție 3 freze toroidale și 3 freze sferice astfel că am analizat uzura sculei în funcție de unghiul la care este folosită, astfel fiecare sculă va fi folosită pentru un singur tip de înclinare. Drept urmare, fiecare sculă va fi folosită pentru prelucrarea a 9 suprafețe din fiecare tip, însumând un număr de 45 de suprafețe prelucrate cu fiecare sculă. În tabelul 4.11 sunt arătate suprafețele prelucrate cu sculele toroidale în funcție de unghi, iar în tabelul 4.12 suprafețele prelucrate cu frezele sferice în funcție de unghiul de înclinare.

Pentru o măsurare cât mai precisă și o imagine de o calitate superioară am utilizat microscopului MM1-200 de la Garant.

Acesta este un microscop de măsurare cu prelucrare rapidă a imaginii, cameră color de înaltă rezoluție și un panou multitalit PC pentru atelier, ușor de utilizat, cu software de măsurare M3 intuitiv.



Fig. 4.31 Microscop MM1-200

Tab. 4.11 Freza toroidală utilizată în funcție de tipul înclinării

Freza folosită	Tipul suprafeței prelucrate cu freza toroidală					
TR-1 15°	SPLN1	SPLN2	SPLN3	SPLN10	SPLN11	SPLN12
	SPLN19	SPLN20	SPLN21	SFCV1	SFCV2	SFCV3
	SFCV10	SFCV11	SFCV12	SFCV19	SFCV20	SFCV21
	SFCX1	SFCX2	SFCX3	SFCX10	SFCX11	SFCV12
	SFCX19	SFCX20	SFCX21	CICV1	CICV2	CICV3
	CICV10	CICV11	CICV12	CICV19	CICV20	CICV21
	CICX1	CICX2	CICX3	CICX10	CICX11	CICX12
	CICX19	CICX20	CICX21			
TR-2 35°	SPLN4	SPLN5	SPLN6	SPLN13	SPLN14	SPLN15
	SPLN22	SPLN23	SPLN24	SFCV4	SFCV5	SFCV6
	SFCV13	SFCV14	SFCV15	SFCV22	SFCV23	SFCV24
	SFCX4	SFCX5	SFCX6	SFCX13	SFCX14	SFCV15
	SFCX22	SFCX23	SFCX24	CICV4	CICV5	CICV6
	CICV13	CICV14	CICV15	CICV22	CICV23	CICV24
	CICX4	CICX5	CICX6	CICX13	CICX14	CICX15
	CICX22	CICX23	CICX24			
TR-3 55°	SPLN7	SPLN8	SPLN9	SPLN16	SPLN17	SPLN18
	SPLN25	SPLN26	SPLN27	SFCV7	SFCV8	SFCV9
	SFCV16	SFCV17	SFCV18	SFCV25	SFCV26	SFCV27
	SFCX7	SFCX8	SFCX9	SFCX16	SFCX17	SFCV18
	SFCX25	SFCX26	SFCX27	CICV7	CICV8	CICV9
	CICV16	CICV17	CICV18	CICV25	CICV26	CICV27
	CICX7	CICX8	CICX9	CICX16	CICX17	CICX18
	CICX25	CICX26	CICX27			

Tab. 4.12 Freza sferică utilizată în funcție de tipul înclinării

Freza folosită	Tipul suprafeței prelucrate cu freza sferică					
SF-1 15°	SPLN1	SPLN2	SPLN3	SPLN10	SPLN11	SPLN12
	SPLN19	SPLN20	SPLN21	SFCV1	SFCV2	SFCV3
	SFCV10	SFCV11	SFCV12	SFCV19	SFCV20	SFCV21
	SFCX1	SFCX2	SFCX3	SFCX10	SFCX11	SFCV12
	SFCX19	SFCX20	SFCX21	CICV1	CICV2	CICV3
	CICV10	CICV11	CICV12	CICV19	CICV20	CICV21
	CICX1	CICX2	CICX3	CICX10	CICX11	CICX12
	CICX19	CICX20	CICX21			
SF-2 35°	SPLN4	SPLN5	SPLN6	SPLN13	SPLN14	SPLN15
	SPLN22	SPLN23	SPLN24	SFCV4	SFCV5	SFCV6
	SFCV13	SFCV14	SFCV15	SFCV22	SFCV23	SFCV24
	SFCX4	SFCX5	SFCX6	SFCX13	SFCX14	SFCV15
	SFCX22	SFCX23	SFCX24	CICV4	CICV5	CICV6
	CICV13	CICV14	CICV15	CICV22	CICV23	CICV24
	CICX4	CICX5	CICX6	CICX13	CICX14	CICX15
	CICX22	CICX23	CICX24			
SF-3 55°	SPLN7	SPLN8	SPLN9	SPLN16	SPLN17	SPLN18
	SPLN25	SPLN26	SPLN27	SFCV7	SFCV8	SFCV9
	SFCV16	SFCV17	SFCV18	SFCV25	SFCV26	SFCV27
	SFCX7	SFCX8	SFCX9	SFCX16	SFCX17	SFCV18
	SFCX25	SFCX26	SFCX27	CICV7	CICV8	CICV9
	CICV16	CICV17	CICV18	CICV25	CICV26	CICV27
	CICX7	CICX8	CICX9	CICX16	CICX17	CICX18
	CICX25	CICX26	CICX27			

Pentru o bună poziționare a tăișului sculei, deoarece microscopul nu are încorporat un dispozitiv de prindere ce poate fi înclinat la unghi, am realizat un dispozitiv simplu, capabil să poziționeze și să țină scula fixă la unghiul la care se dorește, respectiv 15°, 35° și 55°. Acesta are o suprafață plană ce va fi poziționată pe masa microscopului și câte o gaură tolerată prelucrată la unghiul dorit de diametrul cozi frezei. În figura 4.32 este ilustrat dispozitivul de fixare al frezei pentru a fi măsurată uzura tăișului.

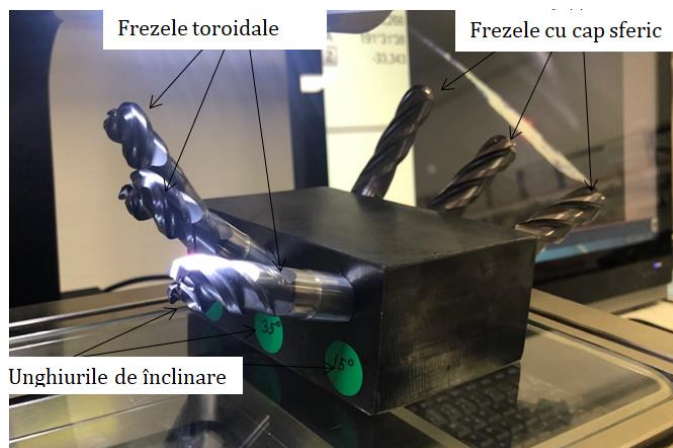


Fig.4.32 Poziționarea sculei pentru măsurarea uzurii tăișului

Fiecare tip de deteriorare va progresa sau va apărea într-o varietate de moduri, în funcție de condițiile de frezare. Standardul ISO 8688 recomandă ca deteriorarea sculei sub formă de uzură să fie utilizată pentru determinarea durabilității sculei.

În ceea ce privește evaluarea rezultatelor testului de deteriorare a frezelor acestea sunt prezentate în figurile 4.33-4.36.

În urma prelucrării celor cinci tipuri de suprafețe cu unghiul de înclinare a axei sculei la 15° , rezultă uzura sculelor ilustrate în imaginile din figura 4.33.

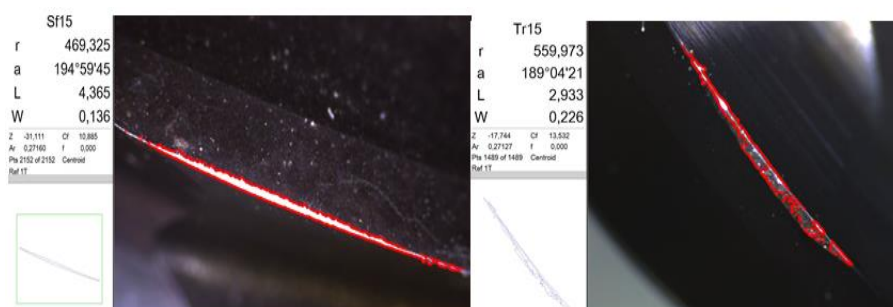


Fig. 4.33 Comparația uzurii sculei sferice și toroidale în urma prelucrării la unghiul de 15°

Astfel, în cazul frezei sferice lungimea maximă a uzurii tăișului este de 4,365 mm cu o lățime maximă de 0,136 mm, aria totală a uzurii tăișului frezei sferice este de 0,2716mm².

În ceea ce privește freza toroidală, aceasta evidențiază asupra tăișului o uzură cu lungimea maximă de 2,933 mm și lățimea maximă a

uzurii de 0,226 mm, în final rezultând aria suprafeței de uzură ca fiind de 0,27127mm².

În acest caz valorile sunt foarte apropiate având un nesemnificativ avantaj freza toroidală.

În figura 4.34 este reprezentată uzura sculelor din timpul prelucrării suprafețelor la unghiul de înclinare de 35°.

În prima imagine este arătată uzura sculei sferice, aceasta are o lungime de 4,304 mm și lățimea maximă de 0,16mm, aria totală a uzurii este de 0,35776mm².

În a doua imagine este ilustrată uzura sculei toroidale din timpul prelucrărilor cu unghiul de înclinare de 35°, iar aceasta are o lungime maximă de 2,65 mm și o lățime maximă de 0,402 mm având aria de 0,44564 mm².

În acest caz freza toroidală obține o uzură asupra tăișului sculei mai mare cu 0.08788 mm² decât freza sferică.

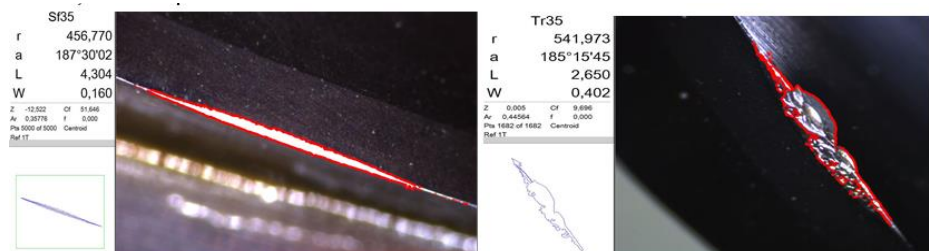


Fig. 4.34 Comparația uzurii sculei sferice și toroidale din timpul prelucrării la unghiul de 35°

Prelucrarea suprafețelor la unghiul de înclinare a sculelor de 55° aduce după sine o uzură a tăișului sculei, precum sunt prezentate în figura 4.35.

În prima imagine este uzura frezei sferice cu o lungime maximă de 4.463 mm și o lățime maximă de 0,194 mm, având aria uzurii de 1,194 mm². În a doua imagine este arătată uzura frezei toroidale ca având lungimea maximă de 2,932 mm și lățimea maximă de 0,255 mm rezultând aria uzurii ca fiind de 0,48123 mm².

În acest caz diferența de uzură este remarcată ca fiind de 0,71277 mm² în favoarea frezei toroidale.

Odată analizată uzura celor șase freze, am constatat că în urma prelucrării a câte 45 de suprafețe cu fiecare freză, cea mai mare uzură o înregistrează prelucrarea suprafețelor la unghiul de 55° cu freza sferică, ca fiind de 1,194 mm². Cea mai mică uzură înregistrată a fost în timpul

prelucrării suprafețelor la unghiul de înclinare de 15° cu freza toroidală, ca fiind de $0,27127\text{mm}^2$.

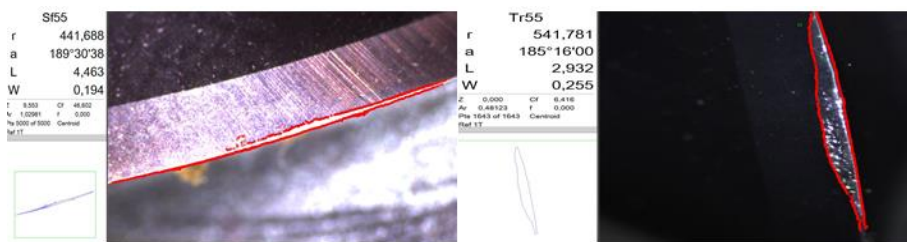


Fig. 4.35 Comparația uzurii sculei sferice și toroidale din timpul prelucrării la unghiul de 55°

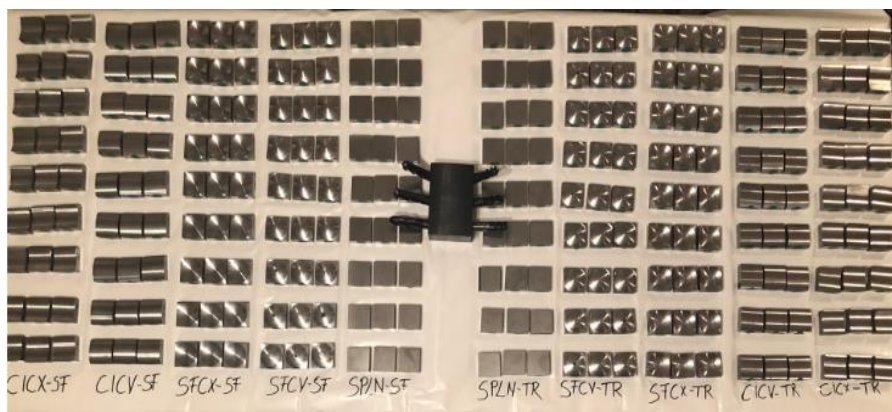


Fig. 4.36 Piese prelucrate cu cele 6 freze

4.9. Analiza productivității în funcție de timpul de bază

În urma datelor extrase din calculul statistic, pus la dispoziție de către programul CAM și exprimate în tabelele anterioare, avem posibilitatea de a compara timpii de bază pentru fiecare suprafață în funcție de freza folosită și de unghiul de înclinare. Astfel, diagramele următoare au rolul de a transmite diferențele dintre timpii de bază.

În ceea ce privește prelucrarea suprafețelor plane cu freza toroidală și cu freza sferică, figura 4.37 se focusează pe comparația prelucrărilor din punctul de vedere al timpului de bază.

Chiar dacă datele din prima jumătate a experimentelor arată un categoric dezavantaj al frezei toroidale, în cea de a doua jumătate, situația se echilibrează.

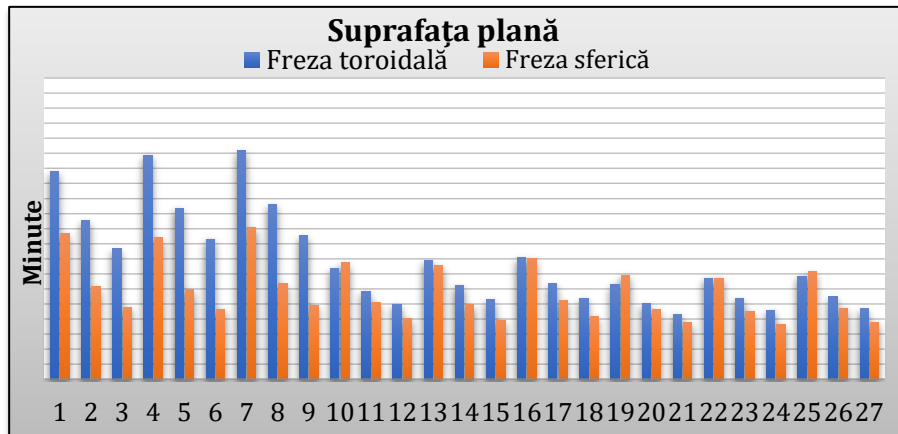


Fig. 4.37 Diagrama timpilor de bază pentru prelucrarea suprafeței plane

Timpul maxim de execuție al suprafeței plane este de 14 minute și 35 de secunde, în cazul regimurilor vitezei de așchiere și a avansului la valori minime ceea ce era de așteptat, dar acest timp nefavorabil a fost realizat în cazul unghiului de 55° cu freza toroidală.

Cel mai bun timp obținut în prelucrarea suprafeței plane cu freza toroidală este de 4 minute și 9 secunde, obținut în cazul regimurilor maxime de prelucrare, dar la unghiul de înclinare de 15° .

În ceea ce privește prelucrarea suprafeței plane cu freza sferică aici lucrurile stau puțin diferit. Afirm asta, deoarece timpul maxim de execuție al suprafeței a fost înregistrat ca fiind de 9 minute și 39 de secunde, tot în cazul regimurilor minime și la fel ca mai sus în cazul unghiului de înclinare de 55° .

Timpul minim obținut pentru prelucrarea suprafeței plane cu freza sferică este de 3 minute și 35 de secunde realizat, conform așteptărilor, în cazul valorilor maxime ale regimurilor de așchiere, dar la unghiul de înclinare de 15° .

Concluzionând, durata de prelucrare a suprafeței plane cu cele două tipuri de freze, în cazul celor trei variabile s-a constatat că ambele freze au obținut cel mai lung timp în cazul înclinării de 55° . Cel mai scurt timp de execuție în cazul unghiului de 15° , însă în ansamblu, freza sferică reușește prelucrarea într-un timp mai scurt, dar rămâne de văzut calitatea suprafeței în capitolele următoare.

Analizând durata timpilor de bază a prelucrării suprafeței sferice concave, în cazul celor două tipuri de freze și a celor 3 variabile, precum este prezentat în figura 4.38, s-a observat următoarele:

Timpul maxim obținut de freza toroidală este de 4 minute și 9 secunde, în cazul regimurilor minime de prelucrare, dar la un unghi de înclinare de 15°.

În ceea ce privește recordul, cel mai scurt timp de prelucrare a suprafeței sferice concave îi aparține frezei toroidale de 49 de secunde, obținut la regimul maxim și la unghiul de înclinare de 55°.

Cea mai lungă durată de execuție este cea cu freza sferică în cazul în care regimurile de așchiere sunt la minim, iar unghiul de înclinare este de 55°, cu un timp de 4 minute și 43 de secunde.

Freza sferică a obținut cel mai scurt timp de 57 de secunde la regimurile maxime și la unghiul de înclinare de 35°.

Concluzionând analiza grafică a timpilor de bază, aceștia sunt apropiați existând o ușoară detașare a frezei toroidale pentru înclinarea de 55°, dar cel mai important test îl reprezintă calitatea suprafeței.

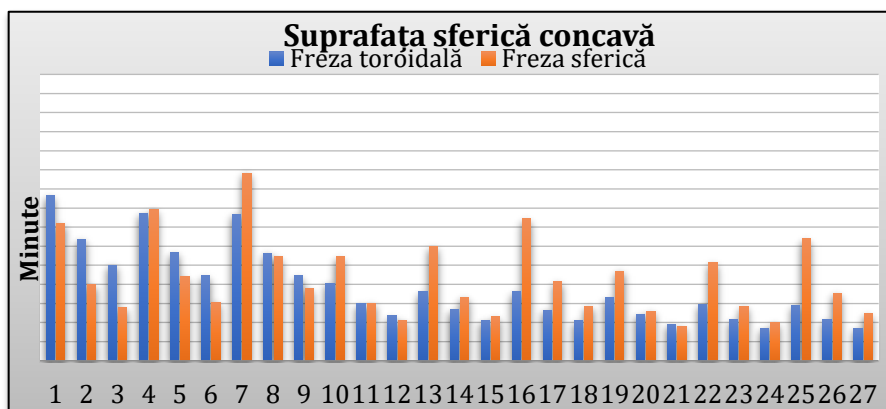


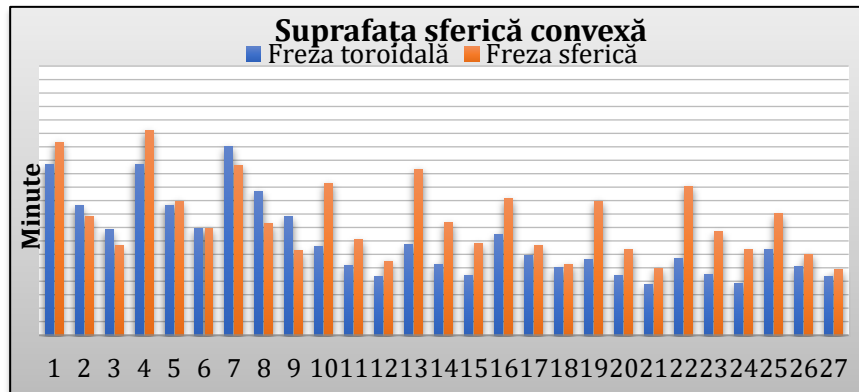
Fig. 4.38 Graficul timpilor de bază în cazul prelucrării suprafeței sferice concave

Timpul maxim obținut pentru prelucrarea suprafeței sferice convexe de către freza toroidală este de 6 minute și 43 de secunde, în cazul regimurilor minime și a unghiului de înclinare de 55°.

Cea mai rapidă prelucrare a suprafeței s-a realizat cu freza toroidală într-un minut și 48 de secunde, în cazul regimurilor maxime la unghiul de 15°, precum este reprezentat în figura 4.39.

Prelucrarea suprafeței sferice convexe durează cel mai mult în cazul frezei sferice cu un timp de 7 minute și 18 secunde, cu regimurile minime stabilite, dar la unghiul de înclinare de 35°.

Timpul minim obținut cu freza sferică de 2 minute și 20 de secunde, s-a obținut tot la regimuri maxime, dar la 55° înclinare.



4.39 Analiza grafică a timpilor de bază pentru prelucrarea suprafeței sferice convexe

Din punctul de vedere al timpului de prelucrare al suprafeței, cel mai rentabil este prelucrarea cu freza toroidală la înclinarea axei sculei de 15°, urmând în capitolele următoare stabilirea celei mai bune calități a suprafeței.

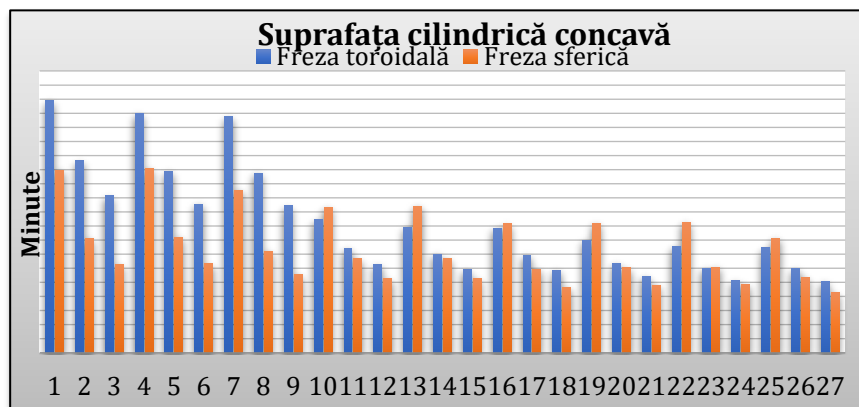


Fig. 4.40 Graficul timpilor de bază pentru prelucrarea suprafeței cilindrice concave

Cel mai lung timp înregistrat pentru prelucrarea suprafeței cilindrice concave este de 17 minute și 10 secunde, înregistrat în cazul prelucrării cu freza toroidală, cu regimuri minime, dar la un unghi de 15°, fiind prezentat grafic în figura 4.40.

Timpul minim obținut de către freza toroidală este de 4 minute și 52 de secunde, cu regimuri maxime și la unghiul de 55°.

Timpul maxim obținut de către freza sferică este de 12 minute și 34 de secunde, cu valorile minime ale regimurilor, dar la un unghi de înclinare de 35°.

Cea mai rapidă prelucrare a fost efectuată cu freza sferică în 4 minute și 6 secunde, la regimuri maxime, dar la unghiul de înclinare de 55°.

În concluzie, timpii de prelucrare a suprafeței cilindrice concave în ambele cazuri, cel mai productiv unghi este de 55° urmând ca adevărata diferență să fie făcută în urma comparării calității suprafeței.

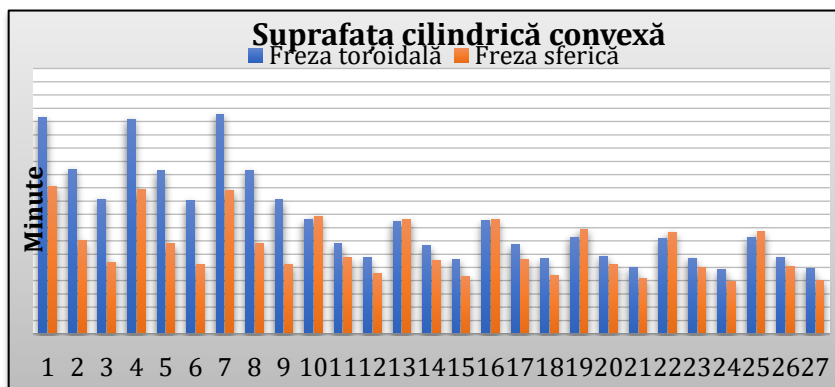


Fig. 4.41 Graficul timpilor de bază pentru prelucrarea suprafeței cilindrice convexe

În ceea ce privește prelucrarea suprafețelor cilindrice convexe, cea mai lungă durată de prelucrare de 15 minute și 53 de secunde, a fost înregistrată de către freza toroidală în timpul prelucrării cu regimuri minime, dar la unghiul de 55°

Cel mai scurt timp obținut de către freza toroidală este de 4 minute și 43 de secunde, cu regimuri maxime și la 55° înclinarea sculei.

Timpul maxim generat de freza sferică este de 10 minute și 40 de secunde, înregistrat la valori minime și la unghiul de înclinare de 15°.

Recordul timpului de prelucrare a suprafeței este de 3 minute și 52 de secunde, realizat de freza sferică la regimuri maxime și la unghiul de 55°.

Pentru prelucrarea acestui tip de suprafață unghiul de 55° este câștigător, având un ușor avantaj freza sferică, timpul de prelucrare fiind mai scurt, dar concluzia finală va fi dată de calitatea suprafeței.

4.10. Concluzii de capitol

În finalul acestui capitol se pot concluziona următoarele:

1. Au fost prelucrate 270 de suprafețe pe centrul cu comandă numerică OKUMA MU-400VA în 5 axe.

2. Din cele 270 de suprafețe, 135 au fost prelucrate cu freze sferice și 135 cu freze toroidale.
3. Cele 270 de suprafețe au fost împărțite în 5 suprafețe diferite;
4. Cele 5 suprafețe prelucrate sunt de formă plană, sferică concavă, sferică convexă, cilindrică concavă și cilindrică convexă;
5. Fiecare tip de suprafață a fost prelucrată în 27 de moduri diferite cu fiecare freză.
6. Variabilele procesului de prelucrare sunt viteza de așchiere, avansul pe dinte și unghiul de înclinare;
7. Se consideră constante adâncimea axială de așchiere de 0,5 mm și adâncimea radială de așchiere 0,3 mm.
8. S-au pus la dispoziție 3 freze toroidale și 3 freze sferice, prelucrându-se cu fiecare, 45 de suprafețe.
9. Fiecare freză a fost folosită pentru un unghi de înclinare.
10. Cea mai mare uzură a fost înregistrată de freza sferică la unghiul de înclinare de 55° .
11. Cea mai mică uzură a fost înregistrată de freza toroidală la unghiul de înclinare de 15° .
12. În ceea ce privește prelucrarea suprafețelor plane, cel mai scurt timp a fost realizat de către freza sferică la unghiul de 15° , iar cel mai lung timp îi aparține frezei toroidale la unghiul de 55° .
13. Cel mai scurt timp pentru prelucrarea suprafeței sferice concave, a fost realizat de freza toroidală la unghiul de 55° , iar cel mai lung timp pentru prelucrarea suprafeței sferice concave s-a realizat prelucrând cu freza sferică la unghiul de 55° .
14. Pentru prelucrarea suprafeței sferice convexe, s-a obținut cel mai scurt timp cu freza toroidală la unghiul de 15° și cel mai lung timp a fost generat de freza sferică la unghiul de 35° .
15. În ceea ce privește prelucrarea suprafeței cilindrice concave, cel mai scurt timp a fost înregistrat de freza sferică la unghiul de 55° , iar cel mai lung timp de prelucrare a fost realizat de freza toroidală la unghiul de înclinare de 15° .
16. Prelucrarea suprafeței cilindrice convexe, a înregistrat cel mai scurt timp în cazul prelucrării cu freza sferică la unghiul de 55° , iar cel mai lung timp în cazul prelucrării cu freza toroidală la unghiul de 55° .
17. Obținerea unui timp de execuție cât mai scurt, cât și obținerea unei uzuri a sculei cât mai mici, este condiționată nu doar de alegerea regimurilor optime de reglaj cât și de corelarea corespunzătoare a acestora, care să asigure valoarea optimă a parametrului de proces a vitezei efective de așchiere.

5. CONTRIBUȚII EXPERIMENTALE PRIVIND INFLUENȚA PARAMETRILOR REGIMURILOR DE AȘCHIERE ASUPRA RUGOZITĂȚII

Având ca punct de plecare informațiile furnizate de studiile experimentale efectuate în cadrul capitolului precedent, în continuare se va proceda spre efectuarea unor cercetări experimentale cât mai cuprinzătoare, în vederea obținerii unor rezultate cât mai relevante asupra rugozității suprafeței, în situația celor cinci tipuri de suprafețe prelucrate cu cele două tipuri de freze. Așadar, în cadrul capitolului curent, paragrafele de interes sunt constituite de:

- Planificarea cercetării modelării datelor;
- Efectuarea măsurătorilor;
- Culegerea, centralizarea și analiza datelor experimentale;

5.1. Planificarea cercetării modelării datelor

Nu doar buna desfășurare a prelucrărilor experimentale pe centrul cu comandă numerică necesită o riguroasă planificare a cercetării. Sunt ferm convins, că planificarea cercetării modelării datelor necesită o atenție sporită. Este în zadar efectuarea prelucrărilor dacă determinarea rezultatelor obținute nu urmează un plan bine stabilit. Până la punctul în care datele urmează a fi prelucrate și modelate, este necesar parcurgerea etapei de obținere a datelor și asta se face doar prin măsurători.

Având în vedere scopul măsurătorilor, în continuare este necesară stabilirea unui plan experimental în ceea ce constituie operația de măsurare. Pentru o bună organizare este necesar ca în urma prelucrării fiecărei suprafețe în parte, aceasta să fie etichetată pentru a putea corela valorile de intrare, acestea fiind corespunzătoare celor 3 variabile discutate în capitolele anterioare, iar valorile de ieșire sunt reprezentate de către valorile rugozității.

Rugozitățile ce urmează a fi urmărite sunt R_a și R_t . Valoarea rugozității prin parametri definiți de standardul național SR EN ISO 4287:2003 indică faptul că, R_a este universal recunoscut și cel mai utilizat parametru de rugozitate. Reprezintă media aritmetică a abaterilor absolute ale profilului rugozității de la linia medie. R_t este

înălțimea maximă dintre punctul maxim și cel minim al profilului în cadrul lungimii de evaluare.

În ceea ce privește planificarea experimentelor, există trei principii de bază, și anume:

Principiul caracterului aleator în baza căruia metodele statistice cer ca observațiile să aibă un caracter aleatoriu, adică să fie distribuite aleatoriu față de parametrii. Randomizarea observațiilor face această presupunere valabilă.

Principiul replicării presupune repetarea între 3 și 7 ori a experimentului pentru fiecare set de valori ale parametrilor de intrare. Această procedură fiind necesară pentru a determina constanța măsurărilor.

Principiul lucrului în „blocuri” se utilizează pentru îmbunătățirea preciziei de comparație între factorii utilizați.

5.2. Efectuarea măsurărilor

Pentru a determina calitatea suprafeței, se va aplica principiul replicării, astfel se vor efectua 3 măsurători pe direcția paralelă direcției de avans, urmând să se facă media celor 3 măsurători. Se vor mai executa încă 3 măsurători pe direcția perpendiculară avansului, urmând ca mai apoi să se calculeze media.

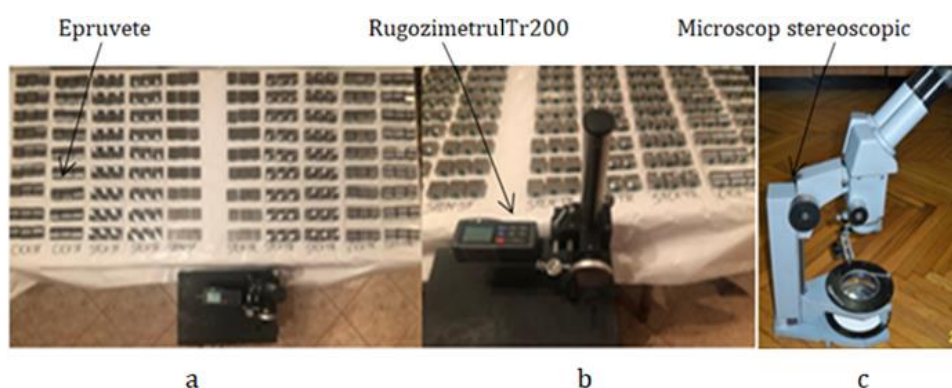


Fig. 5.1 Suprafețele, standul și microscopul stereoscopic pregătit pentru măsurare

Standul de măsurare este compus din rugozimetrul Tr200 și dispozitivul de poziționare capabil să susțină rugozimetrul în poziția dorită. Pentru o bună desfășurare a măsurărilor, atât cele plane cât și cele curbe, acest rugozimetru a fost setat, astfel încât să fie capabil să măsoare liniar și pe suprafețe curbe. În cadrul figurii 5.1a sunt ilustrate

toate suprafețele ce urmează a fi măsurate, având în prim plan standul de măsurare, în figura 5.1b este reprezentat standul de măsurare, iar în figura 5.1c este prezentat microscopul stereoscopic.

Făcând un mic calcul, 270 de suprafețe măsurate de 3 ori paralel pe direcția avansului și de 3 ori perpendicular pe direcția avansului, însumează un număr de 1620 de măsurători. Toate aceste măsurători sunt cuprinse în tabele din anexele 1.1- 1.20.

5.3. Culegerea, centralizarea și analiza datelor experimentale

Rezultatele măsurătorilor obținute în capitolul anterior și prezentate în anexe au fost centralizate în tabele 5.1-5.10 urmând a fi comparate valorile acestora. Aceste tabele conțin media aritmetică a măsurătorilor, fiind prezentată o viziune clară și concretă a valorilor rugozității.

Tab. 5.1 Rezultatele experimentale aferente prelucrării suprafeței plane cu freza sferică

Tipul suprafeței	Rugozitatea R_a [μ m]		Rugozitatea R_t [μ m]	
	Direcția de măsurare în raport cu direcția avansului			
	Paralel	Perpendicular	Paralel	Perpendicular
SPLN -SF-1	0,245	0,481	2,066	3,666
SPLN -SF-2	0,460	0,539	2,860	4,680
SPLN -SF-3	0,746	0,616	3,673	5,540
SPLN -SF-4	0,239	0,476	1,813	3,540
SPLN -SF-5	0,315	0,487	2,120	3,486
SPLN -SF-6	0,452	0,550	2,720	4,133
SPLN -SF-7	0,274	0,557	1,840	3,726
SPLN -SF-8	0,412	0,572	2,866	4,446
SPLN -SF-9	0,707	0,714	3,993	4,946
SPLN -SF-10	0,231	0,544	1,686	5,040
SPLN -SF-11	0,426	0,565	2,446	5,520
SPLN -SF-12	0,589	0,696	4,666	5,939
SPLN -SF-13	0,273	0,444	2,253	3,100
SPLN -SF-14	0,372	0,590	2,866	3,906
SPLN -SF-15	0,588	0,518	3,486	3,986
SPLN -SF-16	0,218	0,479	1,606	3,413
SPLN -SF-17	0,396	0,416	2,786	3,360
SPLN -SF-18	0,604	0,551	2,699	4,386
SPLN -SF-19	0,225	0,554	1,733	5,573
SPLN -SF-20	0,432	0,450	2,699	4,272

SPLN -SF-21	0,530	0,512	3,046	4,460
SPLN -SF-22	0,353	0,486	2,806	3,213
SPLN -SF-23	1,146	0,509	2,246	3,799
SPLN -SF-24	0,564	0,602	3,633	3,953
SPLN -SF-25	0,336	0,435	2,220	3,666
SPLN -SF-26	0,548	0,524	3,613	4,360
SPLN -SF-27	0,721	0,588	5,403	5,326

Analiza figurii 5.2 relevă faptul că, cea mai mică valoare a rugozității $R_a=0,218 \mu\text{m}$ a fost înregistrată măsurând pe direcția paralelă avansului suprafața plană cu numărul 16, prelucrată cu freza sferică (SPLN-SF-16). Regimurile de așchiere folosite sunt: $v_c=370 \text{ m/min}$, $f_z=0,05 \text{ mm/dinte}$ și înclinarea axei sculei de 55° , conform tabelului 4.2.

Cea mai mare valoare $R_a= 1,146 \mu\text{m}$, a fost obținută în timpul prelucrării cu freza sferică a suprafeței plane cu numărul 23 (SPLN-SF-23), cu regimurile de așchiere $v_c=430 \text{ m/min}$, $f_z=0,09 \text{ mm/dinte}$ și la înclinarea de 35° , precum sunt prezentate în tabelul 4.2.

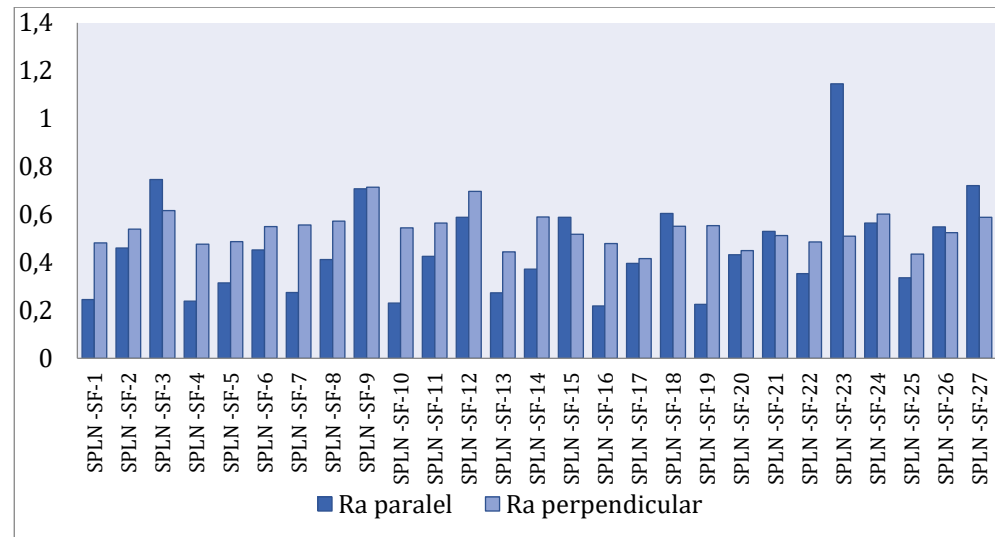


Fig. 5.2 Media aritmetică R_a a suprafeței plane prelucrată cu freza sferică

Din punct de vedere al rugozității totale R_t , analizând figura 5.3, valoare minimă este de $1,606 [\mu\text{m}]$ tot asupra suprafeței plane cu numărul 16 prelucrate cu freza sferică, (SPLN-SF-16).

Valoarea maximă R_t este de $5,936 \mu\text{m}$ înregistrată asupra suprafeței plane cu numărul 12 (SPLN-SF-12) cu regimurile $v_c=370 \text{ m/min}$, $f_z=0,13 \text{ mm/dinte}$ și înclinarea axei sculei de 15° , conform tabelului 4.2.

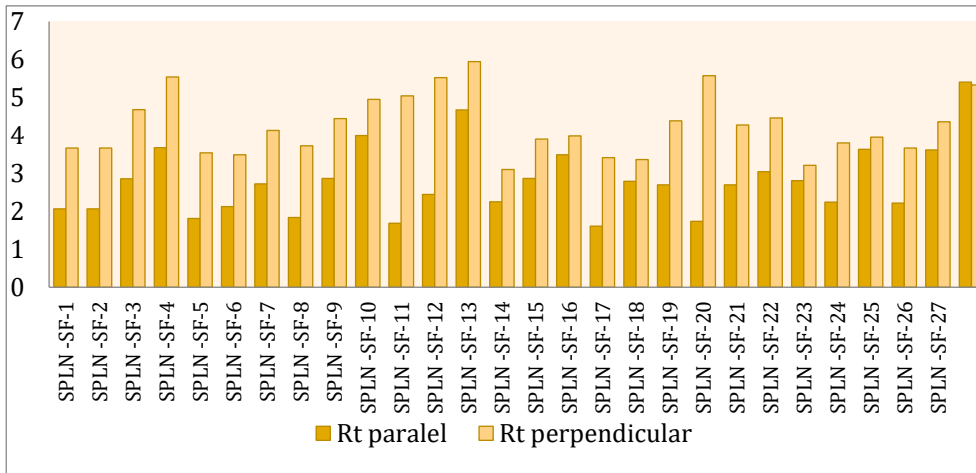


Fig. 5.3 Media rugozității totale Rt a suprafeței plane prelucrată cu freza sferică

În ceea ce privește analiza suprafețelor plane prelucrate cu freza toroidală, conform figurii 5.4, cea mai mică valoare a rugozității $R_a=0,160 \mu\text{m}$ a fost oferită măsurând pe direcția paralelă avansului suprafața plană prelucrată cu freza toroidală cu numărul 1 (SPLN-TR-1), regimurile de așchiere folosite fiind: $v_c=80 \text{ m/min}$, $f_z= 0,11 \text{ mm/dinte}$ și înclinarea axei sculei de 15° , conform tabelului 4.1.

Cea mai mare valoare $R_a=1,131 \mu\text{m}$, a fost evidențiată în timpul prelucrării suprafeței SPLN-TR-18 cu regimurile de așchiere, $v_c=170 \text{ m/min}$, $f_z=0,19 \text{ mm/dinte}$ și la înclinarea de 55° , conform tabelului 4.1.

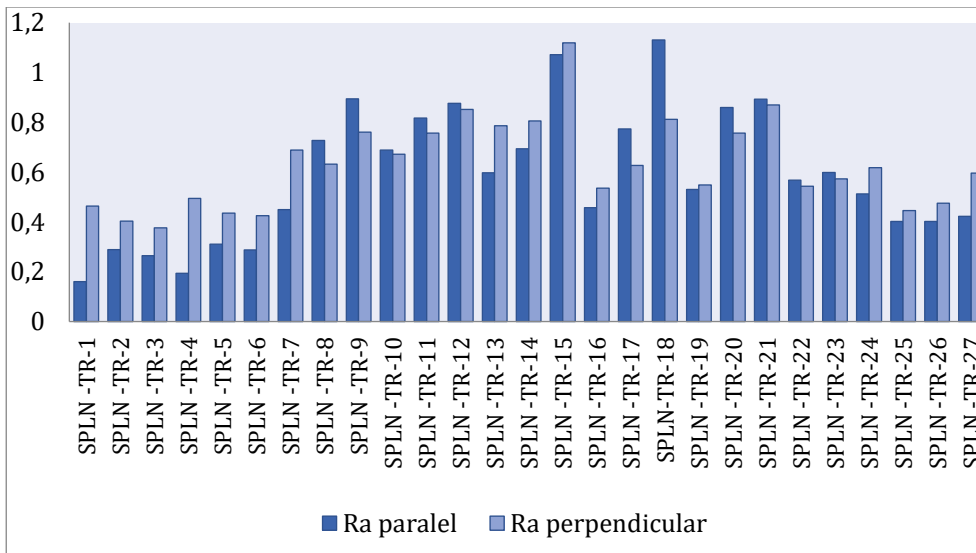


Fig. 5.4 Media aritmetică Ra a suprafeței plane prelucrată cu freza toroidală

Tab. 5.2 Rezultatele experimentale aferente prelucrării suprafeței plane cu freza toroidală

Tipul suprafeței	Rugozitatea R_a [μm]		Rugozitatea R_t [μm]	
	Direcția de măsurare în raport cu direcția avansului			
	Paralel	Perpendicular	Paralel	Perpendicular
SPLN -TR-1	0,160	0,464	0,926	2,920
SPLN -TR-2	0,289	0,403	1,680	2,593
SPLN -TR-3	0,264	0,376	1,706	2,400
SPLN -TR-4	0,194	0,494	1,466	2,613
SPLN -TR-5	0,311	0,435	2,413	3,499
SPLN -TR-6	0,288	0,425	2,719	2,953
SPLN -TR-7	0,450	0,688	2,609	4,273
SPLN -TR-8	0,727	0,632	4,413	4,353
SPLN -TR-9	0,894	0,761	4,639	5,840
SPLN -TR-10	0,689	0,672	3,486	4,519
SPLN -TR-11	0,817	0,756	4,646	5,406
SPLN -TR-12	0,876	0,851	5,094	6,086
SPLN -TR-13	0,597	0,786	3,247	5,579
SPLN -TR-14	0,693	0,805	3,906	4,826
SPLN -TR-15	1,071	1,119	5,760	7,666
SPLN -TR-16	0,457	0,535	3,273	3,619
SPLN -TR-17	0,773	0,627	4,306	5,106
SPLN -TR-18	1,131	0,812	6,103	6,293
SPLN -TR-19	0,530	0,549	3,786	4,053
SPLN -TR-20	0,859	0,757	4,833	4,759
SPLN -TR-21	0,893	0,869	4,799	6,326
SPLN -TR-22	0,568	0,543	3,899	4,146
SPLN -TR-23	0,598	0,573	3,753	4,496
SPLN -TR-24	0,513	0,618	2,966	4,586
SPLN -TR-25	0,402	0,445	3,552	3,700
SPLN -TR-26	0,402	0,475	2,993	3,853
SPLN -TR-27	0,423	0,596	3,186	4,560

Din punct de vedere al rugozității totale R_t , conform figurii 5.5, valoare minimă este de 0,926 μm , tot asupra suprafeței plane cu numărul 1 (SPLN-TR-1).

Valoarea maximă este de 7,666 μm , măsurată asupra suprafeței plane cu numărul 15 (SPLN-TR-15) cu regimurile de așchiere $v_c=170$ m/min, $f_z=0,19$ mm/dinte și înclinarea axei sculei de 35°, conform tabelului 4.1.

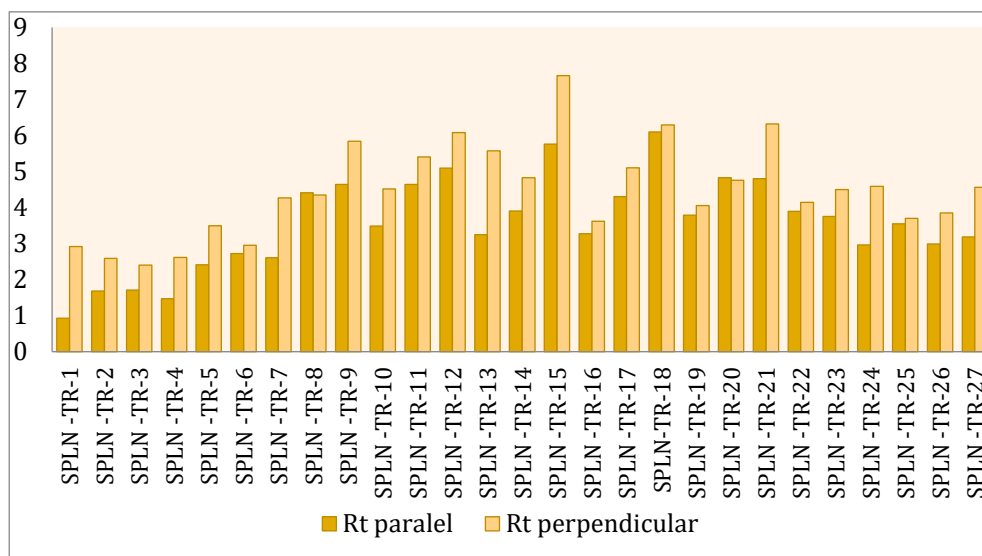


Fig. 5.5 Media rugozității totale Rt a suprafeței plane prelucrată cu freza toroidală

Comparând suprafața plană prelucrată cu cele două tipuri de freze, observăm că cea mai bună rugozitate este obținută în timpul prelucrării cu freza toroidală la înclinarea axei sculei de 15°.

Tab. 5.3 Rezultatele aferente prelucrării suprafeței sferice concave cu freza sferică

Tipul suprafeței	Rugozitatea Ra[μm]		Rugozitatea Rt[μm]	
	Direcția de măsurare în raport cu direcția avansului			
	Paralel	Perpendicular	Paralel	Perpendicular
SFCV-SF-1	0,429	0,556	3,626	3,496
SFCV-SF-2	0,429	0,493	2,279	3,860
SFCV-SF-3	0,338	0,543	2,786	3,880
SFCV-SF-4	0,392	0,484	3,300	3,803
SFCV-SF-5	0,443	0,606	3,639	3,880
SFCV-SF-6	0,385	0,536	2,927	3,783
SFCV-SF-7	0,448	0,513	3,059	5,093
SFCV-SF-8	0,476	0,495	2,453	3,846
SFCV-SF-9	0,400	0,541	3,166	5,093
SFCV-SF-10	0,296	0,485	2,140	3,867
SFCV-SF-11	0,329	0,543	2,473	4,093
SFCV-SF-12	0,379	0,543	3,053	4,039
SFCV-SF-13	0,383	0,573	2,620	4,466
SFCV-SF-14	0,390	0,555	3,346	4,113
SFCV-SF-15	0,504	0,403	4,206	3,293
SFCV-SF-16	0,413	0,666	3,326	6,399
SFCV-SF-17	0,456	0,771	3,679	7,080

SFCV-SF-18	0,409	0,670	4,220	5,406
SFCV-SF-19	0,370	0,785	3,153	5,313
SFCV-SF-20	0,396	0,683	3,220	5,566
SFCV-SF-21	0,436	0,580	3,146	4,200
SFCV-SF-22	0,479	0,674	3,679	5,246
SFCV-SF-23	0,546	0,660	4,566	5,533
SFCV-SF-24	0,486	0,505	4,700	3,686
SFCV-SF-25	0,522	0,861	3,873	8,860
SFCV-SF-26	0,548	0,614	4,660	4,980
SFCV-SF-27	0,467	0,607	4,312	4,886

În ceea ce privește suprafața sferică concavă prelucrată cu freza sferică, precum este prezentată în figura 5.6, cea mai mică valoare a rugozității aritmetice R_a , este 0,296 μm , în cazul suprafeței sferice concave cu numărul 10, (SFCV-SF-10) având regimurile de așchiere $v_c=370$ m/min, $f_z= 0,05$ mm/dinte și înclinarea axei sculei de 15° , conform tabelului 4.4.

Cea mai mare valoare a rugozității R_a este de 0.861 μm asupra suprafeței sferice concave cu numărul 25 (SFCV-SF-25), folosind regimurile de așchiere $v_c=430$ m/min $f_z= 0,05$ mm/dinte și înclinarea axei sculei de 55° , conform tabelului 4.4.

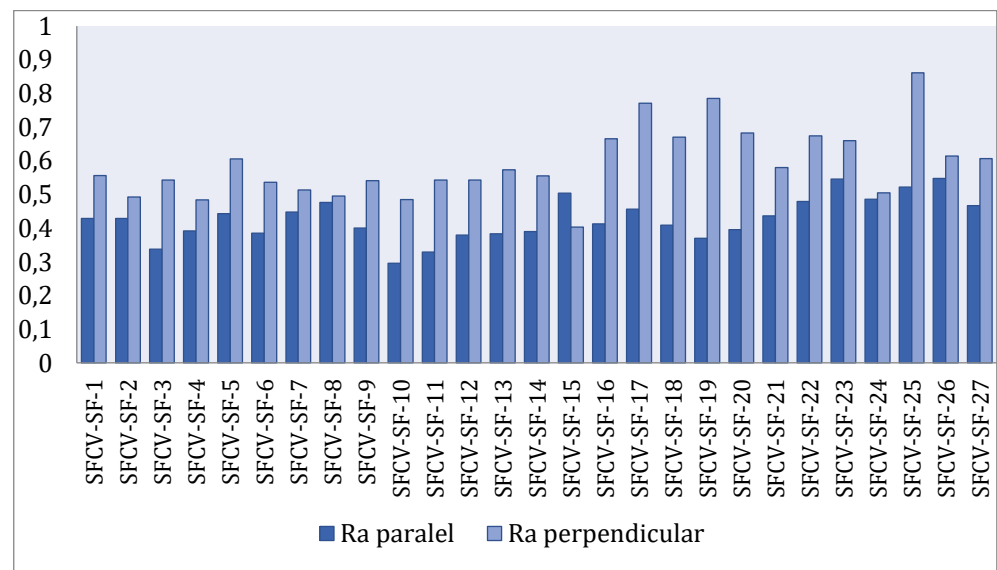


Fig. 5.6 Media aritmetică R_a a suprafeței sferice concave prelucrate cu freza sferică

Conform figurii 5.7, valoarea minimă a rugozității totale, $R_t=2,140$ μm , s-a înregistrat tot în cazul suprafeței sferice concave cu

numărul 10 (SFCV-SF-10), iar valoarea maximă a rugozității totale $R_t=8,860 \mu\text{m}$ asupra suprafeței sferice concave cu numărul 25 (SFCV-SF-25).

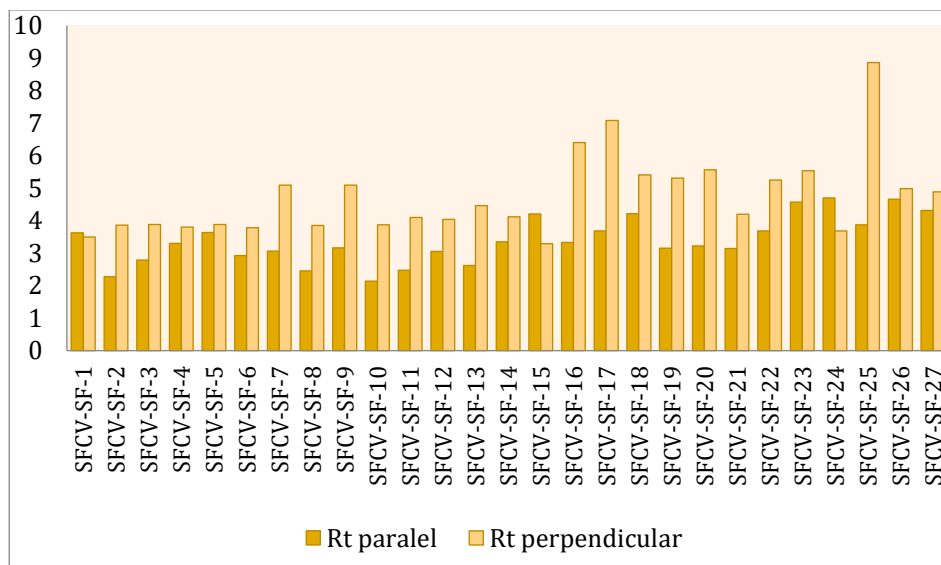


Fig. 5.7 Media rugozității totale R_t a suprafeței sferice concave prelucrate cu freza sferică

Tab. 5.4. Rezultatele aferente prelucrării suprafeței sferice concave cu freza toroidală

Tipul suprafeței	Rugozitatea R_a [μm]		Rugozitatea R_t [μm]	
	Direcția de măsurare în raport cu direcția avansului			
	Paralel	Perpendicular	Paralel	Perpendicular
SFCV-TR-1	0,644	0,655	3,266	5,124
SFCV-TR-2	0,415	0,641	2,399	5,700
SFCV-TR-3	0,440	0,544	2,593	3,683
SFCV-TR-4	0,230	0,800	1,545	7,680
SFCV-TR-5	0,346	0,622	2,013	4,606
SFCV-TR-6	0,339	0,612	2,366	4,866
SFCV-TR-7	0,282	0,731	1,666	4,886
SFCV-TR-8	0,300	0,712	1,907	5,611
SFCV-TR-9	0,265	0,603	2,187	5,692
SFCV-TR-10	0,380	0,558	2,360	3,606
SFCV-TR-11	0,259	0,511	1,526	3,612
SFCV-TR-12	0,291	0,582	2,239	4,306
SFCV-TR-13	0,363	0,797	3,633	6,433
SFCV-TR-14	0,476	0,763	4,120	5,293
SFCV-TR-15	0,250	0,627	3,813	3,553
SFCV-TR-16	0,285	0,613	2,359	4,506

SFCV-TR-17	0,220	0,537	1,960	3,046
SFCV-TR-18	0,333	0,770	2,733	5,407
SFCV-TR-19	0,402	0,537	2,860	4,553
SFCV-TR-20	0,436	0,709	2,686	4,066
SFCV-TR-21	0,280	0,627	1,647	4,586
SFCV-TR-22	0,364	0,618	2,073	4,433
SFCV-TR-23	0,466	0,643	3,486	5,326
SFCV-TR-24	0,367	0,506	2,539	4,399
SFCV-TR-25	0,370	0,673	2,479	5,206
SFCV-TR-26	0,248	0,675	2,659	4,332
SFCV-TR-27	0,342	0,626	1,973	5,519

Referitor la figura 5.8, suprafața sferică concavă prelucrată cu freza toroidală, a înregistrat cea mai mică rugozitate aritmetică $R_a=0.220 \mu\text{m}$, măsurată pe direcția paralelă avansului, suprafața sferică concavă cu numărul 17 (SFCV-TR-17), folosind regimurile de așchiere $v_c=170 \text{ m/min}$, $f_z= 0,15 \text{ mm/dinte}$ și înclinarea axei sculei de 55° , conform tabelului 4.3.

Cea mai mare valoare a rugozității aritmetice, $R_a=0,8 \mu\text{m}$ a fost înregistrată în timpul prelucrării suprafeței sferice concave cu numărul 4 (SFCV-TR-4) cu regimurile de așchiere $v_c=80 \text{ m/min}$, $f_z= 0,11 \text{ mm/dinte}$ și la înclinarea de 15° , conform tabelului 4.3.

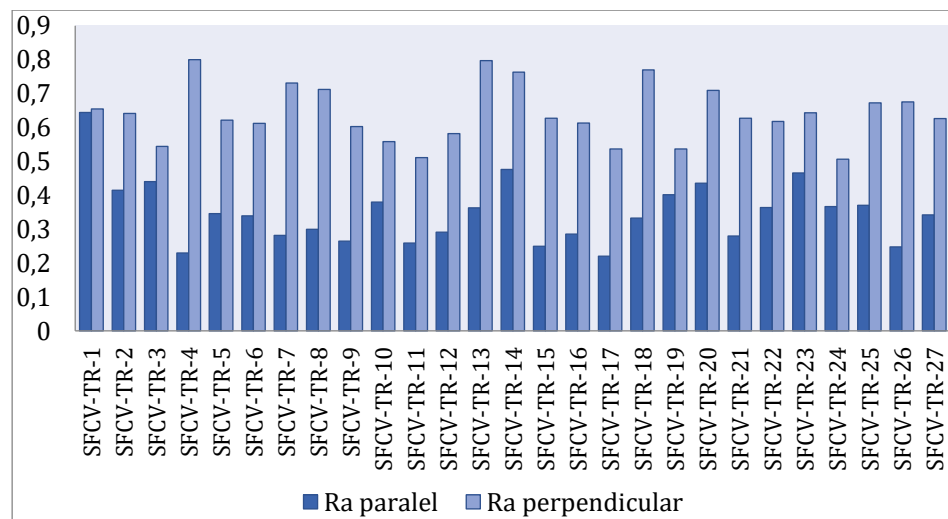


Fig. 5.8 Media aritmetică R_a a suprafeței sferice concave prelucrate cu freza toroidală

Din punct de vedere al rugozității totale R_t , conform figurii 5.9, valoare minimă este de $1,526 \mu\text{m}$, măsurată paralel direcției de avans asupra suprafeței sferice concave cu numărul 11 (SFCV-TR-11).

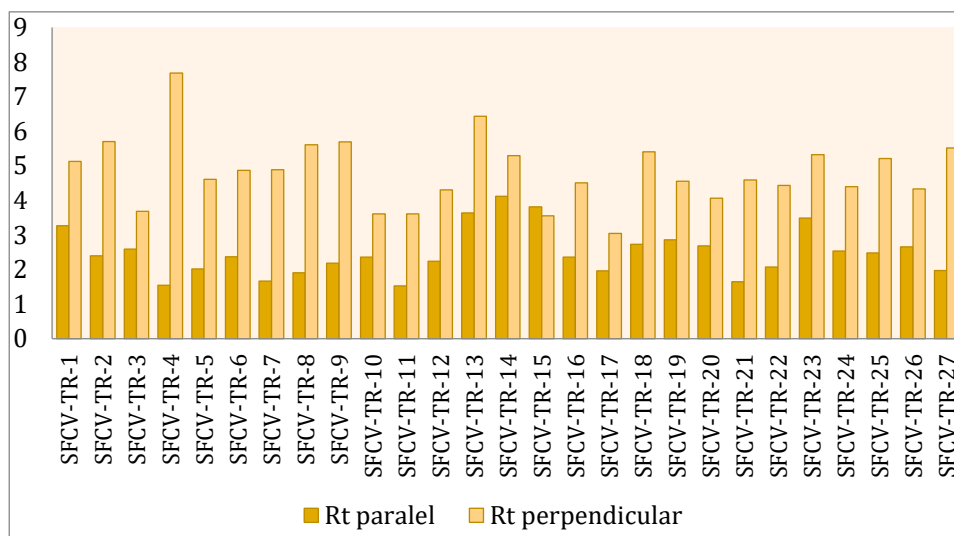


Fig. 5.9 Media rugozității totale R_t a suprafeței sferice concave prelucrate cu freza toroidală

Valoarea maximă pentru rugozitatea totală R_t este de $7,68 \mu\text{m}$, măsurată perpendicular asupra suprafeței sferice concave cu numărul 4, (SFCV-TR-4) folosind regimurile de așchiere $v_c=80 \text{ m/min}$, $f_z=0,11 \text{ mm/dinte}$ și înclinarea axei sculei de 35° conform tabelului 4.3.

Comparând calitatea suprafețelor sferice concave prelucrate cu freza sferică și cu freza toroidală, se poate observa un ușor avantaj de $0,076 \mu\text{m}$ pe adâncimea medie aritmetică pentru freza toroidală în cazul prelucrării suprafeței cu $v_c=170 \text{ m/min}$, $f_z=0,15 \text{ mm/dinte}$ și înclinarea axei sculei de 55° . Din punctul de vedere al rugozității totale, R_t , freza toroidală are un avantaj de $0,614 \mu\text{m}$.

Tab.5.5 Rezultatele aferente prelucrării suprafeței sferice convexe cu freza sferică

Tipul suprafeței	Rugozitatea R_a [μm]		Rugozitatea R_t [μm]	
	Direcția de măsurare în raport cu direcția avansului			
	Paralel	Perpendicular	Paralel	Perpendicular
SFCX-SF-1	0,595	0,492	4,101	3,246
SFCX-SF-2	0,717	0,440	4,466	3,609
SFCX-SF-3	0,630	0,722	4,012	4,926
SFCX-SF-4	0,563	0,582	4,613	3,746
SFCX-SF-5	0,511	0,592	3,602	4,180
SFCX-SF-6	1,218	0,958	7,286	6,920
SFCX-SF-7	0,701	0,748	4,213	5,046
SFCX-SF-8	0,915	0,634	5,646	4,693
SFCX-SF-9	0,832	0,847	5,667	5,379

SFCX-SF-10	0,588	0,935	4,219	7,046
SFCX-SF-11	1,194	0,992	3,680	8,133
SFCX-SF-12	0,747	0,649	4,866	5,166
SFCX-SF-13	0,656	0,955	4,153	6,739
SFCX-SF-14	0,651	0,465	4,866	3,280
SFCX-SF-15	0,439	0,696	2,567	7,752
SFCX-SF-16	0,708	0,466	4,303	3,346
SFCX-SF-17	0,667	0,645	4,846	4,560
SFCX-SF-18	0,695	0,911	4,380	7,330
SFCX-SF-19	0,485	0,749	4,076	4,993
SFCX-SF-20	0,503	0,620	3,599	4,373
SFCX-SF-21	0,742	0,831	4,893	5,260
SFCX-SF-22	0,547	0,473	3,746	3,079
SFCX-SF-23	0,532	0,511	3,136	3,993
SFCX-SF-24	0,773	0,545	6,226	3,733
SFCX-SF-25	0,731	0,624	4,890	3,966
SFCX-SF-26	0,896	0,746	6,033	4,793
SFCX-SF-27	0,611	0,561	4,792	3,373

Analiza tabelului 5.5 relevă valorile măsurate ale rugozității asupra suprafeței sferice convexe prelucrate cu freza sferică.

Potrivit figurii 5.10, cea mai mică valoare a abaterii medii aritmetice R_a a fost înregistrată pe direcția paralelă asupra suprafeței sferice convexe cu numărul 15 (SFCX-SF-15) cu valoarea $R_a=0,439 \mu\text{m}$, având ca parametri variabili de prelucrare $v_c=370 \text{ m/min}$, $f_z=0,13 \text{ mm/dinte}$ și înclinarea axei sculei de 35° , conform tabelului 4.6.

Cea mai mare valoare înregistrată pentru R_a este de $1,194 \mu\text{m}$, pentru suprafața sferică convexă cu numărul 11 (SFCX-SF-11) având regimurile de așchiere $v_c=370 \text{ m/min}$, $f_z=0,09 \text{ mm/dinte}$ și înclinarea axei sculei de 15° , conform tabelului 4.6.

Conform figurii 5.11, valoarea minimă a rugozității totale R_t este $R_t=2,567 \mu\text{m}$, și s-a înregistrat asupra suprafeței sferice convexe cu numărul 15 (SFCX-SF-15), unde s-a obținut și cea mai mică medie aritmetică a rugozității R_a .

Cea mai mare valoare a rugozității totale R_t observată este de $8,133 \mu\text{m}$, măsurată perpendicular pe direcția de avans asupra suprafeței sferice convexe cu numărul 11 (SFCX-SF-11), unde a fost înregistrată și cea mai mare valoare a rugozității R_a .

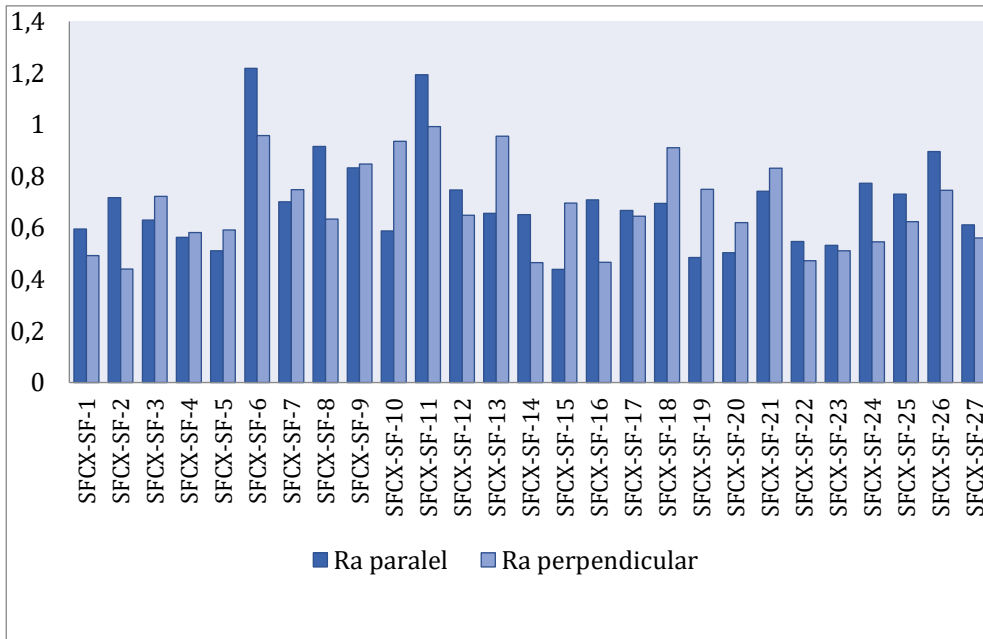


Fig. 5.10 Media aritmetică Ra a suprafeței sferice convexe prelucrate cu freza sferică

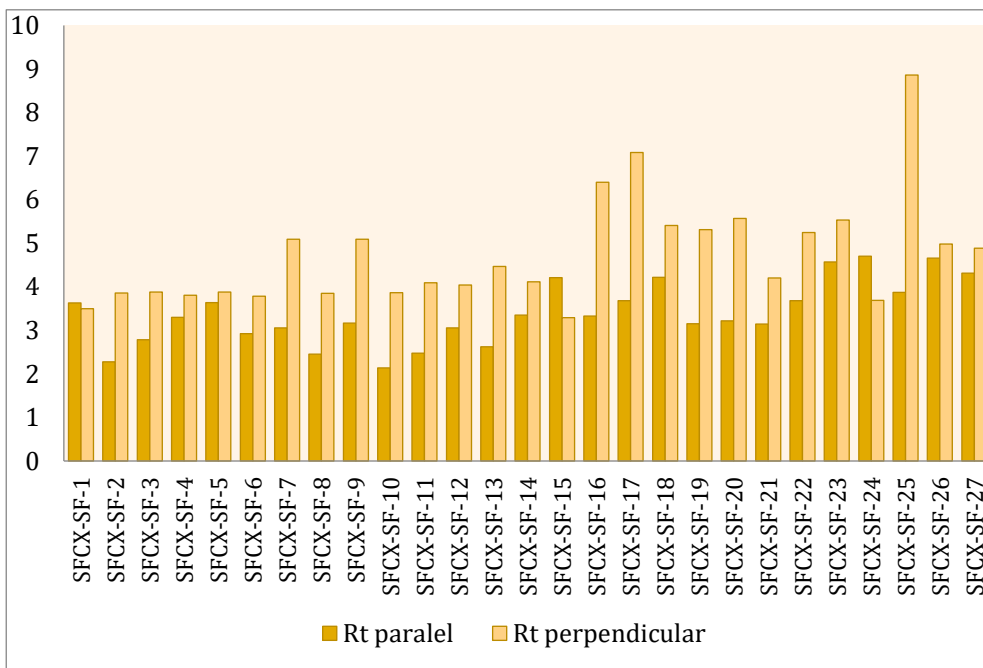


Fig. 5.11 Media rugozității totale Rt a suprafeței sferice convexe prelucrate cu freza sferică

Tab. 5.6 Rezultatele aferente prelucrării suprafeței sferice convexe cu freza toroidală

Tipul suprafeței	Rugozitatea R_a [μm]		Rugozitatea R_t [μm]	
	Direcția de măsurare în raport cu direcția avansului			
	Paralel	Perpendicular	Paralel	Perpendicular
SFCX-TR-1	0,672	1,199	3,599	7,606
SFCX-TR-2	0,711	0,903	4,253	6,153
SFCX-TR-3	0,653	0,702	4,339	3,900
SFCX-TR-4	0,632	0,737	4,066	4,652
SFCX-TR-5	0,909	0,862	5,140	6,927
SFCX-TR-6	0,705	0,979	4,567	6,033
SFCX-TR-7	0,622	0,522	3,306	3,673
SFCX-TR-8	0,372	0,497	2,786	2,813
SFCX-TR-9	0,641	0,881	3,873	4,619
SFCX-TR-10	0,591	0,636	3,626	5,547
SFCX-TR-11	0,556	0,673	3,693	3,899
SFCX-TR-12	0,629	0,887	3,693	6,920
SFCX-TR-13	0,622	0,544	4,113	5,173
SFCX-TR-14	0,697	0,634	3,953	5,686
SFCX-TR-15	0,721	0,717	3,953	5,386
SFCX-TR-16	0,604	0,506	3,360	2,780
SFCX-TR-17	0,530	0,551	2,927	3,580
SFCX-TR-18	0,588	0,798	3,486	4,506
SFCX-TR-19	0,520	0,453	3,827	4,287
SFCX-TR-20	0,624	0,486	4,020	4,073
SFCX-TR-21	0,540	0,999	4,400	6,566
SFCX-TR-22	0,673	0,488	6,587	3,286
SFCX-TR-23	0,691	0,760	5,146	4,792
SFCX-TR-24	0,763	1,003	3,899	7,100
SFCX-TR-25	0,550	0,480	3,039	2,793
SFCX-TR-26	0,625	0,599	3,767	3,226
SFCX-TR-27	0,599	0,572	3,273	2,086

Conform figurii 5.12, în cazul suprafeței sferice convexe prelucrate cu freza toroidală, cea mai mică valoare pentru R_a este de 0,372 μm în cazul suprafeței sferice convexe cu numărul 8 (SFCX-TR-8) prelucrată cu regimurile de așchiere $v_c=80$ m/min, $f_z=0,15$ mm/dinte și înclinarea axei sculei de 55°, conform tabelului 4.5.

Valoarea maximă R_a este de 1,199 μm , măsurată perpendicular pe direcția de avans asupra suprafeței sferice convexe cu numărul 1 (SFCX-TR-1) având regimurile de așchiere $v_c=80$ m/min, $f_z=0,11$ mm/dinte și înclinarea axei sculei de 15°, conform tabelului 4.5.

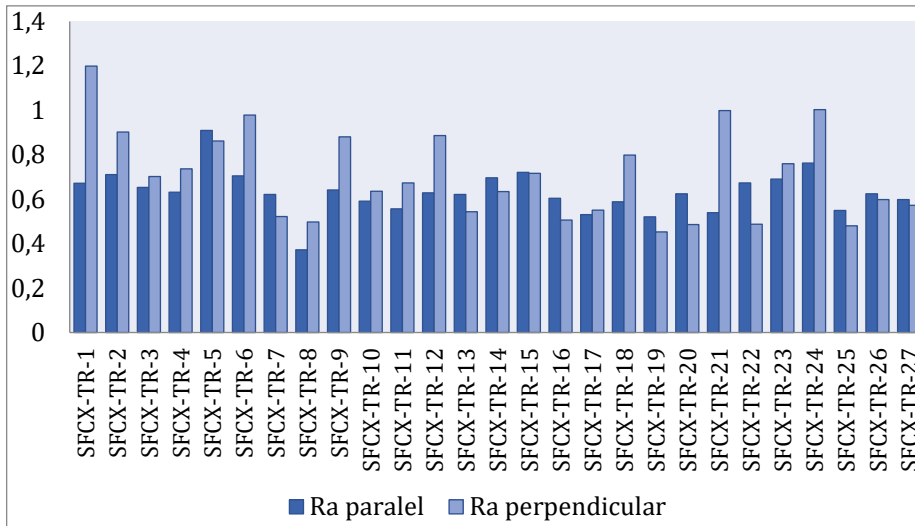


Fig. 5.12 Media aritmetică Ra a suprafeței sferice convexe prelucrate cu freza toroidală

Potrivit figurii 5.13, valoarea R_t minimă este egală cu 2,786 μm pe suprafața sferică concavă cu numărul 8 (SFCX-TR-8), iar valoarea maximă R_t este de 7,606 μm pentru suprafața sferică concavă cu numărul 1 (SFCX-TR-1).

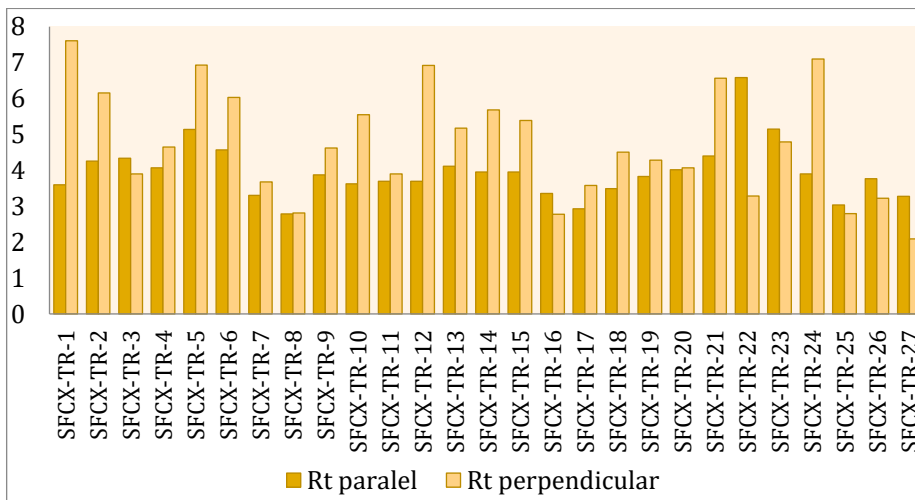


Fig. 5.13 Media rugozității totale R_t a suprafeței sferice concave prelucrate cu freza toroidală

Comparând calitatea suprafețelor sferice convexe, cea mai mică valoare a rugozității R_a este dată de prelucrarea cu freza toroidală, existând o diferență de 0,067 μm .

Referitor la R_t , cea mai mică valoare este înregistrată de prelucrarea cu freza sferică, existând o diferență de 0,219 μm față de freza toroidală.

Tab. 5.7 Rezultatele aferente prelucrării suprafeței cilindrice concave cu freza sferică

Tipul suprafeței	Rugozitatea $R_a[\mu\text{m}]$		Rugozitatea $R_t[\mu\text{m}]$	
	Direcția de măsurare în raport cu direcția avansului			
	Paralel	Perpendicular	Paralel	Perpendicular
CICV-SF-1	0,176	0,345	1,513	2,773
CICV-SF-2	0,334	0,527	2,673	4,186
CICV-SF-3	0,318	0,477	2,466	3,533
CICV-SF-4	0,220	0,425	1,679	2,826
CICV-SF-5	0,393	0,394	2,427	2,713
CICV-SF-6	0,417	0,415	3,413	3,127
CICV-SF-7	0,249	0,367	2,173	3,186
CICV-SF-8	0,266	0,395	2,199	4,730
CICV-SF-9	0,438	0,403	3,640	2,499
CICV-SF-10	0,202	0,552	1,586	3,540
CICV-SF-11	0,328	0,467	2,486	3,493
CICV-SF-12	0,268	0,405	1,919	3,526
CICV-SF-13	0,333	0,497	2,313	4,143
CICV-SF-14	0,364	0,453	2,553	3,020
CICV-SF-15	0,414	0,420	2,859	3,426
CICV-SF-16	0,357	0,480	2,666	3,806
CICV-SF-17	0,276	0,489	2,386	3,753
CICV-SF-18	0,375	0,456	3,200	3,280
CICV-SF-19	0,233	0,525	1,580	3,260
CICV-SF-20	0,270	0,557	1,993	3,373
CICV-SF-21	0,306	0,557	2,686	4,739
CICV-SF-22	0,261	0,394	1,826	3,093
CICV-SF-23	0,399	0,505	2,917	3,546
CICV-SF-24	0,286	0,462	2,280	3,486
CICV-SF-25	0,295	0,531	2,186	4,300
CICV-SF-26	0,374	0,484	2,546	4,520
CICV-SF-27	0,422	0,459	2,666	3,380

Analizând valorile rugozității suprafețelor cilindrice concave prelucrate cu freza sferică s-a ajuns la următoarele deduceri.

Conform figurii 5.14, cea mai mică valoare obținută a rugozității $R_a=0,176 \mu\text{m}$, este în cazul suprafeței cilindrice concave cu numărul 1 (CICV-SF-1) cu regimurile de așchiere $v_c=280 \text{ m/min}$, $f_z=0,05 \text{ mm/dinte}$ și înclinarea axei sculei de 15° , conform tabelului 4.8.

Cea mai mare valoare a rugozității $R_a=0.552 \mu\text{m}$, s-a realizat pe suprafața cilindrică concavă cu numărul 10 (CICV-SF-10) cu regimurile de așchiere $v_c=370 \text{ m/min}$, $f_z=0,05 \text{ mm/dinte}$ și înclinarea axei sculei de 15° , conform tabelului 5.8.

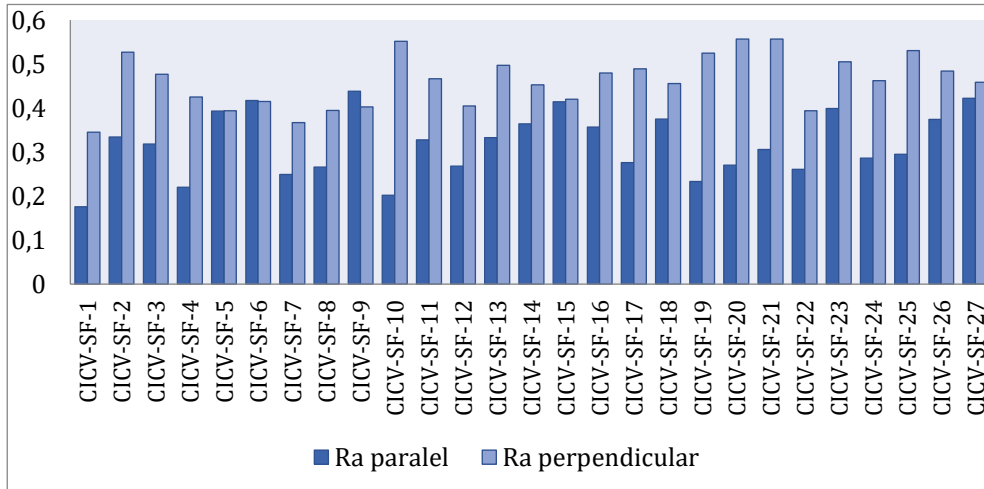


Fig. 5.14 Media aritmetică R_a a suprafeței cilindrice concave prelucrate cu freza sferică

Potrivit figurii 5.15, rugozitatea totală R_t minimă este egală cu $1,513 \mu\text{m}$ pe suprafața cilindrică concavă cu numărul 1 (CICV-SF-1), iar R_t maxim este de $4,739 \mu\text{m}$, generată pe suprafața cilindrică concavă cu numărul 21 (CICV-SF-21) cu regimurile de așchiere $v_c=430 \text{ m/min}$, $f_z=0,13 \text{ mm/dinte}$ și înclinarea axei sculei de 15° , conform tabelului 4.8.

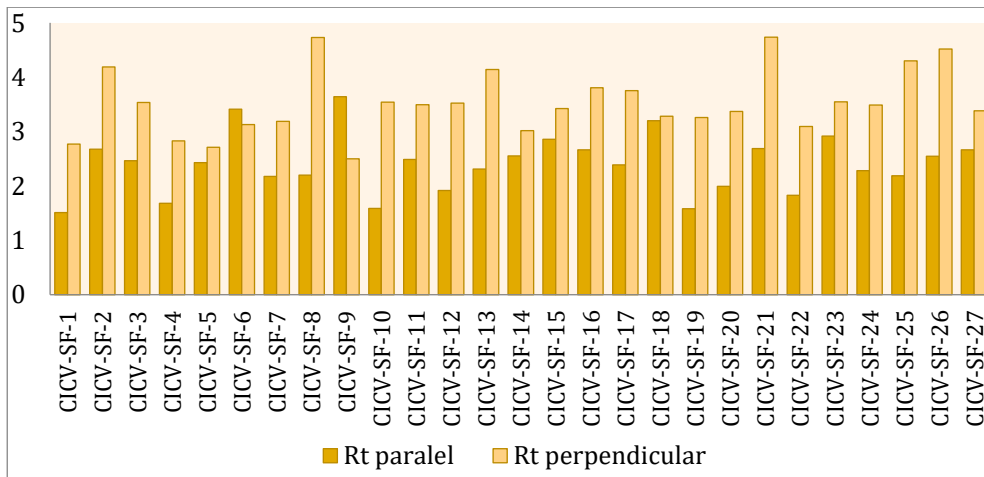


Fig. 5.15 Media rugozității totale R_t a suprafeței cilindrice concave prelucrate cu freza sferică

Tab. 5.8 Rezultatele aferente prelucrării suprafeței cilindrice concave cu freza toroidală

Tipul suprafeței	Rugozitatea R_a [μm]		Rugozitatea R_t [μm]	
	Direcția de măsurare în raport cu direcția avansului			
	Paralel	Perpendicular	Paralel	Perpendicular
CICV-TR-1	0,607	0,579	4,232	5,580
CICV-TR-2	0,404	0,527	3,959	5,307
CICV-TR-3	0,532	0,455	4,193	3,926
CICV-TR-4	0,435	0,424	3,379	3,586
CICV-TR-5	0,432	0,393	3,106	3,687
CICV-TR-6	0,398	0,362	2,387	3,839
CICV-TR-7	0,410	0,573	4,020	4,946
CICV-TR-8	0,346	0,498	2,273	4,386
CICV-TR-9	0,414	0,496	3,346	4,273
CICV-TR-10	0,359	0,562	2,173	3,493
CICV-TR-11	0,453	0,485	2,453	2,913
CICV-TR-12	0,374	0,447	2,760	3,286
CICV-TR-13	0,437	0,384	3,659	3,273
CICV-TR-14	0,360	0,452	2,259	3,700
CICV-TR-15	0,361	0,388	2,693	4,526
CICV-TR-16	0,485	0,648	3,927	6,273
CICV-TR-17	0,375	0,603	3,047	5,380
CICV-TR-18	0,397	0,600	2,799	5,353
CICV-TR-19	0,416	0,599	2,639	5,533
CICV-TR-20	0,326	0,384	3,300	2,413
CICV-TR-21	0,268	0,356	2,346	2,860
CICV-TR-22	0,330	0,469	2,059	3,913
CICV-TR-23	0,286	0,538	3,379	5,039
CICV-TR-24	0,378	0,460	3,513	3,233
CICV-TR-25	0,453	0,773	2,746	7,699
CICV-TR-26	0,398	0,590	4,713	5,099
CICV-TR-27	0,339	0,503	2,593	3,533

Potrivit figurii 5.16, suprafața cilindrică concavă prelucrată cu freza toroidală, a consemnat cea mai mică valoare $R_a=0,268 \mu\text{m}$ pe suprafața cilindrică concavă cu numărul 21 (CICV-TR-21) cu regimurile de așchiere $v_c=210 \text{ m/min}$, $f_z=0,19 \text{ mm/dinte}$ și înclinarea axei sculei de 15° , conform tabelului 4.7.

Cea mai mare valoare R_a este $0,773 \mu\text{m}$, asupra suprafeței cilindrice concave cu numărul 25 (CICV-TR-25) cu regimurile de așchiere $v_c=210 \text{ m/min}$, $f_z=0,11 \text{ mm/dinte}$ și înclinarea axei sculei de 55° , conform tabelului 4.7.

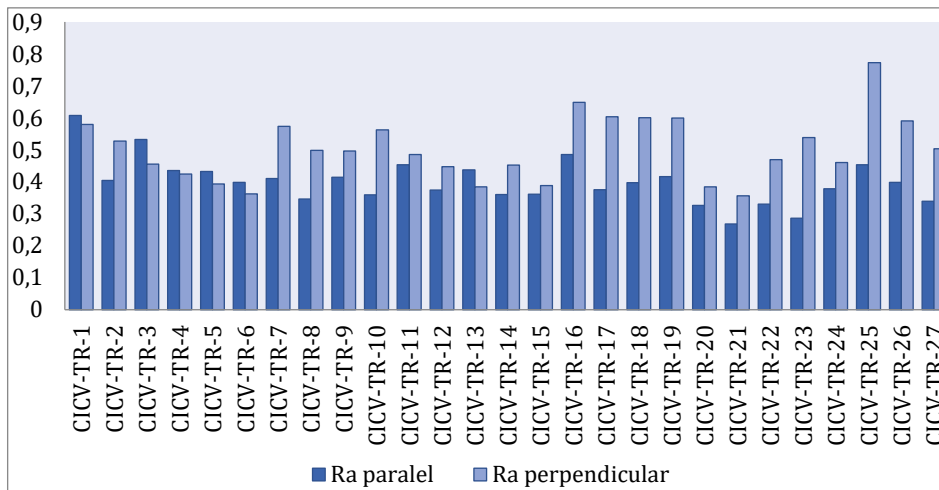


Fig. 5.16 Media aritmetică Ra a suprafeței cilindrice concave prelucrate cu freza toroidală

Conform figurii 5.17, R_t minim obținut este de 2,059 μm , pe suprafața cilindrică concavă cu numărul 22 (CICV-TR-22) cu regimurile de așchiere $v_c=210$ m/min, $f_z=0,11$ mm/dinte și înclinarea axei sculei de 35° conform tabelului 4.7, iar valoarea maximă R_t este de 7,699 μm , asupra suprafeței cilindrice concave cu numărul 25 (CICV-TR-25).

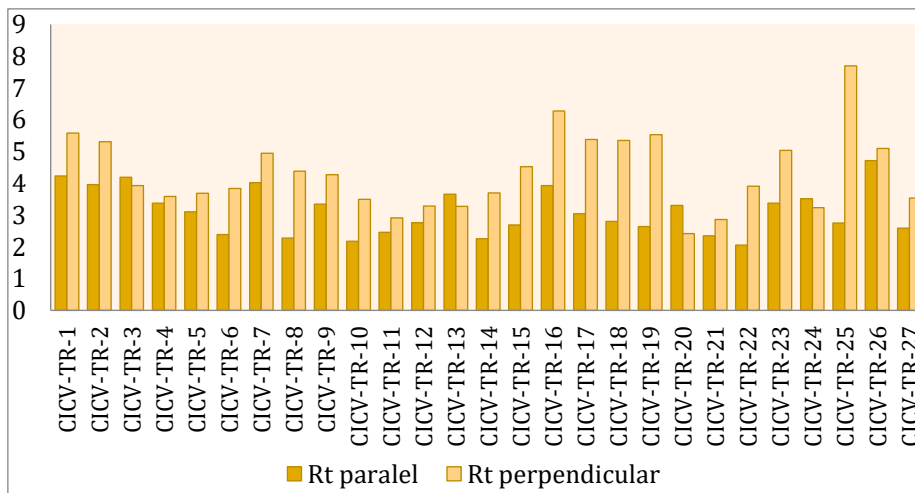


Fig. 5.17 Media rugozității totale R_t a suprafeței cilindrice concave prelucrate cu freza toroidală

Comparând suprafețele cilindrice concave prelucrate cu freza sferică și cea toroidală, freza sferică prezintă un avantaj de 0,092 μm

față de freza toroidală, dar și din punct de vedere al R_t tot freza sferică este în avantaj.

Tab. 5.9 Rezultatele aferente prelucrării suprafeței cilindrice convexe cu freza sferică

Tipul suprafeței	Rugozitatea R_a [μm]		Rugozitatea R_t [μm]	
	Direcția de măsurare în raport cu direcția avansului			
	Paralel	Perpendicular	Paralel	Perpendicular
CICX-SF-1	0,540	0,414	4,359	3,273
CICX-SF-2	0,403	0,552	2,526	3,652
CICX-SF-3	0,609	0,529	4,066	3,666
CICX-SF-4	0,594	0,578	4,299	4,286
CICX-SF-5	0,502	0,432	3,179	3,386
CICX-SF-6	0,803	0,653	6,073	4,519
CICX-SF-7	0,571	0,429	4,046	5,493
CICX-SF-8	0,492	0,332	2,887	3,220
CICX-SF-9	0,588	0,402	3,286	3,462
CICX-SF-10	0,489	0,399	3,447	3,106
CICX-SF-11	0,543	0,481	3,107	3,779
CICX-SF-12	0,597	0,466	3,400	3,886
CICX-SF-13	0,711	0,560	5,193	4,393
CICX-SF-14	0,644	0,507	5,213	2,780
CICX-SF-15	0,622	0,591	3,366	4,853
CICX-SF-16	0,754	0,425	5,593	2,473
CICX-SF-17	0,490	0,502	3,119	2,740
CICX-SF-18	0,632	0,488	4,006	3,953
CICX-SF-19	0,328	0,442	1,640	4,226
CICX-SF-20	0,541	0,558	3,760	4,300
CICX-SF-21	0,730	0,499	5,126	5,166
CICX-SF-22	0,573	0,435	4,547	2,779
CICX-SF-23	0,486	0,650	4,133	4,800
CICX-SF-24	0,389	0,453	2,080	3,660
CICX-SF-25	0,530	0,392	2,619	3,213
CICX-SF-26	0,412	0,389	3,720	2,766
CICX-SF-27	0,389	0,335	2,806	2,653

Potrivit figurii 5.18, suprafața cilindrică convexă prelucrată cu freza sferică, arată valoarea minimă a rugozității $R_a=0,328 \mu\text{m}$, asupra suprafeței cilindrice convexe cu numărul 19 (CICX-SF-19), cu regimurile de așchiere $v_c=430 \text{ m/min}$, $f_z=0,05 \text{ mm/dinte}$ și înclinarea axei sculei de 15° , conform tabelului 4.10.

Valoarea maximă R_a este obținută asupra suprafeței cilindrice convexe cu numărul 6 (CICX-SF-6) cu regimurile de așchiere $v_c=280$

m/min, $f_z=0,13$ mm/dinte și înclinarea axei sculei de 35° , conform tabelului 4.10.

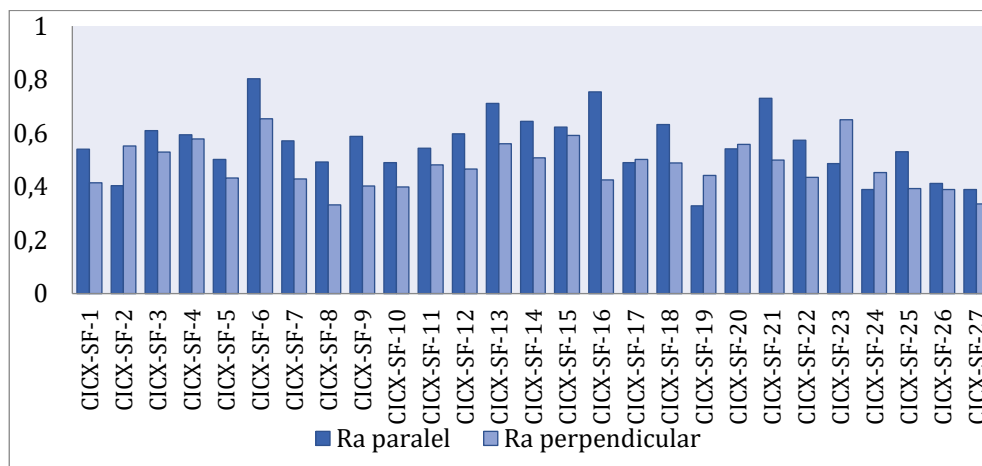


Fig. 5.18 Media aritmetică Ra a suprafeței cilindrice convexe prelucrate cu freza sferică

În ceea ce privește rugozitatea totală, conform figurii 5.19, R_t minim este de $1,64 \mu\text{m}$ în cazul suprafeței cilindrice convexe cu numărul 19 (CICX-SF-19).

Valoarea maximă a rugozității totale este $R_t=6,073 \mu\text{m}$ asupra suprafeței cilindrice convexe cu numărul 6 (CICX-SF-6) cu regimurile de așchiere $v_c=280$ m/min, $f_z=0,135$ mm/dinte și înclinarea axei sculei de 35° , conform tabelului 4.10.

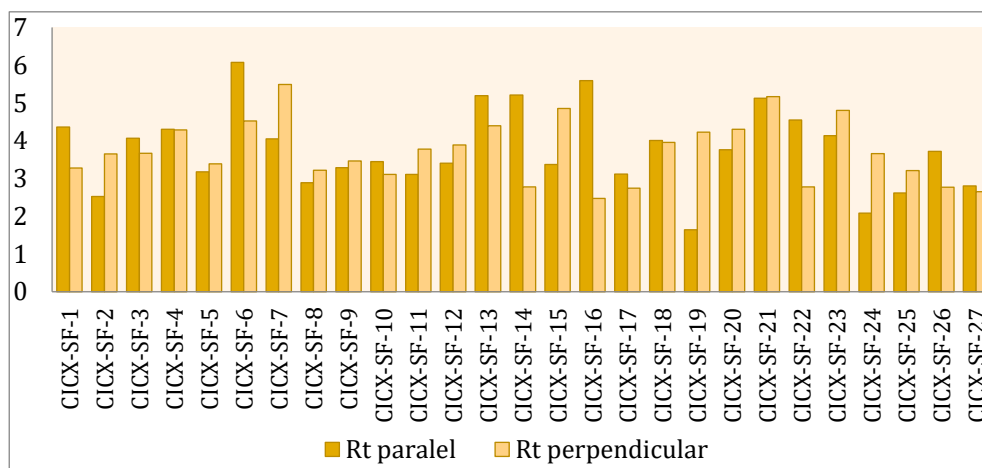


Fig. 5.19 Media rugozității totale R_t a suprafeței cilindrice convexe prelucrate cu freza sferică

Tab. 5.10 Rezultatele aferente prelucrării suprafeței cilindric convexe cu freza toroidală

Tipul suprafeței	Rugozitatea R_a [μm]		Rugozitatea R_t [μm]	
	Direcția de măsurare în raport cu direcția avansului			
	Paralel	Perpendicular	Paralel	Perpendicular
CICX-TR-1	0,512	0,677	3,186	6,533
CICX-TR-2	0,755	0,818	4,699	5,913
CICX-TR-3	0,469	0,743	3,640	5,726
CICX-TR-4	0,845	0,611	4,873	6,206
CICX-TR-5	0,561	0,831	3,160	7,493
CICX-TR-6	0,773	0,726	5,619	6,159
CICX-TR-7	0,919	0,968	6,006	9,106
CICX-TR-8	0,603	0,850	5,653	8,160
CICX-TR-9	0,817	0,918	6,066	8,059
CICX-TR-10	0,586	0,795	4,072	8,436
CICX-TR-11	0,375	0,410	2,986	3,726
CICX-TR-12	0,396	0,455	2,346	3,093
CICX-TR-13	0,686	0,763	4,700	8,166
CICX-TR-14	0,706	0,787	4,766	8,019
CICX-TR-15	0,822	0,519	6,026	4,572
CICX-TR-16	0,795	0,731	5,347	7,600
CICX-TR-17	0,929	0,875	6,266	6,813
CICX-TR-18	0,825	0,587	5,546	6,480
CICX-TR-19	0,486	0,418	3,233	3,993
CICX-TR-20	0,441	0,376	2,839	2,639
CICX-TR-21	0,333	0,414	2,120	3,006
CICX-TR-22	0,631	0,398	4,126	3,160
CICX-TR-23	0,444	0,589	3,372	4,952
CICX-TR-24	0,556	0,631	4,306	5,253
CICX-TR-25	0,606	0,560	4,013	3,959
CICX-TR-26	0,563	0,734	4,713	5,846
CICX-TR-27	0,553	0,767	3,339	8,643

Potrivit figurii 5.20, suprafața cilindrică convexă prelucrată cu freza toroidală deține cea mai mică valoare $R_a=0,398 \mu\text{m}$, pe suprafața cilindrică convexă cu numărul 22 (CICX-TR-22) cu regimurile de așchiere $v_c=210 \text{ m/min}$, $f_z=0,11 \text{ mm/dinte}$ și înclinarea axei sculei de 35° , conform tabelului 4.9.

Valoarea maximă a $R_a=0,968 \mu\text{m}$, măsurată pe suprafața cilindrică convexă cu numărul 7 (CICX-TR-7) cu regimurile de așchiere $v_c=80 \text{ m/min}$, $f_z=0,11 \text{ mm/dinte}$ și înclinarea axei sculei de 55° , conform tabelului 4.9.

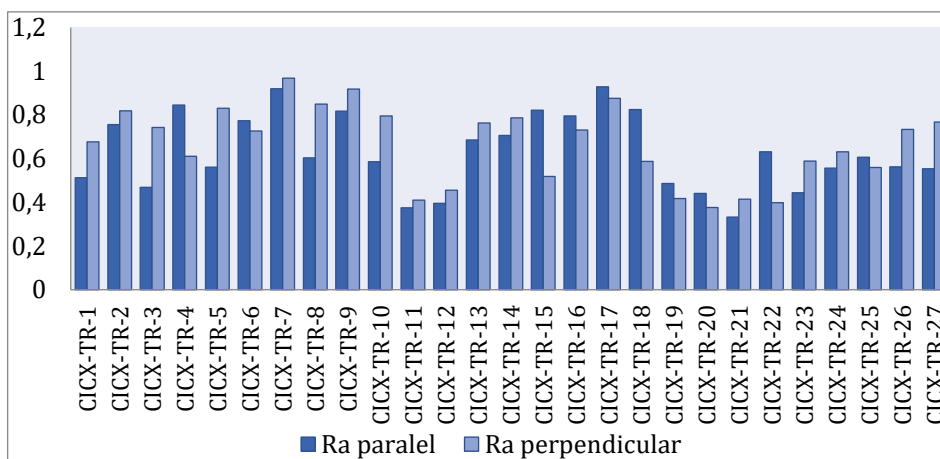


Fig. 5.20 Media aritmetică Ra a suprafeței cilindrice convexe prelucrate cu freza toroidală

Conform figurii 5.21, valoarea minimă a rugozității totale este $R_t=2,12 \mu\text{m}$, înregistrată asupra suprafeței cilindrice convexe cu numărul 21 (CICX-TR-21) cu regimurile de așchiere $v_c=210 \text{ m/min}$, $f_z=0,19 \text{ mm/dinte}$ și înclinarea axei sculei de 15° , conform tabelului 4.9.

În ceea ce privește valoarea maximă R_t , aceasta este $9,106 \mu\text{m}$ asupra suprafeței cilindrice convexe cu numărul 7 (CICX-TR-7).

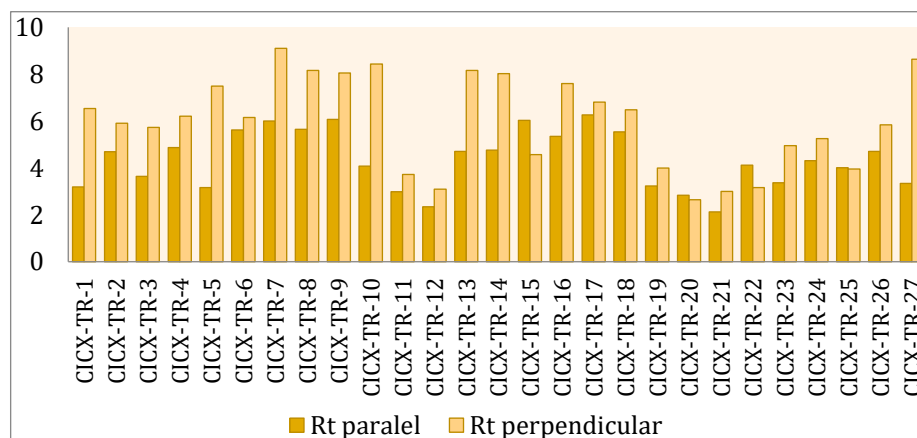


Fig. 5.21 Media rugozității totale R_t a suprafeței cilindrice convexe prelucrate cu freza toroidală

Comparând suprafețele prelucrate cu cele două tipuri de freze, freza sferică prezintă un avantaj deoarece a rezultat media aritmetică a rugozității mai bună cu $0,069 \mu\text{m}$, față de cea prelucrată cu freza toroidală.

5.4. Identificarea și reprezentarea microscopică a valorilor minime a rugozității

În urma efectuării măsurătorilor și centralizării datelor, s-a ajuns la următoarele informații, în cea ce privește care tip de sculă este de preferat de folosit.

Suprafețele plane constituie unele dintre cele mai răspândite suprafețe. Chiar dacă există nenumărate soluții de a o putea prelucra și de a obține valori ale rugozității cât mai mici, în cazurile descrise s-a ajuns la un caz favorabil.

În ceea ce privește cele 3 variabile de proces, cu cele două tipuri de scule, prelucrarea cu freza toroidală prezintă un avantaj. În acest caz unghiul de înclinare al axei sculei este de 15° , prezentând și avantajul unei uzuri mai mici potrivit capitolului 4.8.

În figura 5.22 sunt ilustrate vederi microscopice obținute cu microscopul stereoscopic IOR având gradul de mărire de 8X și cu microscopul MM1-200 cu gradul de mărire de 50X a celei mai bune suprafețe plane prelucrată cu freza toroidală, (SPLN-TR) respectiv, cea mai bună suprafață plană prelucrată cu freza sferică, (SPLN-SF).

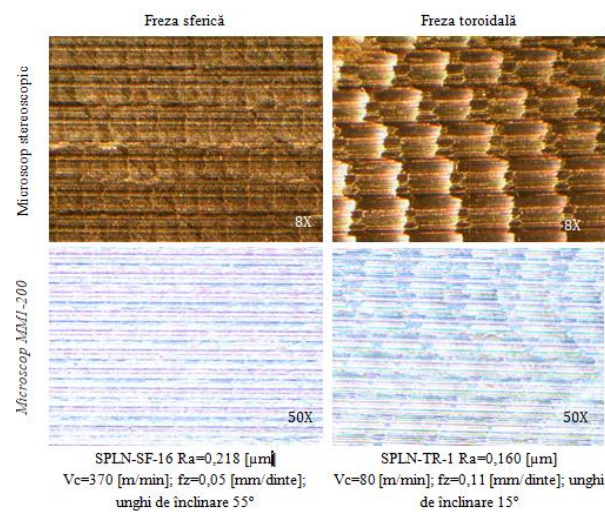


Fig. 5.22 Imagini microscopice a suprafețelor plane în cazul prelucrărilor cu cele două tipuri de freze

Suprafața sferică concavă, prezintă cea mai bună calitate a suprafeței obținută prin prelucrarea cu freza toroidală la unghiul de înclinare de 55° .

În cazul prelucrării suprafețelor la acest unghi, freza toroidală a dezvoltat o uzură mai mică decât freza sferică.

Figura 5.23 prezintă imagini microscopice obținute cu microscopul stereoscopic IOR și cu microscopul MM1-200 a celei mai bune suprafețe sferice concave prelucrată cu freza toroidală, (SFCV-TR) respectiv, cea mai bună suprafață sferică concavă prelucrată cu freza sferică (SFCV-SF).

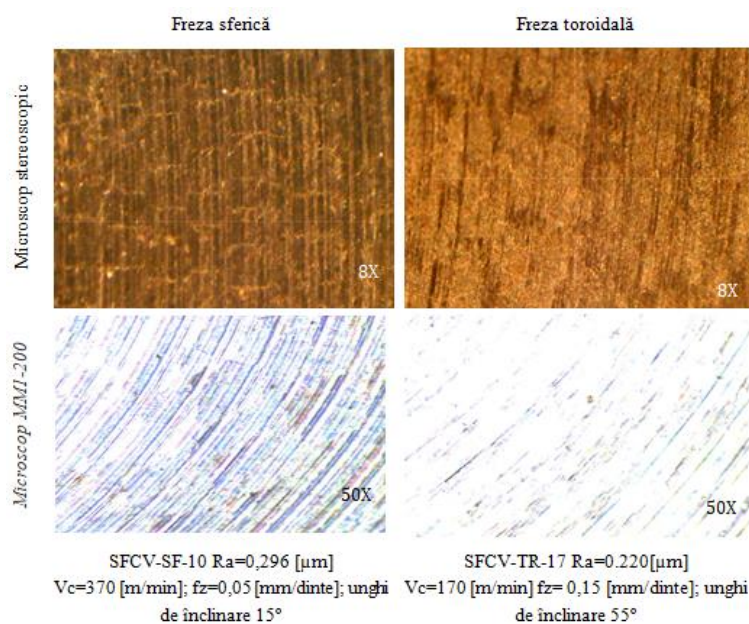


Fig. 5.23 Imagini microscopice a suprafețelor sferice concave în cazul prelucrărilor cu cele două tipuri de freze

Suprafața sferică convexă a constituit o provocare în generarea traseului optim al sculei, reprezentativ pentru mine a fost realizarea unei suprafețe sferice convexe atât cu freza sferică cât și cu freza toroidală.

Din punctul de vedere al calității suprafeței, freza toroidală are un ușor avantaj față de freza sferică, unghiul de înclinare fiind de 55° caz în care la acest unghi și uzura frezei toroidale este mai mică decât uzura frezei sferice.

Figura 5.24 ilustrează topografia microscopică obținută cu microscopul stereoscopic IOR și cu microscopul MM1-200 asupra suprafețelor sferice convexe cu cea mai bună rugozitate prelucrate atât cu freza sferică (SFCX-SF), cât și cu cea toroidală (SFCX-TR).

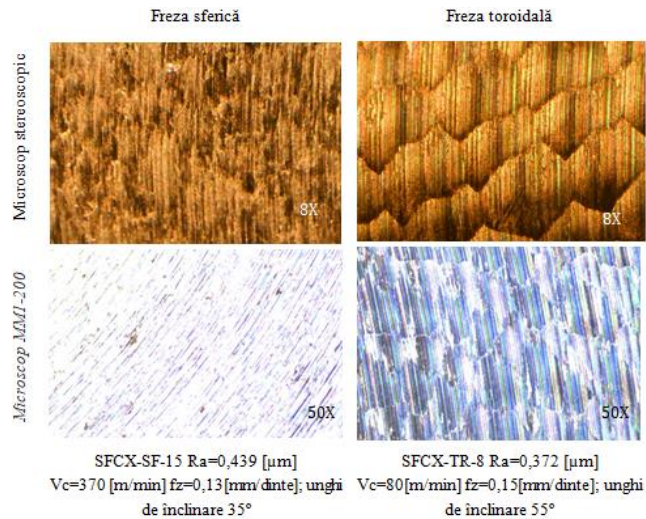


Fig. 5.24 Imagini microscopice a suprafețelor sferice convexe în cazul prelucrărilor cu cele două tipuri de freze

Suprafața cilindrică concavă, înregistrează cea mai bună rugozitate în urma prelucrării cu freza sferică. În acest caz freza sferică prelucrează suprafața la unghiul de înclinare de 15°.

În cazul acestui unghi, valoarea uzurii frezei sferice este ușor mai mare decât în cazul frezei toroidale.

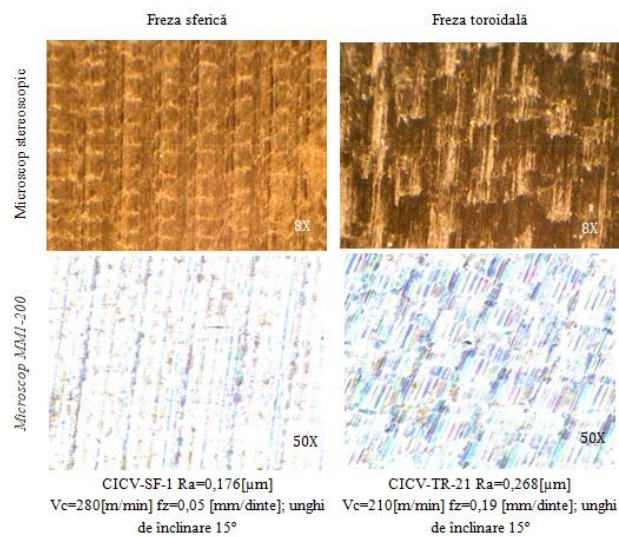


Fig. 5.25 Imagini microscopice a suprafețelor cilindrice concave în cazul prelucrărilor cu cele două tipuri de freze

Figura 5.25 prezintă imagini microscopice obținute cu microscopul stereoscopic IOR și cu microscopul MM1-200 a celor mai bune calități ale suprafețelor cilindrice concave prelucrate cu freza sferică (CICV-SF), cât și cu cea toroidală (CICV-TR).

Ultimul tip de suprafață asupra căruia s-a cercetat rugozitatea este suprafața cilindrică convexă.

În acest caz, cea mai bună calitate a suprafeței a fost obținută cu freza sferică, valorile fiind apropiate cu rugozitatea realizată cu freza toroidală.

Freza sferică a generat cea mai bună calitate a suprafeței la unghiul de înclinare al sculei de 15° , caz în care și valoarea uzuri este minimă, comparativ cu celelalte unghiuri, dar la același unghi, uzura frezei toroidale are un ușor avantaj fiind mai mică.

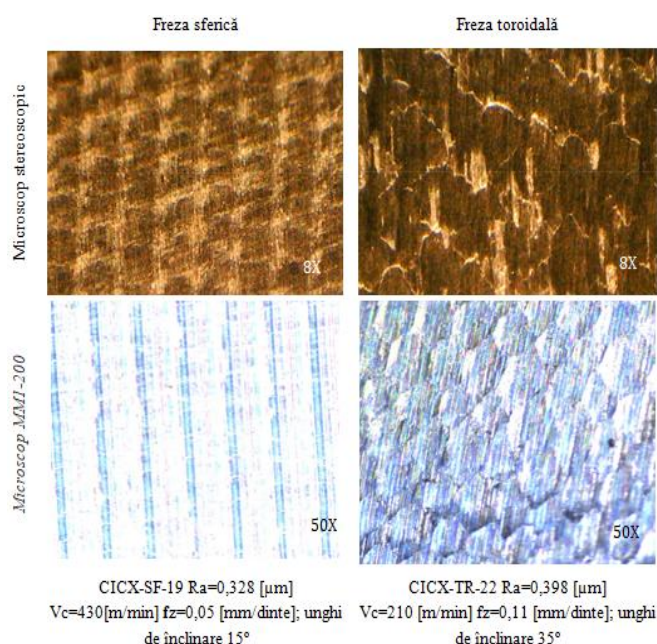


Fig.5.26 Imagini microscopice a suprafețelor cilindrice convexe în cazul prelucrărilor cu cele două tipuri de freze

În figura 5.26 se observă imagini microscopice obținute cu microscopul stereoscopic IOR și cu microscopul MM1-200 a celor mai bune calități ale suprafețelor cilindrice convexe realizate atât cu freza toroidală (CICX-TR), cât și cu freza sferică (CICX-SF).

Pentru a valorifica și a expune calitatea suprafețelor, în capitolul 6.5 se propune scanarea 3D a suprafeței, cu ajutorului unui scanner

Profilm 3D. Acest procedeu oferă un plus de încredere în ceea ce privește calitatea suprafețelor și corectitudinea cercetării.

5.5. Concluzii de capitol

Acest capitol subliniază măsurătorile efectuate asupra celor cinci tipuri de suprafețe. Planul de cercetare și modelare a datelor pornește de la efectuarea măsurătorilor, câte 3 măsurători pentru fiecare suprafață efectuate paralel pe direcția de avans și 3 măsurători pe fiecare suprafață efectuate perpendicular pe direcția de avans. Astfel, cu un număr de 270 de suprafețe, se însumează un număr de 1620 de măsurători, acestea fiind prezentate în anexe. Odată efectuate cele 1620 de măsurători, se urmărește realizarea mediei valorii rugozității asupra fiecărei suprafețe.

Asupra fiecărei suprafețe se urmărește valoarea rugozității R_a și valoarea rugozității R_t , atât paralel cât și perpendicular pe direcția de avans, pentru a determina calitatea suprafeței.

Centralizând datele măsurate și identificând condițiile optime de prelucrare a suprafețelor, astfel încât calitatea suprafeței să fie cât mai bună, rezultă pentru fiecare suprafață în parte cea mai bună variantă de prelucrare.

Pentru certificarea și confirmarea corectitudinii măsurătorilor asupra suprafețelor prelucrate, s-a realizat vizualizarea microscopică a suprafețelor și prezentarea imaginilor celor mai bune suprafețe.

Realizarea imaginilor microscopice asupra celor mai bune suprafețe prelucrate s-au făcut cu ajutorul microscopului MM1-200 și a microscopului stereoscopic IOR, aflate în dotarea facultății de Inginerie în cadrul Centrului Universitar Nord din Baia Mare.

Vizualizarea a fost realizată pe un lot de 5 epruvete prelucrate cu freza toroidală și 5 epruvete prelucrate cu freza sferică. Acestea au fost selectate în urma centralizării măsurătorilor de la începutul capitolului prezentând cele mai bune rugozități obținute la prelucrarea cu freze toroidale și sferice. Aceste centralizări au la bază valorile măsurătorilor prezentate în anexe.

Imaginile microscopice confirmă faptul că, în cazul suprafețelor plane, suprafețelor sferice convexe și suprafețelor sferice concave, prelucrarea cu freza toroidală a obținut cea mai bună suprafață, iar în cazul suprafețelor cilindrice convexe și cilindrice concave, prelucrarea cu freza sferică are un avantaj din punctul de vedere al rugozității.

6. MODELAREA ȘI OPTIMIZAREA PARAMETRILOR DE PROCES CU REȚEAUA NEURONALĂ ARTIFICIALĂ

În vederea prelucrării datelor experimentale și modelarea acestora, există pe piață o mare varietate de programe software capabile să genereze noi date. Pentru prelucrarea datelor obținute în cadrul experimentelor proprii, prezentate în această lucrare a fost folosit programul MatLab datorită maleabilității acestuia pe cerințele cercetării.

6.1. Stadiul teoretic privind rețelele neuronale artificiale

În ultimii ani, mai multe lucrări privind procesele de prelucrare s-au concentrat asupra utilizării rețelelor neuronale artificiale pentru modelarea rugozității suprafeței. Chiar și într-o astfel de nișă specifică a literaturii de specialitate, lucrările diferă considerabil în ceea ce privește modul în care definesc arhitecturile de rețea și validarea rezultatelor, precum și algoritmii lor de instruire, măsurile de eroare și altele asemenea. Mai mult, o examinare a lucrărilor individuale lasă un cercetător fără o viziune clară asupra a ceea ce este predicția calității suprafeței.

Competiția aprigă și o piață din ce în ce mai exigentă semnifică peisajul de producție de astăzi. Pentru a rămâne competitivi, precum afirmă și autorii Karpat și Özel [174], producătorii trebuie să-și crească productivitatea, menținând, dacă nu îmbunătățind, calitatea produselor. Atingerea acestui obiectiv este deosebit de provocator într-o industrie unde calitatea și productivitatea sunt în mod obișnuit obiective conflictuale. O industrie în care un astfel de conflict este o rutină, este prelucrarea modernă. În operațiunea de strunjire, de exemplu, Cus și Zuperl [175] notează că rata de producție, costul și calitatea produselor sunt trei obiective incompatibile. Mai mult, deoarece industria de prelucrare se confruntă cu introducerea de noi materiale și scule așchietoare, aceasta se află într-o evoluție rapidă, care generează procese și fenomene extrem de complexe și neliniare. Singh și Rao [176] subliniază că, executarea acestor procese constituie o provocare suplimentară pentru planificare și optimizare.

Un avantaj important în îndeplinirea acestei noi provocări este obținerea rapidă a informațiilor privind operațiile de prelucrare specifice. Atunci când rolul cheie în astfel de operații este economia, cunoașterea parametrilor optimi de prelucrare este vitală. Cercetătorii care doresc să adune asemenea cunoștințe au propus utilizarea modelelor de prelucrabilitate. Pentru Paiva și colab. [177], aceste modele pot fi utilizate ca funcții obiective în optimizare, simulare, control și planificare.

Un domeniu în care modelele de prelucrabilitate au fost cercetate pe larg este calitatea suprafeței. Datorită impactului său asupra performanței produsului [178], [179] calitatea suprafeței în prelucrare este o cerință esențială a beneficiarului. Basheer și colab. [180] afirmă că caracteristicile suprafețelor prelucrate influențează în mod semnificativ proprietățile fizice. Potrivit lui Sharma și colab. [181], aplicațiile noi în diverse domenii de producție precum industria aerospațială, automobile și matrițe au alimentat o creștere rapidă a cererii de produse cu finisaje de înaltă calitate.

Un indicator de calitate a suprafeței utilizat pe scară largă este rugozitatea suprafeței [182], [183]. Acesta joacă un rol critic, conform lui Öktem [184], în evaluarea și măsurarea calității unui produs prelucrat. Pentru Öktem, capacitatea unui produs de a rezista la solicitări, temperatură, frecare și coroziune este puternic afectată de rugozitatea acestuia. În plus, rugozitatea are un impact asupra proprietăților cum ar fi rezistența la uzură, reflexia luminii și acoperirea. Karayel [185] susține că dificultatea de a controla duritatea se datorează complexității intrinseci a fenomenelor care îi generează formarea. Din aceste motive, modelarea rugozității nu a devenit doar o necesitate care sfidează în mod special, ci o zonă de mare interes pentru cercetare.

Studiile aplicate modelării rugozității suprafeței au la dispoziție un număr semnificativ de opțiuni în ceea ce privește modelarea datelor. Din diferite motive, o singură opțiune a fost în mare măsură investigată în literatură, aceasta fiind reprezentată de utilizarea rețelelor neuronale artificiale (RNA). Rețeaua neuronală artificială este o paradigmă a inteligenței artificiale, asta susține El-Mounayri [186] și Coit [187] ca având posibilitatea să aibă multe proprietăți atractive pentru modelarea sistemelor complexe de producție. Acestea includ aproximarea funcției universale, rezistența la date incomplete sau lipsă, localizarea mai multor variabile neliniare cu interacțiuni necunoscute și capacitatea de generalizare bună. Ele sunt deosebit de utile, conform lui

Ezugwu [188] pentru cartografierea relațiilor complexe a căror reprezentare în termeni analitici ar fi altfel dificilă. Printre lucrările pe această temă, există strategii distincte utilizate pentru colectarea datelor, definiția modelului, montarea modelului și validarea rezultatelor obținute.

Rețeaua neuronală este un instrument de modelare extrem de flexibil, capabil să învețe cartografierea între parametrii de intrare și ieșire. O rețea neuronală artificială (RNA) este capabilă să învețe dintr-un set de date experimentale pentru a descrie mai eficient efectele neliniare și de interacțiune. Rețeaua constă dintr-un strat de intrare utilizat pentru a prezenta datele, stratul de ieșire pentru a produce răspunsul RNA și unul sau mai multe straturi ascunse între ele. Rețeaua se caracterizează prin topologia, vectorii de greutate și funcția de activare care sunt utilizate în straturile ascunse și de ieșire ale rețelei.

Metodele rețelelor numerice și neuronale artificiale (RNA) sunt utilizate pe scară largă atât pentru modelarea cât și pentru optimizarea performanțelor tehnologiilor de fabricație. Parametrii optimi de prelucrare sunt de mare preocupare în mediile de producție, unde economia operațiunii de prelucrare joacă un rol-cheie în competitivitatea pieței. Prin urmare, cercetările de față vizează găsirea parametrilor optimi de proces pentru procesul de frezare de finisare.

Rețelele neuronale artificiale (RNA) sunt inspirate de sistemele nervoase biologice-creierul, care constă dintr-un număr mare de elemente înrudite numite neuroni. Creierul stochează și procesează informațiile prin ajustarea modelelor de legare a neuronilor [189]. Într-un RNA acești neuroni sunt conectați împreună pentru a forma o rețea care imită un sistem nervos biologic. Putem să formăm o rețea neuronală pentru a îndeplini o anumită funcție prin ajustarea valorilor conexiunilor între neuroni. Rețelele neuronale sunt instruite, astfel încât o anumită intrare să conducă la o ieșire specifică țintă. În învățarea inteligenței artificiale, multe perechi de intrări și țintă sunt folosite pentru formarea unei rețele. Rețeaua este ajustată pe baza unei comparații dintre ieșire și țintă, până când rezultatul rețelei se potrivește cu destinația.

Potrivit lui Haykin [190], RNA sunt procesoare masive paralele distribuite, formate din unități de procesare simple sau neuroni. Acești neuroni au o tendință naturală de a stoca și de a pune la dispoziție cunoștințe experimentale. RNA dobândește cunoștințe dintr-un mediu printr-un proces de învățare. Ele creează o reprezentare a acestor cunoștințe sub formă de conexiuni interneuron, cunoscut sub numele

de conexiuni sinaptice. Transformarea rețelei neuronale poate fi văzută ca o formă non algoritmică de calcul; constituie una dintre ramurile principale ale domeniului de cercetare al mașinilor de învățare [190], [191].

Rețelele neuronale artificiale au rădăcinile lor în formele inițiale în inteligența artificială. McCulloch și Pitts [192] au subliniat primul model matematic al neuronului. Hebb [193] a introdus conceptul că învățarea este un proces de ajustare a conexiunilor sinaptice. Printre primele implementări practice au fost rețele simple, capabile să efectueze anumite operații logice și să clasifice modele simple-perceptronul [194] și adalina [195]. Aceste cercetări au introdus concepte importante precum trainingul de rețea și regula delta pentru minimizarea erorilor. Minsky și Papert [196] au demonstrat că perceptronii nu au fost capabili să rezolve problemele inseparabile din punct de vedere liniar, o limitare gravă care a limitat activitatea științifică în materie. Interesul în rețelele neuronale a fost reînviat de lucrările lui Hopfield [197] și Kohonen [198]. În 1986, limitările relevate de Minsky au fost depășite de un algoritm introdus de Rumelhart et al. [199] algoritmul de antrenament de propagare înapoi. De atunci, noi arhitecturi RNA și algoritmi de instruire au fost investigate profund, ducând la evoluții uriașe. În plus, rețelele neuronale au fost aplicate cu succes pentru a rezolva o gamă largă de probleme practice și complexe în mai multe domenii distincte. Acestea includ recunoașterea tiparelor, procesarea semnalelor, procesele industriale chimice și biomedicale și operațiunile de fabricație cum ar fi sudarea, turnarea, prelucrarea mecanică și multe altele.

Potrivit mai multor autori [186], [187], [190], [200], există două motivații principale pentru rezolvarea problemelor folosind RNA pentru a învăța prin exemplu și pentru a generaliza informațiile învățate.

Ce înseamnă "să înveți"? Este de a adapta parametrii rețelei neuronale prin instruirea stimulilor încorporați în mediul rețelei. "Generalizarea" este de a produce rezultate coerente de modele nevăzute în timpul învățării [190].

Există două paradigme principale ale învățării: supravegheate și nesupravegheate. Pentru fiecare dintre ele, se pot găsi algoritmi de formare distinctiv.

În învățarea supravegheată, o rețea prezintă un set de modele care conțin valori de intrare și ieșirile corespunzătoare așteptate; parametrii sunt ajustați pe baza unei cifre de eroare.

În schimb, rețelele de învățare nesupravegheate nu primesc valori de ieșire, ci doar date de intrare. Rețeaua, prin identificarea regularităților statistice ale datelor de intrare, formează reprezentări interne; acest proces dă drumul la caracteristicile de codare ale intrărilor care permit cartografierea ieșirilor [190]. Ca rezultat al învățării, o rețea neurală dobândește cunoștințe despre relațiile care stau la baza variabilelor independente și dependente ale unui proces.

Figura 6.1 ilustrează cea mai frecvent utilizată arhitectură RNA: o rețea perceptron multi-strat (MLP).

RNA are trei tipuri de straturi: straturile de intrare, ieșire și straturile ascunse. Fiecare neuron de pe stratul de intrare este atribuit unui atribut în date și produce o ieșire care este egală cu valoarea scalată a atributului corespunzător. Straturile ascunse, de obicei cu unu sau doi, sunt intermediare între straturile de intrare și ieșire. Neuronii de pe stratul ascuns execută produsul scalar al vectorului de intrare al neuronului prin vectorul greutateților asociate intrărilor sale. Rezultatul produsului scalar este comparat cu o limită de prag. În cazul în care limita este depășită, produsul scalar este utilizat ca variabilă independentă la o funcție de activare a cărei ieșire va fi ieșirea neuronului.

Funcțiile sigmoideale sunt utilizate în mare măsură ca funcții de activare, deși funcțiile Gaussian și hiperbolice liniare sunt, de asemenea, utilizate.

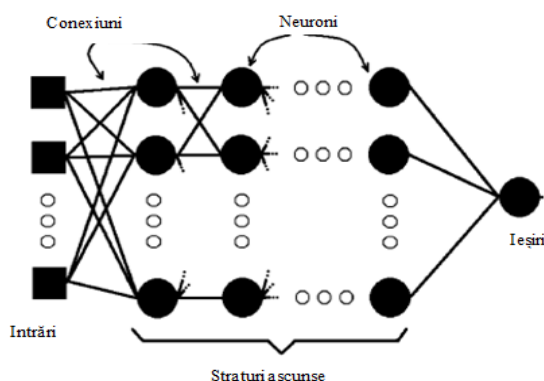


Fig. 6.1. Structura unei rețele neuronale [190]

Stratul de ieșire însumează vectorul rezultat din stratul ascuns, asigurând astfel rezultatele totale ale rețelei. Fiecare strat constă din neuroni, cei din straturile adiacente fiind complet conectați cu greutatețile respective, în timp ce cele din același strat nu sunt.

Ecuatia 6.1 descrie un tip de funcție de activare găsită frecvent în literatură.

$$f(z) = \frac{2}{(1+e^{-z})} - 1 \quad (6.1)$$

Pentru fiecare neuron din stratul ascuns sau de ieșire, transformarea intrări-ieșiri folosite este definită ca în Ec. 6.2:

$$v = F\left(\sum_{h=1}^H w_h u_h + w_0\right) \quad (6.2)$$

unde: v este rezultatul neuronului;

H - numărul total de neuroni din stratul anterior;

u_h - ieșirea neuronului h în stratul anterior;

w_h - conexiunea corespunzătoare;

w_0 - e părtinirea (sau interceptul);

F - funcția de activare neliniară.

Neuronii de pe stratul de ieșire efectuează o sumă ponderată asupra rezultatelor stratului ascuns pentru a genera ieșiri de rețea.

Utilizarea RNA în aplicațiile de prelucrare, conform Sick [201], poate fi grupată în abordări on-line și off-line. Abordările online, pentru a colecta date de modelare, se potrivesc cu dispozitivele de detectare a mașinii.

Potențialul RNA pentru utilizarea în procesele de prelucrare a fost perceput în anii 1990. Pentru a anticipa uzura sculei în cazul prelucrării fontei gri cu scule așchietoare din ceramică, Ezugwu [202] au folosit rezultate din experimente care implică viteză de așchiere distinctă și valori de avans. Chao și Hwang [203] au efectuat un studiu similar. Lucrările timpurii privind modelarea rugozității suprafeței pot fi găsite în Chien și Chou [204] unde, în procesul de strunjire a unui oțel inoxidabil, rețelele prevăd rugozitatea suprafeței, forța de așchiere și uzura sculei. Tsai și Wang [205] au comparat structuri RNA distincte pentru predicția rugozității suprafeței la prelucrarea prin electroeroziune (EDM). Folosind datele obținute din experimente efectuate pe o mașină de frezat cu comandă numerică și planificate conform tehnicilor DOE (Design of Experiments), Benardos și Vosniakos [206] au instruit o rețea neuronală pentru a prezice rugozitatea suprafeței.

Noțiunea de a folosi RNA în procesele de prelucrare a dat naștere unui număr considerabil de lucrări. În multe dintre ele, cercetătorii susțin utilizarea lor. Davim și colab. [207] susțin că rețelele

neuronale sunt capabile să surprindă caracteristica neliniarității în procesul de strunjire. Karpas și Özel [174] vorbesc despre dificultatea de a genera, în strunjire, modele analitice explicite ale relației complexe dintre parametri implicați. Rețelele neuronale, conform autorilor, susțin o opțiune adecvată și practică de modelare. Rezultatele obținute de Özel și colab. [208] arată că modelele de rețele neuronale sunt capabile să prezică, pentru o gamă de procese de prelucrare, uzura sculelor și modelele de rugozitate ale suprafeței. În plus, pentru strunjire, ele pot fi utilizate în planificarea inteligentă a proceselor. Oktem și colab. [184], utilizând datele obținute experimental, au cercetat în conformitate cu algoritmul de propagare înapoi studii pentru predicția rugozității. Autorii au raportat că rezultatele au fost excelente.

Mai multe exemple pot fi găsite în lucrările lui Assarzadeh și Ghoreishi [209], menite să optimizeze rugozitatea suprafeței utilizând rețele neuronale. Autorii au declarat eficacitatea utilizării RNA pentru predicția ratei de eliminare a materialelor și R_a . În Hossain și colab. [210], un model RNA a fost dezvoltat pentru investigarea și predicția relației dintre parametri de frezare și rugozitatea suprafeței în timpul frezării de mare viteză a aliajului Inconel 718. A fost observată o performanță foarte bună de predicție a rețelei neuronale. Alte abordări includ lucrarea lui Panda și Mahapatra [211] în care componentele principale au fost utilizate pentru modelarea uzurii burghiului. Principalele componente ale parametrilor de găurire au fost calculate și rețelele au fost instruite pentru a le prezice. Rețelele au putut clasifica uzura redusă și uzura ridicată cu o precizie de 90% și pentru a prezice uzura tășului principal cu o eroare de $\pm 6,5\%$.

Utilizarea RNA în controlul online al operațiilor de prelucrare este subiectul dezbătut în Gao et al. [212] în cazul în care acestea sunt aplicate pentru a trasa relațiile dintre condiția instrumentului și caracteristicile extrase din semnale distincte ale senzorului prin utilizarea datelor experimentale. Huang și colab. [213] au aplicat RNA pentru controlul adaptivității rugozității suprafeței la operațiile de frezare. Pentru acești autori, tehnicile off-line, manualul pentru a evalua rugozitatea suprafeței și calitatea pieselor sunt costisitoare și consumatoare de timp, ceea ce favorizează utilizarea rețelelor neuronale. Aceeași concluzie poate fi găsită în Nalbant și colab. [79] care susțin că RNA sunt o bună alternativă la modelarea empirică convențională bazată pe regresii liniare pentru modelarea rugozității suprafeței.

Cu toate acestea, trebuie precizat că nu există un consens în ceea ce privește experiența cu rețele neuronale pentru modelarea rugozității suprafeței. Autori precum Dhokia și colab. [214] indică lipsa unor metode sistematice de proiectare a rețelelor neuronale ca dezavantaj. Pentru Cervellera și colab. [215] și pentru Karnik și colab. [216], găsirea unei bune arhitecturi RNA necesită mai multe încercări de modelare, ceea ce face o activitate consumatoare de timp. Ambrogio și colab. [179] atestă necesitatea unor cantități mari de date pentru instruire și validare; o astfel de necesitate limitează aplicarea practică a rețelelor neuronale în procesele de prelucrare. Mai este nevoie de eforturi computaționale, conform lui Bagci și Işik [217], pentru a construi un model de rețea neurală artificială în comparație cu alte metode.

De fapt, proiectarea eficientă a RNA este o problemă de sfidare chiar și în domeniul neurocomputării, așa cum se arată în Zanchettin et al. [218]. Autorii au propus o schemă bazată pe DOE pentru identificarea celui mai influent factor asupra performanței unui sistem de inferențe neuro-fuzzy. Exemple de încercări de optimizare pot fi găsite în lucrarea lui Mohana și colab. [219] care vizează modelarea rugozității suprafeței folosind rețele neuronale. Algoritmi genetici au fost folosiți în cercetarea lor pentru a optimiza factorii de greutate ai rețelei. Ortiz-Rodrigues și colab. [220] au propus utilizarea metodelor Taguchi (tehnica DOE) pentru proiectarea robustă a RNA antrenate prin algoritmul de propagare înapoi și dezvoltă o strategie sistematică și experimentală care subliniază optimizarea simultană a parametrilor rețelei neuronale artificiale în diferite condiții. O analiză a literaturii arată că majoritatea studiilor urmează pași obișnuiți cum ar fi delimitarea problemelor, definirea unei strategii experimentale, colectarea datelor, alegerea unei arhitecturi de rețea și a topologiei, configurarea rețelei prin instruire, analiza datelor, selectarea rețelei și unele validări ale rezultatelor.

De fapt, rezultatul obținut atunci când RNA este folosită pentru a modela rugozitatea suprafeței este un model semi parametric [221], adică un model în care rugozitatea este reprezentată nu numai în termeni de prelucrare, ci și în ceea ce privește arhitectura rețelei selectată, configurația rețelei de parametrii (cum ar fi numărul straturilor ascunse, numărul de neuroni și funcțiile de activare utilizate) și strategia de formare adoptată. Ca și în cazul oricărui alt tip de model, este necesar ca un model RNA să aibă o precizie bine determinată și niveluri de încredere asociate. Aceste caracteristici sunt esențiale pentru asigurarea calității modelului și pentru acceptarea modelului în

mediile de producție. Pentru a obține astfel de caracteristici dorite, trebuie să se țină seama de unele bune practici în timpul activităților de elaborare și validare a modelului.

Tasdemir și colab. [222] au aplicat RNA pentru a prezice rugozitatea suprafeței în procesul de strunjire. Această metodă s-a dovedit a fi destul de eficientă și utilizează mai puține date de instruire și testare.

Hazim et.al [223] au dezvoltat un model de rugozitate a suprafeței la sfârșitul frezării prin utilizarea tehnologiei Swarm Intelligence. Din studii, datele au fost colectate de la experimentele de frezare CNC utilizând abordarea Design of Experiments. Datele de intrare constau în avans și adâncime de frezare, în timp ce ieșirea din model este rugozitatea suprafeței. Modelul este validat printr-o comparație a valorilor experimentale cu omologii lor anticipați. Rețeaua neurală artificială este un sistem adaptabil care poate învăța relații prin obținerea repetată a datelor și este capabilă să generalizeze date noi, nevăzute anterior. Unele rețele sunt supravegheate, prin faptul că un om determină ce ar trebui să învețe rețeaua din date.

Pentru acest studiu, rețeaua are la dispoziție un set de intrări și ieșiri dorite, iar rețeaua încearcă să învețe relația intrare-ieșire prin adaptarea parametrilor săi liberi.

Funcția de activare $f(x)$ utilizată este funcția sigmoidă dată de:

$$f(x) = \frac{1}{q + \exp(-x)} \quad (6.3)$$

Între stratul de intrare și cel ascuns:

$$x = \sum_{i=1}^m \omega_{ji} u_i \theta_j \quad j=1..n \quad (6.4)$$

și între stratul ascuns și stratul de ieșire:

$$x = \sum_{i=1}^m \omega_{kj} u_j \theta_k \quad k=1..i \quad (6.5)$$

unde:

- m este numărul de noduri de intrare;
- n - numărul de noduri ascunse;
- i - numărul de noduri de ieșire;
- u - valorile nodului de intrare;
- v - valori ascunse ale nodurilor;
- ω - greutatea sinaptică;
- θ - pragul.

În rețeaua neuronală de propagare înapoi, algoritmul de învățare are două faze. Mai întâi, la stratul de intrare al rețelei este prezentat un model de introducere a instruirii. Rețeaua apoi propagă modelul de intrare de la strat la strat până când modelul de ieșire este generat de stratul de ieșire.

Ca și în cazul oricărei alte rețele neuronale, o propagare înapoi este determinată de conexiunile dintre neuron (arhitectura rețelei), funcția de activare utilizată de neuroni și algoritmul de învățare (sau legea învățării) care specifică procedurile de ajustare a greutatei.

De obicei, o rețea de propagare înapoi este o rețea multistratificată care are trei sau patru straturi. Straturile sunt conectate complet, adică fiecare neuron din fiecare strat este conectat la fiecare alt neuron din stratul adiacent anterior. Figura 6.2 oferă modelul de calcul al rețelei neuronale. Codificarea modelului de calcul computerizat al rețelei neuronale este construită folosind software-ul MatLab 2008.

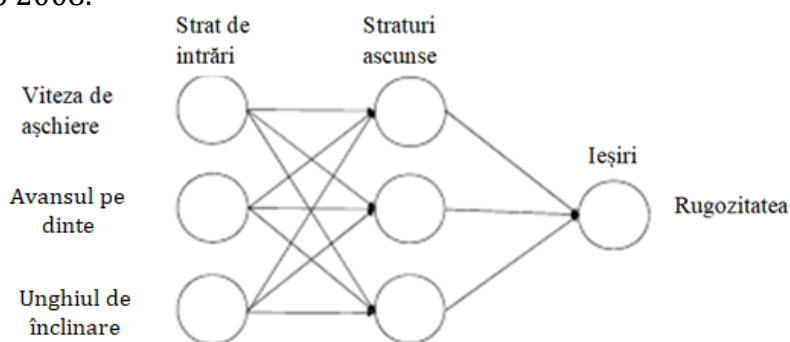


Fig. 6.2 Modelul calculului rețelei neuronale

În ultimii ani, rețelele neuronale artificiale (RNA) s-au dovedit a fi unele dintre cele mai puternice procedee de modelare a datelor și sunt utilizate cu succes în diferite domenii de inginerie pentru modelarea relațiilor complexe dificil de descris cu modele fizice.

Rețelele neuronale artificiale au fost aplicate pe scară largă în modelarea multor operațiuni de așchiere, cum ar fi strunjirea, găurirea și frezarea [78]. Mai mulți cercetători au folosit rețelele neuronale artificiale pentru a prezice influența parametrilor de așchiere asupra ratei de producție, a costului de producție [175] sau pentru a prezice influența parametrilor de așchiere asupra rugozității suprafeței [79], [80], [81], [82], uzura sculei [87], [88] sau forța de așchiere [78], [89].

Parametrii de așchiere sunt cei mai importanți factori care influențează planurile de proces. Selecția optimă a parametrilor de

așchiere conduce la o reducere a acțiunilor de așchiere și reducerea consumului de energie și, prin urmare, reducerea costurilor. Acest studiu propune realizarea predicției parametrilor de așchiere folosind rețelele neuronale artificiale (RNA).

Rețelele neuronale sunt un instrument foarte popular și s-au dovedit a fi foarte bune pentru rezolvarea problemelor de optimizare, pentru controlul adaptiv al mașinilor-unelte sau pentru recunoașterea modelului.

6.2. Implementarea unei rețele neuronale artificiale

Principala caracteristică a rețelelor neuronale este că acestea sunt capabile să găsească regulă care conectează parametrii de ieșire și de intrare, în timpul procesului de antrenament. Atunci când rețeaua neuronală este instruită, ea funcționează și în situații cu care nu s-a confruntat în timpul procesului de instruire [224], [225].

Numărul de neuroni din stratul de intrare este definit de numărul de parametri de intrare; stratul de intrare include trei neuroni. Numărul de neuroni din stratul de ieșire este același cu numărul de parametri de ieșire.

Programul MatLab dispune de o colecție de funcții și interfețe grafice, destinate lucrului cu Rețele Neuronale Artificiale, grupate sub numele de Neural Network Toolbox. În cele ce urmează, se va descrie modul de lucru cu funcțiile de bază și cu interfețele grafice.

RNA este compusă din elemente simple, care operează în paralel. Cunoștințele unei RNA sunt stocate sub formă de valori numerice asociate conexiunilor dintre neuroni, denumite ponderi.

Antrenarea sau instruirea unei RNA înseamnă modificarea/ajustarea valorilor ponderilor. Cel mai des, RNA este antrenată, astfel încât pentru o intrare dată, să returneze la ieșire o valoare cât mai apropiată de ieșirea dorită. Pentru antrenare, este necesar un set de date de antrenare (perechi intrare - ieșire).

Cele trei tipuri de probleme care se pot rezolva cu rețele neuronale sunt:

- Aproximare de funcții (function fitting);
- Clasificare (clustering);
- Optimizare (optimization).

6.2.1. Crearea unei rețele neuronale artificiale folosind MatLab

MatLab® (MATrix LABoratory) este un pachet de programe de înaltă performanță, interactiv, destinat calculului matematic, științific și ingineresc. MatLab integrează calcul, programare și vizualizare, într-un mediu de lucru prietenos, soluționarea problemelor presupunând folosirea notațiilor matematice clasice. Utilizarea programului MatLab include:

- Matematică și calcul numeric;
- Programare și dezvoltare de algoritmi;
- Modelare și simulare;
- Analiză de date, exploatarea rezultatelor și vizualizare;
- Grafică științifică și inginerescă;
- Dezvoltare de aplicații software, incluzând construcție de interfețe grafice cu utilizatorul (GUI).

Cu instrumente și funcții pentru gestionarea seturilor de date mari, MatLab oferă diferite tipuri de instrumente specializate cu învățarea automată, rețelele neuronale, învățarea profundă, viziunea computerului și conducerea automată.

Cu doar câteva linii de cod, MatLab permite dezvoltarea de rețele neuronale fără a fi expert. Cu MatLab, se pot integra rezultatele în diferite aplicațiile existente. MatLab automatizează implementarea modelelor de rețea neurală pe sisteme de întreprindere și dispozitive încorporate.

MatLab și Deep Learning Toolbox oferă funcții și aplicații din linia de comandă pentru crearea, antrenarea și simularea rețelelor neuronale artificiale. Aplicațiile facilitează dezvoltarea rețelelor neuronale pentru sarcini precum clasificare, regresie (inclusiv regresia seriei de timp) și grupare.

Îmbunătățirea capacității de generalizare a rețelei ajută la prevenirea suprasolicitării, o problemă comună în proiectarea rețelei neuronale. Suprasolicitarea apare atunci când o rețea a memorat setul de antrenament, dar nu a învățat să se generalizeze la noi intrări. Suprasolicitarea produce o eroare relativ mică pe setul de antrenament, dar o eroare mult mai mare atunci când sunt obținute date noi în rețeaua neuronală.

Folosind Deep Learning Toolbox cu MatLab Coder, GPU Coder și MatLab Compiler, se pot implementa rețele instruite în sisteme încorporate sau se pot integra într-o gamă largă de medii de producție.

Utilizând MatLab Coder pentru a genera cod C și C ++ pentru rețeaua neuronală instruită, va permite simularea unei rețele instruite pe hardware-ul PC și apoi implementarea rețelei în sisteme încorporate.

6.2.2. Aproximare de funcții cu rețeaua neuronală artificială

Aproximarea funcțiilor cu RNA se poate rezolva în MatLab:

- Din linia de comandă, folosind funcții specifice Neural Network Toolbox;
- Folosind interfețele grafice Neural Network Fitting Tool (nftool).

Înainte de a începe crearea unei rețele neuronale artificiale, este necesar crearea datelor de intrare și a datelor de ieșire. Aici intervin resursele informatice dezbătute în capitolele anterioare.

	1	2	3
1	80	15	0.1100
2	80	15	0.1500
3	80	15	0.1900
4	80	35	0.1100
5	80	35	0.1500
6	80	35	0.1900
7	80	55	0.1100
8	80	55	0.1500
9	80	55	0.1900
10	170	15	0.1100
11	170	15	0.1500
12	170	15	0.1900
13	170	35	0.1100
14	170	35	0.1500
15	170	35	0.1900
16	170	55	0.1100
17	170	55	0.1500
18	170	55	0.1900
19	210	15	0.1100
20	210	15	0.1500
21	210	15	0.1900
22	210	35	0.1100
23	210	35	0.1500
24	210	35	0.1900
25	210	55	0.1100
26	210	55	0.1500
27	210	55	0.1900

	1	2	3	4
1	0.1600	0.4640	0.9260	2.9200
2	0.2890	0.4030	1.6800	2.5930
3	0.2640	0.3760	1.7060	2.4000
4	0.1940	0.4940	1.4660	2.6130
5	0.3110	0.4350	2.4130	3.4990
6	0.2880	0.4250	2.7190	2.9530
7	0.4500	0.6880	2.6090	4.2730
8	0.7270	0.6320	4.4130	4.3530
9	0.8940	0.7610	4.6390	5.8400
10	0.6890	0.6720	3.4860	4.5190
11	0.8170	0.7560	4.6460	5.4060
12	0.8760	0.8510	5.0940	6.0860
13	0.5970	0.7860	3.2470	5.5790
14	0.6930	0.8050	3.9060	4.8260
15	1.0710	1.1190	5.7600	7.6660
16	0.4570	0.5350	3.2730	3.6190
17	0.7730	0.6270	4.3060	5.1060
18	1.1310	0.8120	6.1030	6.2930
19	0.5300	0.5490	3.7860	4.0530
20	0.8590	0.7570	4.8330	4.7590
21	0.8930	0.8690	4.7990	6.3260
22	0.5680	0.5430	3.8990	4.1460
23	0.5980	0.5730	3.7530	4.4960
24	0.5130	0.6180	2.9660	4.5860
25	0.4020	0.4450	3.5520	3.7000
26	0.4020	0.4750	2.9930	3.8530
27	0.4230	0.5960	3.1860	4.5600

Fig.6.3 Imagini cu datele de intrate respectiv cu datele țintă ale rețelei neuronale

Pentru a crea datele de intrare și datele de ieșire, am dezbătut calitatea suprafețelor plane obținute cu freza toroidală. Astfel, datele de intrare sunt cele trei variabile de proces. Acestea sunt viteza de așchiere, avansul pe dinte și unghiul de înclinare. În ceea ce privește datele de ieșire, informațiile țintă, acestea sunt reprezentate de către valorile medii ale R_a , măsurate paralel și perpendicular cât și de valorile medii ale R_t , măsurate paralel și perpendicular. Așadar, datele de intrare și datele de ieșire sunt prezentate în figura 6.3.

Pentru aproximarea funcțiilor cu rețele neuronale artificiale, folosind interfețele grafice, se va deschide interfața Neural Network Fitting Tool cu comanda „nftool”.

Acest tip de rețea neuronală este capabilă să asocieze un set de date de intrare cu un set de date țintă pentru estimarea anumitor valori. Această aplicație are funcția de a ajuta la selectarea datelor, la a crea și antrena o rețea neuronală, precum și pentru a evalua performanțele.

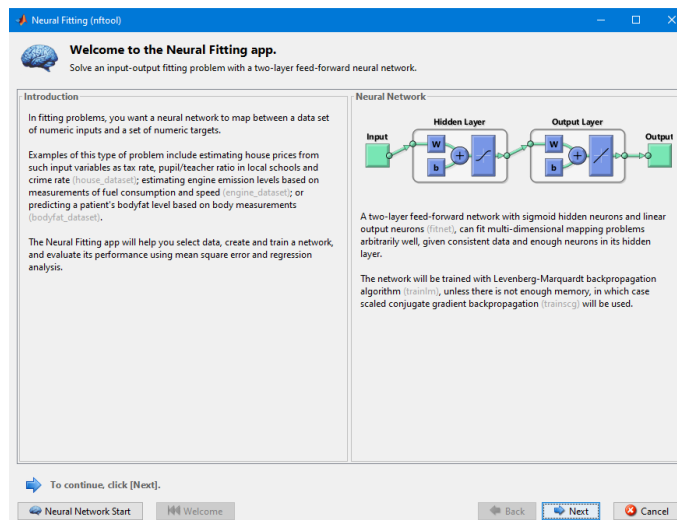


Fig.6.4 Neural Fitting Tool

Aceasta deține o rețea de alimentare cu două straturi de neuroni ascunși fiind instruită cu un algoritm de propagare înapoi așa cum este ilustrat în figura 6.4.

Următoarea etapă în crearea unei rețele neuronale este încărcarea datelor de intrare și celor țintă, precum și selectarea tipului de matrice, precum este prevăzut în figura 6.5.

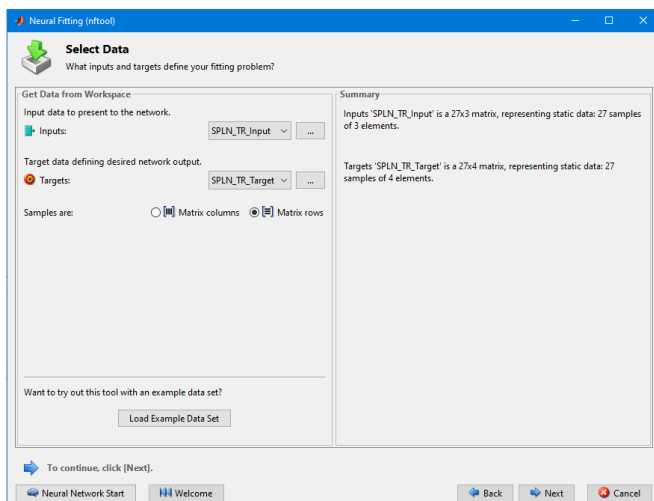


Fig.6.5 Selectarea datelor de intrare și a celor țintă pentru crearea RNA

Următoarea etapă este ilustrată în figura 6.6 și reprezintă stabilirea datelor atribuite antrenării rețelei neuronale, dar și stabilirea numărului de valori atribuite funcției de validare și testare a rețelei. În cazul de față am ales ca pentru funcția de antrenare să fie utilizate 25 de valori urmând ca pentru validare și testare să rămână câte una singura.

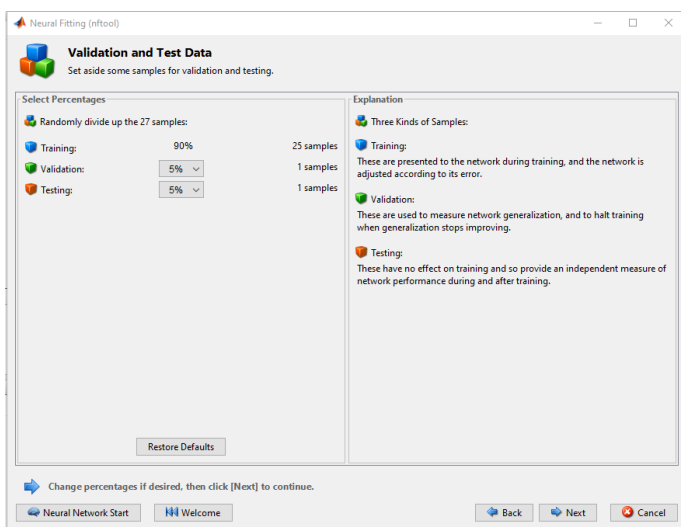


Fig.6.6 Selectarea procentelor atribuite antrenării, validării și testării rețelei neuronale

În ceea ce privește arhitectura rețelei, aici se definesc numărul de neuroni ascunși ai rețelei neuronale, în cazul nostru am decis

utilizarea a 20 de neuroni pentru ca rețeaua să funcționeze în condiții cât mai optime, precum este prezentat în figura 6.7.

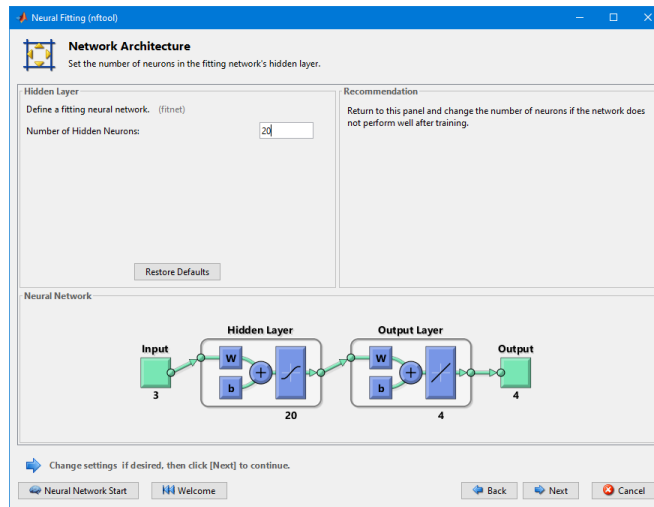


Fig.6.7 Arhitectura rețelei neuronale

Odată stabilite datele de intrare, procentajul de antrenare, validare, testare, precum și numărul de neuroni ascunși nu rămâne decât să-i transmitem rețelei să învețe algoritmul de lucru, precum în figura 6.8. În urma instruirii rețelei neuronale, aceasta transmite o serie de indici, aceștia sunt prezentați în figura 6.9.

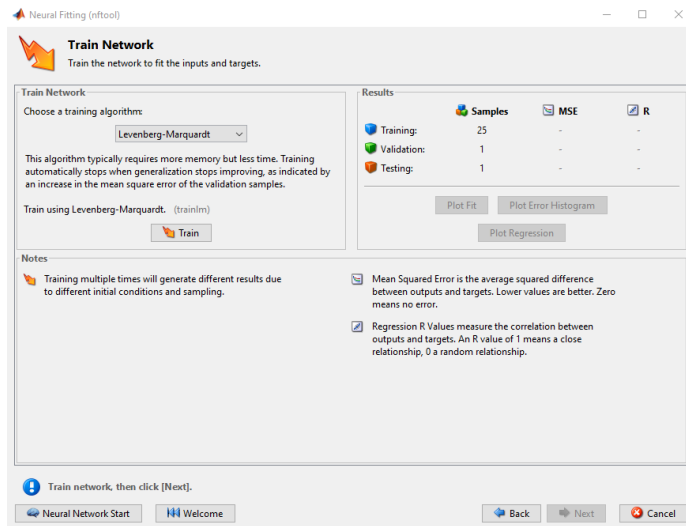


Fig.6.8 Modul de instruire a rețelei neuronale

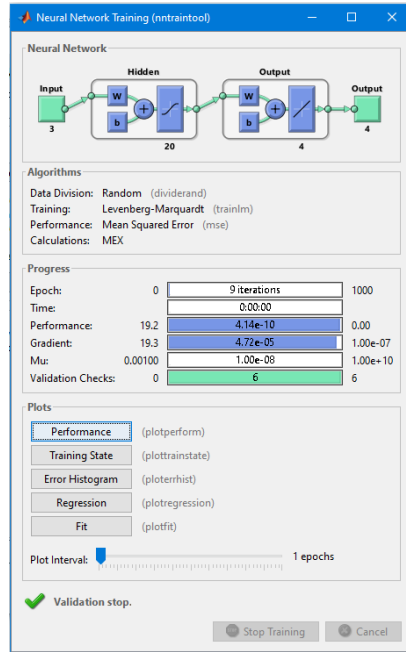


Fig.6.9 Instruirea rețelei neuronale

În urma instruirii rețelei, aceasta oferă anumite informații despre rețea, una dintre informații este susținută de către numărul de interacțiuni avute în cadrul rețelei, în cazul de față fiind vorba despre 9 interacțiuni sau 9 perioade așa cum este ilustrat în figura 6.10.

În ceea ce privește performanța rețelei, cea mai bună performanță a fost înregistrată în timpul interacțiunii numărul 3.

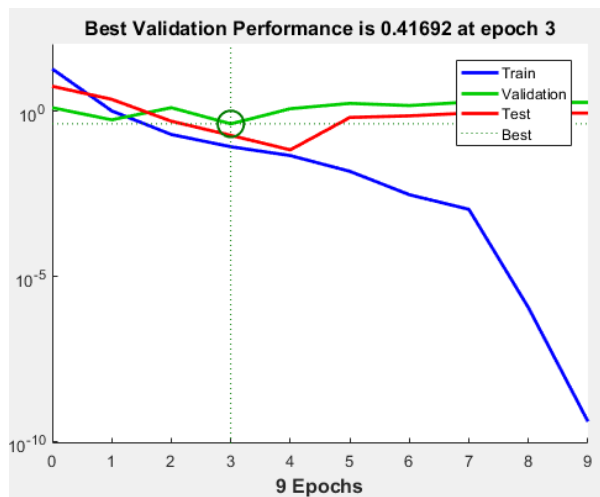


Fig.6.10 Performanța rețelei neuronale

Condițiile de instruire ale rețelei neuronale sunt dependente de valoarea gradientului, ce este un câmp vectorial ai cărui vectori sunt îndreptați în direcția celei mai mari rate de creștere a câmpului scalar. Astfel, modul este cea mai mare rată de schimbare, valoarea maximă fiind efectuată în cazul interacțiunii numărul 9. Verificările de validare au fost 6, tot la interacțiunea 9, fiind prezentat în figura 6.11.

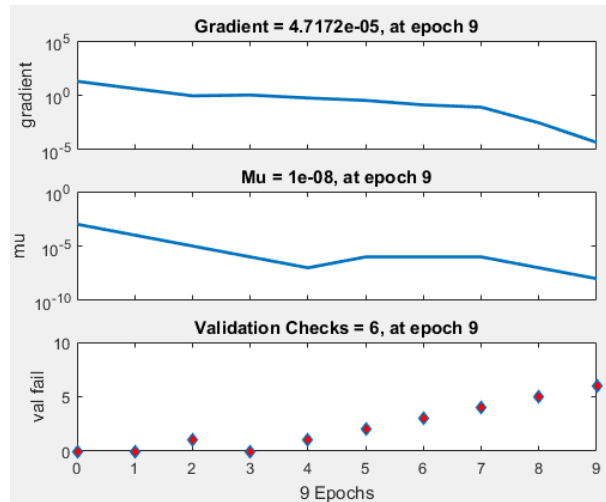


Fig.6.11 Condițiile de instruire

Orice sistem deține și o serie de erori, în cazul rețelei neuronale creată, aceasta are cel mai întâlnit tip de eroare de 0,01469, precum este reprezentat în figura 6.12.

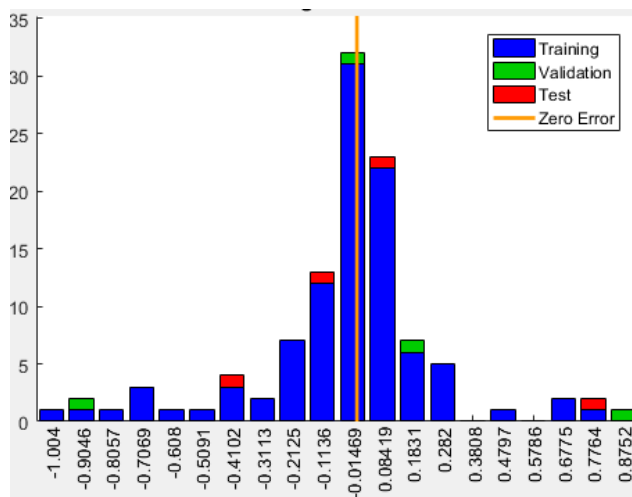


Fig.6.12 Histograma erorilor

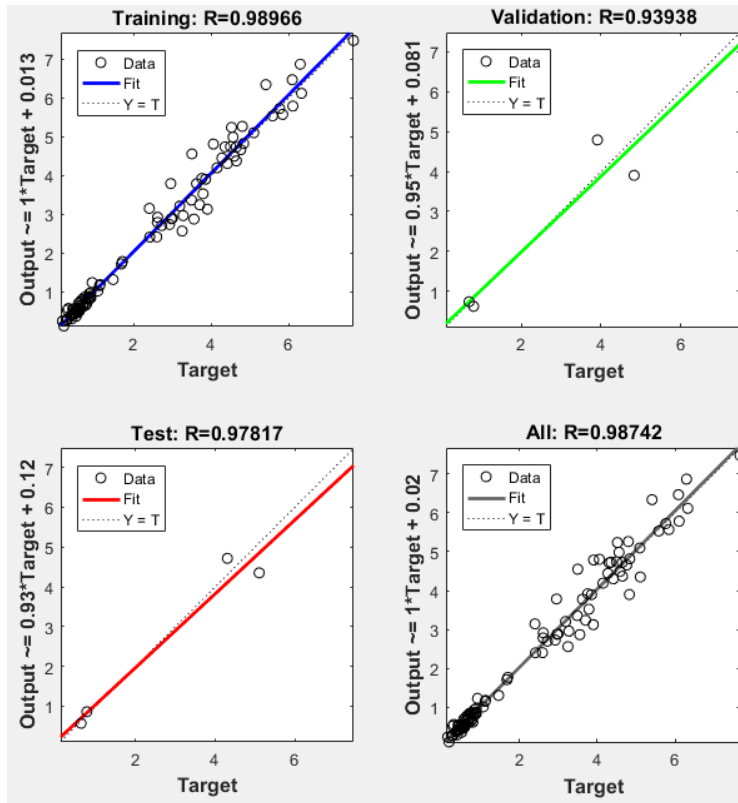


Fig.6.13 Regresia liniară a rețelei neuronale

În ceea ce privește regresia liniară, în cazul rețelei neuronale artificiale studiată și creată asupra calității suprafeței, aceasta este ilustrată în figura 6.13, atât din punctul de vedere al antrenării cât și al validării și testării rețelei.

Pentru implementarea soluțiilor în subcapitolul următor este prezentată funcția MatLab ca suport de matrice. Diagrama rețelei neuronale este compusă din 3 neuroni de intrare, 20 de neuroni ascunși și 4 neuroni de ieșire, precum în figura 6.14.

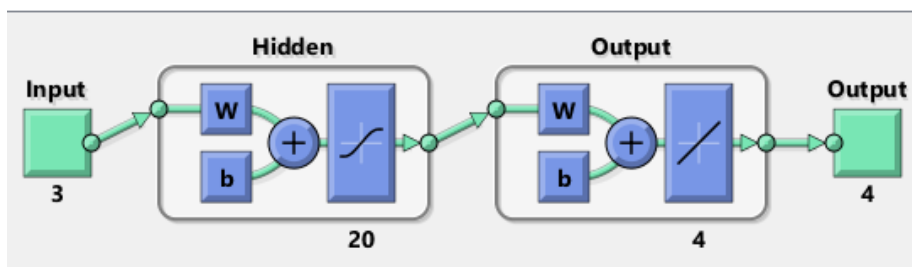


Fig.6.14 Diagrama rețelei neuronale

Odată finalizat tot procesul de creare și instruire al rețelei neuronale, nu rămâne decât punerea față în față a datelor țintă cu ieșirile pe care le oferă rețeaua.

În capitolul următor sunt evidențiate datele măsurate ale rugozității, având ca date de intrare cele trei variabile, iar în comparație sunt valorile approximate obținute în urma instruirii rețelei neuronale, având atașată și o coloană cu erorile rețelei.

6.3. Compararea aproximărilor

Potrivit capitolului anterior, unde s-a creat și instruit o rețea neuronală cu ajutorul softului MatLab, această rețea este capabilă să aproximeze valorile de ieșire bazate pe valorile de intrare. După cum s-a stabilit, rețeaua a fost creată asupra suprafeței plane prelucrate cu freza toroidală pentru a aproxima valorile rugozității. Ca date de intrare, neuronii de intrare sunt cele trei variabile, viteza de așchiere, avansul pe dinte și unghiul de înclinare al axei sculei. Valorile țintă, neuroni de ieșire sunt reprezentați de către valorile măsurate atât paralel cât și perpendicular ale rugozității R_a și R_t , așadar există 4 neuroni de ieșire.

Tab.6.1 Valorile approximate ale RNA pentru calitatea R_a a suprafeței plane prelucrate cu freza toroidală

Tipul suprafeței	Rugozitatea R_a [μm]				Eroarea de aproximare R_a paralel	Eroarea de aproximare R_a perpendicular
	Valori reale		Valori approximate de RNA			
	Direcția de măsurare în raport cu direcția avansului					
	Paralel	Perpendicular	Paralel	Perpendicular		
SPLN -TR-1	0,160	0,464	0,241	0,426	-0,081	0,038
SPLN -TR-2	0,289	0,403	0,270	0,397	0,019	0,006
SPLN -TR-3	0,264	0,376	0,279	0,372	-0,015	0,004
SPLN -TR-4	0,194	0,494	0,116	0,505	0,078	-0,011
SPLN -TR-5	0,311	0,435	0,566	0,517	-0,255	-0,082
SPLN -TR-6	0,288	0,425	0,525	0,552	-0,237	-0,127
SPLN -TR-7	0,450	0,688	0,462	0,684	-0,012	0,004
SPLN -TR-8	0,727	0,632	0,857	0,578	-0,130	0,054
SPLN -TR-9	0,894	0,761	0,975	0,651	-0,081	0,110

SPLN -TR-10	0,689	0,672	0,610	0,802	0,079	-0,130
SPLN -TR-11	0,817	0,756	0,822	0,811	-0,005	-0,055
SPLN -TR-12	0,876	0,851	0,884	0,947	-0,008	-0,096
SPLN -TR-13	0,597	0,786	0,499	0,691	0,098	0,095
SPLN -TR-14	0,693	0,805	0,737	0,622	-0,044	0,183
SPLN -TR-15	1,071	1,119	1,016	1,157	0,055	-0,038
SPLN -TR-16	0,457	0,535	0,555	0,463	-0,098	0,072
SPLN -TR-17	0,773	0,627	0,859	0,569	-0,086	0,058
SPLN -TR-18	1,131	0,812	1,182	0,848	-0,051	-0,036
SPLN -TR-19	0,530	0,549	0,540	0,579	-0,010	-0,030
SPLN -TR-20	0,859	0,757	0,813	0,731	0,046	0,026
SPLN -TR-21	0,893	0,869	0,840	0,874	0,053	-0,005
SPLN -TR-22	0,568	0,543	0,464	0,548	0,104	-0,005
SPLN -TR-23	0,598	0,573	0,517	0,698	0,081	-0,125
SPLN -TR-24	0,513	0,618	0,362	0,745	0,151	-0,127
SPLN -TR-25	0,402	0,445	0,423	0,416	-0,021	0,029
SPLN -TR-26	0,402	0,475	0,298	0,452	0,104	0,023
SPLN -TR-27	0,423	0,596	0,445	0,640	-0,022	-0,044

În tabelul 6. 1 se observă valorile rugozității R_a măsurate paralel și perpendicular pe direcția de avans, precum și valorile approximate cu ajutorul rețelei neuronale, tot pe cele două direcții de măsurare.

Din punct de vedere procentual, cea mai apropiată valoare este în cazul suprafeței plane cu numărul 11, prelucrată cu freza toroidală (SPLN-TR-11) având o eroare de aproximare de 0,61% cu o diferență de 0,005 μm pentru valoarea măsurată paralel, iar pentru valoarea măsurată perpendicular, cea mai apropiată valoare este în cazul suprafeței plane cu numărul 7, prelucrată cu freza toroidală (SPLN-TR-7) cu o eroare de 0,58%, cu o diferență de 0,004 μm . Reprezentarea grafică este prezentată în figura 6.15.

Cea mai mare eroare identificată este în cazul suprafeței SPLN-TR-5, măsurată paralel cu o eroare de aproximare de 81,9% și o diferență de 0,255 μm , iar în cazul măsurării perpendiculare, cea mai mare eroare obținută este de 22,7%, pentru suprafața SPLN-TR-14 cu o diferență de 0,183 μm .

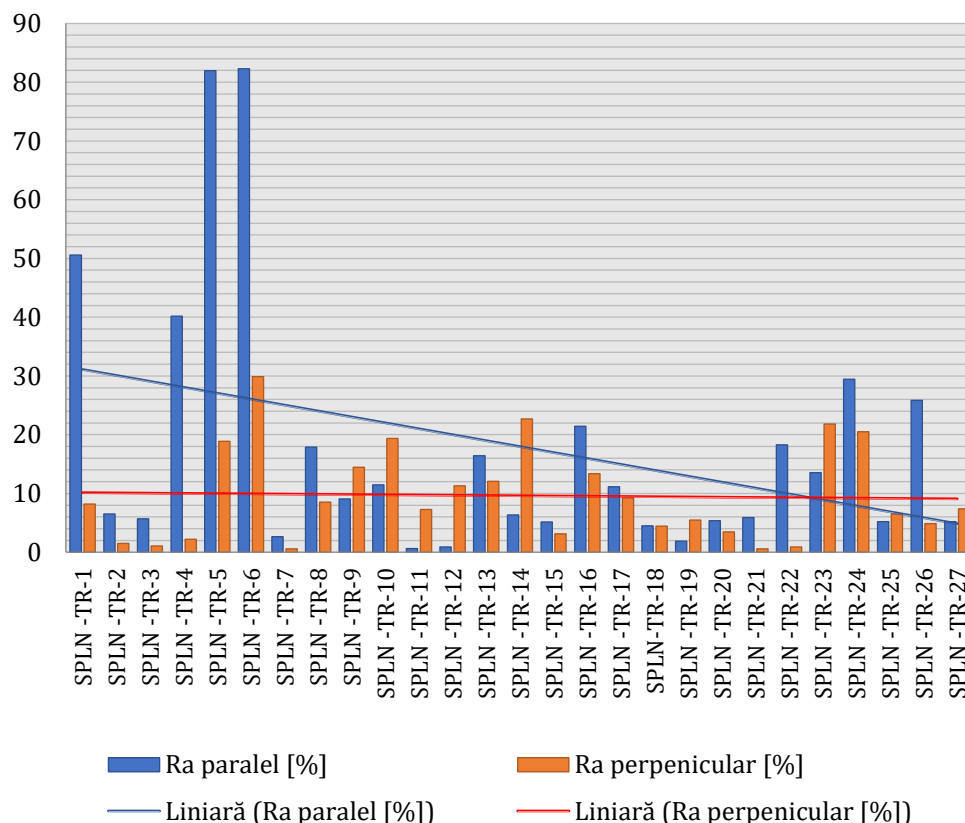


Fig. 6.15 Reprezentarea grafică a diagramei erorilor procentuale pentru valorile aproximare Ra

Tabelul 6.2 reprezintă valorile rugozității R_t măsurate pe suprafața plană prelucrată cu freza toroidală, iar în comparație sunt trecute valorile aproximare cu ajutorul rețelei neuronale, urmând ca în coloanele din partea dreaptă să fie reprezentate valoric erorile de aproximare ale rețelei neuronale.

Din punct de vedere procentual, cea mai scăzută valoare a fost efectuată asupra suprafeței plane cu numărul 12, prelucrată cu freza toroidală, (SPLN-TR-12) cu un procent de 0,27% și o diferență minimă de 0,003 μm , valoare determinată pe direcția de măsurare paralelă cu direcția avansului.

Cea mai mică valoare procentuală înregistrată pe direcția de măsurare perpendiculară este de 0,86%, asupra suprafeței plane cu numărul 13 (SPLN-TR-13) cu o diferență de 0,048 μm .

Tab.6.2 Valorile aproximative ale RNA pentru calitatea R_t a suprafeței plane prelucrate cu freza toroidală

Tipul suprafeței	Rugozitatea R_t [μm]				Eroarea de aproximare R_t paralel	Eroarea de aproximare R_t perpendicular
	Valori reale		Valori aproximative de RNA			
	Direcția de măsurare în raport cu direcția avansului					
	Paralel	Perpendicular	Paralel	Perpendicular		
SPLN -TR-1	0,926	2,920	1,235	2,733	-0,309	0,187
SPLN -TR-2	1,680	2,593	1,715	2,410	-0,035	0,183
SPLN -TR-3	1,706	2,400	1,776	3,147	-0,070	-0,747
SPLN -TR-4	1,466	2,613	1,311	2,920	0,155	-0,307
SPLN -TR-5	2,413	3,499	2,406	4,552	0,007	-1,053
SPLN -TR-6	2,719	2,953	2,704	3,786	0,015	-0,833
SPLN -TR-7	2,609	4,273	2,786	4,445	-0,177	-0,172
SPLN -TR-8	4,413	4,353	4,303	4,733	0,110	-0,380
SPLN -TR-9	4,639	5,840	4,723	5,571	-0,084	0,269
SPLN -TR-10	3,486	4,519	3,361	5,236	0,125	-0,717
SPLN -TR-11	4,646	5,406	4,372	6,337	0,274	-0,931
SPLN -TR-12	5,094	6,086	5,097	6,465	-0,003	-0,379
SPLN -TR-13	3,247	5,579	2,563	5,531	0,684	0,048
SPLN -TR-14	3,906	4,826	4,788	3,901	-0,882	0,925
SPLN -TR-15	5,760	7,666	5,722	7,477	0,038	0,189
SPLN -TR-16	3,273	3,619	2,961	3,782	0,312	-0,163
SPLN -TR-17	4,306	5,106	4,716	4,352	-0,410	0,754
SPLN -TR-18	6,103	6,293	5,785	6,865	0,318	-0,572
SPLN -TR-19	3,786	4,053	3,523	4,806	0,263	-0,753
SPLN -TR-20	4,833	4,759	4,820	4,660	0,013	0,099
SPLN -TR-21	4,799	6,326	5,262	6,114	-0,463	0,212
SPLN -TR-22	3,899	4,146	3,127	4,193	0,772	-0,047
SPLN -TR-23	3,753	4,496	3,920	4,741	-0,167	-0,245
SPLN -TR-24	2,966	4,586	2,880	4,492	0,086	0,094
SPLN -TR-25	3,552	3,700	2,871	3,239	0,681	0,461
SPLN -TR-26	2,993	3,853	2,892	3,900	0,101	-0,047
SPLN -TR-27	3,186	4,560	3,206	4,985	-0,020	-0,425

Valoarea procentuală maximă de aproximare a fost obținută pe suprafața plană cu numărul 1 (SPLN-TR-1) cu un procent de eroare de 33,37% și o diferență de 0,309 μm pe direcția de măsurare paralelă, iar pe direcția de măsurare perpendiculară, valoarea maximă procentuală dată este de 30,09% cu diferență de 1,053 μm .

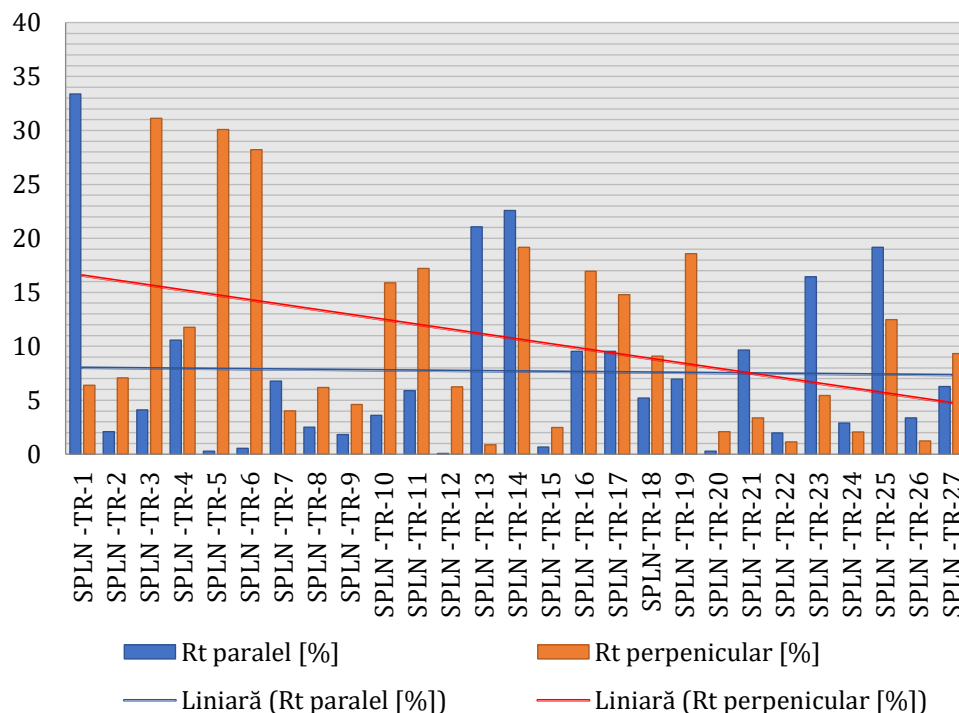


Fig. 6.16 Reprezentarea grafică a diagramei erorilor procentuale pentru valorile approximate R_t

În urma ilustrării grafice a procentelor de eroare din figura 6.16, se poate observa o constantă în aproximarea valori R_a măsurată perpendicular, precum și la valorile approximate R_t măsurate paralel.

6.4. Aplicarea rețelei neuronale artificiale

Odată dezvoltată baza de date obținută în urma efectuărilor măsurătorilor asupra epruvetelor prelucrate, în acest subcapitol se urmărește dezvoltarea unei rețele neuronale artificiale, capabilă să genereze rezultatele rugozității indiferent de cele trei variabile de intrare.

Pentru dezvoltarea rețelei neuronale artificiale este nevoie de a-i transmite intrările și ieșirile de referință. În cazul de față, am creat o rețea neuronală artificială bazată pe prelucrarea suprafețelor plane cu freza toroidală. Intrările sunt stabilite ca fiind cele trei variabile de proces, însumând cele 27 de tipuri de prelucrări. Ieșirile rețelei neuronale sunt reprezentate de valorile medii ale rugozității mediei aritmetice R_a , măsurate paralel pe direcția de avans.

Pentru valorile de test, s-au ales cinci seturi de variabile de proces, reprezentând valorile de intrare, cu totul altele decât cele din setul de valori de referință, urmând determinarea rugozității suprafețelor plane prelucrate cu freza toroidală cu noile regimuri.

Figura 6.17 ilustrează modul de încărcare a datelor, iar figura 6.18 arată modul de creare a unei rețele neuronale, capabile să prezică noi valori ale rugozității.

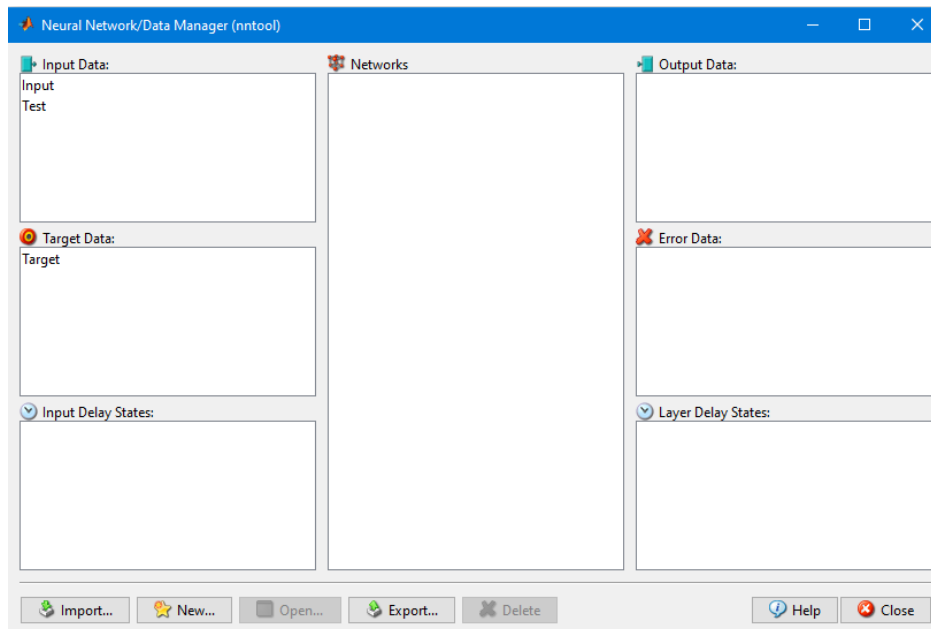


Fig. 6.17 Încărcarea datelor

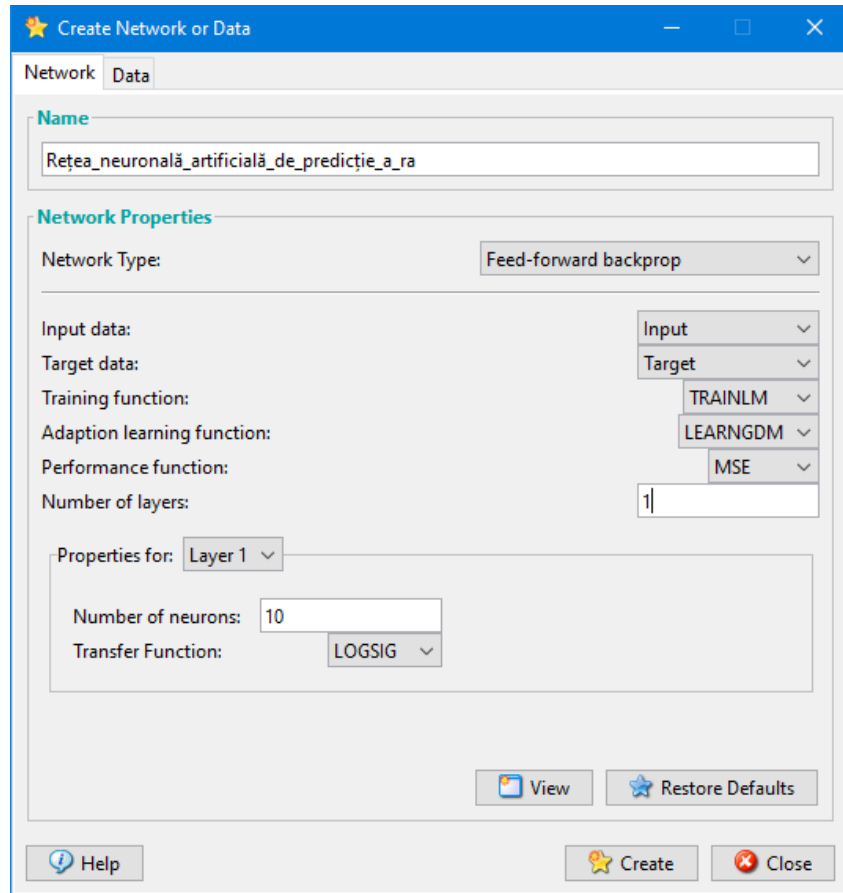


Fig. 6.18 Crearea rețelei neuronale artificiale de predicție

Figura 6.19 ilustrează structura rețelei neuronale ce cuprinde trei neuroni de intrare, zece neuroni ascunși și un neuron de ieșire

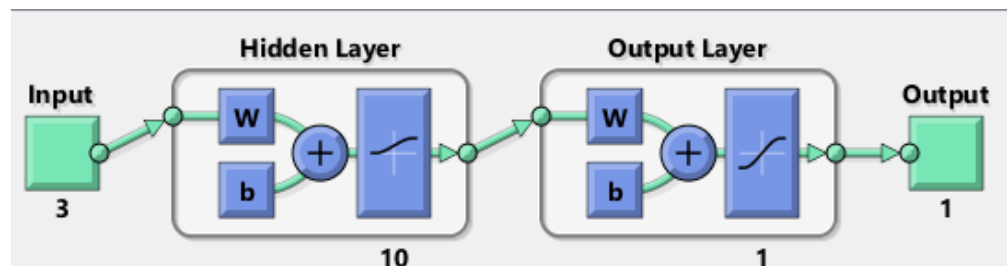


Fig. 6.19 Structura rețelei neuronale

Odată creată rețeaua neuronală artificială, nu rămâne decât antrenarea acesteia încât să învețe algoritmi de calcul. În figura 6.20 este prezentată regresia rețelei neuronale în ceea ce privește datele de lucru.

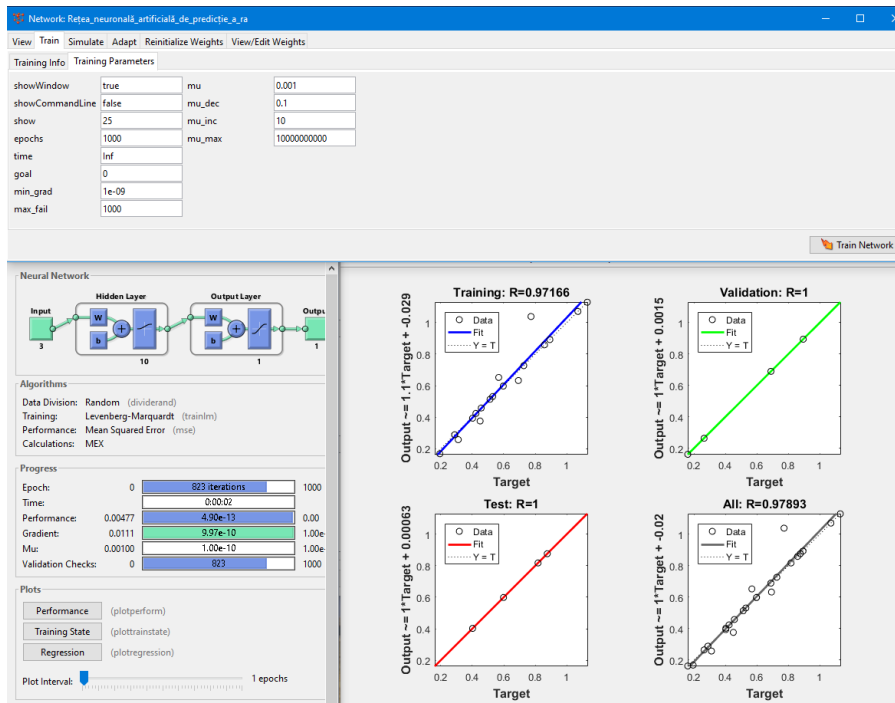


Fig. 6.20 Învățarea rețelei neuronale

La finalul antrenării rețelei neuronale artificiale nu rămâne decât să simulăm rețeaua, încât aceasta să determine predicția valorilor rugozității R_a . Figura 6.21 evidențiază rezultatele finale ale rețelei neuronale artificiale de predicție.

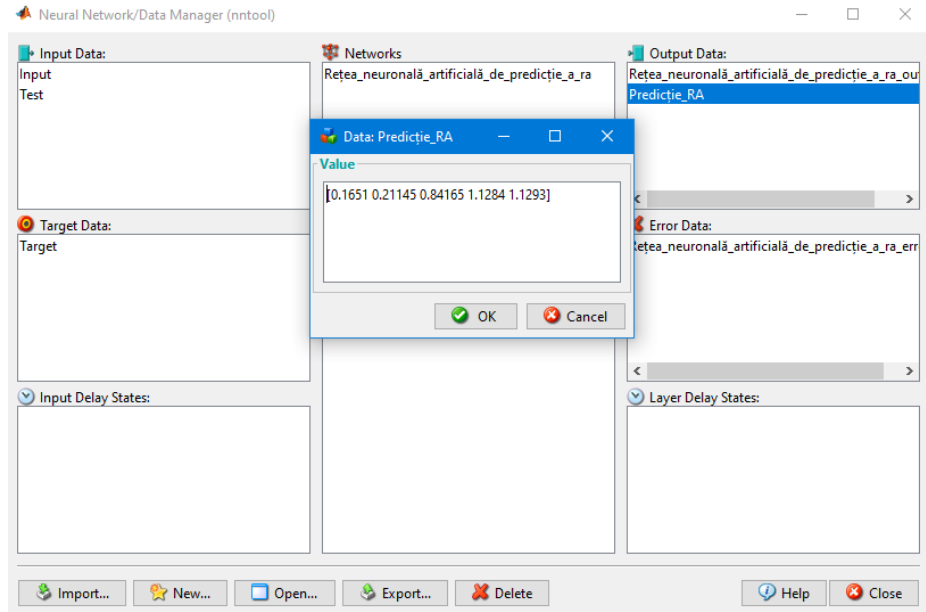


Fig. 6.21 Valorile rugozității R_a previzionate

6.5. Certificarea predicțiilor rețelei neuronale artificiale

După cum s-a stabilit în capitolul 6.4, rețeaua neuronală artificială a prezis pe considerentul bazei de date introduse, noi valori ale rugozității R_a . În tabelul 6.3 sunt reprezentate noile valori de intrare pentru testarea rețelei neuronale artificiale.

Tab. 6.3 Valorile parametrilor pentru fiecare încercare cu freza toroidală

Încercarea	Viteza de așchiere [m/min]	Unghiul de înclinare [°]	Avansul pe dinte [mm/dinte]
TEST 1	100	20°	0,12
TEST 2	120	30°	0,14
TEST 3	140	40°	0,16
TEST 4	160	50°	0,18
TEST 5	180	60°	0,20

Pentru certificarea și confirmarea corectitudinii rețelei neuronale artificiale de predicție, s-a decis prelucrarea a 5 suprafețe plane cu freza toroidală.

La fel ca în cazul experimentelor anterioare, se păstrează constanți aceiași parametri, toate datele experimentale fiind la fel, variind doar cei 3 parametri de proces.

În imaginea 6.22 sunt surprinse momente din timpul simulării cu ajutorul softului PowerMILL, precum și prelucrării ale suprafețelor plane pe centrul cu comandă numerică OKUMA MU-400VA în cele 5 moduri.

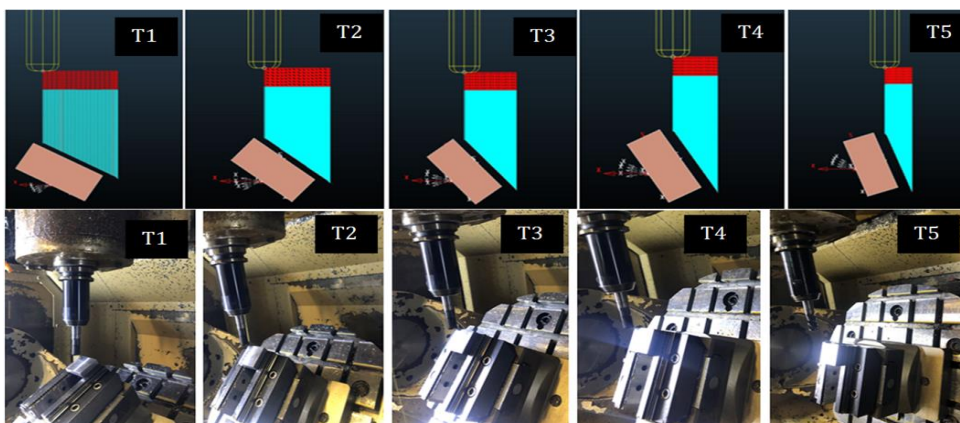


Fig. 6.22 Imagini din timpul prelucrării și simulării suprafețelor de test plane cu freza toroidală

În urma efectuării prelucrărilor celor 5 suprafețe pe centrul cu comandă numerică, calitatea suprafețelor este măsurată cu ajutorul unui scanner 3D aflat în dotarea facultății de Inginerie în cadrul Centrului Universitar Nord din Baia Mare, ilustrat în figura 6.23.

Sistemul Profilm3D, este un scanner optic ce folosește interferometria de schimbare a fazei de înaltă precizie. Această tehnologie oferă acces la topografia de suprafață de la dimensiuni subnanometrice, la scară milimetrică.

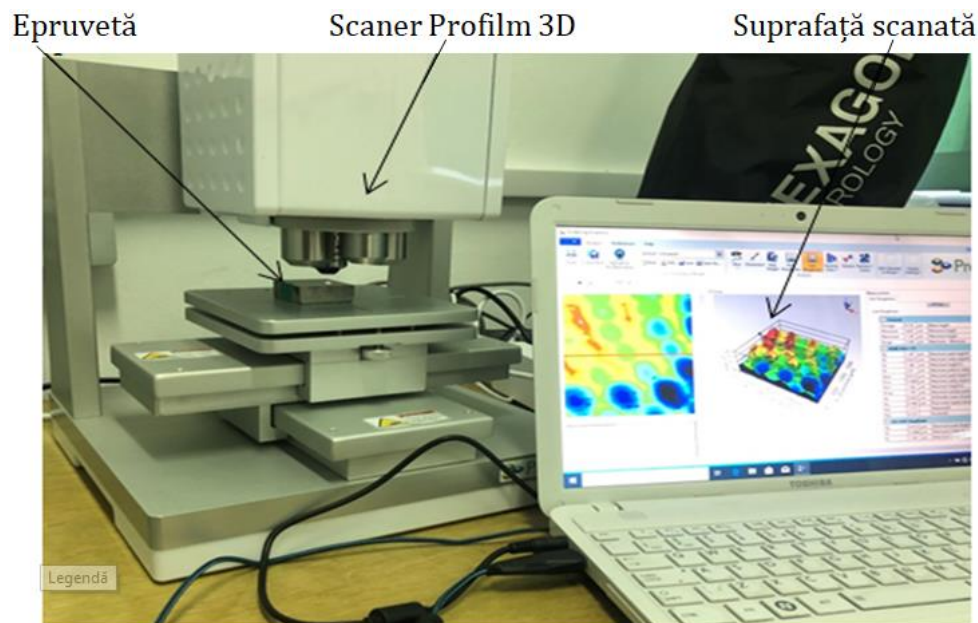


Fig. 6.23 Imagine din timpul măsurătorilor cu ajutorul scannerului Profilm3D

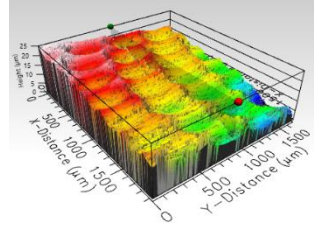
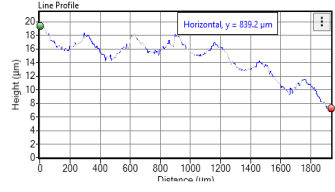
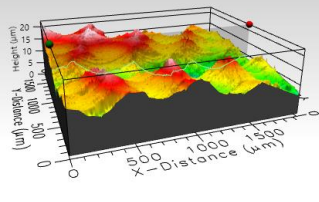
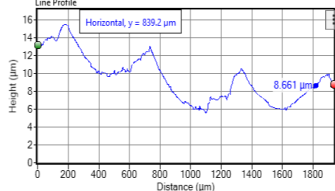
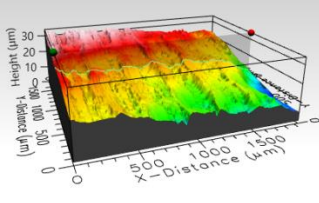
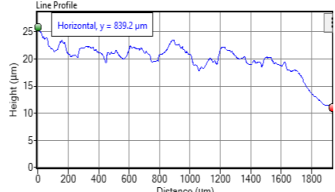
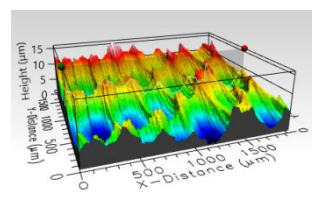
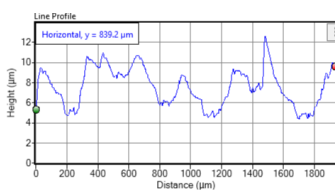
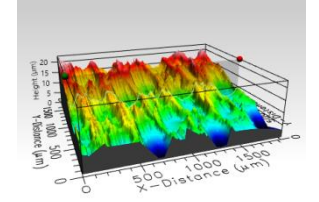
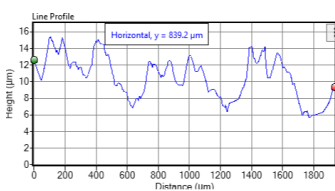
În urma efectuării a șase măsurători asupra fiecărei suprafețe de test, au rezultat un număr de 30 de măsurători centralizate în tabelul 6.4, fiind prezentată și valoarea medie a rugozității asupra fiecărei suprafețe.

Tab. 6.4 Valorile măsurate cu scannerul 3D ale rugozității R_a

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
Măsurătoare 1 R_a [μm]	0,155	0,262	0,826	1,035	1,297
Măsurătoare 2 R_a [μm]	0,162	0,258	0,900	1,087	1,134
Măsurătoare 3 R_a [μm]	0,174	0,230	0,876	1,084	1,131
Măsurătoare 4 R_a [μm]	0,153	0,236	0,904	1,094	1,135
Măsurătoare 5 R_a [μm]	0,151	0,321	0,896	1,031	1,129
Măsurătoare 6 R_a [μm]	0,162	0,227	0,840	1,028	1,032
Media	0,159	0,255	0,873	1,059	1,143

Pentru certificarea corectitudinii măsurătorilor în tabelul 6.5, sunt generate valorile cele mai apropiate de predicțiile rețelei neuronale, restul informațiilor privind măsurătorile efectuate asupra suprafețelor test sunt prezentate în anexe. Următorul tabel ilustrează imagini cu suprafața scanată 3D, graficul rugozității măsurate, precum și valorile rugozității.

Tab. 6.5 Valorile rugozității R_a cele mai apropiate de predicțiile RNA

	Suprafața scanată 3D	Graficul rugozității măsurate	Valorile rugozității																																				
Suprafața test 1 Măsurătoarea 2			<table border="1"> <tr><td>Rp</td><td>0.7045</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rv</td><td>0.7199</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>0.7215</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rt</td><td>1.424</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>0.3559</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rvm</td><td>0.3656</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rtm</td><td>0.7215</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>1.376</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Ra</td><td>0.162</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rq</td><td>0.2132</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rsk</td><td>-0.07311</td><td></td></tr> <tr><td>Rku</td><td>3.945</td><td></td></tr> </table>	Rp	0.7045	μm	Rv	0.7199	μm	Rz	0.7215	μm	Rt	1.424	μm	Rpm	0.3559	μm	Rvm	0.3656	μm	Rtm	0.7215	μm	Rmax	1.376	μm	Ra	0.162	μm	Rq	0.2132	μm	Rsk	-0.07311		Rku	3.945	
Rp	0.7045	μm																																					
Rv	0.7199	μm																																					
Rz	0.7215	μm																																					
Rt	1.424	μm																																					
Rpm	0.3559	μm																																					
Rvm	0.3656	μm																																					
Rtm	0.7215	μm																																					
Rmax	1.376	μm																																					
Ra	0.162	μm																																					
Rq	0.2132	μm																																					
Rsk	-0.07311																																						
Rku	3.945																																						
Suprafața test 2 Măsurătoarea 6			<table border="1"> <tr><td>Rp</td><td>1.171</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rv</td><td>0.9522</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>1.198</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rt</td><td>2.123</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>0.6132</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rvm</td><td>0.5849</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rtm</td><td>1.198</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>2.029</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Ra</td><td>0.2271</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rq</td><td>0.3221</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rsk</td><td>0.9042</td><td></td></tr> <tr><td>Rku</td><td>4.542</td><td></td></tr> </table>	Rp	1.171	μm	Rv	0.9522	μm	Rz	1.198	μm	Rt	2.123	μm	Rpm	0.6132	μm	Rvm	0.5849	μm	Rtm	1.198	μm	Rmax	2.029	μm	Ra	0.2271	μm	Rq	0.3221	μm	Rsk	0.9042		Rku	4.542	
Rp	1.171	μm																																					
Rv	0.9522	μm																																					
Rz	1.198	μm																																					
Rt	2.123	μm																																					
Rpm	0.6132	μm																																					
Rvm	0.5849	μm																																					
Rtm	1.198	μm																																					
Rmax	2.029	μm																																					
Ra	0.2271	μm																																					
Rq	0.3221	μm																																					
Rsk	0.9042																																						
Rku	4.542																																						
Suprafața test 3 Măsurătoarea 6			<table border="1"> <tr><td>Rp</td><td>2.457</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rv</td><td>2.634</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>5.091</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rt</td><td>5.091</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>2.457</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rvm</td><td>2.634</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rtm</td><td>5.091</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>5.091</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Ra</td><td>0.8406</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rq</td><td>1.049</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rsk</td><td>-0.09465</td><td></td></tr> <tr><td>Rku</td><td>2.539</td><td></td></tr> </table>	Rp	2.457	μm	Rv	2.634	μm	Rz	5.091	μm	Rt	5.091	μm	Rpm	2.457	μm	Rvm	2.634	μm	Rtm	5.091	μm	Rmax	5.091	μm	Ra	0.8406	μm	Rq	1.049	μm	Rsk	-0.09465		Rku	2.539	
Rp	2.457	μm																																					
Rv	2.634	μm																																					
Rz	5.091	μm																																					
Rt	5.091	μm																																					
Rpm	2.457	μm																																					
Rvm	2.634	μm																																					
Rtm	5.091	μm																																					
Rmax	5.091	μm																																					
Ra	0.8406	μm																																					
Rq	1.049	μm																																					
Rsk	-0.09465																																						
Rku	2.539																																						
Suprafața test 4 Măsurătoarea 4			<table border="1"> <tr><td>Rp</td><td>4.361</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rv</td><td>2.33</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>4.205</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rt</td><td>6.691</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>1.874</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rvm</td><td>2.33</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rtm</td><td>4.205</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>4.205</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Ra</td><td>1.094</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rq</td><td>1.334</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rsk</td><td>0.4563</td><td></td></tr> <tr><td>Rku</td><td>3.044</td><td></td></tr> </table>	Rp	4.361	μm	Rv	2.33	μm	Rz	4.205	μm	Rt	6.691	μm	Rpm	1.874	μm	Rvm	2.33	μm	Rtm	4.205	μm	Rmax	4.205	μm	Ra	1.094	μm	Rq	1.334	μm	Rsk	0.4563		Rku	3.044	
Rp	4.361	μm																																					
Rv	2.33	μm																																					
Rz	4.205	μm																																					
Rt	6.691	μm																																					
Rpm	1.874	μm																																					
Rvm	2.33	μm																																					
Rtm	4.205	μm																																					
Rmax	4.205	μm																																					
Ra	1.094	μm																																					
Rq	1.334	μm																																					
Rsk	0.4563																																						
Rku	3.044																																						
Suprafața test 5 Măsurătoarea 5			<table border="1"> <tr><td>Rp</td><td>2.902</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rv</td><td>2.527</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>5.038</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rt</td><td>5.428</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>2.579</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rvm</td><td>2.459</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rtm</td><td>5.038</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>5.428</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Ra</td><td>1.129</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rq</td><td>1.323</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rsk</td><td>0.2863</td><td></td></tr> <tr><td>Rku</td><td>2.08</td><td></td></tr> </table>	Rp	2.902	μm	Rv	2.527	μm	Rz	5.038	μm	Rt	5.428	μm	Rpm	2.579	μm	Rvm	2.459	μm	Rtm	5.038	μm	Rmax	5.428	μm	Ra	1.129	μm	Rq	1.323	μm	Rsk	0.2863		Rku	2.08	
Rp	2.902	μm																																					
Rv	2.527	μm																																					
Rz	5.038	μm																																					
Rt	5.428	μm																																					
Rpm	2.579	μm																																					
Rvm	2.459	μm																																					
Rtm	5.038	μm																																					
Rmax	5.428	μm																																					
Ra	1.129	μm																																					
Rq	1.323	μm																																					
Rsk	0.2863																																						
Rku	2.08																																						

Odată măsurată rugozitatea suprafeței, putem compara datele reale cu cele previzionate de către rețeaua neuronală, astfel, în tabelul 6.6 sunt prezentate datele rugozității.

Potrivit comparațiilor observate în tabelul 6.6, rezultă o medie a preciziei de previzionare de 93,5% ,cu o diferență medie de 0,033 μm, ceea ce dovedește că rețeaua neuronală poate fi folosită cu succes în

predicția valorilor rugozității. Important este ca baza de date introdusă să fie cât mai cuprinzătoare și precisă.

Tab. 6.6 Valorile comparabile ale rugozității R_a

Tipul suprafeței	Rugozitatea R_a [μm]		Eroarea de previzionare R_a [μm]	Procentul de precizie de previzionare al R_a [%]
	Valori reale	Valori previzionate de RNA		
TEST 1	0,159	0,165	0,006	96,3
TEST 2	0,255	0,211	-0,044	82,7
TEST 3	0,873	0,841	-0,032	96,3
TEST 4	1,059	1,128	0,069	93,8
TEST 5	1,143	1,129	-0,014	98,7
Media				93,5%

6.6. Concluzii de capitol

Acest capitol cuprinde o introducere în modelarea datelor cu ajutorul rețelei neuronale artificiale, fiind prezentate o serie de lucrări științifice ce abordează utilizarea rețelei neuronale artificiale. Am decis ca pentru prelucrarea datelor în crearea unei rețele neuronale să apelez la softul MatLab.

Prelucrarea datelor cu ajutorul softului MatLab a făcut posibilă crearea unei rețele neuronale artificiale, capabilă să aproximeze valorile rugozității, având ca neuroni de intrare variabilele de proces din timpul prelucrării, iar ca parametri de ieșire rugozitatea măsurată.

O a doua rețea neuronală artificială creată este cea de predicție, ce prezice calitatea suprafeței în funcție de neuronii de intrare, respectiv variabilele de proces.

În urma celei de a doua rețele neuronale artificiale, creată cu scopul de predicție a noilor valori ale rugozității, în urma schimbării datelor de intrare au rezultat o serie de rugozități, concluzionând la finalul măsurătorilor o precizie de previzionare a rețelei neuronale de 93,5%.

Simularea funcționării rețelei neuronale artificiale create arată ca aceasta are o capacitate bună de învățare a cărei precizie crește cu numărul setului de date de învățare. Aceasta rețea neuronală artificială creată este un pas important în utilizarea inteligenței artificiale în acest domeniu de cercetare.

7. DISCUȚII GENERALE

Prezenta lucrare conține un obiectiv principal, clar, acesta fiind prelucrarea suprafețelor curbe complexe cu frezele toroidale pe centrele cu comandă numerică. Prin susținerea și dezbateră acestui obiectiv, aduce după sine o serie de obiective specifice. Oricare dintre aceste obiective specifice ar putea fi un obiectiv fundamental, dar cumulate aceste obiective țintesc spre atingerea scopului final.

Se pune un semn de întrebare, se pot prelucra suprafețele curbe complexe cu frezele toroidale pe centrele cu comandă numerică? Răspunsul este unul afirmativ! Și nu doar că este afirmativ, dar în unele cazuri s-a dovedit a fi mai potrivită folosirea frezelor toroidale decât folosirea frezelor cu cap sferic. Acest lucru o dovedește cele 270 de epruvete prelucrate, acest lucru o arată cele 1620 de măsurători, acest lucru o constituie timpul de bază aferent prelucrărilor cât și valoarea măsurată a uzurii tăișului sculei.

Sunt avantaje și dezavantaje în folosirea frezelor toroidale, dar totul constă în modul în care sunt utilizate aceste freze în funcție de scopul urmărit. Odată identificate valorile măsurătorilor rugozității suprafeței, acestea au fost valorificate prin crearea rețelelor neuronale artificiale. Este un concept la modă, dar cercetările efectuate în prezenta lucrare dovedesc că este și un concept util. Odată creată baza de date, rețeaua neuronală artificială este capabilă să genereze noi valori ale rugozității suprafeței chiar dacă neuronii de intrare nu sunt cuprinși în baza de date. Consider că acest concept poate economisi mult timp și multă materie primă reducând considerabil costurile de cercetare în obținerea unei calități a suprafeței dorite.

Scopul cercetării a fost atins, rezultatele experimentale arată că rugozitatea suprafețelor prelucrate cu freza toroidală, comparativ cu freza sferică este mai bună și s-au stabilit condițiile de reducere a timpul de bază. Obiectivul îndeplinit, de realizare a unei calități bune a suprafeței sub influența parametrilor de așchiere, cât și a unghiului de înclinare a axei sculei a avut ca obiective secundare monitorizarea uzurii sculei cât și productivitatea celor două tipuri de freze.

Proiectarea cercetării are o strategie de desfășurare cu etape intermediare specifice modelului de cercetare, iar planificarea ei este făcută de specialist programator cu experiență. Validitatea rezultatelor obținute s-a făcut prin metode moderne de măsurare și de interpretare a rezultatelor. Astfel, sau identificat prin imagini microscopice obținute

cu microscopul stereoscopic IOR și cu microscopul video de măsurare cu comandă CNC MM1-200 cele mai bune suprafețe prelucrate cu freza toroidală, respective cu freza sferică. Tot pentru aceste confirmări, am efectuat o analiză statistică a erorilor de aproximare pe baza rețelei neuronale de aproximare și o altă rețea neuronală de prezicere.

Pentru confirmarea corectitudinii rețelei neuronale artificiale de predicție, la prelucrarea cu freza toroidală s-a folosit un scanner optic interferometric Profilm3D, constatându-se că valorile generate sunt foarte apropiate de predicțiile rețelei neuronale. Pentru aceste confirmări au fost prelucrate 5 suprafețe plane cu freza toroidală păstrând constanți aceiași parametri, variind doar cei 3 parametri de proces. Aceasta este ilustrată și prin imaginile ce surprind momente din timpul simulării cu ajutorul softului PowerMILL, precum și prelucrării pe centrul cu comandă numerică OKUMA MU-400VA. Datele experimentale referitor la rugozitatea mediei aritmetice de pe suprafețele de test, comparativ cu datele generate de către rețeaua neuronală artificială confirmă faptul că, acestea sunt corecte.

În vederea asigurării condițiilor pentru prelevarea datelor experimentale standul experimental a fost echipat cu instrumentele cu ajutorul cărora poate fi analizată influența unor parametri asupra rugozității suprafeței este valabil și în cazul altor procedee de așchiere.

Cercetările experimentale realizate în această lucrare au utilizat procedeele existente de așchiere pe centrele de prelucrare, care au permis colectarea datelor utilizate. Datele experimentale confirmă cercetările teoretice, precum și importanța acordată testărilor pentru identificarea soluțiilor de reglare a parametrilor procesului de așchiere. În cercetările efectuate s-a ținut cont de cercetările actuale în domeniu, capacitatea maximă a centrelor de prelucrare și a sculelor utilizate.

Rezultatele proprii, coroborate cu datele din literatură, au fost foarte importante în configurarea propriului model de cercetare, lucrarea actuală a evidențiat o serie de factori de influență asupra procesului de prelucrare prin așchiere la centrele de prelucrare.

Ceea ce acest studiu aduce nou este compararea calității suprafețelor prelucrate cu freza toroidală versus prelucrarea cu freza sferică, în scopul obținerii unei calități bune a suprafeței, pe mașini cu comandă numerică Prin abordarea analizei în această lucrare am dorit să analizez diferențele semnificative în ceea ce privește prelucrarea cu cele două tipuri de freze. Această cercetare are un aport în progresul cunoștințelor în domeniu, deoarece aprofundează aspectele tehnologice la prelucrarea prin frezare cu freze sferice și toroidale.

8. CONCLUZII FINALE

Lucrarea denumită „Prelucrarea suprafețelor curbe complexe cu freze toroidale pe centre de prelucrare”, a fost finalizată având la bază atingerea obiectivului principal al temei abordate. Obiectivul principal este compararea calității suprafețelor prelucrate cu freza toroidală versus prelucrarea suprafețelor cu freza sferică. Acesta are ca scop obținerea unei calități a suprafeței și a preciziei de prelucrare ridicate, în cadrul procesului de frezare cu freza toroidală pe mașini cu comandă numerică.

Scopul lucrării cu titlul „Prelucrarea suprafețelor curbe complexe cu freze toroidale pe centre de prelucrare” este de a aduce o contribuție semnificativă la prelucrarea suprafețelor complexe din domeniul industrial, adoptând un plus de încredere frezelor toroidale.

Obiectivele specifice care susțin acest obiectiv fundamental au avut la bază:

- ✓ Prelucrarea a cinci tipuri de suprafețe curbe complexe;
- ✓ Analiza experimentală a calității suprafeței materialului C45 prelucrat cu freza toroidală și cea sferică;
- ✓ Obținerea unor valori ale parametrilor procesului de așchiere pentru determinarea unei rugozități a suprafeței cât mai bune;
- ✓ Determinarea uzurii tăișului sculei în funcție de unghiul de înclinare al axei sculei folosit;
- ✓ Analiza statistică a timpului de bază necesar fiecărei prelucrări;
- ✓ Validarea și analiza statistică a rugozităților suprafețelor obținute;
- ✓ Stabilirea unei rețele neuronale de prezicere a rugozității suprafeței în funcție de neuronii de intrare.

8.1. Concluzii generale

Drept urmare, obiectivele prezentate mai sus au fost atinse cu succes pe parcursul elaborării și desfășurării efective a cercetărilor, astfel încât rezultatele obținute conduc la următoarele concluzii:

Concluzii rezultate în urma studiului bibliografic

1. Fiabilitate, productivitate și rentabilitate sunt cerințele privind așchierarea metalelor și sunt din ce în ce mai exigente. În același timp, trebuie garantate rezultate de înaltă calitate. Pentru aceasta,

mașinile-unelte moderne și sistemele CAD/CAM fac posibile procedee de frezare tot mai eficiente.

2. Cele mai studiate direcții de cercetare, în cadrul referințelor bibliografice sunt reprezentate de cercetări asupra calității suprafețelor, asupra poziționării sculelor cât și cercetări privind geometria sculelor și uzurii sculelor.
3. Există puține lucrări în care să se compare frezele toroidale cu frezele sferice din punct de vedere al calității suprafeței.
4. Odată identificate o serie de cercetări experimentale efectuate de către alți cercetători, am aflat o incertitudine în ceea ce privește parametrii de așchiere optimi în prelucrarea materialului C45 cu freza toroidală.
5. Există o mare varietate de operații tehnologice care se pot executa prin frezare și corespunzător acestora, diferite tipuri constructive de freze.
6. Suprafețele complexe în general pot fi împărțite în suprafețe concave sau convexe. Modelul geometric în cazul acestor prelucrări în care se utilizează freze cilindro-frontale cu cap sferic poate servi ca punct de plecare pentru stabilirea modelului geometric în cazul utilizării frezelor toroidale.
7. Calcularea exactă și alegerea unghiului de înclinare între axul sculei și suprafața piesei de prelucrat nu poate numai să elimine coliziunea, ci și să îmbunătățească condițiile de frezare, dar și să reducă forțele verticale de frezare.
8. Direcția de înclinare a axei sculei și valoarea unghiului la care este înclinată scula așchietoare, în raport cu normala la suprafața de prelucrat, este un factor important care influențează rugozitatea suprafețelor prelucrate.

Concluzii privind metodologia de abordare a cercetării

1. Având ca punct de pornire obiectivul fundamental și obiectivele specifice ale acestei lucrări, întreaga activitate științifică oscilează în jurul planului de cercetare experimentală decis.
2. Pentru ca aceste obiective să fie îndeplinite, s-a realizat pe baza unor criterii fundamentale, valorificarea la maxim a ansamblului de date experimentale.
3. S-a urmărit efectuarea experimentelor conform planului de experimente ceea ce conferă o importanță majoră fiecărei informație primită în urma prelucrării suprafeței.

4. Datele de intrare vor fi strict folosite conform tabelelor prezentate, ceea ce conferă sistemului o rigiditate și o claritate sporită. Cercetările experimentale vor avea ca scop determinarea influenței parametrilor de proces și a parametrilor tehnologici asupra calității suprafeței, în cazul diferitelor tipuri de suprafețe respectiv diferenței tipului de scule.
5. Planul de experimente s-a stabilit în baza regimurilor de așchiere obținute prin combinarea nivelurilor următorilor factori: viteza de așchiere, avansul pe dinte și unghiul de înclinare al axei sculei.

Concluzii privind cercetările experimentale efectuate

1. Odată realizat planul complet de experimente cu ajutorul metodei Taguchi, s-a stabilit prelucrarea a 27 de epruvete din fiecare tip.
2. Pentru a compune suprafețele curbe complexe s-au prelucrat 5 tipuri de suprafețe, acestea fiind suprafețe sferice concave, sferice convexe, cilindrice concave, cilindrice convexe și suprafețe plane.
3. Pentru realizarea celor 270 de experimente s-au folosit 3 freze toroidale pentru prelucrarea a 135 de experimente și 3 freze sferice pentru prelucrarea a celorlalte 135 de experimente.
4. În realizarea detaliată a celor 270 de experimente, regimurile de așchiere au fost stabilite ținând cont de indicațiile producătorului de scule și de posibilitățile tehnologice ale centrului cu comandă numerică.
5. Variabilele procesului de prelucrare sunt viteza de așchiere, avansul pe dinte și unghiul de înclinare, iar constantele se consideră adâncimea axială de așchiere de 0,5 mm și adâncimea radială de așchiere 0,3 mm.
6. Pentru monitorizarea uzurii sculei, fiecare sculă a fost folosită pentru un singur experiment cu un anumit unghi de înclinare.
7. Obținerea unui timp de execuție cât mai scurt și obținerea unei uzuri a sculei cât mai mici, este condiționată nu doar de alegerea regimurilor optime de reglaj, cât și de corelarea corespunzătoare a acestora care să asigure valoarea optimă a parametrului de proces.

Concluzii rezultate în urma prelucrării datelor obținute experimental

1. În privința timpului de bază obținut în urma prelucrării fiecărui tip de suprafață, s-a efectuat o analiză statistică a datelor obținute, cu scopul observării celei mai productive variante.
2. Pentru urmărirea uzurii sculei s-au pus la dispoziție 3 freze toroidale și 3 freze sferice, prelucrându-se 45 de suprafețe cu fiecare. Fiecare freză a fost folosită pentru prelucrarea la un singur unghi de înclinare.
3. Planul de cercetare și modelare a datelor pornește de la efectuarea măsurătorilor, câte 3 măsurători pentru fiecare suprafață efectuate paralel pe direcția de avans și 3 măsurători pe fiecare suprafață efectuate perpendicular pe direcția de avans.
4. Asupra fiecărei suprafețe se urmărește valoarea rugozității mediei aritmetice R_a și valoarea rugozității totale R_t pentru a determina calitatea suprafeței.
5. Ținând cont de cele 270 de suprafețe prelucrate, în vederea măsurătorilor se însumează un număr de 1620 de valori ale rugozității R_a și 1620 de valori ale rugozității totale R_t .
6. Pentru centralizarea datelor experimentale obținute în ceea ce privește rugozitatea, s-a efectuat media rugozității pentru fiecare suprafață măsurată atât longitudinal cât și transversal.

Concluzii rezultate în urma utilizării rețelei neuronale artificiale

1. Prelucrarea datelor cu ajutorul softului MatLab a făcut posibilă crearea unei rețele neuronale artificiale, aceasta este capabilă să aproximeze valorile rugozității, având ca neuroni de intrare variabilele de proces din timpul prelucrării, iar ca parametri de ieșire, rugozitatea măsurată.
2. În urma reprezentării grafice a procentelor de eroare, se poate observa o constantă în aproximarea valorii R_a măsurată perpendicular, precum și la valorile approximate R_t măsurate paralel.
3. Odată dezvoltată baza de date obținută în urma efectuării măsurătorilor asupra epruvetelor prelucrate, se urmărește dezvoltarea unei alte rețele neuronale artificiale capabilă să prezică rezultatele rugozității, în funcție de cele trei variabile de intrare.

4. Pentru certificarea și confirmarea corectitudinii rețelei neuronale artificiale de predicție, s-au prelucrat 5 suprafețe plane de test cu freza toroidală.
5. Datele obținute în urma măsurării rugozității mediei aritmetice R_a de pe suprafețele de test, comparativ cu datele generate de către rețeaua neuronală artificială confirmă faptul că, rețelele neuronale artificiale pot juca un rol foarte important în cercetarea calității suprafețelor.

8.2. Originalitatea și contribuții inovative

1. Am identificat și analizat un număr semnificativ de cercetări efectuate pe plan național și internațional, fapt în urma căruia au rezultat o serie de câmpuri de cercetare nestudiate, în care au fost plasate și proiectate cercetările proprii;
2. Am efectuat analize amănunțite asupra statisticii lucrărilor din materialul bibliografic identificat și studiat, care au avut la bază cercetarea prelucrării suprafețelor cu frezele toroidale.
3. Am identificat și analizat o serie de lucrări științifice ce fac referire la aplicarea rețelei neuronale artificiale.
4. Am elaborat o metodologie de cercetare experimentală pentru determinarea rugozității celor cinci tipuri de suprafețe, prin prelucrarea cu freza toroidală comparativ cu freza sferică.
5. Am identificat obiectivul fundamental al aceste lucrări și am stabilit o serie de obiective specifice, în vederea susținerii obiectivului principal.
6. Utilizând metoda Taguchi, am determinat în baza unui număr redus de experimente, factorii și combinațiile dintre aceștia, care asigură interacțiunile cele mai favorabile reducerii dispersiei procesului de așchiere.
7. Pentru desfășurarea experimentelor, am utilizat metoda planului factorial complet cu scopul determinării experimentale a rugozității suprafeței și totodată a nivelurilor de influență ale parametrilor implicați în generarea rugozității.
8. Am realizat o structură a standului experimental, care conține toate echipamentele și instrumentele, în vederea asigurării condițiilor necesare obținerii unor date experimentale, cu ajutorul cărora poate fi analizată influența unor parametrii asupra rugozității suprafeței. Modelul poate fi transpus și în cazul altor procedee de așchiere.

9. Am elaborat o matrice de experiență ortogonală în concordanță cu metoda Taguchi pentru alegerea valorilor fiecărui experiment.
10. Am proiectat forma 3D a celor 5 tipuri de suprafețe, plană, sferică concavă, sferică convexă, cilindrică concavă și cilindrică convexă.
11. Am realizat 270 de programe CAM folosind softul PowerMILL.
12. Am realizat pe centrul cu comandă numerică OKUMA MU-400VA, 270 de suprafețe dintre care jumătate cu frezele toroidale și jumătate cu frezele sferice.
13. Am identificat timpul de bază pentru fiecare suprafață prelucrată.
14. Am dedus faptul că, suprafața plană a fost prelucrată în cel mai scurt timp cu freza sferică la unghiul de 15° , iar cel mai lung timp de prelucrare al acestei suprafețe îi aparține frezei toroidale, la înclinarea de 55° .
15. Am constatat faptul că, cel mai scurt timp pentru prelucrarea suprafeței sferice concave a fost înregistrat de freza toroidală la unghiul de 55° , iar cel mai lung timp pentru prelucrarea acestei suprafețe s-a înregistrat prelucrând cu freza sferică la unghiul de 55° .
16. Am observat că pentru prelucrarea suprafeței sferice convexe, s-a realizat cel mai scurt timp cu freza toroidală la unghiul de înclinare al axei sculei de 15° și cel mai lung timp s-a înregistrat cu freza sferică la unghiul de 35° .
17. În ceea ce privește prelucrarea suprafeței cilindrice concave, cel mai scurt timp a fost obținut de freza sferică la unghiul de 55° , iar cel mai lung timp de prelucrare a fost realizat cu freza toroidală la unghiul de 15° .
18. Am observat că prelucrarea suprafeței cilindrice convexe a demonstrat cel mai scurt timp în cazul prelucrării cu freza sferică la unghiul de 55° , iar cel mai lung timp în cazul prelucrării cu freza toroidală la unghiul de 55° .
19. Am creat un dispozitiv capabil să poziționeze și să țină scula fixă la unghiul dorit pentru măsurarea uzurii de pe tăișul sculei.
20. Am constatat că cea mai mică uzură măsurată a fost în timpul prelucrării suprafețelor la unghiul de înclinare de 15° , cu freza toroidală. La polul opus, cea mai mare uzură o înregistrează prelucrarea suprafețelor la unghiul de 55° , cu freza sferică.
21. Am efectuat măsurători pentru aflarea valorilor rugozității totale R_t și rugozității mediei aritmetice R_a . Asupra fiecărei suprafețe s-a realizat 3 măsurători transversale și 3 măsurători longitudinale

cumulând 1620 de valori ale rugozității R_a și 1620 de valori ale rugozității R_t .

22. Am identificat în cazul prelucrării suprafeței plane, cea mai mică rugozitate R_a în timpul prelucrării cu freza toroidală și cea mai mică rugozitate R_t în timpul prelucrării tot cu freza toroidală.
23. Am observat în cazul prelucrării suprafeței sferice concave, cea mai mică rugozitate a suprafeței R_a în timpul prelucrării cu freza toroidală și cea mai mică rugozitate R_t în timpul prelucrării tot cu freza toroidală.
24. Am observat că în urma prelucrării suprafeței sferice convexe, cea mai mică rugozitate a suprafeței R_a s-a obținut în urma prelucrării cu freza toroidală și cea mai mică rugozitate R_t aparține prelucrării cu freza sferică.
25. Am identificat în cazul prelucrării suprafeței cilindrice concave, cea mai mică rugozitate a suprafeței R_a în timpul prelucrării cu freza sferică și cea mai mică rugozitate R_t tot în timpul prelucrării cu freza sferică.
26. Am observat că în timpul prelucrării suprafeței cilindrice convexe, cea mai mică rugozitate a suprafeței R_a îi aparține prelucrării cu freza sferică și cea mai mică rugozitate R_t aparține prelucrării tot cu freza sferică.
27. Am realizat imagini microscopice care confirmă că, în cazul suprafețelor plane, suprafețelor sferice convexe și suprafețelor sferice concave, prelucrarea cu freza toroidală a obținut cea mai bună rugozitate, iar în cazul suprafețelor cilindrice convexe și cilindrice concave, prelucrarea cu freza sferică are un avantaj din punctul de vedere al rugozității.
28. Am studiat 3 softuri capabile să genereze o rețea neuronală artificială și am decis folosirea softului MatLab.
29. Am obținut cu ajutorul softului MatLab o rețea neuronală artificială, capabilă să aproximeze rugozitatea suprafeței în funcție de neuronii de intrare și neuronii de ieșire.
30. Am efectuat o analiză statistică a erorilor de aproximare pe baza rețelei neuronale de aproximare.
31. Tot cu ajutorul softului MatLab, am realizat o altă rețea neuronală de prezicere ce are capacitatea de a prezice valori ale rugozității suprafeței, în funcție de noi valori ale variabilelor de proces decât cele existente în baza de date.

8.3. Direcțiile de cercetare viitoare

Având ca punct de pornire studiului unui număr însemnat de lucrări de cercetare, identificate pe plan național și internațional, având ca temă prelucrarea suprafețelor curbe complexe cu frezele toroidale pe centrele cu comandă numerică cât și ca urmare a experimentelor practice realizate au fost identificate următoarele direcții de cercetare:

1. Concepția și aplicarea unor noi soluții de prelucrare a suprafețelor cu freze toroidale;
2. Stabilirea de noi strategii în ceea ce privește prelucrarea suprafețelor curbe complexe, utilizând frezele toroidale;
3. Elaborarea unui model matematic în concordanță cu calitatea suprafeței prin utilizarea inteligenței artificiale;
4. Constituirea unui model matematic în concordanța cu uzura sculelor;
5. Dezvoltarea procesului de calcul al rețelei neuronale pentru aproximarea suprafețelor bazată pe logica fuzzy;
6. Comparația între freza toroidală și freza sferică din punct de vedere al preciziei suprafeței;
7. Comparația productivității la prelucrarea prin așchiere cu cele două tipuri de freze;
8. Cercetarea experimentală a variației rugozității suprafeței în cazul înclinării axei sculei așchietoare;
9. Analiza variației rugozității suprafeței prelucrate cu freze toroidale și a uzurii sculei așchietoare în condițiile practicării unui unghi de înclinare variabil.

8.4. Elemente de noutate aduse în cadrul acestei lucrări

Noutatea acestei lucrări este aceea de identificare a noilor strategii și metode de prelucrare ale suprafețelor curbe complexe. Aceste date își confirmă autenticitatea datorită obținerii experimental și confirmării acestora, prin utilizarea aparatelor de măsură optice de nouă generație cât și clasice.

Am dezvoltat un nou tip de test pentru a confirma datele obținute la teste cu simulările efectuate.

Am realizat un set de recomandări normative pentru frezele toroidale, în determinarea strategiei de prelucrare pentru suprafețele curbe complexe.

În cadrul lucrării, am soluționat o problemă tehnologică dificilă existentă la prelucrarea prin așchiere a suprafețelor curbe complexe, existând o linie de mijloc între calitatea suprafețelor, productivitatea și uzura sculelor.

Rezultatele cercetării doctorale sunt folosite în premieră, pentru procesul de prelucrare din cadrul societății S.C. Ramira S.A, ca obiectiv de creștere al productivității și calității produselor.

BIBLIOGRAFIE

- [1] F., ZGENG. J. and SEDERBERG, T. W. CHEN, "The μ - basis of a rational ruled surface," *Computer Aided Geometric Design*, vol. 18, pp. 61 – 72, 2001.
- [2] N., BEDI, S., BUCHAL, R. RAO, "Implementation of the principal axis method for machining of complex surfaces," *Int. J. Adv. Manufact. Tech*, vol. 11, pp. 249–257, 1996.
- [3] G.B. and QUAN, K.W. VIKERS, "Ball-Mills Versus End-Mills for Curved Surface Machining," *ASME Journal of Engineering for Industry*, vol. 111, pp. 22-26, 1989.
- [4] JUN. Y. T. and YANG. M. Y. CHO. H. D., "Five axis CNC milling for effective machining of sculptured surface," *International Journal of Production Research*, vol. 31, pp. 25-59, 1993.
- [5] S., ISMAIL, F., MAHJOOB. J, and CHEN, Y. BEDI, "Toroidal Versus Ball Nose and Flat Bottom End Mills," *International Journal of Machine Tools Manufacture*, vol. 13, pp. 326-332, 1997.
- [6] Y., ZHANG, W., MA, Y. C. YUN, "A solid trimming method to extract cutter- workpiece engagement maps for multi-axis milling,," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013.
- [7] Zhang. W.H. Wan. M., "Efficient calibration of instantaneous cutting force coefficients and run-out parameters for general end mills,," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 47, pp. 67-76, 2007.
- [8] ALTINTAS. Y. ENGIN. S., "Mechanics and dynamics of general milling cutters. Part I: helical end mills," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 41, pp. 2195–2212, 2001.
- [9] Kalveram. M., and Weinert. K. Gradisek. J., "Mechanistic identification of specific force coefficients for a general end mill," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 44, pp. 401-414, 2004.
- [10] Gao. G., Luo. M., Xie. G.N. Wu. B.H., "Prediction and experimental validation of cutting force for bull-nose end mills with lead angle," *AdvMechEng*, pp. 1–15, 2014.

- [11] W.R. WINFOUGH, "Issues of dynamics in high-speed milling of aluminum aircraft structures," *Philosophical Dissertation, University of Florida*, 1995.
- [12] Dvorak. D. Smith. S., "Tool path strategies for high speed milling aluminium workpieces with thin webs," *Mechatronics*, vol. 8, pp. 291-300, 1998.
- [13] KOPS.L. BUDAK. E., "Improving productivity and part quality in milling of titanium based impellers by chatter suppression and force control," *Annals of the CIRP*, vol. 49/1, pp. 31-32, 2000.
- [14] ZIAEI. R ISMAIL. F., "Chatter suppression in five-axis machining of flexible parts," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 42, pp. 115-122, 2002.
- [15] ALTINTAS. Y. LEE. P., "Predictions of ball-end milling forces from orthogonal cutting data," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 36, pp. 1059-1072, 1996.
- [16] ZHANG. H., ZHU. Z., WANG. J. PAN. Z., "Chatter analysis of robotic machining process," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 173, pp. 301-309, 2006.
- [17] S. A., SHIN, Y. C. JENSEN, "Stability analysis in face milling operation, Part - 1: Theory of stability lobe prediction," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 121, pp. 600-605, 1999.
- [18] A., LÓPEZ DE LACALLE, L. N., SÁNCHEZ, J. A., SALGADO, M. A. LAMIKIZ, "Cutting force estimation in sculptured surface milling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 44, pp. 1511-1526, 2004.
- [19] J. P., BEDI, S., ISMAIL, F., RAO, N. și MORPHY, G. GARAY, "Comparison of 5-Axs and 3-Axis Finish Machining of Hydroforming Die Inserts," *International Journal of Machine Tools Manufacture*, vol. 17, pp. 562-569, 2001.
- [20] ZQ. și LIU, Q. LI, "The cutting force coefficients recognition and dynamic force modeling of the R cutter," *Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery*, vol. 39, pp. 207-211, 2008.
- [21] R. and SIMOES, A. J. F. BAPTISTA, "Three and five axes milling of sculptured surfaces," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 103, pp. 398-403, 2000.
- [22] P. KEYAL, "Optimal ball-end and fillet-end mills selection for 3-

- axis finish machining of point-based surface," *International Journal of CAD/CAM*, vol. 7, 2007.
- [23] G. W., BEDI, S., și HAW, R. VIKERS, "The definition and manufacture of compound curved surfaces using g-surf," *Comp. Indust*, vol. 6, pp. 173-183, 1985.
- [24] C. G., MULLINS, S. H., and ANDERSON, D. C. JENSEN, "Scallop elimination based on calculation," *ASME Advances in Design Automation*, vol. 65, pp. 535-544, 1993.
- [25] S., and BUCHAL, R. BEDI, "Implementation of the principal- axis method for machining of complex surfaces," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 11, pp. 249-257, 1996.
- [26] A., BEDI, S., ISMAIL, F. WARKENTIN, "5-Axis milling of spherical surfaces," *Int. J. Mach. Tool Manufact.*, vol. 36, pp. 229-243, 1995.
- [27] N., ISMAIL, F. and BEDI, S. RAO, "Tool path planning for five-axis machining using the principal axis method," *International Journal of Machine Tools Manufacture*, vol. 37, pp. 1025-1040, 1997.
- [28] A., ISMAIL, F., BEDI, S. WARKENTIN, "Intersection approach to multi point machining of sculptured surfaces," *CADG*, vol. 4, pp. 63-70, 1998.
- [29] J. P., ISMAIL, F. și BEDI, S. GARAY, "Graphics-assisted Rolling Ball Method for 5-axis surface machining," *Computer Aided Design*, vol. 34, pp. 653-66, 2004.
- [30] C. K. TOH, "Cutter path orientations when high-speed finish milling inclined hardened steel," *Int J AdvManufTechnol*, vol. 27, pp. 473-480, 2006.
- [31] E. A., KRUTH, J. P., VANHERCK. P., LAUWERS. B. GANI, "A geometrical model of the cut in five-axis milling accounting for the influence of tool orientation," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 13, pp. 677-684, 1997.
- [32] A., BOUJELBENE, M., BEN, A., BAYRAKTAR, E., KATUNDI, D. DAYMIN, "Surface integrity in high speed end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V," *Materials Science and Technology*, vol. 27, pp. 387-394, 2011.
- [33] T. J., KIM, H. S., și LEE, S. S. KO, "Selection of the Machining InclinationAngle in High-Speed Ball End Milling," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol.

- 17, pp. 163-170, 2001.
- [34] D., DEWES, R., NG, E. ASPINWALL, "The influence of cutter orientation and workpiece angle on machinability when high-speed milling Inconel 718 under finishing conditions," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 47, pp. 1839–1846, 2007.
- [35] T., HWANG, Y. R. KALVODA, "Impact of various ball cutter tool positions on the surface integrity of low carbon steel," *Mater Design*, vol. 30, pp. 3360– 3366, 2009.
- [36] LAN. WEI-WEN., "Research of Inclination angle of high-speed ball-end cutter," *Machinery Design and Manufacture*, vol. 11, pp. 152-153, 2010.
- [37] F., ZHENG, M. L., YANG, Z. T. MIN, "Research of Surface Roughness in High-speed Ball-end Milling Al-alloy," *Journal of Harbin University of Science and Technology*, vol. 9, pp. 4-7, 2004.
- [38] OŞAN. A.R., BĂNICĂ.M, NĂSUI.V., "The influence of inclination of the axis of the toroidal tool on a flat surface soughness," *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 564, October 2019.
- [39] GE GAO,MING LUO, AND GONGNAN XIE. BAOHAI WU, ".The Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology," *Prediction and Experimental Validation of Cutting Force for Bull-Nose End Mills with Lead Angle*, 2014.
- [40] V., NĂSUI, COTEŢIU, R., LOBONŢIU, M. and UNGUREANU, N., *Bazele cercetării experimentale a actuatorilor electromecanici*, 9731729089th ed. Baia MARE, România: Editura Universităţii de Nord, 2007.
- [41] C. TUNC, "Further results on the instability of the solutions of certain nonlinear vector differential equations of fifth order," *Applied Mathematics & Information Sciences*, vol. 2, pp. 51 – 60, 2008.
- [42] COSMA. M., "Cercetări privind procesul de detaşare a aşchiei şi aspecte tribologice la frezarea în 3 axe cu freze cilindro-frontale cu cap sferic," *Teza de doctorat, Baia Mare, Universitatea de Nord din Baia Mare*, 2007.
- [43] I. T. CHAPPEL, "The use of vectors to simulate materials removed

- by numerically controlled milling," *Computer – Aided Design*, vol. 15, pp. 156 – 158, 1983.
- [44] A. A. G. and VOELCKER, H. B. REQUICHA, "Boolean Operations in Solid Modeling: Boundary Evaluation and Merging Algorithms," *Proceedings IEEE*, vol. 73, pp. 30 – 44, 1985.
- [45] R. O. ANDERSON, "Detecting and eliminating collisions in NC machining," *Computer – Aided Design*, vol. 10, pp. 231-237, 1978.
- [46] G. M., CHO, P. J. and CHU, C. N. KIM, "Cutting force prediction of sculptured surface ball – end milling using Z – map," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 40, pp. 277 – 291, 2000.
- [47] I. LAZOGLU, "Sculpture surface machining: a generalized model of ball – end milling force system," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, pp. 453 – 462, 2003.
- [48] W. H, BRONSVOORT, W. F. and VERGEEST, J. S. M. WALSTRA, "Interactive simulation of robot milling for rapid shape prototyping," *Computers & Graphics*, vol. 18, pp. 861 – 871, 1994.
- [49] Y. K., BANERJEE, A. and LEE, J. W. CHOI, "Tool path generation for free form surfaces using Bezier curves/surfaces," *Computers & Industrials Engineering*, vol. 52, pp. 486 - 501, 2007.
- [50] E. M., FENG, H. Y., MENQ, C. H. și LIN, Z. LIM, "The prediction of dimensional error for sculptured surface productions using the ball – end milling process. Part 1: Chip geometry analysis and cutting force prediction," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 35, pp. 1149 – 1169, 1995.
- [51] T., ELBESTAWI, M. A., EL – WARDANY, T. I. și FITZPATRICK, P. BAILEY, "Generic Simulation Approach for Five – Axis Machining, Part I: Modeling Methodology," *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, pp. 624 – 633, 2002.
- [52] T., ELBESTAWI, M. A., EL – WARDANY, T. I. și FITZPATRICK, P. BAILEY, "Generic Simulation Approach for Five – Axis Machining, Part II: Model Calibration and Feed Rate Scheduling," *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, pp. 634 – 642, 2002.
- [53] S., SURMANN, T., WEBBER, O. and WEINERT, K. DU, "Formulating swept profiles for five – axis tool motions," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 45, pp. 849 – 861, 2005.

- [54] E. and LAZOGLU, I. OZTURK, "Machining of Free – form Surfaces. Part 1: Analytical Chip Load," *International Journal of Machine Tool and Manufacture*, vol. 46, pp. 728– 735, 2006.
- [55] T. S. and LIN, Y. J. LEE, "A 3D Predictive Cutting-Force Model for End Milling of Parts Having Sculptured Surfaces," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 16, pp. 773-783, 2000.
- [56] B. M. and LAYEGH, E. IMANI, "Comprehensive Simulation of Surface Texture for End – Milling Process," *International Journal of Science & Technology, Scientia Irania, Sharif University of Technology*, vol. 15, 2008.
- [57] C., SLĂTINEANU, L. și GRĂMESCU, T. PICOȘ, "Contribuții privind determinarea analitică a rugozității suprafeței prelucrate prin așchiere," *Construcția de MAȘINI*, vol. 4, 1979.
- [58] H., ELBESTAWI, M. A., SPENCE, A.D. și BEDI, S. EL-MOUNARY, "General Geometric Modelling Approach for Machining Process Simulation," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 13, pp. 237 – 247, 1997.
- [59] HAO. M., KIKKAWA. K. and MIZUGAKI. Y. TERAJ. H., "Geometric Analysis of Undeformed Chip Thickness in Ball-nosed End Milling," *JSME International Journal*, vol. 47, pp. 2-7, 2004.
- [60] H., CHEN, L., FUJIMOTO, H., SHIRASE, K. și ARAI, E. NARITA, "Trial – less Machining using Virtual Machining Simulator for Ball – End Mill Operation. ," *Japan Society of Mechanical Engineers International Journal, Serie C*, vol. 49, pp. 50 – 55, 2006.
- [61] S. S. și MUNLIN, M. MACHANOV, "Optimal Sequencing of Rotation Angles for Five – Axis Machining," *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, vol. 35, pp. 41 – 54, 2007.
- [62] M. A. MUNLIN, "Virtual Five – Axis Milling Machine: Tool Path Generation and Simulation," *Thammasat International Journal of Science Technology*, vol. 9, 2004.
- [63] W. K., AFOUDA, A. and SZOLGAY, J. ZBIGNIEV, "Mathematical modelling," *Hidrology 2000, IAHS Publication*, vol. 171, 2000.
- [64] J. and DOUGLASS, K. S.. CALDWELL, "Mathematical Modelling – Case studies and Projects," *Kluwer Academic Publishers*, vol. 7, 2010.
- [65] H., M. Lewis – Beck, A. Bryman, T. ABDI, "Futing: Encyclopedia for

- Research Methods for the Social Sciences," *Thousand Oaks*, 2003.
- [66] A. NEALAN, "An as – short – as possible introduction to the least squares, weighted least squares and moving least squares methods for scattered data approximation and interpolation," *Technical report*, 1992.
- [67] K., NIELSEN, H. B. and TINGLEFF, O. MADSEN, "Methods for non – linear least squares problems. ," *2nd Edition, Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark*, 2004.
- [68] T. F., RAHEEM, O. A., and ABBAS, A. N. ABBAS, "Surface Fitting and Representation by Using 2D Least Squares Method in CAD Applications," *Engineering & Tehnology Journal*, vol. 29, pp. 1325 – 1437, 2011.
- [69] Y. and MOTORCU, A. R. SAHIN, "Prediction of surface roughness in machining of Carbon Steel by CVD coated cutting tools," *roceedings 8th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes*, pp. 141 – 147, 2004.
- [70] Y. and MOTORCU, A. R. SAHIN, "International Journal of Refractory Metals & Hard Materials," *Surface roughness model in machining hardened steel with cubic boron nitride cutting tool*, vol. 26, pp. 84 – 90, 2008.
- [71] C. BUZATU, "Modelarea rugozității suprafețelor prelucrate prin superfinisare pe baza volumului de material prelevat în unitatea de timp," vol. 8, pp. 85 – 90, 2007.
- [72] H. and KUMAR, P. SINGH, "Mathematical models of tool life and surface roughness for turning operation through response surface methodology," *Journal of Scientific & Industrial Research*, vol. 66, pp. 220 – 226, 2007.
- [73] S., SENTHILVELAN, T. și SRIRAM, G. RANGANATHAN, "Mathematical modelindg of process parameters on hard turning of AISI 316 SS by WC inserts," *Journal of Scientific & Industrial Research*, vol. 68, pp. 592 – 596, 2009.
- [74] C. M., ENSALIOGLU, C. and DEMIRAYAK, I. CEMAL, "Mathematical modeling of surface roughness for evaluating the effects of cutting parameters and coating material," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, pp. 102 – 109, 2009.
- [75] L., COTEAȚĂ, M., DODUN, O., MERTICARU, V. SLĂTINEANU, "Interactions at the machinability evaluation by facing test. ,"

Annals of the Oradea University, Fascicle of Management and Technological Engineering, vol. 7, pp. 1775 - 1778, 2008.

- [76] L., BOLIN, W. and ZHANG, L. ZHONG, "Prediction an experimental testing of spherical milling media wear rate," *Japan Institute of Metals*, vol. 46, pp. 2036 – 2040, 2005.
- [77] R. B. A. MOHAMMAD, "Modeling of milling process to predict surface roughness using artificial intelligent method," *Thesis for the award of the degree of Bachelor of Mechanical Engineering with Manufacturing Engineering*, 2009.
- [78] S., GÖLCÜ, M., SEMİZ, S., ERGÜR, H.S. AYKUT, "Modeling of cutting forces as function of cutting parameters for face milling of satellite 6 using an artificial neural network," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 190, pp. 199–203, 2007.
- [79] M., GÖKKAYA, H., TOKTAS, I., SUR, G. NALBANT, "The experimental investigation of the effects of uncoated, PVD- and CVDcoated cemented carbide inserts and cutting parameters on surface roughness in CNC turning and its prediction using artificial neural networks," *Robot Comput Integr Manuf*, vol. 25, pp. 211– 223, 2009.
- [80] A. M., HARON, H., SHARIF, S. ZAIN, "Prediction of surface roughness in the end milling machining using Artificial Neural Network," *Expert Systems with Applications*, vol. 37, pp. 1755–1768, 2010.
- [81] R. A., KHANI N., FAKHRABADI, M. M. S.D MAHDAVINEJAD, "Optimization of milling parameters using artificial neural network and artificial immune system ," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 26, pp. 4097-4104, 2012.
- [82] A. K. S. MEENU, "Optimized Prediction and Modeling Under End Milling Machining By ANOVA And Artificial Neural Network ," *IJERT*, vol. 2, 2013.
- [83] B., and CHEN, J. C. HUANG, "An in-process neural network-based surface roughness prediction (INN-SRP) system using a dynamometer in end milling operations," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 21, pp. 339–347, 2003.
- [84] S. L., and CHEN, J. C. SAMSON, "On-line surface roughness recognition systemusing artificial networks system in turning operations," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 22, pp. 498–509, 2003.

- [85] Y. H., CHEN, J. C., and LOU, S. J. TSAI, "An in-process surface recognition system based on neural networks in end-milling cutting operations," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 39, pp. 583–605, 1999.
- [86] M., BIELZA, C., PAMIES-TEIXEIRA, J. CORREA, "Comparison of Bayesian networks and artificial neural networks for quality detection in a machining process," *Expert Systems Appl*, vol. 36, pp. 7270–7279, 2009.
- [87] D.M., TETI, R. D'ADDONA, "Image data processing via neural networks for tool wear prediction," *Procedia CIRP*, vol. 12, pp. 252 – 257, 2013.
- [88] D., CELENT, L., JOZIĆ, S. BAJIĆ, "Modeling of the Influence of Cutting Parameters on the Surface Roughness, Tool Wear and Cutting Force in Face Milling in Off-Line Process Control," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 58, pp. 673-682, 2012.
- [89] T., CUS, F., PAULIC, M., BALIC, J. IRGOLIC, "Prediction of Cutting Forces with Neural Network by Milling Functionally Graded Material," *Procedia Engineering*, vol. 69, pp. 804 – 813, 2014.
- [90] I. N., BAO, W. Y., ARKAN, T. T., SHISLER, B., MCCOOL, M., SMITH, D. TANSEL, "Neural network based cutting force estimator for microend milling operations," *I.E.S. Through ANNs Proceedings of the 1997 Artificial Neural Networks in Engineering Conference*, vol. 7, pp. 885–890, 1997.
- [91] Z., NOLAN, D., CARPENTER, K. R., DUNNE, D. P., NORRISH J. STERJOVSKI, "Artificial neural networks for modelling the mechanical properties of steels in various applications," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 170, pp. 536-544, 2005.
- [92] U., CUS, F., REIBENSCHUH, M. ZUPERL, "Modeling and adaptive force control of milling by using artificial techniques," *J. intell. Manuf.*, vol. 23, pp. 1805–1815, 2012.
- [93] M. A., HAMZEHLOUIA, S., and MEARS, L. KUTTOLAMADOM, "Effect Of machining feed on surface roughness in cutting 6061 aluminum," *Int. J. Mater. Manuf*, vol. 3, pp. 108-119, 2010.
- [94] K. P., BHILARE, S. K., GAIKWAD, S. R. și PHATE, M. R. WARHADE, "Modeling and analysis of machining process using Response Surface Methodology," *International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development*, vol. 2, 2013.

- [95] N. B. Şİ LAKSHMANA SWAMY, N. DODDAPATTAR, "An optimization of machinability of aluminium alloy 7075 and cutting tool parameters by using Taguchi Techniqu," *International Journal of Mechanical Engineering And Technology*, vol. 3, pp. 480-493, 2012.
- [96] A. K. R., SHEOKAND, R. and SRIVASTAVA, R. K. MISHRA, "Tribological Behaviour of Al-6061/SiC Metal Matrix Composite by Taguchi's Techniques," *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 2, 2012.
- [97] M. N., AKDOĞAN, A., VANLI, A. S., and GÜNAY, A. DURAKBAŞA, "Determination of Cutting Tool Geometries with High Precise Measurement Techniques and Investigation of Their Effects on Workpiece Surface Properties," *12th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics. New Perspectives in Measurements, Tools and Techniques for Industrial Applications*, 2013.
- [98] U. D., BHAGWAT, M. P., CHAVAN, M. S., DHATKAR, S. A. and MAYEKAR, S. U. GULHANE, "Investigating the effect of machining parameters on surface roughness of 6061 aluminium alloy in end milling ," *International Journal of Mechanical Engineering And Technology*, vol. 4, pp. 134-140, 2013.
- [99] K., and VENKATESH, J. KRISHNAMURTHY, "Study on machining parameters of TIB2 reinforced aluminum 6063 composites," *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 3, 2013.
- [100] V. A. Şİ SIAMAK, G. ROGOV, "Optimization of Surface Roughness andVibration in Turning of Aluminum Alloy AA2024 Using Taguchi Technique.," *International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering*, vol. 7, 2013.
- [101] H. R. Şİ AMBEKAR, S. D. GHAN, "Review on Optimization of cutting parameter for Surface Roughness, Material Removal rate and Machining Time of Aluminium LM-26 Alloy," *International Journal of Research in Aeronautical and Mechanical Engineering*, vol. 2, pp. 23-28, 2014.
- [102] M., BABU, K. M., Şİ KUMAR, R. S. MURTHY, "Optimization of Machinability Parameters of Al6061 using Taguchi Technique," *International Journal of Current Engineering and Technology*, 2014.
- [103] ZHANG. W.H., DANG. J.W. WAN. M., "New procedures for

- calibration of instantaneous cutting force coefficients and cutter runout parameters in peripheral milling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, pp. 1144-1151, 2009.
- [104] ZHANG. W.-H., YANG. Y., WAN. M. DANG. J.-W., "Cutting force modeling for flat end milling including bottom edge cutting effect," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 50, pp. 986-997, 2010.
- [105] DIEZ. E., MARQUEZ. J.J., VIZAN. A. PEREZ. H., "An enhanced method for cutting force estimation in peripheral milling.," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013.
- [106] Xie. J., Xie. H.F., Li. L.H. Zhang. X.F., "Experimental investigation on various tool path strategies influencing surface quality and form accuracy of CNC milled complex freeform surface.," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 59, pp. 647-654, 2012.
- [107] RELVAS. C., SIMOES. J.A. RAMOS. A.M., "The influence of finishing milling strategies on texture, roughness and dimensional deviations on the machining of complex surfaces," *Journal of Materials Processing Technologies*, vol. 136, pp. 209-216, 2003.
- [108] TOH. C.K., "A study of the effects of cutter path strategies and orientations in milling," *Journal of Materials Processing Technologies*, vol. 152, pp. 346- 356, 2004.
- [109] Sandvik Coromant. (2018) [Online]. www.sandvik.coromant.com
- [110] ZABEL. A., MULLER. H. și KERSTING, P. WEINERT. K., "Optimizing of NC Tool Paths for Five Axis Milling using Evolutionary Algorithms on Wavelets," *Proceedings of the 8th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, pp. 1809-1816, 2006.
- [111] LOBONȚIU. M. și HĂȘMĂȘAN. M., "Milling Process Management," *Scientific Bulletin, Serie C, Fascicle Mechanics, Tribology, Machine Manufacturing Technology*, vol. 21, pp. 421-427, 2007.
- [112] CHOI. Y. K., "Tool path generation and 3D tolerance analysis for free form surfaces," *Thesis for Doctor of Philosophy, Texas A&M University*, 2004.
- [113] C. H. LIM. E. M. și MENQ, "Integrated planning for precision machining of complex surfaces. Part I: Cutting-path and feedrate

- optimization," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 37, pp. 61-75, 1997.
- [114] MENQ. C.H. and YEN. D.W. LIM. E.M., "Integrated planning for precision machining of complex surfaces-III. Compensation of dimensional errors," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 37, pp. 1313-1326, 1997.
- [115] Y. S. CHIOU. C. J. and LEE, "Five-Axis High Speed Machining of Sculptured Surface by Surface-Based NURBS Path Interpolation," *Computer-Aided Design & Applications*, vol. 4, pp. 639- 648, 2007.
- [116] SHIRASE. K., WAKAMATSU. H., TSUMAYA. A. and ARAI. E. NAKAMOTO. K., "Automatic production planning system to achieve flexible direct machining," *JSME International Journal, Mechanical Systems Machine Elements and Manufacturing*, vol. 47, pp. 136-143, 2004.
- [117] BENDIFALLAH. H. și MAZOUZI. M. BEY. M., "An Integrated Application for Seletion of Optimum Strategies and Tools for Finishing Free Form Surfaces," *Proceedings of the World Congress on Engineering*, vol. 2, pp. 1141-1146, 2007.
- [118] JABBER. A. M., "Studying curve interpolator for CNC system," *Thesis for the Degree of Master of Science in Production Engineering, University of Technology, Department of Production and Metallurgy Engineering, Republic of Iraq*, 2008.
- [119] BILALIS. N., SAVAKIS. C., MARAVELAKIS. E. and PETROPOULOS. G. ANTONIADIS. A., "Influence of machining inclination angle on surface quality in ball end milling," *Proceedings of the International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies*, vol. 8, pp. 8-11, 2003.
- [120] EIICHI. A., RYOJI. M. și HIDENORI. S. HIROGAKI. T., "Investigation of Ball Nose End-milled Cylindrical Surface with a Scanning Line Cutter Path-Estimation of Influence of Ball Nose Accuracy Using a Makyoh-topography Image Method," *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, vol. 73, pp. 96-101, 2007.
- [121] SCHUTZER. K. și FAGALI. S. A., "Interpolation Methods Analysis in High Speed Cutting of Free Form Surfaces," *Revista de Cience & Tecnologia*, vol. 11, pp. 29-36, 2004.
- [122] SANDVIK COROMANT, "Fabricação de Moldes e Matrizes," *Guia de Aplicação*, vol. 2, p. 202, 1999.

- [123] TOH. C.K., "Cutter path orientations when high-speed finish milling inclined hardened steel," *Intl. J. Adv. Manud. Technol*, vol. 27, pp. 473-480, 2006.
- [124] CHANG.H., WYSK.R.A.și CHANDAWARKAR. A. WANG. H., "On the efficiency of NC tool path planning for face milling operations," *L. Eng. Ind.*, vol. 109, pp. 370-376, 1987.
- [125] GRAMOPADHYE,A.K. și WANG. H.P. PRABHU. P.V., "A general mathematical model for optimizing NC tool path for face milling of flat convex polygonal surfaces," *Intl. J. Prod. Res*, vol. 28, pp. 101-130, 1990.
- [126] LAKKARAJU. R. și RAMAN. S., "Optimal NC path planning: Is it really possible?," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 19, pp. 462-464, 1990.
- [127] A.T.M. JAMIL, "A semi-analytical method of finding an optimum cutter pth for face milling 3-sided convex surfaces," *Intl. J. Prod. Res.*, vol. 36, pp. 343-355, 1998.
- [128] MONREAL. M. și RODRIGUEZ. C.A., "Influence of tool path strategy on the cycle time of high-speed milling," *Comput. Aided Dess*, vol. 35, pp. 395-401, 2003.
- [129] GOLOGLU. C. and SAKARYA. N., "The effects of cutter path strategies on surface roughness of pocket milling of 1.2738 steel based of Taguchi metod," *J. Mater. Process. Technol*, vol. 206, pp. 7-15, 2008.
- [130] DITU. V., "Bazele aschierii metalelor- Teorie si Aplicatii," *Editura Matrix Rom*, 2008.
- [131] KOENIG. W., BIEKER. R. și COBANOGLOU. M. EVERSHEIM. W., "T. NC Fraesbearbeitung von vergueteten schmiedegesenken.," *VDI-Z*, vol. 31, pp. 99-103, 1989.
- [132] WERNER. A., "Prozessauslegung und Prozesssicherheit beim einstazt von schlanken schaftfraesern," *TH Aachen*, 1993.
- [133] BIEKER. R., "CAM-gerechte technologie fuer die NCFraesbearbeitung von stahlhohlformen," *Diss. TH. Aachen*, 1991.
- [134] EFSTATHIOU. K., ANTONIADIS. A., CHARACHALIOU. C. și AICHOUH. P. BOUZAKIS. K. D., "Analytical experimental determination of surface roughness in milling. Balkantrib'96," *International Conference on Tribology, Thessaloniki*, 1996.
- [135] TAHAT. M.S. and BLUHM. J.A HAYAJNEH. M.T., "Study of the

effects of machining parameters on the surface roughness in the end milling process.," *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, vol. 1, pp. 1-5, 2007.

- [136] HUYNH. V. M. and FAN. Y., "Surface texture measurement and characterization with applications to machine-tool monitoring," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 7, pp. 2-10, 1992.
- [137] REDDY. S. and REDDY. V. K. KRISHNA. J., "Modeling of machining parameters in CNC end milling using principal component analysis based neural networks," *Innovative Systems Design and Engineering*, vol. 2, 2011.
- [138] SHATHER. S.K. and KHALAF. K.A. IBRAHEEM. A.F., "Prediction of cutting forces by using machine parameters in end milling process," *End & Tech*, vol. 26, pp. 1-4, 2008.
- [139] PENG. F. Y., CHEN. X. B. and WEI. L. F. LUO. Z. C., "Prediction and simulation of surface topomorphy in ultraprecision milling for optical freeform surface," *Journal of Vacuum Science and Technology B*, vol. 27, 2009.
- [140] PALANIRADJA. K. and ALAGUMOORTHY. N. AROKIADASS. R., "Predictive modeling of surface roughness in end milling of Al/SiCp metal matrix composite.," *Archives of Applied Science Research*, vol. 3, pp. 228-236, 2011.
- [141] MONKOVA. K. and HLOCH. S. MIŠIK. L., "Factor analysis affecting the roughness at side milling," *The Open Industrial and Manufacturing Engineering Journal*, vol. 2, pp. 10-13, 2009.
- [142] AHMAD.N HOSSAIN. S.J., "Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) based surface roughness prediction model for ball end milling operation ," *Journal of Mechanical Engineering Research*, vol. 4, pp. 112-129, Martie 2012.
- [143] KOENIG. W., BIEKER. R. and COBANOGLOU. M. EVERSHEIM. W., "Effect of the multiaxis milling kinematics on the chip formation and cutting forces and herewith on the surface roughness," *T. NC Fraesbearbeitung von vergueteten schmiedegesenken*, vol. 31, pp. 99-103, 1989.
- [144] WERNER. A., "Prozessauslegung und Prozesssicherheit beim einstanz von schlanken schaftfraesern," *TH Aachen*, 1993.
- [145] BIEKER. R., "CAM-gerechte technologie fuer die

- NCFraesbearbeitung von stahlhohlformen," *TH. Aachen*, 1991.
- [146] EFSTATHIOU. K., ANTONIADIS. A., CHARACHALIOU. C.și AICHOUH. P. BOUZAKIS. K. D., "Analytical experimental determination of surface roughness in milling," *International Conference on Tribology, Thessaloniki*, pp. 131-140, 1996.
- [147] HUYNH. V. M. and FAN. Y., "Surface texture measurement and characterization with applications to machine-tool monitoring," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 7, pp. 2-10, 1992.
- [148] TONSHOFF. H. K. and HERNANDEZ. C. J., "Die manufacturing by-5 and 3-axis milling," *Mechanical Working Technology*, vol. 20, pp. 105-119, 1998.
- [149] SADILEK. M. and CEP. R., "Progressive Strategy of Milling by means of Tool Axis Inclination Angle," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 53, pp. 661-665, 2009.
- [150] SHIMIZU. K. and SASAKI. M. IWABE. H., "Analysis of Cutting Mechanism by Ball End Mill using 3D-CAD," *JSME International Journal*, vol. 49, pp. 28-34, 2006.
- [151] PAȘCA. I., "Experimental research about variation of surface roughness for different inclination angle in ball end milling of C45 material," *Proceedings of The 16th International Conference of Modern Technologies, Quality and Innovation*, vol. 2, pp. 709-712, 2012.
- [152] PAȘCA. I. and LOBONȚIU. M., "Experimental research and mathematical modeling on the surface roughness in ball end milling of C45 material," *Proceedings of The 15th International Conference of Modern Technologies, Quality and Innovation*, vol. 1, pp. 813-817, 2011.
- [153] PAȘCA. I. and LOBONȚIU. M., "Experimental research about influence of inclination angle direction upon the surface roughness in ball end milling of OLC45 (C45) material.," *The 16th International Conference, New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies*, vol. 18, pp. 277-282, 2011.
- [154] NAKAMURA. K. and MIZUGAKI. Y. KIKKAWA. K., "An approach of Estimating Machining Error by Heuristic Geometrical Rule in 5-Axis Ball-Nosed End Milling," *JSME International Journal*, vol. 47, pp. 79-84, 2005.

- [155] G. M., KIM. B. H. and CHU. C.N. KIM, "Estimation of Cutter Deflection and Form Error in Ball-End Milling Processes," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, pp. 917-924, 2003.
- [156] TOH. C.K., "Cutter Path Orientations When High-Speed Finish Milling Inclined Hardened Steel," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 27, pp. 473- 480, 2005.
- [157] BAKER. M., "Finite element investigation of the flow stress dependence of chip formation," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 167, pp. 1-13, 2004.
- [158] TUNC. L. T. and BUDAK. E. OZTURK. E., "Investigation of lead and tilt angle effects in 5-axis ball-end milling processes," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, pp. 1053-1062, 2009.
- [159] ANTONIADIS. A., SAVAKIS. C. and GOTSIS. P. VIDAKIS. N., "Simulation of ball end tools milling," *Proceedings of International Conference on Production Research*, 2001.
- [160] LIU. X., ZHANG. X. and YAMAZAKI. K. SAHASRABUDHE. A., "Theoretical and Experimental Study on Surface Finish for Multi-Axis CNC Milling," *ASPE Proceedings, 18th Annual Meetings, Portland Oregon.*, 2003.
- [161] HOOVER. A. M., HARTNETT. J. DORNFELD. D. A. VIJAYARAGHAVAN. A., "Improving endmilling surface finish by workpiece rotation and adaptive toolpath spacing," *International Journal of Machine Tools&Manufacture*, vol. 49, pp. 89-98, 2009.
- [162] NAKAMOTO. K., ISHIDA. T. and TAKEUCHI. Y. HIKICHI. T., "Tool Path Generation for 5-Axis Control Machining Considering the Quality of Machined Surface.," *Proceedings of 5th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21ST Century*, vol. 21, pp. 107-112, 2009.
- [163] K. J. KALINSKI, "On a method of modelling and simulation of vibration surveillance during ball end milling of flexible details," *Transactions of the VSB- Technical University of Ostrava, Mechanical Series*, vol. 7, pp. 119-124, 2006.
- [164] BUDAK. E. and OZLU. E., "Development of a thermomechanical cutting process model for machining," *CIRP Annals, Manufacturing Technology*, vol. 57, pp. 97-100, 2008.

- [165] MOISAN. A., BOUZID. W. and TORBATY. A. BOUJELBENE. M., "Variation cutting speed on the five axis milling," *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 21, pp. 7-14, 2007.
- [166] MORISHIGE. K. and TAKEUCHI. Y. JAPITANA. F.H., "Six-Axis Controlled Ultrasonic Vibration Cutting in Fabrication of a Sharp Corner," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 21, p. 564, 2003.
- [167] TOH. C.K., "Cutter path orientations when high-speed finish milling inclined hardened steel," *Intl. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 27, pp. 473-480, 2006.
- [168] BUDAK. E. and OZLU. E., "Development of a thermomechanical cutting process model for machining," *CIRP Annals, Manufacturing Technology*, vol. 57, pp. 97-100, 2008.
- [169] and ZHAO. J., HAN. S.G., "Effect of Tool Inclination Angle on Surface Quality in 5-Axis Ball-End Milling. ," *Advanced Materials Research*, vol. 97, pp. 2080-2084, 2010.
- [170] SCHULZ. H. and HOCK. ST., "High speed milling of dies and moulds-cutting conditions and technology," *Annals of CIRP*, vol. 44, pp. 35-38, 1995.
- [171] A. CÎRSTOIU, *Modelare matematică privind calitatea suprafețelor prelucrate*, 9789737122988th ed. Târgoviște, România: Editura Bibliotheca, 2007.
- [172] M., OPREAN, C. & BOROIU, A. ȚÎȚU, *Cercetarea experimentală aplicată în creșterea calității produselor și serviciilor*. București, România: Editura AGIR, 2011.
- [173] V. BÎRLE, *Bazele economie*. Baia Mare, România: Editura Universității de Nord, 2011.
- [174] Y., ÖZEL, T. KARPAT, "Multi-objective optimization for turning processes using neural network modeling and dynamicneighborhood particle swarm optimization," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 35, pp. 234-247, 2007.
- [175] F., ZUPERL, U. CUS, "Approach to optimization of cutting conditions by using artificial neural networks," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 173, pp. 281-290, 2006.
- [176] D., RAO, P.V. SINGH, "A surface roughness prediction model for hard turning process," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 32, pp. 1115-

1124, 2007.

- [177] A.P. PAIVA, E. J., FERREIRA, J. R., BALESTRASSI, P. P., COSTA, S.C. PAIVA, "A multivariate mean square error optimization of AISI 52100 hardened steel turning," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 43, pp. 631–643, 2009.
- [178] T., SEVARAJ, T., HAQ, A.N. TAMIZHARASAN, "Analysis of tool wear and surface finish in hard turning," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 28, pp. 671–679, 2006.
- [179] G., FILICE, L., SHIVPURI, R., UMBRELLO, D. AMBROGIO, "Application of NN technique for predicting the in-depth residual stresses during hard machining of AISI 52100 steel," *Int J Material Forming*, vol. 1, pp. 39–45, 2008.
- [180] A. C., DABADE, U. A., SUHAS, S. J, BHANUPRASAD, V. V. BASHEER, "Modeling of surface roughness in precision machining of metal matrix composites using ANN," *J Mater Process Technol*, vol. 197, pp. 439–444, 2008.
- [181] V. S., DHIMAN, S., SEHGAL, R., SHARMA, S. K. SHARMA, "Estimation of cutting forces and surface roughness for hard turning using neural networks," *J Intell Manuf*, vol. 19, pp. 473–483, 2008.
- [182] T., KARPAT, Y. ÖZEL, "Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 45, pp. 467–479, 2005.
- [183] P. G., VOSNIAKOS, G.C. BENARDOS, "Predicting surface roughness in machining: a review," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 43, pp. 833–844, 2003.
- [184] H. ÖKTEM, "An integrated study of surface roughness for modelling and optimization of cutting parameters during end milling operation," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 43, pp. 852–861, 2009.
- [185] D. KARAYEL, "Prediction and control of surface roughness in CNC lathe using artificial neural network," *J Mater Process Technol*, vol. 209, pp. 3125–3137, 2009.
- [186] H., KISHAWY, H., BRICENO, J. EL-MOUNAYRI, "Optimization of CNC ball end milling: a neural network-based model," *J Mater Process Technol*, vol. 166, pp. 50–62, 2005.
- [187] D. W., JACKSON, B. T., SMITH, A. E. COIT, "Static neural network

- process models: considerations and case studies," *Int J Prod Res*, vol. 36, pp. 2953–2967, 1998.
- [188] E. O., FADARE, D. A., BONNEY, J., DA SILVA, R. B., SALES, W. F. EZUGWU, "Modelling the correlation between cutting and process parameters in high-speed machining of Inconel 718 alloy using an artificial neural network," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 45, pp. 1375– 1385, 2005.
- [189] K., MITRA, S. PALS, "Neuro-fuzzy pattern recognition: methods in soft computing," *John Wiley & Sons Inc.*, 1999.
- [190] S., HAYKIN, "Neural networks and learning machines," *Pearson Prentice Hall*, 2008.
- [191] C. M. BISHOP, "Pattern recognition and machine learning," *Springer Business-Media*, 2007.
- [192] W. S., PITTS, W. MCCULLOCH, "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity," *Bull Math Biophys*, vol. 5, pp. 115–133, 1943.
- [193] D. O. HEBB, "The organization of behavior. ," *Wiley*, 1949.
- [194] F. ROSENBLATT, "The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain," *Psychol Revue*, vol. 65, pp. 386–408, 1958.
- [195] B., HOFF, M. WIDROW, "Adaptative switching circuits. Institute of Radio Engineers," *Western Electronic Show and Convention*, 1960.
- [196] M., PAPER, S. MINKSY, "Perceptrons: an introduction to computational geometry," *MIT Press*, 1969.
- [197] J. J. HOPFIELD, "Neural networks and physical systems with emergent collective properties," *Proc Natl Acad Sci*, vol. 79, pp. 254– 255, 1982.
- [198] T. KOHONEN, "Self-organized formation of topologically correct feature maps," *Biol Cybern*, vol. 43, pp. 49–59, 1982.
- [199] D. E., HINTON, G. E., WILLIAMS, R. J. RUMELHART, "Learning representations by back-propagating errors. ," *Nature*, vol. 323, pp. 533–536, 1986.
- [200] A. AL-AHMARI, "Predictive machinability models for a selected hard material in turning operations," *J Mater Process Technol*, vol. 190, pp. 305–311, 2007.
- [201] B. SICK, "On-line and indirect tool wear monitoring in turning with artificial neural networks: a review of more than a decade of

- research," *Mech Syst Signal Process*, vol. 16, pp. 487–546, 2002.
- [202] E. O., ARTHUR, S. J., HINES, E. L. EZUGWU, "Tool-wear prediction using artificial neural networks," *J Mater Process Technol*, vol. 49, pp. 255–264, 1995.
- [203] P. Y., HWANG, Y. D. CHAO, "An improved neural network model for the prediction of cutting tool life," *J Intell Manuf*, vol. 8, pp. 107–117, 1997.
- [204] W. T., CHOU, C. Y. CHIEN, "The predictive model for machinability of 304 stainless steel," *J Mater Process Technol*, vol. 118, pp. 442–447, 2001.
- [205] K. M., WANG, P. J. TSAI, "Predictions on surface finish in electrical discharge machining based upon neural network models," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 41, pp. 1385–1403, 2001.
- [206] P. G., VOSNIAKOS, G. C. BENARDOS, "Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and Taguchi's design of experiments," *Robot Comput Integr Manuf*, vol. 18, pp. 343–354, 2002.
- [207] J. P., GAITONDE, V. N., KARNIK, S.R. DAVIM, "Investigations into the effect of cutting conditions on surface roughness in turning of free machining steel by ANN models," *J Mater Process Technol*, vol. 205, pp. 16–23, 2008.
- [208] T., KARPAT, Y., FIGUEIRA, L., DAVIM, J. P. ÖZEL, "Modelling of surface finish and tool flank wear in turning of AISI D2 steel with ceramic wiper inserts," *J Mater Process Technol*, vol. 189, pp. 192–198, 2007.
- [209] S., GHOREISHI, M. ASSARZADEH, "Neural-network-based modeling and optimization of the electro-discharge machining process," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 39, pp. 488–500, 2008.
- [210] M. I., AMIN, A., PATWARI, A. U. HOSSAIN, "Development of an artificial neural network algorithm for predicting the surface roughness in end milling of Inconel 718 Alloy," *roceedings of the International Conference on Computer and Communication Engineering*, pp. 1321–1324, 2008.
- [211] S. S., MAHAPATRA, S. S. PANDA, "PCA fused NN approach for drill wear prediction in drilling mild steel specimen," *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology*, pp. 85–89, 2009.

- [212] H., XU, M., SU, Y.C., FU, P., LIU, Q. GAO, "Experimental study of tool wear monitoring based on neural networks, intelligent control and automation," *Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, pp. 6906–6910, 2008.
- [213] B. P., CHEN, J. C., LI, Y. HUANG, "Artificial-neural-networksbased surface roughness Pokayoke system for end-milling operations," *Neurocomputing*, vol. 71, pp. 544–549, 2008.
- [214] V. G., KUMAR, S., VICHARE, P., NEWMAN, S. T., ALLEN, R. D. DHOKIA, "Surface roughness prediction model for CNC machining of polypropylene," *Proc Inst Mech Eng B: J Eng Manuf*, vol. 222, pp. 137– 153, 2008.
- [215] C., WEN, A., CHEN, V. C. P. CERVELLERA, "Neural network and regression spline value function approximations for stochastic dynamic programming," *Comput Oper Res*, vol. 34, pp. 70–90, 2007.
- [216] S. R., GAITONDE, V. N., DAVIM, J. P. KARNIK, "A comparative study of the ANN and RSM modeling approaches for predicting burr size in drilling," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 38, pp. 868–883, 2008.
- [217] E., İŞIK, B. BAGCI, "Investigation of surface roughness in turning unidirectional GFRP composites by using RS methodology and ANN," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 31, pp. 10–17, 2006.
- [218] C., MINKU, F. L., LUDERMIR. T. B. ZANCHETTIN, "Design of experiments in neuro-fuzzy systems," *Proceedings of the 5th International Conference on Hybrid Intelligent Systems*, pp. 218–226, 2005.
- [219] G. K., RANGAJANARDHAA, G., HANUMANTHA RAO, D., SREENIVASA RAO, M. MOHANA RAO, "Development of hybrid model and optimization of surface roughness in electric discharge machining using artificial neural networks and genetic algorithm," *J Mater Process Technol*, vol. 209, pp. 1512–1520, 2009.
- [220] J. M., MARTÍNEZ-BLANCO, M. R., VEGA-CARRILLO, H. R. ORTIZ-RODRÍGUEZ, "Robust design of artificial neural networks applying the Taguchi methodology and DOE," *Proceedings of the Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference*, vol. 2, pp. 131–136, 2006.
- [221] R. TSAY, "Analysis of financial time series," *Wiley-Interscience*, 2005.

- [222] S., NESELI, S., SARITAS, S. Y. TASDEMIRS, "Prediction of surface roughness using artificial neural network in lathe," *Proceedings of the 9th International Conference on Computer Systems and Technologies and Workshop*, vol. 374, 2008.
- [223] Zakir Dugla, și Haiyan Deng, Hazim El-Mounayri, "Prediction of Surface Roughness in End Milling using Swarm Intelligence," *IEEE, Indianapolis, USA*, 2003.
- [224] S., BALIC, J., CUS, F. KLANCNIK, "Intelligent prediction of milling strategy using neural networks," *Control Cybern*, vol. 39, pp. 9-22, 2010.
- [225] G., JURKOVIC, Z. CUKOR, "Optimization of turning using evolutionary algorithms," *Technical Gazette*, vol. 30, pp. 1-10, 2010.
- [226] OȘAN. A, "Experimental Research on the Processing of Convex Spherical Surfaces with Toroidal Mills Versus Spherical Mills," *Magazine of Hydraulics, Pneumatics, Tribology, Ecology, Sensorics, Mechatronics. Hidraulica*, vol. 4, 2019.
- [227] OȘAN. A., BĂNICĂ. M. ȘI NĂSUI. V., "Processing of Convex Complex Surfaces with Toroidal Milling Versus Ball Nose End Mill," *MATEC Web Conf. The 22nd edition of Innovative Manufacturing Engineering & Energy International Conference - ImanE&E 2018, Chișinău*, vol. 178, 2018.
- [228] OȘAN. A., BĂNICĂ. M. ȘI NĂSUI. V., "PROCESSING OF PLANE SURFACES WITH TOROIDAL MILLING VERSUS BALL NOSE END MILL," *ACTA TECHNICA NAPOCENSIS - Series: APPLIED MATHEMATICS, MECHANICS, and Engineering*, vol. 62, no. 4, 2019.
- [229] OȘAN. A., BĂNICĂ. M. ȘI NĂSUI. V., "The Experimental Research Methodology of Toroidal Cutting Processes," *SCIENTIFIC BULLETIN, Serie C, Fascicle: Mechanics, Tribology, Machine Manufacturing Technology*, vol. 2018, no. 32, pp. 2-5, 2018.
- [230] OȘAN. A., BĂNICĂ. M, ȘI NĂSUI. V., "The influence of inclination of the axis of the toroidal tool on a flat surface roughness," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 564.
- [231] OȘAN. A., COSMA. M. ȘI NĂSUI V., "Milling convex surfaces with toroidal cutting edge," *International Conference on Innovative Ideas in Science and Social and Technological Development*, 2018.

[232] OȘAN.A, "Improving roughness using toroidal milling for complex surface processing," *Magazine of Hydraulics, Pneumatics, Tribology, Ecology, Sensorics, Mechatronics. Hidraulica*, vol. 1, pp. 24-31, 2018.

LISTA FIGURILOR

Figura 1.1 Geometria generală a sculei	14
Figura 1.2 Forma frezei cilindro-frontale, sferice și toroida.....	15
Figura 1.3 Diferite tipuri de freze monobloc și profilele muchiilor așchietoare.....	16
Figura 1.4 Scula toroidală.....	16
Figura 1.5 Profilul sculei de-a lungul și în sensul normal de avans.....	17
Figura 1.6 Geometria diferitelor scule monobloc	17
Figura 1.7 Geometria frezei toroidale.....	18
Figura 1.8 Modelul geometric cu unghiul de avans	20
Figura 1.9 Formarea calotelor.....	21
Figura 1.10 Cercul care generează suprafața piesei de prelucrat folosind o freza toroidală	22
Figura 1.11 Înălțimea asperităților pentru freza sferică.....	23
Figura 1.12 Diagrama de calcul a înălțimii asperităților pentru o freză cilindro-frontală.....	24
Figura 1.13 Înălțimile asperităților produsă de cele trei freze pentru $\theta = 10^\circ$	25
Figura 1.14 Înălțimile asperităților produse de cele trei freze pentru $\theta = 5^\circ$	25
Figura 1.15 Înălțimile asperităților produse de cele trei freze pentru $\theta = 2,5^\circ$	26
Figura 1.16 O freză toroidală care prelucrează o suprafață convexă în care tangența este un cerc complet de diametru D_e	27
Figura 1.17 Freza toroidală la generarea unei suprafețe concave.....	28
Figura 1.18 Poziționarea unei freze toroidale înclinate.....	29
Figura 1.19 Metoda axei principale.....	29
Figura 1.20 Specificarea unei poziții a unui tăiș toroidal prin MPM.....	30

Figura 1.21 Geometria contactului multi-punct.....	31
Figura 1.22 Efectul raportului de separare în prelucrarea în mai multe puncte.....	31
Figura 1.23 Determinarea poziției sculei.....	32
Figura 1.24 Patru orientări tipice ale sculei.....	33
Figura 1.25 Zona de intersecție dintre sculă și a piesei la unghiuri de înclinare diferite.....	34
Figura 2.1 Cele 4 blocuri funcționale ale frezării dinamice.....	40
Figura 2.2 Compararea a două procedee de prelucrare.....	41
Figura 2.3 Strategii de prelucrare.....	42
Figura 2.4 Schema logică de alegere a strategiei optime de prelucrare.....	42
Figura 2.5 Schema logică pentru alegerea strategiei optime de prelucrare.....	43
Figura 2.6 Strategii de prelucrare.....	43
Figura 2.7 Influența parametrilor procesului de strunjire asupra rugozității.....	54
Figura 2.8 Frezarea în sensul avansului.....	55
Figura 2.9 Frezarea contra avansului.....	56
Figura 2.10 Mișcări specifice prelucrării pe mașini unelte cu 5 axe.....	59
Figura 2.11 Sisteme de coordonate și unghiuri de înclinare a sculelor.....	60
Figura 2.12 Zona de angajare în direcții diferite.....	61
Figura 2.13 Poziția sculei fără unghi de înclinare ((a) $\lambda = 0$) și cu unghi de înclinare ((b) $\lambda \neq 0$).....	61
Figura 2.14 Zona de angajare a sculei și a piesei de prelucrat sub unghiuri diferite de avans și înclinare.....	62
Figura 3.1 Proiectarea generală a cercetării.....	67
Figura 3.2 Modelul procesului.....	68
Figura 3.3 Interpretarea rezultatelor experimentale.....	68
Figura 3.4 Modelarea matematică a rezultatelor xperimentale..	69
Figura 3.5 Schema standului experimental.....	70
Figura 3.6 Reprezentarea grafică a celor două freze.....	72
Figura 3.7 Strategia de cercetare proprie.....	74
Figura 3.8 Matricea ortogonală în concordanță cu metoda	

Taguchi pentru alegerea valorilor fiecărui experiment.....	80
Figura 4.1 Centrul cu comandă numerică OKUMA MU-400VA...	85
Figura 4.2 Reprezentarea grafică a spațiului de lucru.....	86
Figura 4.3 Forma 3D a celor 5 tipuri de suprafețe.....	86
Figura 4.4 Prezentarea vizuală a celor două freze.....	87
Figura 4.5 Cele 270 de plăcuțe pregătite pentru operația de finisare.....	87
Figura 4.6 Imagini preluate în urma simulării traiectoriei frezei toroidale în PowerMILL.....	91
Figura 4.7 Imagini preluate în urma simulării traiectoriei frezei sferice în PowerMILL.....	91
Figura 4.8 Prelucrarea suprafeței plane cu freza toroidală în cazul celor 3 tipuri de înclinări.....	92
Figura 4.9 Prelucrarea suprafeței plane cu freza sferică în cazul celor 3 tipuri de înclinări.....	92
Figura 4.10 Suprafețele plane prelucrate cu cele două tipuri de freze pregătite pentru măsurare.....	92
Figura 4.11 Imagini preluate în urma simulării traiectoriei frezei toroidale în PowerMILL asupra SFCV-TR.....	95
Figura 4.12 Imagini preluate în urma simulării traiectoriei frezei sferice în PowerMILL asupra SFCV-SF.....	95
Figura 4.13 Prelucrarea suprafeței sferice concave cu freza toroidală în cazul celor 3 tipuri de înclinări.....	95
Figura 4.14 Prelucrarea suprafeței sferice concave cu freza sferică în cazul celor 3 tipuri de înclinări.....	95
Figura 4.15 Suprafețele sferice concave prelucrate cu cele două tipuri de freze pregătite pentru măsurare.....	96
Figura 4.16 Imagini preluate în urma simulării traiectoriei frezei toroidale în PowerMILL asupra SFCX-TR.....	98
Figura 4.17 Imagini preluate în urma simulării traiectoriei frezei sferice în PowerMILL asupra SFCX-SF.....	99
Figura 4.18 Prelucrarea suprafeței sferice convexe cu freza toroidală în cazul celor 3 tipuri de înclinări.....	99
Figura 4.19 Prelucrarea suprafeței sferice convexe cu freza sferică în cazul celor 3 tipuri de înclinări.....	99
Figura 4.20 Suprafețele sferice convexe prelucrate cu cele două tipuri de freze pregătite pentru măsurare.....	100
Figura 4.21 Imagini preluate în urma simulării traiectoriei frezei toroidale în PowerMILL asupra CICV-TR.....	102
Figura 4.22 Imagini preluate în urma simulării traiectoriei frezei	

toroidale în PowerMILL asupra CICV-SF.....	103
Figura 4.23 Prelucrarea suprafeței cilindrice concave cu freza toroidală în cazul celor 3 tipuri de înclinări.....	103
Figura 4.24 Prelucrarea suprafeței cilindrice concave cu freza sferică în cazul celor 3 tipuri de înclinări.....	103
Figura 4.25 Suprafețele cilindrice concave prelucrate cu cele două tipuri de freze pregătite pentru măsurare.....	104
Figura 4.26 Imagini preluate în urma simulării traiectoriei frezei toroidale în PowerMILL asupra CICX-TR.....	106
Figura 4.27 Imagini preluate în urma simulării traiectoriei frezei toroidale în PowerMILL asupra CICX-SF.....	107
Figura 4.28 Prelucrarea suprafeței cilindrice convexe cu freza toroidală în cazul celor 3 tipuri de înclinări.....	107
Figura 4.29 Prelucrarea suprafeței cilindrice convexe cu freza sferică în cazul celor 3 tipuri de înclinări.....	107
Figura 4.30 Suprafețele cilindrice convexe prelucrate cu cele două tipuri de freze pregătite pentru măsurare.....	108
Figura 4.31 Microscop MM1-200.....	109
Figura 4.32 Poziționarea sculei pentru măsurarea uzurii tăișului.....	111
Figura 4.33 Comparația uzurii sculei sferice și toroidale în urma prelucrării la unghiul de 15°.....	111
Figura 4.34 Comparația uzurii sculei sferice și toroidale din timpul prelucrării la unghiul de 35°.....	112
Figura 4.35 Comparația uzurii sculei sferice și toroidale din timpul prelucrării la unghiul de 55°.....	113
Figura 4.36 Piese prelucrate cu cele 6 freze.....	113
Figura 4.37 Diagrama timpilor de bază pentru prelucrarea suprafeței plane.....	114
Figura 4.38 Graficul timpilor de bază în cazul prelucrării suprafeței sferice concave.....	115
Figura 4.39 Analiza grafică a timpilor de bază pentru prelucrarea suprafeței sferice convexe.....	116
Figura 4.40 Graficul timpilor de bază pentru prelucrarea suprafeței cilindrice concave.....	116
Figura 4.41 Graficul timpilor de bază pentru prelucrarea suprafeței cilindrice convexe.....	117
Figura 5.1 Suprafețele, standul și microscopul stereoscopic pregătit pentru măsurare.....	120
Figura 5.2 Media aritmetică Ra a suprafeței plane prelucrată cu	

freza sferică.....	122
Figura 5.3 Media rugozității totale R_t a suprafeței plane prelucrată cu freza sferică.....	124
Figura 5.4 Media aritmetică R_a a suprafeței plane prelucrată cu freza toroidală.....	123
Figura 5.5 Media rugozității totale R_t a suprafeței plane prelucrată cu freza toroidală.....	125
Figura 5.6 Media aritmetică R_a a suprafeței sferice concave prelucrate cu freza sferică.....	126
Figura 5.7 Media rugozității totale R_t a suprafeței sferice concave prelucrate cu freza sferică.....	127
Figura 5.8 Media aritmetică R_a a suprafeței sferice concave prelucrate cu freza toroidală	128
Figura 5.9 Media rugozității totale R_t a suprafeței sferice concave prelucrate cu freza toroidală.....	129
Figura 5.10 Media aritmetică R_a a suprafeței sferice convexe prelucrate cu freza sferică.....	131
Figura 5.11 Media rugozității totale R_t a suprafeței sferice convexe prelucrate cu freza sferică.....	131
Figura 5.12 Media aritmetică R_a a suprafeței sferice convexe prelucrate cu freza toroidală.....	133
Figura 5.13 Media rugozității totale R_t a suprafeței sferice concave prelucrate cu freza toroidală.....	133
Figura 5.14 Media aritmetică R_a a suprafeței cilindrice concave prelucrate cu freza sferică.....	135
Figura 5.15 Media rugozității totale R_t a suprafeței cilindrice concave prelucrate cu freza sferică.....	135
Figura 5.16 Media aritmetică R_a a suprafeței cilindrice concave prelucrate cu freza toroidală.....	137
Figura 5.17 Media rugozității totale R_t a suprafeței cilindrice concave prelucrate cu freza toroidală.....	137
Figura 5.18 Media aritmetică R_a a suprafeței cilindrice convexe prelucrate cu freza sferică.....	139
Figura 5.19 Media rugozității totale R_t a suprafeței cilindrice convexe prelucrate cu freza sferică.....	139
Figura 5.20 Media aritmetică R_a a suprafeței cilindrice concave prelucrate cu freza toroidală.....	141
Figura 5.21 Media rugozității totale R_t a suprafeței cilindrice concave prelucrate cu freza toroidală.....	141

Figura 5.22 Imagini microscopice a suprafețelor plane în cazul prelucrărilor cu cele două tipuri de freze.....	142
Figura 5.23 Imagini microscopice a suprafețelor sferice concave în cazul prelucrărilor cu cele două tipuri de freze.....	143
Figura 5.24 Imagini microscopice a suprafețelor sferice convexe în cazul prelucrărilor cu cele două tipuri de freze.....	144
Figura 5.25 Imagini microscopice a suprafețelor cilindrice concave în cazul prelucrărilor cu cele două tipuri de freze.....	144
Figura 5.26 Imagini microscopice a suprafețelor cilindrice convexe în cazul prelucrărilor cu cele două tipuri de freze.....	145
Figura 6.1 Structura unei rețele neuronale.....	151
Figura 6.2 Modelul calculului rețelei neuronale.....	156
Figura 6.3 Imagini cu datele de intrate respectiv cu datele țintă ale rețelei neuronale.....	159
Figura 6.4 Neural Fitting Tool.....	160
Figura 6.5 Selectarea datelor de intrare și a celor țintă pentru crearea RNA.....	161
Figura 6.6 Selectarea procentelor atribuite antrenării, validării și testării rețelei neuronale.....	161
Figura 6.7 Arhitectura rețelei neuronale.....	162
Figura 6.8 Modul de instruire a rețelei neuronale.....	162
Figura 6.9 Instruirea rețelei neuronale	163
Figura 6.10 Performanța rețelei neuronale.....	163
Figura 6.11 Condițiile de instruire.....	164
Figura 6.12 Histograma erorilor.....	164
Figura 6.13 Regresia liniară a rețelei neuronale.....	165
Figura 6.14 Diagrama rețelei neuronale.....	165
Figura 6.15 Reprezentarea grafică a diagramei erorilor procentuale pentru valorile approximate R_a	169
Figura 6.16 Reprezentarea grafică a diagramei erorilor procentuale pentru valorile approximate R_t	170
Figura 6.17 Încărcarea datelor.....	171
Figura 6.18 Crearea rețelei neuronale artificiale de predicție..	172
Figura 6.19 Structura rețelei neuronale.....	172
Figura 6.20 Învățarea rețelei neuronale	173
Figura 6.21 Valorile rugozității R_a previzionate.....	174
Figura 6.22 Imagini din timpul prelucrării și simulării suprafețelor de test plane cu freza toroidală.....	175
Figura 6.23 Imagini din timpul măsurătorilor cu ajutorul scannerului Profilm3D.....	176

LISTA TABELELOR

Tabelul 3.1 Caracteristicile mecanice ale oțelului C45	71
Tabelul 3.2 Parametrii de proces și valorile lor atribuite conform producătorului SECO	77
Tabelul 3.3 Valorile proprii ale regimurilor de așchiere.....	77
Tabelul 3.4 Parametri de reglaj și valorile nivelurilor aferente frezei toroidale	78
Tabelul 3.5 Parametri de reglaj și valorile nivelurilor aferente frezei sferice	78
Tabelul 3.6 Matricea de experiență pentru freza toroidală.....	80
Tabelul 3.7 Matricea de experiență pentru freza sferică.....	81
Tabelul 3.8 Valorile parametrilor pentru fiecare încercare cu freza toroidală.....	82
Tabelul 3.9 Valorile parametrilor pentru fiecare încercare cu freza sferică.....	83
Tabelul 4.1 Desfășurarea prelucrărilor suprafețelor plane cu freza toroidală	89
Tabelul 4.2 Desfășurarea experimentelor privind prelucrarea suprafețelor plane cu freza sferică.....	90
Tabelul 4.3 Desfășurarea experimentelor privind prelucrarea suprafețelor sferice concave cu freza toroidală.....	93
Tabelul 4.4 Desfășurarea experimentelor privind prelucrarea suprafețelor sferice concave cu freza sferică	94
Tabelul 4.5 Desfășurarea experimentelor privind prelucrarea suprafețelor sferice convexe cu freza toroidală.....	97
Tabelul 4.6 Desfășurarea experimentelor privind prelucrarea suprafețelor sferice convexe cu freza sferică.....	97
Tabelul 4.7 Desfășurarea experimentelor privind prelucrarea suprafețelor cilindrice concave cu freza toroidală.....	101
Tabelul 4.8 Desfășurarea experimentelor privind prelucrarea suprafețelor cilindrice concave cu freza sferică.....	101
Tabelul 4.9 Desfășurarea experimentelor privind prelucrarea suprafețelor cilindrice convexe cu freza toroidală.....	105
Tabelul 4.10 Desfășurarea experimentelor privind prelucrarea suprafețelor cilindrice convexe cu freza sferică.....	105
Tabelul 4.11 Freza toroidală utilizată în funcție de tipul înclinării.....	109

Tabelul 4.12 Freza sferică utilizată în funcție de tipul înclinării.....	110
Tabelul 5.1 Rezultatele experimentale aferente prelucrării suprafeței plane cu freza sferică.....	121
Tabelul 5.2 Rezultatele experimentale aferente prelucrării suprafeței plane cu freza toroidală.....	124
Tabelul 5.3 Rezultatele aferente prelucrării suprafeței sferice concave cu freza sferică.....	125
Tabelul 5.4 Rezultatele aferente prelucrării suprafeței sferice concave cu freza toroidală.....	127
Tabelul 5.5 Rezultatele aferente prelucrării suprafeței sferice convexe cu freza sferică.....	129
Tabelul 5.6 Rezultatele aferente prelucrării suprafeței sferice convexe cu freza toroidală.....	132
Tabelul 5.7 Rezultatele aferente prelucrării suprafeței cilindrice concave cu freza sferică.....	134
Tabelul 5.8 Rezultatele aferente prelucrării suprafeței cilindrice concave cu freza toroidală.....	136
Tabelul 5.9 Rezultatele aferente prelucrării suprafeței cilindrice convexe cu freza sferică.....	138
Tabelul 5.10 Rezultatele aferente prelucrării suprafeței cilindric convexe cu freza toroidală.....	140
Tabelul 6.1 Valorile approximate ale RNA pentru calitatea R_a a suprafeței plane prelucrate cu freza toroidală.....	166
Tabelul 6.2 Valorile approximate ale RNA pentru calitatea R_t a suprafeței plane prelucrate cu freza toroidală.....	169
Tabelul 6.3 Valorile parametrilor pentru fiecare încercare cu freza toroidală.....	174
Tabelul 6.4 Valorile măsurate cu scannerul 3D ale rugozității R_a	176
Tabelul 6.5 Valorile rugozității R_a cele mai apropiate de predicțiile RNA.....	177
Tabelul 6.6 Valorile comparabile ale rugozității R_a	178

ANEXE

Anexa 1.1 Valorile rugozităților măsurate perpendicular pe direcția de avans asupra suprafețelor plane prelucrate cu freza sferică

Tipul suprafeței	R _{a1} [μm]	R _{a2} [μm]	R _{a3} [μm]	Media R _a [μm]	R _{t1} [μm] ²	R _{t2} [μm]	R _{t3} [μm]	Media R _t [μm]
SPLN -SF-1	0,272	0,259	0,204	0,245	2,099	2,440	1,659	2,066
SPLN -SF-2	0,541	0,420	0,418	0,460	2,920	2,680	2,980	2,860
SPLN -SF-3	0,897	0,478	0,864	0,746	4,079	2,880	4,059	3,673
SPLN -SF-4	0,240	0,265	0,213	0,239	1,720	1,960	1,759	1,813
SPLN SF-5	0,308	0,282	0,356	0,315	2,140	1,700	2,519	2,120
SPLN -SF-6	0,542	0,472	0,342	0,452	3,059	3,160	1,940	2,720
SPLN -SF-7	0,252	0,233	0,337	0,274	1,580	1,779	2,160	1,840
SPLN -SF-8	0,426	0,377	0,433	0,412	3,039	2,519	3,039	2,866
SPLN -SF-9	0,834	0,521	0,767	0,707	3,940	3,660	4,380	3,993
SPLN -SF-10	0,290	0,197	0,205	0,231	2,059	1,620	1,379	1,686
SPLN -SF-11	0,459	0,450	0,370	0,426	2,579	2,700	2,059	2,446
SPLN -SF-12	0,574	0,561	0,633	0,589	3,220	5,579	5,199	4,666
SPLN -SF-13	0,270	0,297	0,253	0,273	2,259	2,140	2,359	2,253
SPLN -SF-14	0,372	0,382	0,363	0,372	2,599	2,759	3,240	2,866
SPLN -SF-15	0,673	0,530	0,561	0,588	4,039	3,220	3,200	3,486
SPLN -SF-16	0,302	0,176	0,176	0,218	2,259	1,279	1,279	1,606
SPLN -SF-17	0,353	0,408	0,428	0,396	4,160	2,160	2,039	2,786
SPLN -SF-18	0,598	0,563	0,650	0,604	2,319	2,859	2,920	2,699
SPLN -SF-19	0,234	0,209	0,233	0,225	1,900	1,720	1,580	1,733
SPLN -SF-20	0,449	0,418	0,428	0,432	2,779	2,839	2,480	2,699
SPLN -SF-21	0,641	0,519	0,429	0,530	2,759	3,319	3,059	3,046
SPLN -SF-22	0,406	0,283	0,371	0,353	3,339	2,279	2,800	2,806
SPLN -SF-23	0,370	0,288	2,780	1,146	2,779	2,059	1,900	2,246
SPLN -SF-24	0,472	0,572	0,648	0,564	3,700	3,519	3,680	3,633
SPLN -SF-25	0,290	0,367	0,351	0,336	2,440	2,240	1,980	2,220
SPLN -SF-26	0,538	0,519	0,586	0,548	3,420	3,359	4,059	3,613
SPLN -SF-27	0,644	0,760	0,758	0,721	5,360	4,870	5,980	5,403

Anexa 1.2 Valorile rugozităților măsurate paralel pe direcția de avans asupra suprafețelor plane prelucrate cu freza sferică

Tipul suprafeței	R _{a1} [μm]	R _{a2} [μm]	R _{a3} [μm]	Media R _a [μm]	R _{t1} [μm] ²	R _{t2} [μm]	R _{t3} [μm]	Media R _t [μm]
SPLN -SF-1	0,508	0,468	0,467	0,481	3,640	3,619	3,740	3,666
SPLN -SF-2	0,585	0,506	0,527	0,539	5,340	4,199	4,500	4,680
SPLN -SF-3	0,615	0,592	0,640	0,616	5,739	5,420	5,460	5,540
SPLN -SF-4	0,494	0,468	0,467	0,476	3,980	3,460	3,180	3,540
SPLN SF-5	0,453	0,518	0,490	0,487	3,059	3,680	3,720	3,486
SPLN -SF-6	0,557	0,533	0,559	0,550	4,320	3,880	4,199	4,133
SPLN -SF-7	0,554	0,531	0,587	0,557	3,839	3,559	3,779	3,726
SPLN -SF-8	0,574	0,602	0,540	0,572	4,300	4,820	4,219	4,446
SPLN -SF-9	0,677	0,802	0,664	0,714	4,659	5,239	4,940	4,946
SPLN -SF-10	0,584	0,527	0,521	0,544	4,820	5,019	5,280	5,040
SPLN -SF-11	0,630	0,534	0,530	0,565	5,760	5,340	5,460	5,520
SPLN -SF-12	0,664	0,766	0,657	0,696	5,940	6,159	5,719	5,939
SPLN -SF-13	0,423	0,466	0,444	0,444	2,900	3,420	2,980	3,100
SPLN -SF-14	0,603	0,547	0,621	0,590	3,619	3,740	4,360	3,906
SPLN -SF-15	0,506	0,525	0,522	0,518	4,280	3,859	3,819	3,986
SPLN -SF-16	0,470	0,495	0,471	0,479	3,299	3,420	3,519	3,413
SPLN -SF-17	0,396	0,417	0,434	0,416	3,180	3,640	3,259	3,360
SPLN -SF-18	0,481	0,462	0,710	0,551	4,079	4,280	4,800	4,386
SPLN -SF-19	0,553	0,574	0,536	0,554	6,199	5,320	5,199	5,573
SPLN -SF-20	0,523	0,417	0,411	0,450	5,579	4,039	3,199	4,272
SPLN -SF-21	0,537	0,502	0,496	0,512	3,640	5,280	4,460	4,460
SPLN -SF-22	0,453	0,510	0,495	0,486	3,039	3,200	3,400	3,213
SPLN -SF-23	0,508	0,513	0,507	0,509	3,960	4,079	3,359	3,799
SPLN -SF-24	0,655	0,593	0,557	0,602	4,579	3,619	3,660	3,953
SPLN -SF-25	0,464	0,433	0,407	0,435	3,400	3,460	4,139	3,666
SPLN -SF-26	0,573	0,535	0,464	0,524	5,139	4,000	3,940	4,360
SPLN -SF-27	0,580	0,659	0,525	0,588	5,699	5,420	4,860	5,326

Anexa 1.3. Valorile rugozităților măsurate paralel pe direcția de avans asupra suprafețelor plane prelucrate cu freza toroidală

Tipul suprafeței	R_{a1} [μm]	R_{a2} [μm]	R_{a3} [μm]	Media R_a [μm]	R_{t1} [μm]²	R_{t2} [μm]	R_{t3} [μm]	Media R_t [μm]
SPLN -TR-1	0,177	0,240	0,290	0,160	1,039	0,779	0,959	0,926
SPLN -TR-2	0,336	0,278	0,248	0,289	1,880	1,339	1,820	1,680
SPLN -TR-3	0,266	0,149	0,229	0,264	2,480	1,559	1,080	1,706
SPLN -TR-4	0,204	0,326	0,328	0,194	1,500	1,559	1,340	1,466
SPLN -TR-5	0,280	0,300	0,307	0,311	3,180	2,200	1,860	2,413
SPLN -TR-6	0,256	0,468	0,510	0,288	2,240	2,579	3,339	2,719
SPLN -TR-7	0,373	0,770	0,723	0,450	2,019	2,500	3,309	2,609
SPLN -TR-8	0,688	0,877	0,990	0,727	5,059	4,380	3,799	4,413
SPLN -TR-9	0,815	0,776	0,648	0,894	4,599	4,139	5,179	4,639
SPLN -TR-10	0,642	0,930	0,690	0,689	2,960	3,619	3,880	3,486
SPLN -TR-11	0,832	0,839	0,876	0,817	5,000	4,780	4,159	4,646
SPLN -TR-12	0,912	0,659	0,646	0,876	5,162	4,820	5,300	5,094
SPLN -TR-13	0,486	0,896	0,473	0,597	2,640	3,940	3,160	3,247
SPLN -TR-14	0,710	1,079	1,071	0,693	3,920	4,699	3,099	3,906
SPLN -TR-15	1,062	0,434	0,506	1,071	5,719	5,800	5,760	5,760
SPLN -TR-16	0,431	0,897	0,757	0,457	2,940	3,579	3,299	3,273
SPLN -TR-17	0,664	1,092	1,068	0,773	4,159	4,280	4,480	4,306
SPLN -TR-18	1,232	0,490	0,618	1,131	6,079	6,460	5,769	6,103
SPLN -TR-19	0,483	0,947	0,868	0,530	3,819	3,140	4,400	3,786
SPLN -TR-20	0,762	0,947	0,886	0,859	3,720	5,960	4,820	4,833
SPLN -TR-21	0,845	0,562	0,521	0,893	4,980	5,179	4,239	4,799
SPLN -TR-22	0,620	0,516	0,662	0,568	4,280	3,579	3,839	3,899
SPLN -TR-23	0,615	0,484	0,476	0,598	3,859	3,640	3,759	3,753
SPLN -TR-24	0,578	0,436	0,393	0,513	3,640	2,680	2,579	2,966
SPLN -TR-25	0,378	0,385	0,272	0,402	2,819	4,219	3,619	3,552
SPLN -TR-26	0,550	0,387	0,365	0,402	3,500	3,339	2,140	2,993
SPLN -TR-27	0,518	0,240	0,290	0,423	3,740	3,099	2,720	3,186

**Anexa 1.4. Valorile rugozităților măsurate perpendicular
pe direcția de avans asupra suprafețelor plane
prelucrate cu freza toroidală**

Tipul suprafeței	R _{a1} [μm]	R _{a2} [μm]	R _{a3} [μm]	Media R _a [μm]	R _{t1} [μm] ²	R _{t2} [μm]	R _{t3} [μm]	Media R _t [μm]
SPLN -TR-1	0,427	0,505	0,460	0,464	3,059	3,000	2,700	2,920
SPLN -TR-2	0,504	0,347	0,358	0,403	3,039	2,259	2,480	2,593
SPLN -TR-3	0,408	0,393	0,326	0,376	2,440	2,380	2,380	2,400
SPLN -TR-4	0,464	0,508	0,510	0,494	2,299	2,319	3,220	2,613
SPLN -TR-5	0,476	0,343	0,487	0,435	3,619	3,519	3,359	3,499
SPLN -TR-6	0,420	0,419	0,437	0,425	2,980	2,839	3,039	2,953
SPLN -TR-7	0,633	0,717	0,714	0,688	3,339	5,320	4,159	4,273
SPLN -TR-8	0,682	0,560	0,654	0,632	5,219	3,740	4,099	4,353
SPLN -TR-9	0,759	0,695	0,830	0,761	5,280	4,340	7,900	5,840
SPLN -TR-10	0,672	0,618	0,727	0,672	4,079	4,099	5,380	4,519
SPLN -TR-11	0,705	0,771	0,792	0,756	4,559	5,780	5,880	5,406
SPLN -TR-12	0,876	0,778	0,898	0,851	5,699	5,579	6,980	6,086
SPLN -TR-13	0,771	0,856	0,731	0,786	5,139	6,599	5,000	5,579
SPLN -TR-14	0,797	0,819	0,798	0,805	5,000	5,199	4,280	4,826
SPLN -TR-15	1,260	1,014	1,083	1,119	7,400	7,779	7,820	7,666
SPLN -TR-16	0,452	0,527	0,626	0,535	3,099	3,980	3,779	3,619
SPLN -TR-17	0,596	0,709	0,577	0,627	5,059	5,659	4,599	5,106
SPLN -TR-18	0,810	0,686	0,940	0,812	6,800	5,920	6,159	6,293
SPLN -TR-19	0,535	0,508	0,605	0,549	3,559	3,799	4,800	4,053
SPLN -TR-20	0,815	0,800	0,655	0,757	5,059	5,179	4,039	4,759
SPLN -TR-21	0,819	0,844	0,945	0,869	6,719	6,019	6,239	6,326
SPLN -TR-22	0,589	0,559	0,482	0,543	4,400	4,280	3,759	4,146
SPLN -TR-23	0,624	0,571	0,524	0,573	4,139	4,780	4,569	4,496
SPLN -TR-24	0,729	0,593	0,533	0,618	5,179	4,440	4,139	4,586
SPLN -TR-25	0,368	0,471	0,495	0,445	3,619	3,480	4,000	3,700
SPLN -TR-26	0,477	0,446	0,502	0,475	3,559	3,559	4,440	3,853
SPLN -TR-27	0,571	0,606	0,611	0,596	3,660	5,480	4,539	4,560

Anexa 1.5. Valorile rugozităților măsurate perpendicular pe direcția de avans asupra suprafețelor sferice concave prelucrate cu freza sferică

Tipul suprafeței	R _{a1} [μm]	R _{a2} [μm]	R _{a3} [μm]	Media R _a [μm]	R _{t1} [μm] ²	R _{t2} [μm]	R _{t3} [μm]	Media R _t [μm]
SFCV-SF-1	0,239	0,650	0,780	0,556	0,190	5,019	5,280	3,496
SFCV-SF-2	0,661	0,565	0,254	0,493	4,719	3,660	3,200	3,860
SFCV-SF-3	0,616	0,618	0,394	0,543	4,619	3,880	3,140	3,880
SFCV-SF-4	0,541	0,531	0,379	0,484	4,539	3,680	3,190	3,803
SFCV-SF-5	0,488	0,473	0,857	0,606	3,160	3,160	5,320	3,880
SFCV-SF-6	0,448	0,792	0,369	0,536	3,190	5,219	2,940	3,783
SFCV-SF-7	0,699	0,464	0,375	0,513	7,059	4,980	3,240	5,093
SFCV-SF-8	0,559	0,300	0,625	0,495	4,320	2,160	5,059	3,846
SFCV-SF-9	0,606	0,466	0,551	0,541	5,960	4,340	4,980	5,093
SFCV-SF-10	0,413	0,493	0,549	0,485	3,200	5,000	3,400	3,867
SFCV-SF-11	0,623	0,548	0,459	0,543	4,280	4,019	3,980	4,093
SFCV-SF-12	0,632	0,531	0,467	0,543	4,280	4,039	3,799	4,039
SFCV-SF-13	0,635	0,573	0,512	0,573	4,760	3,759	4,880	4,466
SFCV-SF-14	0,501	0,649	0,515	0,555	4,519	4,360	3,460	4,113
SFCV-SF-15	0,509	0,291	0,409	0,403	4,039	2,460	3,380	3,293
SFCV-SF-16	0,834	0,450	0,714	0,666	7,739	5,260	6,199	6,399
SFCV-SF-17	0,776	0,787	0,749	0,771	5,360	9,020	6,860	7,080
SFCV-SF-18	0,827	0,628	0,554	0,670	7,400	4,980	3,839	5,406
SFCV-SF-19	0,692	0,980	0,684	0,785	5,539	6,000	4,400	5,313
SFCV-SF-20	0,674	0,744	0,630	0,683	6,280	5,059	5,360	5,566
SFCV-SF-21	0,434	0,621	0,685	0,580	3,220	3,900	5,480	4,200
SFCV-SF-22	0,605	0,751	0,666	0,674	5,139	4,559	6,039	5,246
SFCV-SF-23	0,632	0,616	0,731	0,660	5,440	4,599	6,559	5,533
SFCV-SF-24	0,581	0,435	0,498	0,505	3,720	4,099	3,240	3,686
SFCV-SF-25	0,933	0,952	0,697	0,861	9,060	8,340	9,180	8,860
SFCV-SF-26	0,691	0,596	0,555	0,614	5,340	4,340	5,260	4,980
SFCV-SF-27	0,582	0,718	0,521	0,607	5,559	5,159	3,940	4,886

**Anexa 1.6 Valorile rugozităților măsurate paralel pe
direcția de avans asupra suprafețelor sferice concave
prelucrate cu freza sferică**

Tipul suprafeței	R_{a1} [μm]	R_{a2} [μm]	R_{a3} [μm]	Media R_a [μm]	R_{t1} [μm]²	R_{t2} [μm]	R_{t3} [μm]	Media R_t [μm]
SFCV-SF-1	0,492	0,507	0,287	0,429	3,279	3,779	3,819	3,626
SFCV-SF-2	0,575	0,429	0,282	0,429	3,720	0,259	2,859	2,279
SFCV-SF-3	0,410	0,366	0,237	0,338	3,900	3,099	1,360	2,786
SFCV-SF-4	0,477	0,433	0,266	0,392	4,039	3,980	1,880	3,300
SFCV-SF-5	0,453	0,472	0,405	0,443	3,339	4,539	3,039	3,639
SFCV-SF-6	0,431	0,346	0,378	0,385	3,440	2,940	2,400	2,927
SFCV-SF-7	0,611	0,379	0,354	0,448	3,519	3,079	2,579	3,059
SFCV-SF-8	0,595	0,500	0,334	0,476	0,559	3,559	3,240	2,453
SFCV-SF-9	0,498	0,318	0,385	0,400	2,779	2,720	4,000	3,166
SFCV-SF-10	0,318	0,271	0,300	0,296	2,240	2,200	1,980	2,140
SFCV-SF-11	0,313	0,401	0,274	0,329	2,119	3,420	1,880	2,473
SFCV-SF-12	0,439	0,370	0,328	0,379	3,920	2,920	2,319	3,053
SFCV-SF-13	0,386	0,205	0,559	0,383	3,220	1,320	3,319	2,620
SFCV-SF-14	0,368	0,384	0,418	0,390	3,299	2,920	3,819	3,346
SFCV-SF-15	0,813	0,290	0,409	0,504	7,159	2,440	3,019	4,206
SFCV-SF-16	0,473	0,220	0,547	0,413	3,839	2,339	3,799	3,326
SFCV-SF-17	0,473	0,427	0,467	0,456	3,940	2,539	4,559	3,679
SFCV-SF-18	0,453	0,295	0,480	0,409	4,980	3,279	4,400	4,220
SFCV-SF-19	0,467	0,214	0,428	0,370	3,400	1,480	4,579	3,153
SFCV-SF-20	0,263	0,589	0,336	0,396	2,400	4,460	2,799	3,220
SFCV-SF-21	0,436	0,451	0,422	0,436	4,099	2,819	2,519	3,146
SFCV-SF-22	0,413	0,391	0,633	0,479	3,019	3,440	4,579	3,679
SFCV-SF-23	0,514	0,560	0,563	0,546	3,519	5,119	5,059	4,566
SFCV-SF-24	0,389	0,618	0,450	0,486	5,099	5,860	3,140	4,700
SFCV-SF-25	0,653	0,404	0,509	0,522	4,539	3,500	3,579	3,873
SFCV-SF-26	0,475	0,580	0,588	0,548	4,099	5,440	4,440	4,660
SFCV-SF-27	0,513	0,516	0,371	0,467	5,099	4,059	3,779	4,312

Anexa 1.7. Valorile rugozităților măsurate paralel pe direcția de avans asupra suprafețelor sferice concave prelucrate cu freza toroidală

Tipul suprafeței	R _{a1} [μm]	R _{a2} [μm]	R _{a3} [μm]	Media R _a [μm]	R _{t1} [μm] ²	R _{t2} [μm]	R _{t3} [μm]	Media R _t [μm]
SFCV-TR-1	0,554	0,668	0,710	0,644	2,920	3,539	3,339	3,266
SFCV-TR-2	0,369	0,442	0,435	0,415	2,059	2,619	2,519	2,399
SFCV-TR-3	0,442	0,452	0,426	0,440	2,339	2,700	2,740	2,593
SFCV-TR-4	0,275	0,190	0,224	0,230	2,200	0,936	1,500	1,545
SFCV-TR-5	0,359	0,368	0,310	0,346	2,440	1,759	1,840	2,013
SFCV-TR-6	0,310	0,357	0,349	0,339	2,019	2,660	2,420	2,366
SFCV-TR-7	0,253	0,311	0,281	0,282	1,500	1,779	1,720	1,666
SFCV-TR-8	0,269	0,310	0,322	0,300	1,860	1,880	1,980	1,907
SFCV-TR-9	0,315	0,231	0,248	0,265	2,980	1,640	1,940	2,187
SFCV-TR-10	0,419	0,338	0,382	0,380	2,619	2,000	2,460	2,360
SFCV-TR-11	0,282	0,269	0,226	0,259	2,000	1,320	1,259	1,526
SFCV-TR-12	0,302	0,287	0,285	0,291	2,339	2,079	2,299	2,239
SFCV-TR-13	0,258	0,426	0,404	0,363	1,900	4,920	4,079	3,633
SFCV-TR-14	0,493	0,476	0,460	0,476	4,639	5,400	2,320	4,120
SFCV-TR-15	0,300	0,230	0,220	0,250	5,739	2,940	2,759	3,813
SFCV-TR-16	0,252	0,273	0,331	0,285	1,519	2,480	3,079	2,359
SFCV-TR-17	0,195	0,244	0,221	0,220	2,160	1,779	1,940	1,960
SFCV-TR-18	0,332	0,336	0,330	0,333	2,740	3,000	2,460	2,733
SFCV-TR-19	0,405	0,412	0,390	0,402	2,740	2,859	2,980	2,860
SFCV-TR-20	0,388	0,454	0,467	0,436	2,880	2,619	2,559	2,686
SFCV-TR-21	0,295	0,301	0,245	0,280	1,720	1,720	1,500	1,647
SFCV-TR-22	0,399	0,338	0,356	0,364	2,079	1,980	2,160	2,073
SFCV-TR-23	0,474	0,592	0,333	0,466	3,799	4,440	2,220	3,486
SFCV-TR-24	0,339	0,369	0,394	0,367	2,099	2,940	2,579	2,539
SFCV-TR-25	0,317	0,316	0,477	0,370	2,059	1,600	3,779	2,479
SFCV-TR-26	0,230	0,267	0,248	0,248	2,119	3,079	2,779	2,659
SFCV-TR-27	0,438	0,185	0,402	0,342	2,420	1,100	2,400	1,973

**Anexa 1.8. Valorile rugozităților măsurate perpendicular
pe direcția de avans asupra suprafețelor sferice concave
prelucrate cu freza toroidală**

Tipul suprafeței	R_{a1} [μm]	R_{a2} [μm]	R_{a3} [μm]	Media R_a [μm]	R_{t1} [μm]²	R_{t2} [μm]	R_{t3} [μm]	Media R_t [μm]
SFCV-TR-1	0,552	0,550	0,863	0,655	3,920	3,680	7,772	5,124
SFCV-TR-2	0,561	0,650	0,713	0,641	4,360	4,519	8,220	5,700
SFCV-TR-3	0,512	0,566	0,553	0,544	3,220	3,900	3,930	3,683
SFCV-TR-4	0,758	0,804	0,839	0,800	7,360	7,880	7,800	7,680
SFCV-TR-5	0,706	0,619	0,540	0,622	6,039	4,800	2,980	4,606
SFCV-TR-6	0,659	0,594	0,582	0,612	4,739	4,960	4,900	4,866
SFCV-TR-7	0,726	0,725	0,742	0,731	4,780	4,860	5,019	4,886
SFCV-TR-8	0,789	0,786	0,561	0,712	5,679	4,036	7,119	5,611
SFCV-TR-9	0,611	0,650	0,549	0,603	7,460	5,480	4,136	5,692
SFCV-TR-10	0,585	0,545	0,545	0,558	3,900	3,299	3,619	3,606
SFCV-TR-11	0,539	0,580	0,414	0,511	3,299	4,199	3,339	3,612
SFCV-TR-12	0,503	0,602	0,640	0,582	4,039	3,920	4,960	4,306
SFCV-TR-13	0,744	0,761	0,885	0,797	6,960	5,760	6,579	6,433
SFCV-TR-14	0,851	0,712	0,726	0,763	6,679	2,900	6,300	5,293
SFCV-TR-15	0,605	0,674	0,601	0,627	3,500	3,759	3,400	3,553
SFCV-TR-16	0,631	0,613	0,594	0,613	4,019	4,780	4,719	4,506
SFCV-TR-17	0,553	0,541	0,518	0,537	3,359	2,980	2,799	3,046
SFCV-TR-18	0,751	0,811	0,749	0,770	5,260	6,000	4,960	5,407
SFCV-TR-19	0,583	0,525	0,504	0,537	5,500	4,420	3,740	4,553
SFCV-TR-20	0,761	0,718	0,649	0,709	4,340	3,859	4,000	4,066
SFCV-TR-21	0,644	0,618	0,620	0,627	4,719	4,519	4,519	4,586
SFCV-TR-22	0,641	0,630	0,583	0,618	4,840	4,440	4,019	4,433
SFCV-TR-23	0,605	0,663	0,661	0,643	3,859	6,039	6,079	5,326
SFCV-TR-24	0,484	0,517	0,518	0,506	4,239	4,719	4,239	4,399
SFCV-TR-25	0,658	0,678	0,684	0,673	5,239	4,880	5,500	5,206
SFCV-TR-26	0,669	0,682	0,674	0,675	4,199	4,239	4,559	4,332
SFCV-TR-27	0,659	0,612	0,607	0,626	6,059	5,280	5,219	5,519

Anexa 1.9. Valorile rugozităților măsurate perpendicular pe direcția de avans asupra suprafețelor sferice convexe prelucrate cu freza sferică

Tipul suprafeței	R _{a1} [μm]	R _{a2} [μm]	R _{a3} [μm]	Media R _a [μm]	R _{t1} [μm] ²	R _{t2} [μm]	R _{t3} [μm]	Media R _t [μm]
SFCX-SF-1	0,567	0,439	0,469	0,492	3,240	3,420	3,079	3,246
SFCX-SF-2	0,268	0,442	0,580	0,430	4,239	2,779	3,810	3,609
SFCX-SF-3	0,605	0,800	0,760	0,722	4,460	5,059	5,260	4,926
SFCX-SF-4	0,570	0,710	0,466	0,582	3,960	3,819	3,460	3,746
SFCX-SF-5	0,489	0,521	0,765	0,592	3,819	3,460	5,260	4,180
SFCX-SF-6	1,003	0,919	0,952	0,958	7,820	6,539	6,400	6,920
SFCX-SF-7	0,407	0,912	0,924	0,748	2,720	5,380	7,039	5,046
SFCX-SF-8	0,672	0,566	0,664	0,634	4,280	4,519	5,280	4,693
SFCX-SF-9	0,713	0,950	0,878	0,847	4,760	5,639	5,739	5,379
SFCX-SF-10	1,070	0,716	1,020	0,935	8,460	5,619	7,059	7,046
SFCX-SF-11	1,139	0,815	1,022	0,992	7,500	8,600	8,300	8,133
SFCX-SF-12	0,739	0,572	0,637	0,649	5,440	4,719	5,340	5,166
SFCX-SF-13	0,921	0,966	0,978	0,955	7,340	6,139	6,739	6,739
SFCX-SF-14	0,449	0,425	0,521	0,465	2,960	2,519	4,360	3,280
SFCX-SF-15	0,915	0,977	0,197	0,696	8,359	8,659	6,239	7,752
SFCX-SF-16	0,442	0,483	0,472	0,466	3,059	3,240	3,740	3,346
SFCX-SF-17	0,595	0,658	0,683	0,645	3,880	4,519	5,280	4,560
SFCX-SF-18	1,180	0,757	0,796	0,911	11,19	5,840	4,960	7,330
SFCX-SF-19	0,653	0,723	0,870	0,749	4,960	3,880	6,139	4,993
SFCX-SF-20	0,636	0,634	0,589	0,620	3,920	4,260	4,940	4,373
SFCX-SF-21	0,926	0,803	0,763	0,831	5,760	5,440	4,579	5,260
SFCX-SF-22	0,502	0,445	0,472	0,473	2,920	3,019	3,299	3,079
SFCX-SF-23	0,490	0,537	0,505	0,511	4,119	3,859	4,000	3,993
SFCX-SF-24	0,565	0,526	0,545	0,545	3,640	3,779	3,779	3,733
SFCX-SF-25	0,921	0,491	0,459	0,624	6,239	2,880	2,779	3,966
SFCX-SF-26	0,762	0,714	0,761	0,746	4,440	4,360	5,579	4,793
SFCX-SF-27	0,591	0,555	0,536	0,561	3,400	3,339	3,380	3,373

Anexa 1.10 Valorile rugozităților măsurate paralel pe direcția de avans asupra suprafețelor sferice convexe prelucrate cu freza sferică

Tipul suprafeței	R _{a1} [μm]	R _{a2} [μm]	R _{a3} [μm]	Media R _a [μm]	R _{t1} [μm] ²	R _{t2} [μm]	R _{t3} [μm]	Media R _t [μm]
SFCX-SF-1	0,539	0,505	0,741	0,595	3,480	3,463	5,360	4,101
SFCX-SF-2	0,534	0,885	0,733	0,717	3,619	5,300	4,480	4,466
SFCX-SF-3	0,685	0,626	0,580	0,630	4,099	3,819	4,119	4,012
SFCX-SF-4	0,453	0,648	0,589	0,563	2,940	5,480	5,420	4,613
SFCX-SF-5	0,519	0,423	0,592	0,511	3,009	3,079	4,719	3,602
SFCX-SF-6	1,795	0,968	0,890	1,218	11,56	4,539	5,760	7,286
SFCX-SF-7	0,702	0,717	0,683	0,701	4,519	4,199	3,920	4,213
SFCX-SF-8	0,841	0,951	0,954	0,915	4,940	5,639	6,360	5,646
SFCX-SF-9	0,749	0,868	0,878	0,832	4,840	5,860	6,300	5,667
SFCX-SF-10	0,680	0,531	0,553	0,588	4,659	3,980	4,019	4,219
SFCX-SF-11	0,484	0,439	2,660	1,194	3,000	4,840	3,200	3,680
SFCX-SF-12	0,788	0,737	0,715	0,747	5,679	4,539	4,380	4,866
SFCX-SF-13	0,663	0,656	0,650	0,656	3,960	3,759	4,739	4,153
SFCX-SF-14	0,788	0,594	0,571	0,651	5,699	4,539	4,360	4,866
SFCX-SF-15	0,475	0,427	0,415	0,439	2,900	2,380	2,420	2,567
SFCX-SF-16	0,845	0,639	0,641	0,708	4,309	4,360	4,239	4,303
SFCX-SF-17	0,646	0,675	0,681	0,667	3,660	4,519	6,360	4,846
SFCX-SF-18	0,627	0,630	0,829	0,695	4,139	4,500	4,500	4,380
SFCX-SF-19	0,465	0,484	0,507	0,485	3,980	4,150	4,099	4,076
SFCX-SF-20	0,559	0,477	0,474	0,503	4,239	3,279	3,279	3,599
SFCX-SF-21	0,598	0,871	0,757	0,742	4,780	4,680	5,219	4,893
SFCX-SF-22	0,489	0,570	0,583	0,547	3,460	3,579	4,199	3,746
SFCX-SF-23	0,578	0,515	0,504	0,532	3,310	3,079	3,019	3,136
SFCX-SF-24	0,887	0,714	0,718	0,773	9,300	4,679	4,699	6,226
SFCX-SF-25	0,733	0,730	0,729	0,731	5,619	4,092	4,960	4,890
SFCX-SF-26	0,902	0,891	0,895	0,896	6,000	6,099	6,000	6,033
SFCX-SF-27	0,602	0,645	0,587	0,611	4,639	5,199	4,539	4,792

Anexa 1.11 Valorile rugozităților măsurate paralel pe direcția de avans asupra suprafețelor sferice convexe prelucrate cu freza toroidală

Tipul suprafeței	R _{a1} [μm]	R _{a2} [μm]	R _{a3} [μm]	Media R _a [μm]	R _{t1} [μm] ²	R _{t2} [μm]	R _{t3} [μm]	Media R _t [μm]
SFCX-TR-1	0,620	0,734	0,661	0,672	2,779	4,159	3,859	3,599
SFCX-TR-2	0,697	0,690	0,745	0,711	4,300	3,740	4,719	4,253
SFCX-TR-3	0,628	0,692	0,638	0,653	4,219	4,519	4,280	4,339
SFCX-TR-4	0,489	0,705	0,701	0,632	3,299	4,460	4,440	4,066
SFCX-TR-5	0,931	0,892	0,903	0,909	4,840	5,239	5,340	5,140
SFCX-TR-6	0,672	0,663	0,780	0,705	4,440	4,300	4,960	4,567
SFCX-TR-7	0,637	0,634	0,596	0,622	3,119	3,039	3,759	3,306
SFCX-TR-8	0,369	0,345	0,402	0,372	2,480	2,539	3,339	2,786
SFCX-TR-9	0,744	0,583	0,597	0,641	5,760	2,900	2,960	3,873
SFCX-TR-10	0,625	0,577	0,572	0,591	3,559	3,660	3,660	3,626
SFCX-TR-11	0,562	0,551	0,554	0,556	4,840	3,079	3,160	3,693
SFCX-TR-12	0,652	0,623	0,611	0,629	4,159	3,440	3,480	3,693
SFCX-TR-13	0,641	0,599	0,625	0,622	4,039	3,900	4,400	4,113
SFCX-TR-14	0,703	0,720	0,668	0,697	4,039	3,980	3,839	3,953
SFCX-TR-15	0,703	0,734	0,727	0,721	4,639	3,559	3,660	3,953
SFCX-TR-16	0,619	0,647	0,545	0,604	3,400	3,700	2,980	3,360
SFCX-TR-17	0,545	0,521	0,524	0,530	3,000	2,900	2,880	2,927
SFCX-TR-18	0,649	0,560	0,555	0,588	3,579	3,440	3,440	3,486
SFCX-TR-19	0,527	0,490	0,544	0,520	3,900	3,700	3,880	3,827
SFCX-TR-20	0,598	0,632	0,641	0,624	3,960	3,980	4,119	4,020
SFCX-TR-21	0,538	0,545	0,537	0,540	4,340	4,480	4,380	4,400
SFCX-TR-22	0,634	0,651	0,733	0,673	5,480	5,360	8,920	6,587
SFCX-TR-23	0,698	0,689	0,685	0,691	4,920	5,300	5,219	5,146
SFCX-TR-24	0,768	0,770	0,751	0,763	4,139	3,799	3,759	3,899
SFCX-TR-25	0,523	0,496	0,630	0,550	2,799	2,500	3,819	3,039
SFCX-TR-26	0,606	0,641	0,628	0,625	2,480	2,940	5,880	3,767
SFCX-TR-27	0,610	0,600	0,586	0,599	3,440	3,220	3,160	3,273

**Anexa 1.12 Valorile rugozităților măsurate
perpendicular pe direcția de avans asupra suprafețelor
sferice convexe prelucrate cu freza toroidală**

Tipul suprafeței	R _{a1} [μm]	R _{a2} [μm]	R _{a3} [μm]	Media R _a [μm]	R _{t1} [μm] ²	R _{t2} [μm]	R _{t3} [μm]	Media R _t [μm]
SFCX-TR-1	1,340	1,138	1,119	1,199	7,739	7,760	7,320	7,606
SFCX-TR-2	0,881	0,844	0,985	0,903	5,139	4,980	8,340	6,153
SFCX-TR-3	0,723	0,693	0,691	0,702	4,360	3,740	3,599	3,900
SFCX-TR-4	0,654	0,804	0,753	0,737	3,319	6,059	4,579	4,652
SFCX-TR-5	0,844	0,894	0,849	0,862	7,940	6,340	6,500	6,927
SFCX-TR-6	0,964	0,984	0,990	0,979	5,900	6,119	6,079	6,033
SFCX-TR-7	0,501	0,540	0,526	0,522	3,960	3,519	3,539	3,673
SFCX-TR-8	0,503	0,493	0,496	0,497	2,700	2,920	2,819	2,813
SFCX-TR-9	0,872	0,892	0,880	0,881	4,480	4,699	4,679	4,619
SFCX-TR-10	0,674	0,649	0,586	0,636	9,880	3,380	3,380	5,547
SFCX-TR-11	0,670	0,683	0,665	0,673	4,119	3,480	4,099	3,899
SFCX-TR-12	0,880	0,889	0,892	0,887	6,420	6,360	7,980	6,920
SFCX-TR-13	0,549	0,535	0,549	0,544	5,079	5,139	5,300	5,173
SFCX-TR-14	0,637	0,641	0,625	0,634	6,119	5,599	5,340	5,686
SFCX-TR-15	0,787	0,682	0,682	0,717	5,699	5,159	5,300	5,386
SFCX-TR-16	0,526	0,499	0,493	0,506	2,900	2,640	2,799	2,780
SFCX-TR-17	0,526	0,593	0,534	0,551	3,480	3,920	3,339	3,580
SFCX-TR-18	0,793	0,799	0,801	0,798	4,340	4,500	4,679	4,506
SFCX-TR-19	0,481	0,400	0,479	0,453	6,000	3,400	3,460	4,287
SFCX-TR-20	0,508	0,476	0,475	0,486	4,000	4,260	3,960	4,073
SFCX-TR-21	0,965	1,011	1,020	0,999	7,039	6,199	6,460	6,566
SFCX-TR-22	0,453	0,497	0,513	0,488	2,759	3,599	3,500	3,286
SFCX-TR-23	0,738	0,768	0,774	0,760	5,059	4,659	4,659	4,792
SFCX-TR-24	1,096	0,965	0,949	1,003	7,500	6,800	7,000	7,100
SFCX-TR-25	0,499	0,487	0,454	0,480	2,680	2,900	2,799	2,793
SFCX-TR-26	0,612	0,596	0,589	0,599	3,380	3,180	3,119	3,226
SFCX-TR-27	0,391	0,386	0,940	0,572	1,960	1,940	2,359	2,086

**Anexa 1.13. Valorile rugozităților măsurate
perpendicular pe direcția de avans asupra suprafețelor
cilindrice concave prelucrate cu freza sferică**

Tipul suprafeței	R _{a1} [μm]	R _{a2} [μm]	R _{a3} [μm]	Media R _a [μm]	R _{t1} [μm] ²	R _{t2} [μm]	R _{t3} [μm]	Media R _t [μm]
CICV-SF-1	0,335	0,395	0,306	0,345	2,480	3,339	2,500	2,773
CICV-SF-2	0,474	0,586	0,521	0,527	3,599	5,440	3,519	4,186
CICV-SF-3	0,430	0,460	0,540	0,477	3,099	3,799	3,700	3,533
CICV-SF-4	0,374	0,538	0,364	0,425	2,839	2,660	2,980	2,826
CICV-SF-5	0,425	0,324	0,434	0,394	3,140	1,940	3,059	2,713
CICV-SF-6	0,437	0,397	0,410	0,415	3,000	3,220	3,160	3,127
CICV-SF-7	0,322	0,449	0,331	0,367	2,759	3,880	2,920	3,186
CICV-SF-8	0,416	0,409	0,360	0,395	2,779	3,880	7,530	4,730
CICV-SF-9	0,539	0,392	0,279	0,403	3,600	2,099	1,799	2,499
CICV-SF-10	0,545	0,536	0,574	0,552	3,020	3,640	3,960	3,540
CICV-SF-11	0,442	0,487	0,471	0,467	3,220	3,799	3,460	3,493
CICV-SF-12	0,480	0,254	0,482	0,405	3,140	3,759	3,680	3,526
CICV-SF-13	0,414	0,437	0,640	0,497	2,440	2,799	7,190	4,143
CICV-SF-14	0,315	0,552	0,492	0,453	2,720	3,359	2,980	3,020
CICV-SF-15	0,414	0,403	0,444	0,420	3,299	3,400	3,579	3,426
CICV-SF-16	0,454	0,500	0,487	0,480	3,839	3,640	3,940	3,806
CICV-SF-17	0,483	0,513	0,471	0,489	4,519	3,359	3,380	3,753
CICV-SF-18	0,529	0,319	0,521	0,456	3,420	2,940	3,480	3,280
CICV-SF-19	0,538	0,525	0,513	0,525	3,579	2,960	3,240	3,260
CICV-SF-20	0,545	0,549	0,577	0,557	3,099	3,059	3,960	3,373
CICV-SF-21	0,558	0,516	0,597	0,557	4,420	4,639	5,159	4,739
CICV-SF-22	0,386	0,380	0,416	0,394	3,140	2,960	3,180	3,093
CICV-SF-23	0,506	0,509	0,500	0,505	4,139	3,779	2,720	3,546
CICV-SF-24	0,467	0,424	0,494	0,462	4,300	3,039	3,119	3,486
CICV-SF-25	0,607	0,487	0,499	0,531	5,619	3,900	3,380	4,300
CICV-SF-26	0,251	0,640	0,562	0,484	4,960	4,880	3,720	4,520
CICV-SF-27	0,480	0,507	0,390	0,459	3,160	3,900	3,079	3,380

Anexa 1.14. Valorile rugozităților măsurate paralel pe direcția de avans asupra suprafețelor cilindrice concave prelucrate cu freza sferică

Tipul suprafeței	R_{a1} [μm]	R_{a2} [μm]	R_{a3} [μm]	Media R_a [μm]	R_{t1} [μm]²	R_{t2} [μm]	R_{t3} [μm]	Media R_t [μm]
CICV-SF-1	0,189	0,142	0,196	0,176	1,600	1,159	1,779	1,513
CICV-SF-2	0,382	0,330	0,289	0,334	2,980	3,000	2,039	2,673
CICV-SF-3	0,298	0,255	0,402	0,318	1,779	1,659	3,960	2,466
CICV-SF-4	0,187	0,242	0,230	0,220	1,039	1,480	2,519	1,679
CICV-SF-5	0,460	0,360	0,358	0,393	2,240	2,400	2,640	2,427
CICV-SF-6	0,408	0,495	0,347	0,417	2,759	3,960	3,519	3,413
CICV-SF-7	0,243	0,260	0,243	0,249	1,500	3,000	2,019	2,173
CICV-SF-8	0,311	0,254	0,233	0,266	2,339	1,940	2,319	2,199
CICV-SF-9	0,407	0,528	0,380	0,438	4,000	3,019	3,900	3,640
CICV-SF-10	0,217	0,178	0,212	0,202	1,600	1,480	1,679	1,586
CICV-SF-11	0,344	0,311	0,329	0,328	2,640	2,119	2,700	2,486
CICV-SF-12	0,310	0,230	0,263	0,268	2,140	1,279	2,339	1,919
CICV-SF-13	0,385	0,303	0,312	0,333	2,640	2,259	2,039	2,313
CICV-SF-14	0,344	0,405	0,344	0,364	1,740	3,019	2,900	2,553
CICV-SF-15	0,460	0,453	0,330	0,414	3,460	2,519	2,599	2,859
CICV-SF-16	0,263	0,377	0,432	0,357	2,259	2,660	3,079	2,666
CICV-SF-17	0,315	0,277	0,236	0,276	3,180	1,779	2,200	2,386
CICV-SF-18	0,413	0,306	0,405	0,375	3,160	2,500	3,940	3,200
CICV-SF-19	0,270	0,210	0,218	0,233	1,620	1,460	1,659	1,580
CICV-SF-20	0,270	0,302	0,239	0,270	1,340	3,119	1,519	1,993
CICV-SF-21	0,370	0,362	0,187	0,306	4,219	2,240	1,600	2,686
CICV-SF-22	0,224	0,284	0,276	0,261	1,600	1,820	2,059	1,826
CICV-SF-23	0,424	0,376	0,396	0,399	2,890	2,960	2,900	2,917
CICV-SF-24	0,258	0,367	0,233	0,286	2,140	2,539	2,160	2,280
CICV-SF-25	0,377	0,333	0,174	0,295	2,700	2,339	1,519	2,186
CICV-SF-26	0,484	0,284	0,355	0,374	2,759	2,140	2,740	2,546
CICV-SF-27	0,578	0,453	0,235	0,422	3,119	3,160	1,720	2,666

Anexa 1.15 Valorile rugozităților măsurate paralel pe direcția de avans asupra suprafețelor cilindrice concave prelucrate cu freza toroidală

Tipul suprafeței	R _{a1} [μm]	R _{a2} [μm]	R _{a3} [μm]	Media R _a [μm]	R _{t1} [μm] ²	R _{t2} [μm]	R _{t3} [μm]	Media R _t [μm]
CICV-TR-1	0,596	0,606	0,620	0,607	4,619	4,039	4,039	4,232
CICV-TR-2	0,452	0,381	0,380	0,404	4,639	3,619	3,619	3,959
CICV-TR-3	0,518	0,535	0,542	0,532	4,340	4,119	4,119	4,193
CICV-TR-4	0,515	0,559	0,231	0,435	4,099	3,019	3,019	3,379
CICV-TR-5	0,390	0,478	0,429	0,432	2,119	3,599	3,599	3,106
CICV-TR-6	0,306	0,449	0,438	0,398	1,720	2,720	2,720	2,387
CICV-TR-7	0,369	0,448	0,414	0,410	3,420	4,320	4,320	4,020
CICV-TR-8	0,338	0,358	0,341	0,346	1,900	2,460	2,460	2,273
CICV-TR-9	0,383	0,422	0,438	0,414	4,480	2,779	2,779	3,346
CICV-TR-10	0,479	0,306	0,292	0,359	3,000	1,759	1,759	2,173
CICV-TR-11	0,341	0,590	0,429	0,453	1,919	2,720	2,720	2,453
CICV-TR-12	0,455	0,393	0,275	0,374	2,480	2,900	2,900	2,760
CICV-TR-13	0,443	0,524	0,345	0,437	4,260	3,359	3,359	3,659
CICV-TR-14	0,369	0,331	0,381	0,360	3,259	1,759	1,759	2,259
CICV-TR-15	0,369	0,281	0,434	0,361	3,319	2,380	2,380	2,693
CICV-TR-16	0,417	0,580	0,458	0,485	2,940	4,420	4,420	3,927
CICV-TR-17	0,437	0,288	0,399	0,375	2,740	3,200	3,200	3,047
CICV-TR-18	0,488	0,369	0,334	0,397	3,279	2,559	2,559	2,799
CICV-TR-19	0,399	0,409	0,441	0,416	3,400	2,259	2,259	2,639
CICV-TR-20	0,360	0,356	0,261	0,326	3,539	3,180	3,180	3,300
CICV-TR-21	0,330	0,231	0,243	0,268	3,559	1,740	1,740	2,346
CICV-TR-22	0,291	0,378	0,321	0,330	2,099	2,039	2,039	2,059
CICV-TR-23	0,178	0,423	0,258	0,286	1,659	4,239	4,239	3,379
CICV-TR-24	0,346	0,361	0,427	0,378	1,740	4,400	4,400	3,513
CICV-TR-25	0,506	0,475	0,377	0,453	2,839	2,700	2,700	2,746
CICV-TR-26	0,388	0,530	0,277	0,398	2,339	5,900	5,900	4,713
CICV-TR-27	0,255	0,246	0,515	0,339	2,220	2,779	2,779	2,593

**Anexa 1.16 Valorile rugozităților măsurate
perpendicular pe direcția de avans asupra suprafețelor
cilindrice concave prelucrate cu freza toroidală**

Tipul suprafeței	R_{a1} [μm]	R_{a2} [μm]	R_{a3} [μm]	Media R_a [μm]	R_{t1} [μm]²	R_{t2} [μm]	R_{t3} [μm]	Media R_t [μm]
CICV-TR-1	0,739	0,502	0,495	0,579	5,860	6,920	3,960	5,580
CICV-TR-2	0,496	0,493	0,593	0,527	5,760	4,760	5,400	5,307
CICV-TR-3	0,432	0,425	0,508	0,455	4,719	3,680	3,380	3,926
CICV-TR-4	0,370	0,442	0,461	0,424	2,380	4,099	4,280	3,586
CICV-TR-5	0,430	0,354	0,394	0,393	4,940	2,420	3,700	3,687
CICV-TR-6	0,388	0,373	0,325	0,362	3,099	3,599	4,820	3,839
CICV-TR-7	0,617	0,580	0,521	0,573	4,800	5,739	4,300	4,946
CICV-TR-8	0,503	0,485	0,507	0,498	4,519	4,059	4,579	4,386
CICV-TR-9	0,557	0,519	0,411	0,496	4,519	4,260	4,039	4,273
CICV-TR-10	0,614	0,595	0,477	0,562	3,799	3,680	3,000	3,493
CICV-TR-11	0,482	0,492	0,482	0,485	2,460	2,440	3,839	2,913
CICV-TR-12	0,444	0,453	0,443	0,447	3,200	3,819	2,839	3,286
CICV-TR-13	0,368	0,420	0,363	0,384	2,960	3,359	3,500	3,273
CICV-TR-14	0,354	0,448	0,555	0,452	3,460	2,880	4,760	3,700
CICV-TR-15	0,398	0,336	0,431	0,388	3,960	4,480	5,139	4,526
CICV-TR-16	0,540	0,613	0,792	0,648	5,420	6,340	7,059	6,273
CICV-TR-17	0,460	0,749	0,601	0,603	3,720	6,460	5,960	5,380
CICV-TR-18	0,605	0,548	0,647	0,600	5,079	4,440	6,539	5,353
CICV-TR-19	0,716	0,544	0,538	0,599	5,280	6,039	5,280	5,533
CICV-TR-20	0,390	0,345	0,418	0,384	2,259	2,279	2,700	2,413
CICV-TR-21	0,330	0,320	0,419	0,356	2,940	2,759	2,880	2,860
CICV-TR-22	0,522	0,424	0,461	0,469	4,440	3,759	3,539	3,913
CICV-TR-23	0,388	0,560	0,667	0,538	2,920	6,059	6,139	5,039
CICV-TR-24	0,468	0,466	0,445	0,460	3,039	2,880	3,779	3,233
CICV-TR-25	0,737	0,893	0,688	0,773	6,420	9,479	7,199	7,699
CICV-TR-26	0,578	0,667	0,525	0,590	4,099	6,480	4,719	5,099
CICV-TR-27	0,492	0,472	0,545	0,503	2,660	2,640	5,300	3,533

**Anexa 1.17 Valorile rugozităților măsurate
perpendicular pe direcția de avans asupra suprafețelor
cilindrice convexe prelucrate cu freza sferică**

Tipul suprafeței	R _{a1} [μm]	R _{a2} [μm]	R _{a3} [μm]	Media R _a [μm]	R _{t1} [μm] ²	R _{t2} [μm]	R _{t3} [μm]	Media R _t [μm]
CICX-SF-1	0,383	0,423	0,436	0,414	2,980	3,319	3,519	3,273
CICX-SF-2	0,609	0,544	0,504	0,552	3,779	3,599	3,579	3,652
CICX-SF-3	0,490	0,498	0,600	0,529	3,279	3,779	3,940	3,666
CICX-SF-4	0,612	0,583	0,539	0,578	5,239	3,920	3,700	4,286
CICX-SF-5	0,426	0,416	0,455	0,432	3,640	2,960	3,559	3,386
CICX-SF-6	0,740	0,627	0,593	0,653	5,199	4,340	4,019	4,519
CICX-SF-7	0,528	0,465	0,293	0,429	6,079	6,420	3,980	5,493
CICX-SF-8	0,298	0,318	0,379	0,332	2,700	3,299	3,660	3,220
CICX-SF-9	0,492	0,407	0,306	0,402	4,519	2,559	3,309	3,462
CICX-SF-10	0,431	0,366	0,401	0,399	3,579	2,640	3,099	3,106
CICX-SF-11	0,416	0,409	0,618	0,481	3,660	3,559	4,119	3,779
CICX-SF-12	0,400	0,498	0,499	0,466	4,219	3,720	3,720	3,886
CICX-SF-13	0,577	0,544	0,558	0,560	4,340	4,539	4,300	4,393
CICX-SF-14	0,440	0,515	0,566	0,507	2,720	2,920	2,700	2,780
CICX-SF-15	0,649	0,656	0,469	0,591	4,780	4,880	4,900	4,853
CICX-SF-16	0,312	0,474	0,489	0,425	2,000	2,559	2,859	2,473
CICX-SF-17	0,557	0,475	0,475	0,502	2,940	2,599	2,680	2,740
CICX-SF-18	0,465	0,495	0,503	0,488	3,480	4,179	4,199	3,953
CICX-SF-19	0,442	0,429	0,455	0,442	4,260	4,119	4,300	4,226
CICX-SF-20	0,547	0,566	0,560	0,558	4,320	4,300	4,280	4,300
CICX-SF-21	0,509	0,504	0,484	0,499	4,760	5,219	5,519	5,166
CICX-SF-22	0,443	0,435	0,426	0,435	2,599	2,940	2,799	2,779
CICX-SF-23	0,686	0,645	0,620	0,650	4,940	4,760	4,699	4,800
CICX-SF-24	0,442	0,460	0,456	0,453	3,640	3,500	3,839	3,660
CICX-SF-25	0,401	0,385	0,391	0,392	3,359	3,000	3,279	3,213
CICX-SF-26	0,378	0,402	0,386	0,389	2,700	2,819	2,779	2,766
CICX-SF-27	0,346	0,335	0,324	0,335	2,700	2,740	2,519	2,653

Anexa 1.18 Valorile rugozităților măsurate paralel pe direcția de avans asupra suprafețelor cilindrice convexe prelucrate cu freza sferică

Tipul suprafeței	R _{a1} [μm]	R _{a2} [μm]	R _{a3} [μm]	Media R _a [μm]	R _{t1} [μm] ²	R _{t2} [μm]	R _{t3} [μm]	Media R _t [μm]
CICX-SF-1	0,599	0,514	0,506	0,540	4,519	5,500	3,057	4,359
CICX-SF-2	0,464	0,435	0,310	0,403	2,839	2,819	1,919	2,526
CICX-SF-3	0,454	0,851	0,523	0,609	2,859	5,739	3,599	4,066
CICX-SF-4	0,426	0,554	0,803	0,594	2,680	3,519	6,699	4,299
CICX-SF-5	0,787	0,367	0,351	0,502	4,019	2,319	3,200	3,179
CICX-SF-6	0,717	0,804	0,888	0,803	6,119	5,500	6,599	6,073
CICX-SF-7	0,444	0,649	0,619	0,571	2,859	4,320	4,960	4,046
CICX-SF-8	0,603	0,393	0,480	0,492	2,980	2,700	2,980	2,887
CICX-SF-9	0,698	0,607	0,459	0,588	4,239	3,079	2,539	3,286
CICX-SF-10	0,605	0,520	0,342	0,489	5,440	2,700	2,200	3,447
CICX-SF-11	0,680	0,349	0,599	0,543	3,420	1,940	3,960	3,107
CICX-SF-12	0,580	0,645	0,566	0,597	3,160	3,940	3,099	3,400
CICX-SF-13	0,751	0,666	0,715	0,711	7,079	3,960	4,539	5,193
CICX-SF-14	0,525	0,675	0,731	0,644	4,380	6,019	5,239	5,213
CICX-SF-15	0,489	0,786	0,591	0,622	2,680	4,099	3,319	3,366
CICX-SF-16	0,780	0,638	0,845	0,754	5,380	6,360	5,039	5,593
CICX-SF-17	0,444	0,504	0,522	0,490	3,039	3,119	3,200	3,119
CICX-SF-18	0,655	0,575	0,667	0,632	3,480	4,039	4,500	4,006
CICX-SF-19	0,325	0,318	0,342	0,328	1,480	1,600	1,840	1,640
CICX-SF-20	0,581	0,609	0,432	0,541	3,960	4,400	2,920	3,760
CICX-SF-21	0,662	0,740	0,789	0,730	3,940	6,079	5,360	5,126
CICX-SF-22	0,699	0,540	0,480	0,573	5,780	4,440	3,420	4,547
CICX-SF-23	0,517	0,478	0,464	0,486	4,500	3,839	4,059	4,133
CICX-SF-24	0,277	0,432	0,459	0,389	1,720	2,220	2,299	2,080
CICX-SF-25	0,524	0,518	0,549	0,530	2,420	2,359	3,079	2,619
CICX-SF-26	0,416	0,408	0,411	0,412	3,740	3,700	3,720	3,720
CICX-SF-27	0,194	0,574	0,398	0,389	2,140	4,260	2,019	2,806

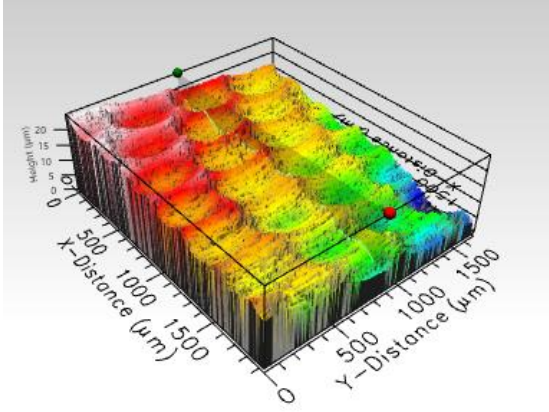
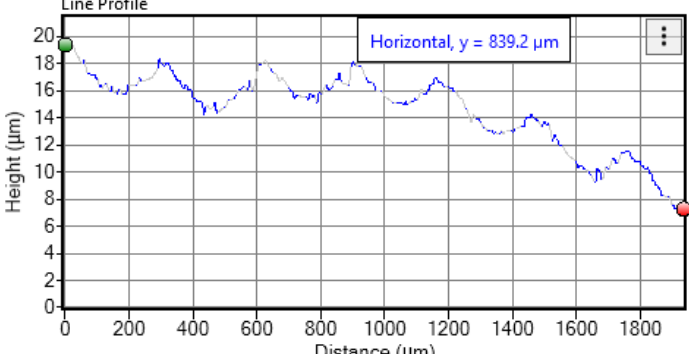
Anexa 1.19 Valorile rugozităților măsurate paralel pe direcția de avans asupra suprafețelor cilindrice convexe prelucrate cu freza toroidală

Tipul suprafeței	R _{a1} [μm]	R _{a2} [μm]	R _{a3} [μm]	Media R _a [μm]	R _{t1} [μm] ²	R _{t2} [μm]	R _{t3} [μm]	Media R _t [μm]
CICX-TR-1	0,445	0,613	0,479	0,512	3,359	3,279	2,920	3,186
CICX-TR-2	0,770	0,788	0,708	0,755	4,659	4,380	5,059	4,699
CICX-TR-3	0,393	0,502	0,513	0,469	2,980	3,740	4,199	3,640
CICX-TR-4	0,815	0,828	0,893	0,845	4,500	5,260	4,860	4,873
CICX-TR-5	0,444	0,586	0,654	0,561	2,480	3,420	3,579	3,160
CICX-TR-6	0,710	0,724	0,886	0,773	4,179	6,199	6,480	5,619
CICX-TR-7	0,981	0,816	0,961	0,919	6,780	5,559	5,679	6,006
CICX-TR-8	0,626	0,624	0,558	0,603	5,920	5,639	5,400	5,653
CICX-TR-9	0,944	0,758	0,750	0,817	6,579	5,559	6,059	6,066
CICX-TR-10	0,654	0,736	0,369	0,586	3,819	5,139	3,259	4,072
CICX-TR-11	0,285	0,417	0,424	0,375	2,599	3,640	2,720	2,986
CICX-TR-12	0,271	0,466	0,452	0,396	1,759	2,359	2,920	2,346
CICX-TR-13	0,633	0,644	0,782	0,686	4,420	3,900	5,780	4,700
CICX-TR-14	0,809	0,637	0,672	0,706	5,420	4,699	4,179	4,766
CICX-TR-15	0,867	0,952	0,648	0,822	7,460	6,059	4,559	6,026
CICX-TR-16	0,805	0,752	0,829	0,795	5,460	4,820	5,760	5,347
CICX-TR-17	0,996	0,884	0,906	0,929	6,400	6,079	6,320	6,266
CICX-TR-18	0,846	0,866	0,763	0,825	6,760	4,539	5,340	5,546
CICX-TR-19	0,529	0,457	0,471	0,486	2,920	3,900	2,880	3,233
CICX-TR-20	0,547	0,251	0,525	0,441	2,779	1,779	3,960	2,839
CICX-TR-21	0,306	0,290	0,404	0,333	2,680	1,720	1,960	2,120
CICX-TR-22	0,953	0,575	0,366	0,631	4,519	4,440	3,420	4,126
CICX-TR-23	0,358	0,443	0,532	0,444	3,319	2,779	4,019	3,372
CICX-TR-24	0,555	0,603	0,511	0,556	4,699	4,500	3,720	4,306
CICX-TR-25	0,948	0,438	0,431	0,606	6,780	2,660	2,600	4,013
CICX-TR-26	0,506	0,691	0,491	0,563	4,820	5,139	4,179	4,713
CICX-TR-27	0,753	0,352	0,553	0,553	4,719	1,919	3,380	3,339

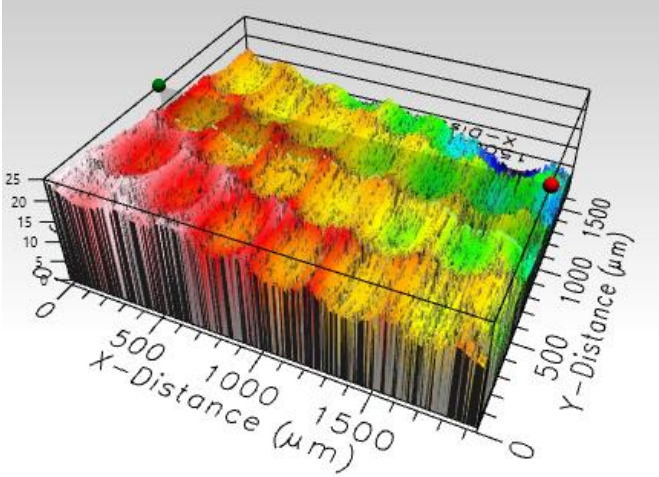
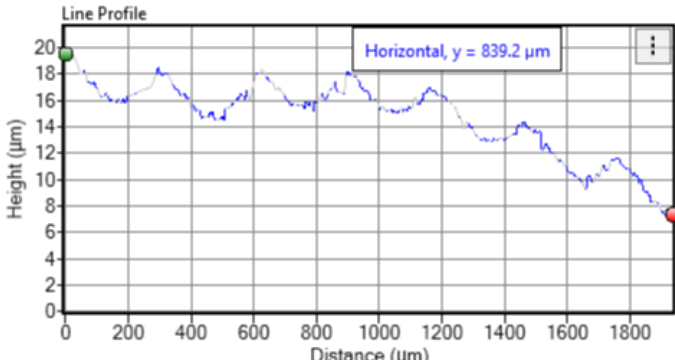
**Anexa 1.20 Valorile rugozităților măsurate
perpendicular pe direcția de avans asupra suprafețelor
cilindrice convexe prelucrate cu freza toroidală**

Tipul suprafeței	R _{a1} [μm]	R _{a2} [μm]	R _{a3} [μm]	Media R _a [μm]	R _{t1} [μm] ²	R _{t2} [μm]	R _{t3} [μm]	Media R _t [μm]
CICX-TR-1	0,853	0,494	0,683	0,677	9,000	4,079	6,519	6,533
CICX-TR-2	0,737	0,910	0,807	0,818	5,760	6,079	5,900	5,913
CICX-TR-3	0,586	0,717	0,925	0,743	4,340	5,760	7,079	5,726
CICX-TR-4	0,644	0,836	0,354	0,611	5,460	8,520	4,639	6,206
CICX-TR-5	0,963	0,922	0,607	0,831	8,460	8,500	5,519	7,493
CICX-TR-6	0,930	0,506	0,743	0,726	7,520	3,759	7,199	6,159
CICX-TR-7	1,179	0,855	0,871	0,968	10,96	7,820	8,539	9,106
CICX-TR-8	0,564	0,881	1,105	0,850	5,760	9,180	9,539	8,160
CICX-TR-9	0,887	0,925	0,941	0,918	8,279	8,039	7,860	8,059
CICX-TR-10	0,986	0,722	0,676	0,795	8,800	10,43	6,079	8,436
CICX-TR-11	0,352	0,506	0,371	0,410	2,099	4,679	4,400	3,726
CICX-TR-12	0,454	0,460	0,451	0,455	3,099	3,680	2,500	3,093
CICX-TR-13	0,913	0,756	0,619	0,763	9,579	7,179	7,739	8,166
CICX-TR-14	0,791	0,985	0,585	0,787	6,599	7,760	9,699	8,019
CICX-TR-15	0,419	0,649	0,490	0,519	2,599	6,599	4,519	4,572
CICX-TR-16	0,679	0,734	0,779	0,731	7,619	7,820	7,360	7,600
CICX-TR-17	0,935	0,776	0,913	0,875	7,480	5,599	7,360	6,813
CICX-TR-18	0,510	0,667	0,583	0,587	6,699	5,900	6,840	6,480
CICX-TR-19	0,279	0,453	0,521	0,418	2,039	4,619	5,320	3,993
CICX-TR-20	0,352	0,412	0,364	0,376	2,339	3,019	2,559	2,639
CICX-TR-21	0,327	0,439	0,477	0,414	2,599	3,059	3,359	3,006
CICX-TR-22	0,366	0,358	0,469	0,398	2,000	1,960	5,519	3,160
CICX-TR-23	0,587	0,651	0,529	0,589	5,159	6,119	3,579	4,952
CICX-TR-24	0,594	0,715	0,584	0,631	5,079	6,739	3,940	5,253
CICX-TR-25	0,595	0,561	0,525	0,560	4,519	4,019	3,339	3,959
CICX-TR-26	0,746	0,632	0,823	0,734	5,840	5,239	6,460	5,846
CICX-TR-27	0,685	0,770	0,846	0,767	5,800	9,399	10,73	8,643

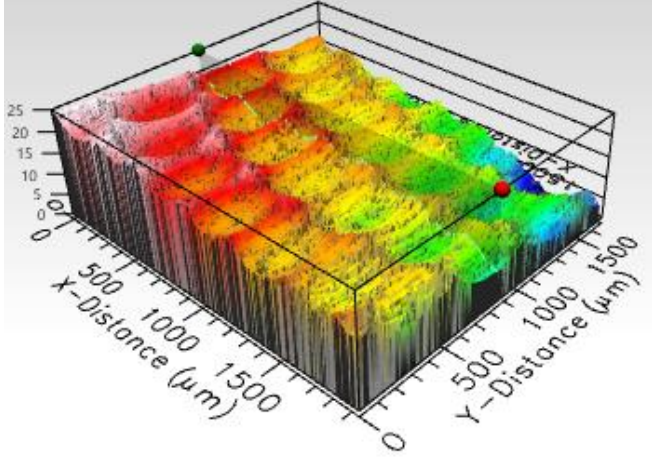
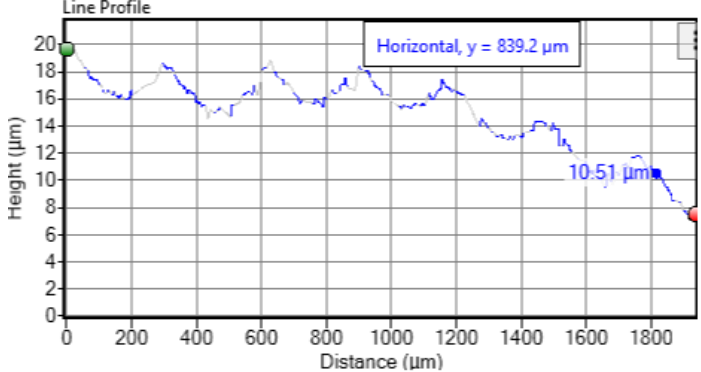
Anexa 2.1 Măsurătoarea numărul 1 asupra suprafeței de test 1

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																				
Suprafața scanată 3D																																					
Graficul rugozității măsurate																																					
Valorile rugozității	<table border="1" data-bbox="858 1196 1193 1630"> <tr><td>Rp</td><td>0.695</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rv</td><td>0.7074</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>0.7112</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rt</td><td>1.402</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>0.3413</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rvm</td><td>0.3699</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rtm</td><td>0.7112</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>1.339</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Ra</td><td>0.1556</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rq</td><td>0.2067</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rsk</td><td>-0.09438</td><td></td></tr> <tr><td>Rku</td><td>4.141</td><td></td></tr> </table>	Rp	0.695	µm	Rv	0.7074	µm	Rz	0.7112	µm	Rt	1.402	µm	Rpm	0.3413	µm	Rvm	0.3699	µm	Rtm	0.7112	µm	Rmax	1.339	µm	Ra	0.1556	µm	Rq	0.2067	µm	Rsk	-0.09438		Rku	4.141	
Rp	0.695	µm																																			
Rv	0.7074	µm																																			
Rz	0.7112	µm																																			
Rt	1.402	µm																																			
Rpm	0.3413	µm																																			
Rvm	0.3699	µm																																			
Rtm	0.7112	µm																																			
Rmax	1.339	µm																																			
Ra	0.1556	µm																																			
Rq	0.2067	µm																																			
Rsk	-0.09438																																				
Rku	4.141																																				

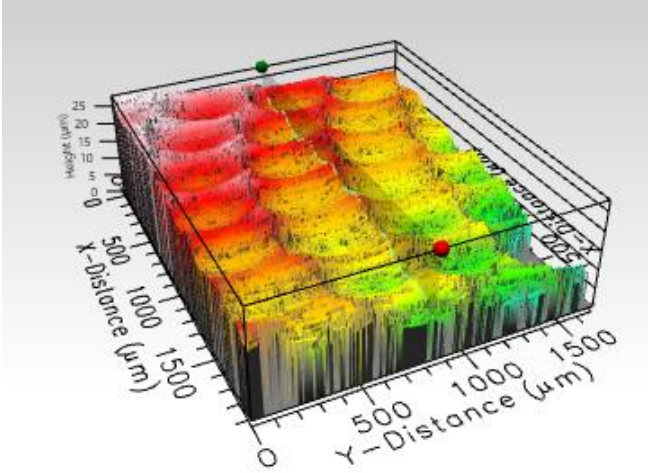
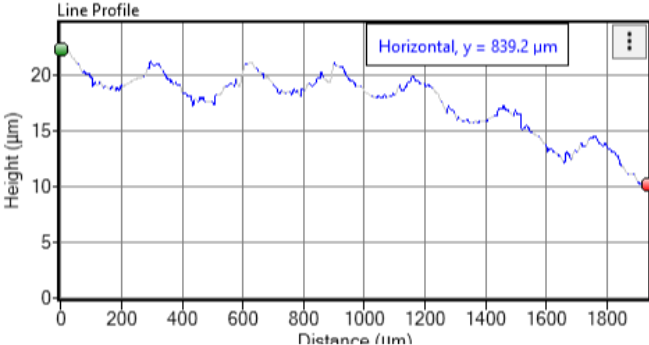
Anexa 2.2 Măsurătoarea numărul 2 asupra suprafeței de test 1

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																							
Suprafața scanată 3D																																								
Graficul rugozității măsurate																																								
Valorile rugozității		<table border="1" data-bbox="561 1281 890 1704"> <tr><td>Rp</td><td>0.7045</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rv</td><td>0.7199</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>0.7215</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rt</td><td>1.424</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>0.3559</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rvm</td><td>0.3656</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rtm</td><td>0.7215</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>1.376</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Ra</td><td>0.162</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rq</td><td>0.2132</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rsk</td><td>-0.07311</td><td></td></tr> <tr><td>Rku</td><td>3.945</td><td></td></tr> </table>	Rp	0.7045	µm	Rv	0.7199	µm	Rz	0.7215	µm	Rt	1.424	µm	Rpm	0.3559	µm	Rvm	0.3656	µm	Rtm	0.7215	µm	Rmax	1.376	µm	Ra	0.162	µm	Rq	0.2132	µm	Rsk	-0.07311		Rku	3.945			
Rp	0.7045	µm																																						
Rv	0.7199	µm																																						
Rz	0.7215	µm																																						
Rt	1.424	µm																																						
Rpm	0.3559	µm																																						
Rvm	0.3656	µm																																						
Rtm	0.7215	µm																																						
Rmax	1.376	µm																																						
Ra	0.162	µm																																						
Rq	0.2132	µm																																						
Rsk	-0.07311																																							
Rku	3.945																																							

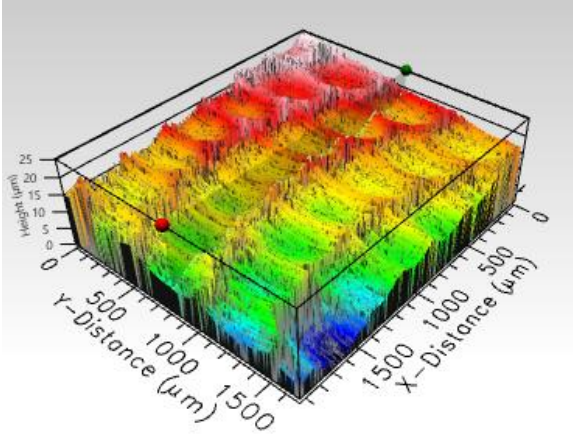
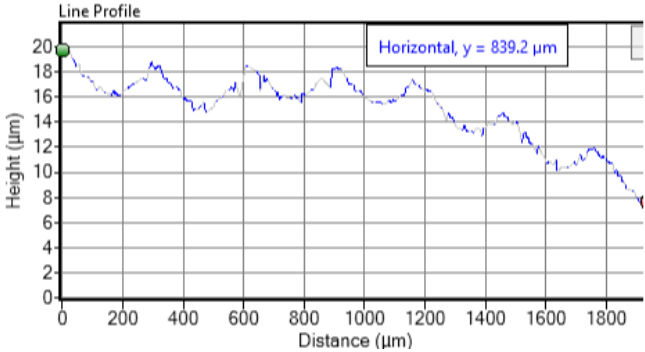
Anexa 2.3 Măsurătoarea numărul 3 asupra suprafeței de test 1

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																				
Suprafața scanată 3D																																					
Graficul rugozității măsurate																																					
Valorile rugozității	<table border="1" data-bbox="863 1279 1187 1711"> <tr> <td>Rp</td> <td>0.7147</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rv</td> <td>1.103</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rz</td> <td>0.8164</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rt</td> <td>1.818</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rpm</td> <td>0.3845</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rvm</td> <td>0.4319</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rtm</td> <td>0.8164</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rmax</td> <td>1.728</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Ra</td> <td>0.1743</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rq</td> <td>0.2397</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rsk</td> <td>-0.5322</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rku</td> <td>5.298</td> <td></td> </tr> </table>	Rp	0.7147	µm	Rv	1.103	µm	Rz	0.8164	µm	Rt	1.818	µm	Rpm	0.3845	µm	Rvm	0.4319	µm	Rtm	0.8164	µm	Rmax	1.728	µm	Ra	0.1743	µm	Rq	0.2397	µm	Rsk	-0.5322		Rku	5.298	
Rp	0.7147	µm																																			
Rv	1.103	µm																																			
Rz	0.8164	µm																																			
Rt	1.818	µm																																			
Rpm	0.3845	µm																																			
Rvm	0.4319	µm																																			
Rtm	0.8164	µm																																			
Rmax	1.728	µm																																			
Ra	0.1743	µm																																			
Rq	0.2397	µm																																			
Rsk	-0.5322																																				
Rku	5.298																																				

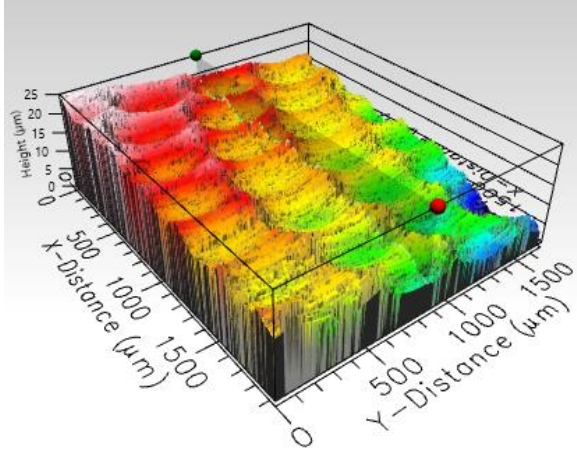
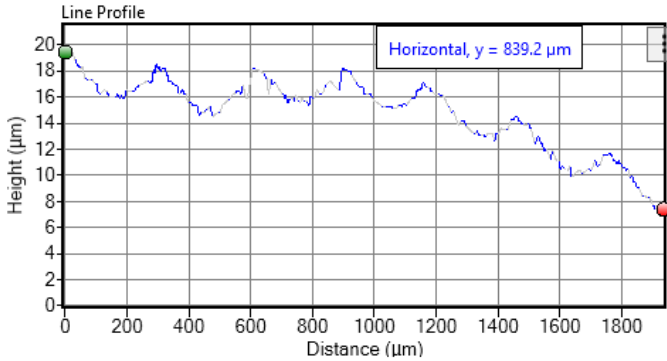
Anexa 2.4 Măsurătoarea numărul 4 asupra suprafeței de test 1

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																				
Suprafața scanată 3D																																					
Graficul rugozității măsurate																																					
Valorile rugozității	<table border="1" data-bbox="580 1294 868 1688"> <tr> <td>Rp</td> <td>0.7208</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rv</td> <td>0.721</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rz</td> <td>0.7153</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rt</td> <td>1.442</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rpm</td> <td>0.3226</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rvm</td> <td>0.3927</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rtm</td> <td>0.7153</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rmax</td> <td>1.367</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Ra</td> <td>0.1534</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rq</td> <td>0.2051</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rsk</td> <td>-0.2018</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rku</td> <td>4.201</td> <td></td> </tr> </table>	Rp	0.7208	µm	Rv	0.721	µm	Rz	0.7153	µm	Rt	1.442	µm	Rpm	0.3226	µm	Rvm	0.3927	µm	Rtm	0.7153	µm	Rmax	1.367	µm	Ra	0.1534	µm	Rq	0.2051	µm	Rsk	-0.2018		Rku	4.201	
Rp	0.7208	µm																																			
Rv	0.721	µm																																			
Rz	0.7153	µm																																			
Rt	1.442	µm																																			
Rpm	0.3226	µm																																			
Rvm	0.3927	µm																																			
Rtm	0.7153	µm																																			
Rmax	1.367	µm																																			
Ra	0.1534	µm																																			
Rq	0.2051	µm																																			
Rsk	-0.2018																																				
Rku	4.201																																				

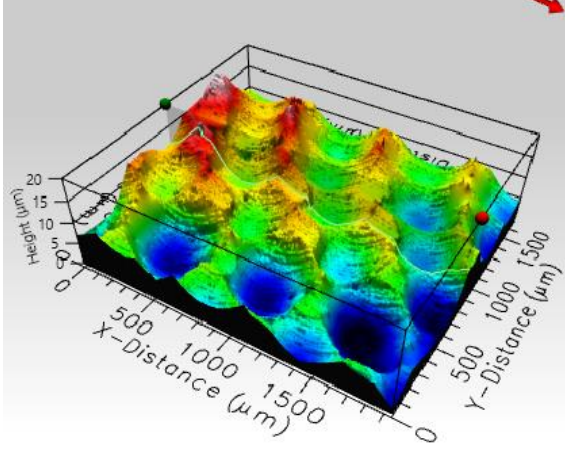
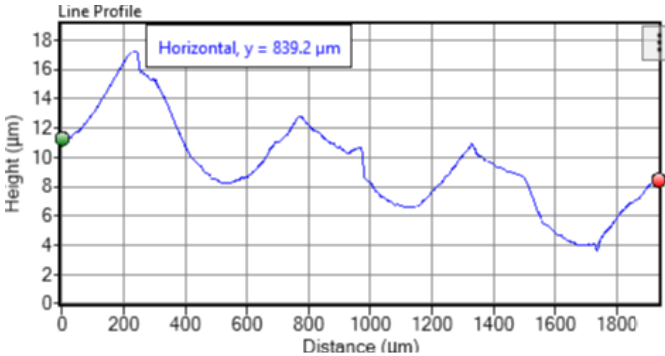
Anexa 2.5 Măsurătoarea numărul 5 asupra suprafeței de test 1

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																					
Suprafața scanată 3D																																						
Graficul rugozității măsurate																																						
Valorile rugozității	<table border="1" data-bbox="863 1279 1190 1711"> <tr> <td>Rp</td> <td>0.6562</td> <td>μm</td> </tr> <tr> <td>Rv</td> <td>1.015</td> <td>μm</td> </tr> <tr> <td>Rz</td> <td>0.7518</td> <td>μm</td> </tr> <tr> <td>Rt</td> <td>1.671</td> <td>μm</td> </tr> <tr> <td>Rpm</td> <td>0.3315</td> <td>μm</td> </tr> <tr> <td>Rvm</td> <td>0.4203</td> <td>μm</td> </tr> <tr> <td>Rtm</td> <td>0.7518</td> <td>μm</td> </tr> <tr> <td>Rmax</td> <td>1.564</td> <td>μm</td> </tr> <tr> <td>Ra</td> <td>0.1516</td> <td>μm</td> </tr> <tr> <td>Rq</td> <td>0.2133</td> <td>μm</td> </tr> <tr> <td>Rsk</td> <td>-0.8805</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rku</td> <td>6.446</td> <td></td> </tr> </table>		Rp	0.6562	μm	Rv	1.015	μm	Rz	0.7518	μm	Rt	1.671	μm	Rpm	0.3315	μm	Rvm	0.4203	μm	Rtm	0.7518	μm	Rmax	1.564	μm	Ra	0.1516	μm	Rq	0.2133	μm	Rsk	-0.8805		Rku	6.446	
Rp	0.6562	μm																																				
Rv	1.015	μm																																				
Rz	0.7518	μm																																				
Rt	1.671	μm																																				
Rpm	0.3315	μm																																				
Rvm	0.4203	μm																																				
Rtm	0.7518	μm																																				
Rmax	1.564	μm																																				
Ra	0.1516	μm																																				
Rq	0.2133	μm																																				
Rsk	-0.8805																																					
Rku	6.446																																					

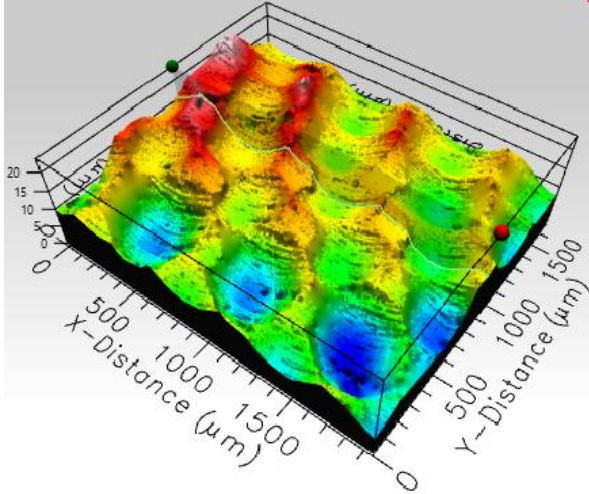
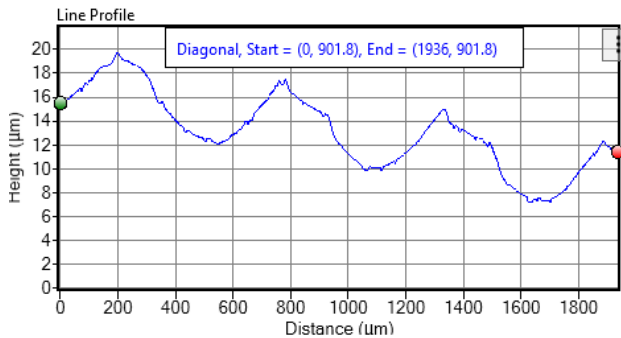
Anexa 2.6 Măsurătoarea numărul 6 asupra suprafeței de test 1

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																						
Suprafața scanată 3D																																							
Graficul rugozității măsurate																																							
Valorile rugozității	<table border="1" data-bbox="564 1279 884 1706"> <tr> <td>Rp</td> <td>0.6257</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rv</td> <td>0.9503</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rz</td> <td>0.7888</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rt</td> <td>1.576</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rpm</td> <td>0.3697</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rvm</td> <td>0.419</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rtm</td> <td>0.7888</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rmax</td> <td>1.515</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Ra</td> <td>0.1624</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rq</td> <td>0.2165</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rsk</td> <td>-0.5304</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rku</td> <td>4.868</td> <td></td> </tr> </table>			Rp	0.6257	µm	Rv	0.9503	µm	Rz	0.7888	µm	Rt	1.576	µm	Rpm	0.3697	µm	Rvm	0.419	µm	Rtm	0.7888	µm	Rmax	1.515	µm	Ra	0.1624	µm	Rq	0.2165	µm	Rsk	-0.5304		Rku	4.868	
Rp	0.6257	µm																																					
Rv	0.9503	µm																																					
Rz	0.7888	µm																																					
Rt	1.576	µm																																					
Rpm	0.3697	µm																																					
Rvm	0.419	µm																																					
Rtm	0.7888	µm																																					
Rmax	1.515	µm																																					
Ra	0.1624	µm																																					
Rq	0.2165	µm																																					
Rsk	-0.5304																																						
Rku	4.868																																						

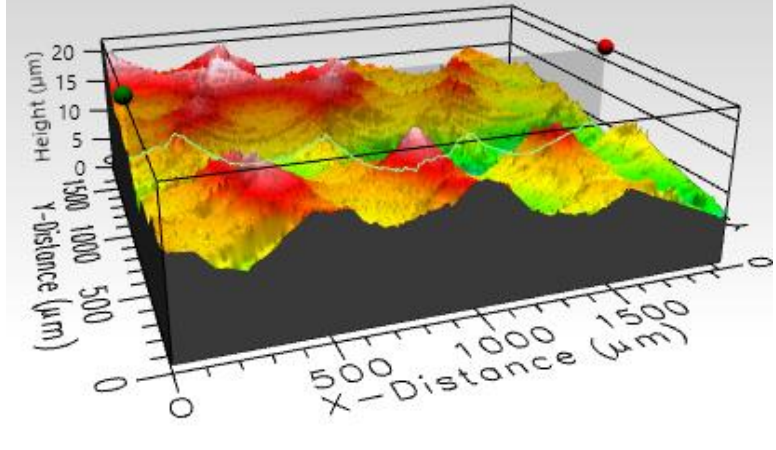
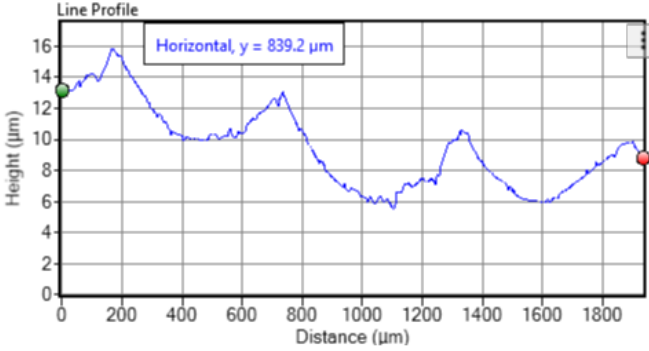
Anexa 2.7 Măsurătoarea numărul 1 asupra suprafeței de test 2

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																						
Suprafața scanată 3D																																							
Graficul rugozității măsurate																																							
Valorile rugozității	<table border="1" data-bbox="871 1279 1182 1711"> <tr> <td>Rp</td> <td>1.247</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rv</td> <td>0.8225</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rz</td> <td>1.302</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rt</td> <td>2.07</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rpm</td> <td>0.9123</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rvm</td> <td>0.3894</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rtm</td> <td>1.302</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rmax</td> <td>1.747</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Ra</td> <td>0.2625</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rq</td> <td>0.3461</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rsk</td> <td>1.117</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rku</td> <td>4.123</td> <td></td> </tr> </table>			Rp	1.247	µm	Rv	0.8225	µm	Rz	1.302	µm	Rt	2.07	µm	Rpm	0.9123	µm	Rvm	0.3894	µm	Rtm	1.302	µm	Rmax	1.747	µm	Ra	0.2625	µm	Rq	0.3461	µm	Rsk	1.117		Rku	4.123	
Rp	1.247	µm																																					
Rv	0.8225	µm																																					
Rz	1.302	µm																																					
Rt	2.07	µm																																					
Rpm	0.9123	µm																																					
Rvm	0.3894	µm																																					
Rtm	1.302	µm																																					
Rmax	1.747	µm																																					
Ra	0.2625	µm																																					
Rq	0.3461	µm																																					
Rsk	1.117																																						
Rku	4.123																																						

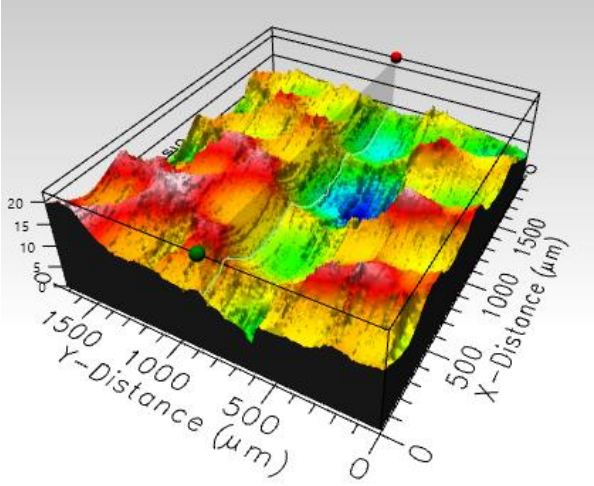
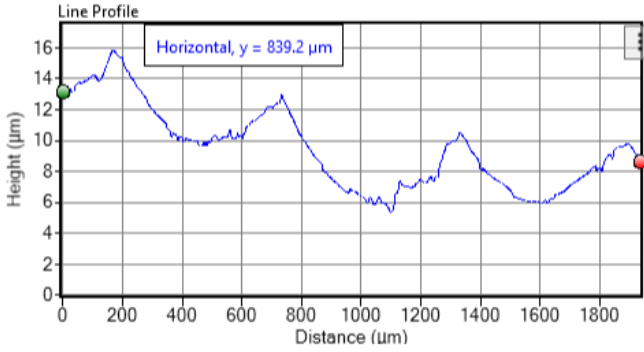
Anexa 2.8 Măsurătoarea numărul 2 asupra suprafeței de test 2

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																				
Suprafața scanată 3D																																					
Graficul rugozității măsurate																																					
Valorile rugozității	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Rp</td><td>1.185</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rv</td><td>0.6022</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>1.07</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rt</td><td>1.787</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>0.5959</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rvm</td><td>0.4742</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rtm</td><td>1.07</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>1.544</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Ra</td><td>0.2584</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rq</td><td>0.3342</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rsk</td><td>1.072</td><td></td></tr> <tr><td>Rku</td><td>4.079</td><td></td></tr> </table>	Rp	1.185	µm	Rv	0.6022	µm	Rz	1.07	µm	Rt	1.787	µm	Rpm	0.5959	µm	Rvm	0.4742	µm	Rtm	1.07	µm	Rmax	1.544	µm	Ra	0.2584	µm	Rq	0.3342	µm	Rsk	1.072		Rku	4.079	
Rp	1.185	µm																																			
Rv	0.6022	µm																																			
Rz	1.07	µm																																			
Rt	1.787	µm																																			
Rpm	0.5959	µm																																			
Rvm	0.4742	µm																																			
Rtm	1.07	µm																																			
Rmax	1.544	µm																																			
Ra	0.2584	µm																																			
Rq	0.3342	µm																																			
Rsk	1.072																																				
Rku	4.079																																				

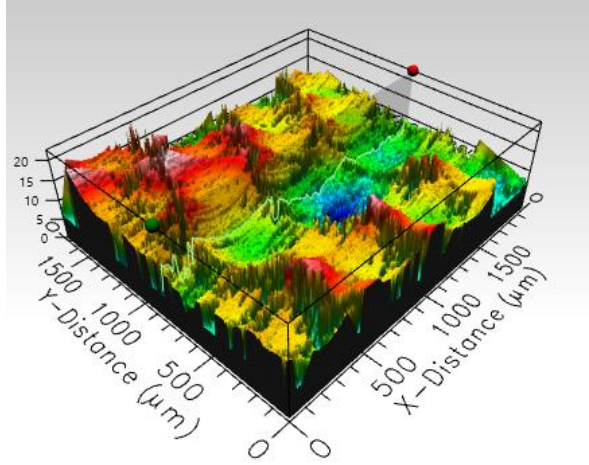
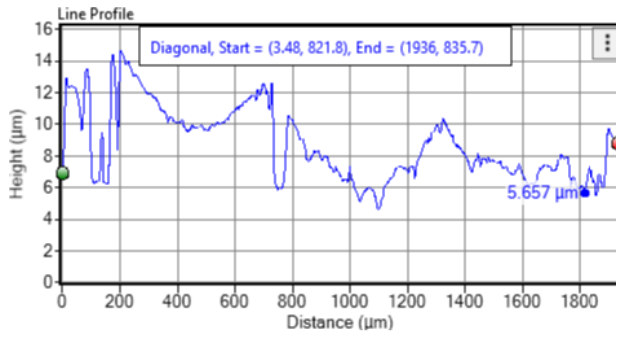
Anexa 2.9 Măsurătoarea numărul 3 asupra suprafeței de test 2

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																				
Suprafața scanată 3D																																					
Graficul rugozității măsurate																																					
Valorile rugozității	<table border="1" data-bbox="890 1303 1166 1688"> <tbody> <tr><td>Rp</td><td>1.16</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rv</td><td>0.9823</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>1.189</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rt</td><td>2.142</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>0.5865</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rvm</td><td>0.6026</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rtm</td><td>1.189</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>2.036</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Ra</td><td>0.23</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rq</td><td>0.3261</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rsk</td><td>1.09</td><td></td></tr> <tr><td>Rku</td><td>4.939</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Rp	1.16	µm	Rv	0.9823	µm	Rz	1.189	µm	Rt	2.142	µm	Rpm	0.5865	µm	Rvm	0.6026	µm	Rtm	1.189	µm	Rmax	2.036	µm	Ra	0.23	µm	Rq	0.3261	µm	Rsk	1.09		Rku	4.939	
Rp	1.16	µm																																			
Rv	0.9823	µm																																			
Rz	1.189	µm																																			
Rt	2.142	µm																																			
Rpm	0.5865	µm																																			
Rvm	0.6026	µm																																			
Rtm	1.189	µm																																			
Rmax	2.036	µm																																			
Ra	0.23	µm																																			
Rq	0.3261	µm																																			
Rsk	1.09																																				
Rku	4.939																																				

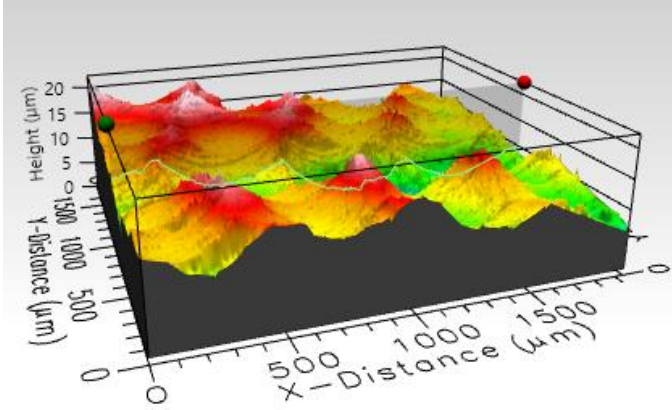
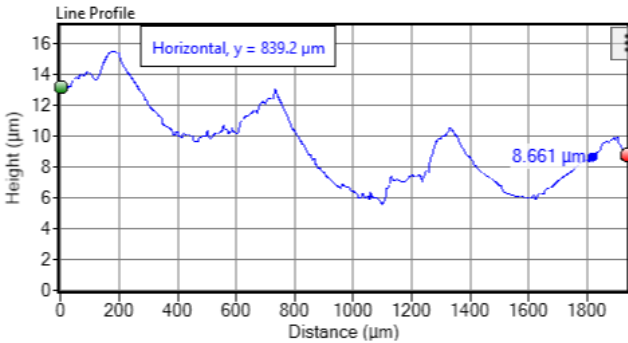
Anexa 2.10 Măsurătoarea numărul 4 asupra suprafeței de test 2

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																						
Suprafața scanată 3D																																							
Graficul rugozității măsurate																																							
Valorile rugozității	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr><td>Rp</td><td>1.159</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rv</td><td>0.9382</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>1.233</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rt</td><td>2.097</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>0.6339</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rvm</td><td>0.599</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rtm</td><td>1.233</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>1.817</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Ra</td><td>0.2366</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rq</td><td>0.3311</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rsk</td><td>0.8824</td><td></td></tr> <tr><td>Rku</td><td>4.534</td><td></td></tr> </tbody> </table>			Rp	1.159	μm	Rv	0.9382	μm	Rz	1.233	μm	Rt	2.097	μm	Rpm	0.6339	μm	Rvm	0.599	μm	Rtm	1.233	μm	Rmax	1.817	μm	Ra	0.2366	μm	Rq	0.3311	μm	Rsk	0.8824		Rku	4.534	
Rp	1.159	μm																																					
Rv	0.9382	μm																																					
Rz	1.233	μm																																					
Rt	2.097	μm																																					
Rpm	0.6339	μm																																					
Rvm	0.599	μm																																					
Rtm	1.233	μm																																					
Rmax	1.817	μm																																					
Ra	0.2366	μm																																					
Rq	0.3311	μm																																					
Rsk	0.8824																																						
Rku	4.534																																						

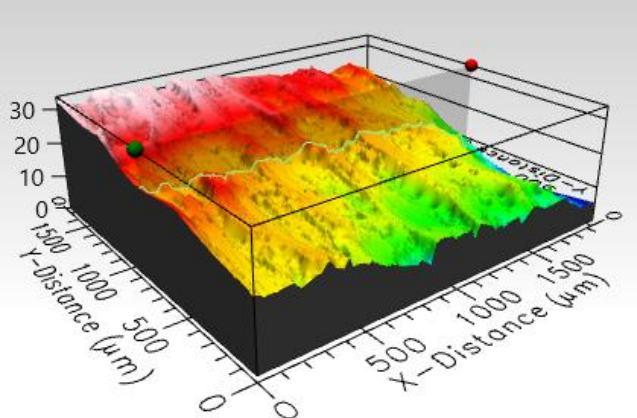
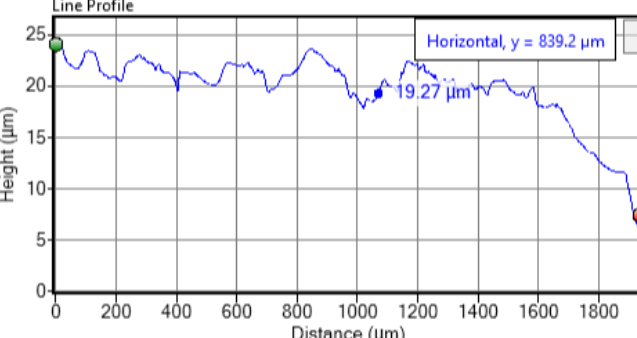
Anexa 2.11 Măsurătoarea numărul 5 asupra suprafeței de test 2

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																				
Suprafața scanată 3D																																					
Graficul rugozității măsurate																																					
Valorile rugozității	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Rp</td><td>3.211</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rv</td><td>4.032</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>1.502</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rt</td><td>7.243</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>0.7673</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rvm</td><td>0.735</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rtm</td><td>1.502</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>7.243</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Ra</td><td>0.3217</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rq</td><td>0.6087</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rsk</td><td>0.1916</td><td></td></tr> <tr><td>Rku</td><td>13.66</td><td></td></tr> </table>	Rp	3.211	μm	Rv	4.032	μm	Rz	1.502	μm	Rt	7.243	μm	Rpm	0.7673	μm	Rvm	0.735	μm	Rtm	1.502	μm	Rmax	7.243	μm	Ra	0.3217	μm	Rq	0.6087	μm	Rsk	0.1916		Rku	13.66	
Rp	3.211	μm																																			
Rv	4.032	μm																																			
Rz	1.502	μm																																			
Rt	7.243	μm																																			
Rpm	0.7673	μm																																			
Rvm	0.735	μm																																			
Rtm	1.502	μm																																			
Rmax	7.243	μm																																			
Ra	0.3217	μm																																			
Rq	0.6087	μm																																			
Rsk	0.1916																																				
Rku	13.66																																				

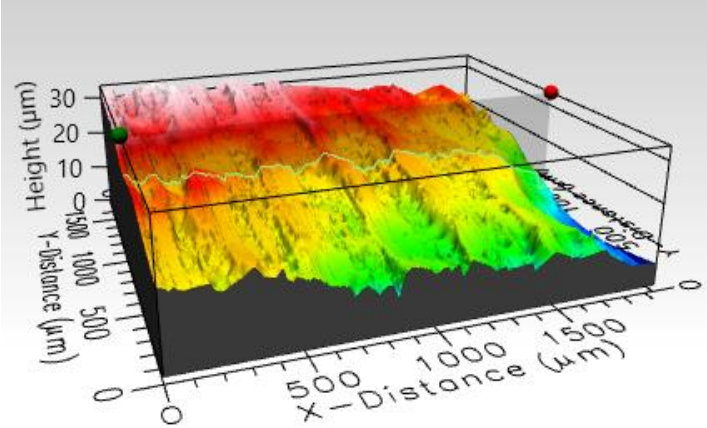
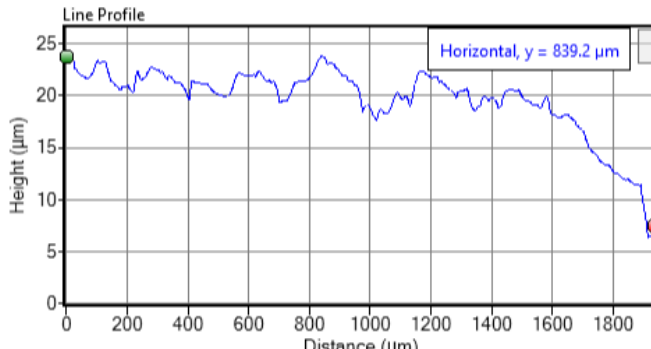
Anexa 2.12 Măsurătoarea numărul 6 asupra suprafeței de test 2

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																						
Suprafața scanată 3D																																							
Graficul rugozității măsurate																																							
Valorile rugozității	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr><td>Rp</td><td>1.171</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rv</td><td>0.9522</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>1.198</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rt</td><td>2.123</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>0.6132</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rvm</td><td>0.5849</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rtm</td><td>1.198</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>2.029</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Ra</td><td>0.2271</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rq</td><td>0.3221</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rsk</td><td>0.9042</td><td></td></tr> <tr><td>Rku</td><td>4.542</td><td></td></tr> </tbody> </table>			Rp	1.171	μm	Rv	0.9522	μm	Rz	1.198	μm	Rt	2.123	μm	Rpm	0.6132	μm	Rvm	0.5849	μm	Rtm	1.198	μm	Rmax	2.029	μm	Ra	0.2271	μm	Rq	0.3221	μm	Rsk	0.9042		Rku	4.542	
Rp	1.171	μm																																					
Rv	0.9522	μm																																					
Rz	1.198	μm																																					
Rt	2.123	μm																																					
Rpm	0.6132	μm																																					
Rvm	0.5849	μm																																					
Rtm	1.198	μm																																					
Rmax	2.029	μm																																					
Ra	0.2271	μm																																					
Rq	0.3221	μm																																					
Rsk	0.9042																																						
Rku	4.542																																						

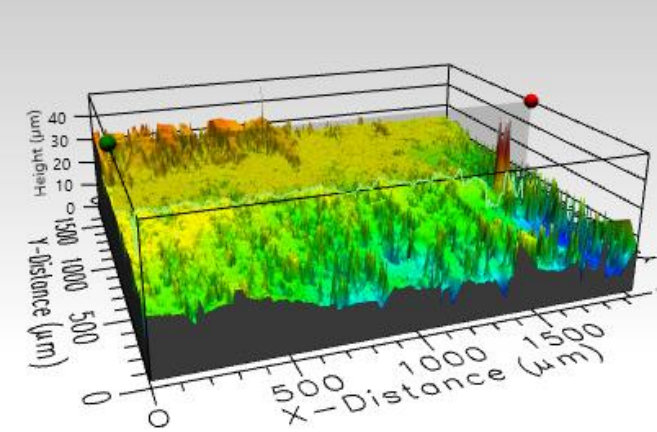
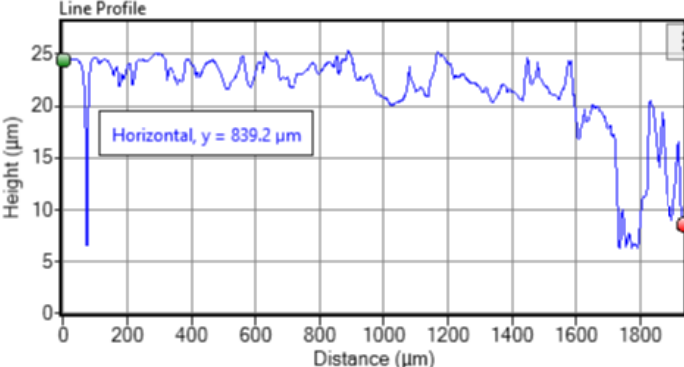
Anexa 2.13 Măsurătoarea numărul 1 asupra suprafeței de test 3

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D			
Suprafața scanată 3D				
Graficul rugozității măsurate				
Valorile rugozității		Rp	2.346	μm
		Rv	2.885	μm
		Rz	5.23	μm
		Rt	5.23	μm
		Rpm	2.346	μm
		Rvm	2.885	μm
		Rtm	5.23	μm
		Rmax	5.23	μm
		Ra	0.8362	μm
		Rq	1.059	μm
		Rsk	-0.2083	
		Rku	2.691	

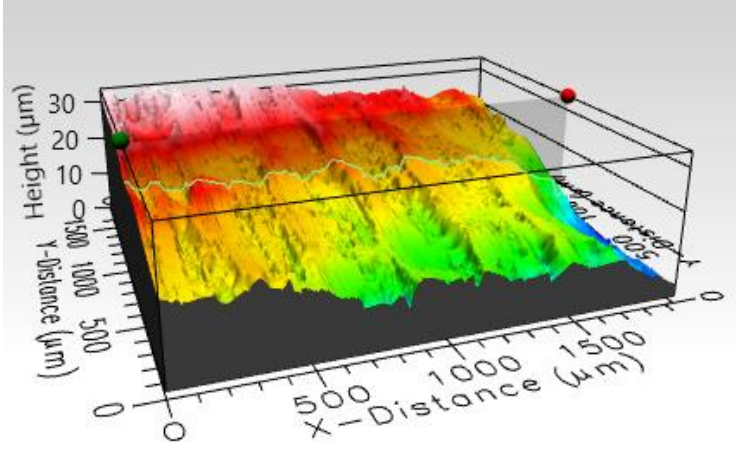
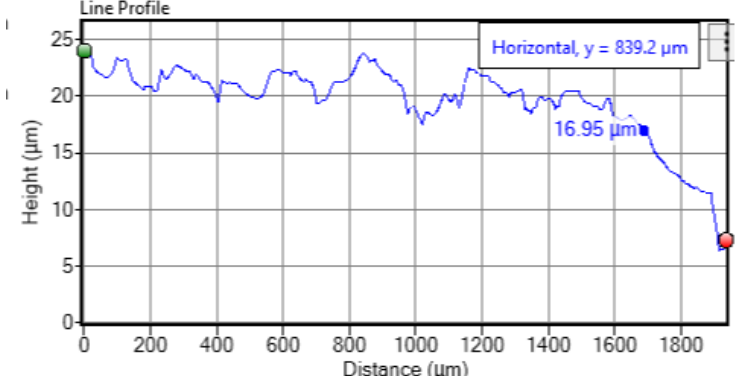
Anexa 2.14 Măsurătoarea numărul 2 asupra suprafeței de test 3

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																						
Suprafața scanată 3D																																							
Graficul rugozității măsurate																																							
Valorile rugozității	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tbody> <tr><td>Rp</td><td>2.553</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rv</td><td>3.009</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>5.562</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rt</td><td>5.562</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>2.553</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rvm</td><td>3.009</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rtm</td><td>5.562</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>5.562</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Ra</td><td>0.9006</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rq</td><td>1.122</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rsk</td><td>-0.2445</td><td></td></tr> <tr><td>Rku</td><td>2.613</td><td></td></tr> </tbody> </table>			Rp	2.553	μm	Rv	3.009	μm	Rz	5.562	μm	Rt	5.562	μm	Rpm	2.553	μm	Rvm	3.009	μm	Rtm	5.562	μm	Rmax	5.562	μm	Ra	0.9006	μm	Rq	1.122	μm	Rsk	-0.2445		Rku	2.613	
Rp	2.553	μm																																					
Rv	3.009	μm																																					
Rz	5.562	μm																																					
Rt	5.562	μm																																					
Rpm	2.553	μm																																					
Rvm	3.009	μm																																					
Rtm	5.562	μm																																					
Rmax	5.562	μm																																					
Ra	0.9006	μm																																					
Rq	1.122	μm																																					
Rsk	-0.2445																																						
Rku	2.613																																						

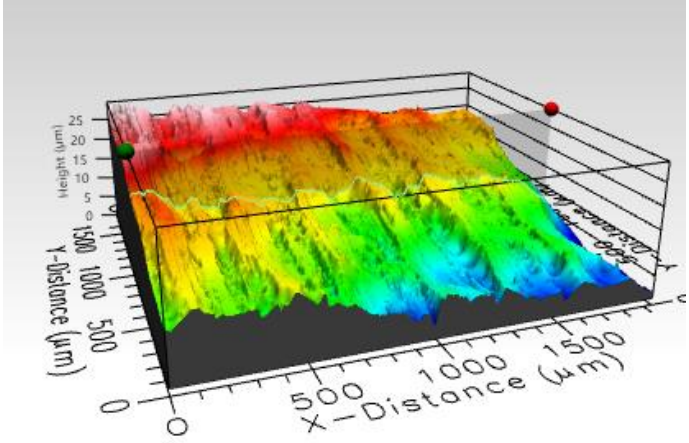
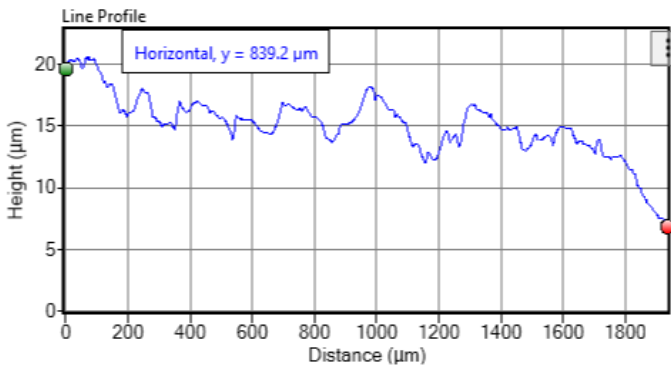
Anexa 2.15 Măsurătoarea numărul 3 asupra suprafeței de test 3

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																						
Suprafața scanată 3D	 <p>A 3D surface scan image showing a textured surface. The vertical axis is labeled 'Height (μm)' with values 0, 10, 20, 30, 40. The horizontal axes are labeled 'Y-Distance (μm)' and 'X-Distance (μm)' with values 0, 500, 1000, 1500. The surface is color-coded by height, with green representing lower elevations and yellow/orange representing higher elevations. A red dot is visible on the surface at approximately (1800, 1500, 35).</p>																																						
Graficul rugozității măsurate	 <p>A line profile graph titled 'Line Profile'. The vertical axis is labeled 'Height (μm)' with values 0, 5, 10, 15, 20, 25. The horizontal axis is labeled 'Distance (μm)' with values 0, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800. The graph shows a blue line representing the surface profile, which fluctuates around a mean height of approximately 20 μm. A horizontal line is drawn at a height of 839.2 μm, with a label 'Horizontal, y = 839.2 μm'.</p>																																						
Valorile rugozității		<table border="1"> <tr><td>Rp</td><td>3.958</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rv</td><td>5.948</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>3.893</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rt</td><td>9.905</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>2.262</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rvm</td><td>1.631</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rtm</td><td>3.893</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>6.912</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Ra</td><td>0.8761</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rq</td><td>1.279</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rsk</td><td>-0.7043</td><td></td></tr> <tr><td>Rku</td><td>6.42</td><td></td></tr> </table>	Rp	3.958	μm	Rv	5.948	μm	Rz	3.893	μm	Rt	9.905	μm	Rpm	2.262	μm	Rvm	1.631	μm	Rtm	3.893	μm	Rmax	6.912	μm	Ra	0.8761	μm	Rq	1.279	μm	Rsk	-0.7043		Rku	6.42		
Rp	3.958	μm																																					
Rv	5.948	μm																																					
Rz	3.893	μm																																					
Rt	9.905	μm																																					
Rpm	2.262	μm																																					
Rvm	1.631	μm																																					
Rtm	3.893	μm																																					
Rmax	6.912	μm																																					
Ra	0.8761	μm																																					
Rq	1.279	μm																																					
Rsk	-0.7043																																						
Rku	6.42																																						

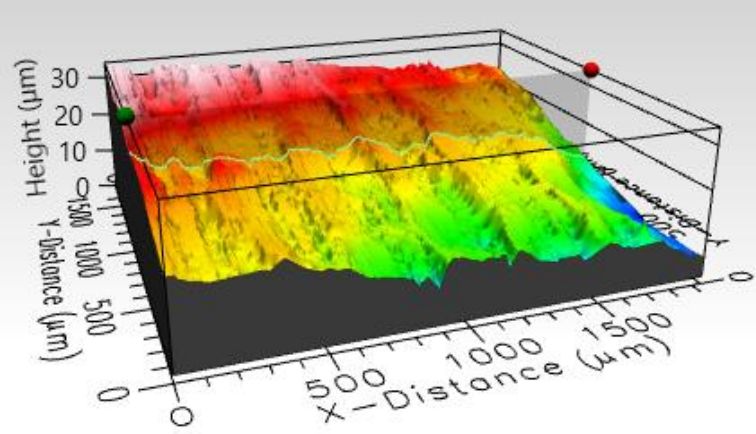
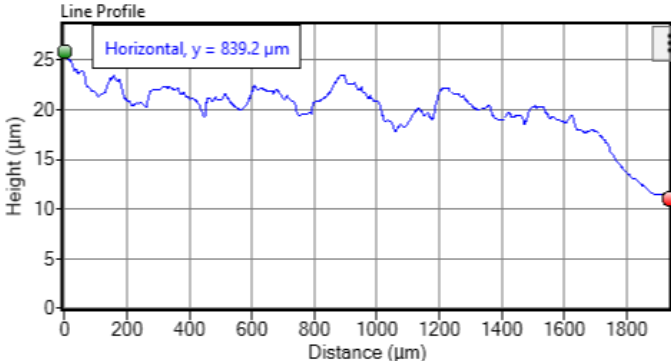
Anexa 2.16 Măsurătoarea numărul 4 asupra suprafeței de test 3

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																				
Suprafața scanată 3D																																					
Graficul rugozității măsurate																																					
Valorile rugozității	<table border="1" data-bbox="564 1290 884 1718"> <tr><td>Rp</td><td>2.494</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rv</td><td>3.048</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>5.542</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rt</td><td>5.542</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>2.494</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rvm</td><td>3.048</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rtm</td><td>5.542</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>5.542</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Ra</td><td>0.9045</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rq</td><td>1.128</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rsk</td><td>-0.194</td><td></td></tr> <tr><td>Rku</td><td>2.573</td><td></td></tr> </table>	Rp	2.494	µm	Rv	3.048	µm	Rz	5.542	µm	Rt	5.542	µm	Rpm	2.494	µm	Rvm	3.048	µm	Rtm	5.542	µm	Rmax	5.542	µm	Ra	0.9045	µm	Rq	1.128	µm	Rsk	-0.194		Rku	2.573	
Rp	2.494	µm																																			
Rv	3.048	µm																																			
Rz	5.542	µm																																			
Rt	5.542	µm																																			
Rpm	2.494	µm																																			
Rvm	3.048	µm																																			
Rtm	5.542	µm																																			
Rmax	5.542	µm																																			
Ra	0.9045	µm																																			
Rq	1.128	µm																																			
Rsk	-0.194																																				
Rku	2.573																																				

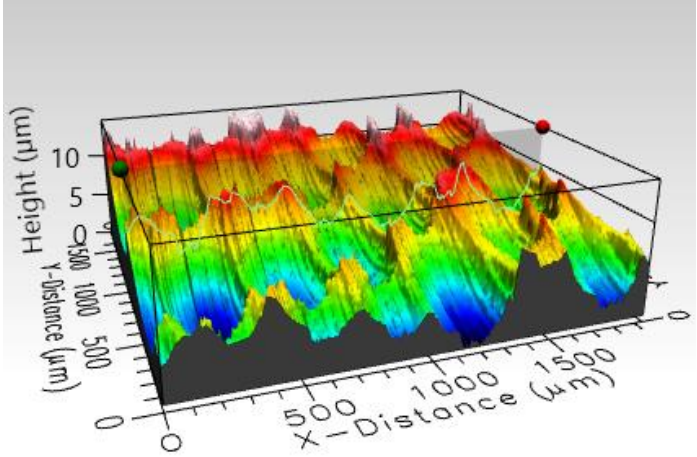
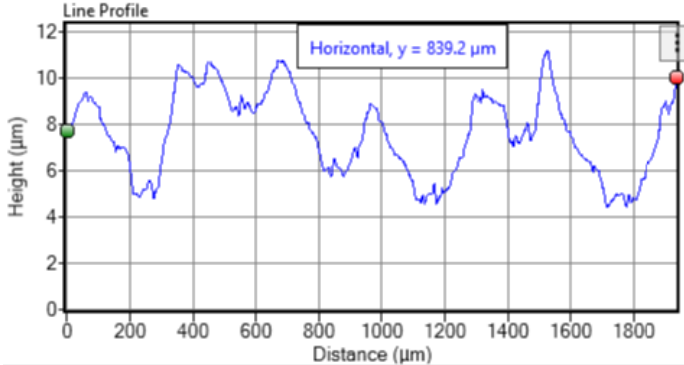
Anexa 2.17 Măsurătoarea numărul 5 asupra suprafeței de test 3

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																				
Suprafața scanată 3D																																					
Graficul rugozității măsurate																																					
Valorile rugozității	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Rp</td><td>2.627</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rv</td><td>2.849</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>5.475</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rt</td><td>5.475</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>2.627</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rvm</td><td>2.849</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rtm</td><td>5.475</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>5.475</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Ra</td><td>0.8961</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rq</td><td>1.125</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rsk</td><td>-0.06702</td><td></td></tr> <tr><td>Rku</td><td>2.646</td><td></td></tr> </table>	Rp	2.627	µm	Rv	2.849	µm	Rz	5.475	µm	Rt	5.475	µm	Rpm	2.627	µm	Rvm	2.849	µm	Rtm	5.475	µm	Rmax	5.475	µm	Ra	0.8961	µm	Rq	1.125	µm	Rsk	-0.06702		Rku	2.646	
Rp	2.627	µm																																			
Rv	2.849	µm																																			
Rz	5.475	µm																																			
Rt	5.475	µm																																			
Rpm	2.627	µm																																			
Rvm	2.849	µm																																			
Rtm	5.475	µm																																			
Rmax	5.475	µm																																			
Ra	0.8961	µm																																			
Rq	1.125	µm																																			
Rsk	-0.06702																																				
Rku	2.646																																				

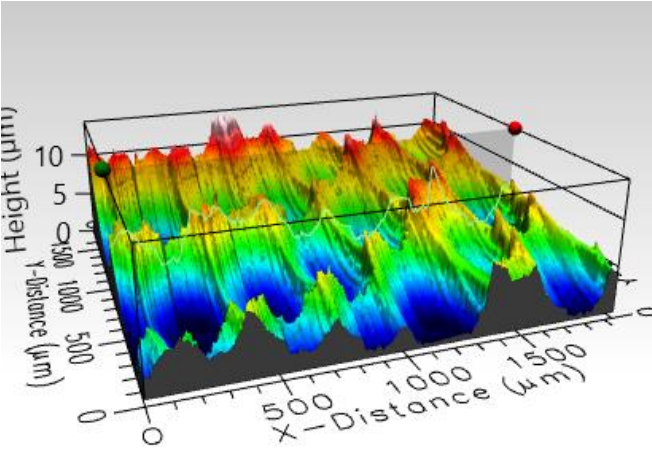
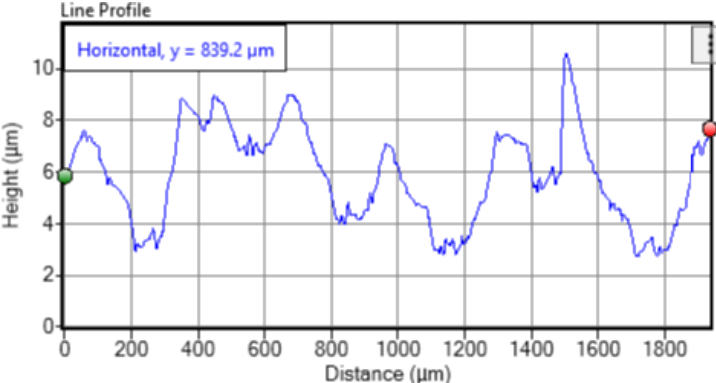
Anexa 2.18 Măsurătoarea numărul 6 asupra suprafeței de test 3

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																				
Suprafața scanată 3D	 <p>A 3D surface scan image showing a textured surface. The vertical axis is labeled 'Height (μm)' with values 0, 10, 20, 30. The horizontal axes are labeled 'Y-Distance (μm)' and 'X-Distance (μm)', both with values 0, 500, 1000, 1500. The surface is color-coded by height, with red at the top and blue at the bottom. A green dot is at the top left and a red dot is at the top right.</p>																																				
Graficul rugozității măsurate	 <p>A line profile graph titled 'Line Profile'. The vertical axis is 'Height (μm)' from 0 to 25. The horizontal axis is 'Distance (μm)' from 0 to 1800. A blue line shows the surface profile. A horizontal line is drawn at 'Horizontal, y = 839.2 μm'. A green dot is at the start of the profile and a red dot is at the end.</p>																																				
Valorile rugozității	<table border="1" data-bbox="584 1323 863 1688"> <tbody> <tr><td>Rp</td><td>2.457</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rv</td><td>2.634</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>5.091</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rt</td><td>5.091</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>2.457</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rvm</td><td>2.634</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rtm</td><td>5.091</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>5.091</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Ra</td><td>0.8406</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rq</td><td>1.049</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rsk</td><td>-0.09465</td><td></td></tr> <tr><td>Rku</td><td>2.539</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Rp	2.457	μm	Rv	2.634	μm	Rz	5.091	μm	Rt	5.091	μm	Rpm	2.457	μm	Rvm	2.634	μm	Rtm	5.091	μm	Rmax	5.091	μm	Ra	0.8406	μm	Rq	1.049	μm	Rsk	-0.09465		Rku	2.539	
Rp	2.457	μm																																			
Rv	2.634	μm																																			
Rz	5.091	μm																																			
Rt	5.091	μm																																			
Rpm	2.457	μm																																			
Rvm	2.634	μm																																			
Rtm	5.091	μm																																			
Rmax	5.091	μm																																			
Ra	0.8406	μm																																			
Rq	1.049	μm																																			
Rsk	-0.09465																																				
Rku	2.539																																				

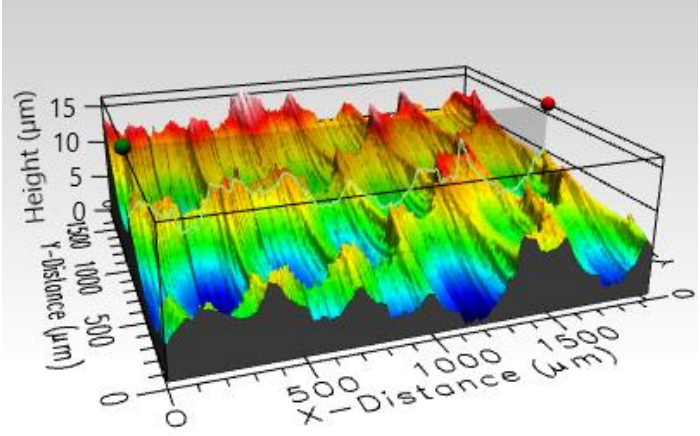
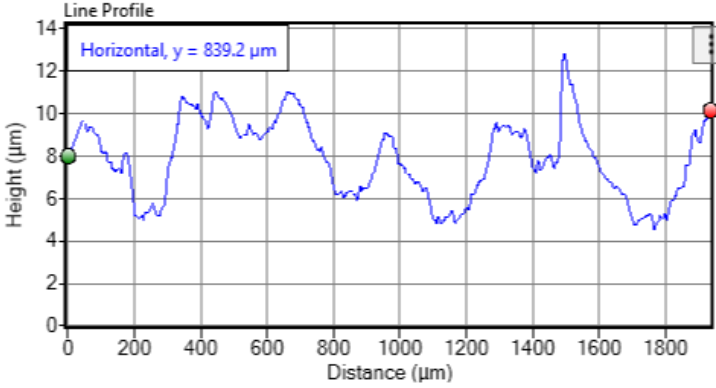
Anexa 2.19 Măsurătoarea numărul 1 asupra suprafeței de test 4

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																				
Suprafața scanată 3D																																					
Graficul rugozității măsurate																																					
Valorile rugozității	<table border="1" data-bbox="890 1319 1163 1691"> <tr> <td>Rp</td> <td>3.3</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rv</td> <td>2.252</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rz</td> <td>4.133</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rt</td> <td>5.552</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rpm</td> <td>1.881</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rvm</td> <td>2.252</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rtm</td> <td>4.133</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rmax</td> <td>4.133</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Ra</td> <td>1.035</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rq</td> <td>1.233</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rsk</td> <td>0.2202</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rku</td> <td>2.352</td> <td></td> </tr> </table>	Rp	3.3	µm	Rv	2.252	µm	Rz	4.133	µm	Rt	5.552	µm	Rpm	1.881	µm	Rvm	2.252	µm	Rtm	4.133	µm	Rmax	4.133	µm	Ra	1.035	µm	Rq	1.233	µm	Rsk	0.2202		Rku	2.352	
Rp	3.3	µm																																			
Rv	2.252	µm																																			
Rz	4.133	µm																																			
Rt	5.552	µm																																			
Rpm	1.881	µm																																			
Rvm	2.252	µm																																			
Rtm	4.133	µm																																			
Rmax	4.133	µm																																			
Ra	1.035	µm																																			
Rq	1.233	µm																																			
Rsk	0.2202																																				
Rku	2.352																																				

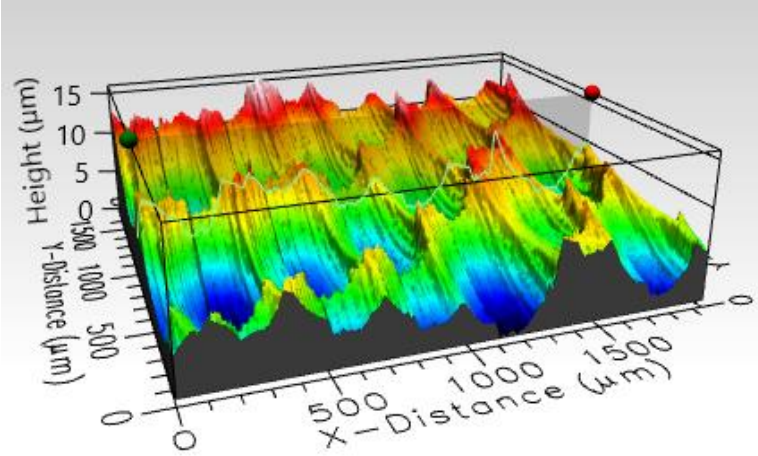
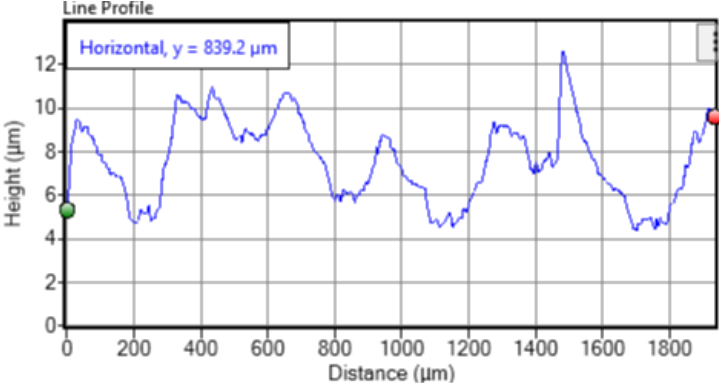
Anexa 2.20 Măsurătoarea numărul 2 asupra suprafeței de test 4

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																				
Suprafața scanată 3D																																					
Graficul rugozității măsurate																																					
Valorile rugozității	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr><td>Rp</td><td>4.208</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rv</td><td>2.282</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>4.163</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rt</td><td>6.49</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>1.881</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rvm</td><td>2.282</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rtm</td><td>4.163</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>4.163</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Ra</td><td>1.087</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rq</td><td>1.326</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rsk</td><td>0.5046</td><td></td></tr> <tr><td>Rku</td><td>3.128</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Rp	4.208	µm	Rv	2.282	µm	Rz	4.163	µm	Rt	6.49	µm	Rpm	1.881	µm	Rvm	2.282	µm	Rtm	4.163	µm	Rmax	4.163	µm	Ra	1.087	µm	Rq	1.326	µm	Rsk	0.5046		Rku	3.128	
Rp	4.208	µm																																			
Rv	2.282	µm																																			
Rz	4.163	µm																																			
Rt	6.49	µm																																			
Rpm	1.881	µm																																			
Rvm	2.282	µm																																			
Rtm	4.163	µm																																			
Rmax	4.163	µm																																			
Ra	1.087	µm																																			
Rq	1.326	µm																																			
Rsk	0.5046																																				
Rku	3.128																																				

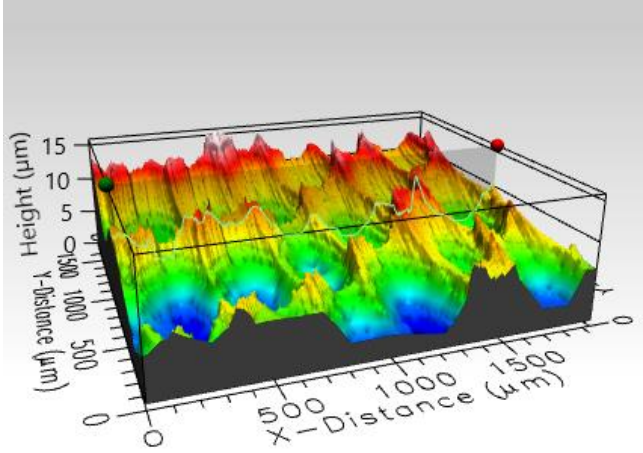
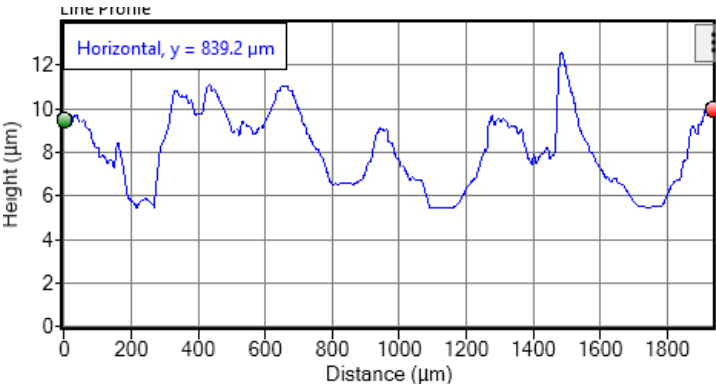
Anexa 2.21 Măsurătoarea numărul 3 asupra suprafeței de test 4

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																				
Suprafața scanată 3D	 <p>A 3D surface scan image showing a textured surface. The vertical axis is labeled 'Height (μm)' with values 0, 5, 10, 15. The horizontal axes are labeled 'Y-Distance (μm)' and 'X-Distance (μm)' with values 0, 500, 1000, 1500. The surface is color-coded by height, with blue representing lower heights and red representing higher heights. A red dot is visible on the surface at approximately (1800, 839.2, 10).</p>																																				
Graficul rugozității măsurate	 <p>A line profile graph titled 'Line Profile' showing 'Height (μm)' on the y-axis (0 to 14) and 'Distance (μm)' on the x-axis (0 to 1800). A blue line represents the surface profile. A horizontal line is drawn at y = 839.2 μm. A red dot is at the end of the profile at approximately (1800, 10). A green dot is at the start at (0, 8).</p>																																				
Valorile rugozității	<table border="1" data-bbox="887 1335 1166 1704"> <tr><td>Rp</td><td>4.408</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rv</td><td>2.29</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>4.159</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rt</td><td>6.698</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>1.87</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rvm</td><td>2.29</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rtm</td><td>4.159</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>4.159</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Ra</td><td>1.084</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rq</td><td>1.325</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rsk</td><td>0.4832</td><td></td></tr> <tr><td>Rku</td><td>3.098</td><td></td></tr> </table>	Rp	4.408	μm	Rv	2.29	μm	Rz	4.159	μm	Rt	6.698	μm	Rpm	1.87	μm	Rvm	2.29	μm	Rtm	4.159	μm	Rmax	4.159	μm	Ra	1.084	μm	Rq	1.325	μm	Rsk	0.4832		Rku	3.098	
Rp	4.408	μm																																			
Rv	2.29	μm																																			
Rz	4.159	μm																																			
Rt	6.698	μm																																			
Rpm	1.87	μm																																			
Rvm	2.29	μm																																			
Rtm	4.159	μm																																			
Rmax	4.159	μm																																			
Ra	1.084	μm																																			
Rq	1.325	μm																																			
Rsk	0.4832																																				
Rku	3.098																																				

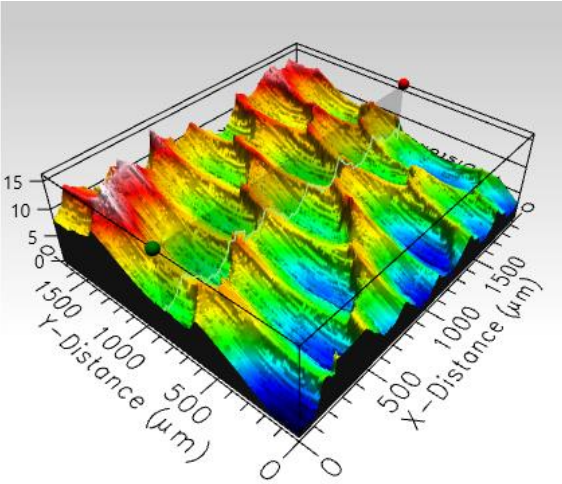
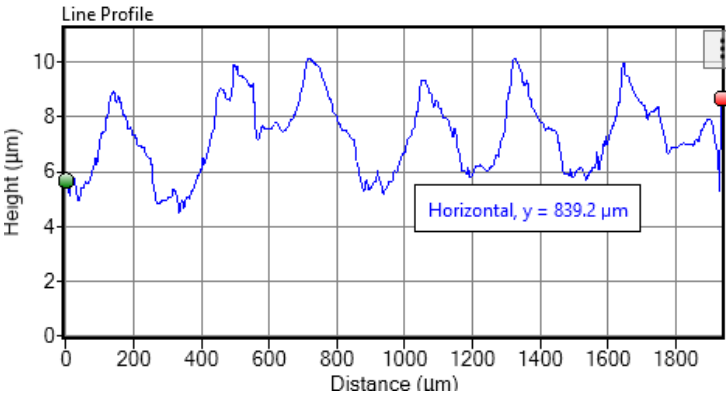
Anexa 2.22 Măsurătoarea numărul 4 asupra suprafeței de test 4

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																				
Suprafața scanată 3D																																					
Graficul rugozității măsurate																																					
Valorile rugozității	<table border="1" data-bbox="596 1339 852 1688"> <tbody> <tr><td>Rp</td><td>4.361</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rv</td><td>2.33</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>4.205</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rt</td><td>6.691</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>1.874</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rvm</td><td>2.33</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rtm</td><td>4.205</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>4.205</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Ra</td><td>1.094</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rq</td><td>1.334</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rsk</td><td>0.4563</td><td></td></tr> <tr><td>Rku</td><td>3.044</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Rp	4.361	µm	Rv	2.33	µm	Rz	4.205	µm	Rt	6.691	µm	Rpm	1.874	µm	Rvm	2.33	µm	Rtm	4.205	µm	Rmax	4.205	µm	Ra	1.094	µm	Rq	1.334	µm	Rsk	0.4563		Rku	3.044	
Rp	4.361	µm																																			
Rv	2.33	µm																																			
Rz	4.205	µm																																			
Rt	6.691	µm																																			
Rpm	1.874	µm																																			
Rvm	2.33	µm																																			
Rtm	4.205	µm																																			
Rmax	4.205	µm																																			
Ra	1.094	µm																																			
Rq	1.334	µm																																			
Rsk	0.4563																																				
Rku	3.044																																				

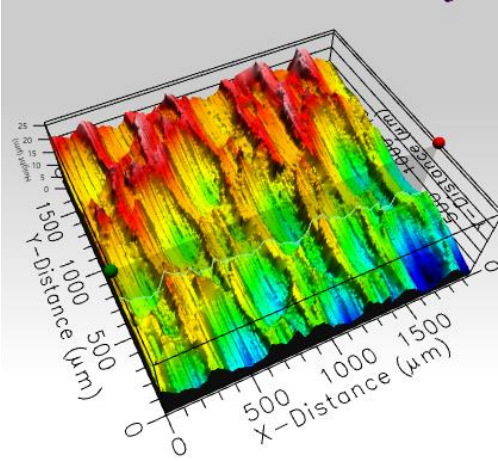
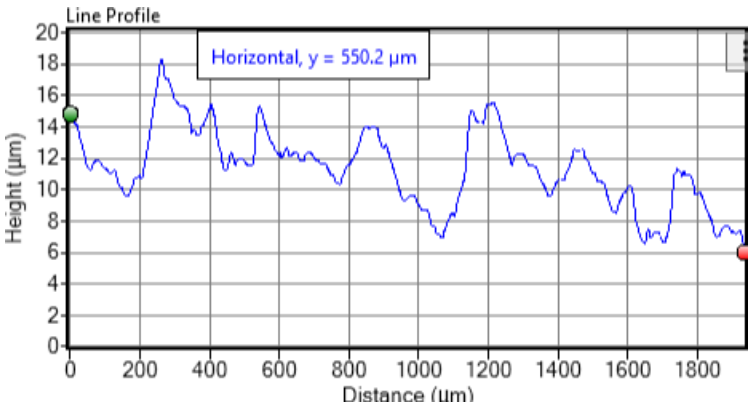
Anexa 2.23 Măsurătoarea numărul 5 asupra suprafeței de test 4

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																				
Suprafața scanată 3D																																					
Graficul rugozității măsurate																																					
Valorile rugozității	<table border="1" data-bbox="895 1346 1158 1697"> <tbody> <tr><td>Rp</td><td>3.987</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rv</td><td>1.912</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>3.798</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rt</td><td>5.899</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>1.886</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rvm</td><td>1.912</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rtm</td><td>3.798</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>3.798</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Ra</td><td>1.031</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rq</td><td>1.243</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rsk</td><td>0.5387</td><td></td></tr> <tr><td>Rku</td><td>2.955</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Rp	3.987	µm	Rv	1.912	µm	Rz	3.798	µm	Rt	5.899	µm	Rpm	1.886	µm	Rvm	1.912	µm	Rtm	3.798	µm	Rmax	3.798	µm	Ra	1.031	µm	Rq	1.243	µm	Rsk	0.5387		Rku	2.955	
Rp	3.987	µm																																			
Rv	1.912	µm																																			
Rz	3.798	µm																																			
Rt	5.899	µm																																			
Rpm	1.886	µm																																			
Rvm	1.912	µm																																			
Rtm	3.798	µm																																			
Rmax	3.798	µm																																			
Ra	1.031	µm																																			
Rq	1.243	µm																																			
Rsk	0.5387																																				
Rku	2.955																																				

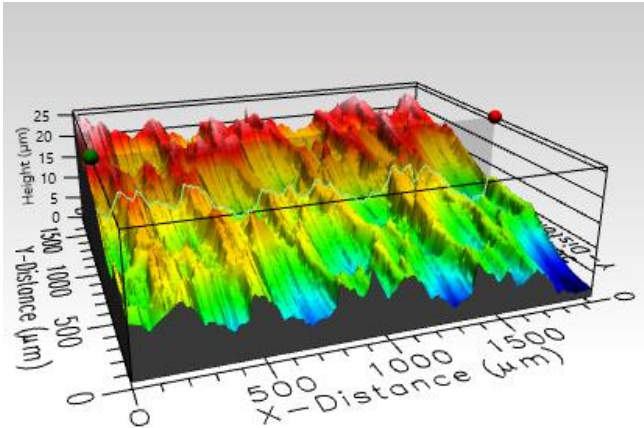
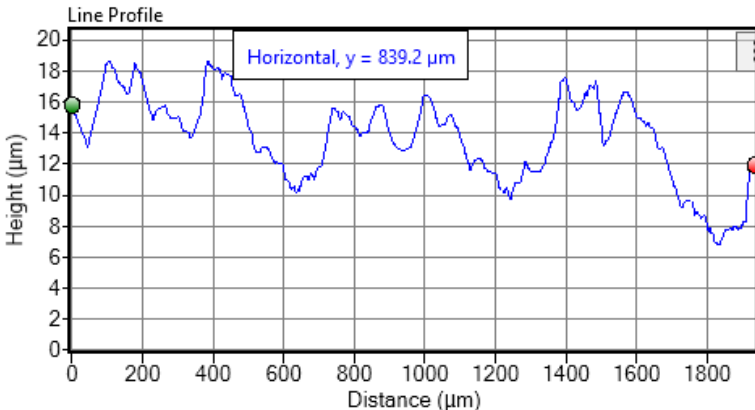
Anexa 2.24 Măsurătoarea numărul 6 asupra suprafeței de test 4

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																				
Suprafața scanată 3D																																					
Graficul rugozității măsurate																																					
Valorile rugozității	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td>Rp</td><td>2.853</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rv</td><td>2.133</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>4.986</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rt</td><td>4.986</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>2.853</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rvm</td><td>2.133</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rtm</td><td>4.986</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>4.986</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Ra</td><td>1.028</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rq</td><td>1.185</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rsk</td><td>0.3012</td><td></td></tr> <tr><td>Rku</td><td>2.094</td><td></td></tr> </table>	Rp	2.853	μm	Rv	2.133	μm	Rz	4.986	μm	Rt	4.986	μm	Rpm	2.853	μm	Rvm	2.133	μm	Rtm	4.986	μm	Rmax	4.986	μm	Ra	1.028	μm	Rq	1.185	μm	Rsk	0.3012		Rku	2.094	
Rp	2.853	μm																																			
Rv	2.133	μm																																			
Rz	4.986	μm																																			
Rt	4.986	μm																																			
Rpm	2.853	μm																																			
Rvm	2.133	μm																																			
Rtm	4.986	μm																																			
Rmax	4.986	μm																																			
Ra	1.028	μm																																			
Rq	1.185	μm																																			
Rsk	0.3012																																				
Rku	2.094																																				

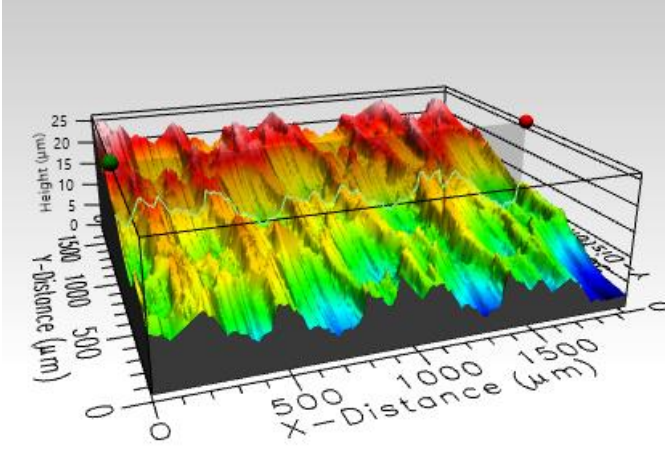
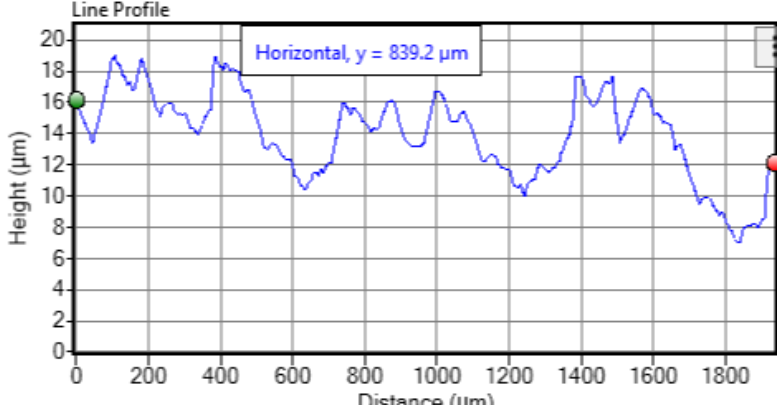
Anexa 2.25 Măsurătoarea numărul 1 asupra suprafeței de test 5

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																						
Suprafața scanată 3D																																							
Graficul rugozității măsurate																																							
Valorile rugozității		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Rp</td><td>3.585</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rv</td><td>4.089</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>7.674</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rt</td><td>7.674</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>3.585</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rvm</td><td>4.089</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rtm</td><td>7.674</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>7.674</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Ra</td><td>1.297</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rq</td><td>1.668</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rsk</td><td>0.04049</td><td></td></tr> <tr><td>Rku</td><td>2.774</td><td></td></tr> </table>	Rp	3.585	µm	Rv	4.089	µm	Rz	7.674	µm	Rt	7.674	µm	Rpm	3.585	µm	Rvm	4.089	µm	Rtm	7.674	µm	Rmax	7.674	µm	Ra	1.297	µm	Rq	1.668	µm	Rsk	0.04049		Rku	2.774		
Rp	3.585	µm																																					
Rv	4.089	µm																																					
Rz	7.674	µm																																					
Rt	7.674	µm																																					
Rpm	3.585	µm																																					
Rvm	4.089	µm																																					
Rtm	7.674	µm																																					
Rmax	7.674	µm																																					
Ra	1.297	µm																																					
Rq	1.668	µm																																					
Rsk	0.04049																																						
Rku	2.774																																						

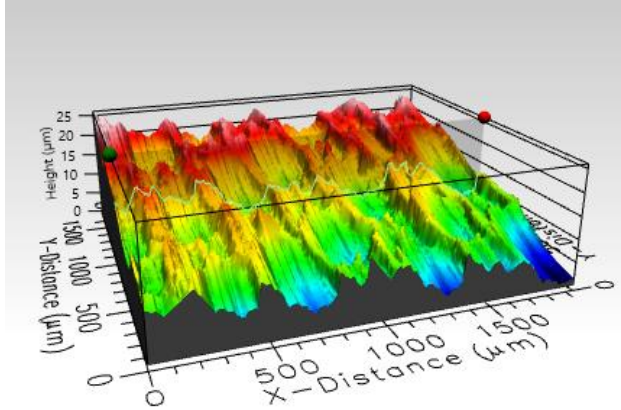
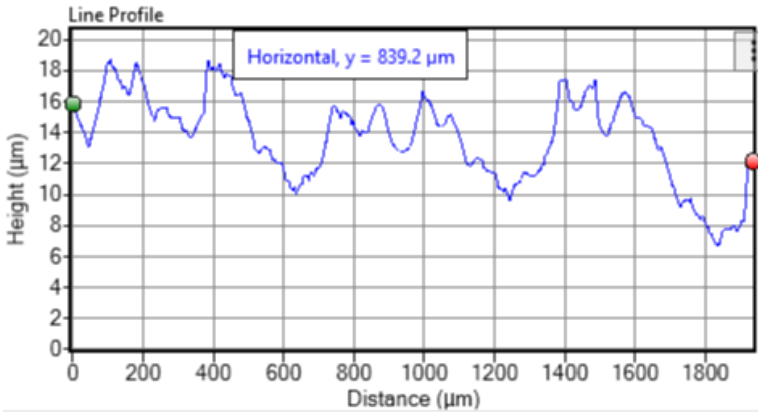
Anexa 2.26 Măsurătoarea numărul 2 asupra suprafeței de test 5

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																				
Suprafața scanată 3D																																					
Graficul rugozității măsurate																																					
Valorile rugozității	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr><td>Rp</td><td>2.976</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rv</td><td>2.595</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>5.02</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rt</td><td>5.571</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>2.539</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rvm</td><td>2.481</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rtm</td><td>5.02</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>5.445</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Ra</td><td>1.134</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rq</td><td>1.329</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rsk</td><td>0.2651</td><td></td></tr> <tr><td>Rku</td><td>2.092</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Rp	2.976	μm	Rv	2.595	μm	Rz	5.02	μm	Rt	5.571	μm	Rpm	2.539	μm	Rvm	2.481	μm	Rtm	5.02	μm	Rmax	5.445	μm	Ra	1.134	μm	Rq	1.329	μm	Rsk	0.2651		Rku	2.092	
Rp	2.976	μm																																			
Rv	2.595	μm																																			
Rz	5.02	μm																																			
Rt	5.571	μm																																			
Rpm	2.539	μm																																			
Rvm	2.481	μm																																			
Rtm	5.02	μm																																			
Rmax	5.445	μm																																			
Ra	1.134	μm																																			
Rq	1.329	μm																																			
Rsk	0.2651																																				
Rku	2.092																																				

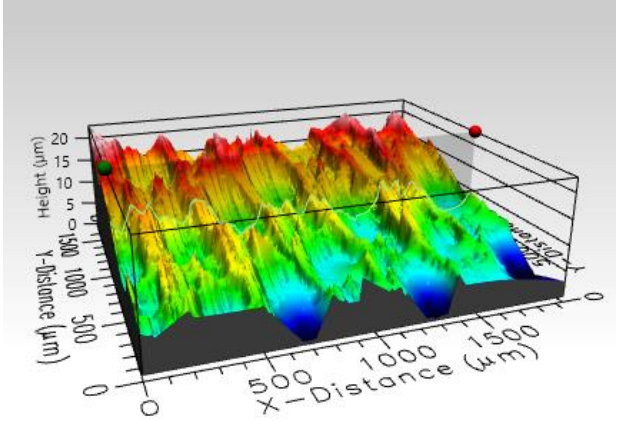
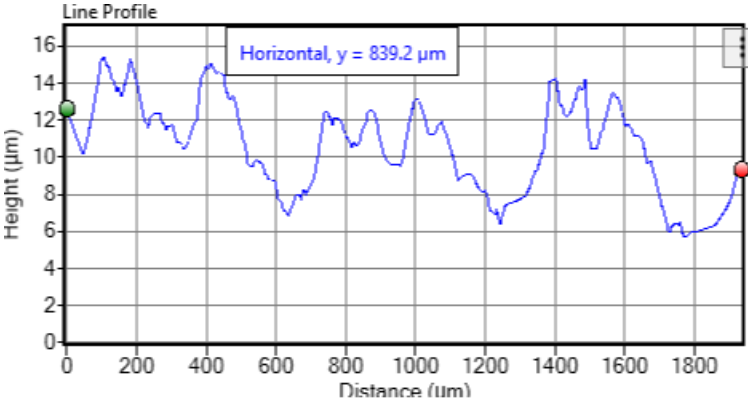
Anexa 2.27 Măsurătoarea numărul 3 asupra suprafeței de test 5

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																				
Suprafața scanată 3D																																					
Graficul rugozității măsurate																																					
Valorile rugozității	<table border="1" data-bbox="877 1344 1157 1702"> <tr><td>Rp</td><td>3.055</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rv</td><td>2.582</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>5.045</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rt</td><td>5.637</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>2.566</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rvm</td><td>2.479</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rtm</td><td>5.045</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>5.453</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Ra</td><td>1.131</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rq</td><td>1.326</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rsk</td><td>0.2945</td><td></td></tr> <tr><td>Rku</td><td>2.103</td><td></td></tr> </table>	Rp	3.055	μm	Rv	2.582	μm	Rz	5.045	μm	Rt	5.637	μm	Rpm	2.566	μm	Rvm	2.479	μm	Rtm	5.045	μm	Rmax	5.453	μm	Ra	1.131	μm	Rq	1.326	μm	Rsk	0.2945		Rku	2.103	
Rp	3.055	μm																																			
Rv	2.582	μm																																			
Rz	5.045	μm																																			
Rt	5.637	μm																																			
Rpm	2.566	μm																																			
Rvm	2.479	μm																																			
Rtm	5.045	μm																																			
Rmax	5.453	μm																																			
Ra	1.131	μm																																			
Rq	1.326	μm																																			
Rsk	0.2945																																				
Rku	2.103																																				

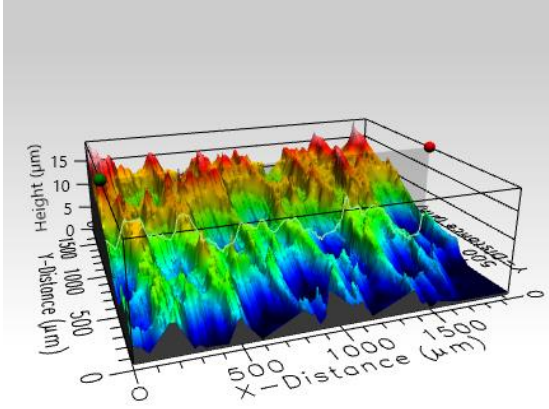
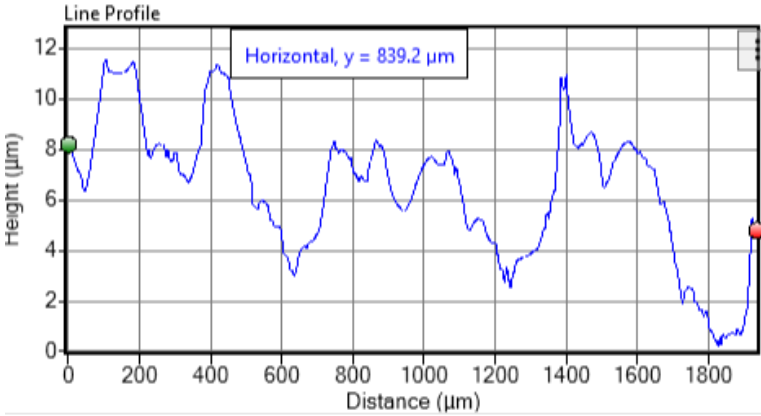
Anexa 2.28 Măsurătoarea numărul 4 asupra suprafeței de test 5

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																				
Suprafața scanată 3D																																					
Graficul rugozității măsurate																																					
Valorile rugozității	<table border="1" data-bbox="600 1352 852 1700"> <tbody> <tr><td>Rp</td><td>3.069</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rv</td><td>2.568</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>5.023</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rt</td><td>5.638</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>2.544</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rvm</td><td>2.48</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rtm</td><td>5.023</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>5.413</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Ra</td><td>1.135</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rq</td><td>1.328</td><td>μm</td></tr> <tr><td>Rsk</td><td>0.3094</td><td></td></tr> <tr><td>Rku</td><td>2.11</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Rp	3.069	μm	Rv	2.568	μm	Rz	5.023	μm	Rt	5.638	μm	Rpm	2.544	μm	Rvm	2.48	μm	Rtm	5.023	μm	Rmax	5.413	μm	Ra	1.135	μm	Rq	1.328	μm	Rsk	0.3094		Rku	2.11	
Rp	3.069	μm																																			
Rv	2.568	μm																																			
Rz	5.023	μm																																			
Rt	5.638	μm																																			
Rpm	2.544	μm																																			
Rvm	2.48	μm																																			
Rtm	5.023	μm																																			
Rmax	5.413	μm																																			
Ra	1.135	μm																																			
Rq	1.328	μm																																			
Rsk	0.3094																																				
Rku	2.11																																				

Anexa 2.29 Măsurătoarea numărul 5 asupra suprafeței de test 5

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																				
Suprafața scanată 3D																																					
Graficul rugozității măsurate																																					
Valorile rugozității	<table border="1" data-bbox="898 1361 1155 1706"> <tr> <td>Rp</td> <td>2.902</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rv</td> <td>2.527</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rz</td> <td>5.038</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rt</td> <td>5.428</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rpm</td> <td>2.579</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rvm</td> <td>2.459</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rtm</td> <td>5.038</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rmax</td> <td>5.428</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Ra</td> <td>1.129</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rq</td> <td>1.323</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>Rsk</td> <td>0.2863</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rku</td> <td>2.08</td> <td></td> </tr> </table>	Rp	2.902	µm	Rv	2.527	µm	Rz	5.038	µm	Rt	5.428	µm	Rpm	2.579	µm	Rvm	2.459	µm	Rtm	5.038	µm	Rmax	5.428	µm	Ra	1.129	µm	Rq	1.323	µm	Rsk	0.2863		Rku	2.08	
Rp	2.902	µm																																			
Rv	2.527	µm																																			
Rz	5.038	µm																																			
Rt	5.428	µm																																			
Rpm	2.579	µm																																			
Rvm	2.459	µm																																			
Rtm	5.038	µm																																			
Rmax	5.428	µm																																			
Ra	1.129	µm																																			
Rq	1.323	µm																																			
Rsk	0.2863																																				
Rku	2.08																																				

Anexa 2.30 Măsurătoarea numărul 6 asupra suprafeței de test 5

Tipul imaginii	Imagini preluate în urma scanării 3D																																				
Suprafața scanată 3D																																					
Graficul rugozității măsurate																																					
Valorile rugozității	<table border="1" data-bbox="600 1361 847 1686"> <tr><td>Rp</td><td>3.726</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rv</td><td>2.462</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rz</td><td>5.295</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rt</td><td>6.188</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rpm</td><td>2.888</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rvm</td><td>2.407</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rtm</td><td>5.295</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rmax</td><td>6.188</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Ra</td><td>1.032</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rq</td><td>1.254</td><td>µm</td></tr> <tr><td>Rsk</td><td>0.4945</td><td></td></tr> <tr><td>Rku</td><td>2.818</td><td></td></tr> </table>	Rp	3.726	µm	Rv	2.462	µm	Rz	5.295	µm	Rt	6.188	µm	Rpm	2.888	µm	Rvm	2.407	µm	Rtm	5.295	µm	Rmax	6.188	µm	Ra	1.032	µm	Rq	1.254	µm	Rsk	0.4945		Rku	2.818	
Rp	3.726	µm																																			
Rv	2.462	µm																																			
Rz	5.295	µm																																			
Rt	6.188	µm																																			
Rpm	2.888	µm																																			
Rvm	2.407	µm																																			
Rtm	5.295	µm																																			
Rmax	6.188	µm																																			
Ra	1.032	µm																																			
Rq	1.254	µm																																			
Rsk	0.4945																																				
Rku	2.818																																				

Anexa 3.1 Stand de prezentare a epruvetelor prelucrate

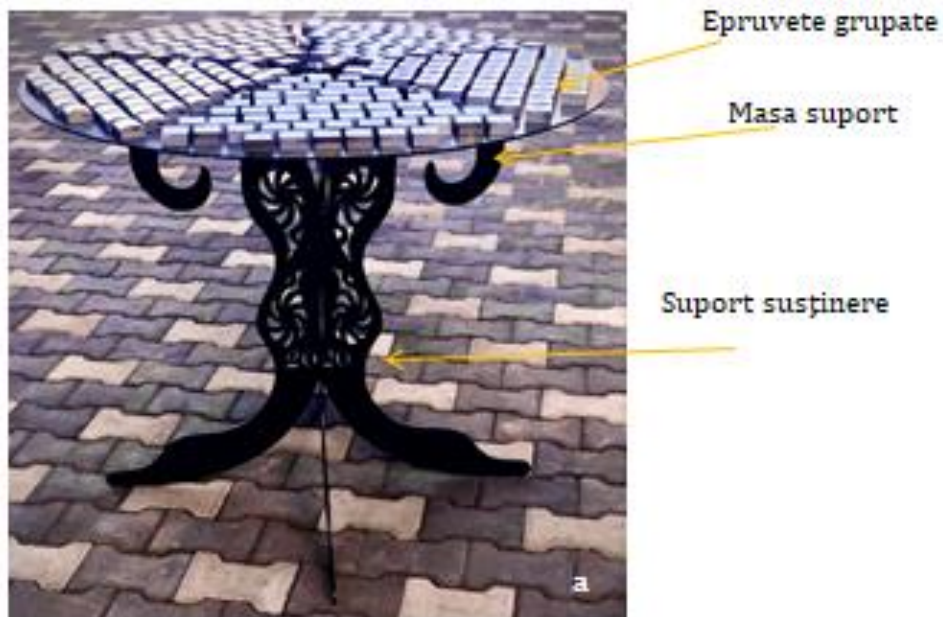


Fig. A3.1 Stand pentru prezentare epruvete.
a. vedere generală, b. vedere masă cu epruvete

Anexa 3.2 Gruparea epruvetelor pe tipuri de suprafețe

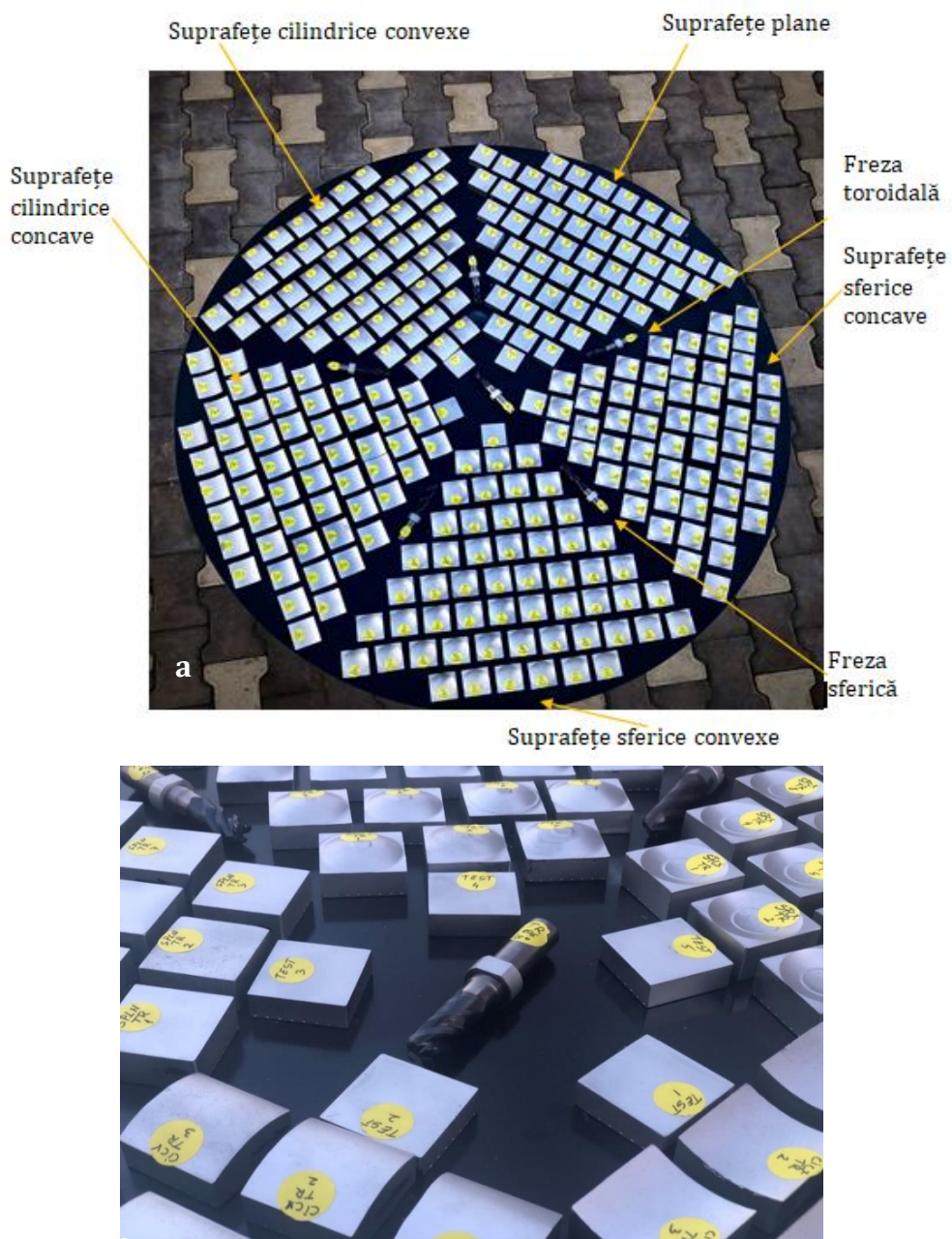


Fig. A3.2 Gruparea epruvetelor pe tipuri de suprafețe.
a. gruparea epruvetelor, b. detaliul central de grupare