

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI"
DIN IAȘI**



**CONTRIBUȚII TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND
FREZAREA ȘI DEFORMAREA PLASTICĂ SUPERFICIALĂ
A SUPRAFEȚELOR PLANE**

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Ionuț Condrea

Conducător de doctorat : Laurențiu Slătineanu

IAȘI, 2023

CONTRIBUȚII TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND FREZAREA ȘI DEFORMAREA PLASTICĂ SUPERFICIALĂ A SUPRAFEȚELOR PLANE

Ionuț Condrea
domeniul Inginerie Industrială

Președinte comisie doctorat:
Conducător de doctorat:
Referenți oficiali:

Dumitraș Cătălin Gabriel
Slătineanu Laurențiu
Gheorghe Marian
Oancea Gheorghe
Nagîț Gheorghe

UNIVERSITATEA TEHNICĂ „GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI

RECTORATUL

Către

Vă facem cunoscut că, în ziua de 09.06.2023, la ora 10:00, în sala TCM7 (corp Departament TCM, etaj 2, b-dul D. Mangeron, 59 A), va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulate:

„Contribuții teoretice și experimentale privind frezarea și deformarea plastică superficială a suprafețelor plane”

elaborate de domnul **CONDREA IONUT**, în vederea conferirii titlului științific de doctor.

Comisia de doctorat este alcătuită din:

1. Dumitraș Cătălin Gabriel, profesor universitar, doctor inginer, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași președinte
2. Slătineanu Laurențiu, profesor universitar, dr. ing., Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași conducător de doctorat
3. Gheorghe Marian, profesor universitar, dr. ing., Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați referent oficial
4. Oancea Gheorghe, profesor universitar, dr. ing., Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați referent oficial
5. Nagiț Gheorghe, conferențiar universitar, dr. ing., Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași referent oficial

Cu această ocazie, vă invităm să participați la susținerea publică a tezei de doctorat.

RECTOR

Prof. univ. dr. ing. DAN CAȘCAVAL



Secretar universitate,

Ing. Cristina Nagiț

Cuprins

INTRODUCERE	6
Cap. 1. SITUAȚIA ACTUALĂ A INFORMAȚIILOR ȘTIINȚIFICE ȘI TEHNICE PRIVIND PROCESUL DE PRELUCRARE PRIN FREZARE ȘI DEFORMARE PLASTICĂ SUPERFICIALĂ ȘI RESPECTIV STAREA SUPRAFEȚELOR PRELUCRATE	9
1.1. Noțiuni de bază privind procesul de prelucrare mecanică prin frezare și deformare plastică superficială	9
1.2. Clasificarea procedeelor de prelucrare a reperelor	18
1.3. Caracteristici esențiale corespunzătoare procedeelor de prelucrare prin frezare și deformare plastică superficială	21
1.4. Procese de prelucrare hibride - caracteristici generale	27
1.5. Evoluția de-a lungul timpului a informațiilor științifice și tehnice privind prelucrarea prin frezare și prin deformare plastică superficială	29
1.6. Echipamente, scule, dispozitive și verificatoare pentru realizarea sau cercetarea proceselor de prelucrare prin frezare și deformare plastică superficială	33
1.7. Parametri de interes tehnologic la frezare, respectiv la deformarea plastică superficială și modalități de influențare a lor	43
1.8. Mărimi specifice proceselor de prelucrare prin frezare și deformare plastică superficială, metode și instrumente de evaluare a lor	46
1.9. Modele teoretice și experimentale propuse pentru caracterizarea unor aspecte specifice prelucrării prin frezare și deformare plastică superficială	49
1.10. Rezultate recente obținute de către alți cercetători în legătură cu studiul procesului de prelucrare prin frezare	54
1.11. Tendințe de evoluție a cercetărilor privind procesul de prelucrare prin frezare	55
1.12. Concluzii	56
Cap. 2. OBIECTIVE DE CERCETARE	58
2.1. Oportunitatea și necesitatea dezvoltării unor cercetări privind procesul de prelucrare prin frezare	58
2.2. Strategia propusă pentru cercetarea rugozității suprafețelor obținute prin frezare	58
2.3. Obiective ale cercetării teoretice	59
2.4. Obiective referitoare la baza materială pentru cercetările experimentale	60
2.5. Obiective ale cercetării experimentale	60
Cap. 3. CONTRIBUȚII TEORETICE PRIVIND STUDIUL PROCESELOR DE FREZARE ȘI DEFORMARE PLASTICĂ SUPERFICIALĂ A SUPRAFEȚELOR PLANE	62
3.1. Analiza sistemică a procesului de prelucrare prin frezare și deformare plastică superficială a suprafețelor plane	62
3.2. Utilizarea diagramei Ishikawa pentru evidențierea factorilor ce pot afecta rezultatele prelucrării prin frezare și deformarea plastică superficială a suprafețelor plane	65
3.3. Considerații privind unele modele teoretice pentru parametrul de rugozitate R_z realizabil la folosirea unor scule cu sau fără raze de racordare	70
3.4. Utilizarea diagramei de idei pentru selectarea unei variante constructive de sculă destinate cercetării procesului de prelucrare prin frezare și deformare plastică superficială a suprafețelor plane	73
3.5. Utilizarea unor principii din metoda proiectării axiomatice pentru proiectarea constructivă și funcțională a unei scule destinate cercetării procesului de prelucrare prin frezare și deformare plastică superficială a suprafețelor plane	77
3.6. Utilizarea metodei corelației de rang pentru ordonarea factorilor de intrare în proces ce pot exercita influență asupra valorilor parametrilor de ieșire ai procesului de prelucrare mecanică prin frezare	90
3.7. Concluzii	97
Capitolul 4. ECHIPAMENTE ȘI MATERIALE PENTRU STUDIUL SAU MATERIALIZAREA PROCESULUI DE PRELUCRARE PRIN FREZARE ȘI DEFORMARE PLASTICĂ SUPERFICIALĂ A SUPRAFEȚELOR PLANE	100
4.1. Schema de prelucrare utilizată în cadrul cercetării experimentale	100
4.2. Soluția propusă pentru materializarea procesului de prelucrare prin frezare și deformare plastică superficială a suprafețelor plane	102
4.3. Scula combinată în cadrul încercărilor experimentale	103
4.4. Epruvete și materiale pentru epruvete	106
4.5. Mașini-unelte utilizate pentru efectuarea încercărilor experimentale	110
4.6. Dispozitive pentru orientarea și fixarea epruvetelor	112
4.7. Orientarea și fixarea sculei	113
4.8. Instrumente și aparate pentru evidențierea unor rezultate ale prelucrării	115
4.9. Echipament utilizat pentru determinarea compoziției chimice a materialelor metalice	119

4.10. Concluzii	121
Capitolul 5. CONTRIBUȚII EXPERIMENTALE PRIVIND STUDIUL PROCESELOR DE FREZARE ȘI DEFORMARE PLASTICĂ SUPERFICIALĂ A SUPRAFEȚELOR PLANE	123
5.1 Analiza și interpretarea rezultatelor unor încercări experimentale preliminare cu privire la influența exercitată de către factorii de intrare ai procesului de frezare și deformare plastică superficială asupra valorilor parametrului de rugozitate Ra ai suprafeței obținute	123
5.2 Analiza și interpretarea rezultatelor teoretice respectiv experimentale privind influența exercitată de către parametrii regimului de așchiere asupra valorii parametrului de rugozitate Rz	129
5.3 Studiul intensității influenței exercitate de către factorii de intrare ai proceselor investigate asupra rezultatelor experimentale	135
5.3.1 Stabilirea modelului matematic	135
5.3.2 Planificarea încercărilor experimentale	138
5.3.3 Prelucrarea prin frezare a epruvetelor	141
5.3.4 Calculul răspunsurilor medii pentru fiecare factor	144
5.3.5 Calculul efectelor medii ale factorilor și interacțiunilor acestora	145
5.3.6 Determinarea răspunsului teoretic	146
5.3.7 Studiul interacțiunilor	146
5.3.8 Stabilirea modelului matriceal al parametrului de ieșire Ra	147
5.3.9 Variabilitatea reziduului Vr	151
5.3.10 Prelucrarea prin deformare plastică a epruvetelor	158
5.3.11 Prelucrarea simultană prin frezare și deformare plastică a epruvetelor	165
5.4 Identificarea unor modele matematice de tip funcție putere	173
5.4.1 Identificarea unor modele matematice de tip funcție putere la prelucrarea prin frezare	174
5.4.2 Identificarea unor modele matematice de tip funcție putere la prelucrarea prin deformare plastică superficială	178
5.4.3 Identificarea unor modele matematice de tip funcție putere la prelucrarea prin frezare și deformare plastică superficială	183
5.5 Compararea rezultatelor experimentale	188
5.6 Concluzii	194
Cap. 6. CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII PROPRII ȘI DIRECȚII DE CONTINUARE A CERCETĂRILOR	198
6.1. Concluzii generale privind rezultatele cercetării documentare	198
6.2. Concluzii generale privind rezultatele cercetărilor teoretice	200
6.3. Concluzii generale privind constituirea bazei materiale necesare în cadrul încercărilor experimentale	201
6.4. Concluzii generale privind rezultatele cercetărilor experimentale	202
6.5. Contribuții proprii	203
6.6. Direcții viitoare de cercetare	204
REFERINȚE BIBLIOGRAFICE	206
ANEXE	227
ANEXA 1	
Rezultate ale calculelor corespunzătoare utilizării metodei corelației de rang	227
ANEXA 2	
Rezultate ale calculelor efectuate la aplicarea metodei Taguchi	229
ANEXA 3	
Program de calculator utilizat la prelucrarea datelor empirice prin aplicarea metodei Taguchi	243

Cap. 1. SITUAȚIA ACTUALĂ A INFORMAȚIILOR ȘTIINȚIFICE ȘI TEHNICE PRIVIND PROCESUL DE PRELUCRARE PRIN FREZARE ȘI DEFORMARE PLASTICĂ SUPERFICIALĂ ȘI RESPECTIV STAREA SUPRAFEȚELOR PRELUCRATE

Tehnologia de prelucrare mecanică este un concept care se referă la niște procese prin care are loc modificarea succesivă a formei și dimensiunilor semifabricatului, în vederea obținerii unei piese capabile să îndeplinească cerințele pentru care a fost proiectată. Tehnologiile de prelucrare fac parte din domeniul mai larg al ingineriei industriale. Obiectivul principal al ingineriei industriale este cel de optimizare a proceselor sau a sistemelor de fabricație complexe.

Alături de alte procedee de prelucrare, așa cum sunt strunjirea, rabotarea, mortezarea, găurirea etc., frezarea face parte din categoria prelucrărilor mecanice cu îndepărtare de material din semifabricat. Această îndepărtare de material din semifabricat se poate efectua într-o singură trecere sau în mai multe treceri, prin utilizarea unor prelucrări de degroșare și respectiv de finisare (Calea et al., 1968, Georgescu 1972).

Datorită posibilităților de obținere a unor suprafețe de formă geometrică complexă, așa cum sunt cavitățile cu o secțiune de forme foarte variate, *frezarea* a devenit treptat una dintre cele mai utilizate metode de prelucrare.

Din punct de vedere tehnologic, *frezarea* poate fi definită ca un procedeu de prelucrare prin așchiere în cazul căruia semifabricatul realizează, de regulă, deplasări relative rectilinii și în care scula așchietoare, prevăzută cu unul sau mai mulți dinți așchietori și denumită *freză*, execută mișcarea de rotație, în vederea îndepărtării surplusului de material. În plus, datorită mișcării de intrare și respectiv de ieșire din materialul semifabricatului a fiecărui dinte așchietor, dimensiunile așchiei sunt de diferite lungimi și se poate afirma că au forma unei virgule (Milling, 2013).

Prin definiție, *deformarea* se referă la modificarea structurală, dimensională sau geometrică a unui corp solid, fără desprindere de material. De exemplu, prin deformare, o bară de formă cilindrică poate fi transformată într-un inel (Deformare, 2015). Există convenția de a se lua în considerare *deformarea plastică* atunci când semifabricatul păstrează forma la care a ajuns prin deformare, atunci când, după înlăturarea forței care a produs deformarea, semifabricatul nu revine la forma inițială sau la o formă apropiată de aceasta (Deformare, 2015).

Deformarea plastică superficială este un proces prin care semifabricatul este prelucrat la nivelul suprafeței lui, *fără îndepărtare de material*, deci fără detașarea unor așchii, așa cum este cazul frezării prezentate anterior. Ca urmare a deformării plastice superficiale, este de așteptat să se ajungă la valori mai mici ale parametrilor de rugozitate ce se referă la înălțimile asperităților (R_a , R_z , R_t etc.), ceea ce conduce la o îmbunătățirea a nivelului de netezime al suprafeței în raport cu cel aferent suprafeței respective înainte de aplicarea unui procedeu de deformare plastică superficială (Cosovschi, 2019; Teodorescu, 1963).

Practic, prin deformare plastică superficială, sub acțiunea forței de apăsare exercitate de către o sculă de tip bilă sau rolă, materialul semifabricatului se deformează plastic într-o anumită măsură, fiind deformat astfel asperitățile suprafețelor sau cel puțin vârfurile acestor asperități (în limba engleză, *peaks*) și diminuându-se mărimile golurilor dintre asperități (în limba engleză, *valley*). Se consideră că, în acest fel, suprafața afectată de procesul de deformare plastică superficială este netezită și tasată (Teodorescu, 1963).

După prelucrarea prin DPS, se constată că se generează o anizotropie a materialului afectat de prelucrare, în lungul unor direcții paralele cu direcția de deformare. Sunt de semnalat trei manifestări distincte: se modifică forma și dimensiunile grăunților cristalului, ce se alungesc în direcția de întindere și se lătesc, respectiv se turtesc, în lungul unei direcții transversale; se modifică orientarea spațială a grăunților cristalini, datorită modificării formei prin rotirea rețelei cristaline; are loc o modificare a structurii fine a grăunților. Aceste modificări conduc la schimbări ale proprietăților fizice și mecanice ale materialului, crescând astfel rezistența la rupere și limita de curgere și scăzând plasticitatea (alungirea, stricțiunea-gătuirea secțiunii transversale), ceea ce face ca materialul să devin mai dur, mai rezistent la abraziune, la oboseală și la coroziune (Lupescu, 1999; Dușa, 1993; Muscă, 1994; Nedelcu, 1999; Căraușu, 2000).

Sculele utilizate pentru materializarea unui proces de deformare plastică superficială sunt de tip bile, role sau vârfuri de diamant. Ultimele sunt mai puțin folosite datorită costurilor inițiale de achiziție relativ ridicate (Roller, 2017).

De-a lungul timpului, cercetătorii din domeniul prelucrărilor mecanice au fost interesați în dezvoltarea de modele matematice empirice. Aceste modele matematice au avut ca scop evidențierea influenței exercitate de o serie de parametri de intrare asupra parametrilor de ieșire (parametrul de rugozitate R_a) cum este cazul lucrării realizate de Bulacu și Iordan în anul 2016.

Într-o altă lucrare s-a determinat modele corespunzătoare parametrului de rugozitate R_a la microprelucrarea unui aliaj de aluminiu de tip 6061-T6, în care s-a utilizat metoda suprafeței de răspuns (Jie et al., 2015). În vederea evaluării rugozității suprafeței în urma prelucrării prin frezare au fost utilizați așa-numiții algoritmi genetici respectiv de algoritm de optimizare al lupului cenușiu în lucrarea realizată de Sekulic et al în anul 2018.

Swirad și Pawlus au investigat posibilitățile de utilizare a procesului de deformare plastică pentru finisarea suprafețelor. În acest sens s-a analizat influența procesului de deformare plastică la rece cu bile asupra forțelor de frecare, atunci când se utilizează un film de lubrifiere (Swirad și Pawlus, 2020). S-a constatat că în cazul procesului menționat anterior la prelucrarea unor probe din oțel X37CrMoV5-1 forța de apăsare a bilei exercită o influență mai mare decât influențele celorlalți factori implicați (Swirad și Wdowik, 2019). Prin metoda rețelelor artificiale neuronale a fost posibilă modelarea efectelor parametrilor de intrare respectiv determinarea relația de legătură dintre factorii de intrare și cei de ieșire (parametrului de rugozitate Ra) din cazul procesului de deformare plastică (Kluz et al., 2021).

Kanovic et al. au dezvoltat un model matematic pentru parametrul de rugozitate Ra, utilizând în acest sens algoritmi de învățare ce folosesc metoda rețelelor neurale, metoda regresiei și respectiv regresia vector-suport, dar plecând de la rezultatele experimentale anterior obținute prin deformare plastică cu o bilă ce lucrează prin rulare (Kanovic et al., 2022). O altă lucrare științifică s-a dorit studierea texturii suprafeței după prelucrarea prin deformare plastică pe o probă din oțel X38CrMoV51 utilizând în acest sens criteriului Fisher-Snedecor pentru verificarea gradului de adecvanță a funcțiilor de regresie determinate (Swirad, 2019).

Concluzii În literatura de specialitate consultată, există numeroase informații privind influența exercitată de către parametrii regimului de așchiere (viteza de așchiere, adâncimea de așchiere, avansul de lucru) sau de alte condiții de lucru (proprietățile materialelor semifabricatelor, geometria zonei active a frezei, condițiile de răcire-ungere etc.) asupra valorilor unor parametri de ieșire din procesul de frezare. Fenomenele și mărimile ce caracterizează procesul de așchiere, așa cum sunt rezistența la așchiere, ecruisarea materialului metalic al semifabricatului, producerea vibrațiilor, uzura sculei, generarea căldurii, forțele care rezultă în timpul prelucrării prin frezare, compoziția chimică, prelucrabilitatea, caracteristicile fizico-mecanice al materialului piesei au constituit obiective ale unor cercetări teoretice și experimentale ale căror rezultate au fost publicate.

Pentru verificarea unor elemente de precizie specifice suprafețelor prelucrate prin frezare, dar și prin deformare plastică superficială, se pot folosi sisteme de măsurare atât de tip fără contact, cât și cele tip cu contact. Performanțele unor asemenea sisteme au fost îmbunătățite, ajungându-se la posibilități de măsurare cu precizii de ordinul micrometrilor sau chiar nanometrilor. Pentru cerințe mai scăzute de precizie, se pot folosi și instrumente de măsurare de construcții mai simple.

Se constată o intensă preocupare pentru studiul utilizării sau al perfecționării unor procedee de deformare plastică superficială. Cercetări mai ample într-o asemenea direcție au fost efectuate în fosta Uniune Sovietică, în Polonia, Turcia, România etc. Unul dintre motivele principale ale orientării preocupărilor spre cercetarea procedeelor de prelucrare prin deformare plastică superficială a fost cel al costurilor mai reduse în raport cu cele aferente aplicării unor procedee de prelucrare foarte fină așa cum sunt honuirea, lepuirea, suprafinisarea etc.

O preocupare permanentă a cercetătorilor din domeniul procedeelor de fabricație a constituit-o optimizarea respectivelor procedee, plecând de la folosirea anumitor criterii de optimizare și acționând asupra condițiilor de prelucrare, în principiu asupra parametrilor geometrici ai sculelor așchietoare și respectiv asupra valorilor parametrilor regimurilor de prelucrare (Gheorghe et al., 1985; Vlase et al., 1993; Dumitraș, 2006; Dumitraș, 2007; Lancea et al., 2008; Lancea et al., 2010; Sekulic et al., 2018; Dharmawardhana et al., 2021; Dragoi et al., 2021a; Drăgoi et al., 2021b).

Poate fi semnalată, de asemenea, o tendință de a se obține prin frezare a unor piese cu forme foarte variate (Five, 2016; CNC milling's, 2016; Super flexible, 2015; Neagu et al., 2005; Ciocan et al., 2015). În privința sculelor așchietoare utilizabile la prelucrarea semifabricatelor din materiale metalice, se dezvoltă în prezent soluții de scule cu un grad sporit de versatilitate, care permit, de exemplu, atașarea pe corpul sculei a 3 tipuri diferite de plăcuțe amovibile din carburi metalice sinterizate (Pramet, 2017; Multiple options, 2017; One cutter, 2019; Milling technology, 2017).

Cap. 2. OBIECTIVE DE CERCETARE

Obiective ale cercetării teoretice

1. Cercetarea teoretică presupune parcurgerea unor etape de lucru ale metodei științifice și anume: observarea unui fapt, formularea unei probleme sau propunerea unei ipoteze. Ca atare, unul dintre obiectivele teoretice ale prezentei teze de doctorat a fost cel de parcurgere a celor trei etape specifice cercetării teoretice. Consultarea literaturii de specialitate se va realiza în scopul de a identifica rezultatele la care s-a ajuns până în prezent în ceea ce privește performanțele realizabile prin utilizarea procedeelor de frezare și deformare plastică superficială luate în considerare separat sau în combinație.

2. Analizarea și prezentarea sintetizată a situației actuale a informațiilor tehnice va trebui să permită identificarea direcțiilor în care au fost efectuate cercetări referitoare la prelucrarea prin frezare și respectiv prin deformare plastică superficială utilizând scule adecvate fiecăreia dintre cele două metode de prelucrare.

3. Determinarea relațiilor sau a modelelor pentru mărimile de ieșire sau pentru cele intermediare se va face prin aplicarea unor metode de sinteză, așa cum sunt metoda diagramei de idei și metoda proiectării axiomatice.

4. Conceperea unor soluții constructive utilizabile ulterior pentru dezvoltarea unor cercetări experimentale în domeniul tezei se va efectua apelându-se de asemenea la proiectarea axiomatică și respectiv la metoda diagramei de idei.

Obiective ale cercetării experimentale

În calitate de obiective ale cercetării experimentale, vor fi avute în vedere:

Obținerea unor modele matematice empirice prin prelucrarea statistică a rezultatelor experimentale. Asemenea modele matematice empirice vor fi determinate prin utilizarea unor softuri specializate, care ar trebui să permită și selectarea celor mai adecvate modele matematice empirice în raport cu rezultatele experimentale determinate anterior.

Realizarea unor reprezentări grafice prin luarea în considerare a modelelor matematice empirice stabilite, cu ajutorul cărora să fie evidențiată influența exercitată de către factorul sau factorii de intrare luate în considerare asupra unor parametri de ieșire ai procesului investigat (asupra valorilor unor parametri ce caracterizează rugozitatea suprafețelor obținute).

Cap. 3. CONTRIBUȚII TEORETICE PRIVIND STUDIUL PROCESELOR DE FREZARE ȘI DEFORMARE PLASTICĂ SUPERFICIALĂ A SUPRAFETELOR PLANE

În timpul prelucrării prin frezare a suprafețelor plane, muchiile așchietoare ale dintelui sunt cele care vor influența, respectiv vor genera suprafața supusă prelucrării și vor conferi acesteia un anumit profil într-o anumită secțiune. Să menționăm că, dacă se realizează o secțiune transversală pe direcția mișcării de avans prin suprafața prelucrată, se va obține un profil ce înglobează, de fapt, „urma” lăsată de vârful așchietor. Din acest punct de vedere, vom înregistra trei situații distincte și anume cele evidențiate în reprezentările grafice din figura 3.5.

În prima situație și anume cea ilustrată prin schița din figura 3.5a, se va putea observa forma profilului obținut prin folosirea unui vârf ce nu prezintă o rază de racordare, de exemplu cel corespunzător unei plăcuțe triunghiulare din carburi metalice sinterizate. Cu o rază de vârf de valoare foarte mică. În realitate, este dificil de imaginat lipsa reală a unei raze de racordare, orice vârf prezentând o rază de racordare de valoare mai mare sau mai redusă, ceea ce face ca profilul fără rază de racordare să fie doar un profil teoretic.

Mai departe, în figura 3.5b se poate observa profilul suprafeței generate atunci când la așchiere participă doar porțiunea din tăiș corespunzătoare razei de racordare r_ϵ a vârfului (pentru această situație, se va recurge ulterior la determinarea unei expresii de calcul al valorii parametrului de rugozitate R_z). Reprezentarea

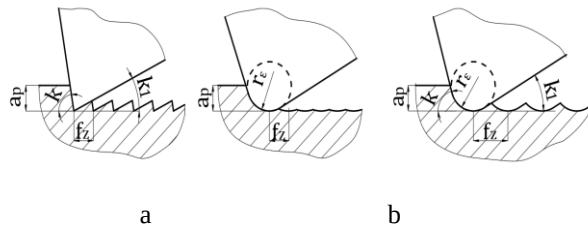


Figura 3.5 Formarea asperităților suprafeței în funcție de participarea la procesul de așchiere a unor zone distincte ale tăișului plăcuței așchietoare folosite

schematică din figura 3.5c corespunde situației în care profilul suprafeței prelucrate este un rezultat al acțiunii atât a zonei tăișului ce include raza de racordare, cât și a unor zone rectilinii ale tăișului, aflate în continuarea zonei în formă de arc de cerc și care contribuie la definirea unghiului de atac principal și respectiv a unghiului de atac secundar.

Din literatura de specialitate, pentru situațiile prezentate în figura 3.5, se vor regăsi următoarele relații de calcul pentru parametrul de rugozitate R_z (Epureanu et al., 1983):

1. Dacă în timpul procesul de prelucrare este implicată doar zona profilului caracterizată printr-o rază la vârful r_ϵ (fig. 3.5b), atunci relația de calcul pentru parametrul de rugozitate R_z are forma:

$$R_z = r_\epsilon - \sqrt{r_\epsilon^2 - \frac{f_z^2}{4}} \approx \frac{f_z^2}{8 \cdot r_\epsilon}, \quad (3.2)$$

în care f este avansul pe dinte, iar r_ϵ - raza de vârf a plăcuței. În acest caz, avem o valoare a unghiului de atac principal $k > \arcsin\left(\frac{f_z}{2r_\epsilon}\right)$, iar $k_1 > \arcsin\left(\frac{f_z}{2r_\epsilon}\right)$.

2. Dacă se consideră că în procesul de frezare este implicat un vârf al sculei pentru care nu se ia în considerare existența unei raze de racordare r_ϵ , participând la proces doar porțiunile rectilinii ale tășului principal și respectiv secundar, relația teoretică de evaluare a mărimii parametrului de rugozitate R_z este următoarea:

$$R_z = \frac{f_z}{ctg(k) + ctg(k_1)} \quad (3.3)$$

în care k și k_1 sunt valorile unghiului de atac principal și respectiv secundar.

3. Dacă profilul secțiunii restante include un arc de cerc tangent la doua semidrepte (fig. 3.5c), relația de calcul pentru parametrul de rugozitate R_z devine:

$$R_z = \frac{1}{ctg(k) + ctg(k_1)} \cdot \left[f_z - r_\epsilon \cdot \left(tg\left(\frac{k}{2}\right) + tg\left(\frac{k_1}{2}\right) \right) \right] \quad (3.4)$$

În ultimul caz, este necesar să fie îndeplinite două condiții suplimentare și anume:

$$k < \arcsin\left(\frac{f_z}{2r_\epsilon}\right) \text{ și respectiv } k_1 < \arcsin\left(\frac{f_z}{2r_\epsilon}\right) \quad (3.5)$$

Dacă profilul secțiunii restante este compus dintr-un arc de cerc racordat cu două semidrepte, iar valoarea unghiului de atac principal și respectiv secundar îndeplinește condiția exprimată prin inegalitatea $k_1 > \arcsin\left(\frac{f_z}{2r_\epsilon}\right)$, atunci relația pentru parametrul de rugozitate R_z va avea forma:

$$R_z = r_\epsilon \cdot (1 - \cos k) + f_z \cdot \sin k \cdot \cos k - \sin k \cdot \sqrt{f_z \cdot \sin k \cdot (2 \cdot r_\epsilon - f_z \cdot \sin k)} \quad (3.6)$$

În funcție de corelațiile care există între valoarea avansului pe dinte, valoarea razei de racordare a vârfului și valorile unghiurilor de atac principal și secundar, se poate utiliza unul dintre modelele matematice teoretice menționate anterior. O asemenea relație poate fi verificată și prin cercetări experimentale, fiind posibilă o comparare a rezultatelor obținute prin folosirea modelului teoretic selectat cu rezultatele obținute pe cale experimentală.

În ceea ce privește deformarea plastică superficială, relația de calcul a înălțimii maxime a rugozității este identică cu relația (3.2) din cazul prelucrării prin frezare. Fiind vorba de o deformare prin intermediul unui element deformatoare de formă sferică, amprenta lăsată pe suprafața de prelucrat este asemănătoare unui arc de cerc, în acest caz, ne confruntăm cu aceeași situație ca la frezarea cu plăcuță din carburi metalice sinterizate, la care participând la formarea profilului doar raza de vârf.

În figura 3.6, poate fi observat un grafic destinat să evidențieze influența teoretică a avansului de lucru asupra înălțimii maxime a rugozității luate în considerare prin parametrul R_z . Se constată că pentru valori ale avansului foarte mici, parametrul de rugozitate R_z a avut valori foarte mici, începând de la 0,001 μm . O dată cu creșterea mărimii avansului pe dinte f_z , are loc o creștere relativ rapidă a valorilor parametrului de rugozitate R_z . Pe de altă parte, în condiții reale, când se manifestă și influența altor factori (așa cum sunt influența vitezei de așchiere, a caracteristicilor de prelucrabilitate ale materialului semifabricatului etc.), este destul de probabil că valorile reale ale parametrului de rugozitate R_z să fie mai mult sau mai puțin diferite de cele oferite de modelul matematic teoretic luat în considerare.

Una dintre metodele care permit o analiză sistematică a condițiilor de concepere a unei noi soluții constructive și care definesc, totodată, succesiunea de etape utilizabile pentru conceperea unui produs sau a unui proces nou sau îmbunătățit este metoda proiectării axiomatice.

Cerința clientului CN_1 este aceea de a se concepe o sculă combinată de frezare și deformare plastică superficială, care să poate fi utilizată inclusiv în cadrul unor încercări experimentale, plecând de la posibilitățile de utilizare ale uneia dintre mașinile-unelte disponibile în cadrul Departamentului de Tehnologia Construcțiilor de Mașini din Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași.

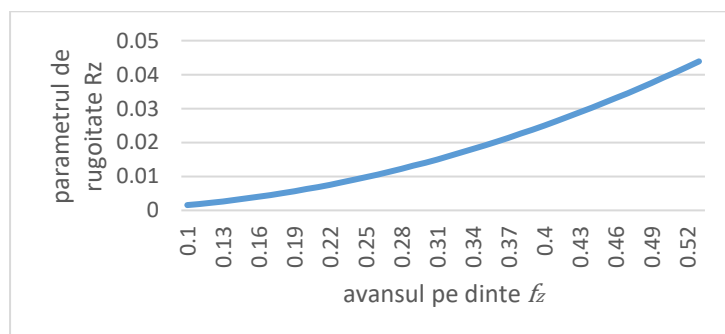


Figura 3.6 Reprezentare grafică a variației parametrului de rugozitate R_z , în raport cu valorile avansului pe dinte, atunci când la constituirea profilului secțiunii restante participă doar zona sub formă de arc de cerc a tășului ($r_\epsilon = 0,8 \text{ mm}$)

Cerința funcțională principală FR_0 va avea deci forma: să se proiecteze o sculă combinată, care să permită studiul experimental al proceselor de frezare și deformare plastică superficială a suprafețelor plane desfășurate în același timp.

Cerințele funcționale de ordinul întâi ar putea fi următoarele:

FR 1.1: Să se asigure orientarea și fixarea sculei pe mașina-unealtă;

FR 2.1: Să se asigure rotirea sculei așchietoare;

FR 2.2: Să se asigure posibilități de variație a unor parametri la prelucrarea prin folosirea elementelor așchietoare ale sculei combinate;

FR 3.1: Să se asigure posibilități de diminuare a bății frontale a elementelor de așchiere ale sculei combinate;

FR 3.2: Să se asigure posibilități de diminuare a bății radiale a elementelor de așchiere;

FR 4.1: Să se asigure posibilități de materializare a unui proces de prelucrare prin frezare;

FR 4.2: Să se asigure posibilități de materializare a unui proces de prelucrare prin deformare plastică superficială;

FR 4.3: Să se asigure posibilități de prelucrare simultană prin frezare și deformare plastică superficială;

FR 5.1: Să se asigure posibilități de reglare a poziției axiale a elementelor de așchiere respectiv a celor de deformare plastică superficială;

FR 5.2: Să se asigure posibilități de reglare a poziției radiale a elementelor de așchiere respectiv a celor de deformare plastică superficială;

FR 6.1: Să se asigure posibilități de orientare și fixare a elementelor de așchiere;

FR 6.2: Să se asigure posibilități de orientare și fixare a elementelor utilizabile pentru materializarea unui proces de deformare plastică superficială;

FR 7.1: Să se asigure posibilități de lubrifiere cu ulei a elementelor deformatoare;

FR 7.2: Să se asigure posibilități de lubrifiere cu vaselină a elementelor deformatoare.

Parametrii de proiectare DP luați în considerare pentru îndeplinirea cu elemente fizice a fiecărei cerințe funcționale FR ar putea fi cei menționați în continuare:

DP1.1: coadă conică con ISO 40, cu tijă de tragere;

DP 2.1: canal de pană;

DP 2.2: mașină-unealtă de frezat din categoria mașinilor de frezat universale de sculărie FUS 22;

DP 3.1: înclinare cu 2 grade a capului mașinii-unelte de frezat universală de sculărie FUS 22 (de fapt, a arborelui la capătul căreia se va orienta și fixa scula combinată);

DP 3.2: bucsă lungă de ghidare fără guler;

DP 4.1: plăcuțe amovibile din carburi metalice sinterizate (CMS) de formă triunghiulară;

DP 4.2: bilă de rulment;

DP 4.3: placă de formă paralelipipedică;

DP 5.1: tijă filetată la exterior, acționată prin intermediul unei piulițe hexagonale;

DP 5.2: canal de trecere;

DP 6.1: subsistem port-cuțit;

DP 6.2: piuliță conică hexagonală lungă;

DP 7.1: subsistem separat de ungere cu pompă;

DP 7.2: subsistem care să presupună existența unui circuit al uleiului, prin crearea unor canale circulare/găuri în corpul sculei și în corpul componentei de orientare (con ISO), care să permită alimentarea cu ulei a zonei de contact dintre elementul deformator și suprafața semifabricatului.

În conformitate cu cele descrise anterior, se ajunge la ecuației (3.16):

$$\begin{pmatrix} FR1.1 \\ FR2.1 \\ FR2.2 \\ FR3.1 \\ FR3.2 \\ FR4.1 \\ FR4.2 \\ FR4.3 \\ FR5.1 \\ FR5.2 \\ FR6.1 \\ FR6.2 \\ FR7.1 \\ FR7.2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP1.1 \\ DP2.1 \\ DP2.2 \\ DP3.1 \\ DP3.2 \\ DP4.1 \\ DP4.2 \\ DP4.3 \\ DP5.1 \\ DP5.2 \\ DP6.1 \\ DP6.2 \\ DP7.1 \\ DP7.2 \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

Tabel 3. 1 Matrice corectată care cuprinde cerințele funcționale FR și parametrii de proiectare DP din cazul unei scule combinate pentru frezare și deformare plastică superficială

Nr · Cr t.	Parametrii de proiectare			Parametrii de proiectare DP														
				Parametrii de proiectare DP de pe primul nivel														
				DP 1	DP2		DP3		DP4		DP5		DP6		DP7			
				Parametrii de proiectare DP de pe nivelul doi														
	Cerințe funcționale			DP 1.1	DP 2.1	DP 2.2	DP 3.1	DP 3.2	DP 4.1	DP 4.2	DP 4.3	DP 5.1	DP 5.2	DP 6.1	DP 6.2	DP 7.1	DP 7.2	
1	FR la L0	FR la L1	FR la L2	Evidențierea parametrilor de proiectare DP corespunzători fiecărei cerințe funcționale FR														
2	FR0	FR1	FR1.1	X														
3		FR2	FR2.1		X													
			FR2.2			X												
4		FR3	FR3.1				X											
			FR3.2					X										
5		FR4	FR4.1						X									
			FR4.2							X								
			FR4.3								X							
6		FR5	FR5.1									X	X					
			FR5.2									X	X					
7		FR6	FR6.1												X			
			FR6.2													X		
8		FR7	FR7.1														X	
			FR7.2															X

Ținând cont de cele arătate anterior, a fost propusă și dezvoltată soluția prezentată în figura 3.10.

Scula combinată a fost concepută astfel încât să fie posibilă prelucrarea suprafețelor plane prin frezare, dar și durificarea stratului superficial generat prin frezare. Se constată că cerințele referitoare la materializarea procesului de frezare pot fi îndeplinite de către un subsistem de tip port-cuțit. Durificarea stratului superficial generat prin procesul de frezare se poate realiza cu ajutorul unui subsistem port-bile, ce are în componența sa o bilă cu un diametru mai mare, cu rol de element deformativ, care va ajunge în contact cu suprafața de prelucrat a semifabricatului sau cea a unei probe utilizate în cadrul încercărilor experimentale.

Prelucrarea simultană prin frezare și prin deformare plastică superficială presupune mai întâi frezarea suprafeței, urmată de deformarea a stratului superficial, dar utilizându-se numai o mașina-unelte universală pentru frezare. Din acest motiv, se vor supune ordonării prin metoda corelației de rang parametrii regimului de așchiere, întrucât aceștia ar putea exercita o influență importantă asupra valorii unui parametru de ieșire, așa cum este, de exemplu, parametrul de rugozitate Ra corespunzător suprafeței prelucrate. Factorii luați în considerare sunt următorii x_1 - compoziția chimică a materialului semifabricatului; x_2 - viteza de așchiere;

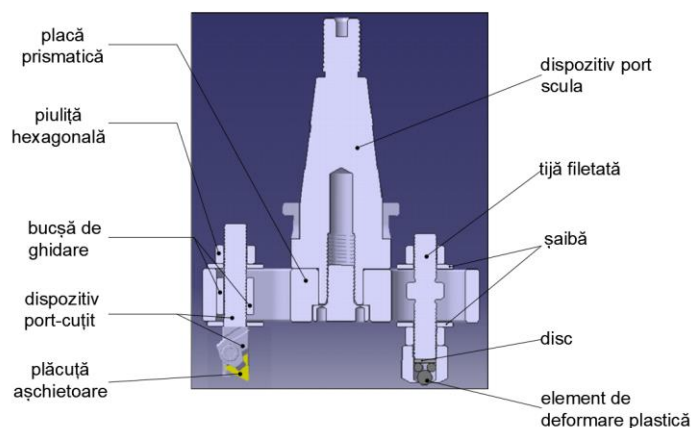


Figura 3.10 Soluție pentru scula combinată pentru frezare și deformare plastică superficială a suprafețelor plane

x_3 - adâncimea de aşchiere; x_4 - material parte activă sculă; x_5 - raza la vârf; x_6 - duritatea materialului semifabricatului; x_7 - avansul pe dinte; x_8 - unghiul de degajare; x_9 - unghiul de atac.

În vederea stabilirii ordonării ierarhice din punct de vedere teoretic s-a utilizat metoda corelație de rang. Astfel că printre altele metoda încorporează noțiuni ce permit verificarea gradului de concordanță a opiniilor formulate de către specialiști (în conformitate cu informațiile oferite de tabelul 3.3) utilizând un așa-numit coeficient de consens w și a cărui relație de definire are forma următoare (Slătineanu, 2019):

$$w = \frac{12 \cdot \sum_{j=1}^k \Delta_j^2}{m^2 \cdot (k^3 - k) - m \cdot \sum_{i=1}^m T_i} \quad (3.17)$$

Tabel 3.2 Ordonarea factorilor ce exercită influență asupra rugozității suprafeței în funcție de opiniile formulate de specialiștii consultați

Expert	Ranguri propuse pentru factorii de influență luați în considerație								
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
1	9	4	7	8	2	6	3	5	1
2	6	3	8	9	1	5	2	7	4
3	4	3	1	7	8	5	2	9	6
4	1	4	3	5	6	7	8	9	2
5	2	9	4	3	8	1	5	6	7
6	9	2	1	5	8	4	3	6	7
7	6	3	2	9	1	5	4	7	8
8	9	2	3	8	6	7	5	4	1
Δ_j^2	36	100	121	196	0	0	64	169	16
A_j	46	30	29	54	40	40	32	53	36
I_j	4.34782	6.666667	6.89655	3.70370	5	5	6.25	3.77358	5.55555
Rang	7	2	1	9	5	6	3	8	4

$$\Delta_j = \sum_{i=1}^m a_{ij} - \frac{1}{k} \cdot \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^m A_{ij} \quad (3.18)$$

După cum s-a fost menționat anterior, din analiza informațiilor oferite de către specialiștii care au participat la studiu, s-a constatat că aceștia nu au acordat același rang de mai multe ori, astfel încât pentru mărimea T_i din relația (3.17) vom avea:

$$T_i = \sum_{j=1}^m (t_j^3 - t_j) = (t_1^3 - t_1) + (t_2^3 - t_2) + (t_3^3 - t_3) + (t_4^3 - t_4) + (t_5^3 - t_5) + (t_6^3 - t_6) + (t_7^3 - t_7) + (t_8^3 - t_8) + (t_9^3 - t_9) = (0^3 - 0) + (0^3 - 0) + (0^3 - 0) + (0^3 - 0) + (0^3 - 0) + (0^3 - 0) + (0^3 - 0) + (0^3 - 0) + (0^3 - 0) = 0 \quad (3.19)$$

În relația anterioară, a_{ij} reprezintă valoarea numerică acordată de către specialistul j factorului i , A_{ij} corespunde însumării pe coloană a rangurilor acordate de către fiecare specialist. Valorile lui i sunt determinate de numărul de experți, iar t_j reprezintă numărul de ranguri identice atribuite de specialistul j , în timp ce k este numărul total de factori luați în considerare. Dacă experții nu acordă același rang mai multor factori, atunci $T_i = 0$ și nu se vor mai efectua calculele legate de corectarea rangurilor. Valorile pentru w pot fi 0 sau 1; zero corespunde situația în care între experți nu există concordanță, respectiv valoarea 1 va fi acordată în situația contrară.

Se va recurge însă, mai întâi, la determinarea sumelor A_{jm} ale rangurilor propuse de către specialiștii consultați pentru fiecare dintre factorii luați în considerare. În acest fel, se va putea scrie:

$$A_{jm} = \sum_{i=1}^m a_{ij} \quad (3.20)$$

Calculele detaliate ale sumelor rangurilor au fost incluse în Anexa 1.

Înlocuind în relația (3.17) $m = 8$ (numărul specialiștilor consultați) și $k = 9$ (numărul factorilor de intrare), respectiv Δ_j^2 cu valorile calculate, se poate determina valoarea coeficientului de consens w :

$$w = \frac{12 \cdot \sum_{j=1}^k \Delta_j^2}{m^2 \cdot (k^3 - k) - m \cdot \sum_{i=1}^m T_i} = \frac{12 \cdot (\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2 + \Delta_5^2 + \Delta_6^2 + \Delta_7^2 + \Delta_8^2 + \Delta_9^2)}{8^2 \cdot (9^3 - 9) - 8 \cdot (T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7 + T_8 + T_9)} = \frac{12 \cdot (36 + 100 + 121 + 196 + 0 + 0 + 64 + 169 + 16)}{8^2 \cdot (9^3 - 9) - 8 \cdot 0} = \frac{12 \cdot 702}{64 \cdot (729 - 9) - 0} = \frac{8424}{64 \cdot 720} = \frac{8424}{46080} = 0.182 \quad (3.21)$$

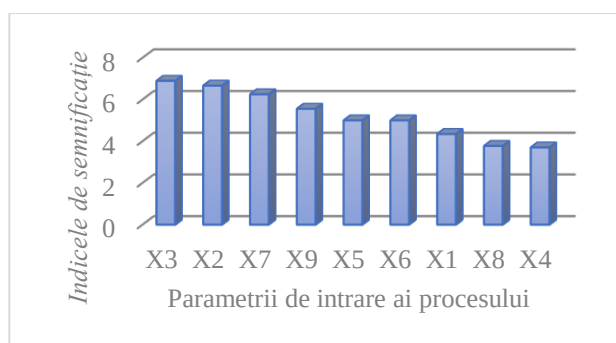


Figura 3.12 Histograma valorilor indicelui de semnificație

Întrucât numărul factorilor de intrare luați în considerare este mai mare decât șapte ($k > 7$), a fost necesară utilizarea criteriului χ^2 , pentru continuarea analizei, prin determinarea valorii calculate χ^2_{calc} , fiind folosită, în acest sens, relația (3.22):

$$\chi^2_{calc} = m \cdot (k - 1) \cdot w = 11,7 \quad (3.22)$$

Se constată că $\chi^2_{calc} < \chi^2_{tab}$, ceea ce înseamnă că nu există o concordanță suficientă între opiniile formulate de către specialiștii consultați, în ceea ce privește ierarhizarea factorilor de intrare ce au capacitatea de a exercita influență asupra rugozității suprafeței la prelucrarea prin frezare a suprafețelor plane, aceasta din urmă fiind considerată un factor de intrare în procesul investigat.

Analiza poate continua prin elaborarea unei histogramme care să permită evidențierea sugestivă a unor rezultate ale aplicării metodei corelației rangurilor.

Se obține astfel o imagine grafică asupra gradelor de semnificație ale factorilor de intrare utilizați. În acest sens, în reprezentarea grafică, în lungul axei absciselor, vor fi incluși factorii de intrare analizați, iar în lungul axei ordonatelor se vor înscrie factorii implicați.

a) *Indicele de semnificație I_j* , a cărei relație este de forma (Slătineanu, 2019):

$$I_j = \frac{K}{A_j}, \quad (3.25)$$

în care K este o constantă ce are o aceeași valoare pentru fiecare sumă A_j .

În aceste condiții, după efectuarea calculelor menționate anterior, se poate realiza așa-numita histogramă a valorilor indicilor de semnificație:

$$I_1 = \frac{200}{46} = 4,347 \quad (3.26)$$

$$I_2 = \frac{200}{30} = 6,66 \quad (3.27)$$

$$I_3 = \frac{200}{29} = 6,89 \quad (3.28)$$

$$I_4 = \frac{200}{54} = 3,7 \quad (3.29)$$

$$I_5 = \frac{200}{40} = 5,0 \quad (3.30)$$

$$I_6 = \frac{200}{40} = 5,0 \quad (3.31)$$

$$I_7 = \frac{200}{32} = 6,25 \quad (3.32)$$

$$I_8 = \frac{200}{53} = 3,77 \quad (3.33)$$

$$I_9 = \frac{200}{36} = 5,55 \quad (3.34)$$

Analizând informațiile oferite de reprezentarea grafică de tip histogramă din figura 3.12, se poate observa că ordinea factorilor de intrare în procesului de frezare analizat, ordine ce a fost stabilită ținând cont de valorile obținute pentru indicele de semnificație I_j în cazul prelucrării suprafețelor plane prin frezare, este următoarea: adâncimea de așchiere a_p ; viteza de așchiere v ; avansul pe dinte f_z ; unghiul de atac; raza la vârf r_ϵ ; duritatea materialului semifabricatului; compoziția chimică a materialului semifabricatului; unghiul de degajare; materialul părții active a sculei.

Ordonarea factorilor de intrare a fost necesară pentru o alegere justificată a factorilor de intrare ale căror valori au fost modificate în cadrul cercetărilor experimentale.

Concluzii

1. În cadrul capitolului, au fost incluse aspecte referitoare la conceperea unei scule combinate ce încorporează atât elemente de așchiere, cât și elemente ce permit materializarea unui proces de deformare plastică superficială. Folosirea unor principii din proiectarea axiomatică a condus la conturarea treptată a unei soluții constructive de sculă combinată.

2. Pentru a evita o analiză amănunțită a tuturor soluțiilor constructive posibile au fost utilizate unele principii specifice proiectării axiomatice pentru corelarea cerințelor funcționale cu parametrii de funcționare din cazul sculei combinate. S-a observat că matricele de proiectare identificate până acum definesc o proiectare (concepție) cuplată, ceea ce sugerează existența unor posibilități de îmbunătățire în continuare a soluției constructive propuse.

3. Din literatura de specialitate consultată, s-a constatat că efectuarea unor cercetări experimentale caracterizate prin luarea în considerare a mai mult de 3 sau 4 factori de intrare în procesul investigat mărește considerabil volumul de muncă necesar pentru prelucrarea statistică a rezultatelor experimentale. Pentru remedierea cel puțin parțială a acestui aspect mai puțin convenabil, a fost utilizată metoda ordonării factorilor de intrare în procesul de frezare, pentru a stabili ordinea de influență a factorilor de intrare, utilizându-se astfel metoda corelației de rang. În urma prelucrării matematice a unor rezultate obținute prin acordarea de ranguri de către un număr de specialiști consultați, s-a constatat că primii 5 factori de intrare ordonați după capacitatea lor de a exercita influență asupra valorilor parametrilor de rugozitate sunt adâncimea de așchiere, viteza de așchiere, avansul pe dinte, unghiul de atac și raza de vârf (raza de racordare a vârfului sculei).

Capitolul 4. ECHIPAMENTE ȘI MATERIALE PENTRU STUDIUL SAU MATERIALIZAREA PROCESULUI DE PRELUCRARE PRIN FREZARE ȘI DEFORMARE PLASTICĂ SUPERFICIALĂ A SUPRAFEȚELOR PLANE

În privința schemei de prelucrare privind prelucrarea prin frezare și prin deformare plastică superficială, pot fi luate în considerare trei situații distincte. În figura 4.1 au fost incluse reprezentări grafice corespunzătoare celor trei situații. Astfel, în figura 4.1a se prezintă schema de prelucrare corespunzătoare frezării suprafețelor plane cu ajutorul unei freze frontale. În calitate de factori de intrare de interes pentru rugozitatea generată printr-o asemenea prelucrare, se menționează raza la vârf r_e a plăcuței, avansul de lucru f_z și adâncimea de frezare a_p , corespunzătoare, de fapt, mărimii adaosului de prelucrare ce trebuie îndepărtat în cadrul unei singure treceri.

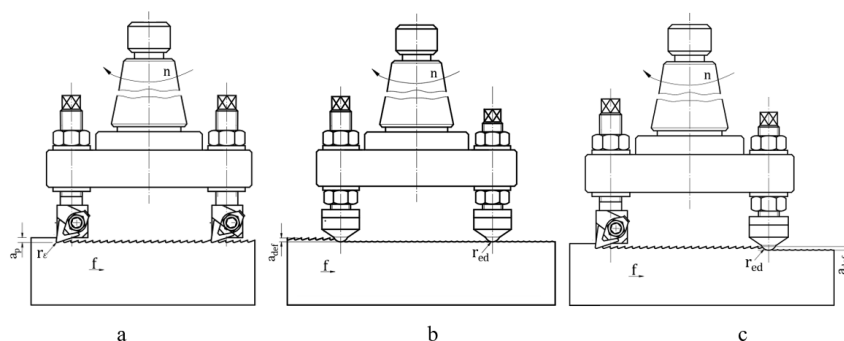


Figura 4.1 Schema de prelucrare pentru: a) procesul de frezare, b) procesul de deformare plastică superficială, c) procesul de frezare și deformare plastică superficială

În calitate de elemente ale sculei ce vor fi folosite în mod direct pentru îndepărtarea surplusului de material, se vor folosi plăcuțe amovibile din carburi metalice sinterizate, de formă triunghiulară. Sunt cunoscute în practica industrială și alte forme de plăcuțe din carburi metalice sinterizate (plăcuțe de formă pătrată, hexagonală, circulară, dreptunghiulară etc.), cele mai multe dispunând de un număr crescut de vârfuri și tăișuri așchietoare.

În figura 4.1b poate fi observată o schemă de prelucrare utilizabilă pentru materializarea unui proces de deformare plastică superficială și care preia unele dintre elementele constructive ale frezei din figura 4.1a. Este necesar să se asigure anumite corelații între mișcarea de avans realizată de către semifabricat/epruvetă sau de către scula

pentru prelucrare prin deformare plastică superficială și turația n a arborelui principal al mașinii de frezat, prin care se asigură mișcarea de rotație a sculei. Se va lua în considerare și în acest caz o adâncime de deformare plastică superficială, de valori relativ scăzute și notată cu a_{def} . Deformarea plastică se va realiza prin folosirea unui subsistem cu bilă, însă elementul deformator poate fi lua și alte forme, așa cum sunt cele de tip role cilindrice sau vârfuri din diamant.

În figura 4.1c poate fi observată o schemă de prelucrare simultană prin frezare și prin deformare plastică superficială. În acest caz, vor fi luate în considerare simbolurile comune corespunzătoare celor două situații anterioare, precum și cele specifice numai unei anumite scheme de prelucrare. Un aspect de interes va fi faptul

că valorile turației și ale avansului de lucru (ale avansului pe dinte) vor fi cele utilizate la prelucrarea prin frezare.

Analiza unui subsistem ce permite prelucrarea prin deformare plastică superficială a semifabricatelor de formă cilindrică a condus la formularea unei sugestii de folosire a unui subsistem, prin modificarea unei freze frontale, pentru a conferi frezei și posibilități de materializare a unor procese de prelucrare prin deformare plastică superficială. S-a ajuns, în acest fel, la soluția prezentată schematic în figura 4.2. Se poate observa în

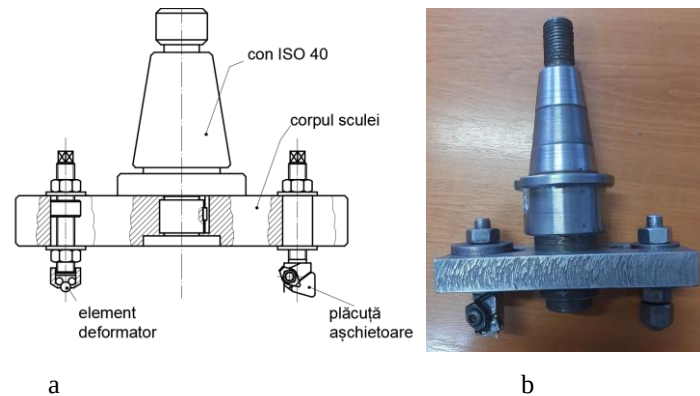


Figura 4.2 Sculă combinată pentru frezare și deformare plastică superficială a suprafețelor plane: a) soluția constructivă; b) soluția tehnologică

această schiță utilizarea unei cozi de formă conică, formă frecvent întâlnită pentru orientarea și fixarea frezelor frontale în alezajul conic din arborele principal al unei mașini-unelte universale de frezat, cu arborele principal amplasat în poziție verticală. Ca element al sculei implicat direct în procesul de frezare, se are în vedere folosirea unor plăcuțe amovibile din carburi metalice sinterizate, plăcuțe de formă triunghiulară.

Din punctul de vedere al modului de utilizare a sculei, într-o primă etapă se realizează un proces de frezare cu ajutorul plăcuțelor amovibile din carburi metalice sinterizate, urmând ca, ulterior, să se desfășoare procesul de deformare plastică superficială a suprafeței frezate anterior, datorită amplasării elementelor deformatoare la raze de valori mai mici în raport cu raza corespunzătoare poziției elementelor de frezare ale sculei. Subsistemul de deformare implică utilizarea unei piulițe conice hexagonale lungi, ce prezintă la interior un orificiu de formă cilindrică, în care se pot adăuga bile cu rol de elemente deformatoare și respectiv bile de susținere a elementului deformator de formă sferică. Bila – element deformator are un diametru mai mare, în timp ce cele trei bile de susținere au un diametru mai mic.

Subsistemul de materializare a unui proces de prelucrare prin deformare plastică superficială este imobilizat pe corpul sculei prin intermediul unor piulițe hexagonale. Aceste piulițe pot fi amplasate în poziții diferite, în lungul tijei filetate a subsistemului deformator, permițând astfel reglarea în lungul unei direcții axiale a poziției elementului deformator propriu-zis.

Materialele metalice utilizate în mod preferențial în construcția de mașini se împart în două grupe principale și anume *materialele metalice feroase* și *materialele metalice neferoase*. Din prima categorie fac parte fontele, oțelurile și fierul pur. Din categoria materialelor metalice neferoase, se utilizează într-o măsură mai largă aluminiul și aliajele sale, cuprul și aliajele sale, staniul, wolframul etc.

Există suficiente informații privind condițiile de prelucrare prin așchiere a semifabricatelor din materiale feroase din categoriile fontelor și oțelurilor. Oțelurile și fontele au fost descoperite cu foarte mult timp în urmă, fiind identificate, de exemplu, artefacte realizate din fontă în orașul Jiangsu din China și care se pare că fuseseră produse în secolul V î.Hr. (Steel, 2020; Cast Iron, 2018). O dată cu creșterea conținutului de carbon din oțeluri, are loc o mărire a rezistenței mecanice și a durității oțelului (Buzatu et al., 1975). Proprietățile mecanice ale oțelurilor diferă și în funcție de utilizarea lor (Marascu, 2018).

Din categoria materialelor metalice neferoase fac parte aliajele de aluminiu. În comparație cu oțelurile și fontele, aliajele de aluminiu au punctul de topire în jurul valorii de 657 °C, după cum sunt caracterizate și printr-o duritate mai redusă (Georgescu, 1972). Aluminiul și unele dintre aliajele sale prezintă și o rezistență ridicată la coroziune, ele fiind considerate materiale „ecologice”, inclusiv pentru faptul că oferă posibilitatea unor reciclări de un număr nelimitat de ori, fără a-și modifica semnificativ caracteristicile (Resurse, 2019). Aliajele de aluminiu dispun de caracteristici de plasticitate ridicate. Prin aliere, se pot îmbunătăți proprietățile mecanice ale lor (limita de curgere R_c , rezistența la tracțiune R_m , duritatea etc.), ajungându-se uneori la valori apropiate de cele ale oțelurilor. Însă în urma alierii cu elemente așa cum sunt cuprul, magneziul, zincul, manganul, siliciul, nichelul, fierul, este posibilă o diminuare a plasticității, a conductibilității electrice (Suciu și Suciu, 2008). Principalele domenii de utilizare a aliajelor de aluminiu sunt cele din arhitectură, conservarea alimentelor, domenii militare, construcțiile aerospațiale, bărcile, jantele pentru autovehicule etc.

Principalul element în cazul epruvetei din oțel este fierul, aflat în oțel într-un procent de 97,1%, urmat de mangan, cu un procent de 1,7%, celelalte elemente existând într-un procentul de sub 0,5%. Pe de altă parte, aliajul de aluminiu are în compoziția sa 95,9% aluminiu, la care se adaugă siliciu, în cantitate de 1,43% siliciu, restul elementelor prezente în aliaj având o pondere mai mică de 1%.

Concluzii

1. Posibilitatea conceperii, realizării și experimentării unei scule combinate, care să poată fi utilizată pentru materializarea, mai întâi, a unui proces de frezare plană și urmând ca imediat să intre în acțiune niște elemente deformatoare de tip bilă, aflate în componența aceleiași scule combinate. S-a plecat de la folosirea, în principiu, a unei freze frontale, căreia i-a fost adăugat un subsistem port-bilă, utilizabil la deformarea plastică a stratului superficial generat anterior prin frezare plană. Adaosul de prelucrare este îndepărtat la prelucrarea prin frezare, procesul de deformare plastică superficială contribuind la diminuarea înălțimilor asperităților generate anterior prin frezare. De asemenea, soluția constructivă la care s-a ajuns permite deplasarea, respectiv reglarea axială și radială a cuțitului cu rol de dinte așchietor și respectiv a subsistemului port-bilă.

2. Au fost luate în considerare posibilitățile de măsurare a valorilor unor parametri de rugozitate a suprafețelor prelucrate prin folosirea unor rugozimetre fabricate de firme de specialitate. Unul dintre aceste rugozimetre permitea și obținerea unor reprezentări grafice corespunzătoare profilului suprafețelor generate prin frezare și respectiv prin deformare plastică superficială.

3. Prelucrările propriu-zise prin frezare și prin deformare plastică superficială au fost efectuate pe o mașină de frezat universală de sculărie, mașină-unealtă existentă într-unul din laboratoarele Departamentului de Tehnologia Construcțiilor de Mașini din Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași. Au fost utilizate, pentru materializarea proceselor de prelucrare, unele dintre dispozitivele și accesoriile din dotarea mașinii de frezat (menghină, tijă de tragere etc.).

Capitolul 5. CONTRIBUȚII EXPERIMENTALE PRIVIND STUDIUL PROCESELOR DE FREZARE ȘI DEFORMARE PLASTICĂ SUPERFICIALĂ A SUPRAFEȚELOR PLANE

Soluția constructivă de sculă combinată propusă ca urmare a cercetărilor efectuate și prezentată în capitolele anterioare a fost testată în laboratorul din cadrul Departamentului de Tehnologia Construcțiilor de Mașini din cadrul Universității Tehnice „Gheorghe Asachi” din Iași.

Forma generală a modelului matematic din cadrul metodei este descrisă de relația (5.5) (Slătineanu, 2019):

$$Y^{\sim} = M + \sum_{i=1}^n ([Ef_{i,1}Ef_{i,2} \cdots Ef_{i,k}]) + \sum_{\substack{i \neq j \\ i < j}}^n \left({}^t[Af_i] \cdot \begin{bmatrix} If_{i,1}f_{j,1} & \cdots & If_{i,1}f_{j,k} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ If_{i,k}f_{j,1} & \cdots & If_{i,k}f_{j,k} \end{bmatrix} \cdot [Af_j] \right) \quad (5.5)$$

în care: $Y^{\sim}$ este răspunsul sistemului, M - media generală, $Ef_{i,k}$ sunt efectele factorilor i la nivelul k , $[Af_i]$ este matricea factorului i , ${}^t[Af_i]$ este transpusa matricei factorului i , iar $If_{i,k}f_{j,1}$ sunt interacțiunile dintre factorii $f_{i,j}$.

Planificarea încercărilor experimentale s-a efectuat prin realizarea unui tabel de tip L16, 2^4 (cu 4 factori de influență, având valori pe două niveluri de variație). Prelucrarea rezultatelor experimentale prin luarea în considerare și a valorilor factorilor de intrare în procesul investigat a fost posibilă prin utilizarea programului de calculator MiniTab 2017. În acest sens, a fost utilizat un instrument specific programului de calculator menționat anterior, instrument denumit DoE (în limba engleză, *Design of Experiments*).

După realizarea încercărilor experimentale, au fost determinate valorile parametrului de ieșire ai procesului și anume valorile parametrului de rugozitate R_a . Plecând de la formula generală de calcul corespunzătoare relației (5.5), ce constituie răspunsului sistemului analizat, s-au calculat și determinat valorile pentru răspunsurile medii ale fiecărui factor $A_{i,j}$, respectiv valorile fiecărei interacțiuni $A_{i,j}B_{i,j}$.

Prelucrarea prin frezare a epruvetelor

Tabelul 5.4 Condiții experimentale la prelucrarea prin frezare a epruvetei din aliaj de aluminiu

Procedeu de prelucrare: frezare												
Material epruvetă: aliaj de aluminiu												
Valori ale adâncimii de aşchiere: a_p [mm]: 0,5; 1,0												
Valori ale avansului de lucru: f_z [mm/dinte]: 0,126; 0,198												
Valori ale vitezei de aşchiere: v [m/min]: 44,92; 89,84												
Valori ale razei de vârf: r_ϵ [mm]: 0,8; 1,2												
Nr crt.	Adâncimea de aşchiere a_p [mm]		Avansul de lucru f_z			Turația n [rot/min]			Raza de vârf r_ϵ [mm]		Parametrul de rugozitate Ra [μm]	
	Valoare reală [mm]	Valoare codificată	Avansul pe dinte f_z [mm/dinte]	Valoare codificată	Avansul de lucru f_{min} [mm/min]	Valoare reală [rot/min]	Valoare codificată	Valoare n_m [rot/min]	Valoare reală [mm]	Valoare codificată	Valoare măsurată	
												Ram
1	0,5	1	0,126	1	12,5	100	1	100	1,2	1	1,12	1,13
											1,13	
											1,14	
2	0,5	1	0,126	1	12,5	100	1	100	0,8	2	1,49	1,59
											1,55	
											1,74	
3	0,5	1	0,126	1	12,5	200	2	160	1,2	1	1	0,92
											0,85	
											0,91	
4	0,5	1	0,126	1	12,5	200	2	160	0,8	2	0,67	0,81
											0,98	
											0,78	
5	0,5	1	0,198	2	20	100	1	100	1,2	1	2,84	2,75
											2,8	
											2,6	
6	0,5	1	0,198	2	20	100	1	100	0,8	2	4,07	3,96
											3,88	
											3,93	
7	0,5	1	0,198	2	40	200	2	200	1,2	1	2,83	3,04
											3,09	
											3,19	

8	0,5	1	0,198	2	40	200	2	200	0,8	2	3,94	3,97
											3,97	
											4,01	
9	1	2	0,126	1	12,5	100	1	100	1,2	1	1,52	1,46
											1,39	
											1,47	
10	1	2	0,126	1	12,5	100	1	100	0,8	2	2,05	1,89
											1,81	
											1,82	
11	1	2	0,126	1	12,5	200	2	160	1,2	1	0,82	0,85
											0,95	
											0,77	
12	1	2	0,126	1	12,5	200	2	160	0,8	2	1,56	1,2
											1,01	
											1,03	
13	1	2	0,198	2	20	100	1	100	1,2	1	3,27	3,31
											3,68	
											2,97	
14	1	2	0,198	2	20	100	1	100	0,8	2	4,3	4,18
											4,11	
											4,12	
15	1	2	0,198	2	40	200	2	200	1,2	1	2,99	2,91
											2,75	
											2,98	
16	1	2	0,198	2	40	200	2	200	0,8	2	4	4,0
											3,98	
											4,01	

În urma determinării valorilor numerice ale interacțiunilor, se poate scrie modelul matriceal al răspunsului sistemului, luându-se în considerare interacțiunile de ordinul 2, în cazul procesului de frezare a epruvetei din aluminiu, pentru factorul de interes tehnologic R_a (abaterea medie aritmetică a profilului evaluat), model în cazul căruia formă generală corespunde celei ilustrate prin relația (5.5). Se obține astfel un model de forma:

$$\begin{aligned} R_a = \bar{T} + |E_{a_{p1}} \quad E_{a_{p2}}| \cdot [a_p] + |E_{f_{z1}} \quad E_{f_{z2}}| \cdot [f_z] + |E_{v_1} \quad E_{v_2}| \cdot [v] + |E_{r_{\varepsilon 1}} \quad E_{r_{\varepsilon 2}}| \cdot [r_{\varepsilon}] + \\ + {}^t[a_p] \begin{vmatrix} I_{a_{p1}f_{z1}} & I_{a_{p1}f_{z2}} \\ I_{a_{p2}f_{z1}} & I_{a_{p2}f_{z2}} \end{vmatrix} \cdot [f_z] + {}^t[a_p] \begin{vmatrix} I_{a_{p1}v_1} & I_{a_{p1}v_2} \\ I_{a_{p2}v_1} & I_{a_{p2}v_2} \end{vmatrix} \cdot [v] + {}^t[a_p] \begin{vmatrix} I_{a_{p1}r_{\varepsilon 1}} & I_{a_{p1}r_{\varepsilon 2}} \\ I_{a_{p2}r_{\varepsilon 1}} & I_{a_{p2}r_{\varepsilon 2}} \end{vmatrix} \cdot [r_{\varepsilon}] + \\ + {}^t[f_z] \begin{vmatrix} I_{f_{z1}v_1} & I_{f_{z1}v_2} \\ I_{f_{z2}v_1} & I_{f_{z2}v_2} \end{vmatrix} \cdot [v] + {}^t[f_z] \begin{vmatrix} I_{f_{z1}r_{\varepsilon 1}} & I_{f_{z1}r_{\varepsilon 2}} \\ I_{f_{z2}r_{\varepsilon 1}} & I_{f_{z2}r_{\varepsilon 2}} \end{vmatrix} \cdot [r_{\varepsilon}] + {}^t[v] \begin{vmatrix} I_{v_1r_{\varepsilon 1}} & I_{v_1r_{\varepsilon 2}} \\ I_{v_2r_{\varepsilon 1}} & I_{v_2r_{\varepsilon 2}} \end{vmatrix} \cdot [r_{\varepsilon}] \quad (5.29) \end{aligned}$$

Înlocuind în relația (5.29) efectele și interacțiunile factorilor cu valorile numerice determinate anterior, se ajunge la:

$$\begin{aligned} R_a = 2,373125 + |-0,101875 \quad 0,101875| \cdot [a_p] + |-1,141875 \quad 1,141875| \cdot [f_z] + \\ + |0,160625 \quad -0,160625| \cdot [v] + |-0,326875 \quad 0,326875| \cdot [r_{\varepsilon}] + {}^t[a_p] \begin{vmatrix} -0,01687 & 0,016875 \\ 0,016875 & -0,01687 \end{vmatrix} \cdot [f_z] + \\ + {}^t[a_p] \begin{vmatrix} -0,07437 & 0,074375 \\ 0,074375 & -0,07437 \end{vmatrix} \cdot [v] + {}^t[a_p] \begin{vmatrix} 0,015625 & -0,01563 \\ -0,01562 & 0,015625 \end{vmatrix} \cdot [r_{\varepsilon}] + \\ + {}^t[f_z] \begin{vmatrix} 0,125625 & -0,12563 \\ -0,12563 & 0,125625 \end{vmatrix} \cdot [v] + {}^t[f_z] \begin{vmatrix} 0,185625 & -0,18563 \\ -0,18563 & 0,185625 \end{vmatrix} \cdot [r_{\varepsilon}] + \\ + {}^t[v] \begin{vmatrix} -0,04438 & 0,044375 \\ 0,044375 & -0,04438 \end{vmatrix} \cdot [r_{\varepsilon}] \quad (5.30) \end{aligned}$$

În figura 5.11 pot fi observate pantele segmentelor de dreaptă corespunzătoare variației între limitele adoptate ale mărimilor factorilor luați în considerare și anume a_p (adâncimea de așchiere), f_z (avansul de lucru), v (viteza de așchiere) și r_{ε} (raza de vârf). Analizând informațiile oferite de graficele mai sus menționate, se poate afirma că factorul f_z îi corespunde, în reprezentarea grafică, panta cea mai mare, exercită și cea mai puternică influență asupra valorii parametrului de ieșire, în acest caz fiind vorba despre parametrul de rugozitate R_a . O analiză mai amănunțită, în sensul că se pot compara rezultatele obținute și evidențiate pe același grafic (fig. 5.11), conduce la concluzia că factorul f_z (avansul de lucru) exercită influența cea mai puternică, fiind urmat de factorii r_{ε} (raza de vârf), v (viteza de așchiere) și respectiv a_p (adâncimea de așchiere). Însă pentru o mai bună observare și înțelegere a informațiilor ce se pot obține cu ajutorul unei reprezentări grafice din care să reiasă mai ușor o așa-zisă ierarhizare a influenței exercitate către fiecare factor de intrare în procesul de frezare asupra valorii parametrului de rugozitate R_a , este posibilă folosirea informațiilor din figura 5.11, în care au fost evidențiate toate pantele de variație ale parametrului R_a pentru toți cei patru factori de intrare

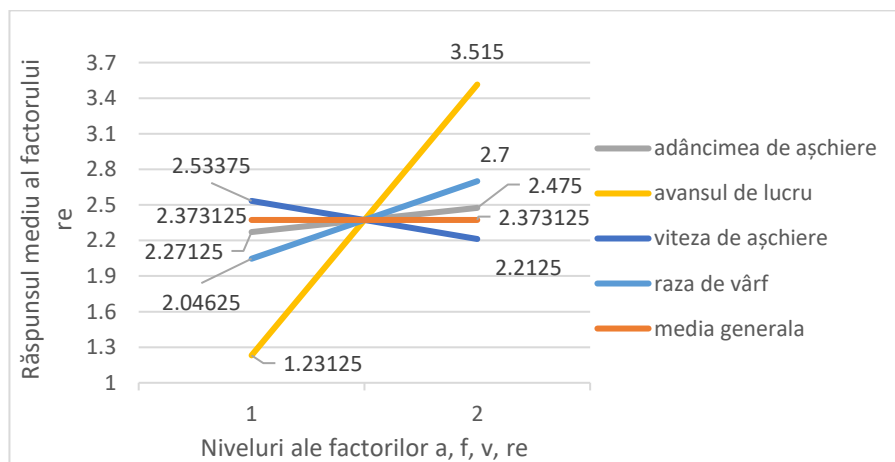


Figura 5.11 Reprezentare grafică a variației parametrului de rugozitate R_a atunci când factorii de intrare luați în considerare (a , f , v , r_{ε}) au valori corespunzătoare celor două niveluri de variație (materialul probei: aliaj de aluminiu, procese de prelucrare prin frezare)

Tabelul 5. 10 Condiții experimentale la prelucrarea simultană, prin frezare frontală și deformare plastică superficială a epruvetei din aliaj de aluminiu

Procese de prelucrare: frezare frontală și deformare plastică superficială												
Materialul epruvetei: aliaj de aluminiu												
Valori ale adâncimii de așchiere a_p [mm]: 0,5; 1,0												
Valori ale avansului de lucru f_z [mm/min]: 0,126; 0,198												
Valori ale vitezei de așchiere v [m/min]: 44,92; 89,84												
Valori ale razei de vârf r_ϵ [mm]: 0,8; 1,2												
Nr crt.	Adâncimea de așchiere a_p [mm]		Avansul de lucru f_z			Turația n [rot/min]			Raza de vârf r_ϵ [mm]		Parametru de rugozitate R_a [μ m]	
	Valoare reală [mm]	Valoare codificată	Avansul pe dinte f_z [mm/dinte]	Valoare codificată	Avansul de lucru $f_{\min}$ [mm/min]	Valoare reală [rot/min]	Valoare codificată	Valoare n_m [rot/min]	Valoare reală [mm]	Valoare codificată	Valoare măsurată	
												R_{am}
1	0,5	1	0,126	1	12,5	100	1	100	0,8	1	0,22	0,363
											0,43	
											0,44	
2	0,5	1	0,126	1	12,5	100	1	100	1,2	2	0,2	0,197
											0,21	
											0,18	
3	0,5	1	0,126	1	12,5	200	2	160	0,8	1	0,57	0,507
											0,32	
											0,63	
4	0,5	1	0,126	1	12,5	200	2	160	1,2	2	0,12	0,123
											0,15	
											0,1	
5	0,5	1	0,198	2	20	100	1	100	0,8	1	0,52	0,683
											0,79	
											0,74	
6	0,5	1	0,198	2	20	100	1	100	1,2	2	0,42	0,403
											0,35	
											0,44	
7	0,5	1	0,198	2	40	200	2	200	0,8	1	0,49	0,647
											0,47	
											0,98	
8	0,5	1	0,198	2	40	200	2	200	1,2	2	0,3	0,307

											0,27	
											0,35	
9	1	2	0,126	1	12,5	100	1	100	0,8	1	0,51	0,440
											0,37	
											0,44	
10	1	2	0,126	1	12,5	100	1	100	1,2	2	0,33	0,267
											0,27	
											0,2	
11	1	2	0,126	1	12,5	200	2	160	0,8	1	0,27	0,247
											0,18	
											0,29	
12	1	2	0,126	1	12,5	200	2	160	1,2	2	0,27	0,170
											0,11	
											0,13	
13	1	2	0,198	2	20	100	1	100	0,8	1	0,34	0,380
											0,42	
											0,38	
14	1	2	0,198	2	20	100	1	100	1,2	2	0,58	0,607
											0,6	
											0,64	
15	1	2	0,198	2	40	200	2	200	0,8	1	0,73	0,543
											0,45	
											0,45	
16	1	2	0,198	2	40	200	2	200	1,2	2	0,92	1,083
											1,49	
											0,84	

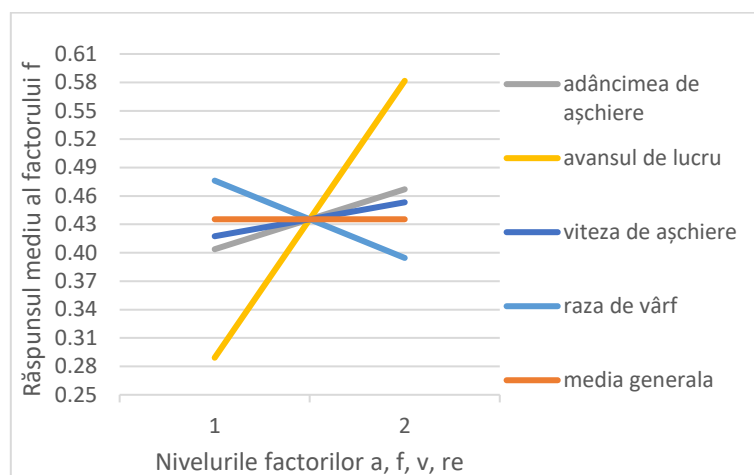


Figura 5.17 Reprezentare grafică a variației răspunsului la variația factorilor supuși analizei a, f, v, r_ϵ , în cazul prelucrării combinate, prin frezare frontală și deformare plastică superficială, (materialul epruvetei aliaj de aluminiu)

Pentru prelucrarea simultană prin frezare și deformare plastică superficială, s-a utilizat tot scula din figura 4.2b, însă de această dată s-au folosit ambele subansambluri, pentru frezare și respectiv pentru deformare plastică superficială. În figura 5.17, pot fi observate segmentele de dreaptă corespunzătoare variației pe două niveluri a factorilor a_p (adâncimea de așchiere), f_z (avansul de lucru), v (viteza de așchiere) și respectiv a raza de vârf r_ϵ . Analizând pantele segmentelor de dreaptă și ținând cont că factorul care are panta cea mai mare exercită influența cea mai puternică asupra valorii parametrului de ieșire R_a , se constată că factorului f_z îi corespunde panta cea mai pronunțată și deci influența cea mai mare, acest factor fiind urmat de factorii r_ϵ , a_p și respectiv v . Mai mult, această ierarhie este confirmată și de modelele matematice empirice determinate cu programul utilizat pentru prelucrarea datelor experimentale și anume folosind programul de calculator MiniTab.

Tabelul 5. 11 Condiții experimentale la prelucrarea simultană prin frezare și deformare plastică superficială a epruvetei din oțel

Procese de prelucrare: prelucrare simultană prin frezare frontală și deformare plastică superficială												
Materialul epruvetei: oțel												
Valori ale adâncimii de așchiere a_p [mm]: 0,5												
Valori ale avansului de lucru f_z [mm/dinte]: 0,126, 0,198												
Valori ale vitezei de așchiere v [m/min]: 44,92, 89,84												
Valori ale razei de vârf r_ϵ [mm]: 0,8, 1,2												
Nr crt.	Adâncimea de așchiere a_p [mm]		Avansul de lucru f_z			Turația n [rot/min]			Raza de vârf r_ϵ [mm]		Parametru de rugozitate R_a [μ m]	
	Valoare reală [mm]	Valoare codificată	Avansul pe dinte f_z [mm/dinte]	Valoare codificată	Avansul de lucru f_{min} [mm/min]	Valoare reală [rot/min]	Valoare codificată	Valoare n_m [rot/min]	Valoare reală [mm]	Valoare codificată	Valoare măsurată	
1	0,5	1	0,126	1	12,5	100	1	100	1,2	1	0,78	0,67
											0,35	
											0,87	
2	0,5	1	0,126	1	12,5	100	1	100	0,8	2	0,27	0,38
											0,32	
											0,54	
3	0,5	1	0,126	1	12,5	200	2	160	1,2	1	0,9	0,63
											0,5	
											0,48	
4	0,5	1	0,126	1	12,5	200	2	160	0,8	2	1	1
											1,15	
											0,84	
5	0,5	1	0,198	2	20	100	1	100	1,2	1	0,51	0,61
											0,53	
											0,78	
6	0,5	1	0,198	2	20	100	1	100	0,8	2	1,37	0,72
											0,46	
											0,32	
7	0,5	1	0,198	2	40	200	2	200	1,2	1	1,06	0,9
											0,9	
											0,73	
8	0,5	1	0,198	2	40	200	2	200	0,8	2	1,4	1,36
											0,85	
											1,84	

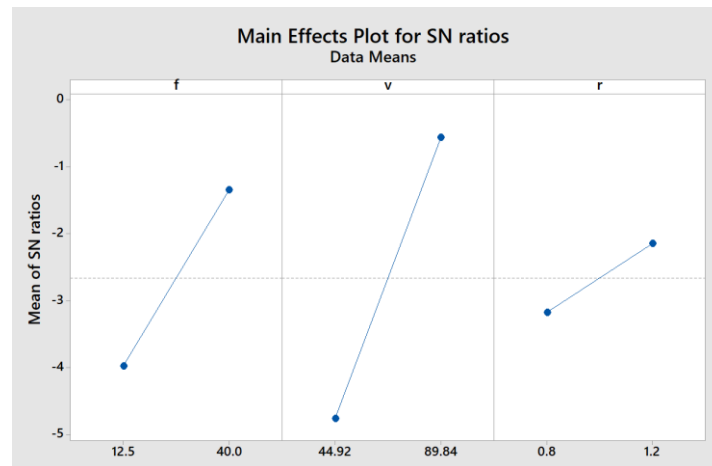


Figura 5.18 Reprezentare grafică a variației răspunsului mediu în raport cu nivelurilor factorilor de intrare supuși analizei (a_p, f_z, v, r_ϵ), în cazul prelucrării simultane prin frezare frontală și deformare plastică superficială (materialul probei: oțel)

Pentru prelucrarea simultană s-a utilizat tot scula din figura 4.2b, fiind folosite ambele subansambluri, adică atât cel de prelucrare prin frezare, cât și cel de prelucrare prin deformare plastică superficială. La prelucrarea simultană prin frezare și prin deformare plastică superficială a epruvetei din oțel, s-au luat în considerare trei variabile independente (trei factori de intrare în procesul investigat) și anume avansul de lucru f_z , viteza de așchiere v și raza de vârf r_ϵ . La fel ca în cazul procesului de prelucrare numai prin frezare aplicat epruvetei din oțel, s-a renunțat la variația celui de-al patrulea factor și anume a adâncimii de așchiere a_p valabile în cazul frezării, păstrându-se astfel o valoare constantă a acestuia și anume $a_p = 0,5$ mm.

Pentru ilustrarea influenței variației unor factori de intrare asupra valorilor unor mărimi de interes tehnologic, în domeniul proceselor de fabricație din construcția de mașini au fost și continuă să fie folosite modele matematice așa-numite de tip *funcție putere*. Un prim asemenea model a fost propus la începutul secolului anterior de către F. Taylor, pentru a evidenția influența exercitate de către viteza de așchiere asupra durabilității unei scule așchietoare. Modele matematice empirice de tip funcție putere au fost propuse încă pentru relevarea influenței condițiilor de așchiere asupra mărimii forței de așchiere și asupra mărimilor componentelor acesteia, asupra valorilor unor parametri de caracterizare a rugozității unei suprafețe prelucrate etc. Este de menționat faptul că funcțiile de tip putere pot fi utilizate cu precădere atunci când se presupune o variație monotonă (fără maxime sau minime) a parametrului de ieșire, la modificarea valorilor factorilor de intrare în procesul investigat.

Unele asemenea modele matematice de tip funcție putere au fost stabilite și pentru a ilustra influența condițiilor de prelucrare asupra valorilor unor parametri de rugozitate pentru materialele utilizate în cadrul cercetărilor experimentale.

În acest sens, pentru procesarea rezultatelor experimentale, s-a utilizat un program de calculator ce are la baza metoda celor mai mici pătrate (Crețu, 1992). Este necesar să se menționeze faptul că programul de calculator permite selectarea celei mai adecvate funcții matematice empirice în raport cu rezultatele experimentale obținute, dintre cinci asemenea funcții (polinom de gradul întâi și de gradul al doilea, funcție de tip putere, funcție exponențială și funcție hiperbolică). Selectarea se poate face prin luarea în considerare a valorii așa-numitului criteriu al lui Gauss: această valoare corespunde unei sume a pătratelor diferențelor dintre valorile corespunzătoare ordonatelor punctelor obținute cu ajutorul modelului adoptat și respectiv valorile ordonatelor punctelor obținute pe cale experimentală, pentru aceleași valori ale absciselor. Cu cât valoarea criteriului lui Gauss este mai redusă, cu atât mai adecvat este modelul matematice empiric adoptat.

Prelucrarea prin frezare și deformare plastică superficială

Materialul epruvetei: aliaj din aluminiu

Ținând cont de rezultatele obținute prin materializarea planului experimental, conform informațiilor din tabelul 5.10 s-a obținut un model matematic valabil în cazul prelucrării prin frezare și deformare plastică superficială a epruvetei din aliaj de aluminiu. Conform criteriului lui Gauss, cea mai adecvată funcție în raport cu rezultatele experimentale este o funcție hiperbolică, a cărei formă este următoarea:

$$R_a = 1,038 - \frac{0,06337}{a_p} - \frac{0,1013}{f_z} - \frac{3,222}{v} + \frac{0,1959}{r_\epsilon}, \quad (5.46)$$

funcției în cauză corespunzându-i o valoare a criteriului lui Gauss $S_G = 0,03818517$

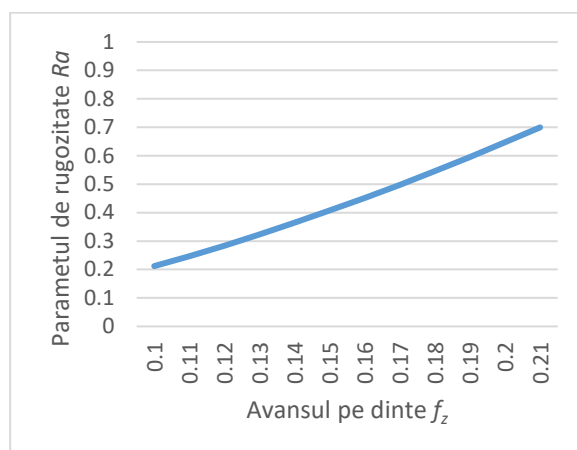


Figura 5.30 Reprezentare grafică a influenței exercitate de avansul de lucru f_z asupra parametrului de rugozitate R_a (condiții de prelucrare: $a_p = 0,5$ [mm], $v = 44,92$ [m/min], $r_\epsilon = 0,8$ mm, frezare și deformare plastică, materialul epruvetei: aliaj de aluminiu)

Optând pentru utilizarea unei funcții de tip putere, se ajunge la relația:

$$R_a = 11,635 \cdot a_p^{0,182} \cdot f_z^{1,609} \cdot v^{-0,1002} \cdot r_\epsilon^{-0,929}, \quad (5.47)$$

în acest caz, valoarea criteriului lui Gauss fiind $S_G = 0,04797568$.

Prin luarea în considerare a modelului matematic empiric de tip funcție putere. Au fost realizate de asemeni graficele de variație a valorii parametrului de rugozitate R_a pentru primii doi factori ce exercită influență semnificativă asupra parametrului R_a (vezi fig. 5.17). Au fost elaborate, de asemenea, reprezentările grafice din figurile 5.30, destinate să evidențieze și influența altor factori, în afara factorului cu influența cea mai semnificativă. Se observă că o dată cu creșterea avansului, se mărește valoarea parametrului de rugozitate R_a , în timp ce la creșterea valorii razei de vârf a plăcuței așchietoare, se înregistrează o diminuare a valorii parametrului de rugozitate R_a . Aceste aspecte sunt în conformitate cu informațiile existente în literatura de specialitate, în legătură cu analiza modului de formare a profilului secțiunii restante, un asemenea concept (cel de profil al secțiunii restante) referindu-se la urma lăsată de către muchia așchietoare a sculei pe suprafața generată, între două treceri ale sculei. În cazul adâncimilor mici sau altfel spus atunci când valoarea numerică a adâncimii de așchiere nu depășește valoarea numerică a razei de vârf care participă la formarea secțiunii restante, se obține un profil aproximativ sub formă de arc de cerc.

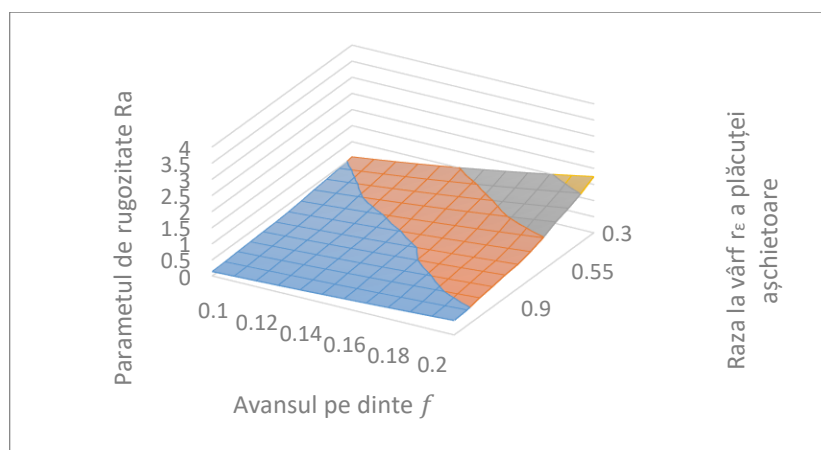


Figura 5.32 Reprezentare grafică a influenței exercitate de către factorii f_z și r_ϵ asupra valorii parametrului de rugozitate R_a ($v = 44,9$ m/min, prelucrare simultană prin frezare și deformare plastică, materialul epruvetei: aliaj de aluminiu)

Materialul probei: oțel carbon

Luând în considerare rezultatele empirice obținute în cadrul celor 8 încercări experimentale incluse în tabelul 5.11, a fost stabilită relația matematică de evidențiere a influenței factorilor de intrare luați în considerare în procesul de frezare asupra valorii parametrului de rugozitate R_a . S-a utilizat în acest sens, programul de calculator bazat pe metoda celor mai mici pătrate (Crețu, 1992) și s-a constatat astfel că, prin

analiza valorilor criteriului lui Gauss, în raport cu rezultatele experimentale obținute, cea mai adecvată funcție este o funcție de tip putere:

$$R_a = 0,1396 \cdot f_z^{0,6689} \cdot v^{0,6964} \cdot r_\varepsilon^{-0,2919}, \quad (5.48)$$

în cazul acestei funcții valoarea criteriului lui Gauss fiind $S_G = 0,02639877$

După cum se poate observa din graficele prezentate în figurile 5.34 creșterea valorilor numerice ale avansului și ale vitezei de așchiere conduce la mărirea valorii parametrului de rugozitate R_a . Pe de altă parte,

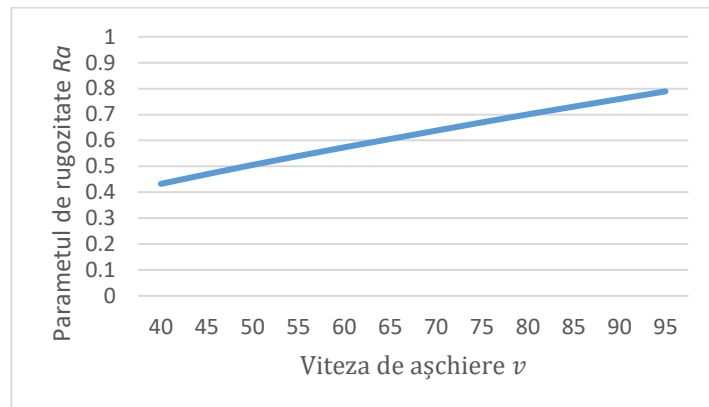


Figura 5.34 Reprezentare grafică a influenței exercitate de viteza de așchiere v asupra valorii parametrului de rugozitate R_a ($f_z=0,126$ mm/dinte, $a_p = 0,5$ mm, $r_\varepsilon = 1,2$ mm, prelucrare simultană prin frezare frontală și prin deformare plastică superficială, materialul probei: oțel)

ordonarea factorilor după gradul de semnificație a lor are aspectul următor: viteza de așchiere v , avansul de lucru f_z și respectiv raza de vârf r_ε .

Concluzii

1. Prin cercetările experimentale, s-a urmărit determinarea unor modele matematice empirice capabile să evidențieze influența exercitată de către unii dintre factorii de intrare ai proceselor investigate asupra unuia dintre parametrii de ieșire ai acestor procese. În acest sens, au fost efectuate mai întâi niște încercări experimentale preliminare, care au condus la unele modele matematice empirice valabile pentru parametrii de rugozitate R_a și R_z . Rezultatele experimentale au fost prelucrate matematic cu ajutorul unui program de calculator ce are la bază metoda celor mai mici pătrate.

2. Analizarea modelelor matematice empirice și a reprezentărilor grafice elaborate plecând de la aceste modele evidențiază faptul că, în cazul epruvetelor realizate din două materiale metalice distincte (oțel și aliaj de aluminiu), cea mai puternică influență asupra valorilor parametrilor de rugozitate menționați (R_a și R_z) este exercitată de către mărimea avansului de lucru f_z .

3. S-a observat că, în unele cazuri, valoarea parametrului de rugozitate R_a scade pe măsura creșterii vitezei de așchiere v , ceea ce se poate justifica printr-o curgere mai bună a materialului metalic la viteze mari (atunci când are loc și o creștere evidentă a temperaturii la nivelul vârfului sculei așchietoare). Pe de altă parte, s-a constatat că mărirea valorii parametrului de rugozitate R_z la creșterea valorii avansului pe dinte f_z și în cazul utilizării unor epruvete din fontă este mai mică decât cea corespunzătoare modelului teoretic valabil în acest caz (relația (3.2)).

4. S-a preferat ca pentru continuarea analizei să se folosească funcții matematice de tip funcții putere, întrucât asemenea funcții permit obținerea directă a unor informații privind influența exercitată de către factorii de intrare în proces asupra valorilor unui parametru de ieșire. S-a observat, de altfel, că funcțiile matematice de tip putere sunt relativ frecvent utilizate în construcția de mașini, pentru modelarea unor aspecte referitoare la procesele de așchiere (modelarea durabilității sculei așchietoare, a mărimilor componentelor forței de așchiere, a diferiților parametri de rugozitate etc. Datorită proprietăților fizico-mecanice și compozițiilor chimice distincte ale materialelor epruvetelor, dar și unor factori ce țin de procesul de generare a așchiilor și a asperităților de suprafață la frezarea frontală, s-a constatat că valorile determinate pe cale teoretică sunt mai mici decât cele obținute pe cale experimentală.

Cap. 6. CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII PROPRII ȘI DIRECȚII DE CONTINUARE A CERCETĂRILOR

Concluzii generale privind rezultatele cercetărilor teoretice

1. S-a realizat adaptarea unor modele teoretice referitoare la influența factorilor de intrare ai proceselor de frezare și deformare plastică superficială asupra rugozității suprafeței rezultate, având ca punct de plecare rezultate prezentate anterior în literatura de specialitate și schema de prelucrare specifică procesului.

2. Prin utilizarea principiilor specifice proiectării axiomatice, adică a unei metode ce permite analizarea în mod sistematic a ansamblului necesar a fi proiectat și prin impunerea unor cerințe funcționale specifice, a fost abordată conceperea unei variante constructiv- funcționale a sculei combinate.

3. S-a realizat ordonarea statistică a factorilor de intrare în procesul de frezare. În urma ierarhizării pe cale statistică s-a formulat o opțiune referitoare la luarea în considerare a anumitor factori de intrare în procesul investigat, în cadrul etapei de planificare a încercărilor experimentale, acești factori de intrare fiind avansul pe dinte, adâncimea de așchiere, viteza de așchiere și raza de vârf a plăcuței așchietoare.

4. În privința procesului de deformare plastică superficială, s-a luat în considerare ca materialul din care vor fi realizate epruvetele să fie materiale care să prezinte o tenacitate ridicată, așa cum este cazul oțelului, al unor aliaje de aluminiu etc.

Concluzii generale privind rezultatele cercetărilor experimentale

5. În vederea prelucrării datelor experimentale obținute în cazul prelucrării prin frezare frontală și deformare plastică superficială, în calitate de procedee distincte de prelucrare și respectiv la materializarea acestor procedee în cadrul unei singure curse a sculei combinate, prin folosirea unor epruvete realizate din materiale metalice (oțel și un aliaj de aluminiu), a fost conceput un plan experimental în conformitate cu cerințele unui experiment de tip factorial cu patru variabile independente la două niveluri de variație, urmărindu-se evidențierea influenței exercitate de către factorii de intrare în procesele de prelucrare investigate asupra valorii unui parametru de rugozitate a suprafeței, parametru considerat de interes tehnologic.

6. Au fost folosite principii specifice utilizării metodei Taguchi în vederea evidențierii factorilor cu influență semnificativă asupra rezultatelor urmărite și respectiv pentru ilustrarea grafică a variației răspunsului procesului investigat în raport cu cele două niveluri de variație ale factorilor de intrare. Au fost determinate modele matriceale (specifice utilizării metodei Taguchi) ale răspunsurilor sistemelor supuse analizei.

7. Ca urmare a efectuării încercărilor experimentale, s-a putut constata că utilizarea unui lichid de răcire, respectiv de lubrifiere a bilei sau bilelor din cazul procesului de deformare plastică superficială, are o importanță deosebită, lipsa lichidului de ungere fiind în măsură să conducă la o blocare a bilei implicate în procesul de deformare plastică superficială, la afectarea în sens negativ a calității suprafeței și eventual a duratei de utilizare a bilei.

8. În literatura de specialitate, se recomandă ca dispozitivele de fixare și orientare a semifabricatelor să aibă o înălțime relativ mică, fără a fi afectată negativ în acest sens rigiditatea dispozitivului și a sistemului tehnologic, dar fiind posibilă diminuarea consumului de materiale încorporate în dispozitiv (Buzatu et al., 1975).

Contribuții proprii

1. Dezvoltarea unei cercetări documentare finalizate printr-o sinteză a situației actuale a informațiilor științifice și tehnice referitoare la prelucrările prin frezare și respectiv prin deformare plastică superficială.

2. Inițierea și dezvoltarea unor cercetări prin care au fost abordate aspecte teoretice specifice prelucrărilor distincte efectuate prin frezare frontală și deformare plastică superficială și respectiv conceperea unei scule care să permită materializarea unei prelucrări prin frezare frontală și prin deformare plastică superficială într-o singură cursă.

3. Implicarea în conceperea, materializarea și cercetarea posibilităților de utilizare a unei scule combinate, capabile să realizeze în cadrul unei singure curse atât o prelucrare prin frezare frontală, cât și o prelucrare prin deformare plastică superficială.

4. Conceperea și dezvoltarea unor cercetări experimentale prin care s-a urmărit identificarea unor modele matematice empirice, capabile să evidențieze influența unor factori de intrare în procesele investigate asupra valorii parametrului de rugozitate R_a .

5. Conceperea unui program de calculator utilizabil prin folosirea softului Excel conform anexei 3, program cu ajutorul căruia a fost posibilă procesarea matematică a rezultatelor experimentale, atunci când s-a urmărit aplicarea unor principii specifice metodei Taguchi.

LISTĂ DE REFERINȚE BIBLIOGRAFICE SELECTIVĂ

1. Andy, *Five surprising new innovations in cnc*, 2016, disponibil la <https://www.scan2cad.com/cnc/five-new-cnc-innovations/>, accesat la 09.08.2019
2. Burlacu, C. și Iordan, O. *Mathematical modelling to predict the roughness average in micro milling process*. ModTech International Conference - Modern Technologies in Industrial Engineering, vol. 4, 2016
3. Buzatu, V., Caisân, V., Gerbert, Fr. *Îndrumar pentru ridicarea calificării frezorilor*. București: Editura Tehnică, 1975, p. 62, 81, 88-91, 93-96, 121, 204-210; 246, 250, 261-273, 296
4. Calea, G., Gaiță, Z., Voicu, M. *Frezarea, rabotarea, mortezarea și broșarea*. București: Editura Didactică și Pedagogică, 1968, p. 8, 16, 194, 265
5. *Cast iron*, autor neprecizat, 2018, disponibil la http://en.wikipedia.org/wiki/Cast_iron, accesat la 20.06.2020
6. Cărăușu, C. *Contribuții teoretice și experimentale asupra prelucrării prin deformare plastică a suprafețelor plane*. Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, 2000
7. Ciocan, I., Datcu, D., Gheorghe, M. *Basic conditions for 5-axis milling of impeller specific surfaces*. Applied Mechanics and Materials, 760, 367–372, 2015
8. *CNC milling's coolest application ever*, autor neprecizat, 2016, disponibil la <https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/11715/CNC-Millings-Coolest-Application-Ever.aspx>, accesat la 09.08.2019
9. Cosovschi, P. *Sporirea durabilității formelor de turnare prin procedee tehnologice și metode constructive*. Teza de Doctorat. Chișinău: Universitatea Tehnică a Moldovei, 2019, p.21
10. Crețu, G., *Bazele cercetării experimentale. Îndrumar de laborator*. Iași: Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi”, 1992
11. *Deformare*, autor neprecizat, 2015, disponibil la <https://dexonline.ro/definitie/deformare/expandat>, accesat la 03.02.2022
12. *Deformare*, autor neprecizat, 2015, disponibil la <https://ro.wikipedia.org/wiki/Deformare>, accesat la 03.02.2022
13. Dharmawardhana, M., Ratnaweera, A., Oancea, G. *STEP-NC compliant intelligent CNC milling machine with an open architecture controller*. Applied Sciences, 11, 13, 6223, 2021
14. Dragoi, M.-V., Rosca, D.M., Folea, M.F., Oancea, G. *A Fully Symmetrical High Performance Modular Milling Cutter*. Symmetry, 12, 3, 496, 2021
15. Dragoi, M.-V., Rosca, D.M., Folea, M.F., Oancea, G. *Modular milling cutter with inner-cooling network*. MATEC Web of Conferences, 343, 01009, 2021b
16. Dumitras C. *Modeling of the deburring process*, Applied Mechanics and Materials, Vols. 5-6, Trans Tech Publications, Switzerland, 367-374, 2006
17. Dumitraș, C.G. *An approach on micro-cutting (deburring) process*. Proceedings of the World Congress on Engineering, Vol II, WCE 2007, July 2 - 4, 1076-1081, 2007, London, U.K
18. Dușa, P. Teză de doctorat. DUȘA Petru - *Contribuții asupra rulării suprafețelor cilindrice exterioare, cu rigiditate redusă*, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, 1993
19. Epureanu, A., Pruteanu, O., Gavrilă I., *Tehnologia Construcțiilor de Mașini*, Editura Didactică și Pedagogică, București, p. 51-52, 1983
20. Georgescu, G.S. *Îndrumător pentru ateliere mecanice*. București: Editura Tehnică, 1972, p. 295, 371, 880, 915-919, 981
21. Gheorghe, M., Neagu, C., Rădulescu, A. *The determination of optimum adjusting size and period of a machining cycle*. Buletinul Institutului Politehnic București: Construcții de mașini, 46, 82, 1985
22. Jie, Y., Jiao, L., Xibin, W., Junfeng, X., Meixia, Y., Shoufeng, G. *Surface roughness models and their experimental validation in micro milling of 6061-t6 Al alloy by response surface methodology*. Mathematical Problems in Engineering, 2015, vol. 2015
23. Kanovic, Z., Vukeli, D., Simunovic, K., Prica, M., Saric, T., Tadic, B., Simunovic, G. *The modelling of surface roughness after the ball burnishing process with a high-stiffness tool by using regression analysis, artificial neural networks, and support vector regression*. MDPI journals. Metals, vol. 12 (2), 2022
24. Kluz, R., Antosz, K., Trzepieciniski, T., Bucior, M. *Modelling the influence of slide burnishing parameters on the surface roughness of shafts made of 42crmo4 heat-treatable steel*. MDPI journals. Materials, vol. 14 (5), 2021
25. Lancea, C., Ivan, N.V., Chicos, L.A., Oancea, G. *Optimisation of CNC milling files since CAD phases*. Annals of DAAAM & Proceedings, 741-743, 2008.

26. Lancea, C., Oancea, G., Chicos, L.A., Stamate, V. *Software package for improving the milling process of 3D parts*. Proceedings of the 10th WSEAS International Conference on Applied Computer Science, 234-237, 2010
27. Lupescu, O. *Netezirea suprafețelor*. Chișinău: Editura Tehnica Info, 1999, p. 39-41
28. Marascu, K. *Materiale industriale*, 2018, disponibil la: <https://www.scribd.com/document/371038227/5-MARASCU-KLEIN-pdf>, accesat la 20.06.2020
29. *Milling (machining)*, autor neprecizat, 2013, disponibil la: [https://en.wikipedia.org/wiki/Milling_\(machining\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Milling_(machining)), accesat la 07.07.2019
30. *Milling technology: 5 new trends*, autor neprecizat, 2017, disponibil la: <https://www.oemupdate.com/cover-story/milling-technology-5-new-trends/>, accesat la 18.08.2019
31. *Multiple options from single cutter design*, autor neprecizat, 2017, disponibil la: <https://www.machinery-market.co.uk/news/17493/Multiple-options--from-single-cutter-design>, accesat la 20.08.2019
32. Muscă, G. *Contribuții asupra îmbunătățirii calității suprafețelor flancurilor dinților roților prelucrate prin rulare*. Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, 1994
33. Neagu, C., Gheorghe, M., Dumitrescu, Andrei. *Fundamentals on face milling processing of straight shafts*. Journal of Materials Processing Technology, 166, 3, 2005, 337-344
34. Nedelcu, D. *Contribuții teoretice și experimentale asupra prelucrării canelurilor prin deformare plastică*. Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, 1999
35. *One cutter, many choices*, autor neprecizat, 2019, disponibil la: <https://www.mtimagazine.com/one-cutter-many-choices/>, accesat la 20.08.2019
36. *Pramet sod05 milling cutter reduces tool change-over time and inventory costs*, autor neprecizat, 2017, disponibil la: <http://www.machineR.y.co.uk/machineR.y-products/dormer-pramet-sod05-milling-cutter-1>, accesat la 20.08.2019
37. Ravindra, D., Kode, S.K. *Laser-transmitting tooling*. Brevet World intellectual property organization nr. WO 2018/017584A1, 25.1.2018 *Resurse informaționale despre aluminiu*, autor neprecizat, 2019, disponibil la: <https://www.alumil.com/extrusion/ro/info/knowledgebase-in-aluminium>, accesat la 20.06.2020
38. *Roller burnishing technology*, autor neprecizat, 2017, disponibil la: <https://www.baublies.com/technology.html>, accesat la 03.02.2022
39. Sekulic, M., Pejic, V., Brezocnik, M., Gostimirović, M., Hadzistevic, M. *Prediction of surface roughness in the ball-end milling process using response surface methodology, genetic algorithms, and grey wolf optimizer algorithm*. Advances in Production Engineering & Management, vol. 13, nr. 1, p.18-30, 2018
40. Slătineanu, L. *Bazele cercetării științifice*. Iași: Editura PIM, 2019, p. 120-124, 333-336, 385-91
41. *Steel*, autor neprecizat, 2020, disponibil la <https://en.wikipedia.org/wiki/Steel>, accesat la 20.06.2020
42. Suciu, V., Suciu, M.V. *Studiul materialelor*. București: Editura Fair Partners, 2008, p.96-98, 172-173
43. *Super flexible double curvature surface - laser cut plywood*, autor neprecizat, 2015, disponibil la: <https://www.instructables.com/id/Super-flexible-duble-cuR.vature-surface-laser-cut-p/>, accesat la 18.09.2019
44. Swirad, S. *Surface Texture Analysis after Hydrostatic Burnishing on X38CrMoV5-1 Steel*. Chinese journal of mechanical engineering, vol. 32 (91), 2019
45. Swirad, S. și Pawlus, P. *The influence of ball burnishing on friction in lubricated sliding*. MDPI journals. Materials, vol. 13(21), 2020
46. Swirad, S. și Wdowik, R. *Determining the effect of ball burnishing parameters on surface roughness using Taguchi Method*. Procedia Manufacturing, vol. 34, p. 287-292, 2019
47. Teodorescu, A. *Prelucrarea de precizie prin deformare plastică a alezajelor cilindrice*. București: Editura Tehnică, 1963, p. 7-10, 68
48. Vlase, A., Stancescu, C., Sturzu, A., Neagu, C. *Tehnologii de Prelucrare pe mașini de frezat*. București: Editura Tehnica, 1993

**Lucrări elaborate în perioada studiilor doctorale și aflate în directă conexiune
cu tema tezei de doctorat**

1. Oroian, B., **Condrea, I.**, Botezatu, C., Hrițuc, A., Ețcu, M., Slătineanu, L. *Use of the systemic approach in studying the industrial processes*. Buletinul Institutului Politehnic din Iași. Secția Construcții de Mașini, vol. 65 (69), nr. 4, p. 18-26, 2019.
2. **Condrea, I.**, Oroian, B., Botezatu, C. *Using Axiomatic design method for analyzing functional requirements of a cylindrical milling tool*. International Conference of Inventics, p. 39-45, 2019
3. Botezatu, C., **Condrea, I.**, Oroian, B., Hrițuc, A., Ețcu, M., Slătineanu, L. *Use of the Ishikawa diagram in the investigation of some industrial processes*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 682, 2019
4. **Condrea, I.**, Slătineanu, L., Nagîț, G., Coteață, M. *Influence of the process input factors on the roughness of surfaces obtained by end milling*. International Conference of Inventics, 2018
5. **Condrea, I.**, Slătineanu, L., Nagîț, G., Hrițuc, A. *Influence of some machining conditions on the value of Rz surface roughness parameter at end milling of cast iron*. Buletinul Institutului Politehnic din Iași. vol. 64 (68), Nr. 4, p. 26-36, 2018. Secția Construcții de Mașini
6. Oroian, B., **Condrea, I.**, Hrițuc, A., Botezatu, C., Ețcu, M., Slătineanu, L. *Analysis as the starting point for the development of scientific research*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 564, 2019 (volum indexat Web of Science – WoS)
7. Slătineanu, L., Hrițuc, A., Nagîț, G., Beșliu-Băncescu, I., Oroian, B., **Condrea, I.**, Botezatu, C., Ețcu, M. *Creative synthesis of the technical solutions in the field of industrial processes*. MATEC web of Conferences MSE, vol. 290, 2019 (volum indexat Web of Science – WoS)
8. **Condrea, I.**, Oroian, B., Botezatu, C., Boca, M., Ețcu, M., Ermolai, V., Ciobanu, D., Galmadi, G. *Use of some TRIZ principles in the case of designing research equipment*. Systematic Innovation for Engineering Complex Technical Systems. Acta Technica Napocensis Series: Mathematics, Mechanics and Engineering, 63(3), 63-70, 2020 (jurnal cotat ISI).

9. **Condrea, I.**, Hrițuc, A., Oroian, B., Boca, M., Botezatu, C., Slătineanu, L. *Ordering the influence of the end milling process*. Conference of the TUIASI Doctoral School, 2021
10. **Condrea, I.**, Oroian, B., Botezatu, C. *Utilizarea modelării matriceale corespunzătoare metodei Taguchi pentru studiul rugozității suprafeței rezultate la frezare*. Technical scientific conference of undergraduate, master and phd students, Universitatea Tehnică din Moldova, Chișinău, 2022
11. Slătineanu, L., **Condrea, I.**, Hrițuc, A., Beșliu-Bancescu, I., Coteață, M., Oroian, B., C. *Sculă combinată pentru frezarea și prelucrarea prin deformare plastică superficială a suprafețelor plane*. Cerere de brevet, 2020, nr. cerere a 2020 00350, clasă internațională: B23C 5/06, B24N39/06, nr. de publicare: 135368 A2

**Lucrări elaborate în perioada studiilor doctorale și ale căror subiecte nu sunt în
conexiune directă cu tema tezei de doctorat**

12. Botezatu, C., **Condrea, I.**, Oroian, B. *Using the ideas diagram in the case of chemical etching*. International Conference of Inventics, p. 94-99, 2019
13. Oroian, B., Slătineanu, L., **Condrea, I.**, Botezatu, C., Hrițuc, A. *Enclosure for testing the electromechanical devices when changing the external conditions*. Buletinul Institutului Politehnic din Iași, secția Construcții de Mașini. vol. 67 (71), Nr. 4, p. 79-87, 2021.
14. Botezatu, C., Hrițuc, A., **Condrea, I.**, Oroian, B., Boca, M., Slătineanu, L. *Educational approaching management of the chemical engraving process*. Conference of the TUIASI Doctoral School, 2021
15. Botezatu, C., Oroian, B., Hrițuc, A., **Condrea, I.**, *Influences of the circular economy in industrial engineering*. Modern Technologies in Industrial Engineering (ModTech), vol. 8, 2019 (volum indexat WoS)
16. Botezatu, C., Oroian, B., **Condrea, I.**, Boca, M., Hrițuc, A., Ciobanu, D., G., Slătineanu, L. *Use of rank correlation method for ordering factors capable of affecting surface roughness in chemical machining*. Buletinul Institutului Politehnic din Iași. vol. 66 (70), Nr. 2, p. 9-19, 2020. Secția Construcții de Mașini
17. Slătineanu, L., Oroian, B., **Condrea, I.**, Botezatu, C., Hrițuc, A., Boca, M., A., Coteață, M., Dodun, O. *Elaboration of the initial requirements in the design activities*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 1037, 2020
18. Mihalache, A., Hrițuc, A., Boca, M., Oroian, B., **Condrea, I.**, Botezatu, C., Slătineanu, L. *Thermal insulation capacity of a 3D printed material*. Macromolecular Symposia, 2021, 2000286, <https://doi.org/10.1002/masy.202000286> (jurnal cotat ISI)
19. Oroian, B., Slătineanu, L., **Condrea, I.**, Botezatu, C., Hrițuc, A. *Container for testing the operation of electromechanical devices when changing experimental conditions*. Conference of the TUIASI Doctoral School, 2021
20. Botezatu, C., **Condrea, I.**, Oroian, B. *Cerințe în cazul unui dispozitiv pentru studiul comportării materialelor metalice la prelucrarea prin eroziune chimică*. Technical scientific conference of undergraduate, master and PhD students, Universitatea Tehnică din Moldova, Chișinău, 2022

21. Slătineanu, L., Oroian, B.C., **Condrea, I.**, Botezatu, C.V., Hrițuc, A. *Echipament pentru investigarea comportării unor componente ale calculatorului în condiții nefavorabile* Cerere de brevet, 2019, nr. cerere a 2019 00318, clasă internațională: G01N 25/20, nr. de publicare: 134582 A2

22. Slătineanu, L., Botezatu, C.V., Hrițuc, A., **Condrea, I.** *Echipament pentru studiul comportării materialelor metalice în cadrul unui proces de eroziune chimică*. Cerere de brevet, 2021, nr. cerere a 2021 00414, clasă internațională: G01N 17/04, nr. de publicare: 137255 A2