

IOSUD – UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI

Școala doctorală de Inginerie Mecanică și Industrială



TEZĂ DE DOCTORAT

**Optimizarea energetică a proceselor de danturare prin
modificarea parametrilor cinematici ai mișcării de rulare**

**Energetic optimization of teeth machining processes by modifying the
kinematical parameters of the rolling motion**

-Rezumat-

Doctorand

Ing. Mihail BORDEANU

Președinte

Prof. dr. ing. Elena SCUTELNICU

Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

Conducător de doctorat

Prof. dr. ing. Gabriel-Radu FRUMUȘANU

Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

Referenți oficiali

Prof. dr. ing. Cătălin DUMITRAȘ

Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași

Prof. dr. ing. habil. George CONSTANTIN

Universitatea POLITEHNICĂ din București

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

Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați

Seria I 4 : Inginerie Industrială Nr.80

GALAȚI

2021

Cuprins		
	Pag. rezumat	Pag. teza
Introducere.....	1	ix
1. Stadiul actual în domeniul proceselor de danturare.....	1	1
1.1. Introducere.....	1	1
1.2. Procesul de formare a așchii la generarea suprafețelor.....	1	20
1.2.1. Fundamente teoretice	1	20
1.2.2. Modelarea mărimii forțelor de așchiere	2	24
1.2.3. Soluții de micșorare a variației forțelor de așchiere la danturare	3	
1.3. Concluzii	4	25
2. Obiectivele tezei și direcții de cercetare	5	28
3. Uniformizarea ariei așchii detașate la danturarea cu scula-cremalieră	8	29
3.1. Introducere.....	8	33
3.2. Prelucrarea danturii evolventice cu o sculă de tip cremaliera monodinte, dintr-o singură trecere.....	9	34
3.2.1. Modelarea în CATIA a procesului de generare a unui gol de dinte	9	37
3.2.2. Algoritm pentru găsirea legii de variație a așchii detașate	10	40
3.2.3. Legea de variație a ariei așchii detașate, pentru prelucrarea danturii cu pași constanți	10	40
3.2.4. Legea de variație a mișcării de rulare, pentru suprafețe constante ale așchii	13	43
3.3. Prelucrarea danturii evolventice cu o sculă de tip cremaliera monodinte, cu treceri multiple	16	46
3.3.1. Modelarea grafică a generării unui gol de dinte în mai multe treceri..	16	50
3.4. Asperitatea geometrică a flancului danturii generate de cremaliera monodinte.....	18	53
3.4.1. Definirea problemei.....	19	57
3.4.2. Modelarea grafică a asperității de generare	19	61
3.4.3. Aplicații numerice	21	64
3.5. Prelucrarea danturii evolventice cu o sculă de tip cremaliera multidinte ...	24	68
3.5.1. Metodă grafică în CATIA pentru modelarea procesului danturării cu scula cremalieră	24	72
3.5.2. Modelare numerică	25	81
3.5.3. Concluzii	31	83
4. Uniformizarea ariei așchii detașate la danturarea cu cuțitul-roată.....	32	83
4.1. Introducere.....	32	87
4.2. Modelarea în CATIA a formei și mărimii ariei așchii detașate	33	87
5. Uniformizarea ariei așchii detașate la prelucrarea melcilor evolventici cu cuțite rotative	40	97
5.1. Introducere.....	40	97

5.2. Modelarea grafică a mărimii ariei așchiilor detașate la generarea cu cuțit rotativ a melcului cilindric evolventic	40	101
6. Uniformizarea ariei așchii detașate la prelucrarea suprafețelor cu profil neevolventic	44	109
6.1. Cuțit-roată pentru generarea unui alezaj cu secțiune transversală pătrată.	44	109
6.1.1. Modelarea schemei de generare în mediul grafic CATIA	45	115
6.2. Modelarea 3D în CATIA a generării cu scula cremalieră a unui arbore cu secțiune transversală pătrată.....	48	122
7. Concept privind modificarea lanțului cinematic de avans a mașinilor unelte de danturat, în vederea asigurării unei variații minime a așchii detașate	52	131
7.1. Introducere.....	52	131
7.2. Soluții pentru modificarea lanțului cinematic de rulare a unei mașini de mortezat tip B5020 în lanț cinematic acționat flexibil	53	135
7.3. Stand pentru testarea controlului unui mecanism de translație.....	56	143
8. Concluzii finale și contribuții originale	58	145
Lista de lucrări științifice publicate și prezentate la conferințe interne și internaționale	62	150
Bibliografie	63	152

Introducere

Procesele de fabricație sunt o parte importantă a sectorului industrial și joacă un rol vital în economia globală. În cadrul proceselor de fabricație, mașinile-unelte transformă materiile prime în produse, utilizând în cele mai multe cazuri energie electrică, producând, pe lângă valoarea adăugată, deșeuri și emisii.

Deoarece, în mare parte, energia electrică este obținută prin arderea combustibililor fosili, consumul de energie generează amprente de carbon. Deci, reducerea emisiilor de carbon este strâns legată de reducerea consumurilor de energie.

Reducerea consumului de energie în procesele de așchiere, sub toate aspectele (prelucrarea suprafețelor, calitatea produselor obținute, folosirea mai eficientă a sculelor etc.) este de o mare importanță pentru realizarea unei fabricări durabile.

Eficiența energetică în prelucrarea materialelor este uneori foarte scăzută. Cu toate acestea, până în urmă cu câțiva ani, optimizarea energetică a operațiunilor de prelucrare nu a primit atenția necesară. Studii recente arată că sunt procese de prelucrare (în general la prelucrarea materialelor dure și fragile), unde energia utilizată în prelucrarea efectivă, însemnând energia consumată pentru îndepărtarea materialului și generarea suprafeței, reprezintă doar aproximativ 15% din energia totală [1] [2].

În prezent, s-a schimbat modul de abordare a acestei probleme.

Energia, modul de obținere și consumul acesteia au devenit priorități ale întregii lumi.

Înțelegerea modului în care variază fluxul de energie pe timpul prelucrării este esențial pentru a exploata potențialul de economisire a acesteia.

Un prim pas către reducerea consumului de energie și mărirea duratei de viață a sculelor, este analiza impactului parametrilor de prelucrare asupra consumului de energie și solicitărilor la care sunt supuse mașinile. Mai mult, cunoscând că procesele de prelucrare sunt utilizate foarte mult, îmbunătățirea eficienței energetice a acestora ar putea duce la o reducere semnificativă a impactului asupra mediului.

Deoarece forța de așchiere este foarte importantă în procesul de danturare, este esențial să fie foarte bine cunoscut modul de variație al acesteia în timpul prelucrării.

În aceste condiții, prezenta teză își propune să analizeze, utilizând medii de prelucrare grafică (CATIA) și aplicații în MatLab:

- formarea așchii și modul în care sunt încărcate energetic sculele așchietoare la prelucrarea pe mașini de mortezat de tip MAAG, a danturilor evolventice drepte, cu scula cremalieră și cuțitul roată;
- formarea așchiilor și modul de uniformizare a mărimii acestora în cazul așchierii prin rulare a melcilor evolventici, folosind cuțite rotative;
- formarea așchiilor la prelucrarea prin rulare a suprafețelor neevolventice (arbori pătrați și bucușe pătrate) și modul de uniformizare a secțiunii acestora;

Teza cuprinde opt capitole, cu următorul conținut:

- **Capitolul 1. Stadiul actual în domeniul proceselor de danturare**

În acest capitol se prezintă modul în care a evoluat de-a lungul timpului, (teoretic și practic), generarea danturilor roților dințate, fiind vizate procedeele de generare, tipuri de mașini unelte folosite în acest scop, metode analitice utilizate la studiul suprafețelor în

înfășurare, forțele de așchiere și teorii privind modul de formare a așchiilor precum și soluții actuale de uniformizare a mărimii forțelor de așchiere, prin modificarea geometriei sculelor.

- **Capitolul 2. Obiectivele tezei și direcții de cercetare**

În capitolul 2 se face o enumerare a inconvenientelor actuale ale proceselor de danturare, date de solicitarea variabilă în timp a sculei așchietoare, urmare a detașării de către aceasta de așchii cu secțiuni neuniforme. De asemenea, se stabilesc obiectivele cercetării (modelări grafice ale generării prin rulare și identificarea unor legi de variație a secțiunilor așchiilor detașate pe baza cărora să se poată modifica avansul sculelor, astfel încât să se obțină o uniformizare a încărcării energetice).

- **Capitolul 3. Uniformizarea ariei așchiei detașate la danturarea cu scula-cremalieră**

Pe parcursul capitolului este prezentată o metodă de măsurare a așchiilor detașate la danturarea cu scula cremalieră monodinte și polidinte și apoi de uniformizare a mărimii așchiilor detașate prin modificarea mărimii avansului. Este tratată danturarea roților cilindrice cu profil evolventic într-o singură trecere și în treceri multiple precum și asperitățile de generare rezultate în urma unui avans variabil.

- **Capitolul 4. Uniformizarea ariei așchiei detașate la danturarea cu cuțitul-roată**

În capitolul 4 este abordată danturarea profilelor evolventice folosind cuțitul-roată și este identificat modul de variație a secțiunii așchiilor detașate la danturarea roților dințate cu această sculă așchietoare.

- **Capitolul 5. Uniformizarea ariei așchiei detașate la prelucrarea melcilor evolventici cu cuțite rotative**

Acest capitol cuprinde rezultatele cercetării privind evoluția secțiunii așchiilor măsurate, simulând în CATIA prelucrarea cu ajutorul cuțitelor rotative a melcilor evolventici și posibilitatea modificării avansului pentru uniformizarea lor.

- **Capitolul 6. Uniformizarea ariei așchiei detașate la prelucrarea suprafețelor cu profil neevolventic – analizează cazul generării cu cuțitul roată a unui alezaj pătrat și a unui arbore cu același profil.**

- **Capitolul 7. Concept privind modificarea lanțului cinematic de avans a mașinilor unelte de danturat, în vederea asigurării unei variații minime a așchiei detașate**

În capitolul 7 se prezintă modul în care se poate modifica o mașină unealtă care prelucrează prin mortezare, astfel încât avansul de prelucrare să poată fi controlat, obținându-se așchii de mărimi stabilite de operator. Capitolul cuprinde și descrierea construcției și modului de operare a unui stand realizat pentru a demonstra acest lucru.

- **Capitolul 8. Concluzii finale și contribuții originale**

În capitolul final sunt evidențiate concluziile privind prelucrarea cu avans variabil a pieselor cu simetrie rotațională, prin metoda rulării și noi direcții de cercetare rezultate în urma demonstrării posibilității de a se identifica, folosind programe de simulare grafică și softuri matematice, a legii de distribuție a secțiunii așchiilor pe timpul prelucrării.

- La finalul lucrării sunt enumerate referințele bibliografice și lista lucrărilor publicate în perioada studiilor doctorale.

1. Stadiul actual în domeniul proceselor de danturare

Capitolul de față prezintă o analiză, pe baza informațiilor existente în literatura științifică de specialitate, a stadiului actual în ceea ce privește metoda de generare a danturilor roților dințate de uz industrial, atât din punct de vedere teoretic (analitic), cât și din punct de vedere practic (tehnologic). În acest scop, au fost inventariate:

- procedeele de generare pe baza cărora operează mașinile-unelte de danturat;
- tipurile de astfel de mașini existente în industria prelucrătoare de specialitate;
- condițiile cinematice ale înfășurării suprafețelor;
- metodele analitice utilizabile la studiul suprafețelor în înfășurare;
- modelarea schemelor de așchiere la generarea danturilor evolventice prin rulare;
- aspecte referitoare la energetica procesului de formare și detașare a așchiei, cu referire directă la forțele de așchiere;
- soluții propuse pentru uniformizarea mărimii forței de așchiere pe parcursul prelucrării danturilor evolventice.

1.1. Introducere

Angrenajele sunt cunoscute de multe secole, construcția lor fiind perfecționată și studiată continuu.

Încă din antichitate se fac referiri la roți dințate - Aristotel (sec. 4 î.e.n), și mai apoi Heron din Alexandria descriu pompe de apă și mecanisme militare ce conțin roți persane - [3] [4] [5] [6] [7], acționate de animale sau oameni.

De asemenea, s-au creat mecanisme necesare îmbunătățirii vieții de zi cu zi (mecanisme de irigație, mori acționate de vânt sau de apă) dar și mecanisme deosebit de complexe necesare orientării sau calculului timpului.

Prelucrarea materialelor prin așchiere a rămas, a fost și a rămas chiar și în condițiile dezvoltării tehnice actuale una dintre metodele cele mai răspândite de obținere a pieselor utilizate în industrie și nu numai.

Prelucrarea prin așchiere se realizează pe mașini specializate, care utilizează scule și execută mișcări specifice fiecărei operații (strunjire, rabotare, mortezare, găurire etc.).

1.2. Procesul de formare a așchiei la generarea suprafețelor

1.2.1. Fundamente teoretice

În procesul de prelucrare prin așchiere, desprinderea așchiei are loc urmare a acțiunii forței aplicate de scula așchietoare asupra materialului.

În Fig. 1.1 este prezentat modelul formării așchiilor continue dezvoltat de Ernst și Merchant [8]. Aceștia consideră că în zona de forfecare (zona de deformare primară), distribuția forțelor este rezultatul descompunerii forței aplicate prin intermediul sculei așchietoare asupra materialului.

Notațiile din Fig. 1.1:

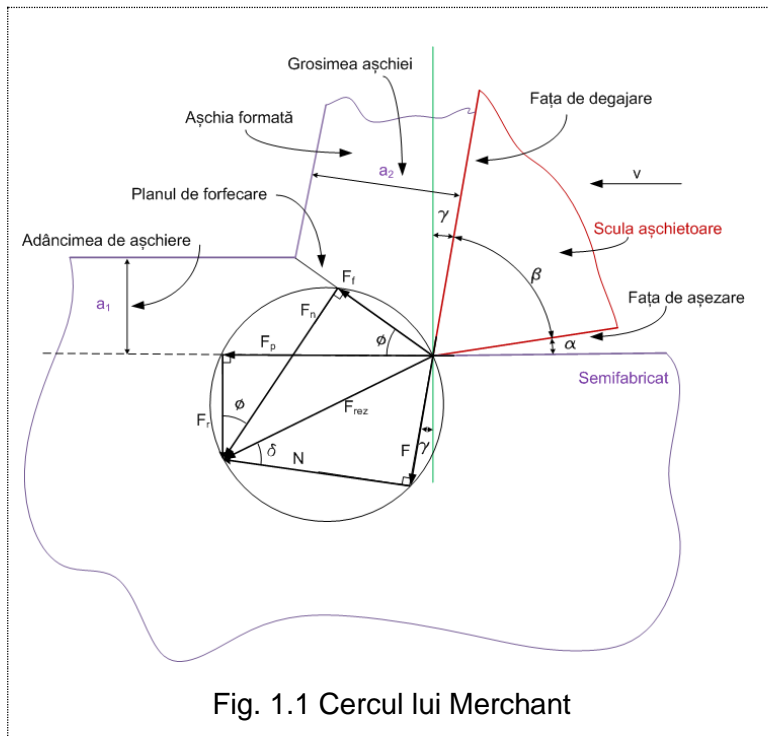


Fig. 1.1 Cercul lui Merchant

- F_p – Forța de așchiere principală;
- F_r – Forța tangențială;
- F_{rez} – Forța rezultantă;
- F_n – Forța normală;
- N – Normala la fața de degajare;
- F – Forța de frecare;
- F_f – Forța de forfecare în planul de forfecare;
- δ – Unghiul de frecare;
- α – Unghiul de așezare al sculei așchietoare;
- γ – Unghiul de degajare al sculei așchietoare;
- a_1 – Adâncimea de așchiere;
- a_2 – Grosimea așchiei

$$\overline{F_{rez}} = \overline{F_p} + \overline{F_r} = \overline{F} + \overline{N} \quad (1.1)$$

Energia consumată în timpul prelucrării (W_m) este produsul între viteza relativă a sculei față de semifabricat și forța de tăiere F_p . [8],

$$W_m = v \cdot F_p \quad (1.2)$$

Dacă se consideră că forța de așchiere este uniform distribuită pe secțiunea așchiei, se poate scrie relația:

$$W_m = v \cdot p \cdot A_c \quad (1.3)$$

Care arată că există o dependență directă a energiei consumate, de suprafața pe care presează cuțitul sculei așchietoare, în timpul detașării așchiei [9], [10], [11], [12].

1.2.2. Modelarea mărimii forțelor de așchiere

Modelarea forțelor de tăiere este necesară pentru a prezice forțele necesare prelucrării, vibrațiile care pot apare, calitatea suprafeței și stabilitatea proceselor, proiectarea și realizarea designului sculelor așchietoare precum și materialelor din care acestea se construiesc [6].

Spre deosebire de prelucrarea suprafețelor netede (plane sau circulare), generarea prin rulare a pieselor cu simetrie rotațională (roți dințate, suprafețe canelate, roți de lanț etc.), folosind scule-cremalieră, cuțite roată sau scule melc, conduce la formarea de așchii cu secțiune variabilă, funcție de poziția relativă a sculei față de semifabricat. Acest fapt are drept

consecință solicitări mecanice și energetice variabile, atât ale sculelor așchietoare, cât și a elementelor lanțurilor cinematice de prelucrare și energiei cerute de la mașina de lucru.

În ultimii ani s-au căutat soluții pentru a se uniformiza mărimea secțiunii așchiei, prin modificarea schemelor de așchiere, astfel încât forțele principale de așchiere să varieze cât mai puțin [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19].

Uniformizarea secțiunii așchiilor, la prelucrarea prin rulare se poate face prin două căi:

- Modificarea constructivă a sculelor așchietoare, astfel încât, în timpul procesului, prin forma tăișului acestora să se obțină așchii a căror secțiune este dependentă de poziția sculei față de semifabricat (respectându-se condiția de rulare);
- Modificarea avansului sculei așchietoare, după un algoritm care să se bazeze pe legea de variație a secțiunii așchiei

Datorită faptului că avansul sculei, la prelucrarea prin rulare este controlat mecanic, prin elemente ale lanțului cinematic de rulare, făcându-se în pași discreți, cu o mărime prestabilită, încercările de uniformizare a mărimii secțiunii așchiilor s-au făcut cel mai adesea prin modificarea constructivă a sculelor [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19].

1.2.3. Soluții de micșorare a variației forțelor de așchiere la danturare

În literatura de specialitate se găsesc puține referiri la soluții utilizabile pentru uniformizarea mărimii forțelor de așchiere. Principala soluție care poate fi menționată este modificarea geometriei sculei așchietoare utilizate [14] [13] [19] [18] [20]

Generarea prin înfășurare a pieselor cu simetrie rotațională se face în general cu scule așchietoare având forme relativ simple, dar solicitările mecanice la care acestea sunt supuse în timpul obținerii unui gol variază între limite largi. Avansul în pași constanți ai sculelor face ca secțiunea așchiilor detașate și implicit solicitările la care cuțitul și mașina să fie variabile funcție de poziția cuțitului.

În urma modelării așchiei detașate utilizând scule cu geometrie modificată, s-a constatat o diminuare a neuniformității mărimii așchiei în timpul formării unui gol.

Au fost concepuți algoritmi de modelare a simulării formării așchiei la danturare, în diferite condiții [17]:

- **Modificarea înălțimii dinților succesivi ai sculei cremalieră (Fig. 1.2);**

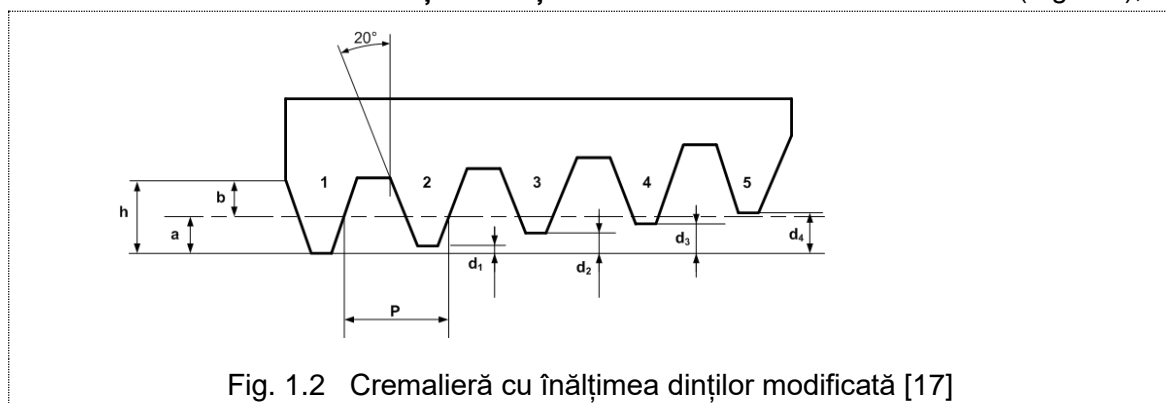


Fig. 1.2 Cremalieră cu înălțimea dinților modificată [17]

- **Modificarea grosimii dinților cremalierii generatoare (fără modificarea pasului acesteia, astfel ca profilul evolventic să rămână nemodificat).**

- **Modificarea unghiului de înclinare a flancurilor cremalierii generatoare**, de la 20°, la 15°, cu condiția menținerii neschimbate a razei de bază a evolventei - cu modificarea razei de rulare a semifabricatului (1.4), rezultatul fiind o variație a secțiunii așchiilor detașate.

$$R_r' = R_r \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha'} \quad (1.4)$$

Simularea în Autocad a danturării cu scula cremalieră modificată, având unghiul de presiune redus de la 20° la 15°, arată o reducere a mărimii maxime a așchiei, obținute în aceleași condiții de prelucrare (aceleași număr de curse duble pentru realizarea unui gol de dinte).

- **Modificarea poziției dinților așchietori, față de dreapta de divizare a cremalierii standard.** Dinții sculei au forma și dimensiunile cremalierii standard, se păstrează pasul de divizare, dar sunt poziționați diferit față de dreapta de divizare.

1.3. Concluzii

În urma analizei stadiului actual al proceselor de danturare, în ceea ce privește metoda de generare a danturilor roților dințate de uz industrial și aspectele energetice conexe, se pot contura următoarele concluzii:

- utilizarea pe scară extrem de largă a transmisiilor prin roți dințate determină un interes pe măsură al cercetătorilor, referitor la procesul de fabricație al roților dințate - inclusiv la procedeele de generare utilizate și modelarea acestora;
- principala metodă de generare aplicată în practică, în cazul danturării roților cilindrice evolventice, este rularea, utilizând scule de tip cremalieră, cuțit-roată sau freză melc-modul;
- au fost dezvoltate metode, atât analitice cât și numerice, cu ajutorul cărora se poate modela, relativ ușor, forma suprafeței dintelui generat;
- la toate procedeele utilizate pentru danturare, aria așchiei detașate prezintă variații semnificative pe parcursul procesului de prelucrare;
- există o evidentă relație de cvasi-proportionalitate între aria așchiei detașate și mărimea forței de așchiere necesară în acest scop;
- variația forței de așchiere pe durata procesului de danturare, care atrage, implicit, o variație a puterii absorbite de motorul / motoarele de acționare al / ale mașinii utilizate determină o scădere a randamentului energetic de funcționare al acesteia;
- există un număr mare de modele, ce utilizează cele mai variate tehnici de modelare, pentru predicția mărimii forțelor de așchiere, aplicabile inclusiv în cazul proceselor de danturare;
- există un număr limitat de cercetări urmărind uniformizarea forțelor de așchiere pe parcursul procesului de danturare;
- principala soluție existentă, propusă pentru uniformizarea din punct de vedere energetic a procesului de danturare este modificarea geometriei active sau a construcției sculelor de danturare utilizate - spre exemplu, realizarea sculelor-melc din segmente decalate unghiular (Klingelberg), utilizarea de scule cu dinți implantați (Fredarom) sau utilizarea unor scule reconfigurabile, care permit crearea unei geometrii specifice în funcție de numărul de dinți ai danturii prelucrate.

2. Obiectivele tezei și direcții de cercetare

Pe baza concluziilor prezentate la sfârșitul capitolului precedent, se pot evidenția o serie de **neajunsuri** privitoare la modul de desfășurare a proceselor de danturare, în practicile actuale de fabricație, după cum urmează:

- procesul de danturare prin înfășurare, cu scule specifice (de tip cremalieră, cuțit-roată, freză-melc modul) este un proces cu încărcare energetică neuniformă;
- soluția cel mai frecvent utilizată în prezent pentru reducerea riscului de instabilizare datorat variației inerente a ariei așchii detașate în procesul mai sus-menționat constă în reducerea mărimii avansului în mișcarea de rulare, fapt care are drept consecință diminuarea productivității;
- variația forței de așchiere pe durata procesului de danturare, care atrage, implicit, o variație a puterii absorbite de motorul / motoarele de acționare al / ale mașinii utilizate determină o scădere a randamentului energetic de funcționare al acesteia.

Premisele de la care pornesc cercetările și soluțiile oferite în lucrarea de față sunt:

- aplicarea metodelor clasice de modelare a procesului de așchiere pentru găsirea legii de variație a ariei așchii detașate la danturare, deși simplă ca principiu, este anevoioasă din punct de vedere al volumului de calcul numeric pe care îl implică, chiar și în cazul utilizării calculatoarelor performante din ziua de azi;
- modelele pentru predicția mărimii forțelor de așchiere existente în prezent abordează cazuri particulare de procese, se referă la valori instantanee, medii sau maxime ale forțelor și nu oferă, în mod direct, legi de variație ale acestora pe parcursul derulării procesului;
- soluțiile existente pentru uniformizarea procesului de danturare din punct de vedere energetic au ca dezavantaj comun necesitatea unor scule speciale, care nu pot fi eficiente din punct de vedere al uniformizării ariei așchii detașate decât pentru un anumit tip de dantură prelucrată;
- pe piața produselor informatice au apărut o multitudine de programe (spre exemplu - CATIA) care permit modelarea grafică a proceselor de prelucrare și pot facilita, astfel, studiul formei și ariei așchii detașate, cu mare acuratețe;
- mașinile-unelte de ultimă generație sunt dotate cu sisteme de comandă numerică ce permit reglarea regimului de așchiere (viteză, avans) în timp real, pe parcursul derulării ciclului de lucru, conform unei legi comunicate de către operator [36] [37] [38] [39].

Direcții de cercetare

Ținând cont de neajunsurile, dar și de premisele enumerate mai sus, s-au conturat următoarele direcții pentru cercetările din cadrul tezei:

- dezvoltarea unei metodologii pentru determinarea formei așchii detașate, a ariei acesteia și a legii după care aria variază pe parcursul procesului de danturare, pe baza modelării grafice a procesului, utilizând softul CATIA în acest scop;
- dezvoltarea unui algoritm și, pe baza acestuia, a unei aplicații MatLab care, pornind de la legea de variație a ariei așchii detașate, să permită deducerea legii de variație a avansului în mișcarea de rulare, astfel încât aria așchii detașate să se situeze în interiorul unui interval de variație impus, procesul de danturare putând astfel asimilat unuia cvasi-uniform din punct de vedere energetic;
- conceperea unei soluții tehnice universal-valabile, care să permită implementarea metodei de uniformizare a ariei așchii detașate pe toate tipurile de mașini de danturat existente, cu impact minim asupra structurii clasice a acestora;
- validarea soluției tehnice propuse prin simularea aplicării acesteia cu ajutorul unui stand experimental conceput și realizat practic, în acest scop.

Obiective concrete ale cercetării

Concretizarea rezultatelor cercetărilor întreprinse pe direcțiile definite mai sus se intenționează a fi obținută prin îndeplinirea următoarelor obiective:

- modelarea grafică a generării danturii evolventice cu o sculă de tip cremalieră-monodinte, dintr-o singură trecere și determinarea, în acest caz, a legii de variație a ariei așchii detașate și a legii de variație a avansului mișcării de rulare pentru care variația ariei așchii este controlată într-un interval impus apriori;
- modelarea grafică a generării danturii evolventice cu o sculă de tip cremalieră-monodinte, cu treceri multiple și determinarea, în acest caz, a legii de variație a ariei așchii detașate și a legii de variație a avansului mișcării de rulare pentru care variația ariei așchii este controlată într-un interval impus apriori;
- modelarea grafică și evaluarea asperității geometrice a flancului danturii generate cu cremaliera-monodinte;
- modelarea grafică a generării danturii evolventice cu o sculă de tip cremalieră-multidinte și determinarea, în acest caz, a legii de variație a ariei așchii detașate și a legii de variație a avansului mișcării de rulare pentru care variația ariei așchii este controlată într-un interval impus apriori;
- modelarea grafică a generării danturii evolventice cu o sculă de tip cuțit-roată și determinarea, în acest caz, a legii de variație a ariei așchii detașate și a legii de variație a avansului mișcării de rulare pentru care variația ariei așchii este controlată într-un interval impus apriori;

- modelarea grafică a generării melcilor evolventici cu scule de tip cuțit rotativ și determinarea, în acest caz, a legii de variație a ariei așchii detașate și a legii de variație a avansului mișcării de rulare pentru care variația ariei așchii este controlată într-un interval impus apriori;
- modelarea grafică a generării suprafețelor neevolventice interioare și exterioare și determinarea, în ambele cazuri, a legii de variație a ariei așchii detașate și a legii de variație a avansului mișcării de rulare pentru care variația ariei așchii este controlată într-un interval impus apriori;
- conceperea și execuția unui stand experimental care să materializeze soluția tehnică de implementare a metodei de uniformizare a ariei așchii detașate la danturare prin metoda rulării;
- validarea soluției tehnice propuse, cu ajutorul standului experimental, prin simularea aplicării metodei de uniformizare a ariei așchii detașate în cazul în care legea de variație a ariei așchii detașate (înainte de aplicarea metodei) este cunoscută.

3. Uniformizarea ariei așchii detașate la danturarea cu scula-cremalieră

În cadrul acestui capitol este prezentată o metodă originală, rezultat al cercetărilor prezentate în teza de față, care urmărește uniformizarea ariei așchii detașate în procesul de generare a danturilor evolventice prin procedeul rulării, cu ajutorul unei scule-cremalieră. Astfel, metoda presupune parcurgerea următorilor pași:

- modelarea grafică (în CATIA) a generării danturii prin procedeul considerat și cu un anumit tip de sculă;
- determinarea legii de variație a ariei așchii detașate, pe parcursul unui ciclu al procesului de prelucrare;
- determinarea unei legi de variație a vitezei mișcării de avans de rulare care, în cazul impunerii în lanțul cinematic de rulare al mașinii, să conducă la menținerea valorii ariei așchii detașate în cadrul unui interval controlat, prestabilit; dacă intervalul impus este suficient de îngust, se poate considera că valoarea ariei așchii detașate este cvasi-constantă, ceea ce conduce la optimizarea energetică a procesului de așchiere.

Pentru o mai ușoară înțelegere, aplicarea metodei este prezentată în mai multe cazuri, a căror complexitate crește gradual: prelucrarea danturii cu sculă-cremalieră monodinte, dintr-o singură trecere; prelucrarea danturii cu sculă-cremalieră monodinte, cu treceri multiple; prelucrarea danturii cu sculă-cremalieră multidinte.

Ținând cont de potențialul impact negativ al variației vitezei mișcării de rulare asupra calității suprafeței generate, s-a efectuat și o modelare grafică a asperității geometrice pentru această suprafață, în vederea măsurării acesteia.

3.1. Introducere

Este cunoscut faptul că procesul de danturare cu aceste tipuri de scule se desfășoară cu importante neuniformități ale mărimii ariei așchii detașate de dinții sculei generatoare, din cauza principiului discontinuu al generării și particularităților lucrului pe mașinile unelte specifice (existența unei curse în gol pentru re poziționarea sculei în vederea realizării mișcării principale de așchiere și, totodată, a procesului de rulare, care se desfășoară discret.

Aceasta face ca procesul generării să se desfășoare cu mari diferențe ale mărimii forțelor de așchiere între secvențele succesive ale procesului de re poziționare ale sculei față de semifabricat înaintea curselor active ale sculei (cuțit pieptene, cuțit roată).

Soluțiile aplicate în prezent pentru ameliorarea acestor neuniformități în desfășurarea proceselor de danturare au fost orientate în principal spre modificarea constructivă a sculelor așchietoare specifice: cuțitul pieptene, cuțitul roată, cuțitul rotativ pentru generarea melcilor elicoidali, scula melc.

S-au realizat scule cu geometrii reconfigurabile care permit, prin treceri succesive, modificări de substanță a mărimii ariei așchii detașate și de aici, a mărimii forței de așchiere, în timpul unei curse relative sculă-semifabricat [25] [18] [20] [19]; în scopul reducerii neuniformității desfășurării procesului de generare.

În prezenta teză, se prezintă o analiză dezvoltată în mediul grafic CATIA a formei și mărimii ariei așchii detașate de dinții succesivi ai sculei (cuțit pieptene, cuțit roată) în procesul de rulare a celor două centroide asociate (conjugate) a sculei și semifabricatului prelucrat.

3.2. Prelucrarea danturii evolventice cu o sculă de tip cremaliera monodinte, dintr-o singură trecere

În cele ce urmează, se prezintă o analiză a formei și mărimii așchiilor detașate, în plane perpendiculare pe axa semifabricatului prelucrat, utilizând facilitățile mediului de proiectare grafică CATIA, pentru cazul sculei monodinte (cremalieră monodinte).

Facem observația că incrementului de rotație al modelului semifabricatului, $\Delta\varphi$ îi corespunde o translație a modelului sculei cremalieră:

$$\Delta\lambda = R_r \cdot \Delta\varphi \quad (3.1)$$

Ca urmare, cinematica desfășurării procesului de generare pe o mașină unealtă de tip MAAG trebuie modificată prin utilizarea în lanțul cinematic a unui motor pas cu pas, controlat numeric, în scopul obținerii unei mișcări de rulare (3.1) variabilă, cu respectarea condiției de rulare acelor două centroide C_1 și C_2 , vezi Fig. 3.1.

3.2.1. Modelarea în CATIA a procesului de generare a unui gol de dinte

Forma și mărimea așchii detașate la fiecare cursă activă a sculei cremalieră pot fi determinate printr-o simulare a procesului de mortezare, în mediul grafic CATIA.

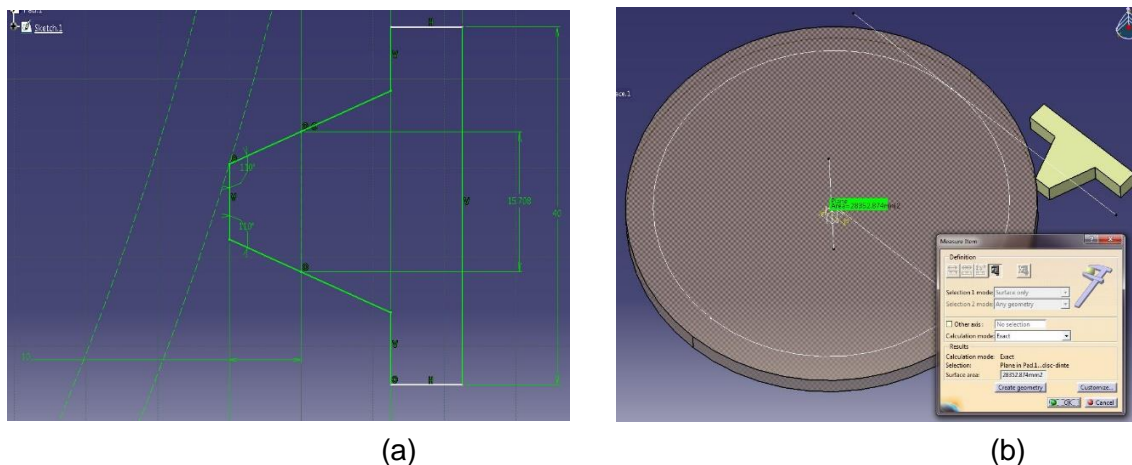


Fig. 3.1 Profilul sculei generatoare (cremalieră monodinte) - (a) și poziționarea inițială a sculei față de semifabricat - (b) [44]

Pentru aceasta, într-o primă etapă, în fișiere separate sunt create două modele: modelul sculei cremalieră monodinte, element activ și modelul semifabricatului din care, prin îndepărtări succesive de material, se va obține roata dințată.

Măsurarea ariei așchii detașate

Pentru măsurarea ariei așchiilor detașate, modelul sculă monodinte se importă în fișierul care conține modelul piesă.

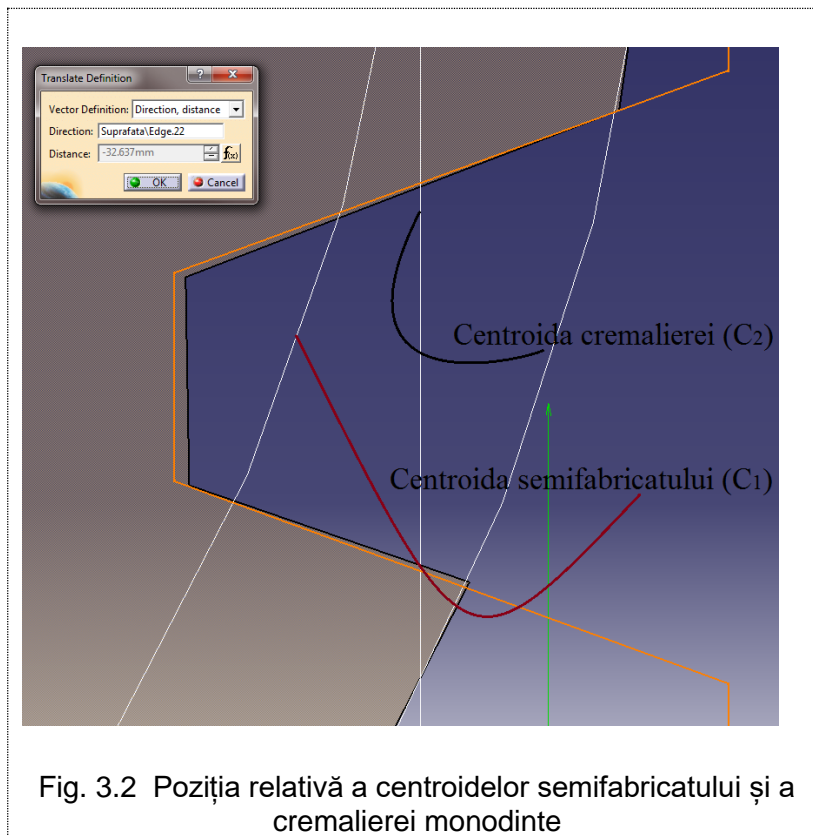


Fig. 3.2 Poziția relativă a centroidelor semifabricatului și a cremalierii monodinte

Simularea procesului de danturare prin mortezare se face prin rotirea semifabricatului cu unghiul $\Delta\varphi$, deplasarea în lungul centrului C_2 a sculei monodinte pe distanța $\lambda=R_{rb}\cdot\Delta\varphi$ și suprapunerea celor două corpuri. Prin aplicarea opțiunii *Remove* a instrumentului de modelare *Operation*, se extrage un corp din altul, rezultatul fiind un singur corp, din care este îndepărtată partea comună.

Mărimea așchii se determină ca diferență între aria semifabricatului măsurată înaintea intersecției și cea măsurată după intersecție, folosindu-

se instrumentul *Measure Item*, din bara de instrumente *Measure*.

3.2.2. Algoritm pentru găsirea legii de variație a așchii detașate

Scopul cercetării prezentate în continuare, vizează găsirea unei legi de variație a ariei așchii detașate în cazul prelucrării standard a unui gol de dinte (deplasarea și rotirea semifabricatului se face în pași discreți și de valoare egală, respectând condiția de rulare, pe toată perioada prelucrării), caz în care puterea cerută este variabilă.

3.2.3. Legea de variație a ariei așchii detașate, pentru prelucrarea danturii cu pași constanți

Pentru a se identifica o lege de variație a mărimii așchii, s-au efectuat măsurători ale secțiunilor de semifabricat (A_c), îndepărtate la fiecare cursă dublă simulată soft, constând în măsurarea în CATIA a diferențelor între aria modelului semifabricatului (A_n) înainte de intersectarea acestuia cu modelul sculei monodinte și aria acestuia după intersectare.

Un prim set de măsurători se vor efectua pentru prelucrarea unei roți dințate cu profil evolventic având următorii parametri: modul $m=10$ mm și număr de dinți $z=60$ (vezi Fig. 3.3).

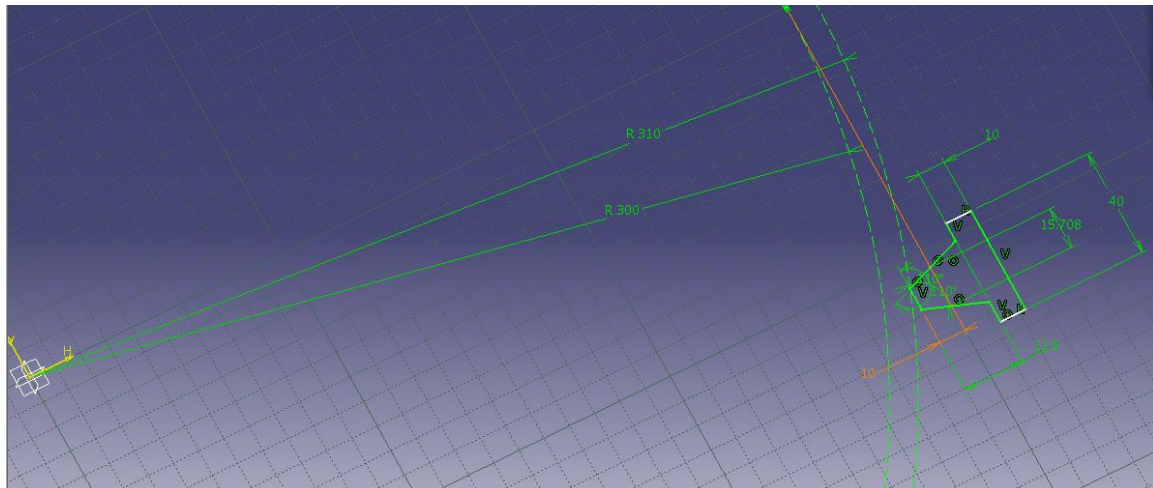


Fig. 3.3 Modelarea generării unei roți dințate [44]

Datele rezultate în urma măsurătorilor se regăsesc în Tabelul 3.1.

Tabelul 3.1 – Determinarea ariei așchii detașate la prelucrarea unui gol de dinte a unei roți dințate având $z=60$ dinți și modul $m=10$ mm

Nr. crt.	Deplasare unghiulara (°)	Pasul unghiular (°)	Deplasare liniară (mm)	Pasul pe cursa dubla $\Delta\lambda$ (mm)	A_n Aria inițială (mm ²)	A_{n+1} Aria finala (mm ²)	$A_c=A_n-A_{n+1}$ Aria așchii detașate (mm ²)
0	0	0	0	0	301907.054	301907.054	0.000
1	0.394	0.394	2.063	2.063	301907.054	301906.131	0.923
2	0.694	0.3	3.634	1.571	301906.131	301904.211	1.920
3	0.994	0.3	5.205	1.571	301904.211	301901.264	2.947
4	1.294	0.3	6.775	1.571	301901.264	301897.316	3.948
5	1.594	0.3	8.346	1.571	301897.316	301892.384	4.932

.....

90	27.094	0.3	141.864	1.571	301585.452	301585.419	0.033
91	27.394	0.3	143.435	1.571	301585.419	301585.398	0.021
92	27.694	0.3	145.006	1.571	301585.398	301585.385	0.013
93	27.994	0.3	146.577	1.571	301585.385	301585.378	0.007
94	28.294	0.3	148.147	1.571	301585.378	301585.375	0.003
95	28.594	0.3	149.718	1.571	301585.375	301585.375	0.000

Reprezentarea grafică a rezultatelor arată o variație în limite largi a ariei așchiilor detașate, funcție de poziția sculei așchietoare.

Golul de dinte, pentru situația prezentată se realizează în 95 de curse duble, aria așchii variind între 0,003 mm² și 6,412 mm² (Fig. 3.4), necesarul de putere și solicitările mașinii și sculei fiind proporționale cu aceasta.

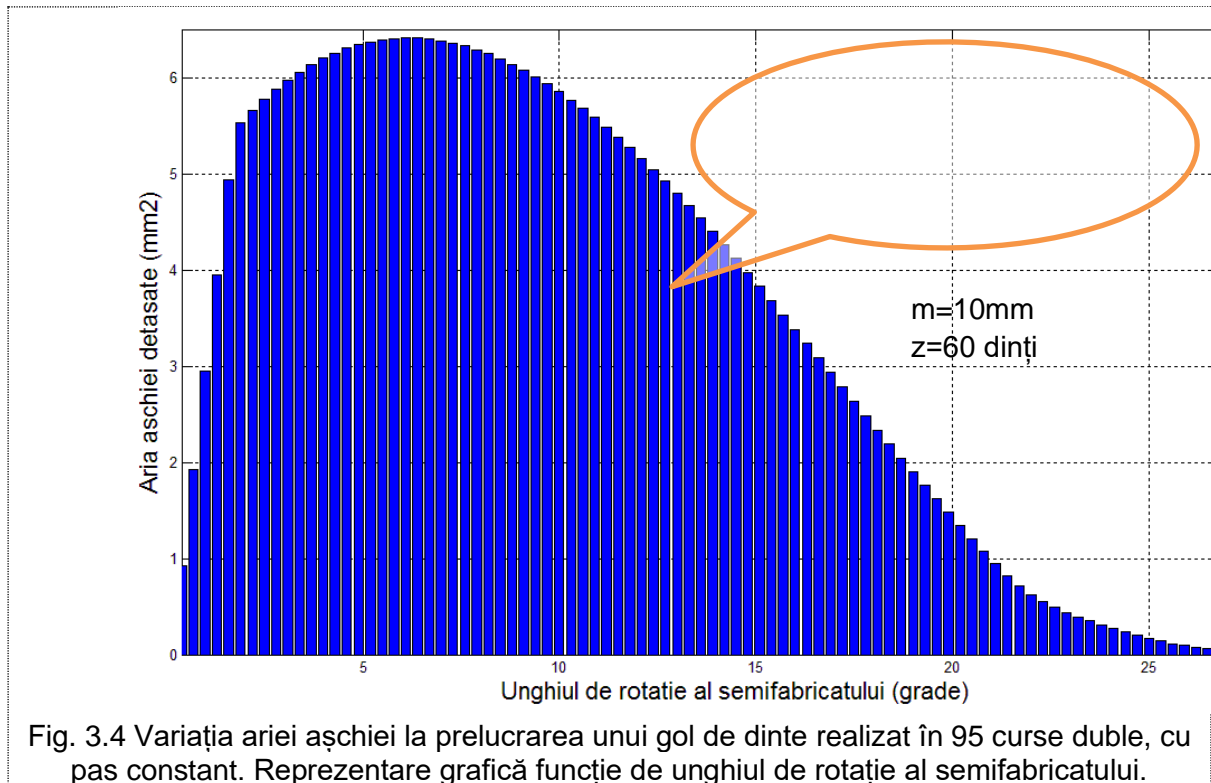


Fig. 3.4 Variația ariei așchiei la prelucrarea unui gol de dinte realizat în 95 curse duble, cu pas constant. Reprezentare grafică funcție de unghiul de rotație al semifabricatului.

Pentru a se găsi o expresie analitică a legii de variație a secțiunii așchiei într-un ciclu de așchiere, rezultatele se prelucrează utilizând un soft de prelucrare a datelor, urmând a se identifica o funcție care aproximează aceste variații.

În Fig. 3.5, se prezintă rezultatul aproximării obținute dacă se utilizează funcția Curve Fitting Toolbox din MatLab și se alege o funcție polinomială de gradul 9:

$$A(\varphi) = p_1 \cdot \varphi^9 + p_2 \cdot \varphi^8 + \dots + p_9 \cdot \varphi + p_{10}, \quad (3.2)$$

$$\text{unde: } p_1 = 2.997 \cdot 10^{-10};$$

$$p_2 = -4.473 \cdot 10^{-8};$$

$$p_3 = 2.87 \cdot 10^{-6};$$

$$p_4 = -0.0001038;$$

$$p_5 = 0.002322;$$

$$p_6 = -0.03313;$$

$$p_7 = 0.2987;$$

$$p_8 = -1.659;$$

$$p_9 = 5.18;$$

$$p_{10} = -0.4928.$$

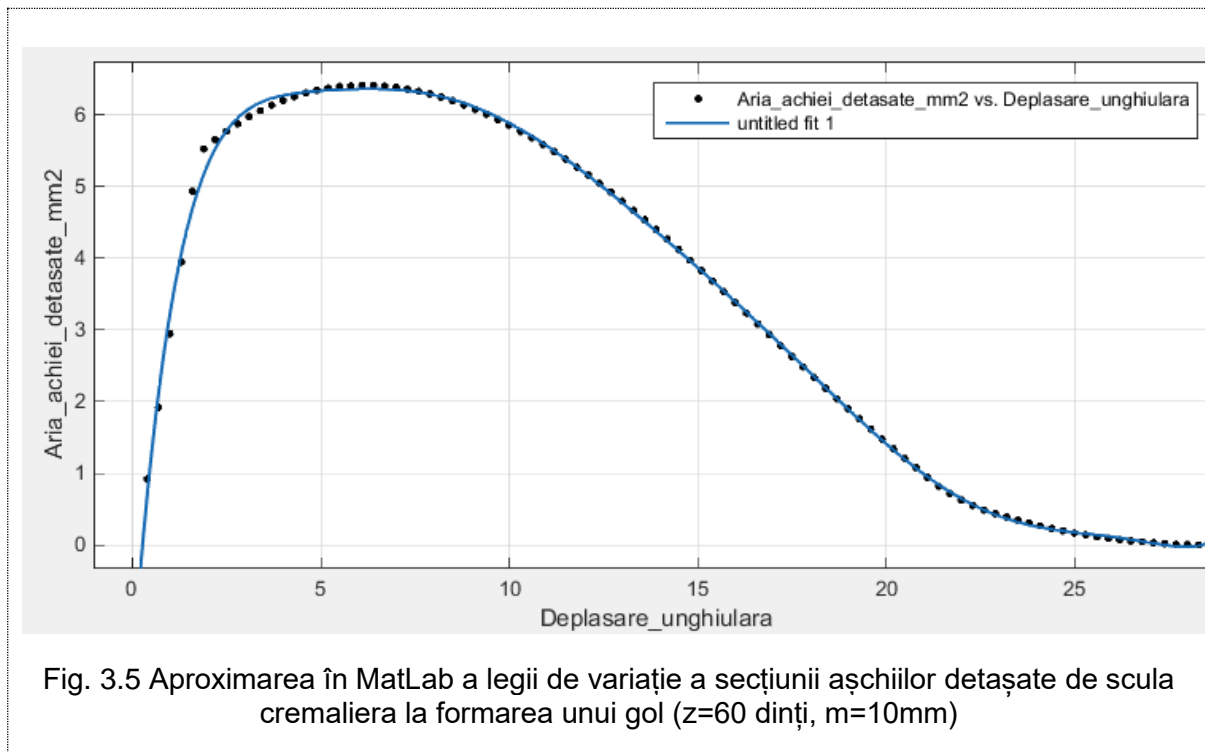


Fig. 3.5 Aproximarea în MatLab a legii de variație a secțiunii așchiilor detașate de scula cremaliera la formarea unui gol ($z=60$ dinți, $m=10\text{mm}$)

Analizând Fig. 3.4 și datele din *Tabelul 3.1*, se constată că aria totală a golului de dinte este egală cu suma secțiunilor așchiilor detașate, la fiecare cursă dublă a sculei cremalieră și este proporțională cu aria suprafeței aflate între axa Ox și graficul funcției din Fig. 3.5.

$$A_{gol} = \int_0^{\varphi^{max}} f(x) d\varphi \quad (3.3)$$

3.2.4. Legea de variație a mișcării de rulare, pentru suprafețe constante ale așchii

Dacă se consideră că poziția piesei este definită de unghiul φ , atunci între A_c și $\Delta\varphi$, se poate scrie relația:

$$A_c = \frac{\Delta\varphi}{\Delta\varphi_0} \cdot A(\varphi) \quad (3.4)$$

Cunoașterea legii de variație a secțiunii așchii, în formă analitică (3.2), permite dezvoltarea unei aplicații în MatLab, cu scopul de a găsi valori variabile pentru deplasarea unghiulară $\Delta\varphi$, corespunzător cărora așchiile detașate să poată avea arii aproximativ egale, apropiate de o valoare impusă A_{c0} .

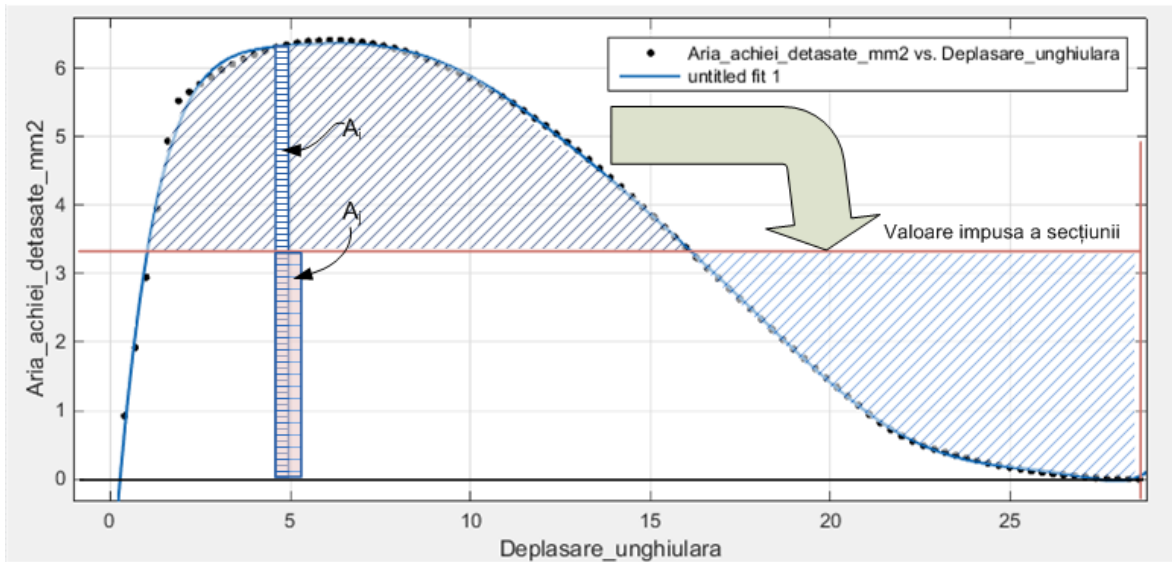


Fig. 3.6 Uniformizarea secțiunii așchiilor detașate de scula cremaliera la formarea unui gol ($z=60$ dinți, $m=10$ mm)

Legile de variație a secțiunii așchiilor detașate prin cele două moduri de prelucrare se pot vedea în Fig. 3.7 și Fig. 3.8.

Pentru validarea rezultatelor, au fost determinate mărimile necesare calculului funcțiilor de aproximare a evoluției secțiunii așchiei la formarea golului de dinte, pentru roți dințate cu modul 10 mm și $z=60$, 45 și 30 dinți.

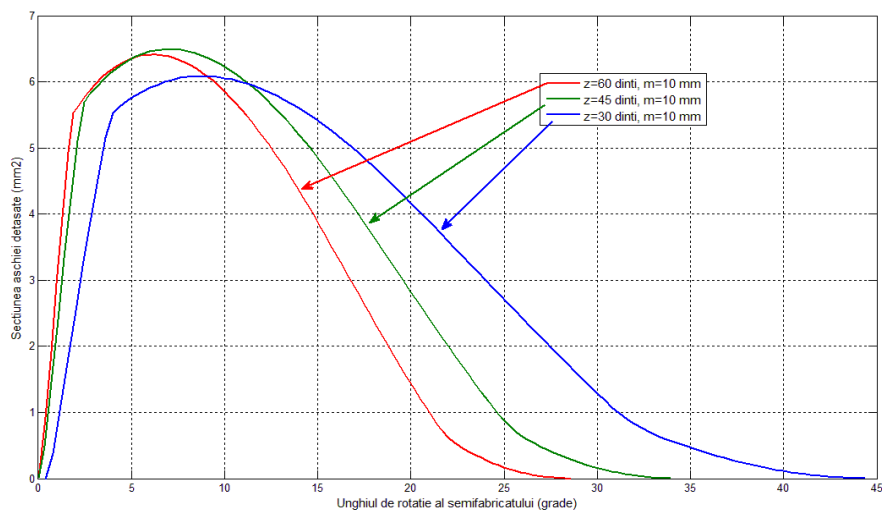


Fig. 3.7 Variația secțiunii așchiei la formarea unui gol de dinte ($z60m10$; $z30m10$; $z45m10$)

Fig. 3.8 prezintă grafic rezultatul obținut dacă se optează pentru o prelucrare cu avans variabil (unghi de rotație, respectiv deplasare liniară care îndeplinesc condiția de rulare fără alunecare), stabilind ca secțiunea așchiei să fie de 5 mm^2 (cu o eroare acceptată de 0.1 mm^2).

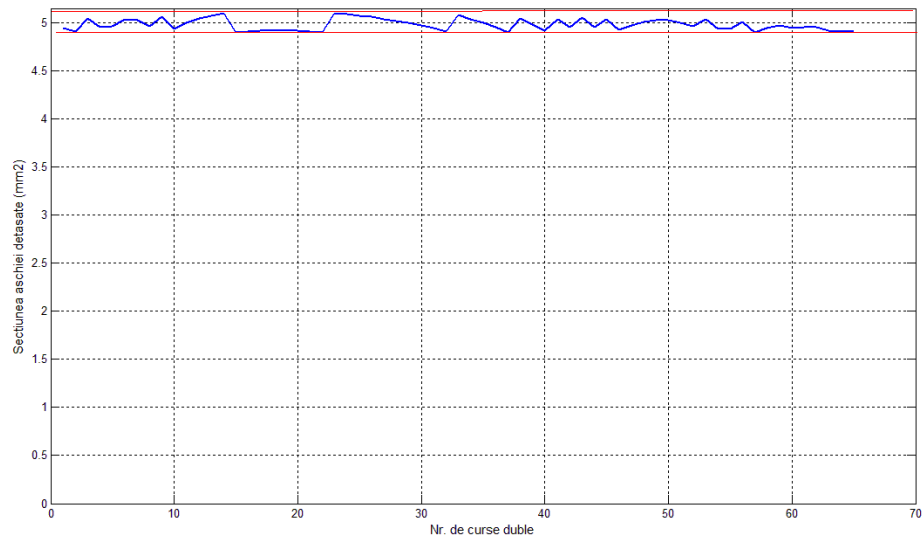


Fig. 3.8 Variația secțiunii așchii, la formarea unui gol de dinte, cu pas variabil. ($z60m10$, $A_{max}: 5mm^2$; Eroarea maximă admisă: $0.1 mm^2$). Gol format în 65 c.d.

Se poate observa că, în această situație, mașina este uniform încărcată din punct de vedere energetic, numărul de curse duble necesar formării golului fiind chiar mai mic decât la prelucrarea clasică.

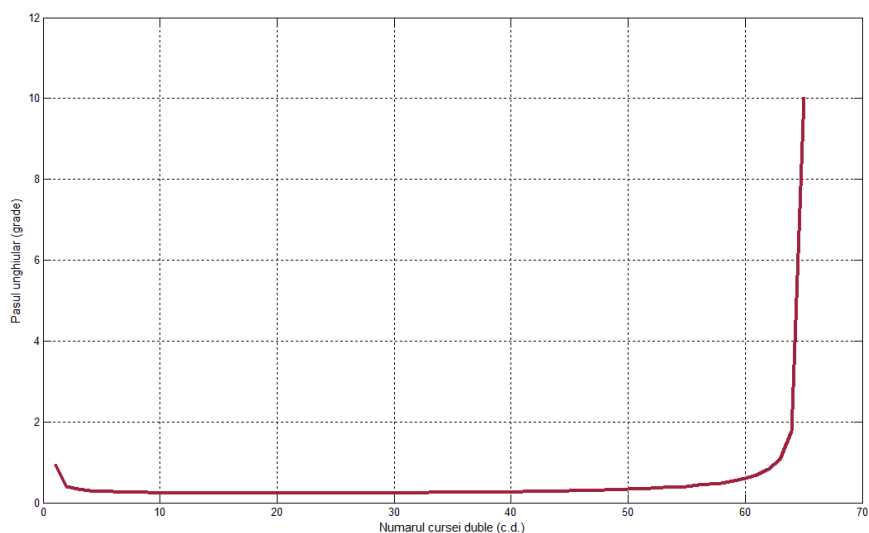


Fig. 3.9 Variația pasului unghiular, la formarea unui gol de dinte (pentru obținere așchii de secțiune totală constantă - $A_{max}: 5mm^2$; Eroarea maximă admisă: $0.1 mm^2$). Gol format în 65 c.d. ($z60m10$)

Variația pasului unghiular al semifabricatului este reprezentată în Fig. 3.9

3.3. Prelucrarea danturii evolventice cu o sculă de tip cremaliera monodinte, cu treceri multiple

În baza analizei prezentate în cap.3.2. , se propune, în cele ce urmează, o dezvoltare pentru situația în care danturarea cu scula cremalieră monodinte se desfășoară în treceri multiple, pentru diferite poziții ale sculei cremalieră în raport cu cercul de divizare a roții dințate generate.

Metoda este mai ineficientă, existând multe curse în gol, de la poziționarea semifabricatului pe masa mașinii și până la începerea efectivă a prelucrării, datorită poziționării sculei la distanță de cercul de rulare.

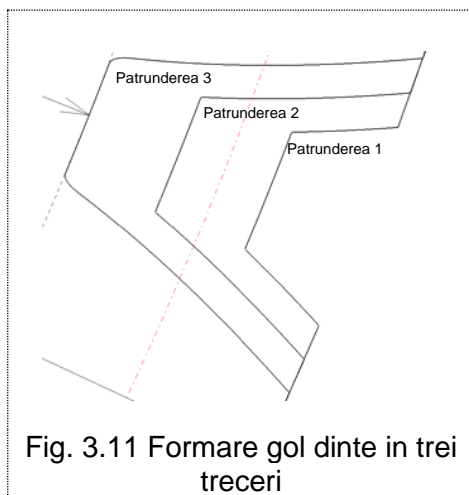


Fig. 3.11 Formare gol dinte in trei treceri

Soluția analitică a problemei, determinarea formei și ariei așchii detașate, în procesul rulării celor două centroide C_1 și C_2 , este deosebit de laborioasă.

Problema poate fi mai ușor abordată apelând la facilitățile mediului de proiectare grafică CATIA.

3.3.1. Modelarea grafică a generării unui gol de dinte în mai multe treceri

Simularea în CATIA s-a realizat pentru un gol de dinte, în trei treceri, al unei roți dințate cu modulul 10 mm și 60 dinți (Fig. 3.10).

Poziționarea inițială a sculei, spre deosebire de modelarea formării golului într-o singură pătrundere, s-a făcut la distanța de $\delta = \frac{2 \cdot m}{3}$ de linia de rulare, mișcările de generare, rămânând neschimbate.

Rezultă, astfel, un gol de dinte inițial modificat (Fig. 3.10, Fig. 3.11), care va influența mărimea așchiilor formate în timpul prelucrării.

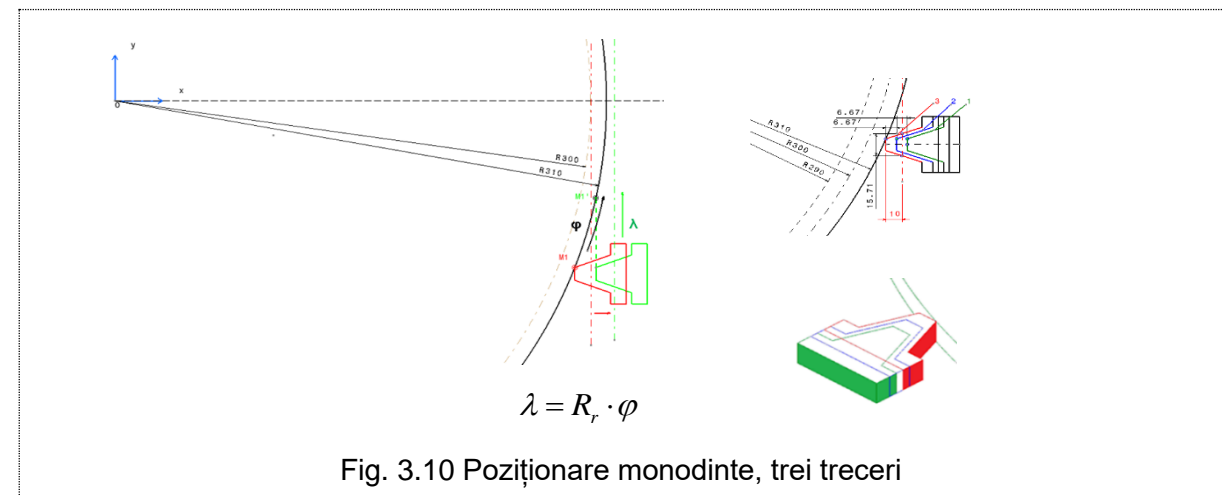


Fig. 3.10 Poziționare monodinte, trei treceri

Variația mărimii secțiunii așchiilor detașate în aceste cazuri se poate vedea în figura de mai jos (Fig. 3.12).

Analizând valorile măsurate și graficele se constată că primele curse duble sunt executate de mașină în gol, cuțitul neatingând semifabricatul.

O acționare controlată independent de mișcarea sculei (care, la o mașină clasică dă impulsurile pentru deplasarea mesei) ar putea reduce semnificativ numărul de curse duble necesare formării golului.

Funcția de aproximare a ariei așchilor generate la prima trecere este prezentată în Fig. 3.14.

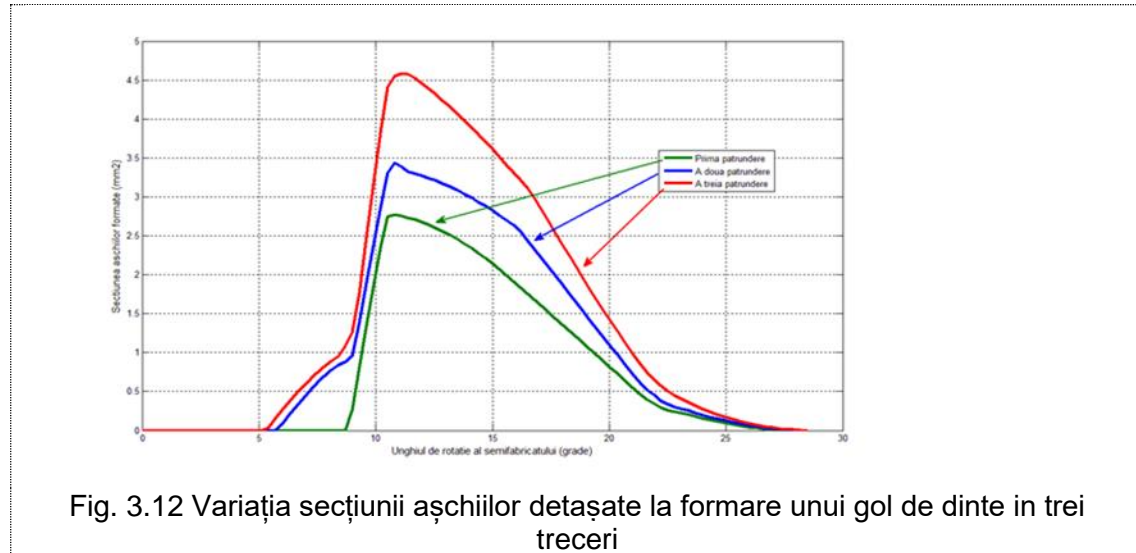


Fig. 3.12 Variația secțiunii așchilor detașate la formarea unui gol de dinte în trei treceri

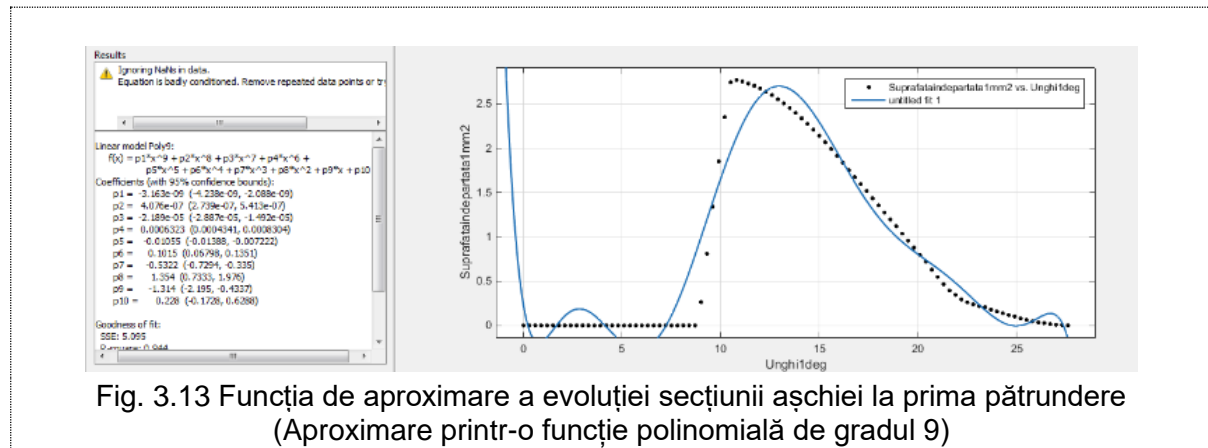


Fig. 3.13 Funcția de aproximare a evoluției secțiunii așchii la prima pătrundere (Aproximare printr-o funcție polinomială de gradul 9)

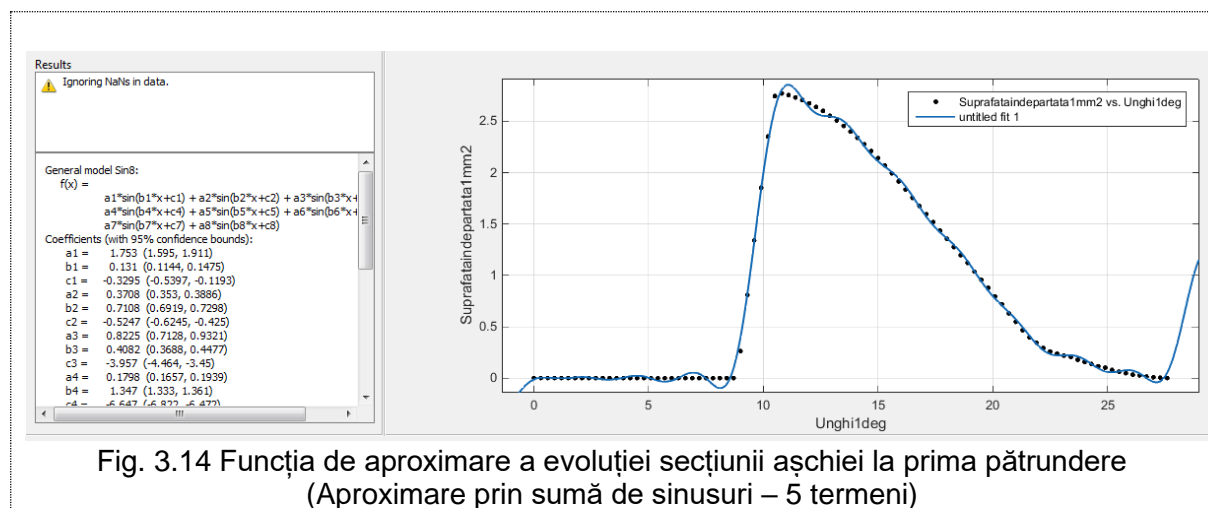


Fig. 3.14 Funcția de aproximare a evoluției secțiunii așchii la prima pătrundere (Aproximare prin sumă de sinusuri – 5 termeni)

Rezultatele obținute rulând programul de uniformizare, în care s-a impus ca valoare maximă a ariei așchiilor 2.5 mm^2 sunt prezentate în *Tabelul 3.2*

Tabelul 3.2 – Valorile unghiului de rotație al semifabricatului și secțiunea așchiilor detașate folosind avans variabil și aria maximă 2.5 mm^2 – Trecerea 1

Uniformizarea secțiunii așchii, prin mărimi variabile ale avansului (Trecerea 1 din 3)														
Nr. c.d.	Unghi rotire (grade)	Deplasare totala (mm)	Deplasare /pas (mm)	Arie așchii (mm ²)	Nr. c.d.	Unghi rotire (grade)	Deplasare totala (mm)	Deplasare /pas (mm)	Arie	Nr. c.d.	Unghi rotire (grade)	Deplasare totala (mm)	Deplasare /pas (mm)	Arie
1	9.61	50.31796	50.31796	2.428618	12	12.85	67.2826	1.46608	2.480975	23	16.55	86.6558	2.04204	2.429627
2	10.06	52.67416	2.3562	2.435166	13	13.14	68.80104	1.51844	2.466655	24	16.97	88.85492	2.19912	2.427693
3	10.41	54.50676	1.8326	2.416024	14	13.44	70.37184	1.5708	2.445293	25	17.43	91.26348	2.40856	2.41175
4	10.72	56.12992	1.62316	2.465738	15	13.75	71.995	1.62316	2.427167	26	17.95	93.9862	2.72272	2.423861
5	11	57.596	1.46608	2.434924	16	14.07	73.67052	1.67552	2.420757	27	18.54	97.07544	3.08924	2.422051
6	11.27	59.00972	1.41372	2.481932	17	14.4	75.3984	1.72788	2.430523	28	19.21	100.58356	3.50812	2.43071
7	11.53	60.37108	1.36136	2.466292	18	14.74	77.17864	1.78024	2.455179	29	19.97	104.56292	3.97936	2.405462
8	11.78	61.68008	1.309	2.400891	19	15.08	78.95888	1.78024	2.416572	30	20.95	109.6942	5.13128	2.403296
9	12.04	63.04144	1.36136	2.489837	20	15.43	80.79148	1.8326	2.44553	31	23.33	122.15588	12.46168	2.400795
10	12.3	64.4028	1.36136	2.450853	21	15.79	82.67644	1.88496	2.455168	32	28.59	149.69724	27.54136	2.415604
11	12.57	65.81652	1.41372	2.478333	22	16.16	84.61376	1.93732	2.432451	33	29.72	155.61392	5.91668	2.416099

De asemenea se poate ușor constata că numărul de curse duble s-a redus de la 91,

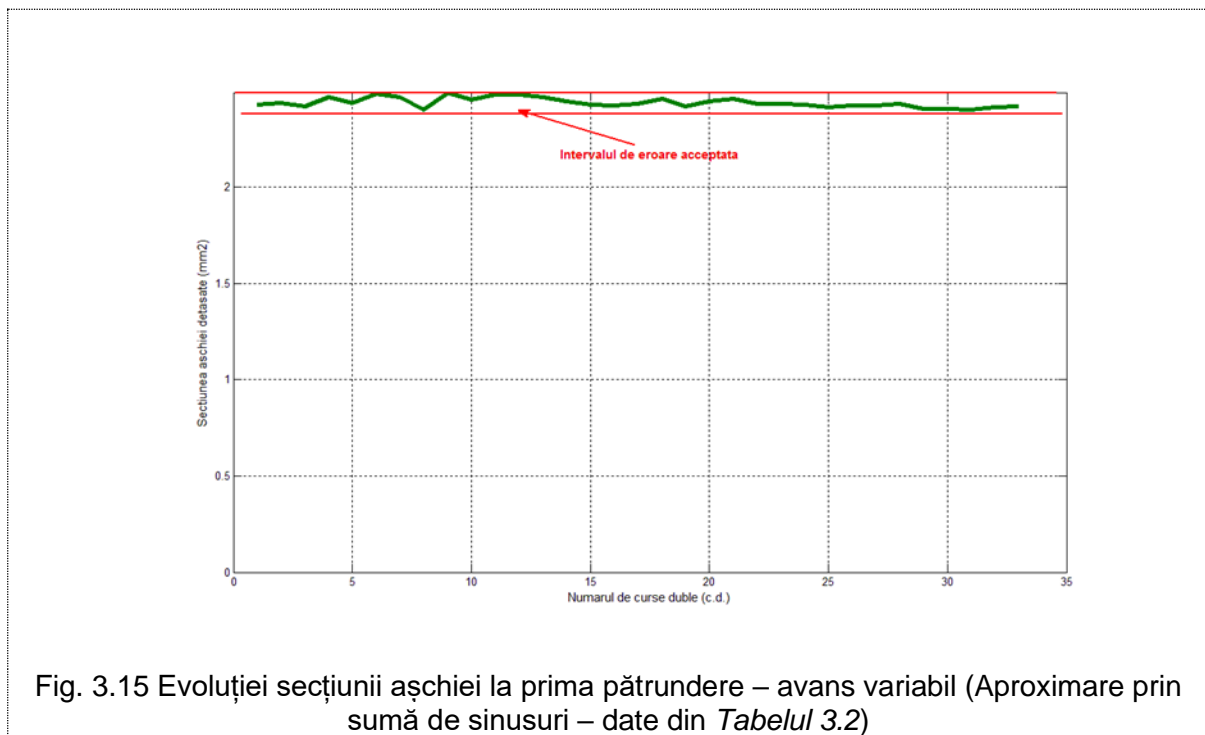


Fig. 3.15 Evoluției secțiunii așchii la prima pătrundere – avans variabil (Aproximare prin sumă de sinusuri – date din *Tabelul 3.2*)

la 33 (deci, aproximativ la o treime) și secțiunile așchiilor sunt aproximativ egale.

3.4. Asperitatea geometrică a flancului danturii generate de cremaliera monodinte

Facem observația că modificarea avansului circular, în procesul de rulare a centroidelor – a semifabricatului și a cremalierii generatoare – ca rezultat al modificării legii

de mișcare al semifabricatului, în scopul asigurării unei arii a așchii detașate (mărimea geometrică a acestei arii) uniformă pentru toate pozițiile succesive ale muchiei de așchiere a sculei în raport cu semifabricatul va avea consecințe directe asupra formei suprafeței flancului danturii generate.

O consecință directă o constituie modificarea asperității geometrice generate ca urmare a unei neuniforme poziționări a muchiei de așchiere a tăișului sculei, la trecerile succesive, în procesul de mortezare.

3.4.1. Definirea problemei

Generarea danturii evolventice cu cremaliera monodinte, în condițiile lucrului cu avans circular variabil, are ca efect modificarea mărimii ariei așchii detașate - în sensul uniformizării ariei acesteia, cu influențe asupra mărimii forței de așchiere, ca urmare a uniformizării apăsării specifice de așchiere pentru toate pozițiile succesive ale tăișurilor sculei în raport cu semifabricatul, în diferitele poziții, în procesul de rulare a celor două centroide - circulară asociată modelului roții dințate prelucrate și rectilinie, asociată sculei monodinte (cremaliera generatoare).

Adoptarea unui proces de rulare neuniform a celor două centroide, printr-o variație a mărimii avansului circular al modelului roții dințate poate avea o influență și asupra mărimii asperității geometrice de generare, în lungul directoarei flancului dintelui generat.

3.4.2. Modelarea grafică a asperității de generare

Elementele geometrice principale ale unei roți dințate sunt standardizate, criteriile de precizie și abaterile de dimensiune și formă trebuind să se încadreze în limite clar stabilite de aceste standarde.

Urmare a modificării modului de generare a flancului (trecerea de la pași egali, la pași variabili), unul dintre parametrii care ar putea fi afectat este eroarea formei profilului.

Asperitatea geometrică, în lungul flancului evolventic al dintelui, poate fi determinată

utilizând facilitățile grafice ale mediului de programare CATIA.

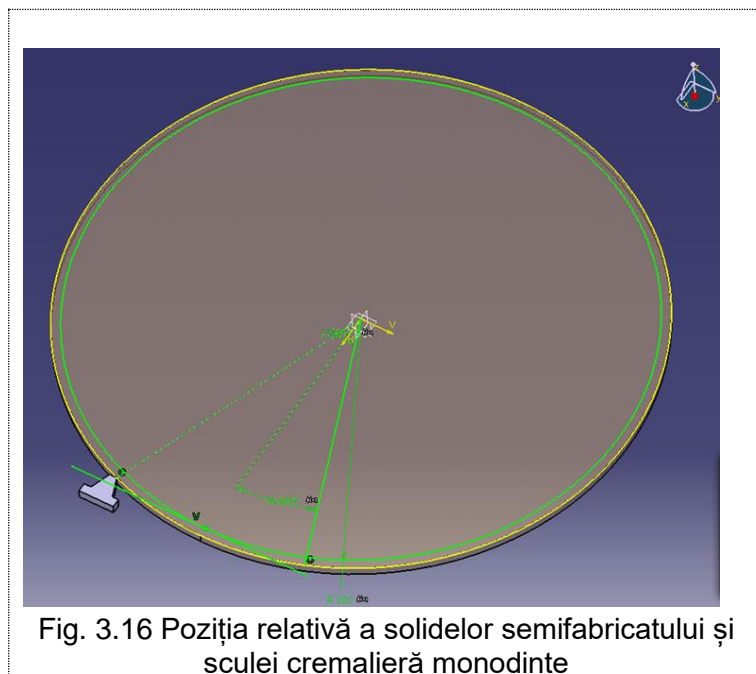


Fig. 3.16 Poziția relativă a solidelor semifabricatului și sculei cremalieră monodinte

- Mișcările se consideră a fi realizate în mod discret, având incrementele $\Delta\varphi$ pentru semifabricat și $\Delta\lambda$ pentru cremalieră, corelate prin cinematica procesului de rulare a celor două centroide asociate: dreapta de rulare a cremalierii și cercul de rulare al semifabricatului:

$$\Delta\lambda = R_r \cdot \Delta\varphi \quad (3.5)$$

Mărimea parametrului variabil $\Delta\varphi$ reprezintă avansul circular variabil al semifabricatului.

- Forma efectiv generată a flancului dintelui rezultă după reprezentarea pozițiilor succesive ale tăișului sculei cremalieră, în procesul de generare;

Nr. crt.	Coordonata y (mm)	Coordonata x (mm)
1	0	281.9077862
2	2.91E-06	281.9091774
3	2.33E-05	281.9133508
4	7.87E-05	281.9203064
5	0.00018647	281.9300439
...
77	1.271740249	289.8289665
78	1.322403914	290.0356961
79	1.374387535	290.2449659
80	1.427707566	290.4567694
81	1.482380434	290.6711003
82	1.538422537	290.8879523
83	1.59585025	291.1073187
84	1.654679916	291.3291931
...
141	7.841425382	307.8699614
142	8.008425195	308.2234102
143	8.177731077	308.5788445
144	8.349357141	308.9362532
145	8.523317451	309.2956254
146	8.699626026	309.6569498
147	8.878296837	310.0202153

Fig. 3.17 Puncte de pe profilul unui dinte evolventic al unei roți dințate având modul $m=10\text{mm}$, calculate în MatLab

- Profilul evolventic teoretic este determinat ca rezultat al reprezentării unui număr suficient de mare de puncte, în lungul profilului, calculat în MatLab, prin folosirea ecuațiilor parametrice.

Programul scris în MatLab, pentru găsirea punctelor necesare construcției profilului evolventic, generează, pentru condițiile date, rezultatele din Fig. 3.17.

Profilul se trasează utilizând o curbă spline care unește aceste puncte.

După realizarea unui flanc, simetric față de axa de simetrie a golului, se obține cel de al doilea, obținându-se golul din Fig. 3.19-b.

Pentru a se compara, profilul teoretic (curba spline trasată) și profilul efectiv generat (pentru un număr finit de poziții succesive ale tăișului cremalierii), se suprapun și, folosindu-se instrumente de măsurare conținute în mediul grafic CATIA, se fac măsurători ale abaterilor de formă.

Au fost făcute măsurători ale asperităților geometrice rezultate în urma simulării prelucrării cu avans variabil pentru goluri de dinte obținute printr-un număr de curse duble comparabil cu cel necesar, dacă nu s-ar fi făcut uniformizarea secțiunii așchii, cât și pentru un număr mic de treceri.

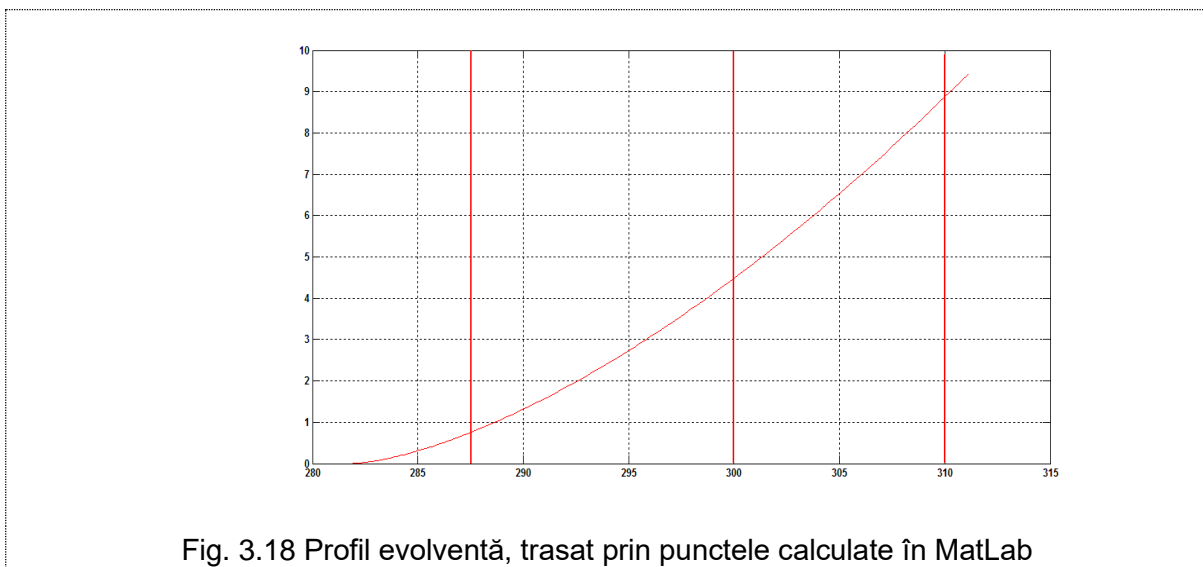


Fig. 3.18 Profil evolventă, trasat prin punctele calculate în MatLab

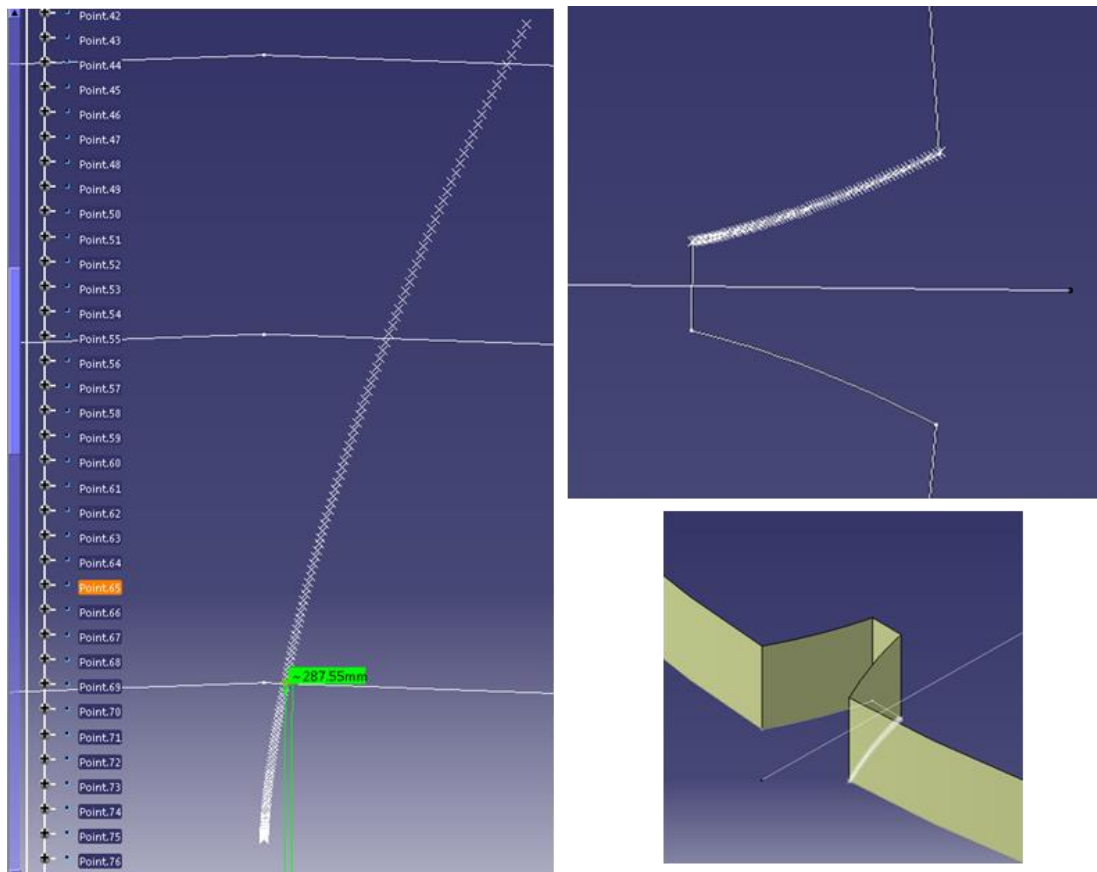


Fig. 3.19 Puncte evolventă, importate în CATIA. Construcția profilului evolventic teoretic.

3.4.3. Aplicații numerice

Pentru realizarea efectivă a măsurătorilor au fost realizat profilul golului de dinte a unei roți dințate cu $z = 60$ dinți și modul $m = 10$ mm, care a fost comparat cu același gol obținut simulând operația de mortezare, corespunzător unui număr de 99 de curse duble cu pas variabil, respectându-se condiția de rulare și limitându-se unghiul de rotire al semifabricatului la 0.5° (Fig. 3.20, Fig. 3.21) și cu un gol obținut limitându-se secțiunea așchiei la 20 mm^2 și unghiul maxim la 4° (Fig. 3.22).

Aplicarea pe porțiuni de profil a funcției de măsurare a distanțelor, cu impunerea ca rezultatul afișat să fie pentru maximum existent, poate da o "hartă" a abaterilor maxime înregistrate. (Fig. 3.20, Fig. 3.21, Fig. 3.22).

Analizând figurile, se poate constata că, pentru cazul danturării cu avans variabil, dacă numărul de curse duble este comparabil cu numărul de curse duble prin care s-ar fi obținut golul prin danturare cu pas constant, înălțimea asperităților geometrice este neglijabilă, abaterile de formă față de profilul teoretic fiind minore.

Abateri mai mari apar dacă se reduce mult numărul de curse, mărindu-se secțiunea așchiei (Fig. 3.22)

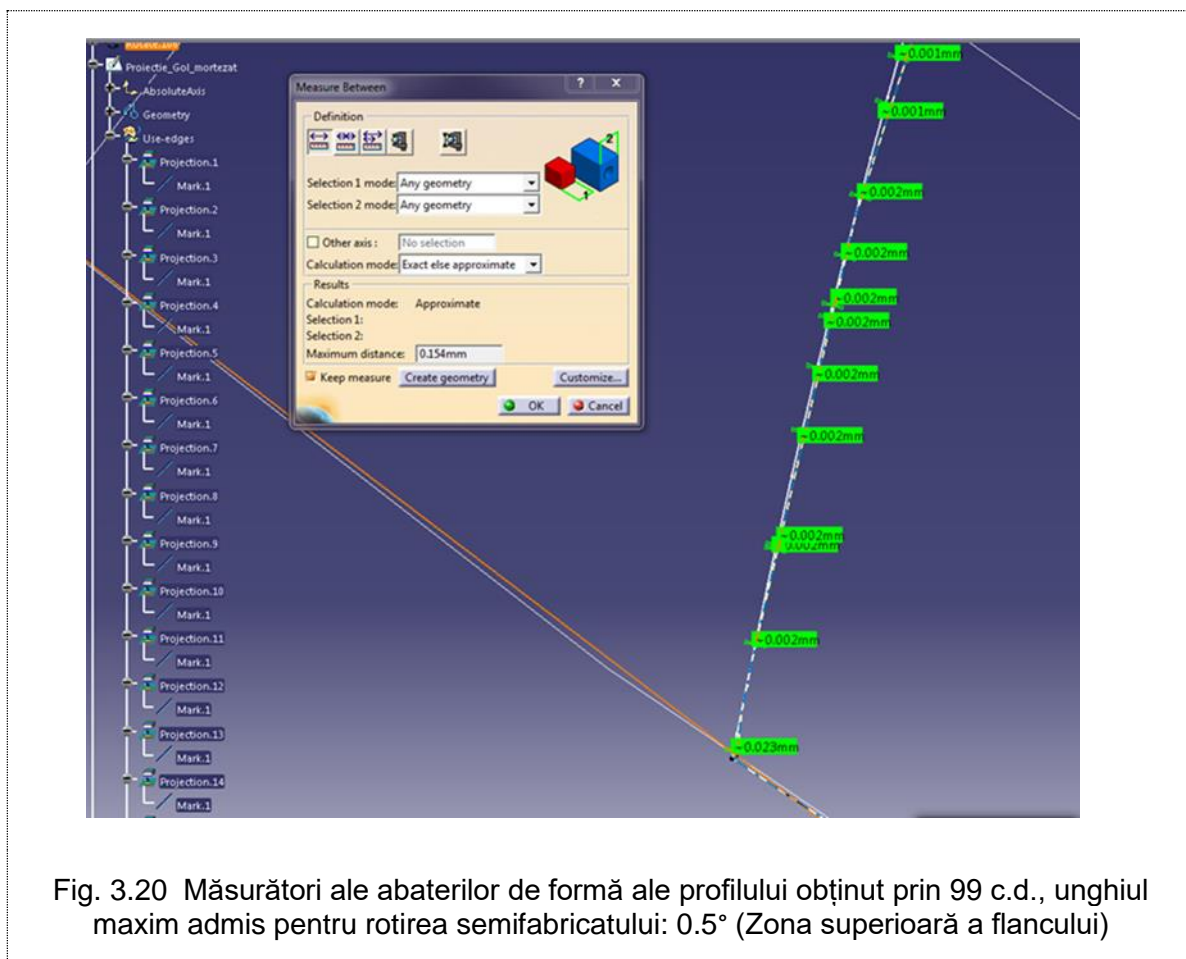


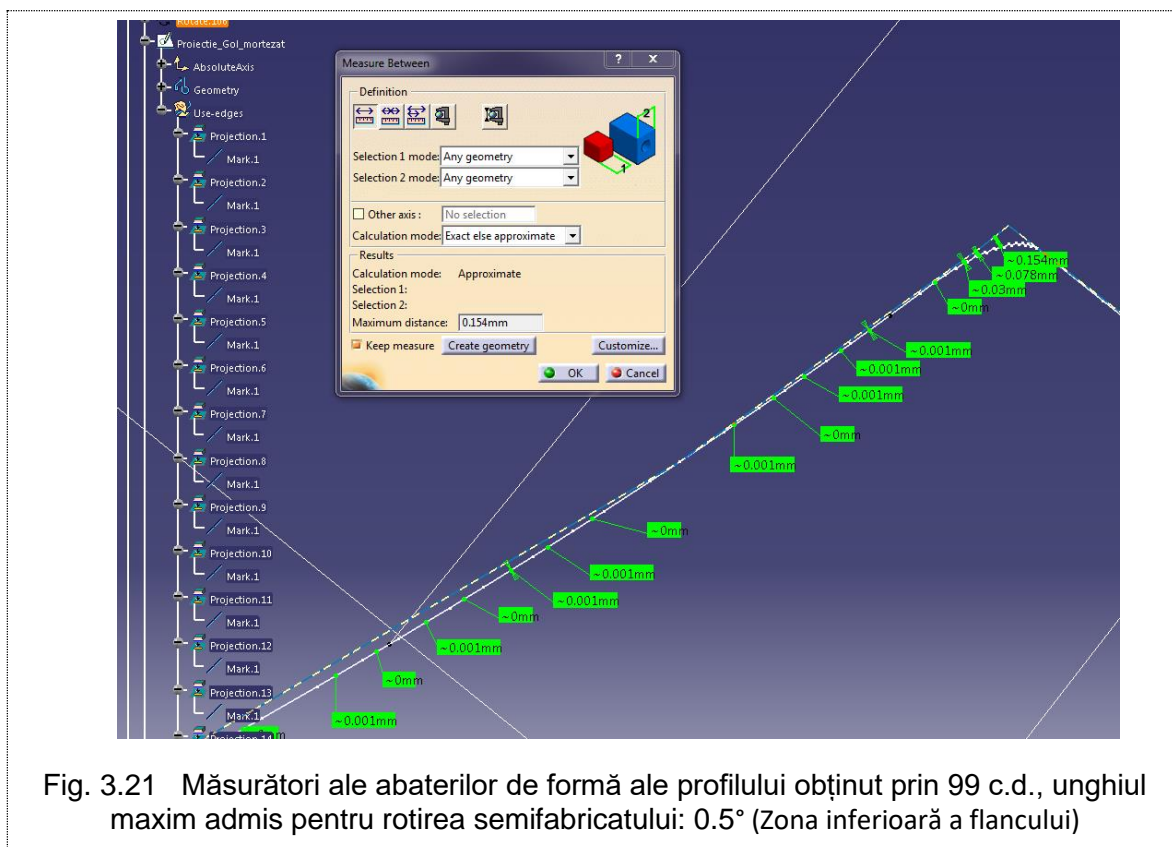
Fig. 3.20 Măsurători ale abaterilor de formă ale profilului obținut prin 99 c.d., unghiul maxim admis pentru rotirea semifabricatului: 0.5° (Zona superioară a flancului)

Dacă se analizează mărimea măsurată a asperităților geometrice rezultate ca urmare a prelucrării golului de dinte cu pas variabil, dar cu un număr de curse duble comparabil cu numărul de care ar fi fost nevoie dacă pașii erau constanți (Fig. 3.20, Fig. 3.21), se observă că acestea sunt foarte mici.

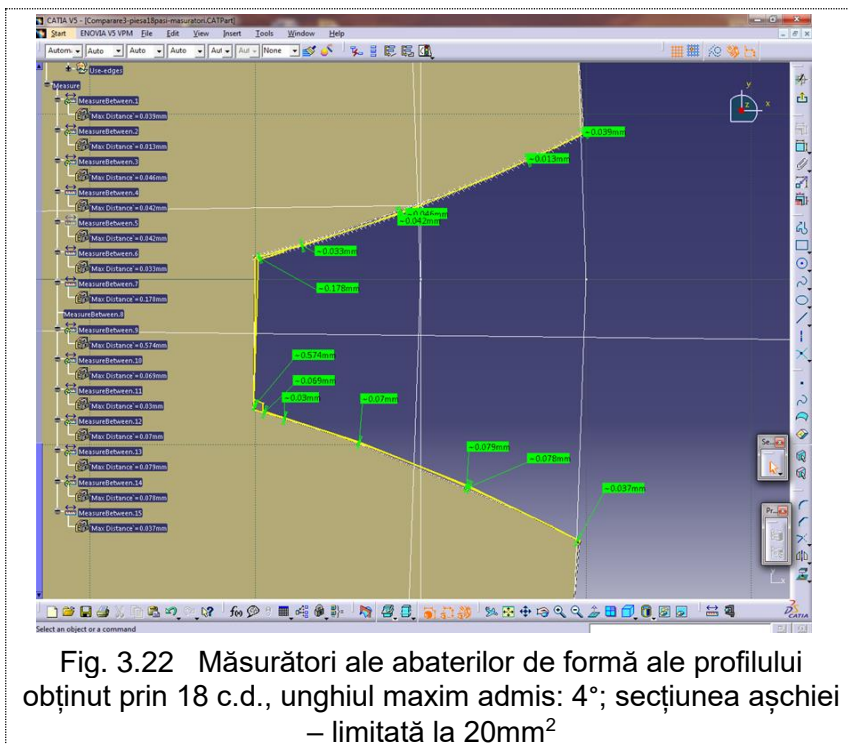
Conform standardelor, rugozitatea suprafețelor flancurilor trebuie să fie de 0.4...6.3 μm.

Pentru cazul studiat, clasa de precizie a roții dințate, conform erorilor de formă ale profilului dintelui, din "Criteriul de funcționare lină" este 6 (din 12!), ceea ce face ca metoda să poată fi folosită cu succes la obținerea roților dințate de uz industrial.

Condiția de bază este, însă, așa cum s-a menționat mai sus, ca numărul de curse duble pe care-l execută mașina pentru realizarea golului, cu pas variabil, să fie comparabil cu numărul de curse duble cu care se obține golul în mod clasic (cu pas constant).



Dacă puterea mașinii permite, numărul de curse duble se poate reduce destul de mult, profilul din Fig. 3.22 fiind realizat în 18 curse duble.



Scăderea numărului de tăieturi se face însă în detrimentul calității flancurilor, abaterile de formă depășind, în unele locuri valorile admise, calitatea suprafețelor trebuind, ulterior, îmbunătățită printr-un procedeu de finisare.

3.5. Prelucrarea danturii evolventice cu o sculă de tip cremaliera multidinte

În prezentul capitol se prezintă o analiză, finalizată printr-un algoritm grafic în mediul de proiectare grafică CATIA, referitor la forma și mărimea ariei așchii detașate de dinții succesivi ai sculei de tip cremalieră polidinte, în procesul de rulare între centroida semifabricatului – cercul de rulare al modelului roții dințate generate și dreapta de rulare a sculei cremalieră.

Problematika generării danturii roților dințate evolventice cu o scula cremalieră monodinte a fost analizată în capitolul 3.2. a prezentei lucrări, urmărindu-se, în condițiile respectării procesului de rulare a centroidelor asociate modelului roții și cremalierii monodinte și determinând legea de variație a mărimii avansului circular, în funcție de numărul de curse duble, în procesul de mortezare.

Faptul că aria așchii detașate la o singură cursă activă a cremalierii (cursă a mișcării principale de așchiere), reprezintă o sumă a ariilor așchiilor detașate simultan de dinții în contact cu semifabricatul, în lungul liniei de angrenare conduce la o mare complexitate a modelării procesului generării așchiilor, facilitățile unei soluții grafice în CATIA, dovedindu-se salutară.

3.5.1. Metodă grafică în CATIA pentru modelarea procesului danturării cu scula cremalieră

Următorii pași în abordarea problemei se realizează prin simulare în mediul de proiectare grafică CATIA:

- Se generează cilindrul care reprezintă modelul semifabricatului, aplicându-se constrângerile de formă și dimensiuni, în corelație cu modelul real.
- Se generează modelul solid al sculei cremalierii polidinte (Fig. 3.23);
- Modelul cilindrului semifabricatului este poziționat în raport cu modelul solid al sculei cremalieră, prin centroidele asociate tangente și cu primul punct al sculei cremalieră în contact cu cercul exterior.

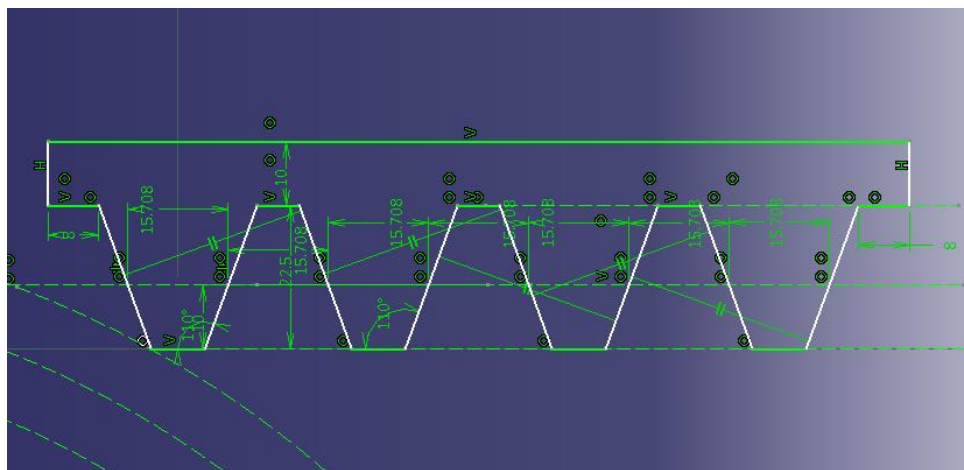


Fig. 3.23 Cremaliera cu patru dinți- schetch

- Începând din această poziție inițială, se imprimă mișcările semifabricatului și modelului cremalierii în acord cu condiția de rulare.
- Semifabricatul este rotit în sens opus mișcării acelor de ceasornic, cu un increment $\Delta\varphi=0.4^\circ$, care corespunde unei deplasări a modelului cremalierii cu mărimea $\Delta\lambda=1.0472$ mm.
- În poziția aceasta, modelul sculei se suprapune parțial cu modelul cilindrului semifabricatului. Domeniul intersectat reprezintă forma așchii detașate, iar aria suprapusă este aria așchii
- Domeniul comun și modelul sculei se îndepărtează, prin comanda *Remove*
- Mărimea ariei așchii detașate este măsurată ca diferență între aria semifabricatului înaintea intersectării cu modelul sculă și aria curentă măsurată.
- Pașii se repetă iterativ până când primul dinte al sculei iese din contactul cu semifabricatul.

Se poate constata că al doilea dinte vine în contact cu semifabricatul după parcurgerea unui unghi:

$$\varphi_i = 360/z \text{ }^\circ \quad (\text{In cazul nostru } 12^\circ) \quad (3.6)$$

Similar, al treilea dinte începe să așchieze după 24° și al patrulea, după 36° .

După ce primul dinte nu mai așchiează (în exemplul prezentat, după 111 curse duble), trebuie să se facă o indexare (o re poziționare a mesei, prin translație, fără rotație) cu

$$p = 2 \cdot \pi \cdot R_r / z = 31.416 \text{ mm}$$

Ciclurile succesive sunt simulate din nou, până când se finalizează danturarea întregului semifabricat.

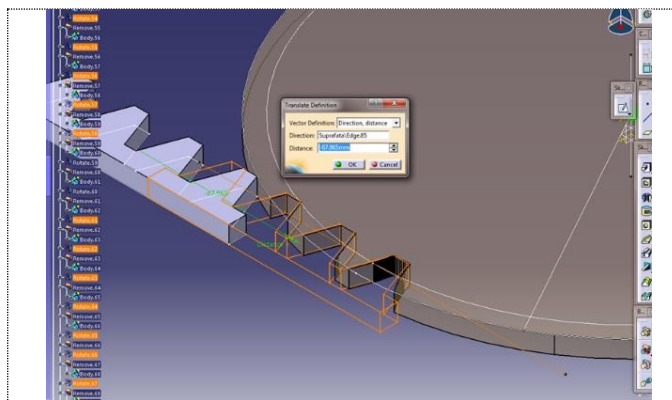


Fig. 3.25 Simularea danturării cu scula cremalieră

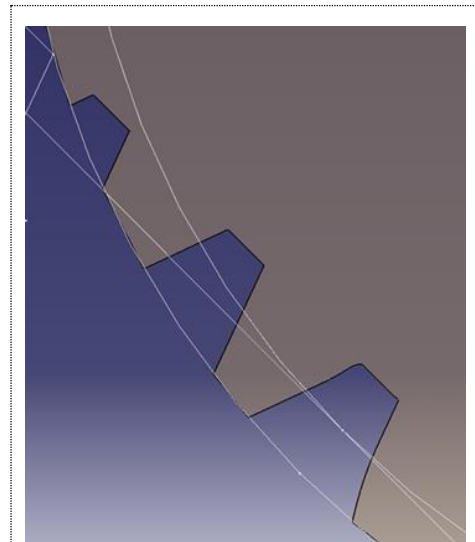


Fig. 3.24 Cremaliera cu patru dinți-2

3.5.2. Modelare numerică

În Tabelul 3.3 sunt prezentate rezultate numerice pentru cazul simulării danturării cu scula cremalieră

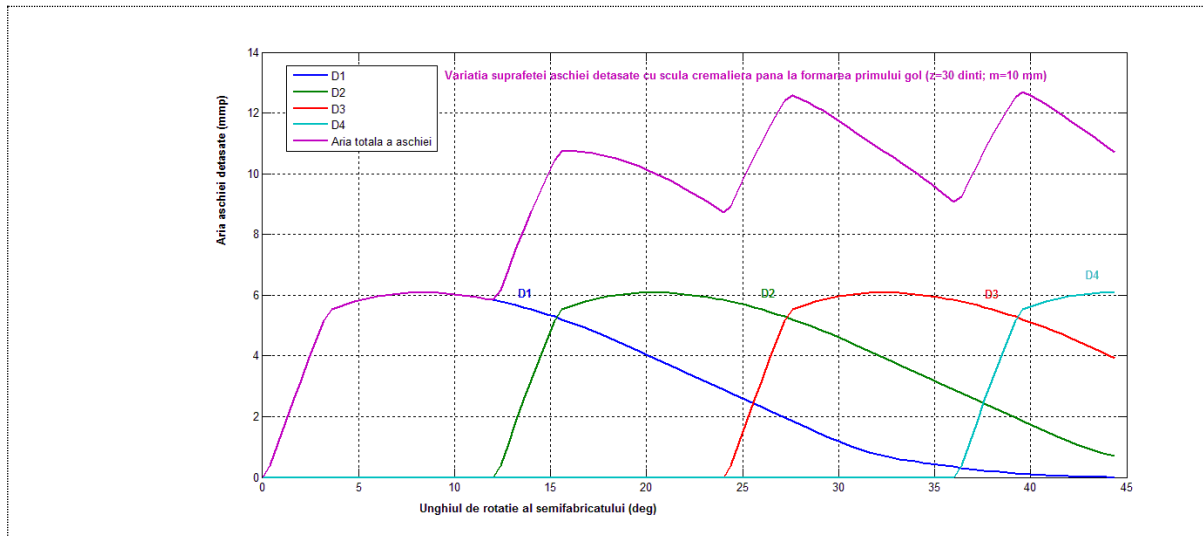


Fig. 3.26 Variația secțiunii așchii la danturarea cu scula cremalieră
 (Roată dințată m10, 30 dinți)

Tabelul 3.3 – Date privind formarea așchii la danturarea unei roți dințate cilindrice, cu profil evolventic, având z=30 dinți și modul m=10, cu scula cremalieră cu 4 dinți

99	39.6	0.4	103.673	1.047	80096.221	0.113	1.848	5.202	5.529	12.692
100	40	0.4	104.720	1.047	80096.125	0.096	1.734	5.112	5.625	12.567
101	40.4	0.4	105.767	1.047	80096.045	0.080	1.622	5.018	5.71	12.430
102	40.8	0.4	106.814	1.047	80095.979	0.066	1.51	4.92	5.784	12.280
103	41.2	0.4	107.862	1.047	80095.930	0.049	1.395	4.825	5.856	12.125
104	41.6	0.4	108.909	1.047	80095.889	0.041	1.289	4.717	5.908	11.955
105	42	0.4	109.956	1.047	80095.859	0.030	1.18	4.611	5.955	11.776
106	42.4	0.4	111.003	1.047	80095.838	0.021	1.079	4.501	5.997	11.598
107	42.8	0.4	112.050	1.047	80095.824	0.014	0.986	4.39	6.028	11.418
108	43.2	0.4	113.098	1.047	80095.818	0.006	0.896	4.281	6.059	11.242
109	43.6	0.4	114.145	1.047	80095.815	0.003	0.826	4.166	6.07	11.065
110	44	0.4	115.192	1.047	80095.814	0.001	0.758	4.052	6.081	10.892
111	44.4	0.4	116.239	1.047	80095.814	0.000	0.699	3.938	6.083	10.720
						328.958				

În Fig. 3.26 este reprezentată variația mărimii ariei așchii cumulate, în procesul de danturare și, de asemenea variația mărimii ariei așchii detașate de fiecare dinte în contact cu semifabricatul.

După fiecare re poziționare a sculei cremaliera, va exista aceeași lege de variație a mărimii așchii cumulate, care are o periodicitate de $360^\circ/z = 12^\circ$, (pentru cazul prezentat).

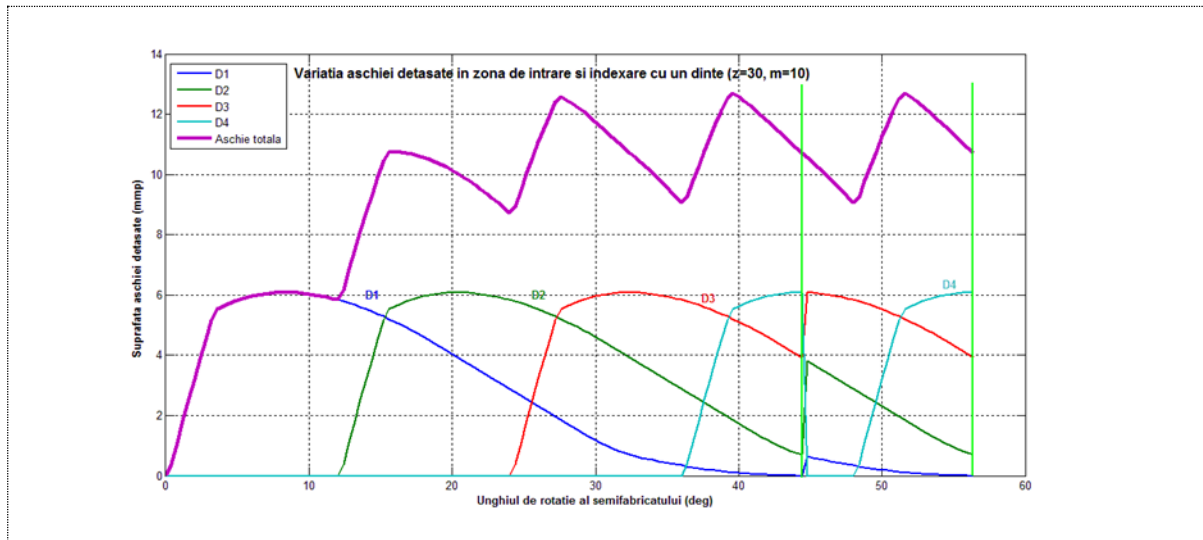


Fig. 3.27 Variația secțiunii așchiilor la danturarea cu scula cremalieră după indexarea cu un dinte (Roată dințată m10, 30 dinți)

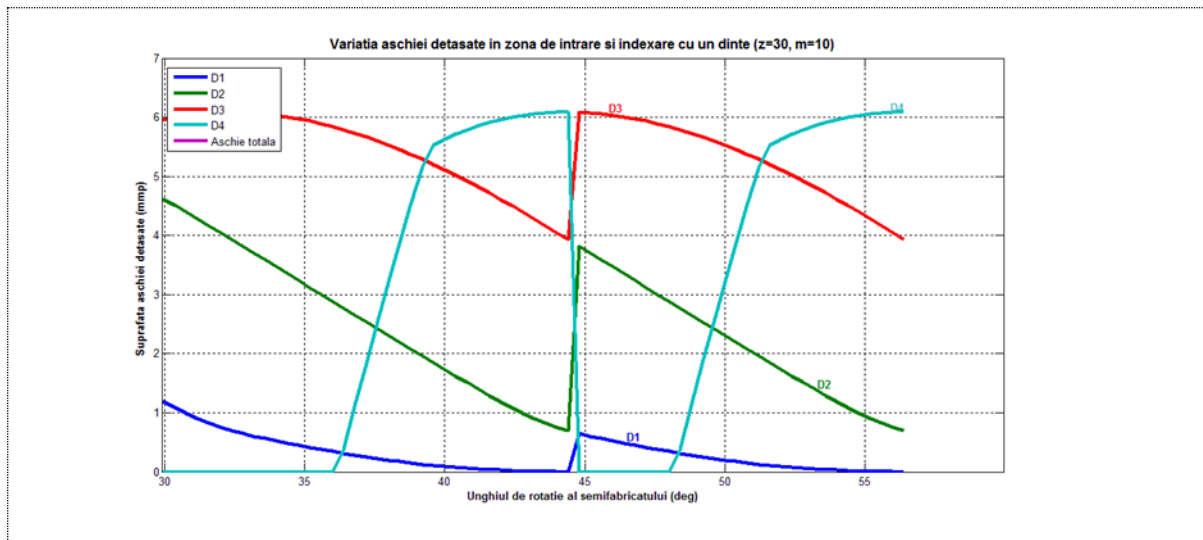


Fig. 3.28 Detaliu privind variația secțiunii așchiilor la danturarea cu scula cremalieră după indexarea cu un dinte (Roată dințată m10, 30 dinți)

La o vizualizare mai atentă a situației din zona 44-45°, observăm că, începând cu această poziție și până la finalizarea obținerii danturii, primul dinte va face doar finisare, dinții cei mai solicitați devenind dintele al 3-lea și al 4-lea.

Pentru uniformizarea mărimii așchiilor, se propune o împărțire a intervalului evaluat în două părți:

- partea de început a formării danturii (intervalul 0-44°), până la finalizarea primului gol, de primul dinte;
- o parte repetitivă, întinsă pe un interval unghiular de $(360^\circ / z = 12^\circ)$.

Vor rezulta astfel două legi de variație, aplicabile pe aceste intervale.

Pe primul interval, secțiunea așchiei variază conform graficului din Fig. 3.29.

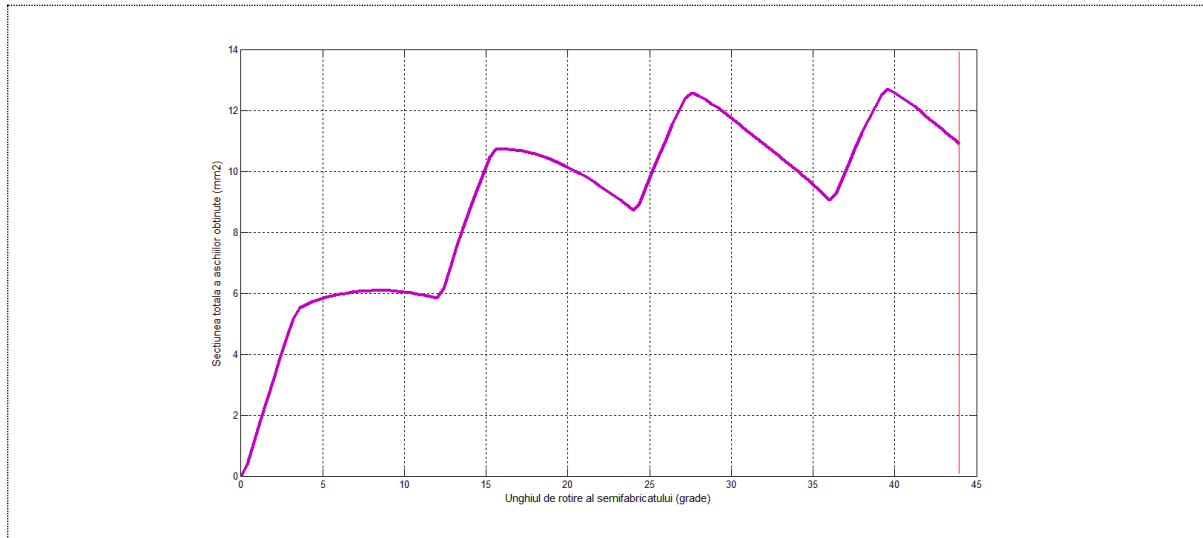


Fig. 3.29 Modul de variație a așchii, până la formarea primului gol, la danturarea cu scula cremalieră

Folosind datele privind evoluția secțiunii totale a așchiilor în *Curve Fitting Tool*, din MatLab, se poate găsi o funcție care aproximează foarte bine alura funcției (Fig. 3.30).

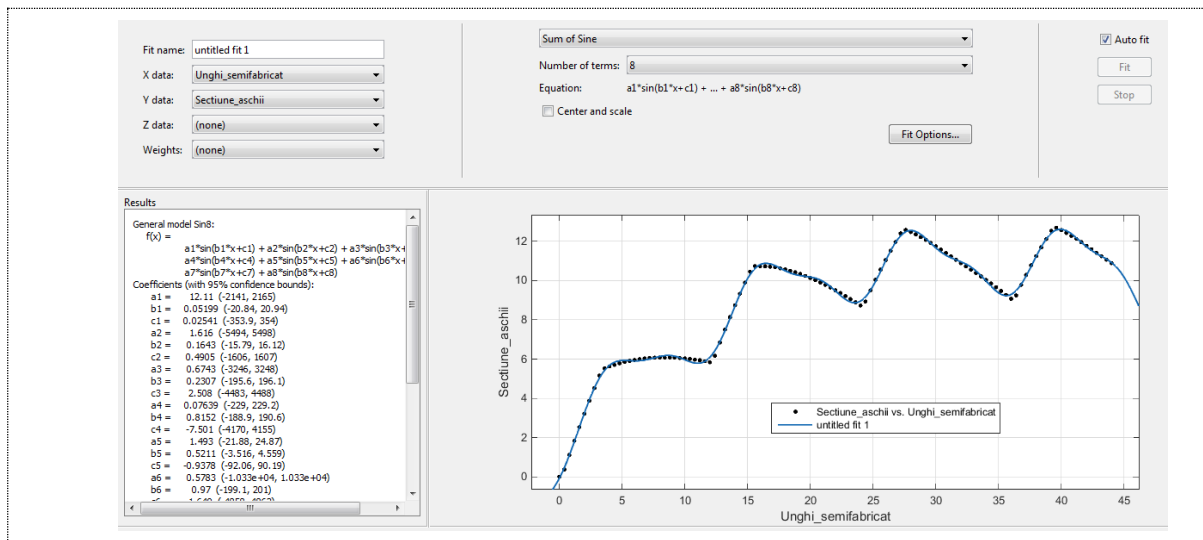


Fig. 3.30 Funcția de aproximare a evoluției secțiunii așchii până la formarea primului gol, la danturarea cu scula cremalieră

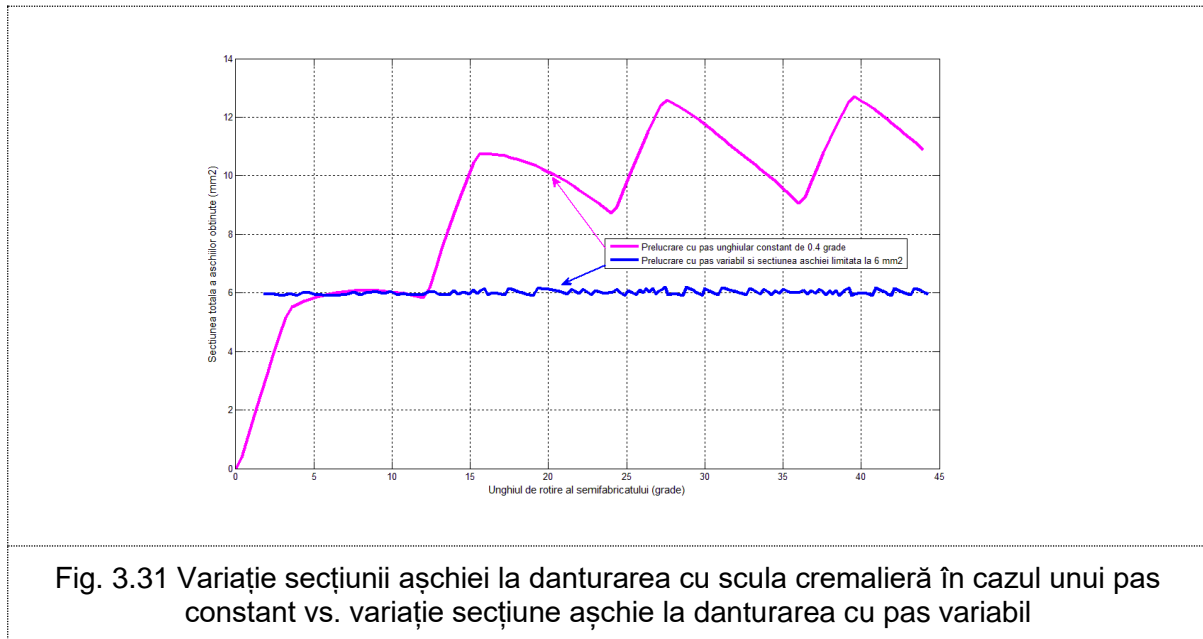
Din modurile de aproximare, avute la dispoziție în cadrul programului, funcția care se potrivește cel mai bine este o funcție de forma (3.7):

$$f(x) = a_1 \cdot \sin(b_1 \cdot x + c_1) + a_2 \cdot \sin(b_2 \cdot x + c_2) + \dots + a_8 \cdot \sin(b_8 \cdot x + c_8) \quad (3.7)$$

în care coeficienților $a_1, a_2, \dots, a_8, b_1, b_2, \dots, b_8, c_1, c_2, \dots, c_8$ li se alocă de program valori potrivite aproximării graficului funcției date.

Rulând programul de uniformizare a funcției $f(x)$, se obțin valorile pasului unghiular al semifabricatului, pentru care, cu respectarea condiției de rulare fără alunecare se obțin valori ale ariei așchiei apropiate celei impuse de operator.

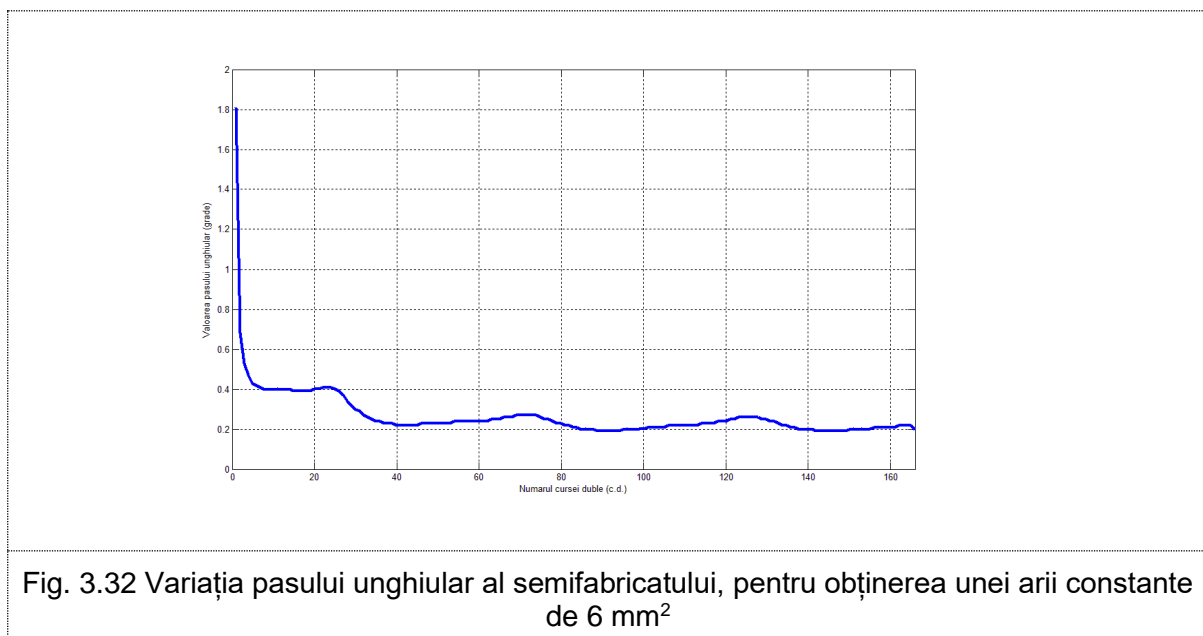
Dacă reprezentăm grafic aceste valori, obținem Fig. 3.31.



Valoarea secțiunii totale a așchiilor detașate la o cursă dublă a sculei generatoare a fost limitată la 6 mm^2 , solicitarea mașinii fiind la nivelul danturării cu o sculă cremalieră monodinte care ar fi avut un pas unghiular fix de $0.4^\circ/\text{c.d.}$

Numărul de curse duble pe care trebuie să le execute mașina pentru acest rezultat crește însă la 165, față de 110.

Modul de variație a pasului unghiular în acest interval ($0-44^\circ$) se poate vedea în Fig. 3.32.



Similar se prelucrează datele pentru zona repetitivă a graficului, care este identică cu forma din intervalul 32°-44°

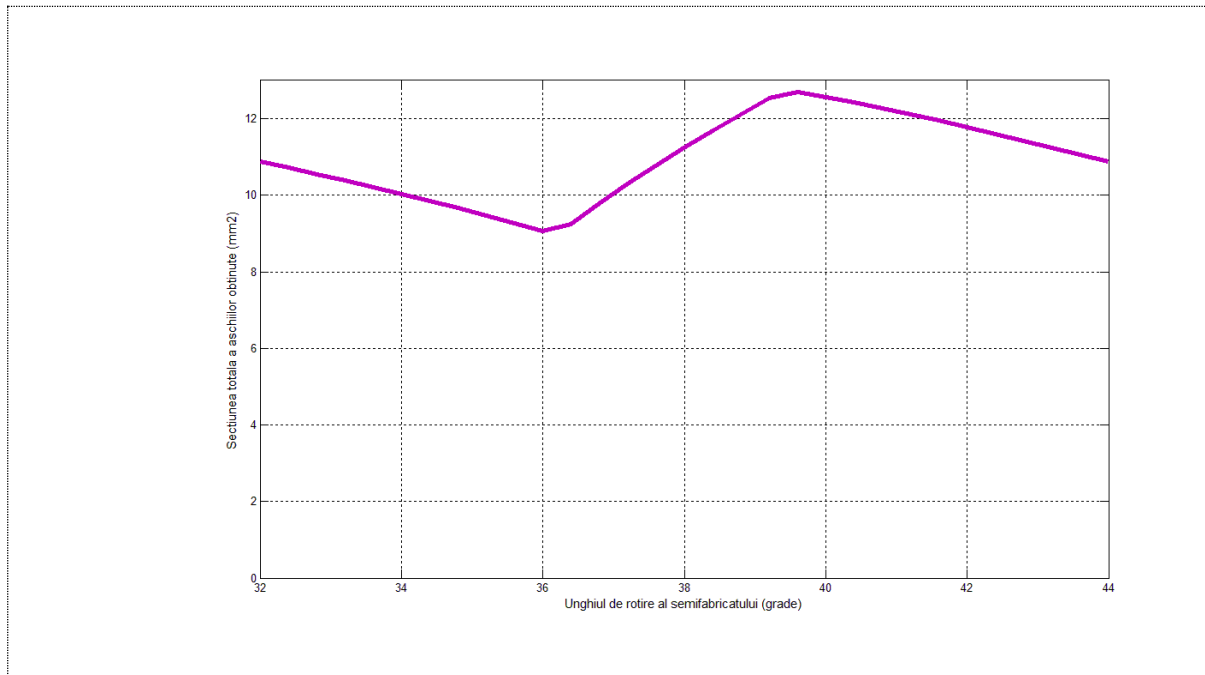


Fig. 3.33 Modul de variație a așchii în intervalul 32°-44°

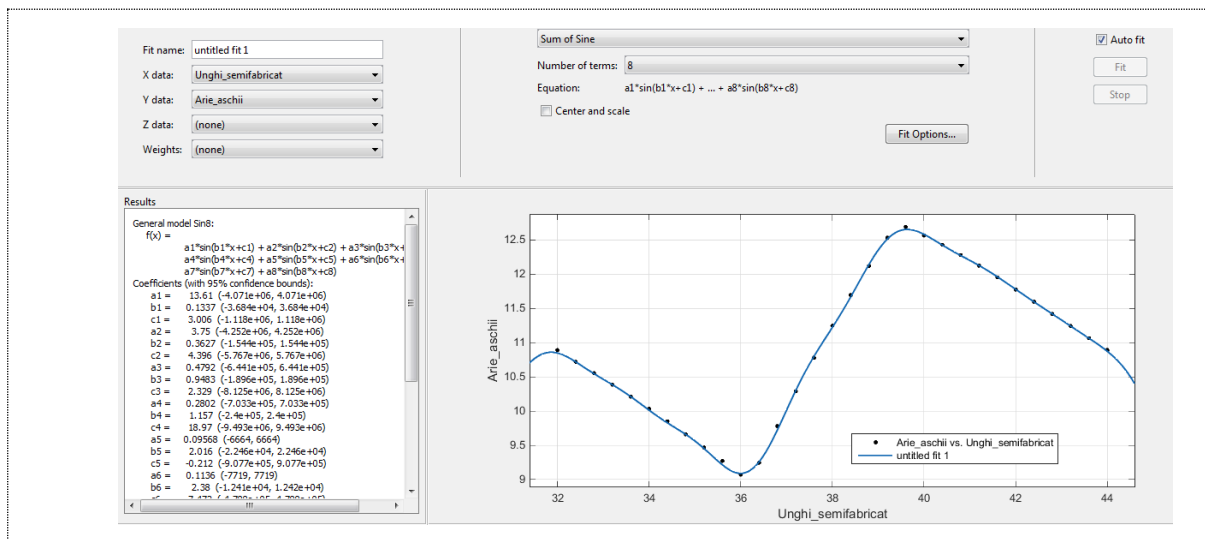


Fig. 3.34 Funcția de aproximare a evoluției secțiunii așchii în intervalul 32°-44°

Impunându-se o arie cumulată a așchiilor de 6 mm², această parte a prelucrării se realizează în 56 curse duble cu mărimi variabile, față de 36 dacă s-ar face cu pas fix de 0.4°.

Rezultă, în schimb așchii cu secțiune stabilită, mașina fiind mult mai puțin solicitată, față de cazul clasic, în care ariile variau între 9.1 și 12.7 mm² (Fig. 3.35).

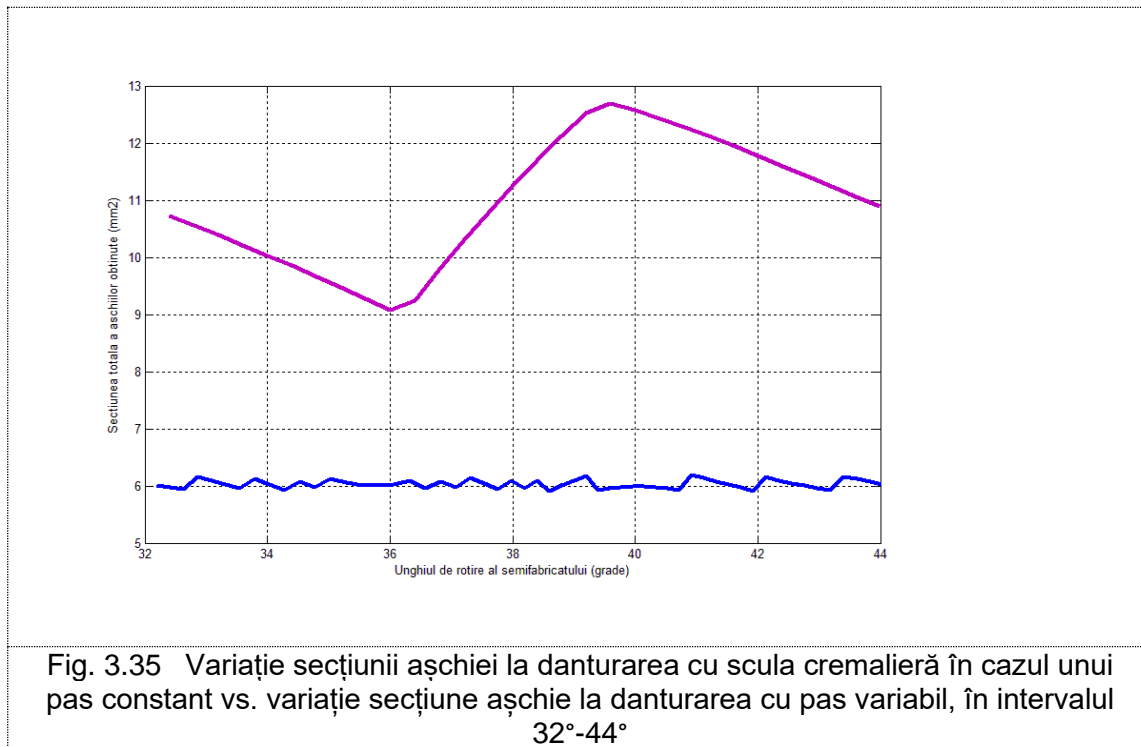


Fig. 3.35 Variație secțiunii așchiei la danturarea cu scula cremalieră în cazul unui pas constant vs. variație secțiune așchie la danturarea cu pas variabil, în intervalul 32°-44°

3.5.3. Concluzii

În Capitolul 3.5 s-a prezentat problema generării cu scula cremalieră polidinte, modelarea variației așchiei, în cinematica specifică a procesului, în primul rând, printr-o modelare analitică, indicându-se limitele acestei modalități, pentru analiza unei asemenea problematici complexe.

Ulterior, problema a fost dezvoltată apelând la facilitățile mediului grafic de proiectare CATIA, în care s-a realizat un algoritm specific pentru determinarea mărimii ariei așchiei cumulate, detașate de toți dinții sculei aflați în contact cu semifabricatul.

Algoritmul a fost aplicat pentru un semifabricat al unei roți dințate cu dinți drepți (având modulul $m=10$ și numărul de dinți $z=30$).

Legea de variație a mărimii ariei așchiei detașate s-a determinat apelându-se la modulul de *Curve Fitting Tool* din MatLab.

S-a determinat mărimea avansului circular al semifabricatului necesar pentru obținerea unei mărimi constante a ariei cumulate a așchiei detașate de dinții cremalierii, pentru fiecare cursă de mortezare realizată de sculă.

Rezultatele obținute susțin viabilitatea soluției imaginate, care, implementată pe o mașină cu comandă numerică specializată, lucrând cu un avans circular al semifabricatului variabil, poate conduce la uniformizarea mărimii ariei așchiei detașate la o cursă dublă a cuțitului pieptene și, deci, a mărimii forței principale de așchiere.

4. Uniformizarea ariei așchii detașate la danturarea cu cuțitul-roată

Un procedeu utilizat frecvent pentru prelucrarea danturilor evolventice interioare și exterioare este mortezarea cu cuțit-roată. Din acest motiv, s-a considerat util a se aborda și acest procedeu pentru aplicarea metodei de uniformizare a ariei așchii detașate prezentat în capitoul anterior. În cele ce urmează, metoda este particularizată la specificitățile mortezării danturilor cu cuțit-roată. Etapele de aplicare sunt aceleași ca în cazul mortezării cu scula-cremalieră, cu observația că, în acest caz, centroida atașată sculei este un cerc.

4.1. Introducere

Schema de așchiere la generarea cu scule cu tășuri active multiple – cazul sculelor pentru danturare – care poate fi modificată, în scopul ameliorării procesului de danturare, a constituit o preocupare permanentă a cercetătorilor [30], [18], [26], [17]

Soluții diverse au fost prezentate în baza teoriei generale a înfășurării suprafețelor [41] prin realizarea unor algoritmi dedicați pentru cazurile generării prin metoda rulării cu scula cremalieră, cuțite-roată sau cu scula melc.

S-au propus modificări constructive ale sculelor așchietoare, prin care, fără a modifica principiul generării prin înfășurare a suprafețelor, în principal a danturilor evolventice, s-au realizat ameliorări ale schemei de așchiere specifice cu efecte asupra diminuării uzurii sculelor melc [18] sau a uniformizării procesului de danturare [30] [17].

Abordarea problemei s-a făcut apelând la principiile fundamentale ale generării prin înfășurare, prin dezvoltări analitice sau grafice în AutoCAD, realizându-se produse soft specifice dedicate acestei problematice [17] [30].

Dezvoltarea algoritmilor de proiectare grafică și realizarea de produse soft, deosebit de versatile, precum CATIA, pot permite o nouă abordare a analizei grafice a sistemelor de așchiere la danturare, în cazul de față a generării cu scule de tip cuțit-roată.

Obiectivul analizei este de astă dată schimbat, în sensul că se urmărește modificarea procesului de desfășurare a generării danturii, prin variația avansului de rulare, fără a denatura mecanismul specific al rulării centroidelor asociate sculei și semifabricatului generat, care să asigure o desfășurare mai uniformă a procesului danturării. Se poate astfel asigura o variație a mărimii ariei așchii detașate de dinții sculei relativ uniformă, cu efecte asupra mărimii forței principale de așchiere, a mărimii asperităților suprafețelor generate și diminuarea uzurii dinților sculelor așchietoare.

Se definesc sistemele de referință, în corelație cu Fig. 4.1:

- $x_0y_0z_0$ – sistem fix, solidar cu z_0 a modelului cuțitului roată;
- $x_1y_1z_1$ – sistem fix, asociat axei z_1 a modelului semifabricatului;
- $x_2y_2z_2$ – sistem fix, asociat axei z_2 a modelului coroanei dințate generate.

Sistemele fixe au axele paralele și orientate în același sens.

Distanțele între axele z_0 , z_1 , z_2 sunt definite de mărimile A_{12-1} , respectiv A_{12-2} .

De asemenea, se definesc sistemele de referință mobile:

- $\xi\eta\zeta$, inițial suprapus cu $x_0y_0z_0$, cu centrul în O_1 , solidar cu centroida cuțitului roată – C;

- $X_1Y_1Z_1$, inițial suprapus sistemului $x_1y_1z_1$, Z_1 este axa modelului semifabricatului roată cu dantură cilindrică, dreaptă, exterioară;

- $X_2Y_2Z_2$, inițial suprapus sistemului $x_2y_2z_2$, Z_2 este axa modelului coroanei dințate;

Poziția relativă între axele z_0, z_1, z_2 ale sistemelor de referință fixe este definită de relațiile: (vezi și Fig. 4.1)

$$A_{12-1} = R_{rp1} + R_{rt}$$

(generarea exterioară)

$$A_{12-2} = R_{rp2} - R_{rt}$$

(generarea coroanei dințate).

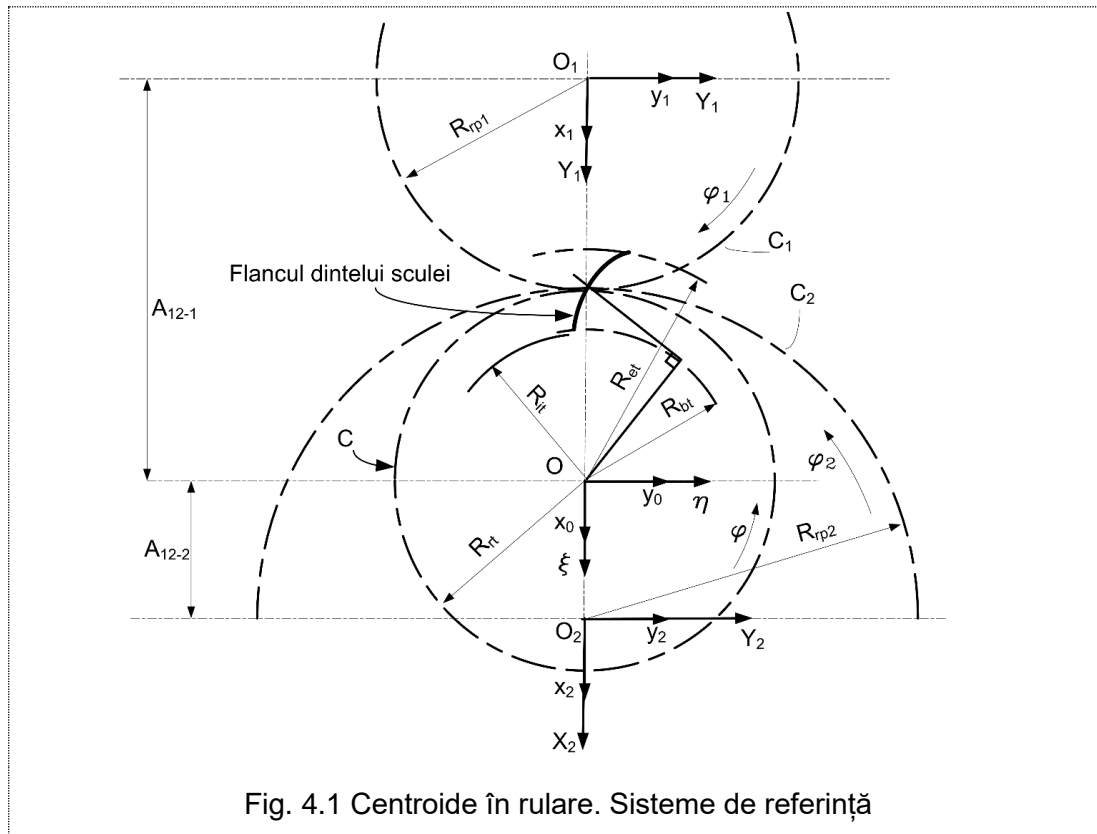


Fig. 4.1 Centroide în rulare. Sisteme de referință

Se definesc R_{bt}, R_{it} și R_{et} raza de bază, de picior și de cap, a danturii generate. Sunt evidente relațiile în procesele de rulare a centroidelor:

$$R_{rt} \cdot \varphi = R_{rp1} \cdot \varphi_1 \quad (4.1)$$

(cazul danturii exterioare)

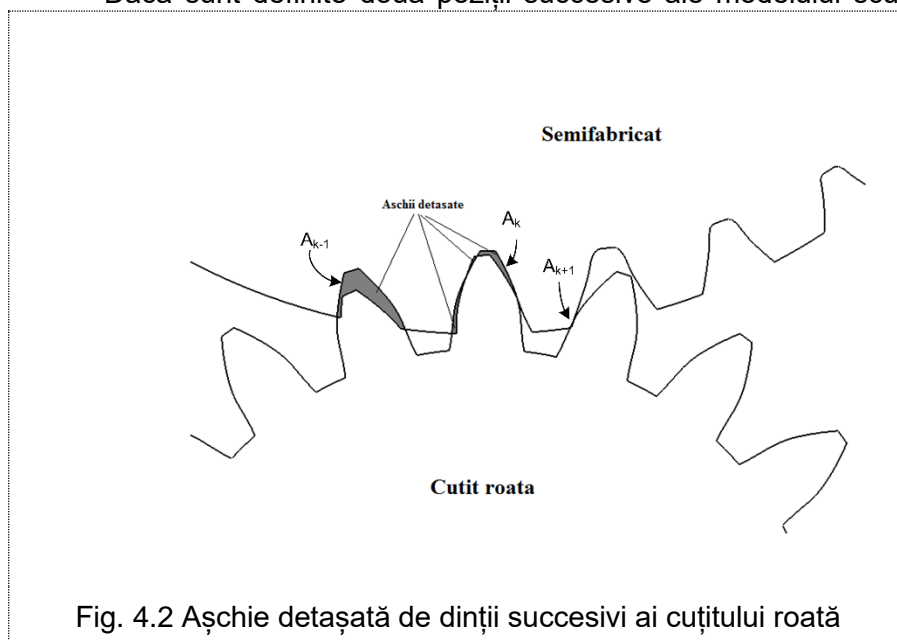
$$R_{rt} \cdot \varphi = R_{rp2} \cdot \varphi_2 \quad (4.2)$$

(cazul coroanei dințate).

4.2. Modelarea în CATIA a formei și mărimii ariei așchii detașate

În Fig. 4.2, este prezentat principiul calculului ariei cumulate a așchii detașate simultan, în funcție de numărul curent al cursei duble a sculei față de semifabricat, la danturarea exterioară.

Dacă sunt definite două poziții succesive ale modelului sculei în raport cu modelul



semifabricatului, forma și aria așchiei detașate pentru fiecare dinte (în Fig. 4.2, A_{k-1} , A_k , A_{k+1}), pot fi definite.

Mărimea așchiei detașate simultan, A_{Σ} rezultă prin însumarea ariilor așchiilor detașate de cei N dinți în contact cu semifabricatul, la un moment dat:

Fig. 4.2 Așchie detașată de dinții succesivi ai cuțitului roată

$$A_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N A_{ki} \quad (4.3)$$

Abordarea analitică este riguroasă. Totuși, dezvoltarea unei aplicații numerice dedicate pentru evaluarea formei și ariei așchiei detașate de dinții sculei-roată în procesul de așchiere este deosebit de complexă și laborioasă totodată. Din această cauză, a fost imaginată în prezenta teză, o soluție grafică, dezvoltată în mediul CATIA, prezentată în cele ce urmează.

Pentru o înțelegere a modului în care se poate simula în CATIA generarea dinților evolventici, se prezintă un exemplu de danturare a unui pinion cu $z_p=30$ dinți, $m=10$ mm, cu o sculă roată având $z_r=20$ dinți.

Profilul sculei rezultă prin multiplicarea profilului unui dinte în jurul axei sculei și modelul este generat extrudându-l cu comanda "Pad".

Modelul semifabricatului se obține pornind de la o formă plană circulară cu raza

$$R_{ep1} = m \cdot (z_p + 2)/2. \text{ (În exemplul prezentat, } R_{ep1} = 160 \text{ mm.)}$$

Inițial, se stabilește poziția relativă a sculei și semifabricatului de la care începe procesul de danturare.

Astfel, modelul sculei este rotit până la suprapunerea axei dintelui cu linia care unește centrele sculei și semifabricatului și se aduc în contact (Fig. 4.4).

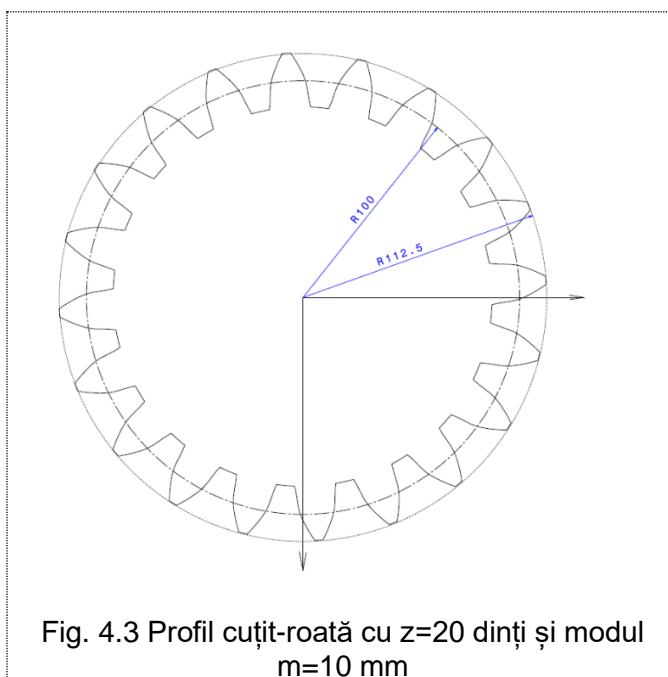


Fig. 4.3 Profil cuțit-roată cu $z=20$ dinți și modul $m=10$ mm

Mișcările executate de sculă și semifabricat în procesul de danturare sunt simulate în formă discretă.

Incrementul de rotație al semifabricatului se consideră $\Delta\varphi = 1^\circ$.

Corespunzător mărimii acestui increment, condiția (4.1) impune ca incrementul de rotație al sculei să fie de $\Delta\varphi = 1,5^\circ$.

În același timp, până la tangența cercurilor de rulare, distanța între axele sculei și semifabricatului se micșorează cu 0,25 mm pentru fiecare avans unghiular executat (mărime ce corespunde avansului radial).

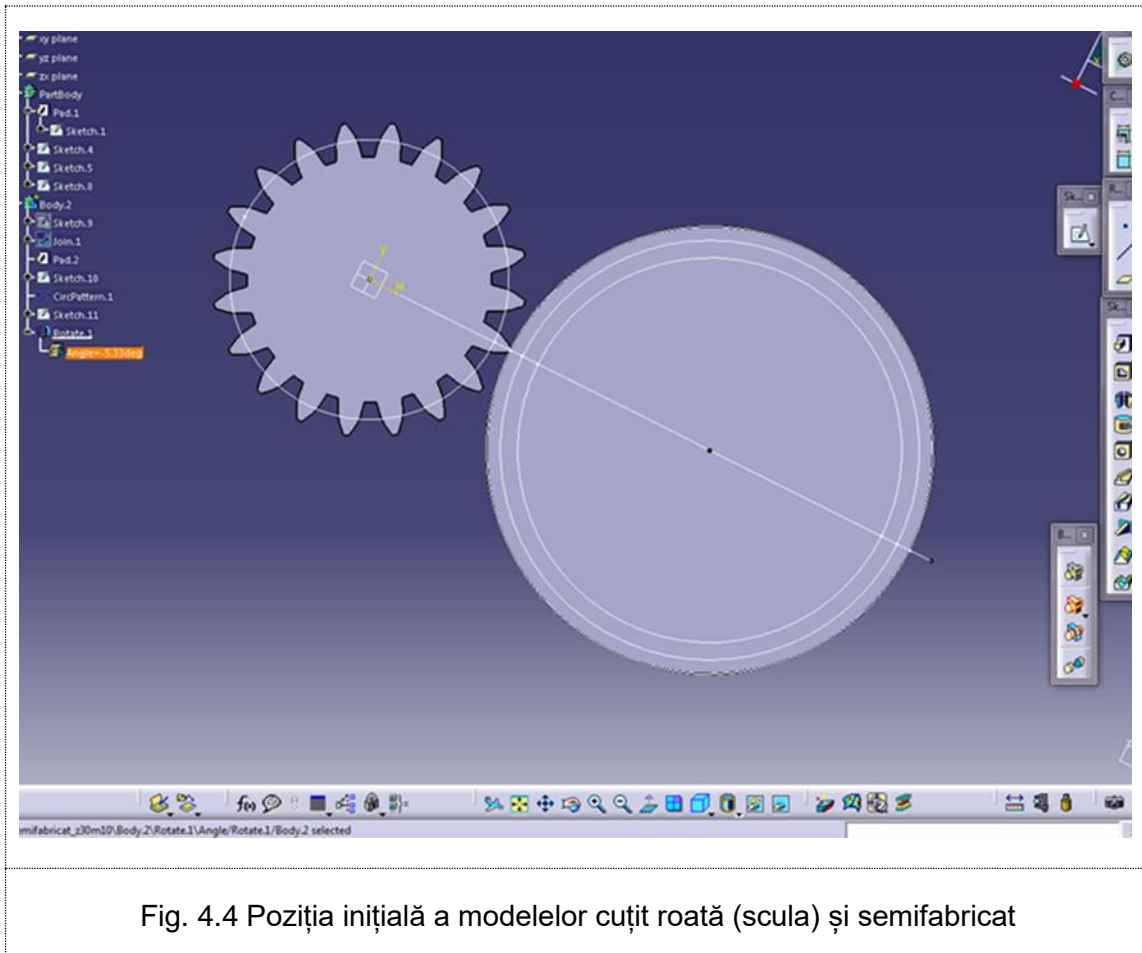


Fig. 4.4 Poziția inițială a modelelor cuțit roată (scula) și semifabricat

Pozițiile relative ale sculei și semifabricatului se obțin importând în fișierul în care s-a creat modelul semifabricatului, modelul sculei, după ce, în prealabil acestea au fost repositionate astfel încât să se respecte mișcările pe care semifabricatul, respectiv scula le fac în procesul fizic de danturare, pe mașina de lucru.

În urma suprapunerii celor două modele, părțile comune vor reprezenta forma și mărimea așchiilor care, la o prelucrare fizică se vor îndepărta din semifabricat.

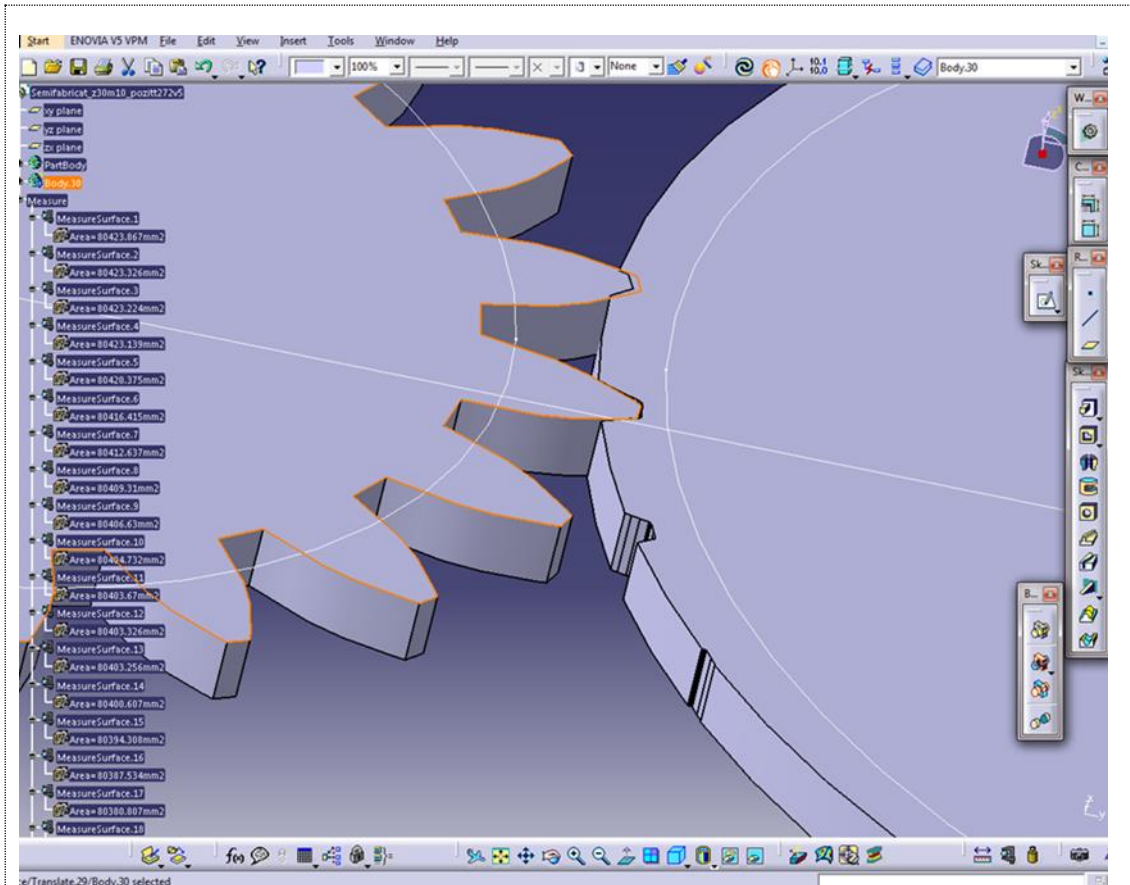


Fig. 4.5 Poziția relativă a modelelor sculei și semifabricatului în procesul danturării

În CATIA, folosindu-se comanda "Remove", din suprafața inițială a modelului semifabricatului se îndepărtează partea comună cu modelul sculei, rezultatul fiind o nouă suprafață având forma și aria diferite.

Diferența între mărimea ariei inițiale ale suprafeței și cea de după prelucrare reprezintă aria așchii detașate.

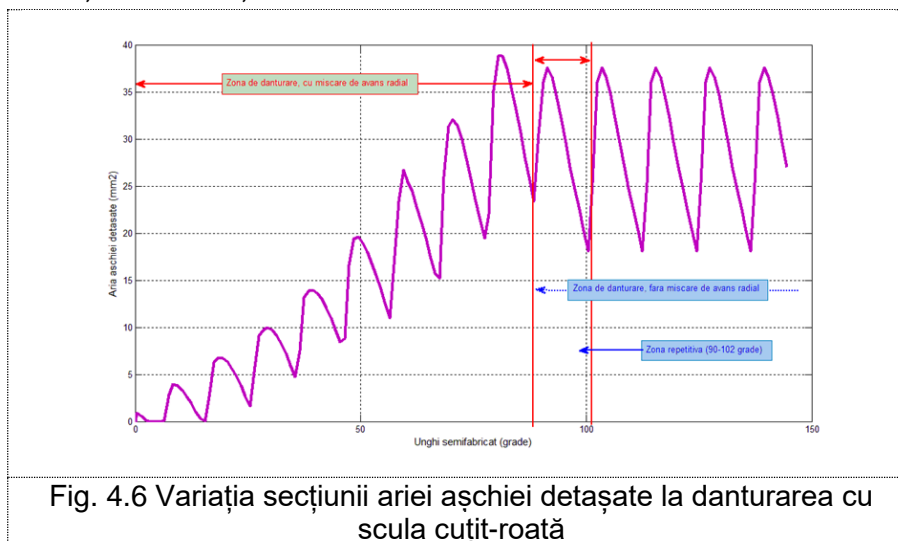


Fig. 4.6 Variația secțiunii ariei așchii detașate la danturarea cu scula cuțit-roată

Evoluția mărimii așchii, funcție de poziția relativă a sculei față de semifabricat se poate vedea în Fig. 4.6.

Analizând Fig. 4.6, se disting două regiuni.

Prima regiune prezintă o variație a mărimii așchii detașate datorate interacțiunii sculei cu

semifabricatul, scula având atât avans circular, pentru realizarea mișcării de rulare, cât și o

mișcare de pătrundere radială (până la tangența cercurilor de rulare, fapt petrecut în exemplul dat, la cursa dublă a 90-a).

Cea de a doua regiune debutează de la cursa dublă 90 și prezintă o variație oscilatorie a mărimii așchii față de o mărime mediană până la finele generării întregii danturi.

Zona repetitivă de valori ale secțiunii așchiilor formate se întinde pe un interval de 12°, echivalentul pasului unghiular al danturii roții care se realizează.

Concluzia este că, dacă se dorește o uniformizare a secțiunii așchii, mărimea acesteia fiind impusă astfel încât solicitarea energetică să fie cât mai constantă pe parcursul danturării complete a roții, trebuie să tratăm separat cele două zone ale graficului.

Acesta este motivul pentru care, cu ajutorul mediului de dezvoltare pentru calcul numeric, MatLab, a fost identificată o funcție care aproximează destul de bine distribuția grafică a rezultatelor, pentru intervalul 0 ... 90° (Fig. 4.7), funcția fiind de forma:

$$f(x) = a_1 \cdot \sin(b_1 \cdot x + c_1) + a_2 \cdot \sin(b_2 \cdot x + c_2) + \dots + a_7 \cdot \sin(b_7 \cdot x + c_7) \quad (4.4)$$

unde, $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, \dots, a_7, b_7, c_7$ sunt coeficienți identificați de program.

Rulând programul de uniformizare a secțiunii așchiilor, pe intervalul 0...90° și stabilind mărimea ariei așchii de 10 mm², rezultă datele din Tabelul 4.1 - A.

Graficul comparativ pentru cele două situații este prezentat în Fig. 4.8.

Pentru realizarea așchierii cu secțiune constantă, de această valoare, sunt necesare 130 de curse duble, față de 90 - în cazul așchierii cu avans constant.

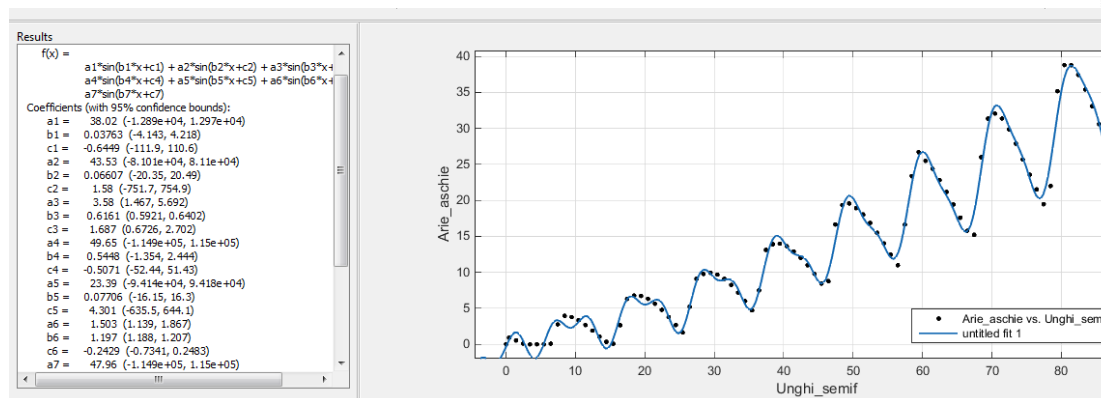


Fig. 4.7 Funcție de aproximare a secțiunii așchiilor detașate la prelucrarea unei roți dințate cu sula cuțit-roată (zona de avans radial)

Tabelul 4.1 – Danturarea cu sula cuțit-roată, cu obținerea unei secțiuni constante a așchii detașate. A -Zona de avans radial; B – Zona repetitivă

Uniformizarea ariei așchii detașate la danturarea unei roți dințate cu z=30 dinti si modul m=10 cu un cutit roata cu 20 dinti.						Uniformizarea ariei așchii detașate la danturarea unei roți dințate cu z=30 dinti si modul m=10 cu un cutit roata cu 20 dinti.								
A - Zona de rulare + avans radial, pana la tangenta cercurilor de rulare						B - Zona repetitivă								
Nr. crt.	Unghiul semifabric.	Aria aschiei	Nr. crt.	Unghiul semifabric.	Aria aschiei	Nr. crt.	Unghiul semifabric.	Aria aschiei	Nr. crt.	Unghiul semifabric.	Aria aschiei	Nr. crt.	Unghiul semifabric.	Aria aschiei
1	9.78	9.914121	46	58.23	9.993458	91	76.79	10.03135	1	90.29	10.04967	19	95.49	9.90872
2	12.76	9.920152	47	58.68	10.01897	92	77.28	9.96874	2	90.57	10.06392	20	95.83	9.933709
3	17.69	9.921059	48	59.09	9.965055	93	77.75	9.945983	3	90.84	9.932116	21	96.18	9.929129
4	19.24	9.933545	49	59.48	10.02338	94	78.19	10.04851	4	91.11	10.06899	22	96.55	10.1616
5	21	9.934383	50	59.86	10.06768	95	78.59	10.0231	5	91.38	10.13488	23	96.93	10.06815

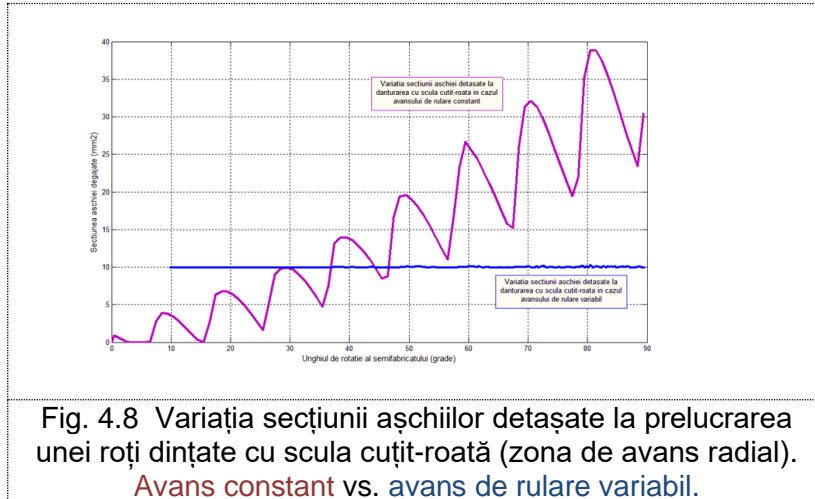


Fig. 4.8 Variația secțiunii așchiilor detașate la prelucrarea unei roți dințate cu scula cuțit-roată (zona de avans radial). Avans constant vs. avans de rulare variabil.

Folosind funcția "Curve Fitting" din MatLab și prelucrând datele privind variația secțiunii așchiilor măsurate în intervalul 90...102° se obține o funcție polinomială (4.5), (Fig. 4.9) care va fi utilizată la calculul avansului necesar a fi aplicat sculei, astfel încât să se obțină secțiuni cumulate ale așchiilor de aproximativ 10 mm².

Funcția este de forma:

$$f(x) = p_1 \cdot x^5 + p_2 \cdot x^4 + p_3 \cdot x^3 + p_4 \cdot x^2 + p_5 \cdot x + p_6 \quad (4.5)$$

și rezultatele rulării programului de uniformizare sunt prezentate în Tabelul 4.1 – B.

Comparația între mărimea așchiilor obținute în cele două moduri se poate vedea în Fig. 4.10.

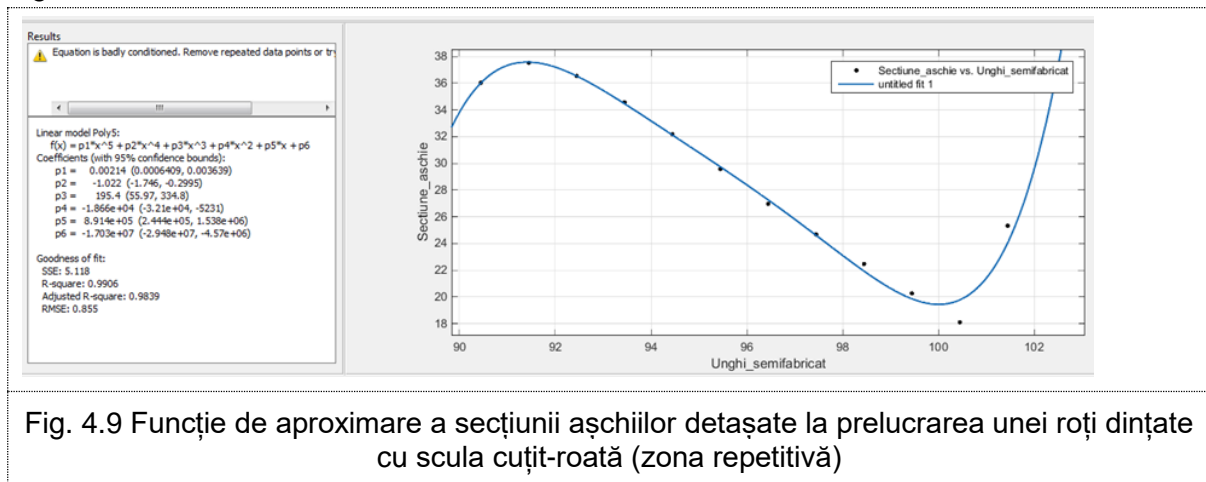


Fig. 4.9 Funcție de aproximare a secțiunii așchiilor detașate la prelucrarea unei roți dințate cu scula cuțit-roată (zona repetitivă)

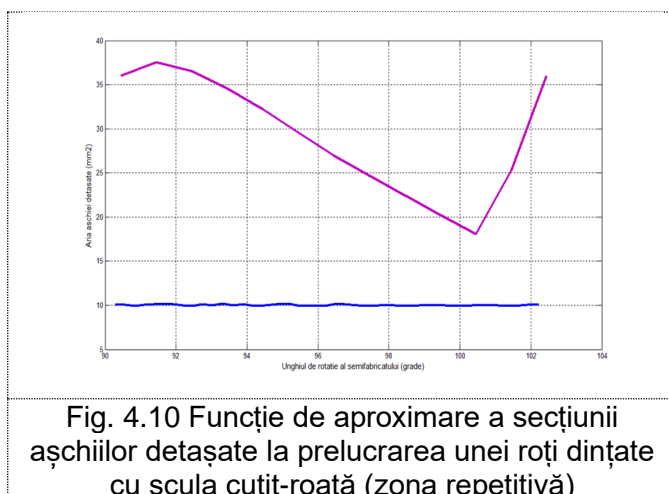


Fig. 4.10 Funcție de aproximare a secțiunii așchiilor detașate la prelucrarea unei roți dințate cu scula cuțit-roată (zona repetitivă)

Concluzii:

Modificarea avansului circular, la danturarea roților dințate cilindrice, cu profil evolventic, folosind cuțite-roată poate conduce la obținerea de așchii relativ constante, pe toată durata prelucrării. Mărimea secțiunii așchiilor se poate stabili la valori care să permită optimizarea încărcării energetice a mașinilor de danturat, numărul de curse duble necesare realizării danturii crescând odată cu micșorarea secțiunii.

Pentru stabilirea funcțiilor de aproximare a distribuției mărimii așchiilor pe timpul danturării complete a roții dințate, trebuie analizate separat cele două zone ale graficului, cea de început, când, pe lângă avansul circular, de rulare, există și un avans radial și cea de după tangența cercurilor de rulare ale sculei și semifabricatului.

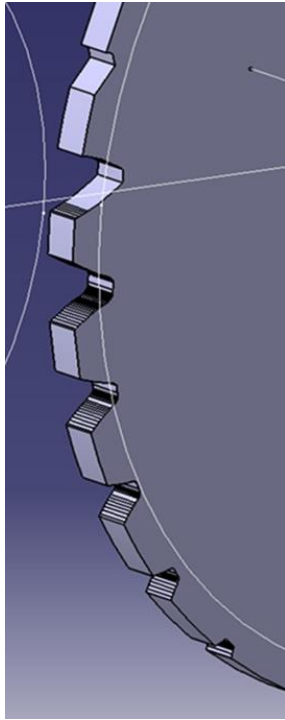


Fig. 4.11 Semifabricat parțial prelucrat

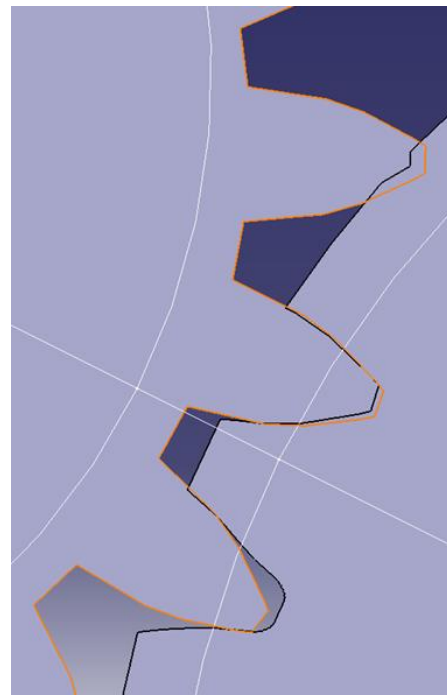


Fig. 4.12 Formare așchii la danturarea cu cuțit roată

5. Uniformizarea ariei așchii detașate la prelucrarea melcilor evolventici cu cuțite rotative

5.1. Introducere

Modelarea schemelor de așchiere, mai ales pentru sculele cu mai mulți dinți, care generează prin înfășurare, prin metoda rulării, este o problemă aparte, care are ca scop determinarea formei și dimensiunilor așchiilor detașate, în vederea uniformizării încărcării energetice a tășurilor sculelor, cu efect direct asupra uzării acestora sau pentru a asigura o uniformizare a momentelor de așchiere, cu repercusiuni asupra productivității [50].

Dezvoltarea mediilor de programare grafică a permis abordarea unor astfel de probleme cu mai mare ușurință, datorită facilităților oferite de metodele grafice. Se pot obține, astfel, deosebit de riguros, forma sculelor care generează prin înfășurare danturi sau suprafețe elicoidale și, de asemenea, se pot analiza procesele de generare sub aspectul determinării formei așchiilor și ariilor acestora, în vederea uniformizării încărcării energetice a tășurilor sculelor.

În prezentul capitol, se propune un algoritm pentru determinarea ariilor așchiilor detașate de cuțitul rotativ, la generarea melcilor evolventici cilindrici.

Dantura cuțitului rotativ se consideră a fi evolventică.

Metoda analitică de modelare a procesului formării așchii la contactul între cuțitul rotativ, cu profiluri evolventice ale flancurilor și semifabricatul melcului generat este un proces dificil de abordat, necesitând și o amplă analiză prin programe de calcul.

Astfel, se impune abordarea problematicii propuse prin modelarea procesului într-un mediu grafic de proiectare, precum CATIA, ale cărui facilități ușurează substanțial obținerea rezultatului într-o astfel de analiză.

5.2. Modelarea grafică a mărimii ariei așchiilor detașate la generarea cu cuțit rotativ a melcului cilindric evolventic

Metoda grafică de determinare a formei și mărimii cumulate a ariilor așchiilor detașate de dinții cuțitului rotativ, dezvoltată în mediul CATIA, constituie o alternativă mult mai facilă decât cea analitică.

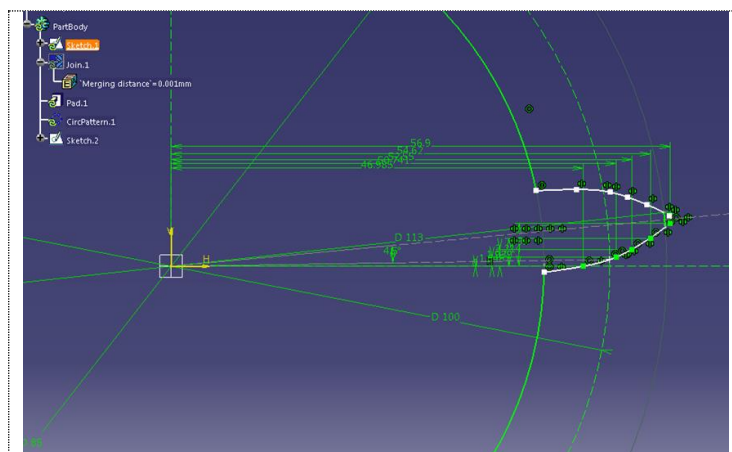


Fig. 5.1 Profil evolventic obținut prin calcul ($z20m5$)

Soluția grafică este dezvoltată referitor la generarea unui melc cilindric cu profil evolventic, de modul $m=5$ mm, având diametrul exterior $2 \cdot r_e = 34$ mm, cu o sculă cuțit rotativ având $z=20$ dinți.

Pentru simularea în CATIA (Computer Aided Three dimensional Interactive Applications) a danturării unui melc globoidal folosind cuțitul rotativ este necesar să se realizeze separat cele două

elemente care vor interacționa (cuțitul rotativ și cilindru din care se va obține prin prelucrare melcul).

După obținerea schiței, aceasta este extrudată folosind instrumentul de modelare **Pad** din bara de instrumente *Sketch Based Features* rezultând o placă circulară cu un singur dinte.

Dintele obținut este multiplicat pe circumferința cercului de fund prin utilizarea comenzii *Circular pattern*, rezultând produsul CATIA care va simula mișcările cuțitului rotativ.

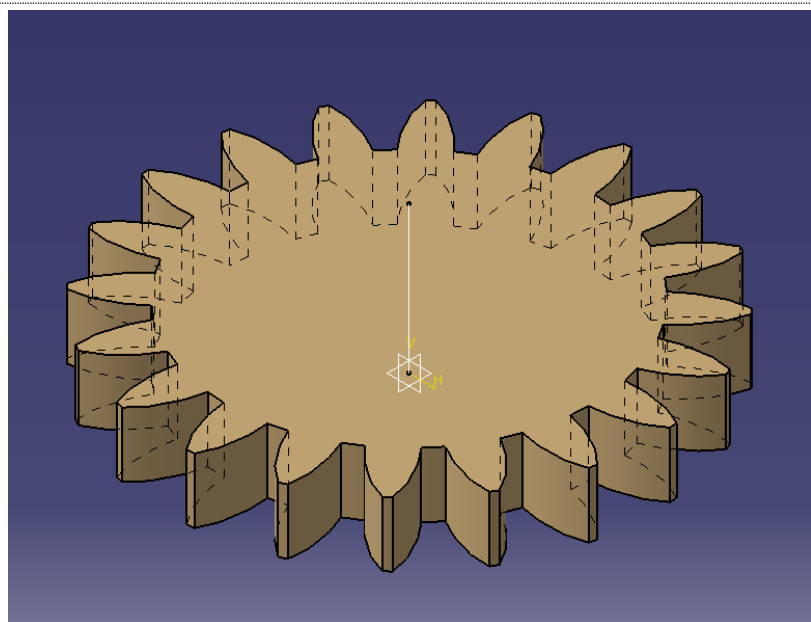


Fig. 5.2 Cuțit rotativ (z=20 dinți, m=5mm)

Semifabricatul din care se va obține melcul este un cilindru $\phi 34$ mm.

Pentru măsurarea secțiunii așchiilor formate la prelucrare, se împarte cilindru în 8 secțiuni (Fig. 5.3).

Se simulează mișcarea sculei și semifabricatului considerând pași de rotație de 45° a modelului semifabricat, care corespund (pentru respectarea condiției de rulare), unui unghi de rotație a cuțitului rotativ cu $\Delta\Phi_1 = \frac{2 \cdot \pi}{8 \cdot z} = 2,25^\circ$, pentru fiecare secțiune axială

urmărită, și unei translații a planului de măsură situat pe respectiva secțiune cu

$$\lambda \cdot \Delta\Phi_1 = 0.0625 \text{ mm}$$

Pentru fiecare poziție relativă a sculei față de semifabricat, cele două modele, ale sculei și semifabricatului se suprapun, așchia este separată din semifabricat, cu comanda *Remove* și suprafața semifabricatului rămasă (în respectivul plan de măsură) este măsurată.

Forma și aria așchiei detașate rezultă comparând suprafața curentă cu suprafața anterior măsurată în aceeași secțiune axială

Generarea completă a melcului, în condițiile date, necesită 23 rotații complete a semifabricatului, dacă se acceptă că avansul radial al sculei (cuțitul rotativ) este de 0.5 mm/rotație.

Sucesiunea formării așchiilor dintr-un semiplan este prezentată în Fig. 5.4.

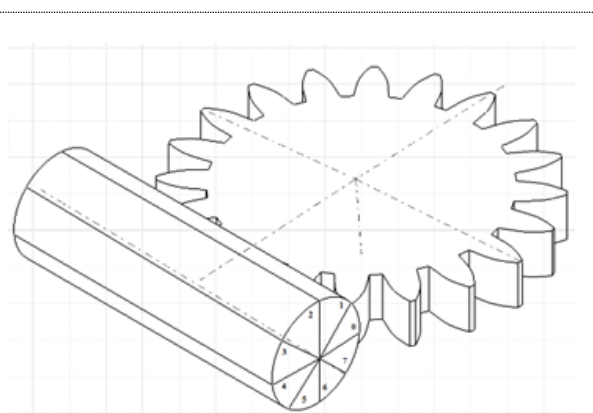


Fig. 5.3 Planele de măsură ale secțiunii așchiilor, la prelucrarea melcului globoidal cu cuțitul rotativ

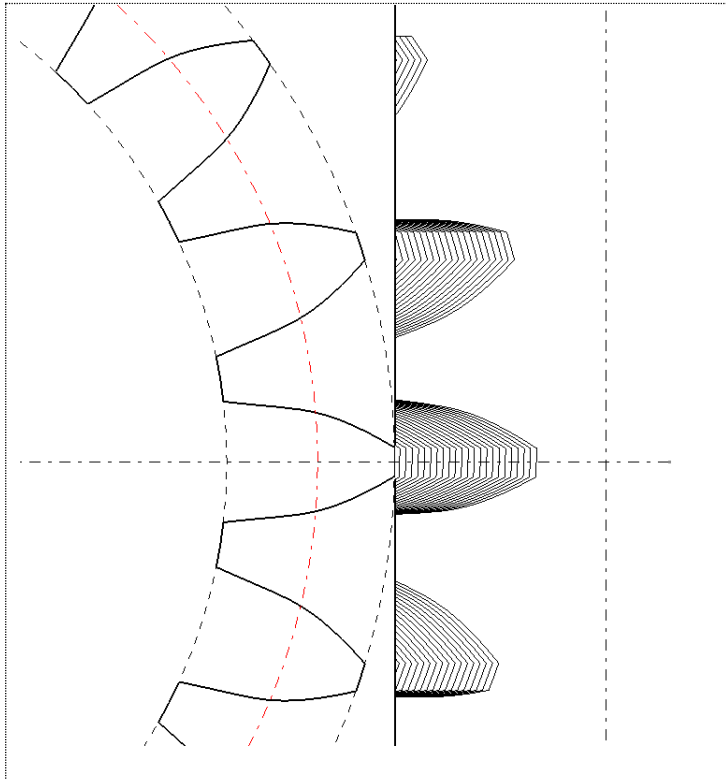


Fig. 5.4 Formare gol – melc globoidal (z20m5)

Un grafic al variației secțiunii așchiilor detașate, măsurate în cele 8 semiplane, bazat pe datele înregistrate, este reprezentat în Fig. 5.5, iar o funcție de aproximare a acestui grafic, sub formă de sumă de sinusuri, care ar putea fi utilizată pentru a încerca o relativă uniformizare a acestora.

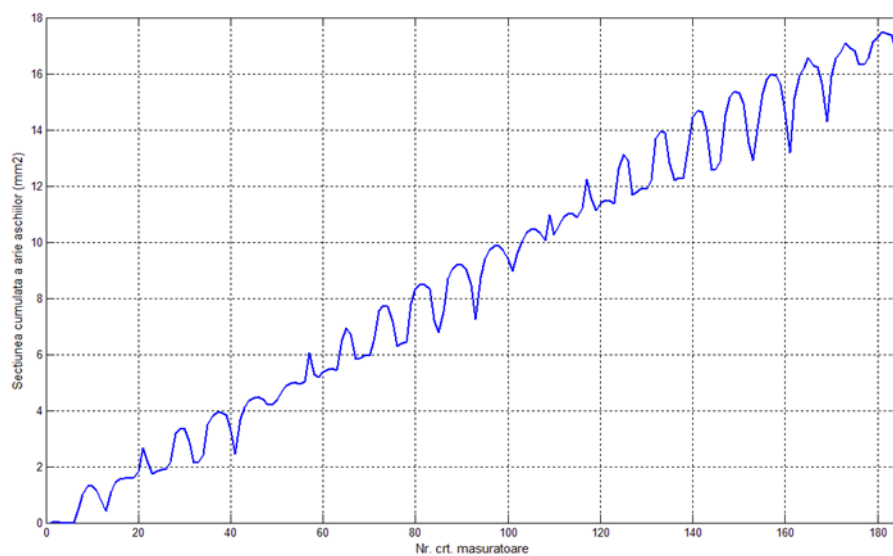


Fig. 5.5 Evoluția secțiunii așchiilor detașate la prelucrarea unui melc globoidal (z20m5)

Spre deosebire de situațiile prezentate în capitolele anterioare, în cazul așchierii melcului globoidal, nu mai putem acționa discret asupra avansului, melcul obținându-se prin strunjire, cuțitul fiind acționat în corelație cu mișcarea de rotație a semifabricatului.

Deci, legea de variație nu mai dă o valoare a deplasării sau modificării unghiului/cursă dublă, ci o valoare a avansului/rotație, sau pe fracțiune de rotație.

Dat fiind faptul că avem măsurător din 45 în 45°, am optat pentru calculul avansului pe optime de rotație a semifabricatului.

Putem alege pentru aproximarea funcției de distribuție a secțiunii așchiilor pe timpul prelucrării melcului globoidal o funcție de gradul 1, de forma (vezi și Fig. 5.6):

$$f(x) = p_1 \cdot x + p_2 \quad (5.1)$$

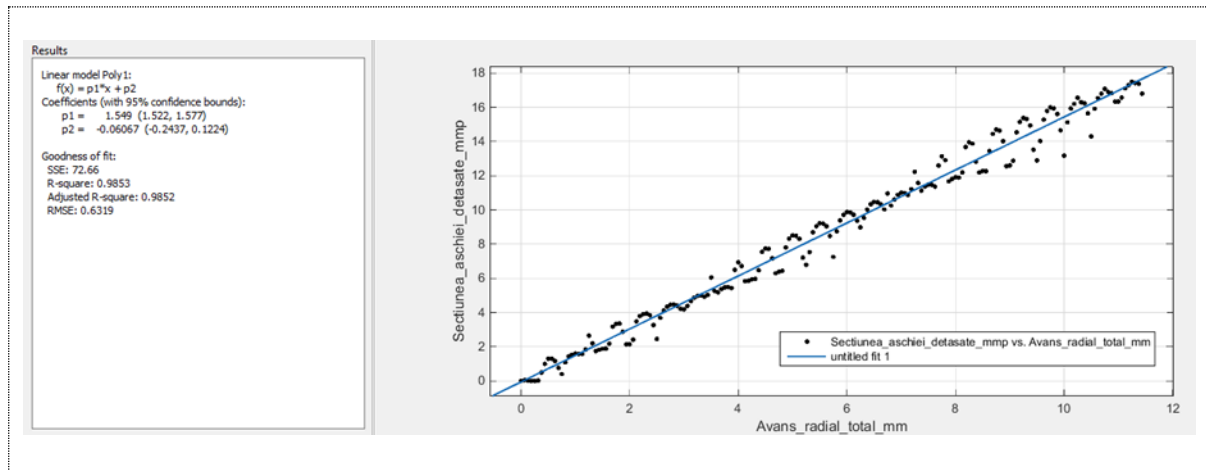


Fig. 5.6 Funcție polinomială de grad 1 pentru aproximarea secțiunii așchiilor detașate la prelucrarea unui melc globoidal (z20m5)

(În Fig. 5.6, pe abscisă este reprezentat avansul cuțitului-roată, pornind de la contactul cu semifabricatul. Aria așchiilor măsurată, corespunde unui avans de 0.0625 mm, pe timpul rotației semifabricatului cu 45°).

Dacă se impune ca aria așchiilor formate să fie de aproximativ 2 mm², rulând programul de uniformizare a acestora, cu datele obținute se construiește graficul din Fig. 5.7.

Valoarea impusă a secțiunii așchii fiind mult mai mică decât valorile măsurate în condițiile unui avans a cuțitului de 0.5 mm/rotație semifabricat, numărul de rotații efectuate de semifabricat crește de la 23, la 744/8=93.

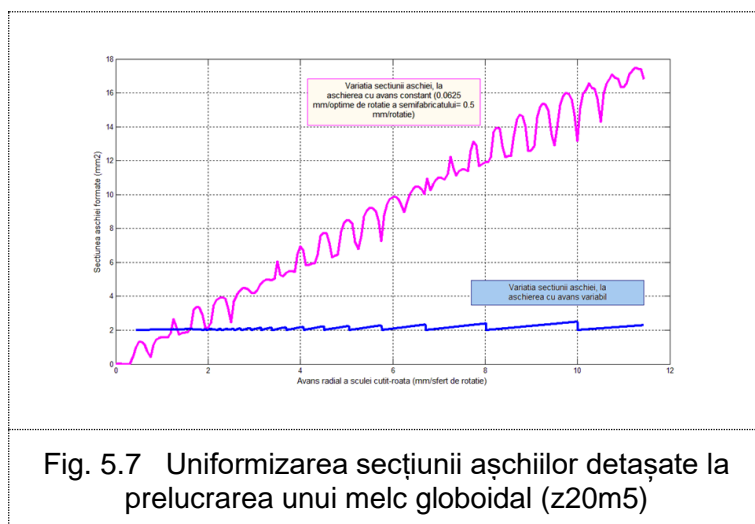


Fig. 5.7 Uniformizarea secțiunii așchiilor detașate la prelucrarea unui melc globoidal (z20m5)

Solicitarea mașinii, însă scade foarte mult, față de primul caz, când așchiile formate aveau arii cuprinse între 0 și 17 mm² (Fig. 5.7).

În concluzie, aria secțiunii așchiilor formate la prelucrarea melcilor globoidali folosind cuțite-roată poate fi controlată și menținută la valori

impuse, prin controlul avansului sculei așchietoare, dacă se cunoaște legea de variație a secțiunii așchiilor pe parcursul unei prelucrări simulate într-un mediu grafic.

6. Uniformizarea ariei așchii detașate la prelucrarea suprafețelor cu profil neevolventic

Metodele de generare a profilurilor neevolventice au fost impuse de necesitatea realizării unor organe de mașini capabile a transmite momente de torsiune, care utilizează suprafețe cuprinse (arbori) sau cuprinzătoare (alezaje) cu suprafețe active poliedrice, ca substitut al arborilor și butucilor cu caneluri. Cele mai frecvente sunt suprafețe cu secțiuni transversale pătrate.

Generarea acestor tipuri de suprafețe, alezaje sau arbori, se poate realiza și prin metoda rulării, utilizând scule de tip cuțit-roată pentru alezaje și scule cremalieră pentru arbori.

Soluția arborilor și bucșelor profilate pentru organe de mașini care transmit momente mari de torsiune constituie o soluție simplă, acestea putând fi generate cu scule simple și relativ facil de realizat. Amintim că din punct de vedere constructiv soluția poate fi înlocuită cu suprafețe cilindrice cuprinse (arbori) și cuprinzătoare de tip poliform [17].

În prezentul capitol se analizează cazul generării cu cuțitul roată a unui alezaj cu profil pătrat și totodată a unui arbore cu același profil.

Analiza se desfășoară printr-o abordare analitică, în baza teoremelor specifice a suprafețelor în înfășurare și, de asemenea, prin modelare grafică în mediul Catia cu scopul optimizării formei și mărimii ariei așchie de atașate de dinți sculelor roată sau cremalieră. Se analizează situația în care avansul circular de generare (în procesul de rulare a centroidelor asociate sculei și semifabricatului) este realizat neuniform cu efect asupra mărimii ariei așchii detașate, care să conducă la detașare unei așchii de mărime relativ constantă care aduce după sine o uniformizare a mărimii forței principale de așchiere, cu repercusiuni imediate asupra uzurii sculei și deformațiilor elastice produse în procesul prelucrării, aceasta conducând la o diminuare a erorilor de prelucrare.

Evident, aplicarea unei asemenea soluții presupune capacitatea mașinii unelte de a realiza un avans neuniform după o lege care poate fi determinată și care poate fi transpusă pe mașina uneltă printr-un lanț cinematic comandat numeric [32].

6.1. Cuțit-roată pentru generarea unui alezaj cu secțiune transversală pătrată.

Abordarea problemei se face în baza teoremelor fundamentale ale înfășurării suprafețelor [18], [33].

Facem observația că o metodă apropiată a fost aplicată în scopul imaginării unor modificări constructive ale sculelor cremalieră și cuțit-roată care au condus la propuneri brevetate de cuțite-roată sau scule cremalieră reconfigurabile [25].

Se poate dezvolta o metodă analitică pentru profilarea sculei de tip roată, generatoare a unui alezaj cu profil transversal pătrat, dar este foarte complexă.

Din acest motiv, se apelează la o metodă grafică, dezvoltată în CATIA, ca soluție a problemei propuse – determinarea ariei așchii detașate de muchiile de așchiere ale sculei (cuțitul roată) în procesul de mortezare.

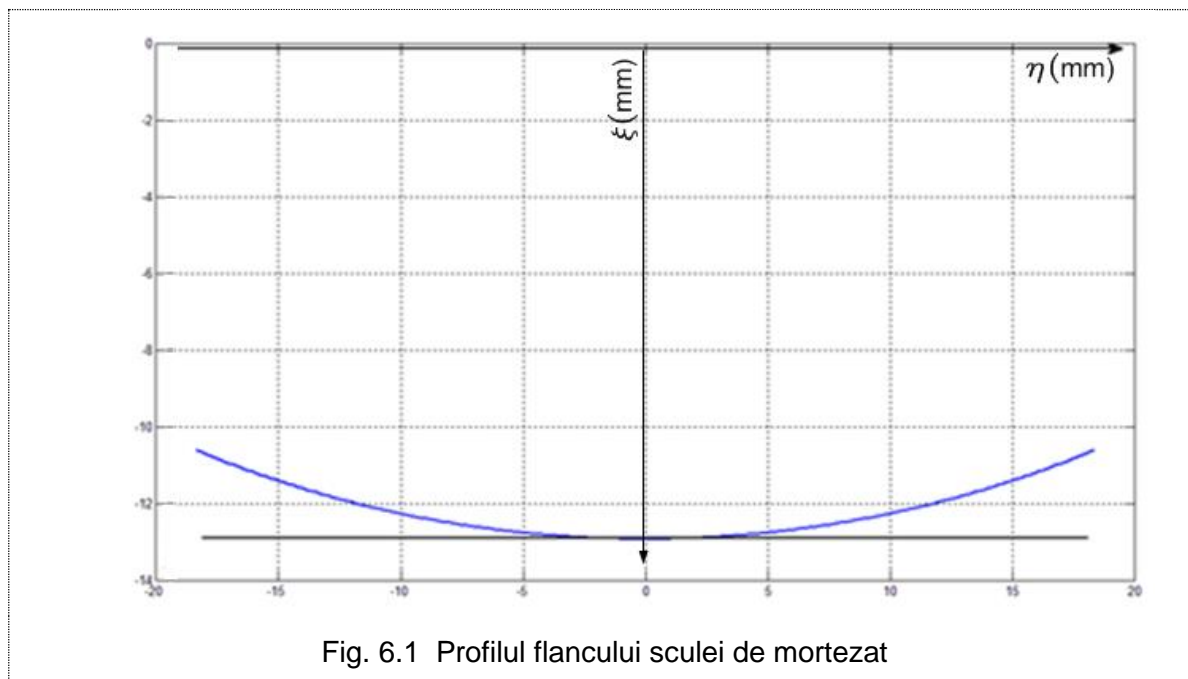
Generarea pe mașina de danturat presupune existența în semifabricat, a unui alezaj, obținut printr-un proces de așchiere, de exemplu, burghiere.

Se definesc razele de rulare:

- a semifabricatului (modelului), $R_{rp} = a \cdot \sqrt{2} = 20,284 \text{ mm}$.
- a sculei (cuțitul roată), $R_{rt} = R_{rp}/i = 7,071 \text{ mm}$,

cu i raportul de transmitere.

Folosind o aplicație dezvoltată în MatLab se identifică un număr suficient de coordonate ale unor puncte de pe profilul sculei și se trasează (Fig. 6.1).



Incrementul de variație al parametrului u este Δu 0,2 mm.

În Fig. 6.1 sunt prezentate în spațiul $\xi\eta$ profilurile transversale ale alezajului pătrat și ale cuțitului de mortezat.

6.1.1. Modelarea schemei de generare în mediul grafic CATIA

A fost dezvoltată o soluție a problemei determinării schemei de așchiere la mortezare cu cuțite roată a unei bucșe cu secțiunea transversală pătrată, cu latura de 40 mm.

Modelul cuțitului roată se definește pornind de la forma analitică a profilului flancului și Fig. 6.1. Coordonatele flancului profilului cuțitului roată sunt introduse în CATIA, în modul Sketcher, profilul obținându-se prin unirea acestora printr-o curbă spline, reprezentată în Fig. 6.2, pentru o latură a sculei de mortezat. Utilizând modul Mirror din bara de operații se construiesc și celelalte laturi (muchii de așchiere) ale sculei (Fig. 6.3).

Prin "extrudarea" profilului creat, se obține modelul solid al sculei de mortezat, care va fi utilizat în continuare la simularea procesului de așchiere (Fig. 6.4.).

Modelul semifabricatului este creat sub forma unei coroane circulare, într-un fișier separat, folosind instrumentul de modelare "Pad" (Fig. 6.5). Diametrul interior al coroanei se consideră ca fiind egal cu latura pătratului care se va genera.

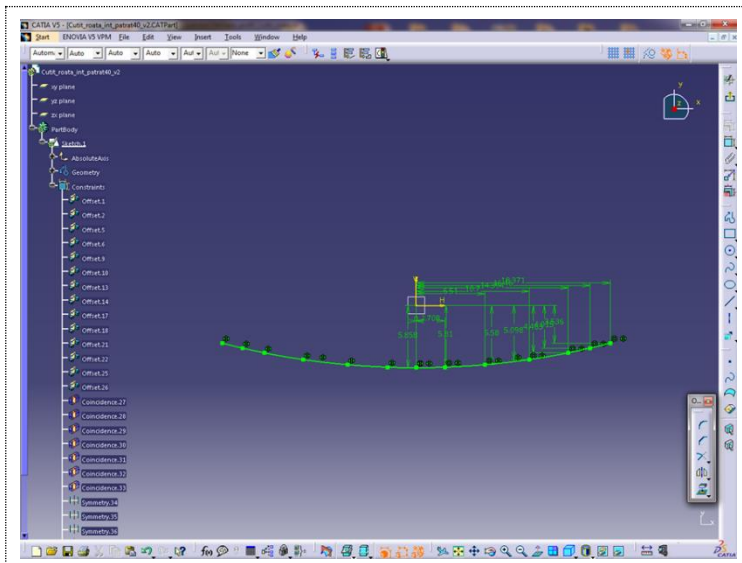


Fig. 6.2 Modelarea în CATIA a profilului sculei de mortezat

repoziționarea sculei față de semifabricat, cele două modele se rotesc în jurul axelor cu unghiuri astfel alese încât să se respecte condiția de rulare.

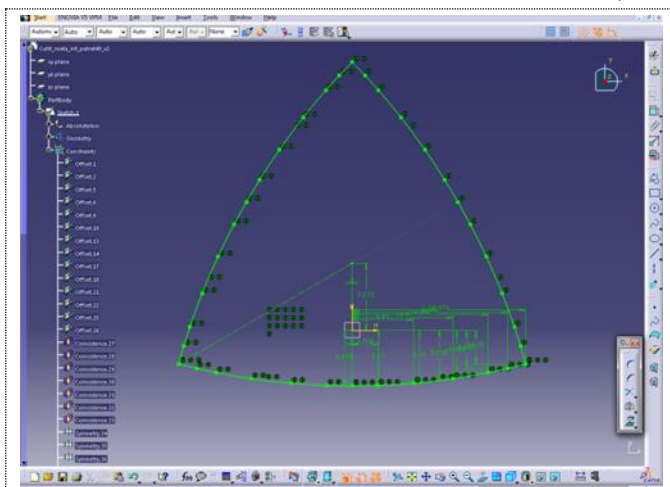


Fig. 6.3 Modelarea profilului frontal al cuțitului de mortezat

deoarece prima tăietură nu se ia în calcul (secțiunea măsurată a așchii fiind de fapt o sumă de arii ale așchiilor generate până la atingerea colțului bușei), iar ultimele așchii generate (în intervalul unghiular 279-360°) au secțiuni mici datorită ajungerii sculei în zona deja prelucrată la început.

Analiza datelor obținute prin simulare se face cu ajutorul programului MatLab.

Cele două modele, al semifabricatului și al cuțitului de mortezat sunt puse în poziția relativă de start a procesului de generare și se îndepărtează o primă așchie, care nu se ia în calcul la obținerea graficului de variație a secțiunii așchiilor îndepărtate în timpul procesului de așchiere. În cazul prelucrării efective, în practică, se propune începerea prelucrării avansând cuțitul roată spre unul din colțurile bușei, până la atingerea colțului acesteia.

Pentru simularea așchierii, înainte de

Modelarea procesului incremental de rulare a semifabricatului și cuțitului roată este prezentat în Fig. 6.6; Fig. 6.7.

Se simulează prelucrarea, cu respectarea condiției de rulare între sculă și semifabricat, până se obțin toate cele 4 laturi.

Mărimea așchiilor a fost măsurată după fiecare intersecție a modelului semifabricat cu modelul cuțitului.

Evoluția variației secțiunii așchii care se va lua în calcul pentru găsirea unei soluții de uniformizare, se identifică în tabel în intervalul unghiular 3-276°,

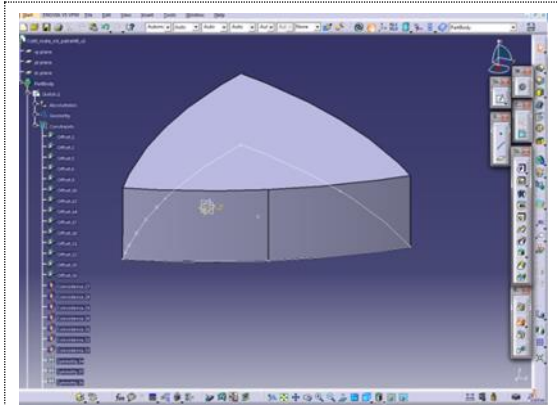


Fig. 6.4 Modelul solid al cuțitului de mortezat

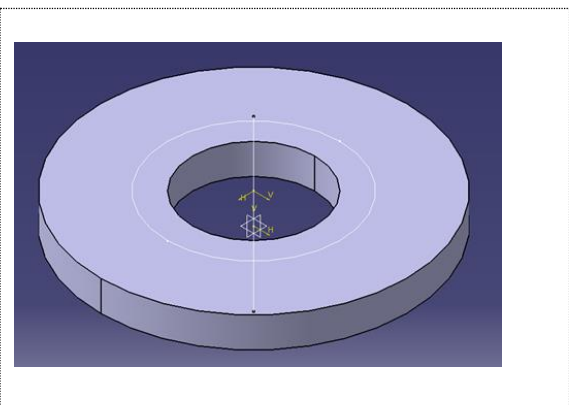


Fig. 6.5 Modelul semifabricatului și axele sistemului de referință

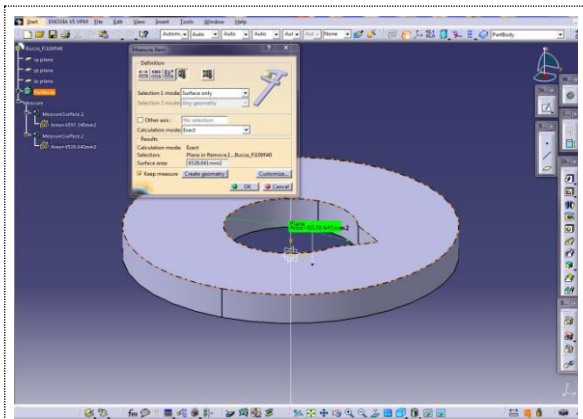


Fig. 6.6 Semifabricat la începutul modelării

Modul în care variază aria așchiilor detașate, funcție de poziția unghiulară a semifabricatului poate fi observat în Fig. 6.10, unde se poate remarca o gamă largă de valori ale acestora.

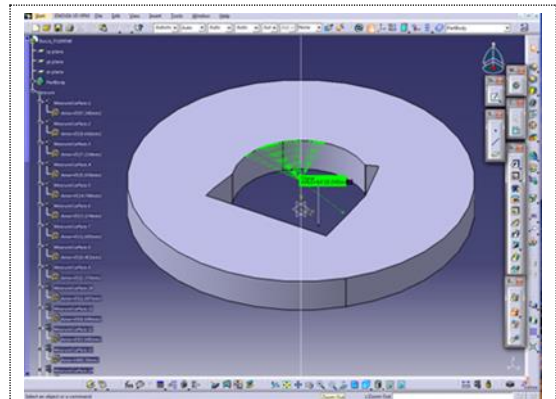


Fig. 6.7 Semifabricat parțial prelucrat

Astfel, secțiunea cumulată a așchiilor îndepărtată la o cursă dubla are valori cuprinse între 1.2 și 4.6 mm², raportul dintre aria maximă

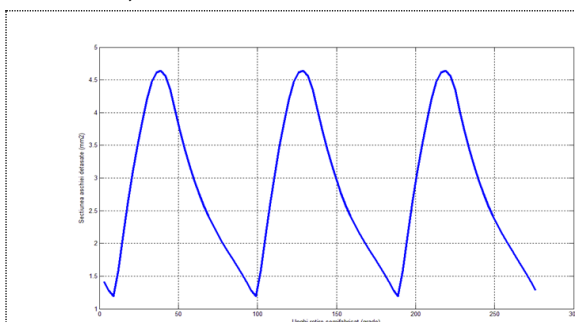


Fig. 6.8 Evoluția secțiunii așchiilor detașate la generarea prin rulare a unei bușe pătrate cu latura de 40 mm

și cea minimă fiind de aproape 4:1. Implicit, solicitările mecanice ale componentelor cu rol în formarea așchiei variază foarte mult.

Pentru a se controla mișcarea ansamblului piesă-sculă, astfel încât să se uniformizeze secțiunea așchiilor, în primul rând trebuie identificată o lege de variație a acestora, funcție de un parametru.

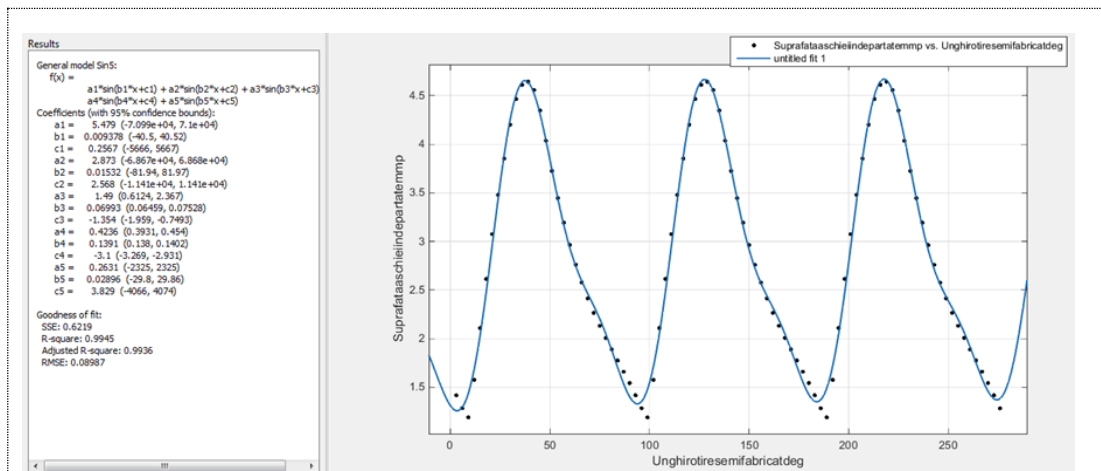


Fig. 6.9 Funcția de aproximare a evoluției secțiunii așchiilor detașate la generarea prin rulare a unei bușe pătrate cu latura de 40 mm

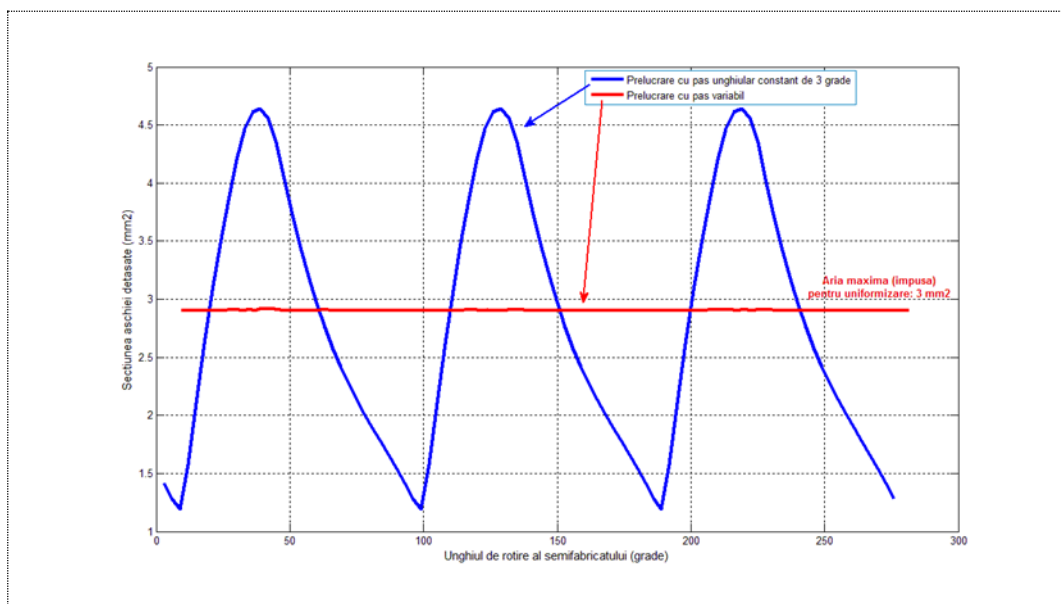


Fig. 6.10 Evoluția secțiunii așchiilor detașate la generarea prin rulare cu pas constant vs. pas variabil

6.2. Modelarea 3D în CATIA a generării cu scula cremalieră a unui arbore cu secțiune transversală pătrată.

Modelarea schemei de așchiere la generarea cu scula de tip cremalieră – monodinte sau polidinte, pentru arbori mărginiți de suprafețe poliedrale (arbori cu secțiune pătrată sau hexagonală) poate pune în evidență neuniformitatea ariei așchii detașate la generare și creează premisele pentru uniformizarea procesului de prelucrare, prin implementarea unei scheme de generare cu o așchie relativ uniformă, care va conduce la o forță principală de așchiere relativ constantă pe toată durata desfășurării procesului. O atare soluție implică

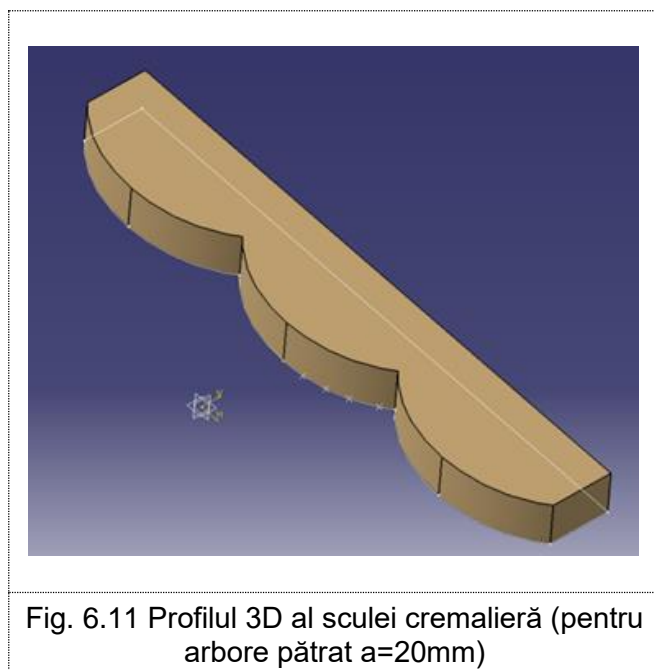
utilizarea unei mașini unelte specializate, la care mișcarea de rulare a sculei și semifabricatului este comandată numeric, după o lege adaptată cerinței impuse.

S-au imaginat soluții constructive a sculei de danturat – scula cremalieră – care, prin modificarea formei dinților consecutivi în angrenare în procesul de rulare a centroidelor asociate sculei și semifabricatului pot conduce la uniformizarea, în anumite limite a procesului de danturare, sub aspectul mărimii forței principale de așchiere [33], [32], [49].

Dezvoltarea produselor soft grafice permit abordarea problematicii legate de analiza schemei de așchiere, într-un mod relativ facil, pentru generarea prin metoda rulării cu scule de tipul cremalierii (cuțit pieptene), cu aplicații la danturarea vârtejurilor ordonate de suprafețe (ex. roți dințate cu dantură evolventică – capitolul 3 al prezentei lucrări) dar și pentru arbori cu secțiune transversală pătrată sau hexagonală, în principiu arbori cu suprafețe active poliedrale.

În acest capitol se abordează problematica identificării schemei de așchiere și a variației mărimii ariei așchii detașate de dinții succesivi ai sculei cremalieră, în contact cu semifabricatul, în cadrul unei singure treceri de generare, în procesul de mortezare a arborelui cu secțiune transversală pătrată.

Se prezintă un exemplu de aplicare, pentru determinarea formei muchiei de așchiere a cremalierii generatoare, pentru exemplu $a=20$ mm



Dacă înainte a acestei operații, a fost măsurată aria semifabricatului (Instrumentul *Measure Item*, din bara de instrumente *Measure* permite aceasta cu foarte mare acuratețe!), prin măsurarea ariei, după "așchiere" se poate, prin diferență se obține valoarea secțiunii îndepărtate.

Astfel, se obțin secțiunile așchiilor separate din corpul semifabricatului, evaluându-se variația acestora, funcție de poziția relativă a sculei în mișcarea pe care acesta o face pe parcursul prelucrării.

Graficul distribuției ariilor așchiilor pe perioada formării laturilor profilului pătrat este prezentat în Fig. 6.12, unde se observă o periodicitate

(previzibilă) de 90° a valorilor.

Deci, dacă dorim o uniformizare a secțiunii așchiilor, la prelucrarea arborelui, este suficient să identificăm modul de a obține acest lucru pentru un interval de 90° .

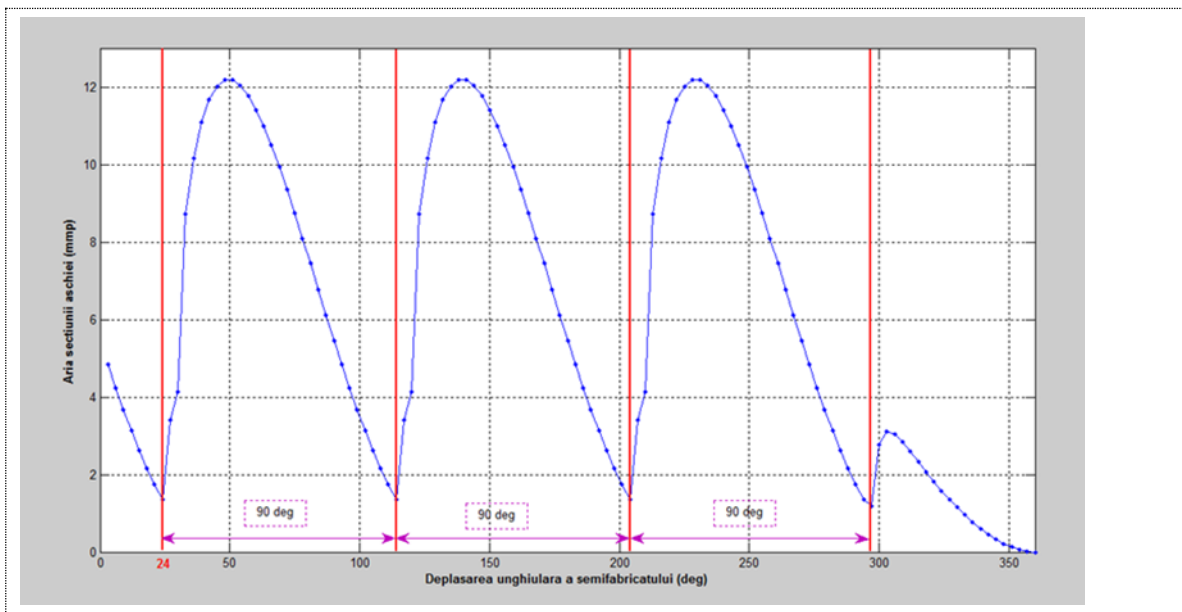


Fig. 6.12 Grafic de evoluție a secțiunii așchii detașate la generarea unui arbore cu secțiune pătrată (a=20 mm)

Așa cum se poate vedea în Fig. 6.13, o funcție de forma:

$$f(x) = a_1 \cdot \sin(b_1 \cdot x + c_1) + a_2 \cdot \sin(b_2 \cdot x + c_2) + a_3 \cdot \sin(b_3 \cdot x + c_3) + a_4 \cdot \sin(b_4 \cdot x + c_4) \quad (6.1)$$

poate aproxima foarte bine modul în care se formează așchiile, pe un parcurs de 90°.

Coefficienții a, b și c sunt calculați de rutina de identificare a funcției de aproximare, din MatLab.

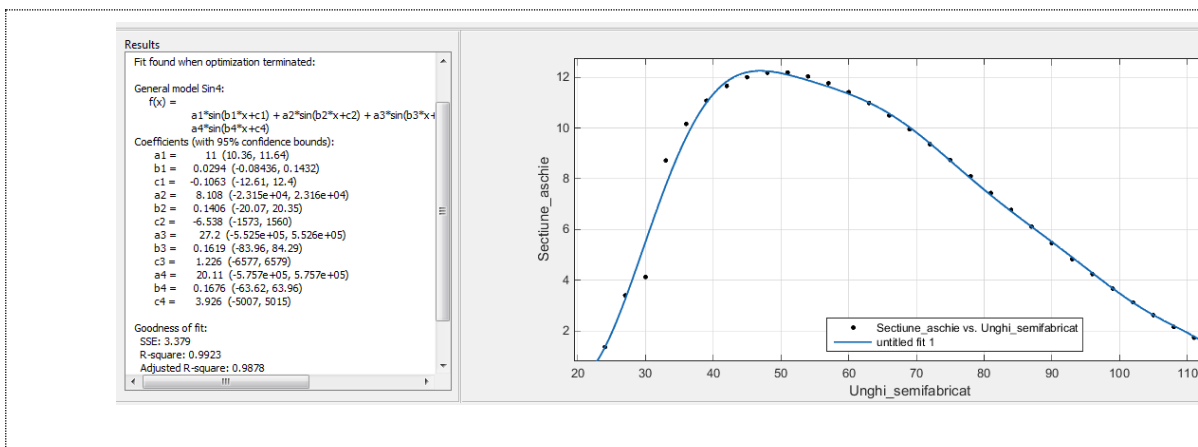


Fig. 6.13 Funcția de aproximare a evoluției secțiunii așchilor detașate pe parcursul unei deplasări unghiulare de 90°, la generarea prin rulare, cu scula cremalieră, a unui arbore cu secțiune pătrată cu latura de 40 mm

Față de prelucrarea cu avans constant, unde, la un avans unghiular constant, de 3°, suprafața se obține în 30 c.d., la o limitare a secțiunii așchii la valoarea de 6 mm², numărul de curse duble crește la 39.

O comparație între secțiunile așchiilor obținute în cele două moduri de prelucrare este prezentată în Fig. 6.14.

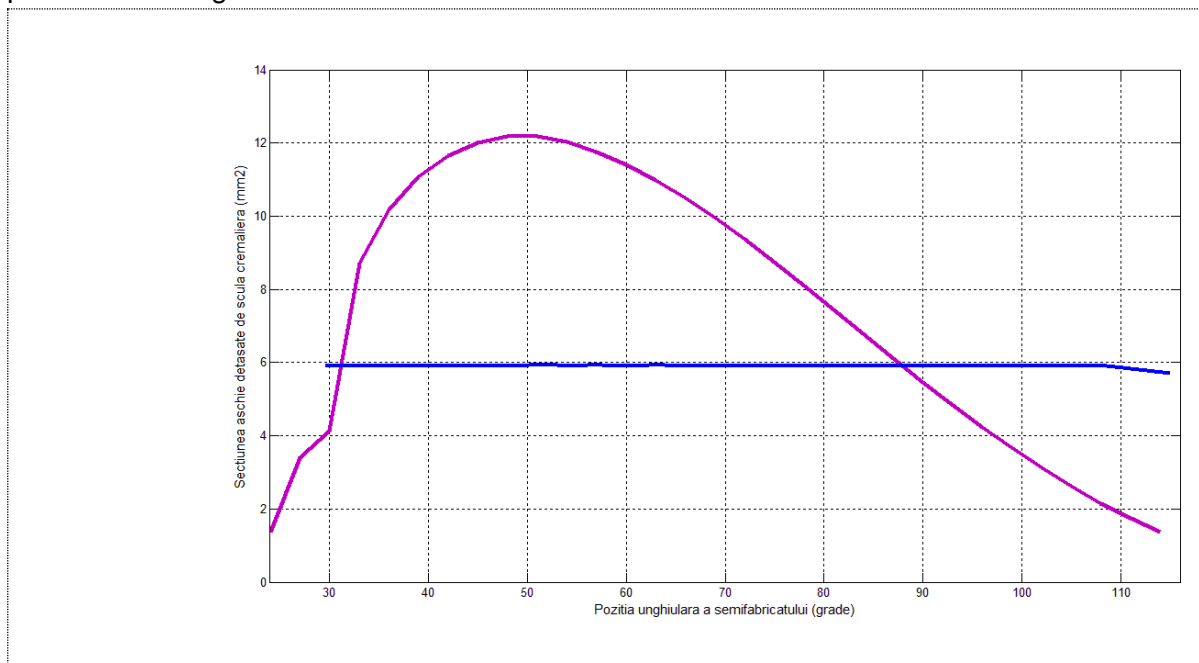


Fig. 6.14 Uniformizarea secțiunii așchiilor detașate pe parcursul unei deplasări unghiulare de 90°, la generarea prin rulare, cu scula cremalieră, a unui arbore cu secțiune pătrată cu latura de 40 mm

7. Concept privind modificarea lanțului cinematic de avans a mașinilor unelte de danturat, în vederea asigurării unei variații minime a așchii detașate

7.1. Introducere

Mașinile unelte sunt mașini de lucru destinate generării suprafețelor pieselor prin procesul de așchiere în condiții de calitate, precizie dimensională și productivitate. În plus, mai ales în ultimii ani, a început să se pună un accent deosebit pe impactul consumurilor de energie și de materiale asupra mediului.

Progresele tehnice și tehnologice, introducerea tehnicii de calcul, care, acum, este disponibilă și accesibilă, tehnicile moderne de acționare a electromotoarelor, face ca numărul de componente ce compun lanțurile cinematice necesare realizării mișcărilor pe care le efectuează mașinile unelte în procesul de așchiere să poată fi mult diminuat.

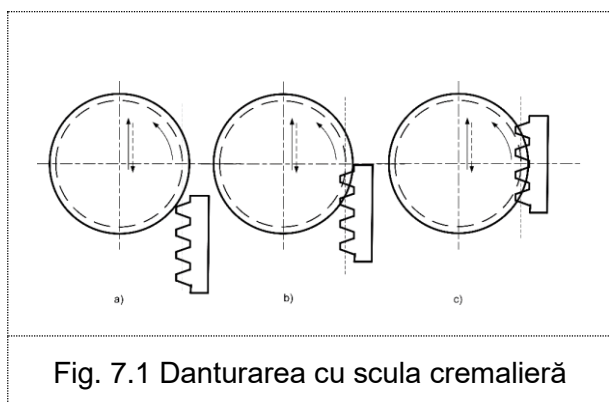


Fig. 7.1 Danturarea cu scula cremalieră

Procesul de danturare presupune realizarea unei mișcări de pătrundere a cuțitului-pieptene (prin angrenare-rostogolire) în corpul semifabricatului (Fig. 7.1). În acest scop, piesa este așezată în poziția de prelucrat prin acționarea celor trei manete care asigură deplasarea mesei mașinii în plan orizontal și rotirea acesteia în jurul axei verticale.

Prin deplasarea mesei, piesa se poziționează astfel încât centrul sculei cremalieră să fie tangentă la cercul de rulare

al acesteia, iar primul dinte să atingă semifabricatul (Fig. 7.1 -a).

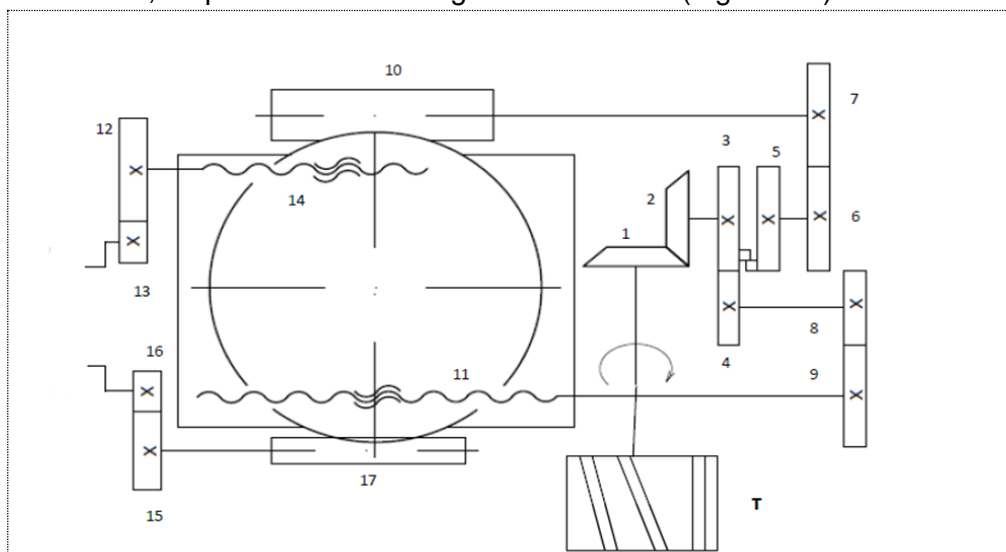


Fig. 7.2 Schema cinematică simplificată de acționare a mesei rotative de fixare a piesei de prelucrat pe o mașina de mortezat

În Fig. 7.2 sunt prezentate doar manetele prin care platoul mașinii este rotit în jurul unei axe verticale sau deplasat pe direcția paralelă cu linia de referință a profilului cremalierii, nefiind figurată și maneta de acționare în direcție perpendiculară pe aceasta.

7.2. Soluții pentru modificarea lanțului cinematic de rulare a unei mașini de mortezat tip B5020 în lanț cinematic acționat flexibil

În cazul mașinilor de danturat prin mortezare, de tip MAAG, masa pe care este fixat semifabricatul este partea mașinii care asigură mișcarea de rulare putând fi acționată fie mecanic, prin intermediul unei bare de cuplare – care face legătura cu lanțul cinematic principal, fie hidraulic, în cazul mașinilor mari.

În cazul mașinii de mortezat B5020, masa este acționată prin intermediul barei I (Fig. 7.3), prin intermediul unei manete al cărei sens de rotație poate fi selectat prin intermediul manetei MS.

Această manetă poate și să decupleze bara de transmitere a mișcării către masă, de la circuitul de comandă al mașinii.

Mișcarea de rotație a barei este o mișcare intermitentă, provenind de la un mecanism cu clichet, acționat la rândul său printr-un lanț cinematic care-l leagă de mișcarea saniei portsculă.

Ansamblul de roți dințate situat pe masa mașinii asigură atât deplasarea mesei, cât și rotirea acesteia, astfel încât, condiția de rulare, pentru obținerea danturilor evolventice se realizează rigid, prin intermediul unor perechi de roți de schimb, alese funcție de numărul de dinți ai piesei și modulul acestora.

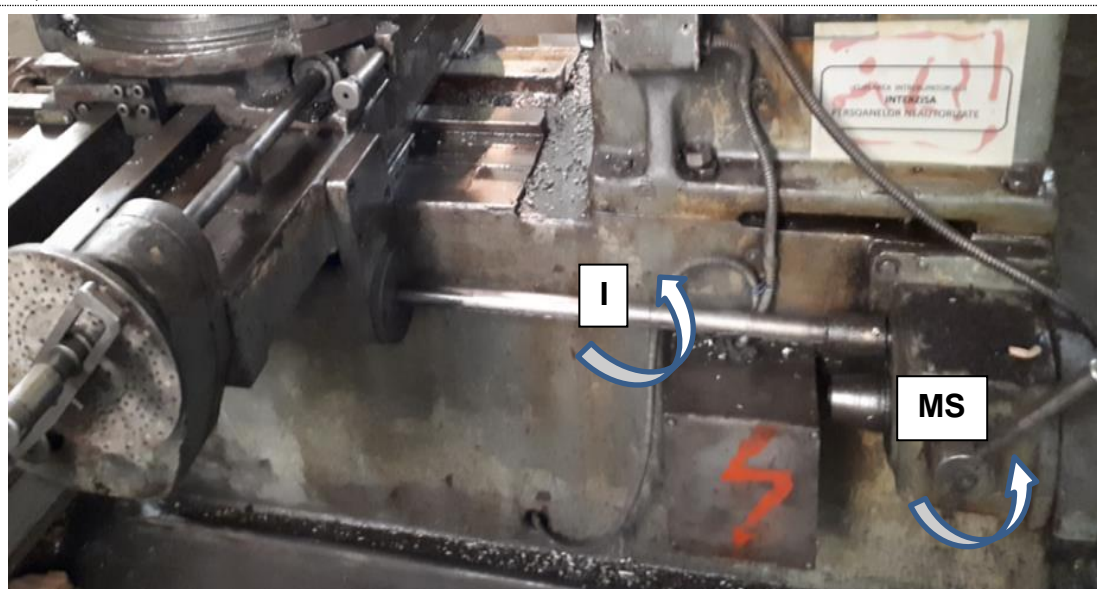


Fig. 7.3 Acționarea platoului unei mașini de mortezat B5020

Deoarece cuțitul-pieptene nu se poate executa la lungimea necesară prelucrării într-un singur ciclu a numărului de dinți ai roții prelucrate, este necesar ca masa să poată reveni la poziția inițială, după prelucrarea unui număr de dinți (în mod obișnuit 1, 2 sau 3).



Fig. 7.4 Mecanismul de acționare manuală a mesei

Revenirea se face fără ca masa să se rotească, cele două mișcări (translație și rotație) fiind separate.

Pe lângă modul de acționare automată de mecanismul mașinii, masa poate fi acționată și manual, prin intermediul a trei roți de manevră. Acestea permit poziționarea mesei astfel încât piesa să fie în poziția necesară începerii lucrului. Acționarea acestora necesită forțe mici și precizia poziționării este mare și ușor de controlat datorită existenței pe platou și pe săniile acestuia a unor scale gradate.

Aceasta face să poată fi abordate **două variante de**

acționare a mesei mașinii, diferit de modul clasic (în pași de mărime egală, care duce la obținerea de așchii detașate cu secțiuni variate în timp, funcție de poziția sculei pe parcursul formării gurilor de dinte).

O primă variantă este de acționare a acesteia folosind un motor electric cuplat cu bara de legătură (I, Fig. 7.3) între mecanismul situat pe masa mașinii și circuitul de comandă clasică (MS – Fig. 7.3 adus pe poziție intermediară).

Avantajul variantei rezidă în faptul că se folosește un singur motor și un singur circuit de comandă al acestuia. De asemenea este păstrată condiția de rulare a sculei cu piesa prin intermediul legăturii rigide între cele două mișcări cu ajutorul roților dințate de schimb (reperele 6, 7, 8, 9 - Fig. 7.2).

Dezavantajul variantei este că va fi nevoie de un motor mai puternic, care trebuie să poată pune în mișcare tot mecanismul mesei.

A doua variantă este de montare a unor motoare electrice în locul roților de comandă manuală a mesei (Fig. 7.5).

Și în această situație bara de cuplare a mesei cu mașina trebuie decuplată.

Dezavantajul ar fi necesitatea utilizării a două motoare, cu două circuite de comandă.

Avantajul este că se utilizează motoare mai mici și mai ieftine.

De asemenea, aceste motoare, prin faptul că sunt acționate separat pot face mișcarea de divizare necesară în timpul prelucrării semifabricatului mult mai simplă.

Pentru a înlocui acționarea clasică a mesei de așezare a piesei care se prelucurează, cu o acționare electrică, trebuie ales sistemul de acționare și dimensionată instalația.

Pentru cazul analizat, tipul de motor și sistemul de acționare se stabilesc astfel încât:

- Să se poată face porniri și frânări frecvente - numărul de curse duble pe minut efectuat de scula așchietoare este de ordinul zecilor (30, 60, ...). La fiecare cursă dublă, motorul

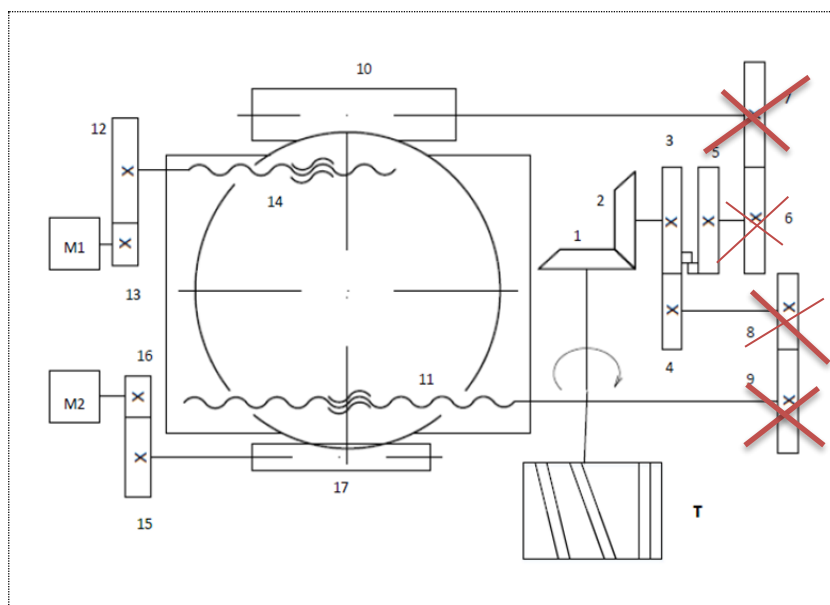


Fig. 7.5 Acționarea electrică a mesei rotative de fixare a piesei de prelucrat pe o mașină de mortezat

trebuie să pornească, să deplaseze / rotească masa pe o distanță impusă și să frâneze. La o viteză de 30 cd/min, motorul va trebui să facă aproximativ 1800 de porniri pe oră, ceea ce limitează mult posibilitatea alegerii tipului de motor.

- Ordinul de mărime al puterii necesare pentru acționare

- Cheltuielile de investiție și exploatare, randamentul, consumurile energetice

Ținând cont de faptul că acționarea este intermitentă, turația motorului se alege astfel

încât energia cinetică înmagazinată în sistemul motor-mașină de lucru să fie minimă.

Ținând seama de cerințele date, un motor pas cu pas de 40Nm, tip MST512 acoperă necesarul de cuplu pentru realizarea mișcării.

Avantajele alegerii unui motor pas cu pas:

Motorul pas cu pas este un motor electric care permite deplasări unghiulare discrete, în salturi, ale părții sale mobile (rotorul). Acest tip de motor poate fi programat să se oprească pe oricare dintre aceste poziții, sau pe poziții intermediare, atunci când este comandat în regim de micro-step.

Programarea mașinii-unelte reprezintă secvențe de instrucțiuni utilizate pentru a controla mișcările acestora. Unul dintre limbajele prin care se poate transmite mașinilor-unelte instrucțiunile privind ceea ce trebuie să facă este Codul G (denumit și RS-274). Acesta este un limbaj de programare apărut în anii 1950, utilizat de mulți producători de mașini-unelte programabile (Siemens, Sinumerik, FANUC etc.) și conține o listă de coduri recunoscute de acestea [51], [52].

O soluție practică de modificare a unei mașini unelte de danturat, în scopul obținerii unor mișcări controlate ale platoului pe care este fixat semifabricatul este prezentată în Fig. 7.6.

Aceasta prezintă schema cinematică inițială și o propunere de schemă cinematică modificată a unei mașini de mortezat.

Propunerea este de decuplare a barei AB, care face legătura între mișcarea capului de așchiere, făcută prin intermediul cutiei de sincronizare CS și deplasarea platoului, urmând

ca platoul să fie comandat independent prin intermediul unui motor pas cu pas conectat la cutia de avansuri (MPP, în Fig. 7.6).

Folosirea unui motor conectat astfel asigură respectarea condiției de rulare, prin folosirea roților de schimb utilizate în cazul prelucrării clasice.

Pentru siguranță, mișcarea platoului este condiționată de poziția berbecului portsculă, care trebuie să fie între cele două limitatoare (S2 și S1), pe timpul cursei de revenire.

Dacă, din anumite motive, masa nu a ajuns pe poziția impusă, înainte de atingerea limitatorului S1, atunci acesta va comanda oprirea, înaintea începerii cursei active, restul deplasării urmând a se face sub forma unei corecții la următoarea cursă dublă.

Valoarea deplasărilor pe care platoul trebuie să le facă la fiecare cursă dublă se introduc în sistem folosindu-se un soft specializat, instalat pe un calculator conectat la panoul de comandă al motorului.

7.3. Stand pentru testarea controlului unui mecanism de translație

Pentru a se valida posibilitatea implementării în practică a unei soluții de acționare controlată a platoului unei mașini de danturat roți dințate, a fost realizat practic un stand experimental, pe care s-au putut simula deplasări controlate ale unui mecanism de translație.

Standul conține un mecanism de translație acționat cu un motor pas cu pas (Fig. 7.7),

controlat cu un driver DM542H ale cărui setări permit obținerea de micro pași de până la $360^\circ/25600=0^\circ0'50.63''$, deci mai mici de $1'$ de arc.

Alimentarea driverului se face cu tensiune continuă obținută dintr-o sursă 220v c.a. /24 V c.c. capabilă să asigure curentul cerut, astfel încât să nu existe pierderi de pași la axul motorului, cu repercusiuni asupra exactității execuției comenzii.

Controlul acționării se face prin intermediul softului **Mach3**, instalat pe un computer, conectat la stand prin interfața paralelă.

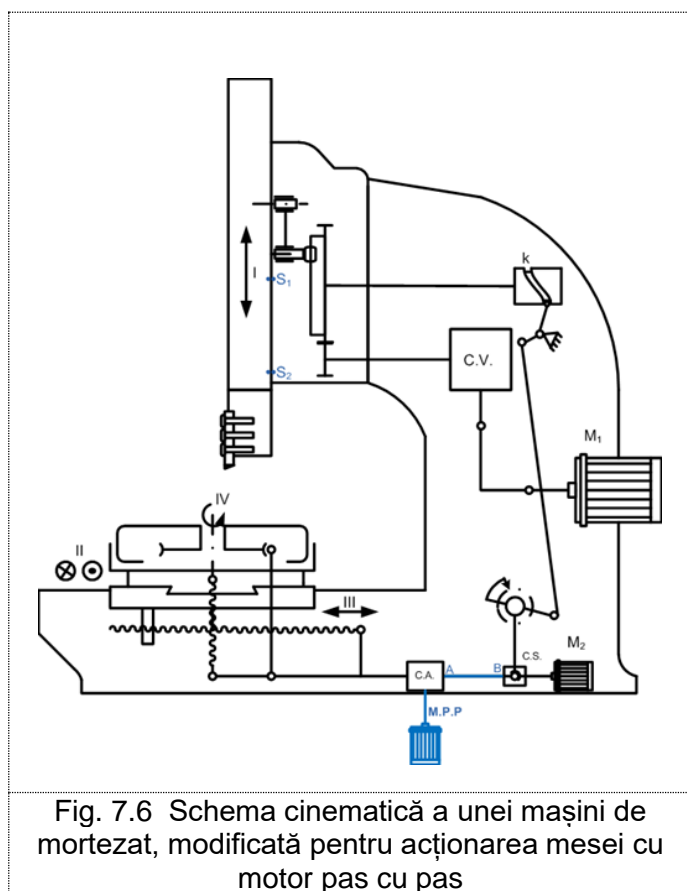


Fig. 7.6 Schema cinematică a unei mașini de mortezat, modificată pentru acționarea mesei cu motor pas cu pas

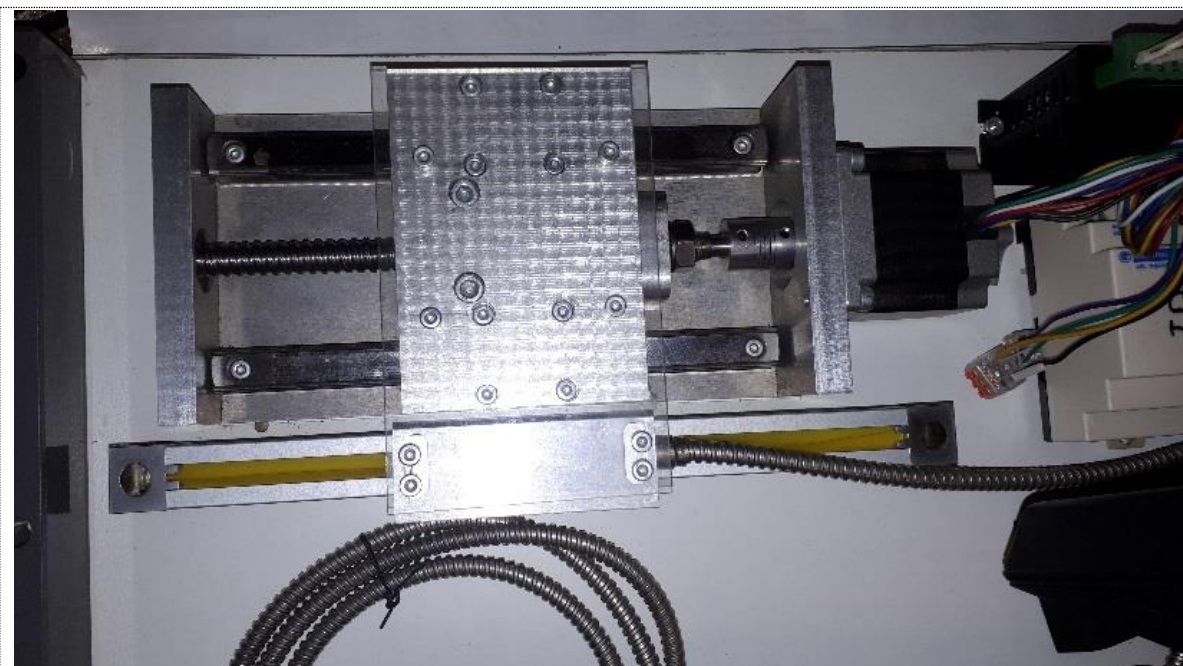


Fig. 7.7 Stand de testare deplasări controlate, cu motor pas cu pas

Programul încărcat în softul de comandă este scris în cod G, sub formă de instrucțiuni de forma:

```
N0000 G00 X....  
N0010 G.....  
.....  
N..... M02
```

În care:

G00, reprezintă o comandă cu viteza maximă până la punctul având coordonata X..., dacă anterior programul a fost setat astfel, prin comanda G90 (Absolute Position mode) sau cu valoarea X..., dacă setarea a fost făcută pentru deplasări în coordonate relative, prin comanda G91 (Incremental Position Mode).

Măsurarea efectivă a deplasărilor se face cu ajutorul unei rigle optice de tip RV 1846, fixată mecanic de elementul mobil al mecanismului și conectată la un sistem de citire.

Rezoluția riglei optice este de 5 μm .

Pentru ca jocul axial să fie cât mai mic, elementul mobil este conectat de axul motorului pas cu pas prin intermediul unui șurub cu bile, cu pas de 4 mm.

Aceste componente au permis o acuratețe deosebită a deplasării, existând un joc de 10 μm , la schimbarea sensului de deplasare. Cum în timpul generării unui gol de dinte, deplasarea se face într-un singur sens, acest joc poate fi preluat prin mișcările de poziționare.

De asemenea, de acest joc se ține cont la momentul revenirii mesei, pentru generarea următorului gol. (În cazul de față, comanda de revenire se va face cu +10 μm , iar primul pas va fi X+10 μm .)

8. Concluzii finale și contribuții originale

Cercetările efectuate în cadrul stagiului doctoral având ca obiect elaborarea tezei de doctorat intitulată „Optimizarea energetică a proceselor de danturare prin modificarea parametrilor cinematici ai mișcării de rulare” s-au derulat pe parcursul a cinci ani, în cadrul centrului de cercetare „Inginerie tehnologică în construcția de mașini” din cadrul departamentului *Ingineria fabricației* al Universității “Dunărea de Jos” din Galați. Tematica abordată poate fi considerată de interes și, în egală măsură, de strictă actualitate, ținând cont atât de preocupările existente la nivel mondial în ceea ce privește creșterea eficienței energetice în toate domeniile, cât și de progresele înregistrate de echipamentele tehnologice pentru prelucrare prin așchiere, tehnica de calcul și produsele soft disponibile.

Obiectivul strategic al cercetărilor din cadrul tezei a fost dezvoltarea unei metode care să permită optimizarea energetică a proceselor de danturare prin uniformizarea mărimii ariei așchiilor succesiv detașate, precum și a unei modalități concrete de implementare a metodei pe mașinile-unelte de danturat existente.

Rezultatele obținute în aceste cercetări permit, la final, sintetizarea unui set de concluzii generale, enunțate în continuare.

Concluzii generale

- După analiza literaturii de specialitate referitoare la desfășurarea proceselor de danturare se pot evidenția o serie de neajunsuri. Ca urmare a unei analize sistematice cu privire la formularea și rezolvarea problemelor de optimizare în general și a celor referitoare la procesul de fabricație, în special, așa cum sunt acestea reflectate în cercetările publicate până în prezent, se pot evidenția o serie de neajunsuri, dintre care cele mai importante sunt:
 - procesul de danturare prin înfășurare, cu scule specifice (de tip cremalieră, cuțit-roată, freză-melc modul) este un proces cu încărcare energetică neuniformă;
 - soluția cel mai frecvent utilizată în prezent pentru reducerea riscului de instabilizare datorat variației inerente a ariei așchiei detașate în procesul mai sus-menționat constă în reducerea mărimii avansului în mișcarea de rulare, fapt care are drept consecință diminuarea productivității;
 - variația forței de așchiere pe durata procesului de danturare, care atrage, implicit, o variație a puterii absorbite de motorul / motoarele de acționare al / ale mașinii utilizate determină o scădere a randamentului energetic de funcționare al acesteia.
- Ținând cont de relația de legătură dintre forța de așchiere și mărimea așchiei detașate, neajunsurile mai sus-menționate pot fi înlăturate prin modificarea parametrilor cinematici ai mișcării de rulare – mai exact, prin înlocuirea avansului constant utilizat în mod tradițional pe parcursul acestei mișcări cu un avans variabil, care să aibă loc după o lege anume, determinată apriori în funcție de caracteristicile specifice piesei prelucrate și ale sculei utilizate.

- Produsul soft CATIA dispune de facilități și instrumente specifice care permit o modelare grafică de mare acuratețe a procesului de prelucrare prin rulare a danturilor evolventice, indiferent de tipul sculei așchiitoare utilizate (sculă-cremalieră, cuțit-roată, cuțit rotativ sau freză-melc).
- Prin abordarea discretă a procesului de danturare (incrementul fiind corespunzător unei curse-duble, în cazul prelucrărilor prin mortezare) modelarea grafică mai sus-menționată permite evidențierea formei fiecărei așchii detașate, precum și măsurarea precisă a ariei acesteia.
- Legea de variație a ariei așchiilor detașate în procesul de generare a danturii se poate determina, în formă analitică, prin interpolare. Cele mai bune rezultate au fost obținute utilizând în acest scop funcții polinomiale de grad superior.
- Prin utilizarea unui soft adecvat (spre exemplu, MatLab), se poate ca, pornind de la legea de variație a ariei așchiilor detașate, să se găsească valori succesive ale avansului în mișcarea de rulare care să conducă la detașarea de așchii cu arie menținută într-un domeniu limitat foarte strict – practic, așchii cu arie cvasi-constantă.
- Asperitatea geometrică (rugozitatea suprafeței prelucrate datorată modului de generare) a flancului dintelui nu este influențată sensibil (în sens negativ) de aplicarea metodei de uniformizare a ariei așchiei detașate.
- În cazul prelucrării danturii prin mortezare, numărul de curse-duble ale sculei așchiitoare necesar pentru generarea unui flanc de dinte (în directă legătură cu productivitatea procesului) este întru-totul comparabil, la aplicarea metodei de uniformizare a ariei așchiei detașate, cu numărul de curse duble la prelucrarea cu avans constant în mișcarea de rulare. Mai mult, acest număr de curse duble poate fi ajustat prin impunerea unei anumite limite minime/maxime pentru mărirea ariei așchiei.
- Aplicabilitatea metodei poate fi extinsă, cu rezultate similare și pentru generarea prin înfășurare a unor suprafețe cilindrice neevolventice (de tipul suprafețelor poliforme), interioare sau exterioare.
- Aplicarea din punct de vedere practic a metodei este posibilă, în cazul mașinilor-unelte de mortezat dantură de tipul celor existente în prezent în industrie, prin separarea lanțului cinematic de rulare de lanțul cinematic principal și acționarea acestuia printr-un motor electric pas-cu-pas comandat de un sistem de control numeric de tipul celui aplicat în cazul standului prezentat în teză pentru validarea aplicării metodei de uniformizare a ariei așchiei detașate.

În conformitate cu obiectivele specifice care au fost definite la începutul cercetărilor derulate în cadrul stagiului doctoral, principalele contribuții originale ale autorului tezei de față sunt enumerate în cele ce urmează.

Contribuții originale

- Prin studiul literaturii de specialitate – tratate, lucrări științifice și teze de doctorat din domeniul subiectului abordat în teza de față, a fost realizată o documentare a stadiului actual cu privire la abordări ale problemelor legate de acest subiect.
- După analiza critică a rezultatelor existente ale cercetărilor privitoare la modul de desfășurare a proceselor de prelucrare a danturilor cilindrice prin metoda rulării și evidențierea premiselor de la care pornesc cercetările din lucrarea de față, s-au definit direcțiile de cercetare ce vor fi urmate și s-au enunțat obiectivele specifice aferente.
- Modelarea grafică a generării danturii evolventice cu o sculă de tip cremalieră-monodinte, dintr-o singură trecere și determinarea, în acest caz, a legii de variație a ariei așchii detașate și a legii de variație a avansului mișcării de rulare pentru care variația ariei așchii este controlată într-un interval impus apriori.
- Modelarea grafică a generării danturii evolventice cu o sculă de tip cremalieră monodinte, cu treceri multiple și determinarea, în acest caz, a legii de variație a ariei așchii detașate și a legii de variație a avansului mișcării de rulare pentru care variația ariei așchii este controlată într-un interval impus apriori.
- Modelarea grafică și evaluarea asperității geometrice a flancului danturii generate cu cremaliera-monodinte.
- Modelarea grafică a generării danturii evolventice cu o sculă de tip cremalieră multidinte și determinarea, în acest caz, a legii de variație a ariei așchii detașate și a legii de variație a avansului mișcării de rulare pentru care variația ariei așchii este controlată într-un interval impus apriori.
- Modelarea grafică a generării danturii evolventice cu o sculă de tip cuțit-roată și determinarea, în acest caz, a legii de variație a ariei așchii detașate și a legii de variație a avansului mișcării de rulare pentru care variația ariei așchii este controlată într-un interval impus apriori.
- Modelarea grafică a generării melcilor evolventici cu scule de tip cuțit rotativ și determinarea, în acest caz, a legii de variație a ariei așchii detașate și a legii de variație a avansului mișcării de rulare pentru care variația ariei așchii este controlată într-un interval impus apriori.

- Modelarea grafică a generării suprafețelor neevolventice interioare și exterioare și determinarea, în ambele cazuri, a legii de variație a ariei așchii detașate și a legii de variație a avansului mișcării de rulare pentru care variația ariei așchii este controlată într-un interval impus apriori.
- Conceperea și execuția unui stand experimental care să materializeze soluția tehnică de implementare a metodei de uniformizare a ariei așchii detașate la danturare prin metoda rulării.
- Validarea soluției tehnice propuse, cu ajutorul standului experimental, prin simularea aplicării metodei de uniformizare a ariei așchii detașate în cazul în care legea de variație a ariei așchii detașate (înainte de aplicarea metodei) este cunoscută.

Perspectivă ale cercetărilor viitoare

Rezultatele cercetărilor prezentate în această teză se consideră ca fiind doar începutul unui demers mai vast privitor la creșterea eficienței energetice a proceselor de prelucrare a danturilor prin așchiere. În perspectivă, aceste cercetări vor putea fi continuate prin:

- conceperea unei aplicații soft care să permită automatizarea modelării pozițiilor relative succesive dintre scula așchietoare și piesa prelucrată, ceea ce va accelera obținerea legii de variație a ariei așchii detașate;
- evidențierea unor „pattern”-uri pentru legile de variație a avansului în mișcarea de rulare, în condițiile detașării de așchii cu arie cvasi-constantă, pentru diferitele procedee și scule de danturare utilizate, fapt care ar permite o simplificare majoră în aplicarea metodei dezvoltate în cadrul tezei;
- implementarea soluției tehnice de aplicare a metodei elaborate pentru uniformizarea arie așchiilor detașate pe o mașină-unealtă de uz industrial, de tipul celor pentru mortezarea danturilor cu cuțit-roată, pentru a putea evalua în condiții reale eficiența energetică a aplicării metodei propuse;
- modelarea grafică în CATIA și a altor procedee de prelucrare prin rulare a danturilor cilindrice evolventice – spre exemplu, frezarea cu freză-melc modul;
- extinderea aplicării metodei și pentru uniformizarea desfășurării proceselor de prelucrare ale altor tipuri de danturi (spre exemplu evolventice cu dinți înclinați, melcate, conice etc.).

Lista de lucrări științifice publicate și prezentate la conferințe interne și internaționale

Lucrări științifice publicate pe parcursul stagiului doctoral

- Volume ale conferințelor indexate ISI:

1. Bordeanu, M., Frumușanu, G., Oancea, N., ***The energetic load smoothing along the rack tool cutting edge in toothing process***, MATEC Web of Conferences (2017) 112, 01008, DOI: 10.1051/mateconf/201711201008, https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/26/mateconf_imane2017_01008/mateconf_imane2017_01008.html
2. Bordeanu, M., Frumușanu, G., Oancea, N., ***Detached chip smoothing during involute gear slotting in relation to generated tooth features***, MATEC Web of Conferences 178, 01001, (2018), <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817801001>
3. Bordeanu, M., Frumușanu, G., Oancea, N., ***Algorithms for modelling the load of teeth from pinion cutter tool used at worms machining***, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **564** (2019) 012005, doi:10.1088/1757-899X/564/1/012005, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/564/1/012005/pdf>
4. Bordeanu, M., Frumușanu, G., Oancea, N., ***Analytical and graphical modelling of the cutting scheme when generating with a pinion cutter***, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **591** (2019) 012042, doi:10.1088/1757-899X/591/1/012042, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/591/1/012042/pdf>

- Reviste indexate BDI:

1. Bordeanu, M., Frumușanu, G., Oancea, N., ***Graphical modeling of gear tooth generating process with rack-shaped tool, aiming constant area of detached chips***, Proceedings in Manufacturing Systems, (2018) 13(2): 63-68, Editura Academiei Române, ISSN 2067-9238, http://www.icmas.eu/Volume13_Issue2_2018.htm
2. Bordeanu, M., Frumușanu, G., Oancea, N., ***The Geometric Roughness when Machining Involute Gear Tooth with Feed Motion of Variable Speed***, The Annals of "Dunărea de Jos" Univ. of Galați, (2017) Fasc.V: 61-66, ISSN 1221-4566, <http://www.cmrs.ugal.ro/TMB/2017.htm>
3. Bordeanu, M., Frumușanu, G., Oancea, N., ***Graphical & Analytical Modeling of the Cutting Scheme Used to Generate Square Holes with Slotting Tools Having Periodic Profile***, Proceedings in Manufacturing Systems, Editura Academiei Române, ISSN 2067-9238 (2019) **14**(2): 49-54, http://www.icmas.eu/Journal_archive_files/Vol_14-Issue2-2019.PDF/49-54_Bordeanu.pdf
4. Bordeanu, M., Frumușanu, G., Oancea, N., ***The modelling of detached chip area at square shafts machining with rack-tools***, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **1009** (2021) 012007, doi:10.1088/1757-899X/1009/1/012007, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1009/1/012007/pdf>

Bibliografie

- [1] Gutowski, T.; Dahmus, J.; Thiriez, A., „Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes,” *13th. CIRP International conference of life cycle engineering*, 2006.
- [2] Zhao, G.Y.; Liu, Z.Y.; He, Y.; Cao, H.J.; Guo, Y.B., „Energy consumption in machining: Classification, prediction, and reduction strategy,” *Energy*, nr. 133, pp. 142-157, May 2017.
- [3] Radzevich, S.P., *Theory of Gearing. Kinematics, Geometry and Synthesis*, Second Edition ed., CRC Press, 2018.
- [4] Boothroyd, G.; Knight, W.A, *Fundamentals of Macining and Machine Tools*, Third Edition ed., CRC Press, 2019, p. 602.
- [5] Dooner, D.B., *Kinematic Geometry of Gearing*, Second Edition ed., Wiley, 2012.
- [6] Gupta, K.; Kumar, N.J.; Laubscher, R., *Advanced Gear Manufacturing and Finishing*, Academic Press, 2017.
- [7] Astakhov, Viktor P., *Metal cutting mechanics*, CRC Press Taylor & Francis Group, 1999.
- [8] Rolt, L.T.C., *A short history of machine tools*, Second Printing edition ed., MIT Press, 1966.
- [9] Gheghea, I.; Plăhteanu, B.; Nitoseriu, C-tin; Ghionea, A., *Mașini-unelte și agregate*, București: Editura Didactică și pedagogică, 1983.
- [10] Vaida, A.; Botez, E.; Velicu, S., *Proiectarea mașinilor-unelte*, București: Editura Didactică și Pedagogică, 1980.
- [11] Enache, Șt., Belousov, V., *Proiectarea sculelor așchietoare*, București: Editura didactică și pedagogică, 1983.
- [12] Lepădătescu, B., Buzatu, C., *Mașini unelte și prelucrări prin așchiere*, București: Editura Matrix Rom.
- [13] Popescu, Ioan, *Tehnologii de prelucrare mecanică*, București: Editura Matrix Rom, 2011.
- [14] Boagiu, Gh., Dodon, E. ș.a., *Mașini-unelte și agregate*, București: Editura didactică și pedagogică, 1978.
- [15] Cristian, Ioan, *Generarea suprafețelor prin așchiere*, București: Editura Matrix Rom, 2015.
- [16] Lăzărescu, I., *Calculul și construcția sculelor așchietoare*, București: Editura tehnică, 1961.
- [17] Oancea, N., *Generarea suprafețelor prin înfășurare. Complemente de teoria înfășurărilor*, Galați: Editura Fundației Universitare ”Dunărea de jos”, 2004.
- [18] Rodriguez, J.M.; Carbonel, J.M.; Jonsen, P., „Numerical Methods for the Modelling of Chip Formation,” *Archives of Computational Methods in Engineering* , pp. 387-412, 2020.

- [19] Childs, Thomas, Metal Machining: Theory and Applications, Butterworth-Heinemann, 2000.
- [20] Radzevich, S.P., Gear Cutting Tools. Science and Engineering, Second Edition ed., CRC Press, 2017.
- [21] Stephenson, David.A.; Agapiou, John S., Metal Cutting Theory and Practice, Third Edition ed., CRC Press, 2018, p. 947.
- [22] Litvin, Faydor L.; Alfonso, Fuentes, Gear Geometry and Applied Theory, Cambridge University Press, 2004.
- [23] Shaw, M.C., Metal Cutting Principles, Oxford University Press, 2005.
- [24] Barzegar, Zahra; Ozlu, Emre, „Analytical prediction of cutting tool temperature distribution in orthogonal cutting including third deformation zone,” *Journal of Manufacturing Processes*, 2021.
- [25] Fu, H.J.; DeVor, R.E.; Kapoor, S.G. , „A mechanistic model for the prediction of the force system in face milling operations,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. <https://doi.org/10.1115/1.3185915>, pp. 81-88, 1986.
- [26] Kim, H.S; Ehmann, K.F., „A cutting force model for face milling operations,” *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, vol. 33, nr. 5, pp. 651-673, 1991.
- [27] Otalora-Ortega, Harry; Aristimuno Osoro, Patxi; Arazola Ariola, Pedro, „Uncut chip geometry determination for cutting forces prediction in orthogonal turn-milling operations considering the tool profile and eccentricity,” *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021.
- [28] Otalora-Ortega, Harry; Patxi, Aristimuno Osoro; Jose Arrazola Arriola, Pedro, „Analytical modeling of the uncut chip geometry to predict cutting forces in orthogonal centric turn-milling operations,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, nr. 144, 2019.
- [29] Azvar, Milad; Katz, Andrew; Van Dorp, Jacob; Erkorkmaz, Kaan, „Chip geometry and cutting force prediction in gear hobbing,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2021.
- [30] Sutherland, J.W., Salisbury, E.J.; Hoge, F.W., „Model for the cutting force system in the gear broaching process,” *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, vol. 37, nr. 10, pp. 1409-1421, 1997.
- [31] Căpățînă, N; Târu, E., „Special Gear Cutting Tools,” *Analele Universității din Galați*, vol. fasc. V, pp. 25-32, 1995.
- [32] Căpățînă, N., „Contribuții la perfecționarea constructiv-funcțională a frezelor melc modul cu dinți decalați,” Galați, 1998.
- [33] Fetecău, Cătălin, Relații parametrice la prelucrarea prin așchiere, București: Editura Tehnică, 2001, p. 190.
- [34] Minciu, C., „Măsurarea eforturilor de așchiere la frezarea cu freză-melc modul,” *Construcția de mașini*, nr. 4, pp. 216-221, 1971.
- [35] Dima, M., Oancea, N., Teodor, V, Modelarea schemelor de așchiere la danturare, Iași: Editura Cermi, 2007.

- [36] Dima, M., Oancea, N., "Constructive modification of the energetically improvement of the tothing process," *Romanian Journal of Technical Sciences, Applied Mechanics, Special number*, vol. Tome 49, pp. 237-241, 2004.
- [37] Dima, M., Epureanu, A., Teodor, V., Oancea, N., „Cuțit roata de danturat cu dinți amovibili”. Romania Brevet 12263/30.03.2009, 2009.
- [38] Epureanu, A., Dima, M., Teodor, V., Oancea, N., „Cuțit pieptene pentru danturare”. Romania Brevet 12264, 2009.
- [39] Frumușanu, G.; Epureanu, A.; Constantin, I., „Cutting Process stability Evaluation bu Process Parameters Monitoring,” *in Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on Non-Linear Analysis, Non-Linear Systems and Chaos (NOLASC 09)*, pp. 345-350, 2009.
- [40] Frumușanu, G.; Constantin, I.; Epureanu, A., „Method for early detection of regenerative instability in turning,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 58, pp. 29-43, 2012.
- [41] Frumușanu, G.; Constantin, I.; Marinescu, V.; Epureanu, A., „Development of a stability intelligent control system for turning,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 64, pp. 643-657, 2013.
- [42] Epureanu, A.; Marinescu, V.; Constantin, I.; Banu, M.; Frumușanu, G., „Technique for online controlling the cutting process stability,” *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, vol. 21, pp. 277-282, 2014.
- [43] Epureanu, A., Teodor, V., Dima, M., Oancea, N., A reconfigurate Rack Tool for the Generation of Gears, 2008, pp. 662-668.
- [44] Georgescu, V., Oancea, N., Constantin, E., „Le Chargement de tranchants de pointe des dents de la fraise helicoidale,” *Buletinul Universității Galați*, vol. Fas. V, p. 29, 1981.
- [45] Constantin, E., Teodorescu, M., Oancea, N., Epurea, „Freză melc modul”. Romania Brevet 7423.
- [46] Dima, M., Contribuții la modelarea schemelor de așchiere la generarea suprafețelor asociate unor axoide în rulare, Galați: Teză de doctorat, Universitatea "Dunărea de Jos", 2012.
- [47] Bordeanu, M., Frumușanu, G., Oancea, N., The energetic load smoothing along the rack tool cutting edge in tothing process, 2017.
- [48] Oancea, N., Generarea suprafețelor prin înfășurare. Teoreme complementare, vol. Vol. II, Galați, Romania: Editura Fundației Universitare "Dunărea de Jos", 2004.
- [49] Antoniadis, A; Vidakis, N; Bilalis, N., „Fatigue fracture investigation of cemented carbide tools in gear hobbing, part 2: The effect of cutting parameters on the level of tool stresses—a quantitative parametric analysis,” *Journal of Manufacturing Science*, vol. 124, nr. 4, pp. 792-798, 2002.
- [50] Gimpert, D, „Gear Hobbing Process,” *Gear Technology*, vol. 11, pp. 38-44, 1994.
- [51] Maroș, D; Kiliman, V; Royanyi, V, Angrenaje melcate, București: Editura Tehnică, 1966.

- [52] Dima, M., Baicu, I, Produs soft destinat modelării schemei de aşchiere la generarea danturii evolventice, vol. III, Chişinău: Conferinţa Internaţională "TEHNOLOGII MODERNE, CALITATE, RESTRUCTURARE", 2009, pp. 138-141.
- [53] Oancea, N., Méthode numérique pour l'étude des surfaces enveloppées, Mechanism and Machine Theory, vol. 31, 1996, pp. 957-972.
- [54] MachMotion, G&M Code Referece Manual, 2016.
- [55] G and M Programming for CNC Milling Machines, West Yorkshire - England: Deford Limited.
- [56] Berbinschi, S., Contribuţii la elaborarea unei metode grafice CAD pentru profilarea sculelor generatoare prin înfăşurare, Galaţi: Teză de doctorat, Universitatea "Dunărea de Jos".
- [57] Bordeanu, M., Frumuşanu, G., Oancea, N., Algorithms for modelling the load of teeth from pinion cutter tool used at worms machining, 2019.
- [58] Bordeanu, M., Frumuşanu, G., Oancea, N., Analytical and graphical modelling of the cutting scheme when generating with a pinion cutter, 2019.
- [59] Bordeanu, M., Frumuşanu, G., Oancea, N., Detached chip smooting during involute gear slotting in relation to generated tooth features, 2018.
- [60] Bordeanu, M., Frumuşanu, G., Oancea, N., Graphical modeling of gear tooth generating process with rack-shaped tool, aiming constant area of detached chips, 2018.
- [61] Bordeanu, M., Frumuşanu, G., Oancea, N., Graphical&analytical modeling of the cutting scheme used to generate square holes with slotting tools having periodic profile, 2019.
- [62] Bordeanu, M., Frumuşanu, G., Oancea, N., The geometric roughness when machining involute gear tooth with feed motion of variable speed, 2017.
- [63] Bordeanu, M., Frumuşanu, G., Oancea, N., The modeling of detached chip area at square shafts machining with track tools, 2019.
- [64] Crosher, William P., A Gear Chronology - Signicant events and dates affecting gear development, Xlibris LLC, 2014.
- [65] Radzevich, Stephen P., Advanced in Gear Design and Manufacture, L. Taylor&Francis Group, Ed., CRC Press, 2019.
- [66] Radzevich, S.P., Kinematics Geometry of Surface Machining, London: CRC Press, 2007.
- [67] Radzevich, S.P., Geometry of Surfaces: A Practical Guide for Mechanical Engineers, Wiley, 2013, p. 264.
- [68] Radzevich, S.P., Generation of Surfaces. Kinematic Geometry of Surface Machining, I ed., CRC Press, 2014.
- [69] Radzevich, S.P., Gear Cutting Tools. Fundamentals of Design and Computation, CRC Press, 2010.
- [70] Oproescu, Gh., Modelări în procesul de aşchiere, Craiova: Editura Scrisul Românesc, 1997.

- [71] Kneifets, A.L., Geometrically Accurate Computer 3D Models of Gear Drives and Hob Cutters, *Procedia Engineering*, 2016.
- [72] Ghiță, E., Teoria și tehnologia suprafeșelor poliforme, București: Editura Bren, 2000.
- [73] Oancea, N., Generarea suprafețelor prin înfășurare. Teoreme fundamentale, Galați: Editura Fundației Universitare "Dunarea de Jos", 2003.
- [74] Crosher, William P., Design and Application of the Worm Gear, New York: ASME Press, 2002.
- [75] Trent, Eduard; Paul, Wright, 4-th Edition ed., Butterworth-Heinemann, 2000, p. 464.
- [76] Institutul Român de Standardizare, STAS 6273-81. Angrenaje cilindrice. Toleranțe.
- [77] Azeem, Abdullahil; Feng, Hsi-Young, „Cutting force prediction for ball-end mills with non-horizontal and rotational cutting motions,” *International Journal Advanced Manufacture and Technology*, nr. 67, pp. 1833-1845, 2013.
- [78] Matsumura, Takashi; Usui, Eiji, „Simulation of cutting process in peripheral milling by predictive cutting force model based on minimum cutting energy,” *International Journal of Machine Tools&Manufacture*, nr. 50, pp. 467-473, 2010.
- [79] Ditu, V., Bazele aschierii metalelor - Teorie si Aplicatii, Editura MatrixRom, 2008.
- [80] Dong, Liang; Bingkui, Chen; Yane, Gao, „Geometric and Meshing Properties of Conjugate Curves for Gear Transmission,” *Mathematical Problems in Engineering*, 2014.
- [81] Ge, Song; Shaochun, Sui; Limin, Tang, „Precision prediction of cutting force in oblique cutting operation,” *International Journal of Manufacturing and Technology*, pp. 553-562, 2015.
- [82] Wenwang, Qiu; Qiang, Liu; Ji, Ding, „Cutting force prediction in ortogonal turn-milling by directly using engagement boundaries,” *International Journal of Advanced Manufacturing and Technology*, 2016.
- [83] Li, JG.; Yao, YX; Liu, CQ; Wu, CG, „Extended octree for cutting force prediction,” *International Journal for Advanced Manufacturing Tekhnology*, vol. 39, pp. 866-873, 2008.
- [84] Cai, Sijie; Yao, Bin; Feng, Wei; Cai, Zhiqin, „An improved cutting force prediction model in the milling process with a multi-blade face milling cutter based on FEM and NURBS,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019.
- [85] Xianyin, Duan; Fangyu, Peng; Zerun, Zhu; Guozhang, Jiang, „Cutting edge element modeling-based cutter workpiece engagement determination and cutting force prediction in five- axis milling,” 2019.
- [86] Chuang, Jiang; Xiaozhong, Deng; Hua, Zhang; Longlong, Geng, „Prediction and simulation of cutting force in hypoid gear machining using forming method,” *Internationa Journal of Advaced Manufacturing Technology*, 2017.
- [87] Antoniadis, A; Vidakis, N; Bilalis, N, „A simulation model of gear skiving,” *Journal Mater Process Technology*, vol. 146, pp. 213-220, 2004.

- [88] Chung-Liang, Tsai; Yunn-Shiuan, Liao, „Cutting force prediction in ball-end milling with inclined feed by means of geometrical analysis,” *International Journal of Advanced Manufacturing and Technology*, vol. 46, pp. 529-541, 2010.
- [89] Subrahmanyam, K.V.R.; Wong, Yoke San, „Cutting force prediction for ball nose milling of inclined surface,” *International Journal of Advanced Manufacturing and Technology*, vol. 48, pp. 23-32, 2010.
- [90] Paris, H.; Brisaud, D.; Gouscov, A., „A More Cutting Force Model at Uncut Chip Thickness Close to Zero,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2007.
- [91] Pierce, McCloskey; Andrew, Katz, „Chip geometry and cutting forces in gear power skiving,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 68, pp. 109-112, 2019.
- [92] Dima, M.; Rusu, C.; Pârvu, G., „A Geometric Model Regarding the Engendering Generalisation of Some Polyform Surfaces,” *The Annals of "Dunărea de Jos" University of Galați*, vol. V, pp. 38-44, 2001.
- [93] Vakondios, D.; Kiratsis, P.; Yaldiz, S., „Influence of milling strategy on the surface roughness in ball end milling of the aluminium alloy Al7075-T6,” *Measurement*, vol. 45, pp. 1480-1488, 2012.
- [94] Damianakis, M.A.; Bement, M.T.; Liang, S.Y., „Kinematics prediction and experimental validation machined surface roughness,” *International Journal of Advanced Manufacturing and Technology*, vol. 65, pp. 1651-1657, 2013.
- [95] Karkalos, N.E.; Galanis, N.I.; Maropoulos, P.G., „A geometrical model for surface roughness prediction when facemilling Al 7075-T7351 with square insert tools,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 36, pp. 216-223, 2015.
- [96] Krenzer, Theodore, Computer Aided Corrective Machine Settings for Manufacturing Bevel and Hypoid Gear Sets, American Gear Manufacturers Association, 1984.
- [97] Klingenberg, Jan, Bevel Gear: Fundamentals and Applications, Berlin: Springer-Verlag, 2016.
- [98] Ghionea, Ionuț Gabriel, CATIA v5. Aplicații în inginerie mecanică, București: BREN, 2013.
- [99] Ghionea, Ionuț Gabriel, Module de proiectare asistată în CATIA v5 cu aplicații în construcția de mașini, București: BREN, 2004.
- [100] Dima, Gabriel D., Velea, Marian M., CATIA v5 - Proiectare de produs, Brașov: Editura Universității Transilvania din Brașov, 2016.
- [101] Berbinschi, Silviu, Contribuții la elaborarea unei metode grafice CAD pentru profilarea sculelor generatoare prin înfășurare, Galați: Teza de doctorat, 2012.
- [102] Constantin, Corina; Croitoru, Sorin-Mihai; Constantin, George, „FEM Tools for Cutting Process Modelling and Simulation,” *U.P.B. Sch. Bull.*, vol. 74, 2012.
- [103] Dima, M.; Oancea, N.; Teodor, V., „Cutting Scheme Modeling at Generation by Rack-Gear Tool Algorithms,” *Buletinul Institutului Politehnic din Iași*, vol. LII, pp. 85-89, 2006.
- [104] Dima, M., Contribuții la modelarea schemelor de așchiere la generarea suprafețelor asociate unor axoide în rulare, Teză de doctorat, Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați, 2006.

- [105] Hefeng, Bai; Savage, Michael; Knorr, Raymond James, „Computer modeling of rack-generated spur gears,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 20, pp. 351-360, 1985.
- [106] Bouzakis, K.D.; Lili, E.; Michailidis, N.; Fridericos, O., „Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes: A critical synthesis of analysis methods,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 57, pp. 676-696, 2008.
- [107] Erkorkmaz, Kaan; Katz, Andree ș.a., „Chip geometry and cutting forces in gear shaping,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 65, pp. 133-136, 2016.
- [108] Xu, Man; Han, Xinghui; Hua, Lin; Zheng Fanhyan, „Modeling and methods for gear shaping process and cutting force prediction of variable transmission ratio rack,” *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 171, 2020.
- [109] Zhang, Guicai; Guo, Changsheg, „Modeling Flank Wear Progression Based on Cutting Force and Energy Prediction in Turning Process,” *Procedia Manufacturing*, vol. 5, pp. 536-545, 2016.
- [110] Guo, Erkuo; Huang, Xiaodiao; Fang, Chengang, „Research on the cutting mechanism of cylindrical gear power skiving,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 79, pp. 541-550, 2015.
- [111] Ren, Zongwei; Fang, Zhenglong; Arakane, Takuhiro, „Parametric modeling of uncut chip geometry for predicting crater wear in gear skiving,” *Journal of Materials Processing Tech.*, nr. 290, 2021.
- [112] Stadfeld, H.J., „Power Skiving of Cylindrical Gears on Different Machine,” *GEARTECHNOLOGY*, pp. 52-62, January/February 2014.
- [113] Yesilyurt, Isa; Gursoy, Habibe, „Modeling and experimental verification of cutting forces in gear tooth cutting,” *Machining Science and Technology*, vol. 22, 2018.
- [114] Budak, E.; Armarego, E.J.A., „Prediction of Milling Force Coefficients From Orthogonal Cutting Data,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, pp. 216-224, May 1966.
- [115] Prasad, Umasai Vara; Rao, K. Vencata; Murty, P.B., „Mechanistic models for prediction of cutting forces and power consumption considering chip geometry,” *Journal of Process Mechanical Engineering*, 21 October 2020.
- [116] Rajemi, M.F.; Mativenga, P.T.; Aramcharoen, A., „Sustainable machining: selection of optimum turning conditions based on minimum energy considerations,” *Journal of Cleaner Production*, nr. 18, pp. 1059-1065, 2010.
- [117] Bhusan, Rajesh Kumar, „Optimization of cutting parameters for minimizing power consumption and maximizing tool life during machining of Al alloy SiC particle composites,” *Journal of Cleaner Production*, nr. 39, pp. 242-254, 2013.