MINISTERULEDUCAȚIEIȘICERCETĂRII
UniversitateaNațională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA BUCUREȘTI

Școala Doctorală de InginerieIndustrialăși Robotică

Nr.decizieCSUD07din 06.03.2024

Teza de doctorat

-REZUMAT-

Comportarea elastică și evaluarea tensiunilor din zona de racordare a danturii la angrenajul cilindric cu dinți înclinați

Autor: Ing.Mihai Tiberiu T. Bucur

Conducătordedoctorat: Prof.dr.ing.SorinCĂNĂNĂU

COMISIADEDOCTORAT

		dela	
		dela	
		dela	
		dela	
		dela	

București

-2024 -

Contents

Capitolul 1. Stadiul actual privind studiul experimental si analitic al angrenajelor cu roți dințate cilindrice cu dinți înclinați 9

Capitolul 2. Direcțiile, obiectivul principal și metodologia de cercetare-dezvoltare a angrenajelor cilindrice cu dantură înclinată 12

Capitolul 3. Abordarea calculelor în standardele ISO 6336 si AGMA Standard 2001–D04 12

Capitolul 4. Modelare 2D Avansată a Angrenajelor Evolventice – Simulare și Validare 14

Capitolul 5. Evaluarea Acurateței Geometrice a Pinioanelor: Studiu Comparativ Între Modelele Generate prin Cod și Cele din Biblioteca NX12 16

Capitolul 6. Standul de testare 20

Distribuția deformațiilor pe lățimea dintelui: 25

Poziționarea Dornului și Impactul Asupra Deformațiilor: 25

"Edge Loading" și Rigidizarea Locală: 26

Comportamentul Structural Sub Sarcini Mari: 26

Simulări Numerice și Validarea Experimentului: 26

Concluzii Generale și Recomandări pentru Design: 26

Capitolul 7. Simularea Comportamentului Mecanic al Angrenajelor Cilindrice: Modelul Angrenarii Dinte Pe Dinte 27

Modelul Geometric 27

Materiale 28

Contacte 28

Concluzie 28

Discretizarea și Modelarea Contactului 28

Condițiile de Încărcare 29

Rezultate Experimentale și Compararea Tensiunilor 29

Capitolul 8. Metoda coeficientilor de influenta 30

Comparația Între Încărcarea cu Dorn și Angrenarea Reală 30

Tensiuni în Racordare (Angrenare Reală la 760 N·m) 30

Metoda Coeficientului de Influenta și Angrenajele cu Dantură Înclinată 30

Deformarea și Comportamentul Elastic Local 31

Sarcini Efective și Încărcarea Multiplelor Linii de Contact 32

Conclusii 32

Capitolul 9. Concluzii finale şi contribuţii principale la Modelarea și evaluarea tensiunilor în racordarea dinților angrenajelor cilindrice cu dinți înclinați prin simulare FEM și testare pe stand experimental 32

Bibliografie selective 34

Introducere

Angrenajele cilindrice cu dantură înclinată (elicoidale) reprezintă o categorie esențială de componente în ingineria mecanică modernă, fiind preferate în majoritatea transmisiilor de putere, de la industria grea până la aplicațiile auto și aerospațiale. Această predilecție este justificată de avantajele lor operaționale semnificative: ele asigură o angrenare graduală și continuă, ceea ce minimizează șocul, reduce substanțial zgomotul în funcționare și permite transmiterea unor cupluri mult mai mari comparativ cu angrenajele cu dinți drepți. Cu toate acestea, complexitatea lor geometrică introduce și provocări majore, în special în ceea ce privește evaluarea stării de solicitare și garantarea durabilității la oboseală.

Punctul critic al acestor componente, cel care determină cel mai frecvent cedarea prin oboseală, este reprezentat de zona de racordare (fillet) a dintelui. Aici, schimbarea bruscă a secțiunii transversale, combinată cu forțele complexe generate de angrenarea elicoidală (care includ încovoiere, forțe axiale și o distribuție neuniformă a sarcinii pe lățimea dintelui), generează concentrații maxime de tensiune. O evaluare inexactă a acestor tensiuni critice conduce direct la o supra-dimensionare ineficientă sau, mult mai periculos, la o sub-dimensionare care se traduce prin falimente mecanice premature. Metodele de proiectare convenționale, bazate pe standarde internaționale recunoscute precum ISO 6336 sau AGMA Standard 2001-D04, deși fundamentale, utilizează factori de corecție empirici care adesea se dovedesc a fi insuficienți sau inexacți în capturarea detaliilor locale, cum ar fi influența precisă a geometriei sculei de prelucrare (ex. racordarea cu protuberanță) sau a tensiunilor reziduale.

Legendă

Nr. crt.	**Abrev.**	**Semnificație/ Significance**
01	b	Latimea danturii
02	d	Diametrul de divizare
03	d_a	Diametrul de cap
04	d_b	Diametrul de baza
05	d_f	Diametrul de picior
06	d_m	Diametrul mediu al rulmentului
07	d_1	Diametrul de divizare al pinionului
08	d_2	Diametrul de divizare al roții conduse

09	ε	Gradul de acoperire
10	*F*	Forta
11	F_{fZ}	Forta tangentiala din angrenare la nivelul cercului de baza
12	F_a	Sarcina axială
13	F_{bt}	Forţa tangenţială din angrenare la nivelul cercului de bază
14	F_r	Sarcina radială
15	h	Înălţimea dintelui
16	h^*_{0a}	Coeficientul inaltimii capului de referinta
17	h^*_{0f}	Coeficientul inaltimii capului de referinta
18	h_a	Înălţimea capului dintelui
19	h_f	Înălţimea piciorului dintelui
20	m_n	Modulul normal
21	m_t	Modulul frontal
22	p_E	Pasul elicei
23	p_n	Pasul normal
24	p_t	Pasul frontal
25	WL	Sarcina specifică
26	x	Coeficientul deplasarii radiala a profilului
27	z	Numărul de dinţi
28	α_n	Unghiul de presiune pe cilindrul de divizare în plan normal
29	α_t	Unghiul de presiune pe cilindrul de divizare în plan frontal
30	β	Unghiul de înclinare pe cilindrul de divizare
31	T	Cuplu
32	K_{FX}	Turaţia
33	S_F	Forţă tangenţială

34	σ_F	Forța radială
35	ν	Numărul virtual de dinți
36	E	Coeficient de deplasare
37	u	Forța axială
38	β_b	Factorul de formă
39	Z_H	Factorul de distribuție a sarcinii
40	Z_M	Factorul de înclinare a danturii
41	Z_ϵ	Viteza periferică a angrenajului
42	Z_β	Factorul dinamic interior
43	K_{HL}	Factorul de suprasarcină
44	Z_L	Factorul duratei de viață
45	Z_R	Factorul repartitiei longitudinale a sarcinii pentru solicitarea la piciorul dintelui
46	Z_V	Factorul de siguranta pentru solicitări la oboseala la piciorul dintelui
47	Z_W	Tensiunea la încovoiere a dintelui
48	K_{HX}	Coeficientul lui Poisson
49	$K_{H\beta}$	Modul de elasticitate longitudinal
50	S_H	Raport de transmitere
51	σ_H	Unghiul elicei pe diametrul de baza
52	n	Factorul punctului de rostogolire
53	F_t	Factorul de material
54	F_r	Factorul gradului de acoperire
55	Z_{v1}	Factorul datorat înclinării danturii
56	X	Factorul de viață
57	Fa	Factorul de lubrifiant
58	Y_F	Factorul de calitate a suprafeței

59	Y_ϵ	Factorul vitezei de alunecare
60	Y_β	factorul raportului durității flancurilor
61	v_1	Factorul de dimensiune
62	K_v	Factorul de distribuție a sarcinii pe flancul dintelui
63	K_0	Factorul de siguranță la solicitarea hertziană
64	K_L	Tensiunea de contact
65	W_T	Forța transmisă
66	K_0	Factorul de suprasarcina
67	Q_v	Clasa de precizie
68	K_v	Factorul dinamic
69	C_{mc}	Factorul corecției de sarcina
70	C_{pf}	Factorul de proportie a pinionului
71	C_{pm}	Factorul modificării proporției profilului
72	C_{ma}	Factorul de aliniere a discretizării
73	Ce	Factor de corecție a alinierii rețelei
74	KH	Factorul de distribuție a sarcinii
75	KB	Factorul de grosime a dintelui
76	YJ	Factorul de formă pentru tensiunea la baza dintelui
77	σ_b	Tensiuniea la baza dintelui
78	ZE	Coeficientul de elasticitate
79	ZI	Factorul de suprafață
80	ZR	Factorul de suprafață
81	σ_c	Tensiunea de contact în angrenaj este:
82	FEM	Finite Element Method – Metoda elementului finit
83	MEF	Metoda Elementului Finit (versiunea în limba română)

84	SOLID186	Tip de element cu 20 noduri utilizat în simularea 3D
85	CONTA174	Element de contact folosit pentru simularea interacţiunii dintre suprafeţe
86	TARGE170	Element ţintă în ANSYS pentru cuplarea contactului
87	D1–D6	Puncte de măsurare a tensiunii în zona de racordare a dintelui
88	P1–P6	Poziţii de aplicare a forţei prin dornuri, echidistante
89	Dorn	Componentă experimentală utilizată pentru aplicarea sarcinii punctiforme
90	C++	Limbajul de programare utilizat pentru scrierea codului de suprapunere
91	σ_{VM}	Tensiunea echivalentă von Mises (în analiza FEM)
92	Δσ	Variaţie de tensiune între poziţii de încărcare
93	ε_VM	Deformaţia echivalentă von Mises
94	Pinball Region	Parametru ANSYS utilizat pentru definirea zonei de contact virtuală
95	Augmented Lagrange	Metodă de formulare pentru contactul nelinear în ANSYS
96	$F_{aplicată}$	Forţă impusă prin standul de testare (pe fiecare dorn)
97	σ_{rac}	Tensiune maximă în zona de racordare (din simulare sau experiment)

Capitolul 1. Stadiul actual privind studiul experimental si analitic al angrenajelor cu roți dințate cilindrice cu dinți înclinați

Mecanismele de transmitere și transformare a mișcării de rotație reprezintă un element esențial în dezvoltarea ingineriei mecanice, iar roțile dințate ocupă un loc central în acest context. De-a lungul istoriei, aceste mecanisme au evoluat de la forme primitive, realizate din lemn, la sisteme sofisticate de mare precizie utilizate în prezent în numeroase domenii tehnice.

Primele utilizări ale roților dințate datează din antichitate, în civilizațiile egipteană, greacă și romană, unde erau folosite în sisteme de blocare, în porți și mecanisme pentru extracția apei.Un punct de referință major în istoria acestor mecanisme îl constituie **Mecanismul din Antikythera** (sec. II î.e.n.), o construcție extrem de complexă pentru acea vreme, capabilă să efectueze calcule astronomice. Acesta este considerat primul calculator analogic și dovedește nivelul avansat de înțelegere a mecanicii și prelucrării metalelor în Grecia Antică.

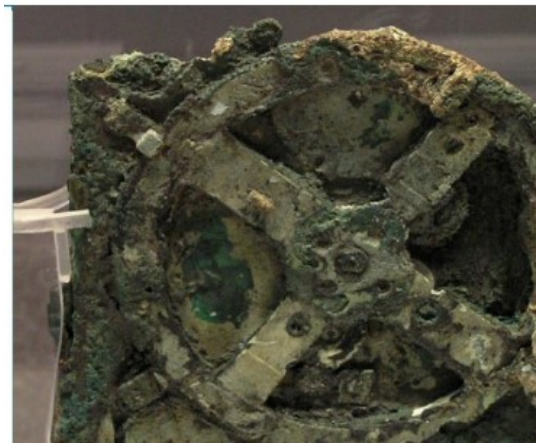


Fig. 1.2. Fragmentul mare al Mecanismului de la Antikythera [5]

Arhimede, cunoscut pentru numeroasele sale contribuții în domeniul științei și tehnicii, este primul care a descris angrenajul melc-roată melcată, o soluție tehnică importantă pentru transmiterea mișcării între axe perpendiculare.

Pe măsură ce matematica s-a dezvoltat, și forma dinților roților a fost rafinată. Inițial, contururile erau stabilite empiric, însă ulterior au fost definite matematic (ex: evolventă, cicloidă), asigurând o transmitere constantă a mișcării și o funcționare lină. Aceste progrese s-au accentuat începând cu sfârșitul Renașterii.

În timpul revoluției industriale (sec. XVIII), nevoia transmiterii eficiente a unor forțe mari a condus la dezvoltarea pe scară largă a sistemelor cu roți dințate. **James Watt**, în efortul de a evita un brevet, a conceput un angrenaj planetar pentru motoarele sale cu

abur, care s-a dovedit eficient și inovator. Ulterior, dezvoltarea automobilelor a dus la o nouă serie de inovații: **Emil Levassor** și **Louis Renault** au pus bazele transmisiei moderne, iar **Wilhelm Maybach** a perfecționat sistemul prin introducerea angrenajelor culisante și danturii înclinate, care asigură o funcționare mai silențioasă și o capacitate mai mare de încărcare.

În același timp, în domeniul mașinilor-unelte, roțile dințate au devenit componente-cheie pentru precizia mecanică.Introducerea roților de schimb de către **Henry Maudslay** a permis filetarea cu o acuratețe ridicată. Deși în timpul Primului Război Mondial s-au înregistrat frecvente defecțiuni ale angrenajelor, acestea au fost înlocuite treptat cu sisteme mai fiabile, datorită avantajelor pe care le ofereau: precizie, durabilitate, siguranță și capacitate de a atinge turații variabile.

În epoca modernă, analiza și proiectarea roților dințate a fost revoluționată de apariția computerelor și a metodelor numerice. S-a trecut de la modele analitice clasice (Hertz, Lewis, Timoshenko) la **Metoda Elementelor Finite (MEF)**, care permite o analiză detaliată a distribuției tensiunilor, deformărilor și a comportamentului real în timpul funcționării. Cercetătorii precum Wilcox, Vijayakar, Chabert sau Tsay au contribuit la dezvoltarea acestor modele, care analizează contactul dintre dinți, efectele erorilor de montaj, precum și uzura sau oboseala materialului.

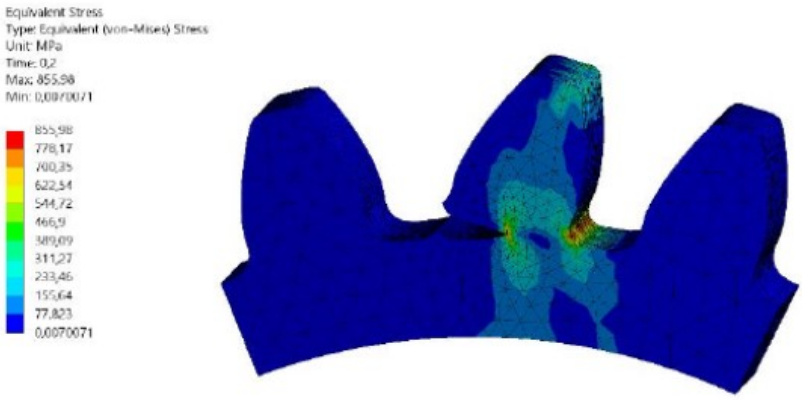


Fig. 1.3. Simulare cu element finit a angrenajelor [22]

Standuri de Testare pentru Tensiunea la Baza Dintelui în Regim Static

Totodată, proiectarea modernă se bazează pe softuri specializate (ex: CATIA, SolidWorks, Inventor, Ansys), care permit simularea completă a funcționării angrenajelor în condiții reale. Acestea ajută la optimizarea formei flancurilor, alegerea materialelor, evaluarea rezistenței la gripaj, uzură și alte forme de degradare, sporind astfel fiabilitatea și durabilitatea transmisiei.

În concluzie, roțile dințate au evoluat de la unelte rudimentare la componente de înaltă precizie, indispensabile în mecanisme moderne.Această evoluție reflectă nu doar progresul tehnic, ci și adaptabilitatea continuă a soluțiilor mecanice la cerințele tot mai complexe ale societății moderne.

Analiza tensiunii la baza dintelui în regim static este esențială pentru înțelegerea comportamentului inițial al roților dințate sub sarcină, oferind o bază solidă pentru proiectare și optimizare. În acest context, metodele experimentale și modelele numerice joacă un rol crucial în evaluarea distribuției tensiunilor și în validarea ipotezelor teoretice.

Printre cele mai utilizate metode experimentale se numără **mărcile tensometrice**, instrumente precise de măsurare a deformărilor locale, care permit determinarea tensiunilor în zona de bază a dintelui, acolo unde apar cele mai mari concentrații de efort. Acestea funcționează pe baza variației rezistenței electrice a unui element sensibil și sunt integrate în circuite de tip punte Wheatstone pentru detectarea variațiilor minore. Aplicațiile pot include sisteme cu telemetrie sau inele colectoare pentru transmiterea semnalelor, chiar și în regimuri statice.



Fig. 1.4. Marci tensometrice precablate[28]

Din punct de vedere analitic și numeric, modelarea 2D și 3D a roților dințate, în special a celor cu dinți înclinați, permite simularea realistă a comportamentului dinților sub sarcină. Metode precum analiza cu elemente finite (FEM) oferă rezultate detaliate privind distribuția tensiunilor, influența geometriei și condițiile de contact, facilitând detectarea zonelor de inițiere a fisurilor și optimizarea designului.

Standardele internaționale (ISO 6336, DIN etc.) folosesc modele bazate pe complianța (conformitatea) dinților – un parametru esențial în evaluarea deformabilității și distribuției sarcinilor. Spre deosebire de modelele simple care consideră doar rigiditatea dintelui, abordările moderne includ și flexibilitatea arborilor, jantelor, rulmenților, luând în calcul fenomene precum deformarea Hertziană, încovoierea, forfecarea și compresia axială.

Numeroase studii, de la cercetările clasice ale lui Weber, Walker, până la abordările moderne cu MEF, au abordat analiza tensiunilor, complianței și propagării fisurilor în zona bazei dintelui. Cercetările experimentale și teoretice au arătat că rigiditatea

contactului este influențată semnificativ de geometria dintelui, poziția sarcinii, material, condițiile de lubrifiere și existența defectelor precum fisurile.

De asemenea, cercetările recente s-au extins asupra comportamentului neliniar, dinamicii transmisiilor, influenței erorilor de profil, distribuției neuniforme a sarcinii și a variației în timp a rigidității contactului.S-au studiat inclusiv efectele fisurilor asupra variației rigidității și metode de predicție timpurie a defectelor prin tehnici analitice, experimentale sau hibride.

În concluzie, analiza tensiunii la baza dintelui constituie o temă complexă, multidisciplinară, care combină metode experimentale de înaltă precizie cu modelare numerică avansată. Integrarea acestor abordări contribuie la îmbunătățirea fiabilității, durabilității și performanței angrenajelor, în special în aplicații critice.

Angrenajele cilindrice cu dantură înclinată oferă o transmitere eficientă şi silenţioasă a cuplului, fiind preferate în aplicaţii solicitante datorită contactului progresiv între dinţi. Asigură o uzură redusă, fiabilitate ridicată şi performanţe superioare chiar şi la viteze mari. Deşi implică o fabricaţie complexă, progresele în CAD, FEM şi simulare dinamică permit optimizarea lor.Tendinţele actuale vizează personalizarea profilului dinţilor şi integrarea tehnologiilor moderne, menţinând aceste angrenaje relevante în faţa alternativelor emergente.

Capitolul 2. Direcțiile, obiectivul principal și metodologia de cercetare-dezvoltare a angrenajelor cilindrice cu dantură înclinată

Activitatea de cercetare-dezvoltare propusă urmăreşte elaborarea unei metodologii integrate de analiză a comportamentului mecanic al angrenajelor cilindrice cu dinţi înclinaţi, în special pentru cele cementate. Studiul vizează compararea metodelor analitice ISO şi AGMA, dezvoltarea unui model geometric fidel al dintelui, simulări numerice FEM şi validare experimentală cu mărci tensometrice. Scopul este evaluarea precisă a distribuţiei tensiunilor şi îmbunătăţirea durabilităţii roţilor dinţate în condiţii reale de funcţionare.

Capitolul 3. Abordarea calculelor în standardele ISO 6336 si AGMA Standard 2001–D04

Capitolul 4 tratează evaluarea tensiunilor mecanice în angrenajele cilindrice cu dantură înclinată, cu accent pe tensiunile la baza dintelui și cele de contact. Sunt analizate comparativ metodele analitice oferite de standardele **ISO 6336** și **AGMA 2001–D04**, care, deși similare în structură, prezintă diferențe importante privind parametrii considerați, ipotezele de calcul și rezultatele obținute.

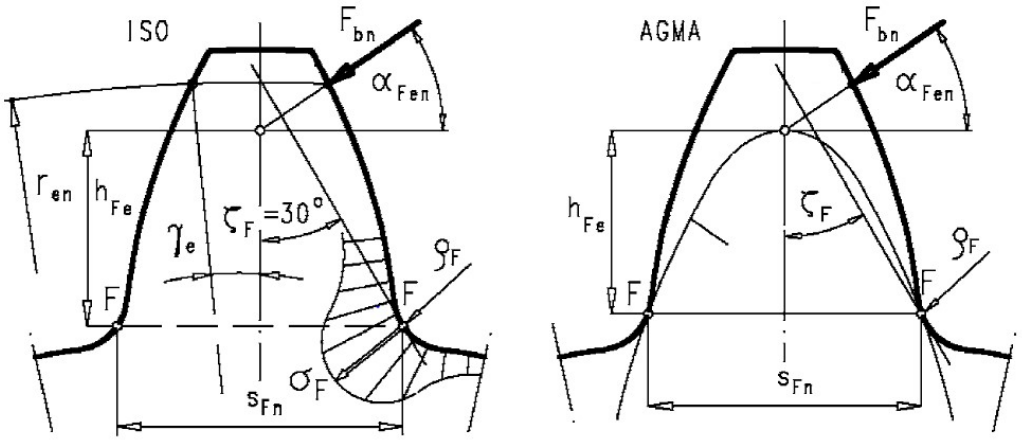


Fig 4.1. Schema de încărcare ISO şi AGMA[64][66]

Pentru a obține o estimare mai fidelă a comportamentului real sub sarcină, este propusă utilizarea **metodei elementului finit (FEM)**, care permite analiza angrenajelor cu geometrii corectate, imposibil de abordat riguros prin metodele clasice. Modelul Hertzian este folosit ca fundament pentru analiza tensiunilor de contact, fiind adaptat la complexitatea geometriei angrenajelor.

Se subliniază importanța modelării detaliate a contactului dinților și influența geometriei dinamice asupra distribuției tensiunilor. De asemenea, sunt prezentate limitele metodelor analitice în raport cu simulările numerice, și este propusă o **analiză comparativă riguroasă** (ISO vs. AGMA vs. FEM) aplicată acelorași condiții de lucru și geometrie.

În subcapitolul 4.3 se vor aplica efectiv relațiile de calcul conform standardelor, pe baza unui set de date geometrice și funcționale definite pentru angrenajul analizat.

Nume	Simbol	Unitate de măsură	Z1	Z2
Număr de dinţi	z	-	16	16
Modulul normal	m_n	mm	6	
Coeficienţii de deplasare a danturii	x	-	0.682	0.625
Lăţimea danturii	B	mm	150	
Unghiul de presiune normal	A	°	20	
Unghiul de inclinare pe diametrul de bază	B	°	10	
Unghiul de presiune transversal	α_t	°	20.2836	
Unghiul de angrenare	α_w	°	28.4547	
Distanţa intre axe	A12	mm	104	
Modulul tangenţial	m_t	mm	6.0926	
Diametrul de divizare	d	mm	97.4810	97.4810
Diametrul de rostogolire	d_w	mm	104	104

Diametrul de bază	d_b	mm	91.436	91.436
Înălțimea capului dintelui	h_a	mm	10.092	9.75056
Coeficientul de scurtare a dintelui	K	-	0	
Jocul la piciorul dintelui	c	mm	1	
Înălțimea la piciorul dintelui	h_f	mm	3.408	3.74944
Diametrul de cap	d_a	mm	117.665	116.982
Diametrul de fund	d_f	mm	90.665	89.9821
Gradul de acoperire frontal	ϵ_α	-	1.33459	
Gradul de acoperire datorat lățimii danturii	ϵ_β	-	1.38185	

Capitolul 4. Modelare 2D Avansată a Angrenajelor Evolventice – Simulare și Validare

În contextul ingineriei moderne, modelarea 3D a angrenajelor și validarea comportamentului acestora prin simulări numerice avansate reprezintă pași esențiali în procesul de proiectare și optimizare a sistemelor de transmisie. Datorită complexității geometrice și a solicitărilor la care sunt supuse angrenajele în exploatare, este necesar un model virtual fidel, care să reproducă cu acuratețe atât forma, cât și comportamentul mecanic al componentelor. În acest sens, modelarea 3D a fost realizată cu ajutorul platformei Siemens NX 12, un software performant, utilizat pe scară largă în industria constructoare de mașini, datorită funcțiilor sale avansate de modelare parametrică, simulare și integrare cu analizele prin metoda elementului finit (MEF).

Modelarea pinionului a început prin definirea semifabricatului, un corp cilindric cu diametrul exterior de 117,665 mm și lungimea de 150 mm, realizat prin operația de extrudare. Acest corp a reprezentat baza pe care s-a construit ulterior întreaga geometrie a danturii. Pentru generarea dinților s-a pornit de la profilul transversal al unui singur dinte, obținut pe baza unui set de coordonate care definesc cu precizie forma evolventică. Acest profil a fost apoi utilizat într-o operație de tip "swept", care a permis crearea formei tridimensionale a golului dintre doi dinți, respectând exact geometria funcțională a dinților implicați în angrenare.

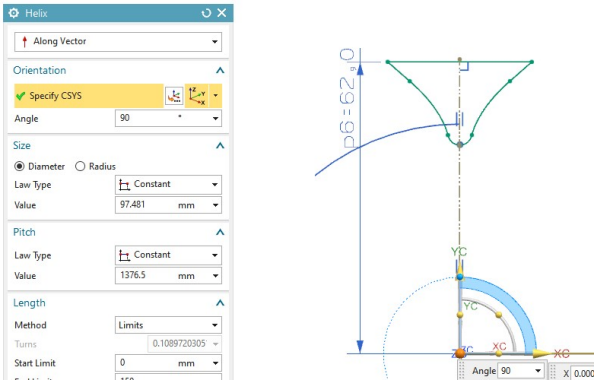


Fig. 5.4. Generare elice dinte

După obținerea unui singur gol de dinte, s-a recurs la multiplicarea acestuia prin funcția "circular pattern", care a generat întreaga dantură a pinionului, respectând pasul circular și simetria specifică unui angrenaj cilindric exterior cu dantură dreaptă. Această abordare a permis nu doar modelarea eficientă și precisă a pinionului, ci și modificarea facilă a parametrilor geometrici în cazul în care s-au efectuat optimizări ulterioare în faza de analiză. De asemenea, geometria finală obținută a fost complet parametrică, oferind flexibilitate maximă în adaptarea designului la condițiile reale de lucru sau la cerințele impuse de aplicația specifică.

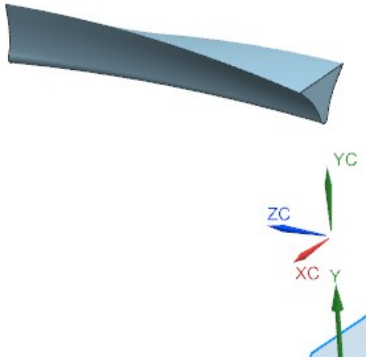


Fig. 5.5.Negativ dinte.

Modelul 3D al pinionului, odată finalizat, a fost importat într-un mediu de simulare pentru realizarea analizelor prin metoda elementului finit. Scopul acestor simulări a fost evaluarea comportamentului mecanic al pinionului în condiții reale de funcționare, în special în ceea ce privește distribuția tensiunilor în zona de contact a dinților, riscul de apariție a oboselii și comportamentul la sarcini dinamice. Prin aplicarea unei sarcini concentrate pe flancul unui dinte, s-a putut analiza modul în care forța este transmisă către dinții adiacenți și s-au identificat zonele critice cu risc crescut de fisurare sau deformare plastică.

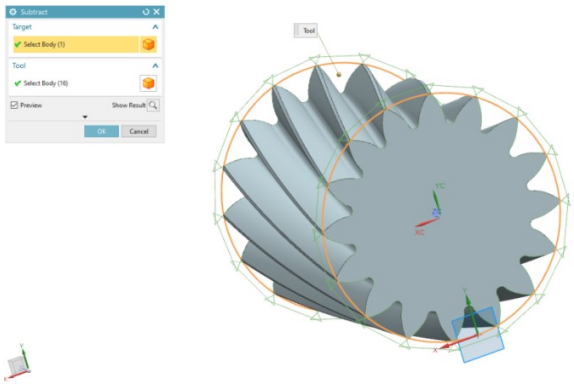


Fig. 5.7. Pinion generat

Rezultatele obținute în urma simulărilor numerice au fost esențiale pentru validarea proiectului și pentru identificarea necesității unor eventuale optimizări. Astfel, în funcție de distribuția tensiunilor și de modul în care se comportă materialul în regim de solicitare ciclică, au fost propuse ajustări ale profilului dintelui, în special în zona de racordare între piciorul dintelui și flanc, acolo unde apar frecvent concentrări de tensiune. De asemenea, s-a avut în vedere posibilitatea aplicării unor tratamente termice locale, cum ar fi cementarea sau inducția, pentru a crește duritatea suprafețelor de contact și a îmbunătăți rezistența la uzură.

În concluzie, integrarea proceselor de modelare 3D cu simulările prin metoda elementului finit oferă o imagine completă asupra comportamentului pinionului în condiții de lucru reale. Această abordare permite nu doar proiectarea unui angrenaj funcțional, ci și optimizarea lui din punct de vedere al fiabilității, durabilității și performanței mecanice. Prin urmare, utilizarea acestor instrumente avansate devine indispensabilă în proiectarea modernă a angrenajelor, contribuind decisiv la reducerea costurilor de producție, minimizarea timpului de dezvoltare și creșterea competitivității produsului final.

Capitolul 5. Evaluarea Acurateței Geometrice a Pinioanelor: Studiu Comparativ Între Modelele Generate prin Cod și Cele din Biblioteca NX12

În această secțiune a lucrării, este prezentată o **analiză comparativă** detaliată a geometriei roților dințate, comparând două metode de generare a profilurilor evolventice ale pinioanelor: una realizată printr-un algoritm propriu dezvoltat pentru modelare parametrică în mediul de proiectare NX12, și cealaltă bazată pe utilizarea bibliotecii standard din același software. Obiectivul principal al studiului este evaluarea preciziei geometrice a fiecărei metode și determinarea gradului de adecvare al acestora pentru diverse etape ale procesului de proiectare și analiză structurală a angrenajelor. În mod particular, se pune accent pe analiza acurateței profilului evolventic al dintelui, precum și a regiunii critice de racordare a acestuia.

Metodologia de verificare a acurateței profilului evolventic

Pentru a evalua diferențele geometrice dintre modelele generate, s-a adoptat o **metodologie riguroasă** bazată pe principiile fundamentale ale teoriei de generare a profilului evolventic. Procesul a început cu modelarea cercului de bază al pinionului, un element esențial pentru definirea profilului evolventic al dintelui. În continuare, au fost extrase proiecțiile bidimensionale ale profilului dintelui pe planul frontal, pentru a permite măsurători precise ale dimensiunilor relevante. Aceste măsurători au fost realizate la cinci unghiuri diferite (10°, 16°, 22°, 28°, 35°), selectate strategic pentru a reprezenta porțiuni semnificative ale flancului dintelui, de la baza acestuia până la vârf.

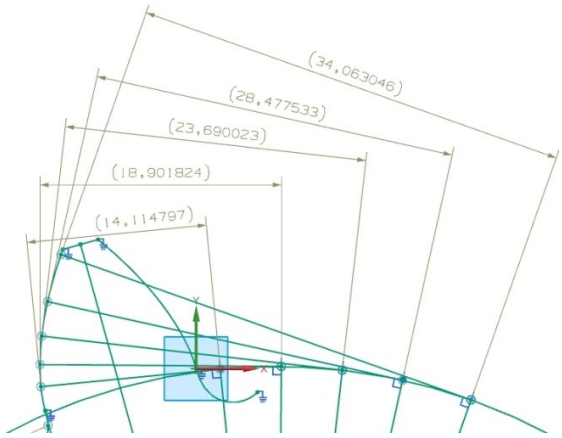


Fig. 6.4. Detaliu angrenaj generat

Din punctele de intersecție ale acestor linii unghiulare cu cercul de bază, s-au trasat tangente la cerc în direcția evolventei, extinzându-le până la intersecția cu conturul real al profilului dintelui. Această abordare geometrică a permis definirea grosimii evolventei la diferite adâncimi, măsurată în raport cu cercul de bază, și a facilitat compararea precisă a lungimilor segmentelor tangente pentru modelele generate algoritmic și cele din biblioteca NX12. Rezultatele obținute au evidențiat mici diferențe între cele două metode, dar aceste diferențe au fost semnificative doar în anumite zone critice ale profilului.

Metodologia de verificare a acurateței racordării

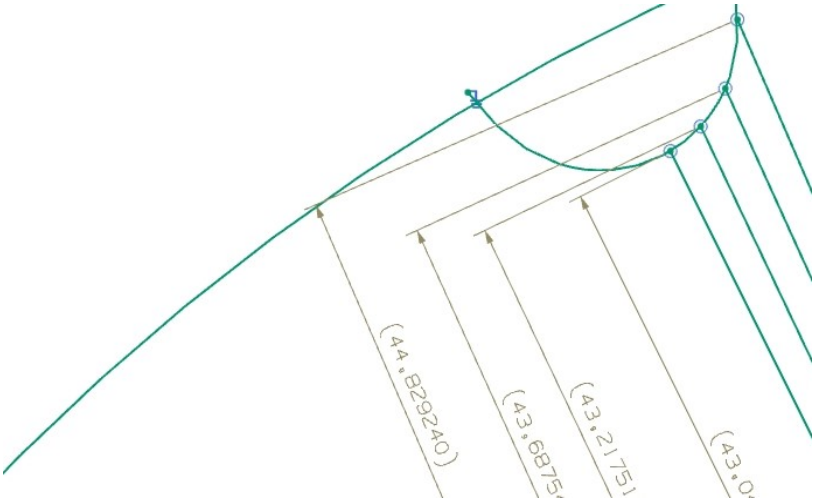


Fig. 6.5.Racordare racordare angrenaj generat

Pe lângă analiza evolventei, s-a acordat o **atenție deosebită zonei de racordare** a dintelui, care este esențială pentru rezistența la solicitările mecanice ale angrenajelor. Această zonă a fost verificată prin măsurători ale razei de curbură și ale distanțelor între punctele relevante, atât în cazul modelului generat prin codul propriu, cât și în cazul celui provenit din biblioteca standard NX12. Compararea acestor parametri a oferit informații despre fidelitatea geometriei racordării și despre posibilele diferențe care ar putea influența comportamentul mecanic al roții dințate, în special în ceea ce privește rezistența la uzură și performanța sub sarcină.

Rezultate și Analiză

Tabel 6.1. Comparație Lungimi Segmente Tangente (Model Cod NX vs. Bibliotecă NX)

Unghi profil (grade)	Lungime Segment Tangent - Model Cod (mm)	Lungime Segment Tangent - Bibliotecă (mm)	Diferență (mm)
10	14.555156	14.59809	-0.042934
16	19.342752	19.385596	-0.042844
22	24.130351	24.172272	-0.041921
28	28.917910	28.960854	-0.042944
35	34.454674	34.546295	-0.091621

Pentru a verifica profilul evolventic, au fost selectate șase puncte de control distribuite pe curba evolventică. Fiecare punct a fost caracterizat prin coordonatele polare, iar pentru

fiecare punct a fost calculat parametrul de rostogolire.Aceste calcule au fost esențiale pentru determinarea poziției punctului pe traiectoria involută și pentru compararea unghiurilor teoretice cu cele reale. De asemenea, au fost implementate formule matematice în Excel pentru o verificare suplimentară a erorilor unghiulare.

Rezultatele au arătat că, în comparație cu modelul generat din biblioteca NX12, **modelul generat prin algoritmul propriu** prezenta o eroare unghiulară ușor mai mare, în special în zonele de vârf ale dintelui. Totuși, această eroare este considerată acceptabilă în contextul obiectivelor proiectului, având în vedere că modelul propriu oferă un control superior asupra parametrilor de construcție și permite o adaptare mai precisă a profilului la geometria reală a dintelui. Astfel, modelul algoritmic prezintă o **precizie mai mare în zonele critice ale profilului**, ceea ce este esențial pentru performanța pe termen lung a angrenajului.

Concluzii

Profil generat de cod:

rb	s	r	teta grd	teta rad	fi	fi rad	teta teoretic	teta grd	eroare (grd)
45.7	14.555	47.961	0.6427	0.0112	18.309	0.3195	0.01025	0.5876	0.055133
45.7	19.342	49.624	1.3683	0.0238	24.309	0.4242	0.02301	1.3188	0.049474
45.7	24.130	51.679	2.4742	0.0431	30.309	0.5289	0.04242	2.4305	0.043748
45.7	28.917	54.080	3.9843	0.0695	36.309	0.6337	0.06887	3.9461	0.038279
45.7	34.454	57.232	6.2563	0.1091	43.309	0.7558	0.10862	6.2239	0.032391

În urma analizei detaliate, se poate concluziona că **metoda de generare a profilului prin cod propriu**este preferabilă față de utilizarea bibliotecii NX12, în special datorită **controlului mai mare asupra parametrilor geometrici** ai profilului și racordării. Deși modelul din bibliotecă are o eroare mai mică în ceea ce privește geometria evolventică, modelul generat algoritmic permite o **adaptare mai fidelă la cerințele specifice ale proiectului**. Aceasta asigură o mai bună **compatibilitate cu cerințele de performanță mecanică și de fiabilitate** ale angrenajelor, având un impact semnificativ asupra **etapelor ulterioare ale analizei numerice și comparării cu date experimentale**.

Astfel, **metoda algoritmică** se dovedește a fi mai robustă și mai eficientă, având un**potențial mai mare pentru optimizări ulterioare**, în special în contextul în care se urmărește obținerea unor **geometriespecific** personalizate pentru aplicații industriale complexe.

Capitolul 6. Standul de testare

În această cercetare, scopul principal a fost realizarea unei **analize complexe a comportamentului mecanic al roților dințate** cu dantură cilindrică înclinată și lățimi axiale semnificative, într-un cadru experimental care să reproducă fidel condițiile de funcționare reale. Abordarea teoretică și numerică anterioară a studiat comportamentele de solicitare ale angrenajelor utilizând atât modele analitice, cât și simulări cu elemente finite. Cu toate acestea, modelele numerice au fost limitate de ipoteze simplificatoare (de exemplu, material izotrop, contact idealizat, condiții de încărcare perfect controlate) care nu au reușit să surprindă complet complexitatea comportamentului real al dinților din angrenaje. Astfel, pentru a completa și valida rezultatele obținute prin metode numerice, cercetarea a inclus o etapă experimentală, desfășurată pe un**stand de încercare inovativ**.

Rolul Etapei Experimentale

Standul experimental a fost conceput pentru a permite **măsurarea precisă a distribuției tensiunilor** și **deformațiilor** pe flancurile și în racordarea dinților, replicând condițiile reale de funcționare ale unui angrenaj sub sarcină. Etapa experimentală a fost esențială pentru a identifica zonele de solicitare critică, dar și particularitățile procesului de transmitere a sarcinii care nu pot fi observate prin simulări. Astfel, prin această abordare, s-a urmărit completarea rezultatelor numerice cu date experimentale concrete, care să permită o validare directă a comportamentului real al dinților sub diferite condiții de operare.

Conceperea și Realizarea Standului Experimental

Un aspect fundamental al cercetării a fost **proiectarea și realizarea unui stand experimental dedicat** care să permită evaluarea comportamentului mecanic al roților dințate cu geometrii complexe, caracterizate de danturi cilindrice înclinate și lățimi axiale semnificative. Standul experimental a fost integrat într-o **mașină universală de încercări**, care asigură aplicarea unor forțe de compresiune controlate și menținerea stabilității condițiilor de testare. Mecanismul de aplicare a sarcinii utilizează un sistem **șurub–piuliță cu autoblocare**, operat manual, care acționează asupra unei sanie longitudinale, montând un palpator special conceput pentru aplicarea punctuală a forței tangențiale asupra dintelui.

Pentru a asigura **precizia măsurătorilor**, sistemul include un **mecanism cu arc pentru retragerea automată** a palpatorului în fazele de reglaj, prevenind astfel contactele nedorite cu echipamentul de măsurare. De asemenea, poziția exactă a punctului de aplicare a forței este determinată cu ajutorul unui **sistem de măsură liniară** (riglă gradată și ac indicator fix), care permite citirea directă a deplasării palpatorului și corelarea acesteia cu poziția de contact pe suprafața dintelui.

Instrumentarea și Colectarea Datelor Experimentale

Instrumentarea a fost gândită astfel încât să permită **compararea comportamentului flancurilor active și pasive** ale dintelui, utilizând mărci tensometrice amplasate strategic pe fiecare flanc. Acestea au permis identificarea stărilor de **întindere și compresiune** generate de momentul de încovoiere indus de componenta tangențială a forței aplicate. Sistemul de măsură a fost conceput pentru a achiziționa valori de deformație (ε) la nivelul fiecărei mărci tensometrice, folosind o punte tensometrică în configurație **Wheatstone**, iar semnalele analogice au fost digitalizate și transmise în timp real către o unitate de calcul pentru prelucrarea și reprezentarea grafică a rezultatelor (curbe forță–deformație).

Pentru a**asigura o repetabilitate ridicată**, s-au realizat zece seturi de teste independente pentru fiecare combinație de **valoare a forței aplicate** și **poziție a punctului de aplicare** pe suprafața dintelui. Această metodă a permis obținerea unor medii statistice robuste și calcularea intervalelor de încredere înguste, reducând influența variațiilor accidentale asupra datelor experimentale.

În plus, înainte de începerea testelor propriu-zise, standul a fost supus unei etape de **calibrare și validare**, care a inclus verificarea liniarității răspunsului sistemului de măsură, testarea repetabilității pentru sarcini constante și compararea rezultatelor experimentale cu cele obținute prin simulări numerice pentru un caz de referință. Acest proces a asigurat **corectitudinea măsurătorilor** și a consolidat credibilitatea datelor obținute în urma experimentelor.

Validarea Rezultatelor și Contribuția Standului Experimental

Rezultatele obținute din **testele experimentale** au avut o relevanță directă pentru **proiectarea, validarea și optimizarea** roților dințate cu geometrie complexă. Standul experimental dezvoltat a permis evaluarea detaliată a distribuției tensiunilor și deformațiilor pe întreaga suprafață a dintelui și în zona de racordare, evidențiind astfel comportamentele care nu sunt complet surprinse de modelele numerice.

De asemenea, infrastructura experimentală a oferit un cadru versatil și modular, capabil să testeze o gamă largă de configurații de roți dințate, având aplicabilitate atât în cercetarea academică, cât și în aplicații industriale. Acest **stand experimental inovativ** reprezintă o contribuție semnificativă în domeniul **tribologiei** și **mecanicii angrenajelor**, având potențialul de a optimiza soluțiile constructive și de a **îmbunătăți fiabilitatea** transmisiunilor mecanice. În plus, prin posibilitatea de a aplica **forțe concentrate** progresive și de a menține solicitările în **domeniul elastic al materialului**, standul permite o **verificare detaliată a comportamentului dinților** în condiții cât mai apropiate de cele întâlnite în exploatarea reală.

Impactul Cercetării

Cercetarea contribuie semnificativ la **înțelegerea detaliată a comportamentului real** al angrenajelor, în special în condiții de funcționare extreme, și are un impact important asupra **optimizării soluțiilor de proiectare**. Prin utilizarea standului experimental, sunt

obținute date experimentale valoroase care permit **validarea și ajustarea** modelelor numerice existente, având un rol esențial în **îmbunătățirea performanței** transmisiunilor mecanice moderne și în **creșterea fiabilității** acestora.

În concluzie, **standul experimental inovativ** dezvoltat în cadrul cercetării reprezintă o verigă esențială în înțelegerea comportamentului mecanic al roților dințate cu geometrii complexe, oferind un instrument de cercetare valoros pentru domeniul ingineriei mecanice și contribuind la avansarea cunoștințelor în domeniu.

Modulul de 6 mm a fost ales ca dimensiune optimă pentru dintele analizat, având în vedere necesitatea de a permite montarea corespunzătoare a mărcilor tensometrice. Zona de racordare a dintelui este un punct sensibil, unde frecvent pot apărea fisuri de oboseală, iar un modul mai mic ar fi redus prea mult spațiul necesar pentru plasarea fiabilă a senzorilor. Acesta este esențial pentru a asigura o implementare eficientă a sistemului de măsurare și pentru a obține date precise privind comportamentul dintelui sub sarcină.

Lățimea de 150 mm a roții a fost aleasă pentru a asigura un suport adecvat pentru amplasarea mai multor mărci tensometrice pe întreaga suprafață a dintelui. Această decizie este crucială deoarece interacțiunea dintre dinți într-un angrenaj cilindric cu dantură înclinată se dezvoltă progresiv pe întreaga lățime, iar doar o lățime suficient de mare permite studierea completă a distribuției tensiunilor pe întreaga zonă de contact. Astfel, măsurarea efectivă a acestora poate fi realizată cu acuratețe doar dacă senzorii sunt amplasați corespunzător pe întreaga lungime a dintelui.

Numărul de 16 dinți ai roții introduce un fenomen de subtaiere, unde materialul din zona de racordare este îndepărtat mai mult decât este ideal. Acest lucru poate slăbi structura dintelui în această zonă, făcând-o mai vulnerabilă la concentrarea tensiunilor și la formarea fisurilor de oboseală. Deși subtaierea poate afecta rezistența bazei dintelui, aceasta a fost aleasă pentru a analiza comportamentul materialului în condiții de încărcare diferite.

Materialele alese pentru fabricarea roții și a pinionului reflectă un compromis între performanța mecanică și costuri. Pinionul este realizat dintr-un material de cementare, care îi conferă o suprafață dură, capabilă să reziste la uzura continuă și la solicitările de oboseală. În schimb, roata este realizată dintr-un material mai ușor de prelucrat și mai economic, dar care păstrează suficientă rezistență și tenacitate pentru a face față încărcărilor tipice întâlnite în aplicațiile uzuale.

Prelucrarea cu protuberanță a fost aleasă pentru a modifica profilul dintelui, ceea ce ajută la concentrarea tensiunilor în mod controlat. Acest fenomen are rolul de a facilita măsurarea comportamentului dintelui chiar și la încărcături mici, permițând identificarea timpurie a fisurilor de oboseală. Astfel, este posibil să se monitorizeze cu precizie zona de rădăcină a dintelui, unde sunt cele mai critice acumulările de tensiuni.

Mărcile tensometrice au fost amplasate strategic pe suprafața dintelui, pentru a analiza distribuția tensiunilor sub sarcină. Aceste măsurători sunt esențiale pentru a înțelege modul în care materialul răspunde la forțele aplicate. Sistemul de achiziție a datelor a fost

calibrat cu atenție pentru a asigura măsurători precise și fiabile, iar semnalele obținute de la mărcile tensometrice sunt înregistrate și analizate într-un mod detaliat.

Sistemul experimental utilizează un stand de testare, în care pinionul este blocat pentru a preveni orice mișcare de rotație nedorită, iar mărcile tensometrice sunt conectate la o punte Wheatstone, un dispozitiv extrem de precis care permite măsurarea variațiilor de rezistență. Aceste semnale sunt apoi procesate pentru a obține informații despre comportamentul materialului sub stres. Mașina universală de încercări este folosită pentru a aplica sarcini controlate, iar sistemul de achiziție a datelor este integrat cu un software care înregistrează și analizează rezultatele în timp real.

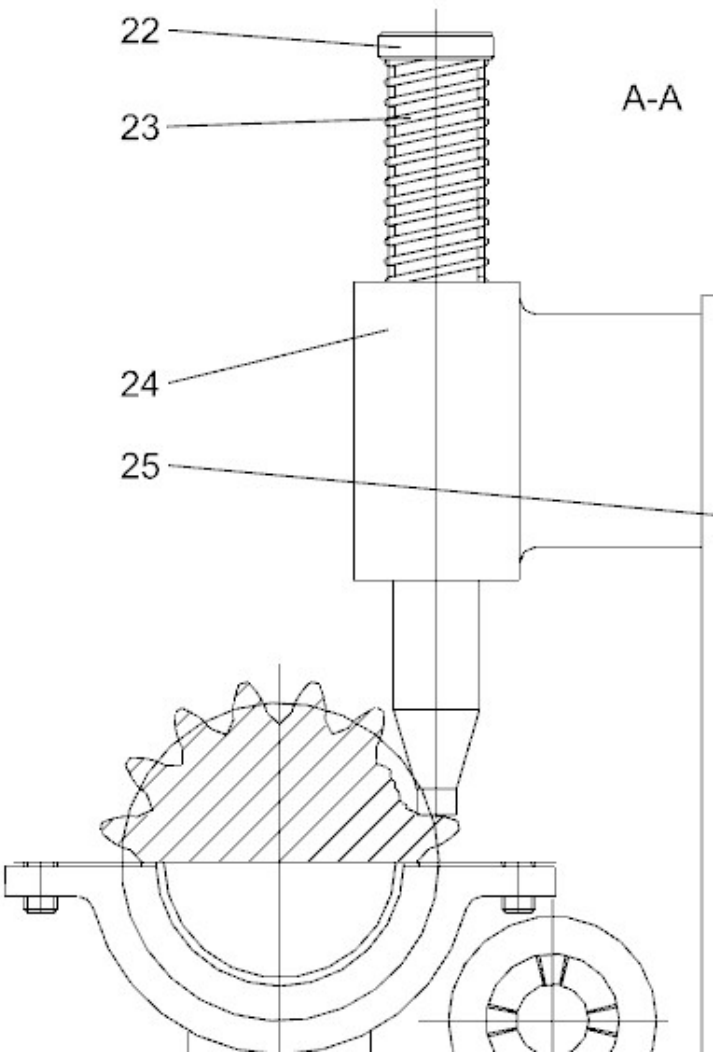


Fig. 7.2 Schiţa standului (vedere laterală)

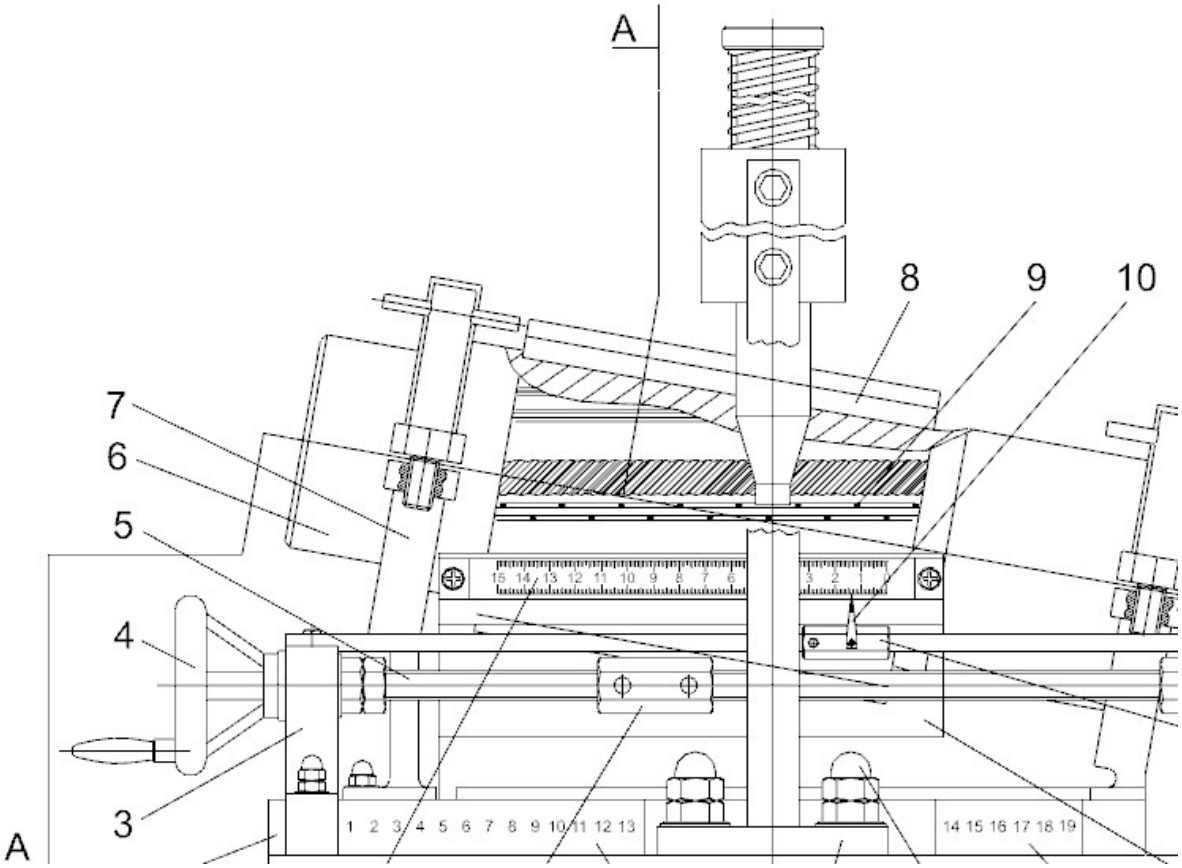


Fig. 7.3. Schiţa standului (vedere frontală)

Pentru a valida acuratețea datelor, testele sunt repetate de mai multe ori, iar analizele statistice ajută la identificarea și eliminarea valorilor extreme, care ar putea afecta integritatea concluziilor. Datele obținute sunt prelucrate folosind metode de interpolare polinomială, care permit construcția unor funcții continue sarcină-tensiune. Aceste funcții sunt folosite pentru a estima tensiunile la orice nivel de încărcare.

Pentru a evita influența valorilor aberante asupra analizei, se utilizează testul Grubbs, care ajută la detectarea valorilor extreme în setul de date. Această metodă asigură că doar valorile valide sunt incluse în analiza finală, iar rezultatele sunt corecte și reprezentative pentru comportamentul materialului sub sarcină.

Cercetarea a fost desfășurată într-un mediu controlat, folosind un stand experimental unde au fost obținute 10 seturi de date pentru analiza comportamentului elastic al dintelui sub sarcină punctiformă. În timpul testelor, echipamentele și senzorii au fost calibrați, iar parametrii au fost atent monitorizați pentru a asigura repetabilitatea rezultatelor. Testul Grubb a fost aplicat pentru a identifica și elimina valorile aberante din seturile de date, îmbunătățind astfel acuratețea analizei.

Cercetările efectuate asupra dintelui de angrenaj au evidențiat un comportament elastic, dar cu o distribuție neuniformă și asimetrică a deformațiilor pe lățimea dintelui,

influențată semnificativ de poziționarea dornului, prin care se aplică forța pe flancul dintelui. Toate curbele de deformare analizate au arătat o evoluție **aproape liniară** a deformațiilor în funcție de sarcină, ceea ce sugerează că materialul rămâne în **domeniul elastic** pe toată plaja de încărcare. Abaterile mici de pantă, observate la sarcini mari, nu au fost suficiente pentru a indica plasticizarea materialului, ci sunt asociate cu **efecte elastice complexe**, specifice comportamentului unui ansamblu sub încărcare excentrică, cum ar fi:

- Rigidizarea locală a zonei de contact sub dorn;
- Interacțiunea între încovoierea axială și torsiunea pe direcția lățimii, fenomen tipic angrenajelor cu dinți înclinați.

Distribuția deformațiilor pe lățimea dintelui:

Unul dintre cele mai importante aspecte ale cercetării a fost distribuția neuniformă a deformațiilor pe întreaga lățime a dintelui. În mod concret:

- **Marca 1**, care se află aproape de locul de aplicare a sarcinii, a înregistrat cele mai **mari deformații**. Acest lucru se poate explica prin concentrarea sarcinii în apropierea punctului de aplicare, unde eforturile sunt maxime.
- **Mărcile 5 și 6**, aflate mai la distanță de punctul de aplicare, au prezentat **deformații semnificativ mai mici**, ceea ce sugerează o **disipare treptată a solicitărilor** pe măsură ce ne îndepărtăm de zona de contact direct cu dornul. Acest fenomen reflectă **comportamentul elastic localizat**, caracteristic fenomenului de **"edge loading"**.
- În zona de tranziție între regiunile de concentrație mare a solicitărilor și cele mai puțin solicitate (în jurul **Mărcii 4**), deformațiile au fost intermediare, ceea ce sugerează o redistribuire graduală a tensiunilor de la zona centrală către margini.

Această **asimetricitate a distribuției deformațiilor**este o caracteristică esențială a încărcării punctuale, în special în cazul angrenajelor cu dinți înclinați, unde efectele torsiunii și încovoierei provoacă concentrarea eforturilor la extremitățile dintelui, chiar dacă sarcina este aplicată în mod central.

Poziționarea Dornului și Impactul Asupra Deformațiilor:

Poziționarea **dornului aproape de piciorul dintelui**a avut un impact semnificativ asupra comportamentului dintelui sub sarcină. Un aspect important este că acest lucru a condus la un **braț de pârghie mai mic**, ceea ce a **reducerea fenomenului de încovoiere** al dintelui. În acest fel, torsiunea generată de aplicarea sarcinii a fost **reducerea considerabil**, iar distribuția deformațiilor a devenit mai localizată, ceea ce a dus la o **concentrație mai mare a solicitărilor în zona proximității punctului de aplicare (Marca 1 și 2)**.

"Edge Loading" și Rigidizarea Locală:

Pe măsură ce ne îndepărtăm de punctul de aplicare al sarcinii (spre Mărcile 5 și 6), deformațiile au scăzut semnificativ, indicând un **efect de disipare a sarcinii**, caracteristic fenomenului de **"edge loading"**. În acest context, efectul sarcinii asupra dintelui devine din ce în ce mai mic, ceea ce sugerează că doar **extremitățile dintelui** sunt sensibile la încărcările punctiforme. De asemenea, **zonele de la extremitățile dintelui** (Mărcile 1 și 6) au manifestat o **rigidizare locală**, ceea ce poate reduce riscul de deformări permanente în aceste regiuni, dar, în același timp, sugerează că **marginea dintelui** este susceptibilă la defecte de suprafață, cum ar fi **pitting-ul** sau **microfisurile**, în cazul în care sarcinile sunt concentrate pe aceasta.

Comportamentul Structural Sub Sarcini Mari:

La sarcini mari (peste **40-60 kN**), curbele de deformare au devenit mai abrupte, semnalând un comportament **neliniar** și o **scădere a rigidității locale**. Acest fenomen este indicativ al **apariției unor efecte neliniare** de contact, unde deformațiile nu mai urmează o evoluție liniară și materialul începe să aibă o **reacție mai complexă** sub sarcini ridicate. Aceasta poate duce la apariția unor **fenomene plastice** sau, în cel mai rău caz, la deteriorări permanente în zonele de concentrator de tensiuni.

Simulări Numerice și Validarea Experimentului:

Pentru validarea rezultatelor experimentale, au fost realizate **simulări numerice** care au utilizat metoda suprapunerii efectelor pentru a simula o distribuție a forțelor cât mai apropiată de realitatea angrenajului.Rezultatele simulărilor au fost comparate cu cele experimentale, iar **similitudinile între cele două metode** au fost evidente. Aceste simulări au fost utile pentru a oferi o înțelegere mai detaliată a comportamentului dintelui la sarcini mari, dar și pentru a evidenția zonele critice în ceea ce privește **oboseala materialului** și riscurile de defecte.

Concluzii Generale și Recomandări pentru Design:

1. **Distribuția asimetrică a deformațiilor** indică necesitatea de a aplica corecții geometrice, cum ar fi **crowning-ul** sau **modificări ale profilului dintelui**, pentru a uniformiza sarcinile pe toată lățimea dintelui și a reduce riscurile de defecte structurale.
2. **Poziționarea dornului** aproape de piciorul dintelui s-a dovedit a fi benefică pentru reducerea încovoierei și torsiunii, dar a evidențiat și importanța unui **design echilibrat** al danturii, care să prevină concentrarea sarcinilor pe margini.
3. **Efectele de torsiune și încovoiere** nu trebuie subestimate în procesul de proiectare, deoarece acestea pot duce la concentrarea de tensiuni în anumite zone ale dintelui, iar aceste zone sunt cele mai susceptibile la defecte, cum ar fi **pitting-ul** sau **microfisurile**.

4. Este recomandat ca **încărcările punctiforme**să fie distribuite cât mai uniform pe întreaga lățime a dintelui, pentru a maximiza durabilitatea și performanța ansamblului de angrenaj.

Capitolul 7. Simularea Comportamentului Mecanic al Angrenajelor Cilindrice: Modelul Angrenarii Dinte Pe Dinte

Rezumatul simulării angrenării reale

Simularea angrenării reale are rolul de a reproduce cât mai fidel condițiile de funcționare ale angrenajelor, iar pentru acest lucru, este esențial să fie realizată o descriere detaliată a geometriei și interacțiunii dintre roțile dințate. Procesul începe cu definirea riguroasă a formei și dimensiunilor angrenajului, care reprezintă baza tuturor calculelor legate de contact, distribuția eforturilor și transmisia mișcării.

Modelul Geometric

Modelul geometric al angrenajului a fost construit pe baza pinionului folosit în testele experimentale și simulările anterioare cu dornuri punctiforme. Geometria modelului respectă exact forma piesei reale, fiind utilizat un sector de pinion pentru optimizarea resurselor de calcul. Sectorul include zona activă de contact dintre dinți, iar zonele care nu intră în angrenare nu au fost modelate, deoarece nu influențează distribuția locală a tensiunilor.

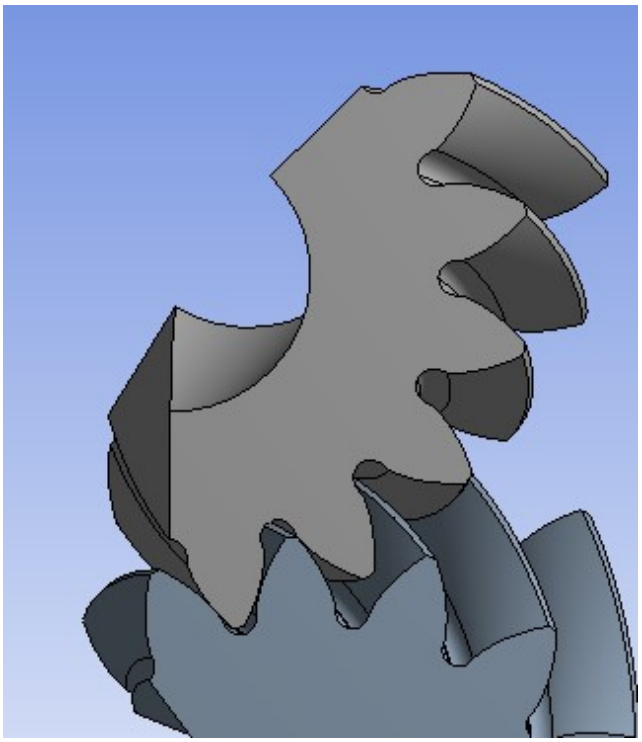


Fig. 8.1. Sector de angrenaj

Modelul a fost realizat în **DesignModeler** și importat în **ANSYS Workbench** pentru simularea statică 3D.Această abordare permite modificări rapide ale geometriei și asigură comparabilitatea între rezultatele numerice și cele experimentale.Analiza s-a concentrat pe evaluarea distribuției tensiunilor în zona de racordare la baza dintelui, esențială pentru comportamentul la oboseală al angrenajului.

Materiale

Materialul folosit pentru simulare este**18CrNiMo7-6**, un oțel aliat cu proprietăți excelente de rezistență și durabilitate, frecvent utilizat în aplicațiile de transmisie a puterii. Proprietățile mecanice utilizate în simulare sunt un **modul de elasticitate de 2.1×10^5 MPa** și un **coeficient de Poisson de 0.28**, care reflectă comportamentul elastic al materialului sub sarcină. Aceste caracteristici sunt esențiale pentru asigurarea rezistenței la uzură și oboseală, aspecte critice în evaluarea durabilității ansamblului de angrenaj.

Contacte

În ceea ce privește tipul de contact, a fost ales **contactul Frictionless**, presupunând absența forțelor tangențiale la interfața de contact, pentru a simplifica modelarea și a facilita stabilitatea numerică. Această alegere permite obținerea unor rezultate rapide și precise în fazele preliminare ale analizei. Pentru simulări mai detaliate și realiste, pot fi utilizate contacte **Frictional**, care includ efectele frecării.

Pentru rezolvarea contactului, s-a utilizat **metoda Augmented Lagrange**, o tehnică hibridă care combină avantajele metodei penalizării și multiplicatorilor Lagrange. Aceasta asigură respectarea condiției de non-penetrație a suprafețelor și permite ajustarea iterativă a multiplicatorilor Lagrange pentru a garanta precizie și robustete în calculul interacțiunii dintre dinți.

Concluzie

Simularea angrenării reale, prin construirea unui model geometric precis și analiza interacțiunii dintre roțile dințate, oferă o înțelegere detaliată a distribuției tensiunilor și comportamentului structural al angrenajului.Utilizarea materialului **18CrNiMo7-6**, completată de modelarea detaliată a contactului, permite obținerea unor rezultate valide și utile pentru optimizarea designului angrenajului în aplicațiile de transmisie a puterii.

Discretizarea și Modelarea Contactului

Simularea a utilizat **elemente solide cu 20 de noduri (SOLID186)** pentru o discretizare avansată a geometriei, asigurând o reprezentare precisă a comportamentului structural. Elementele de contact utilizate au fost **CONTA174** (cu 6 noduri) pentru suprafața contactantă și **TARGE170** (cu 8 noduri) pentru suprafața țintă, permițând o simulare

detaliată a interacțiunii dintre componente. Aceste tipuri de elemente au garantat o captare fidelă a distribuției tensiunilor și fenomenului de contact în zona de angrenare.

Condițiile de Încărcare

Pentru aplicarea condițiilor de încărcare, **pinionul de test** a fost complet blocat (toți cei 6 parametri de libertate), asigurând fixarea rigidă în model. **Roata dințată pereche** a avut libertate de mișcare doar în rotație în jurul propriei axe, fiind aplicat un moment de torsiune asupra acesteia. Această configurare a fost aleasă pentru a reproduce cât mai fidel condițiile reale de funcționare din zona de angrenare, permițând analiza comportamentului mecanic sub sarcină.

Rezultate Experimentale și Compararea Tensiunilor

Pentru evaluarea distribuției tensiunilor generate în timpul angrenării, modelul a fost supus la **6 poziții succesive de rotație**, corespunzătoare începutului petei de contact pe dintele de referință. Aceste poziții au fost alese astfel încât să coincidă cu secțiunile definite anterior conform metodologiei Dorn, asigurând comparabilitatea rezultatelor.

În fiecare dintre aceste poziții s-au măsurat **tensiunile maxime** în zona de racordare, în puncte etichetate de pe profilul dintelui (14–19), corespunzătoare zonelor critice de solicitare.Rezultatele obținute prin simularea numerică au fost comparate cu cele determinate analitic prin **metoda suprapunerii efectelor**, validând astfel modelul numeric.

Distribuția Tensiunilor

Simularea a oferit distribuții detaliate ale tensiunilor locale în diferite puncte de pe fața dintelui (D1–D6), iar valorile experimentale ale tensiunilor din zona de racordare au fost înregistrate în MPa, oferind informații esențiale pentru evaluarea comportamentului mecanic și a riscurilor de defecte (de exemplu, oboseală sau pitting).

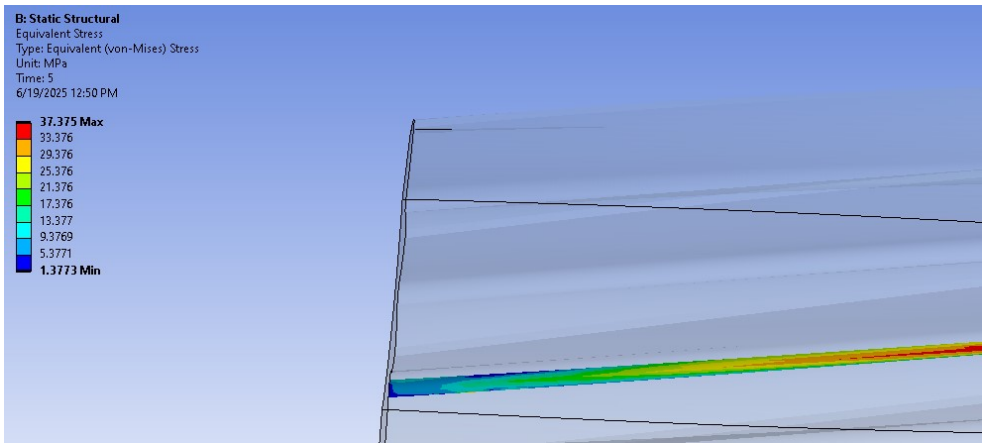


Fig. 8.5. Tensiuni din racordare ale dintelui testat

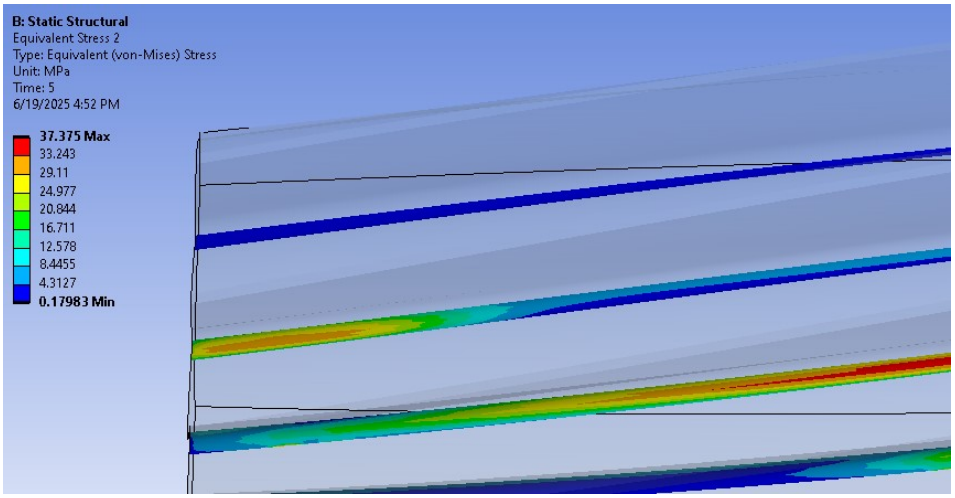


Fig. 8.6. Tensiune din racordare

Concluzie

Simularea numerica detaliată a interacțiunii dintre dinți și distribuția tensiunilor în timpul angrenării a fost validată prin compararea cu rezultatele experimentale. Această abordare a oferit o înțelegere aprofundată asupra modului în care contactul evolutiv dintre dinți afectează starea de tensiune și performanța ansamblului, fiind utilă pentru optimizarea designului și îmbunătățirea durabilității angrenajelor.

Capitolul 8. Metoda coeficientilor de influenta

Comparația Între Încărcarea cu Dorn și Angrenarea Reală

Diferențele semnificative dintre modul de transmitere a sarcinii în cazul încărcării cu dorn și cel din angrenajul real dinte pe dinte sunt evidențiate în analiza tensiunilor la baza dintelui. Această zonă este mai puțin influențată de particularitățile contactului local și reprezintă un punct de referință relevant pentru evaluarea solicitărilor structurale. Pentru a face o comparație corectă între cele două configurații, distribuția tensiunilor obținute din simularea cu dorn a fost recalibrată utilizând **metoda coeficienților de influență**.

Tensiuni în Racordare (Angrenare Reală la 760 N·m)

În tabelul de mai sus (Tabel 9.1), sunt prezentate tensiunile în racordare pentru diverse valori ale momentului de transmisie (M) (de la 15 Nm la 135 Nm), măsurate pe 6 puncte de pe profilul dintelui (P1 - P6). Aceste valori sunt esențiale pentru a analiza comportamentul structural al dintelui în diferite etape de încărcare.

Metoda Coeficientului de Influenta și Angrenajele cu Dantură Înclinată
La **angrenajele cilindrice cu dinți înclinați**, există posibilitatea angrenării multiple, caracterizată printr-un raport de contact global variabil, care poate varia între 1 și 4.

Acesta depinde de parametrii geometrici, cum ar fi modulul normal, unghiul de înclinare al danturii (unghiul de elice), lățimea danturii și raportul de transmisie. În acest context, distribuția sarcinii de-a lungul liniilor de contact este neliniară și influențează comportamentul elastic al dintelui.

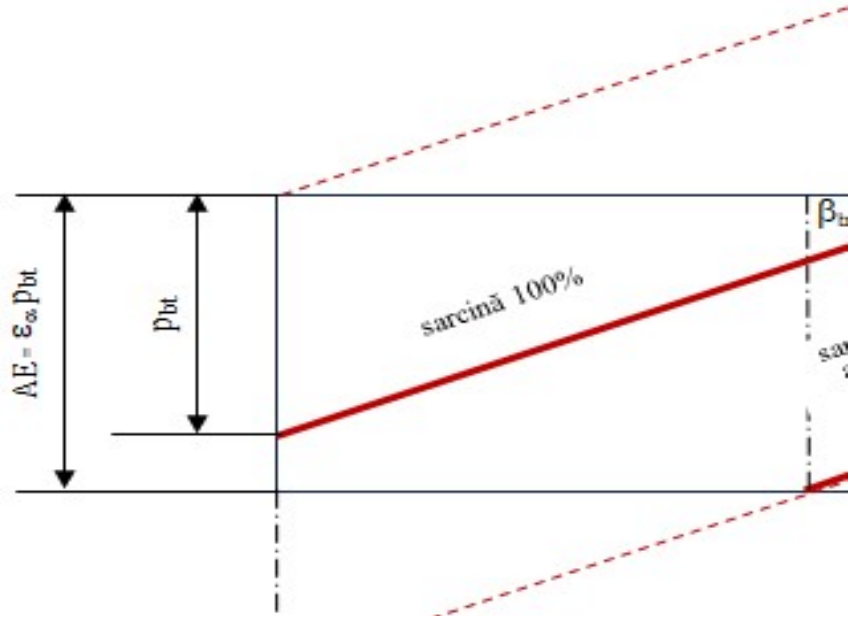


Fig. 9.3. Configuratie de contact

Este important de menționat că forțele de contact nu sunt distribuite uniform pe întreaga linie de contact, având o distribuție eliptică, conform teoriei elasticității. Acest comportament este accentuat de fenomenul **"efectul de capăt"**, care se manifestă prin reducerea sarcinii spre extremitățile flancurilor dintelui. În acest sens, deformările sunt concentrate pe anumite puncte de pe profilul dintelui, iar analiza este realizată pe baza unui model discretizat de sarcini concentrate.

Deformarea și Comportamentul Elastic Local

Deformarea dintelui sub încărcare este compusă din două componente: **deformarea elastică prin încovoiere** și **deformarea locală de tip Hertzian**, asociată cu contactul elastic. În cazul în care mai multe perechi de dinți sunt simultan în angrenare, distribuția sarcinilor și interacțiunile elastice între flancuri nu mai pot fi descrise precis prin metode analitice, motiv pentru care se impune utilizarea unor simulări numerice avansate (precum **metoda elementelor finite - FEM**) pentru a simula comportamentul real.

Sarcini Efective și Încărcarea Multiplelor Linii de Contact

În cazul angrenajului cilindric cu dinți înclinați, este posibil ca unghiul de înclinare al danturii să permită angrenarea simultană pe mai multe linii de contact. Astfel, pentru a simula fidel condițiile de funcționare reale, sarcina aplicată de poanson este considerată echivalentă cu aproximativ **60% din sarcina totală** corespunzătoare momentului transmis, deoarece distribuția sarcinii nu este perfect uniformă din cauza toleranțelor de fabricație și erorilor de montaj. Această abordare permite o mai bună reprezentare a comportamentului dinților în condiții de contact multiplu.

Conclusii

Simulările realizate folosind metoda coeficienților de influență au permis o comparație între încărcarea cu dorn și angrenarea reală, evidențiind impactul distribuției sarcinilor și al interacțiunii elastice asupra comportamentului dintelui. De asemenea, s-a subliniat importanța utilizării unor simulări numerice avansate, cum ar fi FEM, pentru a captura cu acuratețe efectele deformărilor și tensiunilor în cazul angrenajelor cu dantură înclinată și multiple linii de contact.

Capitolul 9. Concluzii finale şi contribuţii principale la Modelarea și evaluarea tensiunilor în racordarea dinților angrenajelor cilindrice cu dinți înclinați prin simulare FEM și testare pe stand experimental

Lucrarea analizează distribuția tensiunilor în zona de racordare a dinților angrenajelor cilindrice cu dinți înclinați, comparând calculele analitice conform standardelor ISO și AGMA cu rezultatele obținute prin analiza cu elemente finite (FEM). Un aspect important este că metodele standard subestimează semnificativ valorile maxime ale tensiunilor locale din zona de racordare, ceea ce subliniază necesitatea unor modele de calcul mai detaliate. În plus, geometria cu protuberanță și racordarea joacă un rol esențial în propagarea tensiunilor la adâncimi semnificative, ceea ce impune includerea acestor caracteristici geometrice în modelele de calcul. Astfel, un model geometric 2D, dezvoltat cu un cod propriu, a fost utilizat pentru a descrie realist profilul dintelui, fiind corelat cu datele CAD.

Pe lângă analiza 2D, modelele 3D s-au dovedit utile pentru a evidenția noi fenomene, cum ar fi neuniformitatea distribuției tensiunilor pe lățimea danturii și influența unghiului de înclinare asupra stării locale de solicitare. Aceste observații completează analiza 2D și permit o descriere mai realistă a comportamentului geometriei angrenajului. De asemenea, analiza a subliniat importanța tratamentelor termice și a stării structurale a materialului asupra rezistenței la oboseală. În mod specific, duritatea stratului superficial și prezența tensiunilor reziduale compresive ajută la redistribuirea solicitărilor și întârzie

inițierea fisurilor, ceea ce sugerează că proiectarea optimizată trebuie completată de tratamente termice adecvate pentru a obține fiabilitate sporită.

Simulările numerice realizate cu elemente FEM, cum ar fi SOLID186, CONTA174 și TARGE170, au arătat că vârful dintelui nu este zona critică în regimul de încărcare analizat, evidențiind în schimb efectul de levier în distribuția tensiunilor pe flanc. Validarea rezultatelor obținute prin simulări a fost realizată pe un stand experimental original, unde sarcinile au fost aplicate punctual în poziții controlate. Măsurătorile tensometrice au confirmat tendințele identificate în simulările numerice, subliniind importanța calibrării și interpolării valorilor pentru o imagine completă a distribuției reale a tensiunilor.

Un alt punct esențial al lucrării este utilizarea unei metode hibride de interpolare polinomială de ordin superior, care a permis reducerea erorilor de prelucrare a datelor experimentale și extrapolarea acestora către regimuri de încărcare diferite. Această metodă, cu o eroare sub 2%, poate fi integrată în software-ul de proiectare asistată, oferind astfel un instrument util pentru reducerea dependenței de teste experimentale suplimentare.

Lucrarea compară, de asemenea, modelele simplificate de încărcare statică pe dorn cu simulările FEM ale angrenajului dinamic real, subliniind avantajele și limitările fiecărei metode. Modelele de încărcare pe dorn asigură reproductibilitate experimentală, dar nu reflectă complexitatea interacțiunilor de contact multipunct, în timp ce simulările FEM pot captura aceste efecte, dar necesită resurse computaționale semnificative. Corelarea celor două abordări oferă un echilibru optim între precizie și eficiență.

De asemenea, au fost identificate influențe majore ale parametrilor geometrici și tehnologici, cum ar fi raza de racordare, coeficientul de deplasare radială și calitatea suprafețelor, asupra valorii tensiunilor maxime din piciorul dintelui. Aceste rezultate sugerează că proiectarea bazată exclusiv pe standarde generalizate nu este suficientă, fiind necesare ajustări specifice pentru aplicațiile industriale.

În ceea ce privește contribuțiile științifice și tehnice ale lucrării, aceasta include dezvoltarea unui cod propriu pentru generarea profilului geometric evolventic cu protuberanță, realizarea unui stand experimental modular pentru testarea dinților sub sarcini controlate și integrarea unui model hibrid validat prin corelarea datelor obținute din FEM, calcule analitice și măsurători experimentale. De asemenea, a fost propusă o metodă de interpolare polinomială de ordin V pentru prelucrarea și generalizarea datelor experimentale.

Lucrarea în ansamblu contribuie la dezvoltarea unui cadru metodologic avansat pentru analiza mecanică a angrenajelor cilindrice cu dinți înclinați, având aplicații semnificative în cercetarea aplicativă, industrie și educație. De asemenea, deschide noi direcții de cercetare, în special în ceea ce privește dezvoltarea unor modele de calcul și testare care să includă efectele dinamice, cum ar fi șocurile, vibrațiile și rezonanța, precum și modelarea influenței uzurii și micro-pittingului asupra distribuției tensiunilor. Utilizarea metodelor avansate, precum „damage mechanics” sau modelele bazate pe viața în

oboseală, poate permite evaluarea impactului acumulat asupra zonei critice de racordare într-un mod mai realist și predictiv.

Bibliografie selective

[5] „https://facerealumii.ro/mecanismul-antikythera/,” 29 5 2025. [Interactiv].

[22] M. K. a. A. S. Milan Zmindak, Analysis of the Contact Stresses of Spur Gears Manufactured by 3D Printing from Composite Materials, 2022.

[28] „https://spectromas.ro/produse/seria-y/,” 15 6 2025. [Interactiv].

[64] I. 6336-1:2019, „Calculation of load capacity of spur and helical gears - Part 1: Basic principles, introduction and general influence factors.,” 2019.

[66] A. 2004-C08., „Gear Strength Design Handbook. American Gear Manufacturers Association.,” 2008.