

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI**

Cu titlu de manuscris  
CZU: 621.883+621.91/92

**MAZURU SERGIU**

**PROCEDEE TEHNOLOGICE DE GENERARE  
A PROFILURILOR NESTANDARDE  
ALE ANGRENAJELOR PRECESIONALE**

**242.05 – Tehnologii, procedee și utilaje de prelucrare**

Autoreferatul tezei de doctor habilitat în științe tehnice

**CHIȘINĂU, 2019**

Teza a fost elaborată în cadrul Departamentului *Tehnologia Construcției de Mașini*, Universitatea Tehnică a Moldovei. Școală Doctorală Inginerie Mecanică și Civilă.

**Consultant științific:**

**BOSTAN Ion**, prof. univ., dr. hab., academician al AȘM

**Referenți oficiali:**

**OANCEA Gheorghe**, prof. univ., dr. ing., Universitatea *Transilvania*, Brașov, România

**FETECĂU Cătălin**, prof. univ., dr. ing., Universitatea *Dunărea de Jos*, Galați, România

**MUSCĂ Gavril**, prof. univ., dr. ing., Universitatea Tehnică *Gheorghe Asachi*, Iași, România

**Componența consiliului științific specializat:**

1. **STOICEV Petru**, prof. univ., dr. hab., președinte CȘS, UTM
2. **BODNARIUC Ion**, conf. univ., dr., secretar științific al CȘS, UTM
3. **SLĂTINEANU Laurențiu**, prof. univ., dr. ing. membru al CȘS, UT *Gh. Asachi*, Iași
4. **DULGHERU Valeriu**, prof. univ., dr. hab., membru al CȘS, UTM
5. **TOPALĂ Pavel**, prof. univ., dr. hab., membru al CȘS, US *Alecu Russo*, Bălți
6. **MARIAN Grigore**, prof. univ., dr. hab., membru al CȘS, UASM

Susținerea va avea loc la 17.06. 2019, ora 14.00, în ședința Consiliului științific specializat DH 242.05-02 din cadrul Universității Tehnice a Moldovei, MD 2045, Republica Moldova, or. Chișinău, str. Studenților 9.

Teza de doctor habilitat, lucrările științifice în baza cărora a fost elaborată teza și autoreferatul pot fi consultate la Biblioteca științifică a Universității Tehnice a Moldovei, precum și la pagina web a CNAA ([www.cnaa.md](http://www.cnaa.md)).

Autoreferatul a fost expedit la 15.05. 2019.

Secretar științific al Consiliului științific specializat:



**BODNARIUC Ion**  
conf. univ., dr.

Consultant științific

**BOSTAN Ion**

prof. univ., dr. hab., academician al AȘM

Autor

**MAZURU Sergiu**

## REPERE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII

**Actualitatea și gradul de studiere a temei investigate.** Evoluția tehnicii în ansamblul ei, prin abordarea construcțiilor din ce în ce mai complexe în toate domeniile industriale, ridică probleme deosebite și în domeniul tehnologiilor de prelucrare mecanică a danturilor roților dințate, o deosebită importanță se atribuie preciziei de execuție și automatizării proceselor tehnologice de generare. Tendința generală în construcția de mașini spre reducerea consumului de materiale și a costurilor de producție se referă și la angrenaje, fapt ce necesită elaborarea unor tehnologii noi.

Roțile transmisiilor conice reprezintă cele mai complicate piese, din punctul de vedere al proiectării și al tehnologiei de execuție. În transmisiile planetare precesionale, roțile de asemenea sunt conice, la care prelungirile generatoarelor dinților se întretaie într-un punct numit centru de precesie, iar danturile sunt amplasate pe suprafețe conice. Crearea unei transmisii noi cu angrenaj conceptual nou cu roți conice necesită elaborări tehnologice și constructive inovative iar diseminarea acesteia în producție cere mult timp, în unele cazuri chiar zeci de ani de muncă asiduă a proiectanților, constructorilor și tehnologilor.

Cel mai răspândit procedeu de prelucrare finală a roților dințate îl constituie rectificarea, care asigură o precizie ridicată de execuție dimensională și de calitate a suprafețelor. Totodată, pe suprafețele rectificate ale dinților roților dințate apar arsuri și fisuri, fapt care necesită o cercetare multilaterală a cauzelor ce provoacă defectele respective și impune elaborarea unor metode de înlăturare a lor. Complexitatea problemelor generării danturilor conice ale roților centrale ale transmisiilor precesionale suplimentar derivă din specificul geometriei angrenajului multipar al acestuia, printre care:

- profilul convex-concav nestandardizat;
- profilul variabil al dinților, dependent de parametrii geometrici ai angrenajului: unghiul de nutație  $\theta$ , unghiul axoidei conice  $\delta$ , unghiul conicității rolelor  $\beta$ , numărul dinților roților  $z_1$  și  $z_2$  și coraportul dinților conjugați  $z_1 = z_2 \pm 1$ ;
- precizia de execuție înaltă, impusă de multiplicitatea angrenării.

Extinderea utilizării transmisiilor planetare precesionale ca produse aparte (reductoare) sau ca componente de transformare a mișcării și sarcinii în dispozitivele mașinilor cu destinație generală și specială, în multe cazuri este limitată de posibilitățile neadecvate ale tehnologiei de generare a dinților din angrenajele precesionale. Astfel, tehnologia de generare a dinților angrenajelor precesionale cu profil variabil convex-concav elaborată de academicianul **Ion**

**Bostan** în anii 1980 (cu scula în formă de trunchi de con) nu permite generarea dinților pentru roți cu diametrul mai mic de 20 mm și are o productivitate redusă.

Problemele sporirii calității stratului superficial al dinților roților, de regulă, se rezolvă prin alegerea corectă a cinematicii mecanismului de rectificare, prin alegerea optimă a regimului de rectificare și a caracteristicilor sculei. Tehnologiile clasice de rectificare, inclusiv cele cu discuri din materiale policristaline pe bază de diamant și abrazivi sintetici, cum este nitrura cubică de bor (NCB), nu exclud definitiv defectele, care apar în straturile superficiale (fisuri, arsuri, tensiuni remanente). Acest lucru se referă mai ales la dinții roților dințate care au un profil geometric complex, inclusiv executate din oțeluri și aliaje greu prelucrabile.

Din cauza erorilor inevitabile apărute la operațiile precedente de prelucrări mecanice, a deformărilor produsului provocate de influența temperaturilor ridicate în urma tratamentelor termochimice, precum și a vibrațiilor discului de rectificat datorate dezaxării acestuia, rectificarea are loc în condiții neuniforme (aleatorii).

Eliminarea defectelor în urma rectificării este îngreunată de adaosul neuniform legat de erorile inevitabile din cadrul operațiilor precedente ale prelucrărilor mecanice; deformarea semifabricatului roții cauzată de tratamentul chimico-termic; vibrația axului principal provocată de la debalansarea discului rectificator și alți factori, ce depind de însăși esența procesului de rectificare.

Ca urmare a acestor considerații, studiul influenței factorilor tehnologici de bază, a sistemului *sculă abrazivă – piesă – mediu de lucru*, dar și a condițiilor de interacțiune dintre forța de așchiere și temperatură, precum și cercetarea căilor noi de rezolvare a problemei de îmbunătățire a calității stratului superficial, apar ca un obiectiv de valoare științifică și aplicativă majoră.

O influență deosebită asupra preciziei prelucrării o are scula (discul abraziv), care determină calitatea stratului superficial al dintelui roții dințate și, implicit, determină indicatorii calitativi de funcționare a angrenajului. În același timp, influența discului rectificator în procesul rectificării depinde nu numai de tipul și dimensiunile granulelor abrazive, structura, liantul și duritatea lor, dar și de parametrii geometrici. Este important că în urma rectificării (cu scule abrazive) în anumite condiții domină efectul copierii suprafeței de lucru (active) a discului rectificator pe suprafața dintelui roții dințate, care poate fi anihilat prin regimurile corecte ale procesului tehnologic de rectificare și prin calitatea sculei abrazive.

Practica demonstrează că până la 80% din toate operațiile de finisare ale prelucrării mecanice a pieselor se efectuează cu ajutorul sculelor abrazive.

Calitatea suprafeței depinde de o serie de factori constructivi și tehnologici. Soluționarea cel puțin a unor obiective din cadrul problemei menționate va permite să ne apropiem de posibilitatea asigurării indicilor de exploatare la proiectarea și execuția pieselor.

Rectificarea se efectuează cu ajutorul sculelor așchietoare cu o amplasare haotică a multiplelor elemente așchietoare – granule abrazive, care au diferite unghiuri de așchiere, prinse în liantul sculei. În procesul așchierii cu granule, sculele abrazive și suprafețele prelucrate se încălzesc local pe o durată scurtă de timp  $1 \cdot 10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-6}$ , apoi se răcesc.

În industria constructoare de mașini lipsește utilajul tehnologic și echipamentul care ar permite implementarea procedeeleor de generare a profilelor nestandarde ale angrenajelor precesionale în producere care de fapt fiind o problemă **practică de fabricare**.

Lipsa metodelor de asigurare a preciziei rectificării profilului dinților angrenajelor precesionale nu permite să asigurăm nivelul cerut al calității angrenajului prelucrat la etapa finală de prelucrare și a exclude rebutul la operația dată.

Asigurarea scopului practic de implementare a procedeeleor tehnologice de generare a profilurilor nestandarde ale angrenajelor precesionale se reține din lipsa metodelor științifice de justificare al preciziei profilării dinților TPP, **care este o problemă științifică de importanță majoră**. Rezolvarea acestei probleme cere elaborarea teoriei de profilare a angrenajului și în baza ei stabilirea legităților, legăturilor și elaborarea unui sistem de asigurare a preciziei de profilare a dinților prin metoda rulării cu sculă în formă de disc profilat periferic.

Lucrarea a fost elaborată la catedrele *Tehnologia construcțiilor de mașini și Teoria mecanismelor și organe de mașini* ale Universității Tehnice a Moldovei, reprezintă continuarea cercetărilor în domeniul transmisiilor planetare precesionale și tratează problema cercetării și optimizării tehnologiei de execuție a transmisiilor planetare precesionale cinematice prin utilizarea metodelor și procedeeleor noi de producere inovative.

Reeșind din cele menționate, **problema științifică a cercetărilor** din disertație constă în elaborarea procedeeleor tehnologice de generare a profilurilor dinților angrenajelor precesionale cu profil variabil nestandard cu extinderea posibilităților tehnologice, de sporire a calității și a preciziei suprafețelor profilate.

Pentru realizarea scopului, au fost trasate următoarele **obiective**:

1. Elaborarea conceptului cinematic al procedeeleor tehnologice de generare prin rulare a danturilor angrenajelor precesionale cu profil variabil și nestandardizat cu sculă-disc profilată periferic.

2. Elaborarea modelului fizico-matematic al procedeeleor de generare prin rulare a profilului convex-concav cu sculă-disc cu mișcare sferospațială.

3. Elaborarea modelului fizic de realizare a procedurii de generare a profilului convex-concav cu sculă-disc cu mișcare sferospațială.

4. Determinarea indicilor de calitate a suprafeței prelucrate în funcție de forma conturului periferic al sculei, cinematica mișcărilor sculei și regimurile de rectificare.

5. Determinarea abaterilor geometrice și stabilirea erorilor tehnologice admisibile ale danturilor roților dințate și conformarea lor la normele preciziei cinematice.

6. Identificarea naturii erorilor tehnologice și abaterilor geometrice în funcție de precizia de prelucrare a roților dințate și interdependenței acestora.

7. Elaborarea recomandărilor practice privind asigurarea indicilor de calitate și de precizie ai profilurilor convex-concave variabile ale flancurilor danturilor transmisiilor planetare precesionale.

**Metodologia cercetării științifice.** Cercetările teoretice au fost efectuate prin modelări matematice, ținând cont de ultimele realizări în domeniile teoriei angrenajelor, teoriei de așchiere și prelucrării abrazive. Problema influenței cantitative și calitative, a parametrilor tehnologici de prelucrare asupra caracteristicilor de calitate ale suprafeței prelucrate a fost abordată cu utilizarea modelărilor matematice. Condițiile raționale de realizare a proceselor au fost determinate folosind metoda *Simplex* de programare liniară și Programul *MatchCad*.

Procedeele tehnologice de generare a danturilor roților precesionale cu sculă în formă de disc au fost elaborate, experimentate și aplicate pe semiautomatul de model *30A50P* modernizat, dotat cu un dispozitiv elaborat de către autor. Cercetările experimentale ale procedeelor noi de prelucrare mecanică a roților dințate au fost efectuate în laboratoarele Departamentelor *Tehnologia Construcțiilor de Mașini și Bazele Proiectării Mașinilor* ale Universității Tehnice din Moldova (UTM) și Departamentului *Tehnologia Construcțiilor de Mașini* din Iași (România).

**Noutatea și originalitatea științifică** a lucrării constă în elaborarea pentru prima dată a modelelor matematic și fizic ale unui nou principiu de generare a danturilor angrenajelor precesionale cu profil convex-concav variabil (nestandardizat) al dinților cu sculă-disc cu mișcare sferospațială. Principiul nou de generare permite: extinderea posibilităților tehnologice de producere a dinților danturilor cu diametre mai mici ( $d < 20$  mm), precum și mai mari; creșterea productivității generării profilului; asigurarea preciziei de rectificare a dinților transmisiilor precesionale cu profil nestandardizat variabil prin metoda rulării cu disc abraziv profilat periferic. Pentru soluționarea acestei probleme au fost întreprinse următoarele acțiuni:

- Pentru prima dată a fost propusă tehnologia generării dinților cu profil convex-concav variabil cu scule precesionale în formă de disc cu contur periferic profilat în arc de cerc;

- A fost identificată interdependența reciprocă a indicilor de precizie ai roților dințate și a parametrilor regimurilor de prelucrare;
- S-a stabilit nivelul admisibil al erorii semifabricatului și valorii adaosului de prelucrare pentru a exclude rebutul la rectificarea danturii;
- A fost stabilită eficacitatea rectificării în procesele cu productivitate mare de finisare a danturii roților dințate precursionale cu profil nestandardizat din semifabricate progresive cu formarea prealabilă a coroanei dințate.

Noutatea rezultatelor obținute este protejată cu 29 de brevete de invenție ale Republicii Moldova.

#### **Semnificația teoretică a cercetării:**

✓ Pentru prima dată a fost elaborat modelul matematic al procesului de generare a dinților cu sculă-disc cu profil convex-concav nestandardizat, cu cinematica constituită din patru mișcări: *mișcarea autonomă* – mișcare principală de așchiere – rotirea sculei abrazive cu frecvența ( $n_1$ ), *mișcarea de așchiere auxiliară*, efectuată rapid ca o mișcare liniară de-a lungul dintelui, *mișcarea de rulare* – rotirea lentă a roții la un unghi  $\Delta\theta$  în timpul unei curse duble a sculei abrazive de-a lungul dintelui, *mișcarea coordonată cu rularea roții* – deplasarea capului portsculă într-o direcție tangențială față de punctul de contact.

✓ A fost identificată interacțiunea conturului generator periferic al sculei precesionale în formă de disc cu profilul variabil al danturilor roților precesionale.

✓ Au fost determinate legăturile de formare a erorilor roților dințate la prelucrare conform principiului rulării libere, precum și legătura dintre factorii tehnologici și erorile roților dințate.

✓ Au fost determinate sursele tehnologice care cauzează erorile roților dințate conform normelor preciziei cinematice.

✓ A fost efectuată analiza cinematică și fizico-matematică a procesului de rectificare a angrenajului precesional nestandardizat.

#### **Valoarea aplicativă a lucrării:**

- A fost propus și realizat în echipamente procedeul nou de generare a suprafețelor dinților cu profil variabil convex-concav cu sculă-disc cu mișcare sferospațială, cu un punct fix.

- Au fost elaborate tehnologiile de netezire a profilului convex-concav nestandardizat, ce asigură o corecție substanțială a erorii formei profilului angrenajului roții dințate până și după operația de rectificare și sporirea duratei de funcționare a transmisiei.

- Au fost elaborate, executate și implementate utilajul, dispozitivele și sculele care asigură prelucrarea transmisiilor precesionale cu profil nestandardizat.

- Au fost propuse metode constructiv-tehnologice de asigurare a indicilor de calitate a roților dințate.

- Rezultatele cercetărilor au fost implementate la *ARP GmbH Alpirsbach* (Germania), conform actului de implementare.

- Materialele cercetărilor experimentale sunt utilizate în procesul de studii la cursurile: *Metode și procedee de prelucrare, Sisteme de tehnologii, Proiectarea asistată de calculator a dispozitivelor și verificatoarelor, Tehnologia construcțiilor de mașini* ș.a., de asemenea și pentru pregătirea doctoranzilor și masteranzilor.

Lucrarea *Transmisii planetare precesionale*, în anul 1998, a fost apreciată cu înalta distincție în domeniul științei și tehnicii – Premiul de Stat al Republicii Moldova. În calitate de coautor, mi s-a oferit titlul de Laureat al Premiul de Stat al RM în Domeniul Științei și Tehnicii.

Rezultatele de bază ale tezei de doctor habilitat au fost prezentate, discutate și aprobate la ședințele:

- departamentului de profil (Tehnologia Construcțiilor de Mașini);
- seminarului științific de profil lărgit al UASM;
- seminarului științific de profil al UTM;
- seminarului interfacultativ FIMCM și FIMT;
- la simpozioane, conferințe, saloane de expoziții.

Rezultatele au fost publicate în reviste științifice: *INTELECTUS*, AGEPI, Chișinău, 1999; *Buletinul Institutului Politehnic din Iași*, tomul XLVI (L), suplimentul I, 2000, tomul LIV, fascicula Vc, Iași, 2004, tomul XLVIII, suplimentul I, Iași, 2002, tomul LII, fascicula Va, Secția *Construcția de mașini*, Iași, 2006, tomul LVIII; Universitatea Tehnică *Gh. Asachi* din Iași, fascicula 3, 2008; *Nonconventional Technologies Review*, nr. 1 din 2009, nr. 1 din 2012, nr. 2 din 2016, tomul LX; Universitatea Tehnică *Gh. Asachi* din Iași, fascicula 2a, 2010; revista *TEHNOMUS* nr. 20, 2013, Nr. 1. 2017, Suceava.

De asemenea, rezultatele au fost prezentate la diferite conferințe: CICS *Tehnologii moderne în construcția de mașini*, vol. 1, Iasi, 1996; Romanian First International Fourth National Conference on Powder Metallurgy, 4-7 iulie 1996, Cluj-Napoca; Materialele Conferinței Internaționale *Tehnologii moderne, calitate, restructurare*, vol. 4, Chișinău, 1999; *Международный сборник научных трудов Прогрессивные технологии и системы машиностроения*, выпуск 13, Донецк, 2000; Materialele Conferinței Internaționale *Tehnologii moderne, calitate, restructurare*, vol. 3, Chișinău, 2001; Materialele Conferinței Internaționale *Tehnologii moderne, calitate, restructurare*, vol. 2, UTM, Chișinău, 2005; ediția III a Conferinței internaționale științifico-practice *Probleme teoretice și practice ale economiei proprietății*



*intelectuale*, AGEPI, Chișinău, 2005; The 31<sup>st</sup> Internationally Attended Scientific Conference *Modern technologies in the XXI century*, Bucharest, 3-4 Novembre, 2005; The 5<sup>th</sup> International Conference on advanced manufacturing technologies, ICAMaT 2007, 12-14 July, 2007, Sibiu; AGIR Publishing House. Academy of Technical Science of Romania. The 32<sup>st</sup> Internationally Attended Scientific Conference *Modern technologies in the XXI century*, Bucharest, 1-2 Novembre 2007; CȘI Iași – Chișinău *Tehnologii Moderne. Calitate. Restructurare*, 31 mai – 3 iunie 2007; the 19<sup>th</sup> International DAAAM Symposium, Vienna, Austria, 2008; Proceedings of the 13<sup>th</sup>, 14<sup>th</sup>, 15<sup>th</sup>, 16<sup>th</sup> International Conference *Modern Tehnologies, Quality and Innovation*, ModTech 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, Romania – Moldova; IX International Congress *Machines, Technologies, Materials 2012*, Varna, Bulgaria, 2012; *Машиностроение и техносфера XXI века*. Сборник трудов XI, XII, XIII, XIV, XV, XVI, XVII, XVIII, XIX международной научно-технической конференции, 2004-2014, Донецк; ICAD 2011. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Axiomatic Design. Editor: Mary Kathryn Thompson, KAIST, Daejeon, Republic of Korea, 2013; *Innovativ Manufacturing Engineering International Conference (IManE) Applied Mechanics and Materials*, 2013, 2014, 2015. Trans Tech Publications, Switzerland,

**Publicații la tema tezei.** Rezultatele cercetării și problemele abordate în teză au fost publicate în 106 lucrări științifice și metodice, inclusiv o monografie, un manual, două articole de sinteză, 21 de articole în reviste, 40 de articole în culegeri ale conferințelor, 29 de brevete de invenție, 16 rapoarte științifice, 16 articole științifice de un singur autor.

**Volumul și structura tezei.** Teza include adnotare în limbile română, rusă și engleză, introducere, șase capitole, concluzii și recomandări, 322 pagini de text de bază, 349 surse bibliografice, 7 tabele, 215 de figuri și 3 anexe.

**Cuvinte-cheie:** transmisie precesională, angrenaj nestandardizat, profil, dinte, viteză, avans, tehnologia danturării, rectificare, eroare cinematică, sistem tehnologic, generare, forță, așchiere, sculă, abraziv, frezare, semifabricat, excentricitate, mașină-unealtă, dispozitiv, tratament termic, rigiditate, netezire, linie de contact, sarcină, adâncimea așchierii, cinematica procesului.

## CONȚINUTUL TEZEI

În **Introducere** este motivată actualitatea temei investigate, sunt formulate scopul și obiectivele cercetării, sunt prezentate noutatea și originalitatea științifică, importanța aplicativă a lucrării, tezele înaintate pentru susținere, date ce confirmă aprobarea științifică și practică a lucrării.

Capitolul 1 – *Analiza problemei abordate și obiectivele cercetării* – conține sinteza rezultatelor cercetărilor reflectate în literatura de specialitate, analiza stării actuale a problemei asigurării tehnologice și sporirii calității angrenajelor, fiind structurat pe zece subcapitole: 1.1. *Analiza literaturii de specialitate* – este axat pe studiul direcțiilor de cercetare în domeniul dat; 1.2. *Transmisiile planetare precesionale și procedeele de prelucrare a angrenajului*; 1.3. *Analiza metodelor de apreciere a preciziei sistemelor tehnologice de danturare* – sunt analizate variantele optime ale procesului tehnologic, fiind evidențiați factorii care provoacă refuzul sistemelor tehnologice; 1.4. *Analiza metodelor de optimizare a sistemelor tehnologice* – este dedicat problemei asigurării stabilității sistemelor tehnologice în scopul realizării indicilor de precizie ai roților dințate; 1.5. *Stratul superficial și valoarea lui pentru determinarea calității roților dințate*: în baza studiului bibliografic, sunt date recomandări de dezvoltare continuă a acestei teme; 1.6. *Procedee de finisare ca etapă principală de asigurare a calității danturii*; 1.7. *Influența procedeelelor tehnologice asupra capacității portante a roților dințate*; 1.8. *Influența procedeelelor de durificare asupra capacității portante a roților dințate*; 1.9. *Analiza cauzelor de deteriorare a roților dințate*; 1.10. Sunt prezentate concluziile cercetărilor în domeniul procedeelelor tehnologice de generare a profilurilor și se argumentează necesitatea efectuării studiului dat.

În capitolul doi – *Mecanismul formării componentelor erorii cinematice a roților dințate* – este cercetat mecanismul formării erorilor de prelucrare a roților dințate [1, 2, 22, 31, 35, 36], fiind puse în evidență sursele tehnologice care provoacă astfel de erori, și sunt stabilite legăturile dintre factorii tehnologici și erorile roților dințate. Analiza mecanismului formării componentelor erorii cinematice a roților dințate la operația de frezare a danturii este prezentată detaliat în paragraful 2.2, iar analiza mecanismului formării componentelor erorii cinematice a roților dințate la șeveruire este dată în paragraful 2.3. Mecanismul formării componentelor erorii cinematice a roților dințate în cadrul operației tehnologice de durificare termochimică (TCT) este analizat și prezentat în paragraful 2.4. S-a stabilit că în urma tratamentului chimico-termic aplicat, roților dințate li se asigură o creștere a duratei de exploatare a transmisiilor dințate înalt solicitate sau de viteză mare. Dar, în același timp, se poate produce o micșorare a preciziei de prelucrare a pieselor.

Tratamentul termic este cauza deteriorării complexe a formei geometrice și a preciziei dimensionale a roților dințate, obținute în urma operațiilor mecanice precedente. Ca urmare a transformării structurale și de fază a materialului piesei și a deformațiilor termice ale acestuia, au loc modificări dimensionale, de formă și de poziționare reciprocă. Valoarea și caracterul deformațiilor termice sunt determinate de construcția piesei, de tehnologia mecanică precedentă,

tratamentul termic, caracteristica materialului semifabricatului, precum și de o serie de alți factori.

Ținând cont de unele valori ale deformațiilor, ordonatele și abscisele punctelor  $A_1$  și  $A_2$  corespunzătoare vor fi egale:

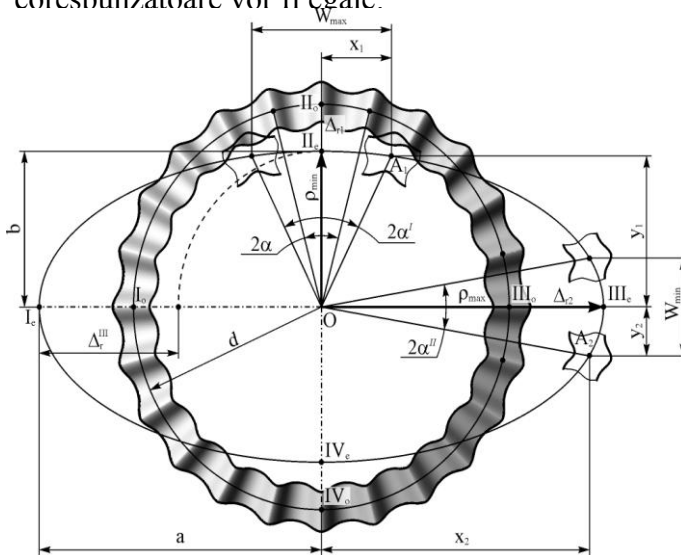


Fig. 1. Formarea componentelor radiale și tangențiale ale erorii cinematice a roților dințate în cadrul operației tehnologice de TCT

$$y_1 = \left( \frac{d}{2} - \Delta_{r1} \right) \cdot \cos \alpha, \quad (1)$$

$$x_2 = \left( \frac{d}{2} - \Delta_{r2} \right) \cdot \cos \alpha. \quad (2)$$

Luând în considerare valoarea componentei dependențelor, transformările dependențelor (1) și (2) permit obținerea presiei distanței modificate dintre dinții roții sectoarele examinate:

$$W_{max} = 2 \cdot \sin \alpha \cdot \left( \frac{d}{2} + \Delta_{r2} \right), \quad (3)$$

$$W_{min} = 2 \cdot \sin \alpha \cdot \left( \frac{d}{2} - \Delta_{r1} \right), \quad (4)$$

ce determină valoarea variației lungimii normale comune, care apare la TCT:

$$F_{vwr} W_{max} - W_{min} = 2 \cdot \sin \alpha \cdot (\Delta_{r1} + \Delta_{r2}) = 2 \cdot \sin \alpha \cdot \Delta_r^{III}. \quad (5)$$

În figura 1 sunt reprezentate convențional proiecțiile roții dințate precise, precum și deformate în urma TCT. Centrul sistemului de coordonate coincide cu centrele geometrice ale proiecțiilor roților dințate. Modificarea formei circumferinței coroanei provoacă, la rândul ei, modificări ale distanțelor radiale și tangențiale dintre dinți.

Mecanismul formării componentei radiale a erorii cinematice din cadrul operației de rectificarea interioară a roților dințate este detaliat în paragraful 2.5. Analiza mecanismului formării componentelor erorii cinematice a roților dințate în urma operației de honuire a danturii este dată în paragraful 2.6. Legitățile formării erorilor roților dințate după normele preciziei cinematice la prelucrare, utilizând metode de rulare liberă, sunt analizate în paragraful 2.7. A fost elaborat modelul matematic de formare a rugozității la rectificarea profilului dintelui, care este prezentat în paragraful 2.8.

Capitolul 3 – *Elaborarea modelului fizico-matematic al procesului de prelucrare a danturii prin metoda de rulare cu disc profilat.* În subcapitolul 3.1 este abordată cinematica procesului de generare a danturii. Procesul de rectificarea a danturii roților conice cu profil

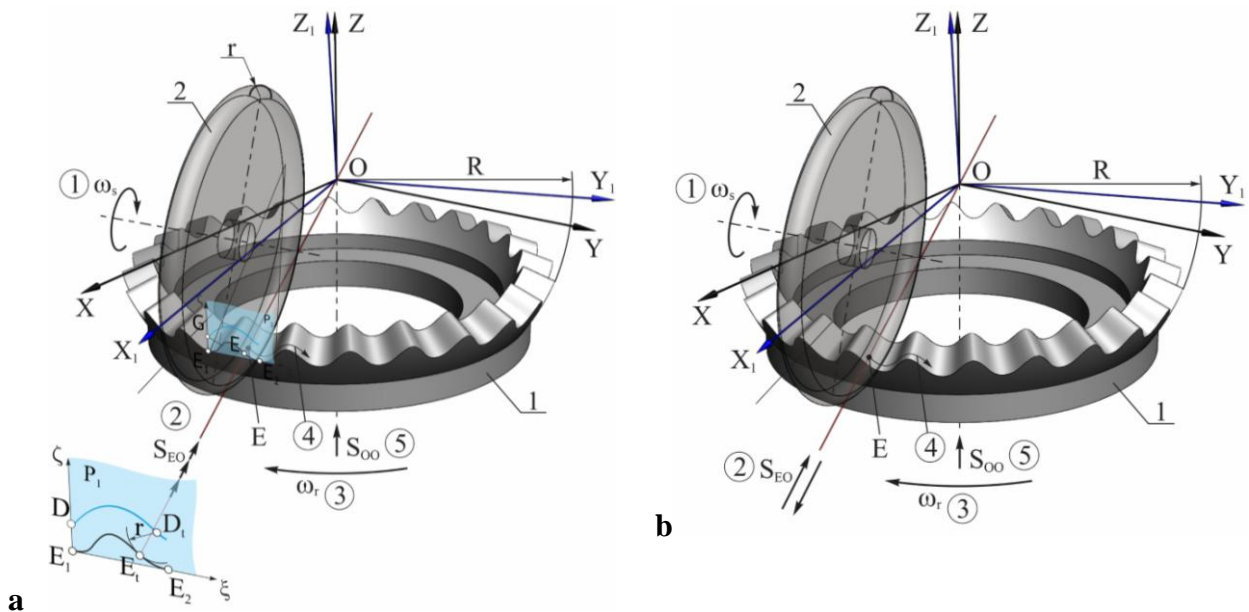


Fig. 2. Schema cinematică a procedeeului de generare prin rectificare cu sculă-disc profilat periferic, varianta I (a) și variația II (b)

nestandardizat (figura 2 a, b) a fost realizat pe mașini-unelte tip 53A30P sau 5A32 cu o sculă abrazivă în formă de disc profilat la extremitate după o rază. Schema cinematică a procedeelor – variantele I (figura 2a) și II (figura 2b) – arată că acestea diferă între ele cu mișcarea 2 și includ următoarele mișcări principale și auxiliare: 1. *Mișcarea autonomă* – mișcare principală de aşchiere – rotirea sculei abrazive cu frecvența ( $n_1$ ), care determină viteza de aşchiere sau, în acest caz, a rectificării  $V = \pi D n_1$ ; 2. *Mișcarea de aşchiere auxiliară alternativă*, efectuată de sculă în direcția generatoarei conului roții imaginare. Este o mișcare liniară de-a lungul dintelui, care se efectuează în dispozitivul instalat pe mașina-unealtă; 3. *Mișcarea de rulare* – rotirea lentă a roții la un unghi  $\Delta\theta$  în timpul unei curse duble a sculei abrazive de-a lungul dintelui. Valoarea unghiului de rotire sau a mișcării de rulare este coordonată cu mișcarea curselor duble ale sculei abrazive de-a lungul dintelui roții dințate; 4. *Mișcarea coordonată cu rularea roții* – deplasarea capului portsculă într-o direcție tangențială față de punctul de contact, cu circumferința de bază a roții, care determină profilul. Mișcările de rulare 3 și de deplasare a sculei 4 determină precizia generării profilului dintelui roții, caracterizată prin valoarea poligonalității profilului, format prin mișcări discrete la generarea profilului conform metodei date. Mașina-unealtă mai efectuează suplimentar și următoarele mișcări: a) rotirea roții la un unghi care cuprinde două goluri ale unui dinte; b) pătrunderea sculei abrazive în materialul roții-semifabricat, realizată în direcție radială față de roata dințată.

Varianta a II a tehnologiei de prelucrare diferă de varianta I cu mișcarea 2 – *mișcarea de aşchiere auxiliară*, efectuată rapid ca o mișcare liniară de-a lungul dintelui cu viteza avansului transversal, ca la o rectificare rotativă simplă. Această mișcare se efectuează pe mașinile-unelte

care fac mișcări rectilinii alternative. Caracterul îndepărtării adaosului va depinde de energia procesului de așchiere care, la rândul ei, determină calitatea prescrisă a suprafeței prelucrate.

În paragraful 3.2 a fost studiată traiectoria punctului (liniei) de contact dintre sculă și roata dințată în procesul de generare a profilului, rezultând unele constatări și descrieri analitice [1, 12]. La rectificarea sau frezare, pentru diferite adâncimi de așchiere  $t$ , în direcția axei semifabricatului, condițiile de prelucrare diferă pe parcursul prelucrării unui dinte. Din schema de prelucrare (figura 2) se constată că cele mai lejere condiții se creează la vârful dintelui. Contactul liniar dintre sculă și profilul convex-concav al dintelui trece dintr-o formă în alta. Scula în fundul dintelui funcționează în condițiile de rectificare cilindrică interioară, în poziția de mijloc pe dinte – de rectificare plană, în poziția de vârf dinte – de rectificare cilindrică exterioară. S-a stabilit, că adâncimea așchierii  $t$  în direcția axei semifabricatului este diferită de cea în direcția normalei pe profilul dintelui.

Pentru studiul contactului punctului (liniei) *sculă – dinte*, descriem forma profilului dintelui prin ecuații parametrice pentru diferite adâncimi de așchiere  $t$ , astfel:

$$\begin{aligned} X_{D_t} &= R \cos \delta (-\cos \psi \sin(Z_1 \psi / Z_2) + \sin \psi \cos(Z_1 \psi / Z_2) \cos \theta) - R \sin \delta \sin \psi \sin \theta; \\ Y_{D_t} &= -R \cos \delta (\sin \psi \sin(Z_1 \psi / Z_2) + \cos \psi \cos(Z_1 \psi / Z_2) \cos \theta) + R \sin \delta \cos \psi \sin \theta; \\ Z_{D_t} &= -R \cos \delta \cos(Z_1 \psi / Z_2) \sin \theta - R \sin \delta \cos \theta, \end{aligned} \quad (10)$$

unde:  $\psi$  – unghiul precesie (de rotire a axului principal al mașinii-unelte);  $\theta$  – unghiul de nutație (de înclinare a arborelui cotit al dispozitivului);  $\delta$  – unghiul axoidei conice (de înclinare a axei sculei față de suprafața mesei mașinii-unelte);  $r$  – raza de profilare a sculei (conturului generator).

În acest scop, derivăm în raport cu timpul ecuațiile (10) și obținem:

$$\begin{aligned} \dot{X}_{D_t} &= R \dot{\psi} \cos \delta [\sin \psi \sin(Z_1 \psi / Z_2) - (Z_1 / Z_2) \cos \psi \cos(Z_1 \psi / Z_2) + \cos \psi \cos(Z_1 \psi / Z_2) \cos \theta - \\ &\quad - (Z_1 / Z_2) \sin \psi \sin(Z_1 \psi / Z_2) \cos \theta] - R \dot{\psi} \sin \delta \cos \psi \sin \theta; \\ \dot{Y}_{D_t} &= -R \dot{\psi} \cos \delta [\cos \psi \sin(Z_1 \psi / Z_2) + (Z_1 / Z_2) \sin \psi \cos(Z_1 \psi / Z_2) - \\ &\quad - \sin \psi \cos(Z_1 \psi / Z_2) \cos \theta - (Z_1 / Z_2) \cos \psi \sin(Z_1 \psi / Z_2) \cos \theta] - R \dot{\psi} \sin \delta \sin \psi \sin \theta; \\ \dot{Z}_{D_t} &= R \dot{\psi} (Z_1 / Z_2) \cos \delta \sin(Z_1 \psi / Z_2) \sin \theta, \end{aligned} \quad (11)$$

unde  $\dot{\psi}$  este viteza unghiulară a arborelui-manivelă a mașinii-unelte.

$$\begin{cases} X^2 + Y^2 + (Z - t)^2 = R^2 \\ (X - X_D)^2 + (Y - Y_D)^2 + (Z - (Z_D + t))^2 = 4R^2 \sin^2(\beta/2) \\ \dot{X}_D (X - X_D)^2 + \dot{Y}_D (Y - Y_D)^2 + \dot{Z}_D (Z - (Z_D + t))^2 = 4R^2 \sin^2(\beta/2) \end{cases} \quad (12)$$

Ecuatiile (11) descriu poziția punctului  $E_t$  pe planul normal  $P_N$  la vectorul vitezei punctului  $D_t$  (centrul conturului sculei), iar ecuațiile (12) reprezintă deplasarea punctului de contact *sculă – profil* generat  $E_t$  la valoarea unghiului conicității  $\beta$  al rolei transmisiei reale.

Profilul dinților proiectat de pe sferă pe planul normal  $P_I$  se descrie prin ecuațiile:

$$Y_{EP}=[(BZ_{E1}-CY_{E1})n_x+(CX_{E1}-AZ_{E1})n_y+(AY_{E1}-BX_{E1})n_z]/[(BZ_E/Y_E-C)n_x+(CX_E-AZ_E)n_y/Y_E+(A-BX_E/Y_E)n_z]; \quad (13)$$

$$X_{EP}=Y_{EP}X_E/Y_E; \quad (14)$$

$$Z_{EP}=Y_{EP}Z_E/Y_E, \quad (15)$$

unde:  $A=X_{E2}-X_{E1}$ ,  $B=Y_{E2}-Y_{E1}$ ,  $C=Z_{E2}-Z_{E1}$ .

Profilul generat al dinților plasat (descriș) pe sferă se proiectează pe planul normal al dinților  $P = f(p)$  prin ecuațiile:

$$\begin{aligned} (E_1E_2)^2 &= (X_{E2}-X_{E1})^2 + (Y_{E2}-Y_{E1})^2 + (Z_{E2}-Z_{E1})^2; \\ v^2_1 &= (X_{EP}-X_{E1})^2 + (Y_{EP}-Y_{E1})^2 + (Z_{EP}-Z_{E1})^2; \\ v^2_2 &= (X_{EP}-X_{E2})^2 + (Y_{EP}-Y_{E2})^2 + (Z_{EP}-Z_{E2})^2; \\ P_{En} &= [(E_1E_2)^2 + v^2_1 - v^2_2]/2(E_1E_2); \\ P_{En} &= (v^2_1 - p^2)^{1/2}. \end{aligned} \quad (16)$$

Profilul generat al dintelui (figura 3) pe plan se determină prin funcția  $P_E=f(p_{En})$ . Iar proiecția traiectoriei centrului conturului generator al sculei se descrie prin:

$$\begin{aligned} Y_{DP} &= [(BZ_{E1}-CY_{E1})n_x+(CX_{E1}-AZ_{E1})n_y+(AY_{E1}-BX_{E1})n_z]/ \\ & / [(BZ_D/Y_D-C)n_x+(CX_D-AZ_D)n_y/Y_D+(A-BX_D/Y_D)n_z]; \\ X_{DP} &= Y_{DP}X_D/Y_D; \\ Z_{DP} &= Y_{DP}Z_D/Y_D; \\ (E_1E_2)^2 &= X_{E2}-X_{E1})^2 + (Y_{E2}-Y_{E1})^2 + (Z_{E2}-Z_{E1})^2; \\ s^2_1 &= (X_{DP}-X_{E1})^2 + (Y_{DP}-Y_{E1})^2 + (Z_{DP}-Z_{E1})^2; \\ s^2_2 &= (X_{DP}-X_{E2})^2 + (Y_{DP}-Y_{E2})^2 + (Z_{DP}-Z_{E1})^2; \\ P_D &= [(E_1E_2)^2 + s^2_1 - s^2_2]/2(E_1E_2); \\ P_D &= (s^2_1 - p^2)^{1/2}. \end{aligned} \quad (17)$$

Prin metoda grafică, pentru parametrii constructivi ai roții fabricate  $Z_1 = 24$ ,  $Z_2 = 25$ ,  $\Theta = 2.5^\circ$ ,  $\delta = 22.5^\circ$ ,  $\beta = 3.83^\circ$ ,  $R = 75$  mm, cercetăm următoarele valori ale avansurilor axiale  $s_z$ : 1 mm, 0.5 mm, 0.25 mm, 0.1 mm (figura 4 a, b). Analiza graficului (figura 4 a) demonstrează că lungimea liniei de contact a sculei cu profilul generat este maximă la piciorul dintelui și scade, devenind minimă la vârful acestuia.

În subcapitolul 3.3 sunt analizate arcele de contact al sculei cu roata dințată în diferite zone de prelucrare a dintelui. Stabilindu-se că condițiile de prelucrare a profilului dintelui sunt

diverse, s-au determinat variația vitezei tangențiale la profilul dintelui și raportul dintre secțiunea maximă și cea minimă pentru diferite adâncimi de prelucrare.

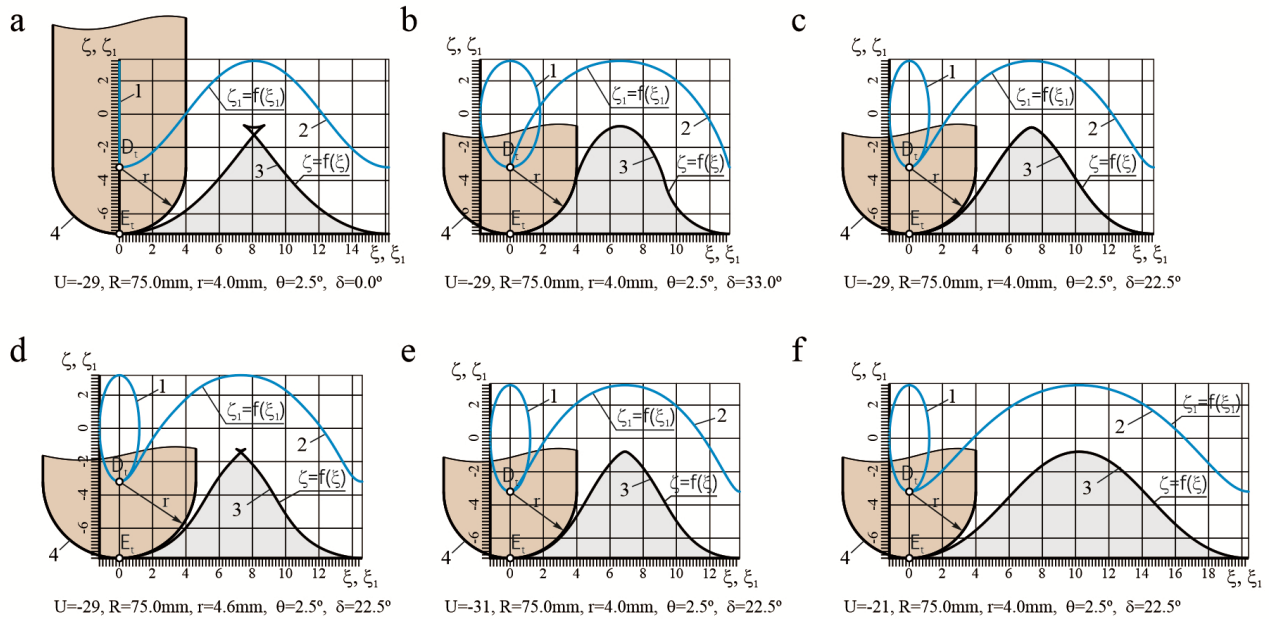


Fig. 3. Profilogramele generării profilului dinților cu sculă precesională: 1, 2 – traiectoriile mișcării centrului sculei în sistemul de coordonate imobil  $OXYZ$  și, respectiv, în cel mobil  $OXYZ$ ; 3 – profilul dintelui; 4 – conturul generator al sculei

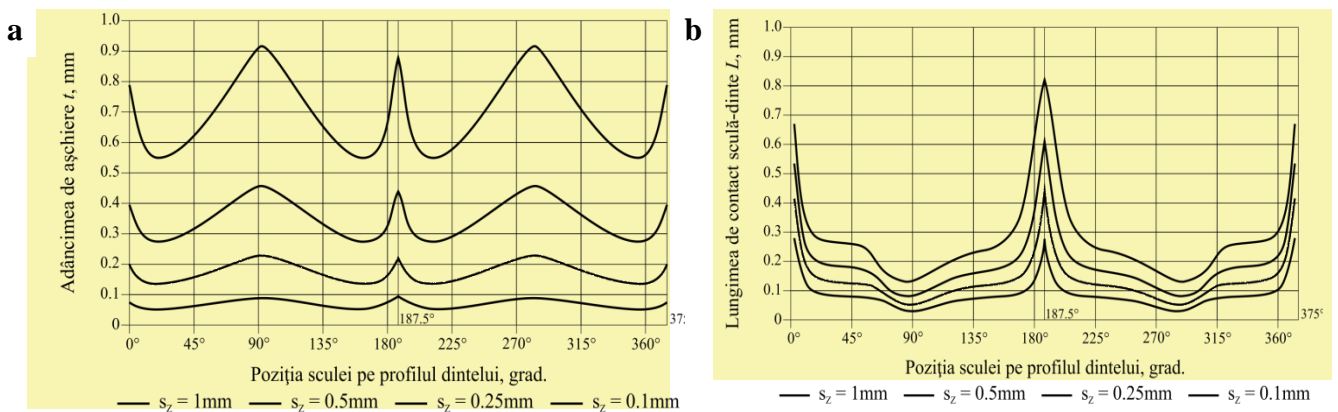


Fig. 4. a) contactul liniar dintre sculă și dinte, b) dependența adâncimii de așchiere pe normala la suprafața profilului dintelui pentru diferite poziții ale sculei

În subcapitolul 3.4 a fost prezentată modelarea matematică a cinematicii procesului de rectificare a danturii. A fost examinată schema obținerii profilului nestandardizat [1, 11, 15, 20, 26, 45, 51, 54] la rectificare prin metoda expusă mai sus. În figura 5 este prezentată schema de formare a suprafeței danturii conice cu profil convex-concav cu sculă în formă de disc profilat la periferie în arc de cerc. În această schemă se analizează formarea poligonalității profilului danturii generate la  $i/z_2$  cicluri de precesie a sculei și  $i$  deplasări complete alternative (du-te-vino) a acesteia în direcția spre centrul de precesie, unde:  $z_2$  este numărul de dinți ai roții

fabricate;  $i$  –numărul ciclurilor de deplasare alternativă (du-te–vino) a sculei în direcția spre centrul de precesie la generarea danturii.

Mișcările sfero-spațială și alternativă (du-te–vino) ale sculei sunt coordonate între ele, astfel încât punctele de contact  $K_1, K_2$  (scula-profilul) în mișcarea lor evolutivă să fie plasate pe profilul dinților descriși prin ecuațiile parametrice (11).

În procesul de generare a profilului dinților coordonarea mișcărilor sculei trebuie să asigure următoarele: când centrul conturului generator al sculei (centrul razei de curbura a

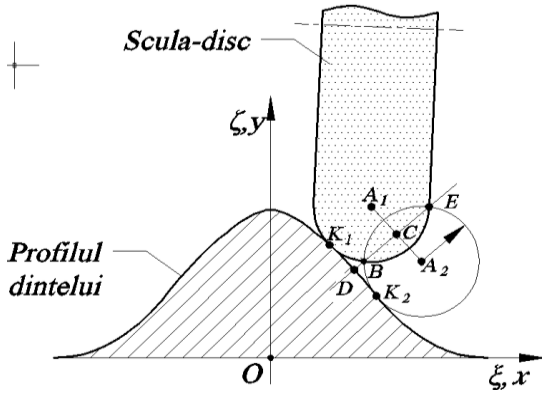


Fig. 5. Schema formării poligonalității profilului generat

profilului periferic) se plasează în punctul  $A_1$ , scula vine în contact cu profilul dintelui în punctul  $K_1$ ; după  $i/z_2$  cicluri de precesie și o deplasare completă du-te–vino a sculei, aceasta vine în contact cu profilul dintelui în punctul  $K_2$ . Așadar, poligonalitatea profilului generat în secțiunea normală și pe lungimea dintelui depinde de cinematica procesului de generare, exprimată prin coraportul  $i$  și  $z_2$ .

Pentru determinarea poligonalității este necesar a determina segmentul  $DB$  format în timpul unei deplasări alternative (du-te–vino) a sculei și care reprezintă calitatea suprafeței generate. Valoarea maximă a poligonalității predomină în zona trecerii formei profilului din concavă în convexă, localizată în vecinătatea vârfului dintelui.

Pentru determinarea analitică a segmentului  $DB$ , folosim geometria contactului sculei generatoare cu profilul generat, reprezentată în figura 6. În acest scop, determinăm coordonatele punctelor-reper, care geometric reprezintă interacțiunea sculei în mișcare cu profilul generat.

Având ecuația circumferinței de rază  $r$  cu centrul în  $A_1$  și  $A_2$ , determinăm coordonatele punctelor  $B$  și  $E$ :

$$x_b = \frac{-b - \sqrt{b^2 - c(A^2 + 1)}}{A^2 + 1}; x_e = \frac{-b + \sqrt{b^2 - c(A^2 + 1)}}{A^2 + 1}; \quad (17)$$

$$y_B = A * X_B + B; y_E = A * X_E + B. ,$$

iar lungimea segmentului  $BC$  se determină din relația:

$$BC = \sqrt{(x_c - x_b)^2 + (y_c - y_b)^2}. \quad (18)$$

Lungimea segmentului  $BD$  reprezintă eroarea de profil a dintelui:

$$BD = r - BC. \quad (19)$$



În subcapitolul 3.5 este prezentată elaborarea sistemului tehnologic de generare a danturilor cu mișcare sferospațială a sculei în formă de disc. Tehnologia de generare a profilurilor convex-concave cu scula precesională în formă de trunchi de con, descrisă în [1], nu poate fi utilizată pentru crearea profilurilor roților conice cu diametrul mai mic de 20 mm, din cauza micșorării dimensiunilor sculei abrazive.

Dezavantajul acestui procedeu în cazul rectificării profilurilor constă și în uzarea neuniformă a sculei abrazive pe lungimea ei, fapt ce provoacă formarea ridurilor perpendiculare pe axa dintelui, apariția arsurilor și microfisurilor, iar toate acestea conduc la scăderea calității suprafeței prelucrate. Procedeu de generare a danturilor conice cu sculă în formă de disc urmărește scopul de a înlătura dezavantajele menționate. Procedeu (figura 6) constă în comunicarea sculei în formă de disc a unei mișcări sfero-spațiale cu un punct fix, care ar imita mișcările relative la angrenarea dinților în angrenajul precesional real. Mișcările transmise sculei urmează a fi coordonate în raport cu un sistem mobil de coordonate  $(X_I Y_I Z_I)$  și cu unul fix  $(XYZ)$ , originea cărora să fie plasată pe axa mesei mașinii-unelte și să coincidă cu central mișcării sferospațiale.

Pentru realizarea tehnologiei de generare a danturilor cu mișcare sferospațială a sculei în formă de disc descrise în p. 3.1, a fost elaborat dispozitivul prezentat în figura 6, care conține un corp 1 cu un element de reazem executat în formă de semicilindru pentru reazemarea lui în lăcașul mașinii-unelte, traversa 2 prinsă prin buloane de corpul 1, arborele-manivelă 3 pe care este montat balansierul 4, brațul reglabil 5. Așezarea simetrică a brațului se asigură prin intermediul unei pene prismatice. Scula 7 împreună cu mecanismul de acționare constructiv sunt legate cu brațul 5, cu asigurarea posibilității varierii unghiului de poziționare a sculei  $(\beta + \delta)$ . Schema cinematică a dispozitivului a fost elaborată astfel încât axele fixă  $Z$  și mobilă  $Z_I$  ale arborelui-manivelă 3 să se intersecteze într-un punct (central mișcării sferospațiale) amplasat pe axa semifabricatului 9. Totodată, balansierul 4 este legat cu sistemul mobil de coordonate  $O X_I Y_I Z_I$ , corpul 1 – cu sistemul imobil de coordonate  $OXYZ$ , axa arborelui-manivelă 3 coincide cu axa  $Z_I$ , iar axa de rotire a semifabricatului 9 – cu axa  $Z$ . La rotirea arborelui-manivelă 3, balansierului 4 și sculei 1 li se comunică o mișcare sferospațială în jurul punctului  $O$  de intersecție a axelor fixă și mobilă ale arborelui-manivelă 3, denumit *centru de precesie*. Totodată, cu ajutorul mecanismului de acționare 10, sculei i se comunică o mișcare alternativă du-te-vino spre centrul de precesie, astfel încât punctul de contact al sculei cu profilul dintelui să coincidă cu generatoarele suprafețelor flancurilor dinților.



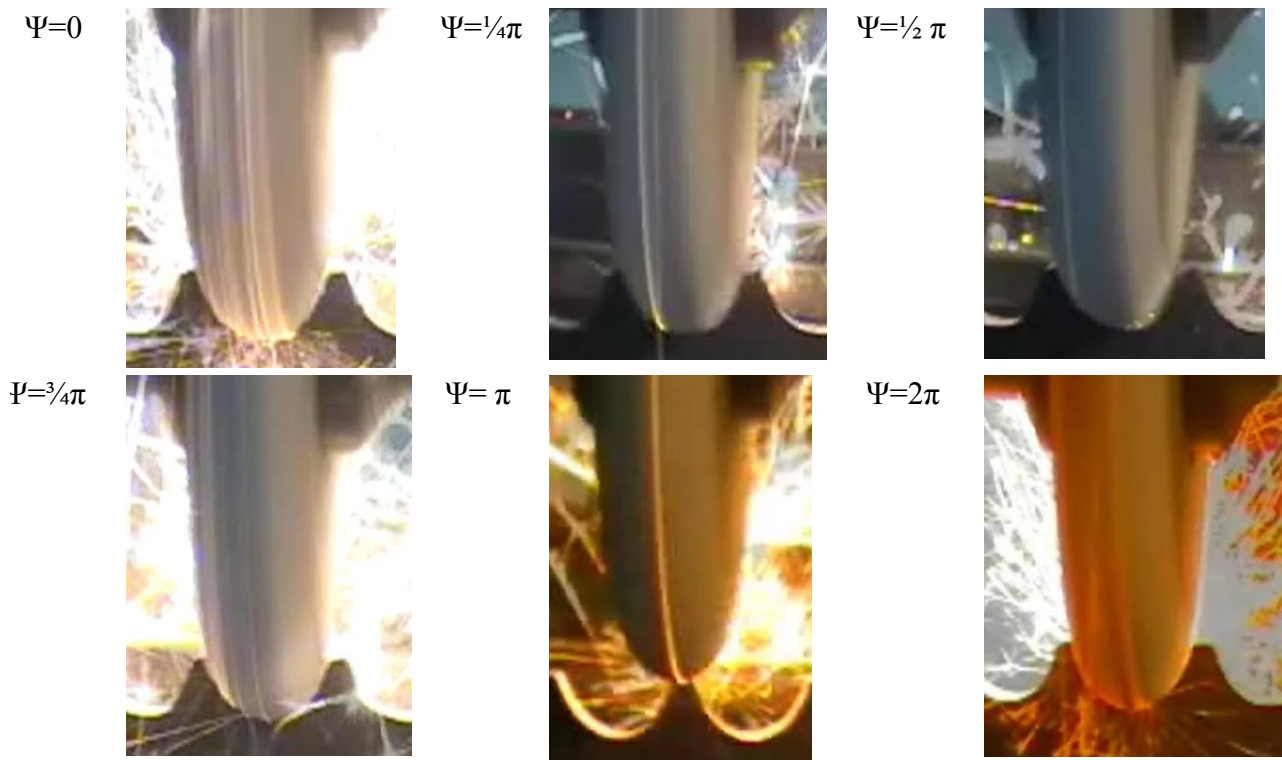


Fig. 7. Generarea dintelui cu profil convex-concav prin rostogolire-rolare spațială cu sculă-disc profilată periferic în evoluția unui ciclu de precesie  $0 < \Psi < 2\pi$

În subcapitolul 3.6 e descrisă cinetica procesului de rectificare a danturii cu ajutorul sculei abrazive cu mișcare sferospațială. În baza procedurii de prelucrare a dinților au fost stabilite relațiile de calcul [1, 36] ale: numărului  $N$  de curse duble la generarea profilului, la care se obține poligonalitatea profilului; lățimii maxime a segmentului de rectificare; numărului de granule care participă la procesul de așchiere; suprafeței de contact al discului abraziv cu dintele. Apoi a fost posibil să determinăm valoarea medie a forțelor de așchiere:

$$F_{R(cp)} = \frac{3.4\sigma_R S_{S C} C \cdot A \cdot K}{\pi V^2 \tau_I}, \quad (20)$$

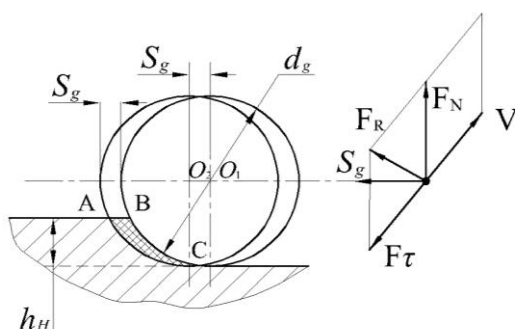


Fig. 8. Schema interacțiunii fizice a grăuntelui unitar cu suprafața de prelucrare

unde:  $C$  – constanta proprietăților fizico-mecanice ale materialului prelucrat;  $\sigma$  – tensiuni de distrugere pentru materialul prelucrat (Pa);  $\mu$  – coeficientul lui Poisson;  $S_{s.c.}$  – suprafața de contact simultană;  $A$  – conductibilitatea termică ( $m^2/s$ );  $K$  – coeficientul ce caracterizează zona de restabilire a proprietăților elastice;  $\tau_i$  – timpul integrării.

După determinarea forței, au fost stabilite regimurile de așchiere (figura 8), valoarea avansului

$S_z$  la nivelul unui grăunte, apoi pe dinte:

$$S_z \leq \frac{0,5\sigma_{B2}}{\sigma_R d_g^2 h_H}. \quad (21)$$

Pentru alegerea regimurilor de rectificare conform parametrilor consecutiv-tehnologici ai procesului de prelucrare și conform parametrilor calității suprafețelor prelucrate, este folosit softul *MatCAD*.

Trebuie de menționat că majorarea vitezei de așchiere conduce la micșorarea temperaturii în liant, la răcirea suprafeței prelucrate și la o îndepărtare mai productivă a așchiilor. Temperatura la suprafața liantului, conform formulei Kelvin pentru o sursă impulsivă de emiterie a căldurii, va fi egală:

$$T_{int} = \frac{\sigma_R S_z V K_m^2}{\sqrt{\pi \lambda \rho C \cdot A \cdot X \cdot N \exp \frac{d}{16 A \tau_1}}}, \quad (22)$$

unde:  $\tau_1$  – timpul integrării;  $K_m$  – coeficient de proporționalitate ales, care determină trecerea unei cote a căldurii din granule în liant;  $N$  – numărul de granule aflate în contact;  $X$  – coeficient ce caracterizează zona de restabilire a proprietăților elastice la modelarea proceselor termodinamice ale procesului de distrugere prin așchiere;  $\pi^* \lambda^* \rho$  – conductibilitatea relativă a căldurii, capacitatea căldurii și densitatea liantului.

Analiza egalităților denotă că la o mărire a vitezei crește și indicele puterii exponențiale ce se află la numitor, care este cu mult mai mare decât valoarea vitezei de la numitor.

Capitolul 4 – ***Metodica, standurile și aparatura pentru cercetarea indicilor energetici ai procesului de rectificare.*** În paragraful 4.1 sunt expuse considerațiile generale că rolul hotărâtor în procesul de prelucrare abrazivă le aparține sarcinilor și forțelor din zona de contact al discului cu produsul. Cu cât mai înalte sunt sarcinile și forțele, cu atât mai intens are loc îndepărtarea metalului. Pentru a obține un anumit volum de metal îndepărtat, trebuie micșorate sarcinile care se dezvoltă în zona de contact, fapt ce permite reducerea temperaturilor în zona de contact, micșorarea cedărilor elastice în sistemul tehnologic *semifabricat – sculă – dispozitiv – mașină-unealtă*, creșterea preciziei dimensionale, preciziei de formă și a celei de amplasare reciprocă a suprafețelor prelucrate.

Pentru determinarea forței de așchiere a fost construită, proiectată, fabricată și utilizată stația tensometrică (paragraful 4.2), care include un dispozitiv dinamometric original [8, 16], capabil să determine forța de așchiere, alcătuită din trei componente (figura 9) în intervalul 25–250 N. Forța normală  $P_y$  este înregistrată de către toți tensorii (figura 10) celor patru inele, componenta tangențială  $P_z$  – de tensorii elementelor elastice (inele) (al doilea și al patrulea), iar

componenta  $P_x$ , care acționează în direcția avansului transversal, este înregistrată de tensorii elementelor elastice (primul și al treilea).

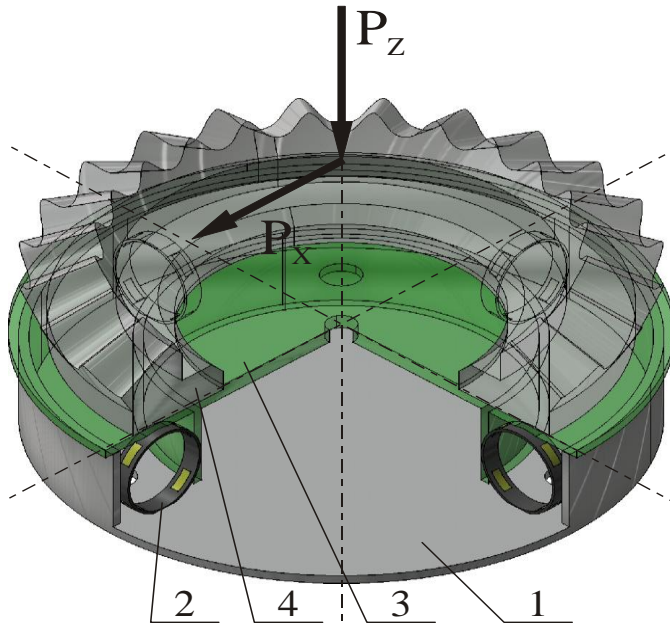


Fig. 9. Dinamometru DR-01

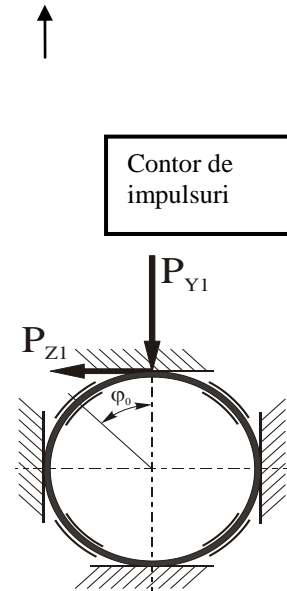


Fig. 10. Element elastic

La etalonarea (încărcarea) statică a dinamometrului, încărcarea are loc consecutiv în fiecare direcție cu sarcina în creștere, iar abaterea fascicolului de lumină se înregistrează pe pelicula oscilografului sau pe banda aparatului înregistrator. Conform datelor respective se construiesc curbele de etalonare  $h(Pz)$  și  $(Py)$ .

Pentru cercetarea procesului de rectificare, în baza mașinii de danturat 53A30P, a fost elaborat un stand (paragraful 4.3). Acest semiautomat are o stație hidraulică ce asigură avansul axial precis, rotirea mesei până în momentul potrivit și reglarea lor în limitele stabilite. Viteza de rotire a mesei se reglează în limitele de 0,5...6 m/min, avansul axial se reglează de la 0,003 până la 0,12 mm la o rotație. Standul este echipat cu un sistem hidraulic, cu ajutorul căruia în zona de așchiere, la rectificare, se asigură lichidul de ungere-răcire.

Prelucrarea profilurilor descrise în [1, 3, 4, 6, 13, 18, 20, 22] prin metoda tradițională, practic, este foarte complicată, deoarece pentru fiecare relație a parametrilor  $\Theta$ ,  $\delta$ ,  $\beta$  și  $z$  este necesar a se executa scule cu profiluri corespunzătoare. Se știe că asupra formei profilului dinților influențează valoarea unghiului axoidei conice  $\delta$ , unghiul conicității roților  $\beta$ , unghiul de nutație  $\Theta$ , numărul dinților roților  $z_1$  și  $z_2$  și raportul dintre ele.

De aceea, a fost propusă metoda care asigură generarea unei mulțimi de profiluri ale dinților cu utilizarea aceleiași scule. Unei rotații a semifabricatului în jurul axei sale trebuie să-i corespundă  $n$  cicluri depline de precesie, efectuate de sculă (unde  $n = z_1$  – numărul de dinți ai semifabricatului). Esența metodei constă în următoarele: sculei rotitoare i se comunică o serie de mișcări coordonate în raport cu semifabricatul rotitor. Totodată, suprafața descrisă de partea periferică a sculei în raport cu semifabricatul rotitor reproduce un oarecare corp imaginar, care are forma roții generatoare.

Utilizând lanțul cinematic de rulare al mașinii de danturare a roților dințate, semifabricatul roții dințate și scula se aduc la o mișcare coordonată – mișcarea de rulare, ce reproduce angrenarea roții generatoare cu semifabricatul (figura 11). La fiecare schimbare elementară a poziției sculei rotitoare în spațiu față de semifabricat, din acesta se scoate o parte din metal. În consecință, suprafața dintelui roții prelucrate se obține ca înfășurătoarea unei serii consecutive de poziții ale periferiei sculei rotitoare față de semifabricat.



Fig. 11. Mașina-unealtă 53A30P și dispozitivul central de danturat

Pentru efectuarea mișcărilor necesare ale sculei a fost elaborat dispozitivul [1, 11, 26] (figura 11), care poate fi adaptat la mașinile de danturat de mărcile: 5K32P, 53A11, 53A30P, 53A50, 53A80, 5342, executate conform clasei de precizie  $P GO37 8-77$ .

Pentru măsurarea temperaturii exterioare [9] în zona rectificării (paragraful 4.5), se utilizează metoda fără contact, bazată pe măsurarea temperaturii în zona rectificării prin canalul format în prealabil în corpul sculei abrazive prin burghiere cu burghiu cu diamant. Temperatura suprafeței produsului nemijlocit în zona rectificării este măsurată prin intermediul fotorezistenței seleniu-plumb, care are o inerționalitate mică (constanta timpului  $4 \mu s$ ). Razele infraroșii din zona de contact al discului cu piesa sunt orientate spre canalul  $\varnothing 1,0$  mm, burghiat în corpul discului, spre stratul

fotosensibil al tensorului. Eroarea determinării cantității de căldură la măsurarea cu precizia de  $\pm 0,01^\circ C$  este sub 5% din valoarea nominală.

Uzura sculei (paragraful 4.5) se măsoară prin metoda liniară de măsurare, care a fost dezvoltată în cercetările respective.

O informație importantă despre proprietatea de așchiere a sculei abrazive [35, 37] o dau parametrii geometriei reliefului suprafeței de lucru a sculei (paragraful 4.6). Determinarea geometriei reliefului suprafeței așchietoare a discului se realizează prin metoda profilogramării cu un ac de diamant cu o rază de 2  $\mu\text{m}$ . Înregistrarea profilului se face pe un profilograf de model 201 (uzina Kalibr, Rusia).

Capitolul 5 – *Cercetarea experimentală a procesului de rectificare a danturii transmisiilor precesionale prin rulare*. În subcapitolul 5.1 este redată metodica cercetărilor experimentale. Cercetările [1, 31, 32, 37, 41, 51, 53, 55, 57, 58, 61] au fost efectuate pe o mașină de danturat 53A30P, modificată pentru a rectifica danturi. Caracteristica tehnică: lungimea dintelui rectificat  $s = 20\text{--}100$  mm; numărul de curse duble  $n = 100\text{--}315$   $\text{min}^{-1}$ ; valoarea avansului mesei  $p_o = 80\text{--}800$  mm/min. Cercetarea caracteristicilor de precizie ale mașinii-unelte s-a efectuat conform cerințelor GOST 8001-78 și GOST 13 142-90.

Avansul necesar obținerii adâncimii de rectificare a fost reglat prin rotirea manivelei mecanismului cu șurub [vezi capitolul 3, figura 11]. Mașina-unealtă a fost echipată cu un



Fig. 12. Roata dințată pentru cercetarea procesului de rectificare după metoda rulării

dispozitiv de îndreptare a pietrei abrazive. În calitate de disc abraziv a fost utilizat discul tip *ИО*  $D = 20\text{--}100$  mm, lățimea discului  $H = 5\text{--}15$  mm, granula abrazivă 99A: mărimea granulei 60-80; duritatea *H, I, J, K, L, M*; structura 5, 7, 8, 25; liant *V*. Duritatea discului abraziv a fost cercetată prin metoda Grindosome.

Echilibrarea dinamică a discului a fost efectuată pe mașina *K300BR Rava Torno*. Valoarea dezechilibrului a fost determinată pe un aparat electronic cu compensarea momentului. Precizia dezechilibrului discului abraziv a fost în limita bătăii de 1  $\mu\text{m}$ . Viteza la echilibrare – 10000  $\text{min}^{-1}$ . Discul abraziv a fost îndepărtat și echilibrat după fiecare instalare a roții, adâncimea de îndreptare fiind stabilită de 0,05 mm la o viteză de 0,1 mm/min. S-au rectificat mai multe roți dințate conice cu profil nestandardizat

cu dinți drepți, înălțimea dintelui  $h = 10\text{--}15$  mm, lungimea dintelui  $b = 10\text{--}25$  mm, cu un număr de dinți  $z = 20\text{--}32$ , executate din oțel 40H, 45H, 12H2N4A, 20H2N4A cu o duritate de 40–62 HRC (figura 12).

Adâncimea rectificării dintelui a fost de  $0,003\div 0,02$  mm, iar adaosul în partea laterală a dintelui – în limitele  $0,12\div 0,35$  mm. În calitate de lichid de ungere-răcire (LUR) a fost utilizat

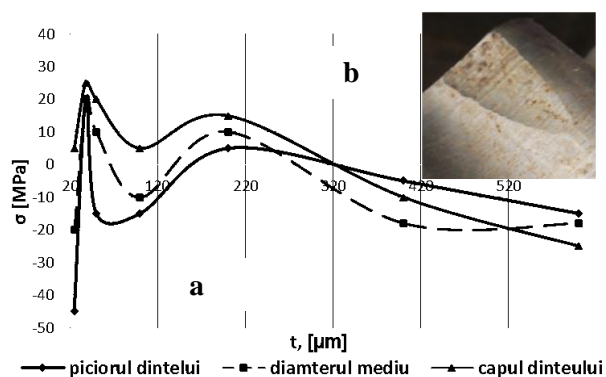


Fig. 13. a) Influența amplitudinii oscilațiilor ( $u$ ) asupra valorii și semnului tensiunilor remanente:  $n_s=208 \text{ min}^{-1}$ ,  $a=0,0525 \text{ mm}$ ,  $p_0=440 \text{ mm/min}$ ,  $u=2.149E-06 \text{ mm}$ ; b) dinte tăiat înclinat

ulei cu emulsie *ER*, în raport de 1:40, care a fost transportat în zona de rectificare cu viteza de  $15 \text{ dm}^3/\text{min}$ , cu o valoare admisibilă de poluare de  $40 \mu\text{m/l}$ .

Tensiunile remanente amplasate în stratul subțire al dinților roților au fost cercetate pe capul dintelui, în partea de mijloc și în piciorul acestuia, prin utilizarea metodei B Röntgen. Suprafața a fost supusă atacului prin metoda electrochimică (65% soluție  $\text{H}_3\text{PO}_4$  cu

densitatea electrolitică 8-8, 2 A), cu măsurarea și calculul ulterior al tensiunilor prin metoda Hailsa. În cercetările efectuate, tensiunile remanente au fost determinat prin metoda Röntgen sin  $2\phi$ , pe difractoare *TUR M61* și *Philips*. A fost utilizat generatorul *PW 1130*, goniometrul *PW 1050* (Firma *AMR*), goniometrul *HZG3* și aparate de înregistrare.

Au fost cercetate duritatea, microduritatea, rugozitatea suprafeței și aspectul metalografic. În procesul cercetărilor stării stratului exterior au fost utilizate următoarele aparate: dispozitiv universal pentru măsurarea roților dințate (Firma *Carl Zeiss*) *Jena* cu traductor opto-test, valoarea preciziei de măsurare  $1 \mu\text{m}$ , și *VG450*, aceeași firmă, cu limitele de măsurare  $0-65 \mu\text{m}$  și precizia de măsurare  $0,001 \text{ mm}$ ; role de măsurare tip *MLCbA* și micrometru tip ceas *Mm CC* cu precizia de măsurare  $0,002 \text{ mm}$ ; profilometru (Firma *Carl Zeiss*) tip *ME-10*; dispozitive de măsurare a durității tip *Rokwell* (Firma *Kabial Press*) și tip *PRL-510*; microscop metalografic *Neophot-2* (Firma *Carl Zeiss*) tip *Hanemann* cu dispozitiv pentru măsurarea microdurității; microdurometru *PMT-3* și microscop-scaner *IDOL*.

A fost stabilită influența oscilațiilor (paragraful 5.2 ) care apar în procesul rectificării și acționează asupra tensiunilor remanente în stratul exterior al dinților roților. Se observă (figura 13) că, de fiecare dată, valoarea tensiunilor în stratul superficial al piciorului dintelui este mai mică față de cea de la capul dintelui ori la suprafața de lucru a dinților în zona de trecere din concavă în cea convexă. Acest fapt dovedește că amplitudinea oscilațiilor are legătură cu adâncimea de rectificare și cu tensiunile generate.

Un rol important îl are frecvența oscilațiilor și avansul pentru metoda de rulare cu disc profilat. Majorarea avansului provoacă creșterea valorii amplitudinii care, la rândul său, influențează asupra frecvenței oscilațiilor în zona de contact al sculei cu semifabricatul prelucrat. Dacă amplitudinea oscilațiilor are o influență importantă asupra, adâncimii de așchiere, atunci ar putea crește influența frecării în zona de așchiere.



În paragraful 5.3 a fost determinată influența condițiilor de rectificare asupra caracteristicii calității stratului exterior. A fost cercetată influența numărului de curse duble ale discului rectificator, a avansului rotativ al mesei, a sculelor și adâncimii de așchiere asupra tensiunilor remanente în stratul exterior al dinților roților dințate. Influența numărului de curse duble ale sculei ( $n_s$ ) se reflectă puternic asupra tensiunilor de întindere, la o adâncime de cca 100  $\mu\text{m}$  (figura 14 a). Acest fapt este provocat de creșterea vitezei de deplasare a discului rectificator față de suprafața rectificată a dinților roții dințate, care micșorează cantitatea de căldură degajată și se răsfrânge pozitiv asupra răcirii mai rapide a stratului exterior al dinților. Ca rezultat, are loc majorarea tensiunilor de comprimare la adâncimi mari.

După cum au demonstrat cercetările, simultan cu creșterea avansului rotativ se majorează și valoarea tensiunilor remanente (figura 14 b) care, la o adâncime de mai mult de 100  $\mu\text{m}$ , sunt tensiuni de comprimare.

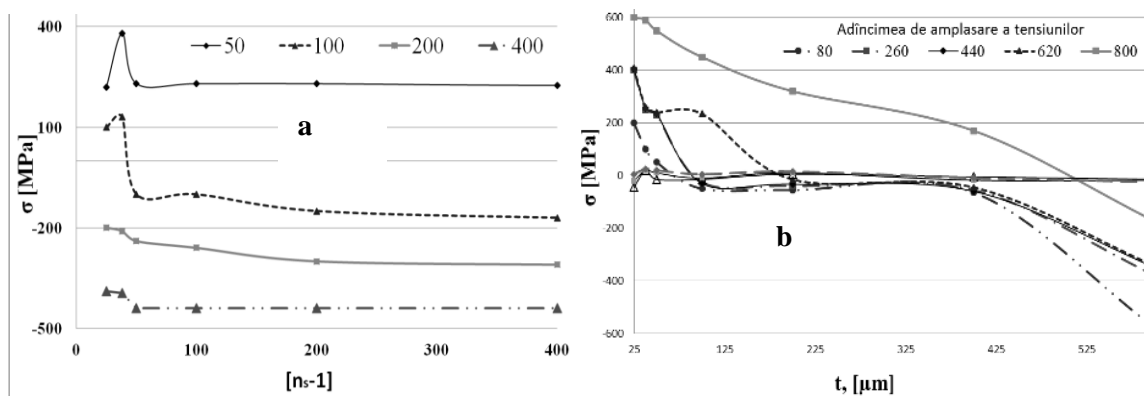


Fig. 14. Repartizarea tensiunilor în exteriorul dinților în funcție de: a) numărul curselor duble [ $n_s^{-1}$ ]; b) avansul rotativ al mesei [mm/min];

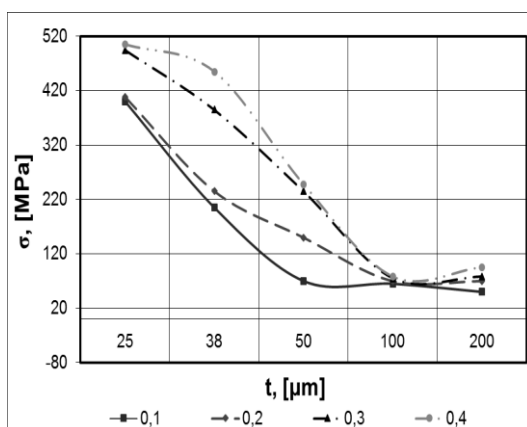


Fig. 15. Repartizarea tensiunilor remanente în stratul exterior al dinților roților dințate în funcție de valoarea excentricității  $e$  [mm]

Acțiunea adâncimii de rectificare asupra formării tensiunii inițiale în stratul exterior al dinților roților dințate se reflectă prin creșterea valorilor tensiunilor. Caracterul modificării tensiunilor remanente pe adâncimea lor de amplasare este același la rectificare cu diferite adâncimi, cuprinse în câmpul de valori de la 0,05 până la 0,1 mm.

Aceste tensiuni de suprafață sunt de întindere și se micșorează odată cu adâncimea față de suprafață, de la 400 MPa până la 0, la o distanță de cca 500  $\mu\text{m}$  de la suprafață. Aceasta are loc deoarece, pe de o parte, există o influență a căldurii care trece în materialul prelucrat din zona de contact, iar pe de altă parte, datorită variației forțelor de așchiere.

Căldura provoacă modificări ale structurii în stratul exterior, care conduc la apariția tensiunilor remanente de întindere.

În subcapitolul 5.4 a fost analizată influența excentricității dinților roților dințate asupra tensiunilor remanente care apar în stratul exterior. Pe baza rezultatelor obținute în urma cercetărilor efectuate (figura 15) putem stabili că o creștere a excentricității dinților roților dințate influențează considerabil starea tensiunilor remanente.

Putem menționa că variația excentricității influențează asupra grosimii stratului eliminat de la cap spre piciorul dintelui. Ultimele variații se răsfrâng asupra modificării conținutului de căldură care trece în interiorul metalului, urmate de modificări structurale, determinând valoarea și caracterul distribuirii tensiunilor remanente în stratul exterior al dinților. Valoarea considerabilă a tensiunilor remanente din stratul exterior demonstrează că în procesul de rectificare are loc o influență simultană a valorilor variabile ale cantității de căldură și a forțelor de așchiere din cauza creșterii excentricității (cu 25%), care conduce la o sporire de până la 77% a tensiunilor remanente în stratul exterior.

Modificarea durității stratului exterior al dintelui roții dințate rectificat (paragraful 5.5) ține de transformarea tensiunilor remanente. Această modificare depinde de metoda de rectificare a dinților roții dințate în poziția în care în zona de contact a discului rectificator cu dintele roții dințate se formează o cantitate mare de căldură, care pătrunde în adâncimea metalului, urmată de modificări structurale. În rezultat apar tensiuni remanente de întindere, însoțite de micșorarea durității (figura 16 a).

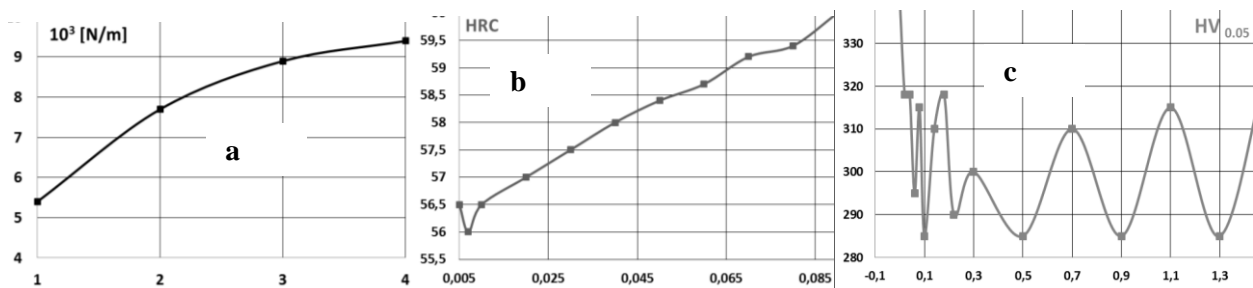


Fig. 16. Repartizarea durității pe adâncimea stratului superficial al dintelui: a) duritatea miezonivelului [ $\text{N/mm}^2$ ], pentru serii de probe cercetate; b) duritatea [HRC] în adâncimea dintelui [mm], c) microduritatea  $\text{HV}_{0.05}$  în adâncimea dintelui, când  $n_3=200 \text{ min}^{-1}$ ,  $P_0=440 \text{ mm/min}$ ,  $t=0.050 \text{ mm}$

Micșorarea ori creșterea durității ține de dispersarea valorilor durității, ceea ce înseamnă că duritatea nu este constantă. Acest fapt demonstrează că la o amplitudine minimă a oscilațiilor se măresc tensiunile de întindere, iar la amplitudinea maximă are loc sporirea tensiunilor de

comprimare în stratul exterior rectificat al dintelui roții dințate. Legitatea menționată denotă că procesul este ciclic.

Cercetând repartizarea durtății pe adâncimea suprafeței exterioare a dintelui (figura 16 b), a fost constatat faptul că, începând de la suprafața exterioară spre interior, durtatea se micșorează până la 7  $\mu\text{m}$ , apoi crește lent, atingând valoarea de 60 HRC la o adâncime de 90  $\mu\text{m}$ . Aceasta înseamnă că în stratul cercetat există tensiuni de comprimare, care apoi trec în tensiuni de întindere, exercitând o influență asupra modificării durtății.

Rezultatele cercetărilor (figura 16 c) au scos în evidență valorile modificărilor microdurtății pe adâncimea stratului exterior al dintelui roții dințate. Valoarea maximă a durtății se regăsește pe suprafața dintelui. De la suprafața dintelui spre adâncimea acestuia, valoarea microdurtății se micșorează, iar la o adâncime de 60  $\mu\text{m}$  atinge chiar valoarea de 320 MPa.

Analizând diagrama din figura 16 c, se poate stabili influența amplitudinii asupra caracterului modificării microdurtății. Existența valorilor maxime în amplitudinea modificărilor arată că în stratul exterior există tensiuni remanente de comprimare, care se transformă în tensiuni de întindere, în același timp modificându-se amplitudinea microdurtății în valoarea ei minimă.

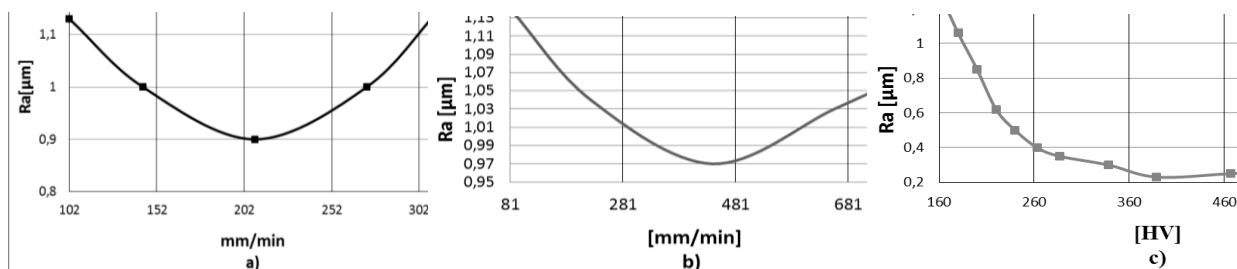


Fig. 17. Dependenta înălțimii rugozității  $R_a$  de: a) numărul curselor duble ale sculei  $n_s$  [ $\text{min}^{-1}$ ]; b) avansul rotativ al mesei  $P_0$  [ $\text{mm}/\text{min}$ ]; c) durtatea [HV] roții dințate.

În subcapitolul 5.6 a fost studiată formarea rugozității suprafeței dinților roților dințate.

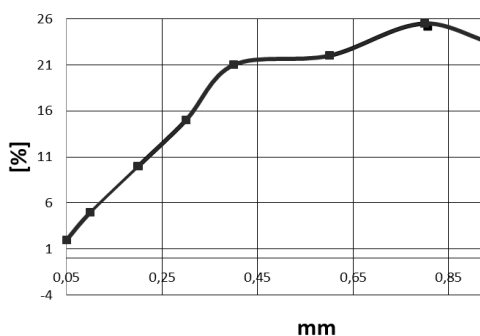


Fig. 18. Modificarea conținutului de austenită reziduală (%) după rectificarea dinților roților dințate;  $n_s = 208 \text{ min}^{-1}$ ,  $P_0 = 440 \text{ mm}/\text{min}$ ,  $a = 0,0525 \text{ mm}$  în adâncimea dintelui

Într-o serie de lucrări, cercetătorii afirmă că înălțimea neregularităților suprafeței dinților roților dințate variază în limitele de 2,5...0,16  $\mu\text{m}$ . Rugozitatea are o valoare considerabilă pentru starea stratului exterior, fapt care a provocat cercetarea înălțimii microneregularității suprafeței dinților cum este reprezentat în figura 17 a și c.

Trebuie remarcat faptul că înălțimea neregularităților este influențată de numărul de curse duble ale discului abraziv, care are o amplitudine ciclică. Astfel, pentru a obține o rugozitate minimă a suprafeței dintelui, este

necesar a efectua un proces de rectificare cu cca  $215 \text{ min}^{-1}$  curse duble ale discului rectificator

(figura 17 a). În cazul analizei dependenței rugozității suprafeței dintelui de avansul rotativ al mesei (figura 17 b), valoarea minimă a înălțimii rugozității se observă la un avans rotativ al mesei de 440 mm/min, iar cea maximă – la o valoare a avansului mesei de 660 mm/min.

Când determinăm caracterul modificării rugozității, legat de adâncimea rectificării, putem menționa valoarea minimă la adâncimea de rectificare de 0,05 mm și valoarea maximă – la adâncimea de rectificare 0,11 mm. Stabilind influența parametrilor prezenți ai regimurilor de rectificare (figura 17 a, c) asupra înălțimii neregularităților suprafeței, putem constata ușor că valorile extreme ale rugozității sunt diferite și se dezvoltă în mod diferit.

Legătura dintre rugozitățile și duritatea suprafeței rectificate a dintelui (figura 17 c) se confirmă printr-o dependență logaritmică, ce demonstrează că la creșterea durității înălțimea neregularităților scade.



Fig. 19. Structura inițială a oțelului 40H (x500)

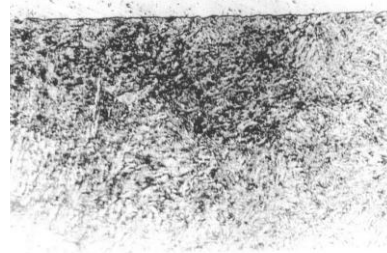


Fig. 20. Structura materialului dintelui roții dințate din oțel 40H după rectificare (x500)

Un conținut sporit de austenită reziduală (paragraful 5.7) are o influență favorabilă asupra stării de tensiuni remanente și durității stratului exterior. A fost stabilit că conținutul de austenită reziduală crește spre adâncimea stratului exterior (figura 18). Acest fapt demonstrează că proprietățile stratului exterior al dinților se modifică, apărând totodată modificări ale formei și dimensiunilor, care conduc la apariția rebutului roților dințate.

Pentru oțelul 40H (figura 19), în structura inițială găsim ferită cu perlită și o rețea pronunțată de cementită la limitele grăunților. După rectificare apare martensita de revenire și austenită reziduală, din cauza influenței căldurii, care provoacă formarea germenilor structurii stratului alb la călirea secundară. Structura stratului exterior are o granulație fină (figura 20), cu limite pronunțate ale grăunților. Se observă de asemenea prezența perlitei cu o rețea de cementită secundară. Vom remarca și modificări de structură pe adâncime de la suprafața dintelui roții dințate.

Modificări apar în stratul exterior (paragraful 5.8) chiar în timpul executării semifabricatului. Ele depind de valoarea diferenței de temperatură dintre stratul exterior și miezul roții dințate, de grosimea semifabricatului și conductibilitatea termică. Din momentul formării semifabricatului apar o serie de modificări provocate în timpul procesului de prelucrare în funcție de ereditatea tehnologică a semifabricatului. Aceste modificări pot fi pozitive, dar și negative, în

funcție de tehnologia utilizată [1, 2, 53, 55, 57, 58, 61]. Ele se referă la stratul exterior și se manifestă prin modificări chimico-fizice și mecanice.

Au fost efectuate cercetări asupra influenței parametrilor procesului de rectificare a dinților roților (paragraful 5.9) executate din diferite materiale, cu microstructură diferită, asupra caracterului influenței comune a modificării stării stratului exterior al profilului nestandardizat și a caracteristicilor de precizie, în condițiile în care are loc apariția erorilor sistematice în procesul aşchierii.

Starea stratului exterior (paragraful 5.11) se determină după modificarea tensiunilor remanente, iar a caracteristicilor de precizie – după modificarea abaterii de la profilul dintelui, acumularea erorii pe pasul circular și valoarea bății dintelui.

Analiza modificărilor tensiunilor remanente în stratul exterior, în procesul rectificării dinților, a fost realizată cu utilizarea metodelor statisticii matematice și a analizei de regresie. Pentru determinarea epurelor tensiunilor remanente s-au luat în considerație și rezultatele matematice prelucrate ale cercetărilor:

- limita modificărilor tensiunilor remanente:

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min};$$

- amplitudinea oscilațiilor tensiunilor remanente:

$$\Delta_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2;$$

- valoarea medie a tensiunilor remanente:

$$\Delta_s = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2;$$

- coeficientul modificării amplitudinii tensiunilor remanente:

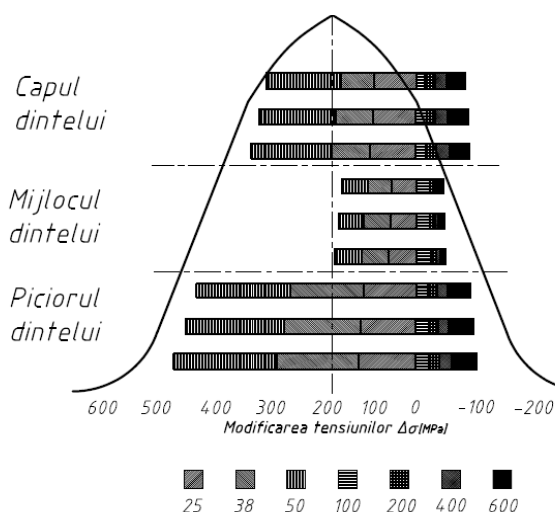
$$W_a = \sigma_{min} / \sigma_{max};$$

- coeficientul modificării formei:

$$\alpha_k = \sigma_{max} / \sigma_{min}.$$

Valoarea și caracterul modificărilor tensiunilor remanente în stratul exterior al dintelui roții executate din oțel 40H depinde de locul amplasării pe înălțimea dintelui, fapt care se observă în figura 21. Putem observa că pe toată suprafața dintelui, de la cap până la baza piciorului dintelui, tensiunile remanente sunt de întindere, cu amplasarea lor până la 100 μm în adâncime.

Totodată, valoarea lor maximă se află la adâncimea de 50 μm, cu creștere de la cap spre piciorul dintelui și practic fără schimbări în partea de mijloc a dintelui. Apoi, în adâncime, epura are unul și același caracter – tensiuni remanente de comprimare cu valoare de cca 30–50 μm, fără modificări pe adâncimea de la 100 până la 600 μm.



Adâncimea de amplasare a tensiunilor, μm  
Fig. 21. Limitele modificării tensiunilor remanente în adâncimea stratului superficial din oțel 40 H după rectificare

Bătaia dinților roților dințate se formează diferit, în funcție de parametrii de rectificare utilizați (figura 22). Creșterea numărului de curse duble ale discului abraziv (figura 22 a) reduce bătaia dinților roților dințate, însă analiza dependenței logaritmice arată că această tendință se micșorează treptat. Această legitate se demonstrează prin valoarea  $Ra$  calculată în procesul analizei de regresie. Influența valorii avansului asupra bății dinților roților are un alt caracter (figura 22 b).

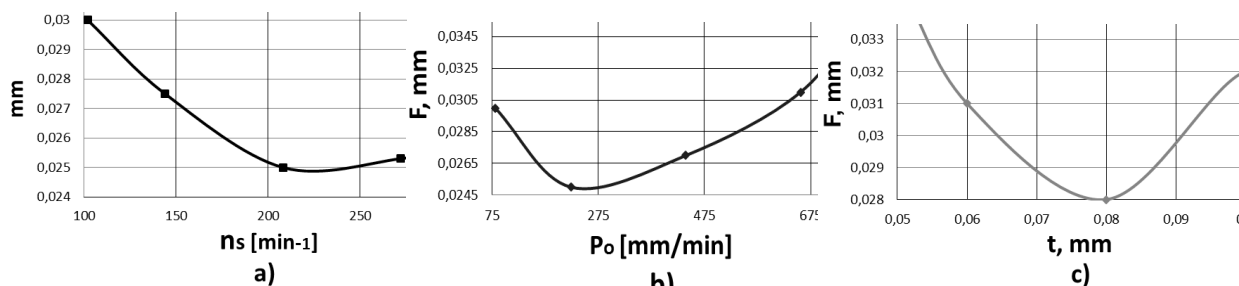


Fig. 22. Valoarea bății dinților  $F$  [mm] în funcție de:

a) numărul curselor duble  $n_s$  [min<sup>-1</sup>]; b) avansul mesei  $P_o$  [mm/min]; c) adâncimea de rectificare  $t$  [mm]

Valoarea bății dinților roților dințate la o valoare minimă a avansului mesei constituie 0,03 mm, iar odată cu creșterea avansului mesei, această bătaie se micșorează până la 0,02 mm. Sporirea ulterioară a avansului mesei provoacă majorarea valorii bății dinților roților dințate, care atinge valori maxime aproape de valoarea 0,035 mm la un avans al mesei de 800 mm/min. O influență considerabilă asupra modificării valorii bății dinților roților dințate o are și adâncimea de rectificare (figura 22 c). În principiu, valoarea bății dinților roților dințate se micșorează odată cu creșterea adâncimii de rectificare. Dar la o adâncime mai mare de 0,08 mm, valoarea bății se mărește până la 0,032  $\mu$ m.

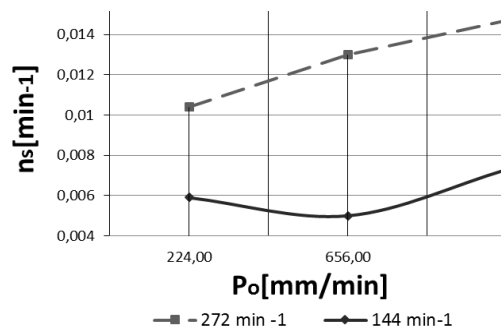


Fig. 23. Influența avansului mesei  $P_o$  [mm/min] și curselor duble  $n_s$  [min<sup>-1</sup>] asupra abaterii pasului circular al dinților

Creșterea adâncimii de rectificare peste 0,11 mm nu provoacă o mărire considerabilă a bății dinților roților dințate.

Modificările care au loc în stratul exterior al dinților roții dințate sunt legate și de apariția abaterii pasului circular (figura 23) și depind de modificările parametrilor procesului de rectificare a danturii.

După cum au demonstrat rezultatele cercetărilor efectuate, valoarea abaterii pasului de bază depinde de acțiunea comună a avansului mesei și a curselor duble ale discului rectificator și este maximală atunci când avansul depășește valoarea de 225 mm/min (figura 23). Totodată, la valori

considerabile ale avansului discului rectificator (650 mm/min) observăm o abatere înaltă a pasului circular atât la un număr mic de curse duble, cât și la un număr mai mare al acestora.

Parametrii procesului de rectificare a danturii ( $n_s$  – cursele duble ale discului rectificator;  $p_o$  – valoarea avansului mesei;  $t$  – adâncimea rectificării) exercită o influență și asupra abaterii profilului dintelui roții dințate (figura 24).

Analiza influenței numărului curselor duble ale discului rectificator (figura 24 a) asupra abaterii profilului dintelui arată că sporirea valorii numărului curselor duble ale discului rectificator peste  $270 \text{ min}^{-1}$  provoacă creșterea abaterii profilului dintelui de până la 0,003 mm. Ca să minimizăm această valoare a abaterii, numărul curselor duble ale discului rectificator trebuie păstrat la un nivel de cca  $150 \text{ min}^{-1}$ .

O influență analogică asupra abaterii de la profilul dintelui exercită și avansul mesei: sporirea acestuia până la 200 mm/min conduce la creșterea abaterii indicate în limitele de 0,005–0,008 mm (la un avans de 650 mm/min). Astfel, se observă o oarecare stabilitate a procesului de rectificare a danturii la avansuri mari (figura 24 b).

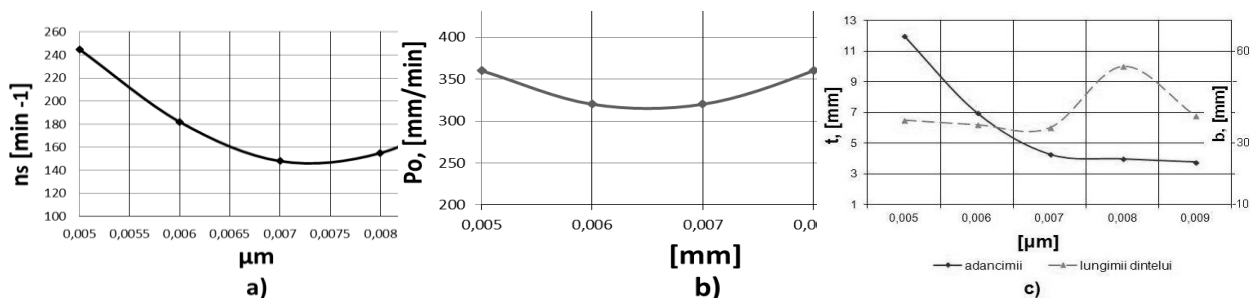


Fig. 24. Valoarea abaterii profilului în funcție de: a) cursele duble  $n_s$  [min<sup>-1</sup>]; b) avansul mesei  $P_o$  [mm/min]; c) adâncimea de rectificare  $t$  [mm] și lățimea dintelui  $b$  [mm]

Analizând influența adâncimii de rectificare, s-a stabilit că trebuie luată în considerare și influența pe care o are lungimea dintelui roții dințate. Creșterea lungimii dintelui generează o valoare considerabilă a abaterii de la profilul dintelui (figura 24 c). La o lățime a roților de până la 40 mm, valoarea abaterii de la profilul dintelui este constantă. Adâncimea rectificării nu joacă, în cazul dat, un rol hotărâtor, deoarece rectificarea cu o adâncime de 0,06 mm provoacă o abatere a profilului dintelui de la 0,005 până la 0,009 mm. Însă, creșterea adâncimii de rectificare peste 0,1 mm contribuie la posibilitatea abaterii profilului dintelui până la 0,008 mm. Astfel, cum au arătat rezultatele cercetărilor procesului tehnologic de rectificare a danturii, aceasta este însoțită de modificări considerabile ale stratului exterior al dinților roților dințate. Se modifică nu numai caracteristicile stereometrice ale profilului dintelui, ci și caracteristicile de formă și dimensiuni. Totodată, se modifică și proprietățile mecanice și fizice ale stratului exterior al dinților roților

dințate. Luând în considerare aceste proprietăți și caracteristici, putem dirija procesul de rectificare printr-o alegere optimă a parametrilor de lucru.

Legătura proprietăților stratului exterior al dinților roților dințate (paragraful 5.12) cu construcția lor este condiționată nu numai de modificările profilului dintelui roții dințate pe lungimea lui, dar și de corelarea volumului materialului dintelui și al coroanei roții dințate.

Cantitatea considerabilă de căldură ce apare în timpul rectificării dinților roților dințate și grosimea variabilă așchiată conduc la modificarea proprietăților stratului rectificat al dinților roților dințate. Se modifică nu numai înălțimea rugozității dinților rectificați, ci și duritatea lor.

O diferență mare, la cercetarea durității (HV) folosind diferite sarcini, indică modificările care au loc în stratul exterior al dinților roților dințate și care apar datorită călirii repetate (mai sus de 50 unități HV) în timpul rectificării lor. La rectificarea dinților roților dințate, principalul obiectiv îl constituie nu numai sarcina construcției corecte a roților dințate, ci și precizia de așezare și de centrare.

Eroarea de fixare și eroarea de bazare condiționează modificările ce au loc în stratul exterior al dinților roților dințate. Aceste erori conduc la apariția grosimii neuniforme îndepărtate de pe profilul dintelui, la apariția neparalelismului față de axă sau la abateri unghiulare ale suprafeței dinților roților dințate față de poștul acestora.

Aceleași cauze conduc la micșorarea preciziei profilului și la apariția abaterilor în limita de  $10\div 25\ \mu\text{m}$ , a erorii de pas  $7\text{--}16\ \mu\text{m}$ , a bătăii coroanei  $15\text{--}40\ \mu\text{m}$  și la sporirea creșterii rugozității  $R_a$  până la  $5\ \mu\text{m}$ . În realitate, se modifică profilul dintelui roții dințate și se deplasează pata de contact a dintelui în timpul exploatarei roții. Acest fapt modifică condițiile de funcționare a roților dințate executate și caracteristicile stratului exterior.

Cercetările efectuate asupra durității dintelui au arătat că aceasta crește în adâncime. Mărirea durității la o adâncime de  $0,4\ \text{mm}$  este de cca 40% din cea care ar fi rezultat la suprafață în urma tratamentului termic. Astfel, putem aștepta o micșorare la minimum a tensiunilor remanente de întindere, cu trecerea lor în cele de comprimare, iar creșterea durității conduce la întărirea stratului exterior. Împreună cu majorarea durității și tensiunilor remanente de comprimare, crește și probabilitatea măririi rezistenței la oboseală.

Așadar, legătura reciprocă stabilită și dependențele obținute în baza multiplelor cercetări experimentale, precum și a analizei particularităților constructive ale roților dințate, ne permit să dirijăm – prin intermediul stratului exterior al dinților roților dințate – condițiile și sarcinile care apar la exploatare.



Forma și dimensiunile sculei abrazive (paragraful 5.13) influențează asupra stratului exterior al dintelui rectificat. Granulele abrazive acționează cu o forță anumită asupra suprafeței prelucrate.

Granulele discului rectificator în timpul frecării de suprafață provoacă degajarea locală a unei cantități considerabile de căldură. În rezultat, aceasta duce la apariția austenitei remanente în stratul exterior și a durificării locale. Odată cu răcirea repetată la rectificare se micșorează linia difracțională în planele fazelor  $\alpha$  și totodată în planele fazelor  $\gamma$  [58, 61].

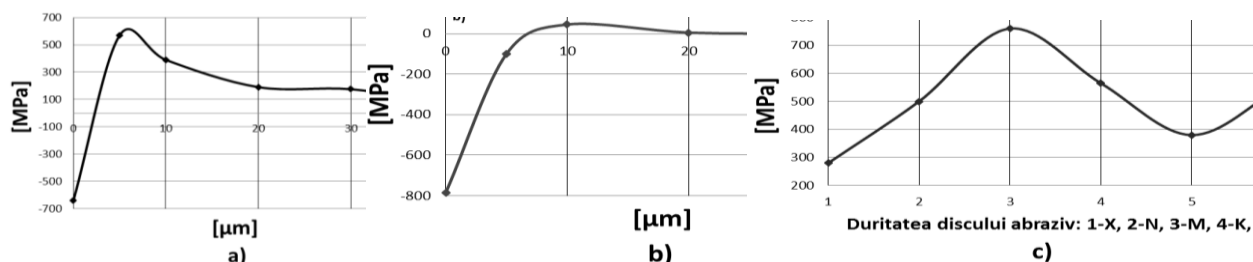


Fig. 25. Dependenta tensiunilor remanente [MPa] în adâncimea dinților de: a) structura discului abraziv 99A-80-K-5-V; b) structura discului abraziv 99A-80-K-25-V; c) duritatea discului abraziv

Cercetările röntgenografice au arătat o zonă clară a revenirii înalte. Totodată, se observă o descompunere a martensitei, a tensiunii de întindere în faza  $\alpha$  și mărunțirea granulelor în faza  $\gamma$ . Are loc creșterea blocului mozaic și micșorarea microdeformațiilor. La creșterea adâncimii de rectificare, structura materialului se modifică simțitor, deoarece are loc micșorarea conținutului de carbon din cauza temperaturii înalte a procesului de rectificare [31, 32, 37, 41,51, 58, 61]. De aceea, are o valoare esențială caracteristica discului abraziv, în special structura lui, care influențează asupra cantității de căldură degajate în timpul rectificării. Cu cât structura discului rectificator este mai poroasă (figura 25) și amplasarea granulelor este mai favorabilă, cu atât frecarea și cantitatea de căldură degajată sunt mai mici.

Repartizarea tensiunilor remanente, evoluția și caracterul lor depind în mare măsură și de repartizarea câmpului de temperatură în granulele discului abraziv. În timpul rectificării, granulele se încălzesc și se răcesc ciclic, cu variații mari de cantități de căldură în timp. Aceasta micșorează rezistența prinderii granulei în liantul discului abraziv și conduce la apariția tensiunilor remanente atât în materialul prelucrat, cât și în scula abrazivă. Se confirmă faptul că asupra valorii tensiunilor remanente influențează și condițiile cinematice de îndepărtare a așchiilor, duritatea și structura stratului exterior.

Totodată, se cere a mai adăuga că temperatura la starea tensionată a stratului exterior are o influență determinantă, indiferent de cauza apariției ei în zona de contact cu suprafața prelucrată, și se răspândește în două direcții, provocând modificări esențiale în stratul indicat. Neavând o

orientare unghiulară concretă, unele granule fixate în discul abraziv condiționează modificarea structurii materialului în zona de contact, precum și modificarea tensiunilor remanente.

Putem afirma că este optimală structura 4–5 a discului abraziv, în care vom avea un volum de granule de cca 52-54% în scula abrazivă, ceea ce permite să se obțină o suprafață de contact corespunzătoare.

Capitolul 6 – *Metode constructiv-tehnologice de asigurare a preciziei indicilor de calitate a roții dințate*. În practică, deseori este necesar a elabora un proces de execuție a pieselor care să îmbine în sine operații diverse după conținut, cum ar fi prelucrarea mecanică și cea termică. Ca urmare, continuitatea unui astfel de proces se realizează greu. De regulă, după prelucrarea termică se elaborează un proces nou de prelucrare mecanică, care asigură indicii necesari de precizie.

În paragraful 6.1 se face o legătură între componentele structurale separate ale roții cu tehnologia de execuție și cu organizarea producției [25, 42]. S-a efectuat o analiză a construcției piesei de tip roată dințată (paragraful 6.2) pentru asigurarea creșterii la tehnologicitate.

În subcapitolul 6.3 sunt analizate particularitățile de bazare a roților dințate tratate termic la prelucrarea mecanică. La bazarea roților dințate, la fiecare operație de prelucrare este necesar, în primul rând, a nu admite erori noi sau a nu le majora pe cele existente, sau a nu le transforma. În al doilea rând, este necesară reducerea erorilor formate la operațiile precedente. Aceste două obiective au o legătură reciprocă și soluționarea unuia, în unele cazuri, nu este posibilă fără soluționarea celuilalt [3, 27, 38].

În paragraful 6.4 sunt abordate procedeul și ștanța pentru execuția roților dințate conice. Prelucrarea prin deformare plastică la cald sau la rece a danturilor conduce la scurtarea ciclului de fabricație cu circa 60...70%. În același timp, rezistența statică și la oboseală a danturii crește cu 15...20%, comparativ cu dantura prelucrată prin așchiere, ca urmare a faptului că dantura are un fibraj continuu. La aceasta se adaugă avantajul esențial al costului scăzut cu 40...60%, corelat cu creșterea calității produselor.

În compartimentul 6.5 este prezentat dispozitivul de moletare a profilurilor dințate. Roțile dințate conice cu dinți drepți, care nu necesită o precizie de prelucrare ridicată, pot fi executate prin deformare plastică la rece și, în special, prin deformare plastică la cald. În acest scop, precum și pentru procedeul de moletare, a fost elaborat și brevetat dispozitivul de profilare a dinților roților precesionale și conice [59].

În subcapitolul 6.6 sunt expuse procedeele de netezire a dinților angrenajului precesional sau conic. Netezirea roților dințate din oțel a fost implementată tot mai pregnant în ultimii ani datorită indicilor tehnico-economici ridicați. Din cauza costurilor prea ridicate ale tratamentelor

termice, termochimice, fabricarea roților dințate invenții [1, 2, 28, 44, 47, 48, 50] în producția de masă și în serie mare este neavantajoasă din punct de vedere economic.

Este prezentată informația despre lichidul de ungere-răcire brevetat, care poate fi utilizat

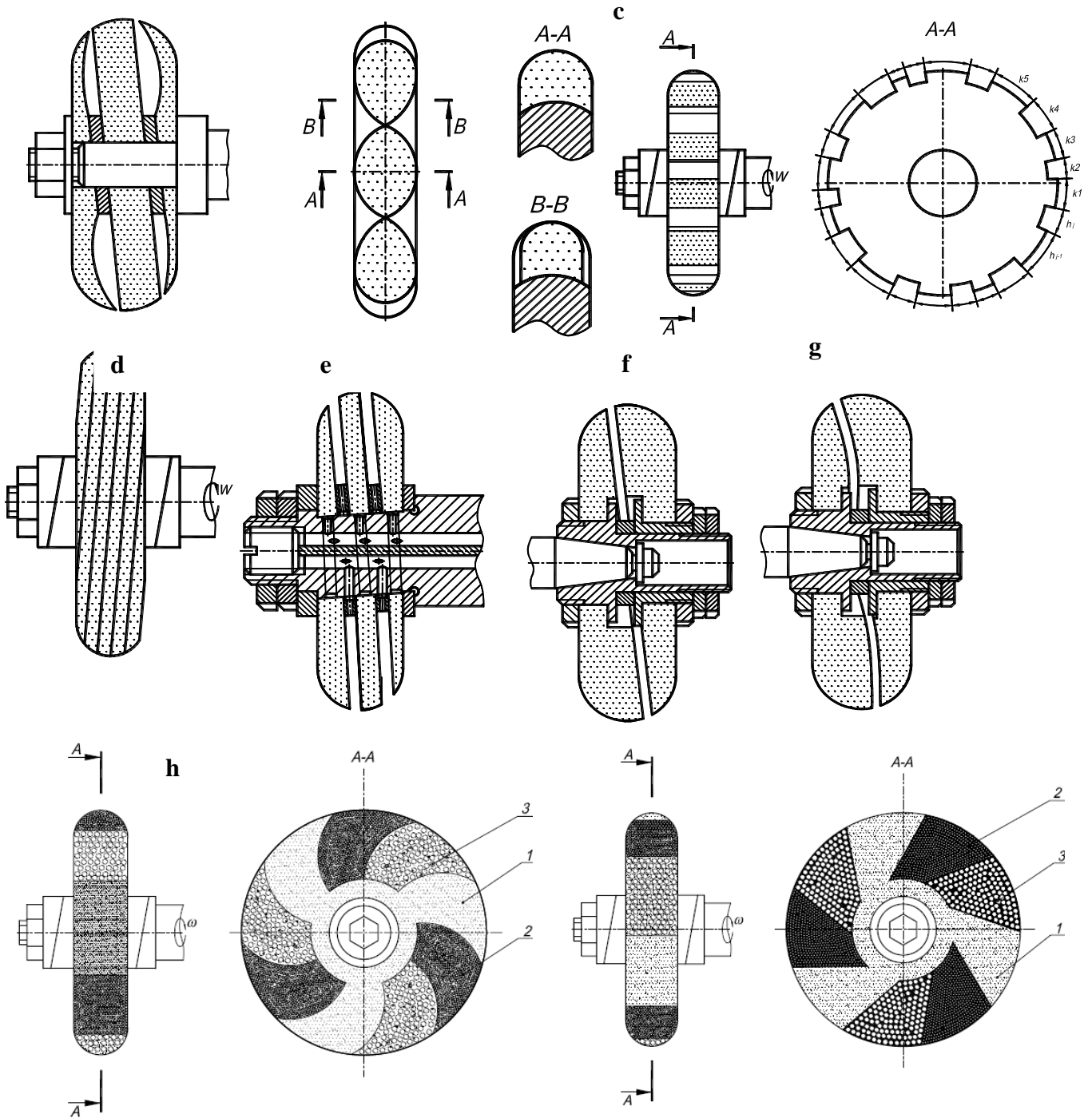


Fig. 26. Scule abrazive: a) sculă profilată, formată din 3 discuri cu interstițiu variabil); b) sculă abrazivă profilată; c) sculă abrazivă cu lungime variabilă a muchiiilor așchietoare; d) sculă abrazivă în formă de pachet de discuri; e) sculă abrazivă cu discuri înclinate, cu interstițiu liniar; f) sculă abrazivă cu discuri înclinate, cu interstițiu liniar reglabil; g) sculă abrazivă profilată, cu interstițiu ondulat reglabil; h) sculă abrazivă profilată cu sectoare ale discului cu proprietăți mecanice diferite, amplasate după o curbă sau linie

la prelucrarea angrenajului precesional sau conic prin netezire și acoperire simultană a angrenajului cu un strat de protecție.

Subcapitolul 6.7 descrie procedeele de prelucrare a dinților angrenajului precesional și sculele utilizate. Sunt prezentate mai multe scheme de prelucrare și scule brevetate (figura 26),

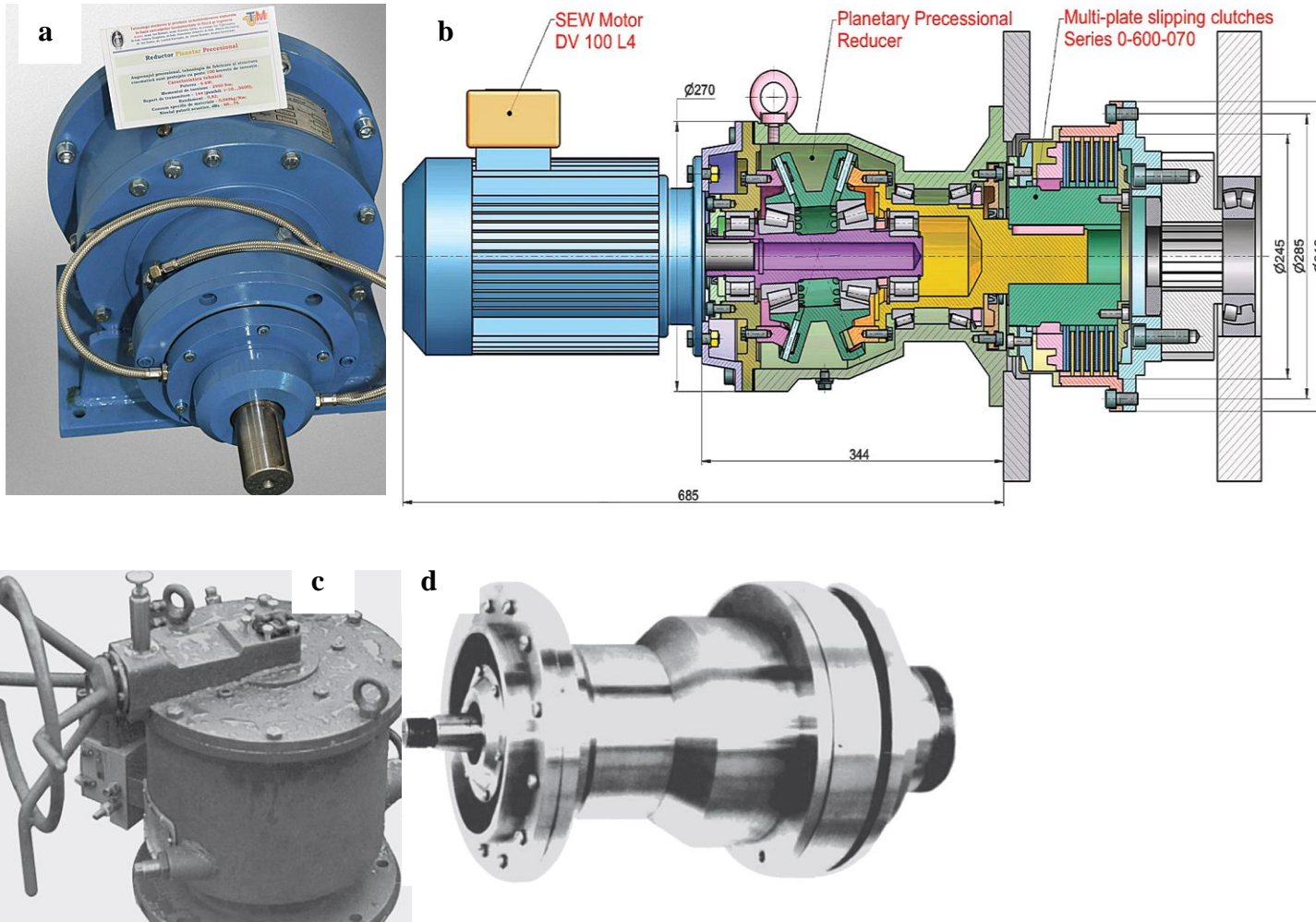


Fig. 27. Tehnologia de generare a profilului precesional, implementată în mecanisme de acționare:  
 a) motoreductor precesional de acționare a propulsoarelor-șneac de deplasare a robotului pe fundul oceanului ( $T = 15000 \text{ Nm}$ ,  $i = -280$ );  
 b) reductor precesional  $2K-H$  pentru echipament tehnologic special ( $T = 1480 \text{ Nm}$ ;  $i = -80$ );  
 c) turbomotor precesional reactiv cu ejecție a armăturii pentru magistrale de gaz;  
 d) modul electromecanic pentru acționarea platformelor de scanare a aparatului cosmic de zbor

necesare pentru realizarea angrenajului precesional sau conic, care au o serie de avantaje față de procedeele cunoscute [1, 2, 11, 26, 29, 45, 46, 47, 48, 50].

În paragrafele 6.8–6.10 sunt prezentate procedee de prelucrare prin electroeroziune și electrochimice a roților dințate centrale din angrenajul precesional sau conic, care sunt protejate cu brevete de invenții [1, 60].

În subcapitolul 6.11 sunt prezentate (figura 27) diverse tehnologii de generare a profilurilor nestandardizate, care au fost implementate în transmisiile planetare precesionale, și mecanismele de acționare elaborate în baza lor, care se datorează avantajelor ce le caracterizează. Sunt descrise motoreductoarele planetare precesionale din Complexul Robotizat pentru Extracția Zăcămintelor Feromanganice de pe fundul Oceanului Planetar (Conceptul URSS, *Okeanmaş*).

## CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI

Problemele abordate în teză sunt consacrate creării bazelor științifico-practice de cercetare-dezvoltare a procedeelor tehnologice inovative de generare a dinților transmisiilor planetare precesionale cu profil convex-concav variabil, menite spre extinderea utilizării transmisiilor planetare precesionale ca produse aparte (reductoare) sau ca componente de transformare a mișcării și sarcinii în dispozitivele mașinilor cu destinație generală și specială.

1. Pentru prima dată [11, 26, 46] a fost propus un procedeu tehnologic nou de generare a dinților cu profil convex-concav variabil cu sculă în formă de disc profilat periferic, cu cinematica compusă din două mișcări autonome și trei mișcări interdependente, și anume:

- de aşchiere autonomă – rotirea sculei;
- de avans în direcția generatoarei conului roții imaginare;
- mișcarea de rulare – rotirea roții;
- mișcarea (de precesie) coordonată cu rularea roții;
- mișcarea de avans pe direcția axială a semifabricatelor,

iar raza de curbură periferică a sculei este egală cu raza rolei în secțiunea razei interioare a danturii.

2. Procedeul tehnologic de generare a dinților cu profil convex-concav variabil cu scula în formă de disc profilat periferic, în comparație cu scula în forma de trunchi de con, permite:

- extinderea gamei de rectificare a roților dințate, a diametrelor mai mari de  $\varnothing 20$  mm;
- reducerea numărului operațiilor și fazelor de profilare a sculei și, în consecință, micșorarea cheltuielilor procesului de rectificare;
- asigurarea posibilității de rectificare a roților dințate cu con interior și profil negativ pentru forme de turnat sau de presare, reducerea de 4-5 ori a timpului de reglare a utilajului pentru prelucrarea roților dințate;
- folosirea instrumentarului standardizat după formă și dimensiuni, inclusiv a echipamentului universal de profilare a sculelor abrazive;
- micșorarea timpului de generare a danturii unei roți dințate precesionale de circa 1,5 ori (în unele cazuri – de până la 30 de ori), iar costul de producție a roților poate fi redus de 2-5 ori.

3. Tehnologia elaborată permite realizarea atât a procesului de frezare, cât și a celui de rectificare a profilurilor convex-concave variabile cu sculă în formă de disc profilat periferic.

4. Cinematica interacțiunii *sculă – semifabricat* este [1, 2] identică atât pentru procesul tehnologic de frezare, cât și pentru cel de rectificare;

5. Durata de funcționare a roților dințate prelucrate [30] conform noii tehnologii s-a majorat de cca 1,5 ori, datorită formării în stratul exterior al profilului dinților a micro- și macrostructurilor modificate la o adâncime de până la  $10 \mu\text{m}$  și apariția tensiunilor remanente de comprimare de suprafață până la 240 MPa. Termodinamica procesului de rectificare este mai favorabilă transformărilor structurale, deoarece încălzirea stratului superficial este cu cca 300-400°C sub temperatura critică a transformărilor structurale de faze, fapt ce conduce la diminuarea sau la excluderea arsurilor și a microfisurilor, a altor efecte de deteriorare a suprafeței de lucru a dinților.

6. S-a constatat influența regimurilor procesului de rectificare [21] asupra stării tensionale în stratul superficial al profilului dinților, și anume:

- numărul de curse duble ale sculei ( $n_s$ ) influențează asupra tensiunilor de întindere, atingând cote maxime la  $25 \text{ min}^{-1}$  și o adâncime de cca  $25 \mu\text{m}$ . Odată cu creșterea numărului de curse duble ale discului rectificator până la cca  $100 \text{ min}^{-1}$ , valoarea tensiunilor de întindere se micșorează, iar după  $n_s = 100 \text{ min}^{-1}$  și o adâncime de cca  $75 \mu\text{m}$ , acestea trec în tensiuni de comprimare;

- odată cu creșterea avansului rotativ se majorează și valoarea tensiunilor remanente, care, la o adâncime mai mare de  $100 \mu\text{m}$ , devin tensiuni de comprimare;

- odată cu creșterea adâncimii de rectificare, tensiunile remanente au caracterul unor tensiuni de comprimare atât de-a lungul înălțimii dintelui, cât și în piciorul acestuia. Cercetările au demonstrat că pentru adâncimi de rectificare mai mici de  $0,05 \text{ mm}$ , valoarea tensiunilor de comprimare de  $200 \text{ MPa}$  scade, dar crește odată cu adâncimea de rectificare.

7. Modificarea grosimii stratului de material îndepărtat, de la cap spre piciorul dintelui, influențează modificarea cantității de căldură transmisă în adâncimea metalului. S-a constatat că la majorarea excentricității cu  $25\%$ , tensiunile remanente în stratul superficial cresc până la  $77\%$ .

8. Calitatea prelucrării suprafeței [68] flancurilor dinților redată prin rugozitate are o importanță considerabilă pentru procesele tribologice în contactul dinților, și anume:

- înălțimea neregularităților este influențată de numărul de curse duble ale discului abraziv, având o amplitudine ciclică, cu un maxim mai pronunțat la  $150$  și  $275 \text{ min}^{-1}$ ;

- s-a demonstrat că valoarea minimă a înălțimii rugozității suprafeței rectificate poate fi realizată stabil cu un avans rotativ al mesei de  $440 \text{ mm/min}$ ;

- înălțimea rugozităților suprafeței rectificate depinde de adâncimea de așchiere, obținând valori minime la adâncimea de rectificare  $a = 0,05 \text{ mm}$ .

9. S-a constatat că materialul abraziv din electrocorund [17] pentru discul rectificator este mai indicat, deoarece provoacă microdeformații mai mici ale rețelei cristaline:

- pentru discuri abrazive din electrocorindon, valoarea blocului mozaic crește cu circa  $240\%$ , iar pentru discuri cu diamante – cu doar  $8\%$ ;

- valoarea minimă a microdeformațiilor rețelei la rectificare cu disc abraziv din electrocorindon, la o adâncime de așchiere de  $0,01 \text{ mm}$ , este cu  $38\%$  mai mică decât cea inițială, iar utilizând discul cu diamante – cu  $33\%$ , la o adâncime de rectificare de  $0,02 \text{ mm}$ .

10. S-a constatat că precizia geometriei danturii roților dințate prelucrate prin rectificare [57, 61] se caracterizează prin abateri de la pasul circular, bătaii radiale și axiale ale dinților roților dințate și abateri de la profilul nominal ale dintelui, și se recomandă de a lua în considerație că:

10.1. Bătaia dinților roților dințate se formează diferit, în funcție de parametrii de rectificare utilizați:

- creșterea numărului de curse duble ale discului abraziv reduce bătaia dinților roților dințate, influența valorii avansului asupra bătaii dinților roților are un alt caracter: la o valoare minimă a avansului mesei este de  $0,03 \text{ mm}$ , iar odată cu creșterea avansului mesei, această bătaie se micșorează până la  $0,02 \text{ mm}$ ;

- asupra modificării valorii bătaii dinților roților dințate are influență considerabilă și adâncimea de rectificare, care se micșorează odată cu creșterea adâncimii de rectificare;

- la o adâncime mai mare de  $0,08 \text{ mm}$ , valoarea bătaii dinților roților dințate se mărește până la  $0,032 \text{ mm}$ .

10.2 Valoarea abaterii pasului de bază depinde de:

- acțiunea comună a avansului mesei și a curselor duble ale discului rectificator și au valoare maximă când avansul depășește  $225 \text{ mm/min}$ ;

- la valori considerabile ale avansului discului rectificator de cca  $650 \text{ mm/min}$  observăm o abatere mare a pasului circular, atât la un număr mic de curse duble, cât și la un număr mai mare al acestora;

10.3. Abaterea profilului depinde de următoarele:

- la creșterea valorii numărului curselor duble ale discului rectificator de peste 270  $\text{min}^{-1}$  crește și abaterea profilului dintelui de până la 0,003 mm;
- valori minime ale abaterii profilului se obțin la un nivel de cca  $n_s = 150 \text{ min}^{-1}$ ;
- asupra abaterii profilului dintelui influențează și avansul mesei, creșterea acestuia până la 200 mm/min duce la sporirea abaterii indicate în limita de 0,005-0,008 mm, astfel, se constată o oarecare stabilitate a procesului de rectificare a danturii la avansuri mari;
- s-a stabilit că influența adâncimii de rectificare trebuie luată în considerare în funcție de lungimea dintelui roții dințate, și anume: o creștere a lungimii dintelui generează o valoare considerabilă a abaterii de la profilul dintelui, și anume pentru lățimea roților de până la 40 mm, valoarea abaterii de la profil a dintelui este constantă, iar adâncimea rectificării nu influențează considerabil, deoarece rectificarea la adâncimi de cca 0,06 mm provoacă o abatere a profilului dintelui de la 0,005 până la 0,009 mm, iar creșterea adâncimii de rectificare de peste 0,1 mm mărește abaterea profilului dintelui până la 0,008 mm.

11. Eroarea de instalare a semifabricatului este cauza modificărilor ce au loc în stratul exterior al dinților roților dințate, ducând la apariția grosimii neuniforme îndepărtate de pe profilul dintelui și, în consecință, la apariția neparalelismului față de axă sau la abateri unghiulare ale suprafeței dinților roților dințate față de profilul acestora. Eroarea de instalare a semifabricatului conduce la micșorarea preciziei profilului și la apariția abaterilor radiale în limita de 10-25, a erorii de pas de 7-16  $\mu\text{m}$ , a bătăii coroanei de 15-40  $\mu\text{m}$  și la creșterea rugozității  $Ra$  până la 3  $\mu\text{m}$ , în consecință, se modifică profilul dintelui roții dințate și se deplasează pata de contact a dintelui în timpul exploatarei, fapt ce modifică condițiile de funcționare a roților dințate executate și caracteristicile stratului exterior.

12. S-a constatat că:

- la o creștere a adâncimii de rectificare, structura materialului se modifică simțitor, deoarece are loc micșorarea conținutului de carbon din cauza temperaturii înalte a procesului de rectificare;
- structura 4-5 a discului abraziv este optimă, deoarece vom avea un volum de granule de cca 54-52% în scula abrazivă, care permite să se obțină o suprafață de contact corespunzătoare.

13. Rectificarea roților dințate precesionale tratate termic conduce la sporirea preciziei finale a acestora, și anume:

- toleranța abaterii profilului dintelui  $f_f$  – cu 34%;
- toleranța bătăii frontale a dintelui  $F_f$  – cu 49%;
- abaterea-limită a pasului de angrenare  $f_{pb}$  – cu 29%, ceea ce a confirmat utilitatea metodei propuse de prelucrare finală a angrenajului precesional; astfel, prin procedeul propus de rectificare se obțin roți dințate precesionale cu precizia 5-6.

14. Noutatea științifică a soluțiilor tehnice utilizate la elaborarea tehnologiei de generare a danturilor cu profil convex-concav variabil cu sculă în formă de disc profilat periferic a fost protejată cu 29 de brevete de invenții.

15. Tehnologia de generare cu sculă în formă de disc profilat periferic a danturilor cu profil convex-concav variabil, care asigură extinderea posibilităților tehnologice de fabricare și majorarea calității stratului superficial rectificat al flancurilor dinților, a fost diseminată în diferite perioade la realizarea proiectelor de cercetare-dezvoltare internaționale (*CRDF* și *MRDA*, *SUA*, *ARP* și *DFG*, *German* etc.) și naționale (programe de stat și proiecte instituționale).

### **Direcții și obiectivele de cercetare pentru viitor:**

1. Elaborarea procedeelelor de fabricație a roților dințate precesionale cu profil convex-concav variabil bazate pe formarea preventivă a danturii prin deformare plastică cu adaos pentru finisarea prelucrării a angrenajelor prin șeveruire ( $\text{HRC} > 45$ ), sau honuire ( $\text{HRC} < 45$ ) care posedă o corecție a profilului în limita a două trepte de precizie.

2. Elaborarea transmisiilor planetare precesionale cu o tehnologicitate sporită privind reducerea costurilor de fabricație prin, excluderea în construcție a roților cu găuri interioare și

procedeu de divizare a găurilor în satelit și înlocuirea lor prin elemente constructive flotante de așezare.

Rezultatele principale ale cercetării și soluțiile tehnice protejate cu 29 de brevete de invenție au fost publicate în 109 lucrări științifice printre care:

1. Bostan I., Dulgheru V., Glușco C., **Mazuru S.**, Vaculenco M. Anthology of inventions. Vol. 2. Planetary precessional transmissions. Chișinău: Bons Offices, 2011. 542 p.
2. **Mazuru S.**, S. Scaticailov. Tehnologii și procedee de danturare a roților dințate /Univ. Tehn. a Moldovei, Fac. Inginerie Mecanică, Industrială și Transporturi, Dep. Tehnologia Construcțiilor de Mașini. – Chișinău : Tehnica-UTM, 2018. – 397 p. : fig., tab.
3. **Mazuru S.** Influența cedărilor elastice ale sistemului tehnologic asupra preciziei de prelucrare a roților dințate precesionale. În: Tehnologii moderne, calitate, restructurare. Vol. 4. Materialele Conferinței internaționale Tehnica-Info, Chișinău, 1999, p. 335-338.
4. Bostan I., Dulgheru V., Țopa M., **Mazuru S.** Dentiton de l'engrenage precesional a profil modifie. În: Buletinul Institutului Politehnic din Iași, tomul XLVI (L), supliment I, p. 17-22.
5. Scaticailov S., **Mazuru S.** Model imitațional al procesului de rectificarea a danturilor. În: Tehnologii moderne, calitate, restructurare. Vol. 3. Materialele Conferinței internaționale Tehnica-Info, Chișinău, 2001, p. 275-279.
6. Bostan I., Scaticailov S., **Mazuru S.** Metoda de calcul al componente radiale a forței de așchiere la rectificarea angrenajelor. În: Tehnologii moderne, calitate, restructurare. Vol. 3. Materialele Conferinței internaționale Tehnica-Info, Chișinău, p. 280-284.
7. Scaticailov S., Crețu Ș., **Mazuru S.** Sporirea preciziei de danturare prin alegerea corectă a dinților lirei de divizare. În: Tehnologii moderne, calitate, restructurare. Vol. 3. Materialele Conferinței internaționale Tehnica-Info, Chișinău, 2001, p. 368-272.
8. Bostan I., Vaculenco M., **Mazuru S.** Method, standards and the equipment for energetic indexes research of the rectification process. În: Buletinul Institutului Politehnic din Iași, tomul XLVIII, supliment I, 2002, p. 37–40.
9. Bostan I., Vaculenco M., **Mazuru S.** Method and the equipment at the research of the rectification process temperature. În: Buletinul Institutului Politehnic din Iași, tomul XLVIII, supliment I, 2002, p. 41–44.
10. Scaticailov S., **Mazuru S.** L'efficacitate de la rectification de la force et de la vitesse. În: Buletinul Institutului Politehnic din Iași, tomul XLVIII, supliment I, 2002, p. 237–240.
11. Bostan I., **Mazuru S.**, Scaticailov S. Procedeu de prelucrare a dinților angrenajului precesional. Brevet de invenție nr. 2120 MD. I.Cl.: B23 F9/06. Publ. BOPI nr. 3/2003.
12. Bostan I., Toca A., Scaticailov S., **Mazuru S.** Cercetarea variației secțiunii transversale teoretice a așchiilor dintre sculă și roata dințată conică precesională la rectificarea și frezare. În: Buletinul Institutului Politehnic din Iași, tomul LIV, fascicula Vc, 2004, p. 753–756.
13. Bostan I., Mazuru S., Scaticailov S. Modelul de calcul al componente radiale a forței de așchiere la rectificarea angrenajelor. În: Materialele Conferinței internaționale Tehnica-Info „Tehnologii Moderne, Calitate, Restructurare”, vol. 3, Chișinău, 2001, p. 280-283.
14. Bostan I., Mazuru S., Botnari V. CINETIC process of teeth grinding. In: The 15<sup>th</sup> International Conference „Modern Tehnologies, Quality and Innovation”, p. 121-124. ModTech 2011, 25-27 May, 2011, Vadul lui Voda, Moldova – Romania.
15. Олевский А., **Мазуру С.** Обработка профиля зубьев методом обкатки прецессирующим инструментом. В: Собр. трудов XI МНТК „Техносфера XXI века”, Донецк, 2004, том 2, с. 183-186.
16. Bostan I., **Mazuru S.**, Vaculenco M. Dispozitiv de măsurare a forțelor dezvoltate de un mecanism. Brevet nr. 2920 MD. I.Cl.: G01 L3/16. Publ. BOPI nr. 11/2005.
17. **Mazuru S.** Capacitatea de rectificarea a discului abraziv a suprafeței angrenajului. În: Tehnologii moderne, calitate, restructurare. Vol. 3. Materialele Conferinței internaționale, Chișinău: UTM, 2005, p. 326-330. ISBN 9975-9875-6-7.
18. **Mazuru S.**, Vaculenco M. Calculation procedure of cutting grinding elements. In: The 31<sup>st</sup> Internationally attended scientific conference „Modern tehnologies in the XXI Century”, Bucharest 3-4 November, 2005.
19. **Мазуру С.** Особенности контроля зубчатых поверхностей после обработки. В: Сб. трудов XII МНТК „Машиностроение и техносфера XXI века”, том 2, Донецк, 2005, с. 232–236.
20. **Мазуру С.** Математическое моделирование кинематики процесса зубошлифования. В: Машиностроение и техносфера XXI века, том 3, Донецк, 2006, с. 3-6.



21. **Mazuru S.** Contribuții la studiul stratului superficial în urma rectificării danturii (Partea I). În: Buletinul Institutului Politehnic din Iași, tomul LII, fascicula V, Secția ”Construcția de Mașini”.
22. **Мазуру С.** Оценка уровня надежности обработки и оптимизации параметров точности элементов технологических систем. В: Сб. трудов XIII МНТК „Техносфера XXI века”, Донецк, 2007, том 2, с. 183-186.
23. Bostan I., Topa M., **Mazuru S.** L’engrenage precessionnel a profil modifie. In: The 32<sup>st</sup> Internationally attended scientific conference „Modern technologies in the XXI century”, Bucharest, 1-2 November, 2007, p. 168-171.
24. **Mazuru S.** Analiza mecanismului formării componentelor erorii cinematice a roților dințate. Partea I. În: CȘI Iași – Chișinău „Tehnologii moderne, calitate, restructurare”, 31 mai – 3 iunie 2007, p. 73-80.
25. **Мазуру С.Г.** Оценка точности обработки зубьев зубчатых колес с нестандартным профилем. В: Сборник трудов XV МНТК «Машиностроение и техносфера XXI века», том 2, Донецк, 2008, с. 236-239.
26. Bostan I., **Mazuru S.**, Olievschi A. Procedeu de prelucrare a dinților angrenajului precesional. Brevet nr. 3532 MD, BOPI 3/2008.
27. Bostan I., **Mazuru S.**, Broșoveanu C., Rusu V. Dispozitiv pentru fixarea roților dințate conice. Brevet nr. 3531 MD, BOPI 3/2008.
28. Bostan I., **Mazuru S.**, Pasincovschi V., Postolachi A. Procedeu de netezire a dinților angrenajului conic. Brevet nr. 3533 MD, BOPI 3/2008.
29. Bostan I., **Mazuru S.** Procedeu de execuție a roților dințate conice. Brevet nr. 3562 MD, BOPI 4/2008.
30. Бостан И., **Мазуру С.Г.** Повышение нагрузочной способности зубчатых колес с нестандартным профилем. В: Сборник трудов XV МНТК „Машиностроение и техносфера XXI века”, том 2, Донецк, 2009. ISBN 966–7907-25-2.
31. Mazuru S. Influence of the grinding parameters on the characteristics of gears teeth outer layer. First part. In: Proceedings of The 13<sup>th</sup> International Conference Modern Tehnologies, Quality and Inovation, Iasi & Chisinau ModTech, 2009, p. 391-394.
32. Bostan I., **Mazuru S.** Influence of the grinding parametrs on the characteristics of gears teeth outerlayer. Second part. In: Proceedings of The 13<sup>th</sup> International Conference „Modern Tehnologies, Quality and Inovation”, Iasi & Chisinau ModTech, 2009, p. 79-82.
33. **Mazuru S.** System reliability and optimization processing parameters for its accuracy of elements. First part. In: The 14<sup>th</sup> International Conference „Modern Tehnologies, Quality and Innovation”, ModTech 2010, 20-22 May, 2010, Slanic Moldova, Romania, p. 379-382.
34. **Mazuru S.** Mechanism of training component kinematics error gears in operation tehnology hardening chemical – heat. În: Buletinul Institutului Politehnic din Iași, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, tomul LVI (LX), fascicula 2a, 2010, p. 189-194.
35. **Мазуру С.Г.**, Скатицайлов С.В., Ботнаръ. В.А. Моделирования процесса шлифования с оценкой производительности, стойкости инструмента и качества обработки. В: Сборник трудов XVII МНТК „Машиностроение и техносфера XXI века”, том 2, 2010, Донецк, с. 126-130.
36. Bostan I., **Mazuru S.**, Botnari V. CINETIC process of teeth grinding. In: The 15<sup>th</sup> International Conference „Modern Tehnologies, Quality and Innovation” ModTech 2011, 25-27 May, 2011, Vadul lui Voda, Moldova – Romania, p. 121-124.
37. **Мазуру С.Г.**, Скатицайлов С.В., Мазуру А.С. Экспериментальные исследования поверхностного слоя зубьев зубчатых колес в зависимости от условий шлифования, стойкости инструмента и качества обработки. В: Сборник трудов XIX МНТК „Машиностроение и техносфера XXI века”, том 2, 2012, Донецк, с. 159-162.
38. **Мазуру С.Г.**, Метельский В. Обеспечение точности базирования зубчатого колеса интегрированием погрешностей технологической базы. В: Сборник трудов XIX МНТК „Машиностроение и техносфера XXI века”, т. 2, 2011, Донецк, с. 171-174.
39. **Мазуру С.Г.** Механизм образования составляющих кинематической погрешности зубчатого колеса при химико-термической обработке. Сборник трудов XIX МНТК „Машиностроение и техносфера XXI века”, том 2, 2011, Донецк, с. 167-171.
40. Бостан И., **Мазуру С.Г.**, Касиан М.С. Оптимизация параметров точности элементов технологических систем операций зубообработки. Сборник трудов XIX МНТК „Машиностроение и техносфера XXI века”, том 1, 2012, Донецк, с. 109-112.

41. **Mazuru S.**, Casian M., Scaticailov S. Contributions to increase safety of operating equipment tehnology gear. *Машиностроение и техносфера XXI века*. В: Сборник трудов XIX МНТК, том 3, 2012, Донецк, p. 157-160.
42. **Mazuru S.**, Metelski V. Constructive methods to ensure the accuracy of technological-quality indicators gears. In: The 16<sup>th</sup> International Conference „Modern Tehnologies, Quality and Innovation”, ModTech 2012, 24-26 May, 2012, Sinaia, Romania, p. 541-544.
43. Bostan I., **Mazuru S.**, Vaculenco M., Scaticailov S. Issues technology manufacturing precessional gears with nonstandard profile generating. In: IX international congress “Machines, Technologies, Materials 2012”, Varna, Bulgaria, 2012, vol. I.
44. Bostan I., **Mazuru S.**, Metelski V. ș.a. Procedeu de șeveruire a dinților roților dințate precesionale. Brevet de invenție nr. 4138. BOPI nr. 11/2011.
45. Bostan I., **Mazuru S.**, Slătineanu L., Stîngaci I., Cosovschi P. Procedeu de formare a microreliefului regulat pe suprafața angrenajului. Brevet de invenție de scurtă durată nr. 374, BOPI nr. 2011.05.31.
46. Bostan I., **Mazuru S.**, Slătineanu L., Stîngaci I. Procedeu de prelucrare a roților dințate. Brevet de invenție de scurtă durată nr. 373 2011.05.31. BOPI nr. 5/2011.
47. Bostan I., **Mazuru S.**, Botnari V., Mardari A. Procedeu de durificare a dinților angrenajului conic sau precesional. Brevet de invenție de scurtă durată nr. 346, 2011.04.30, BOPI nr. 3/2011.
48. Bostan I., **Mazuru S.**, Metelski V., Mardari A., Stîngaci I., Roșca A., Botnari V. Procedeu de honuire a dinților roților dințate precesionale. Brevet de invenție de scurtă durată nr. 4137. BOPI nr. 11/2011.
49. **Mazuru S.**, Botnari V., Mazuru A. Sculă abrazivă. Brevet de invenție de scurtă durată nr. 622. BOPI nr. 4/2013.
50. **Mazuru S.**, Botnari V., Mardari A., Casian M., Mazuru A. Procedeu de șeveruire a dinților roților dințate precesionale. Brevet de invenție nr. 635. BOPI nr. 5/2013.
51. Bostan I., **Mazuru S.**, Scaticailov S. Technologies for precessional planetary transmissions toothing generation. In: TEHNOMUS, nr. 20, 2013, p. 226-233, Suceava.
52. Botnari V., **Mazuru S.** Influence of Processing Parameters on the Quality of the Superficial Layer after Processing Surfaces with Plastic Deformation Processes. In: Applied Mechanics and Materials, vol. 657, 2014, p. 147-153. Switzerland: Trans Tech Publications.
53. **Mazuru S.**, Casian M. Theoretical and experimental aspects concerning elastic behavior in the grinding technological system. In: Advanced Materials Research, vol. 1036, 2014, p. 286-291. Switzerland: Trans Tech Publications.
54. Мазуру С. Математическое моделирование кинематики процесса зубошлифования. В: *Машиностроение и техносфера XXI века*, том 5, Донецк, 2006.
55. Casian M., **Mazuru S.** A study concerning the workpiece profile after grinding process of precessional gear wheels. In: Advanced Materials Research, vol. 1036, 2014, p. 292-297. Switzerland: Trans Tech Publications.
56. Мазуру С.Г., Скатицайлов С.В., Ботнаръ. В.А. Моделирования процесса шлифования с оценкой производительности, стойкости инструмента и качества обработки. В: *Машиностроение и техносфера XXI века*. Сборник трудов XVII международной научно- технической конференции, том 2, 2010, с. 126-130. Донецк.
57. Мазуру С.Г., Скатицайлов С.В., Мазуру А.С. Экспериментальные исследования поверхностного слоя зубьев зубчатых колес в зависимости от условий шлифования, стойкости инструмента и качества обработки. В: *Машиностроение и техносфера XXI века*. Сборник трудов XIX международной научно-технической конференции, том 2, 2012, с. 159-162. Донецк.
58. **Sergiu Mazuru**, Maxim Casian, and Serghei Scaticailov. The processing accuracy of the gear. *Advanced Materials Research*. 112. 01026. (2017). 21<sup>st</sup> Innovative Manufacturing Engineering & Energy International Conference – IManE&E 2017. Pag. 122-127.
59. Bostan I., Mazuru Sergiu, Trifan N. Dispozitiv de moletare a profilelor dințate pe semifabricate inelare. Brevet nr.2704 MD. I.Cl.: B21 H5/00, 1/06. Publ. 2004.11.30, BOPI nr.11/2004.
60. Bostan I., **Mazuru S.**, Vaculenco M. Procedeu de prelcurare prin electroeroziune a suprafețelor roților dințate ale transmisiei precesionale. Brevet 2609 MD I.Cl.: B23 H1/00. Publ. 2004.02.29, BOPI nr.2/2004.
61. **Sergiu Mazuru**, Maxim Casian, and Serghei Scaticailov. Grinding of the gears with high depth processing. 112. 01019. (2017). 21<sup>st</sup> Innovative Manufacturing Engineering & Energy International Conference – IManE&E 2017. Pag. 164-169.

## ADNOTARE

la teza *Procedee tehnologice de generare a profilurilor nestandarde ale angrenajelor precesionale*, prezentată de **Mazuru Sergiu** pentru conferirea gradului științific de doctor habilitat în științe tehnice

**Structura tezei.** Teza include introducere, șase capitole, concluzii generale și recomandări, bibliografie cu 349 titluri, 3 anexe, 322 pagini de text de bază, 215 figuri, 7 tabele.

**Publicații la tema tezei.** Rezultatele obținute sunt publicate în 109 lucrări științifice (două monografii, articole în reviste de profil, comunicări la conferințe internaționale, inclusiv 29 brevete de invenții).

**Cuvinte-cheie:** transmisie precesională, angrenaj nestandardizat, profil, tehnologia danturării, rectificare, semifabricat, mașină-unealtă, dispozitiv, rigiditate, linie de contact, sarcină, cinematica procesului.

**Domeniul de studiu:** Bazele științifice ale procedeelelor tehnologice de generare a profilurilor nestandarde ale angrenajelor precesionale.

Cercetările prezentate în Teză și în publicațiile respective au contribuit la rezolvarea unei **probleme științifice de importanță majoră:** elaborarea teoriei de profilare a angrenajului prin metoda rulării cu sculă în formă de disc profilat periferic și în baza stabilirii legităților, legăturilor elaborarea sistemului de asigurare a preciziei de profilare a dinților.

**Scopul lucrării** constă în elaborarea procedeelelor tehnologice de generare a profilurilor dinților angrenajelor precesionale cu profil variabil nestandardizat, cu extinderea posibilităților tehnologice, de sporire a calității și a preciziei suprafețelor profilate.

**Obiectivele cercetării:** elaborarea conceptului cinematic al procedeei tehnologice de generare prin rulare a danturilor angrenajelor precesionale cu profil variabil și nestandardizat cu sculă-disc profilată periferic; elaborarea modelului fizico-matematic al procedeei de generare prin rulare a profilului convex-concav cu sculă-disc cu mișcare sferospațială; elaborarea modelului fizic de realizare a procedeei de generare a profilului convex-concav cu "scula-disc" cu mișcare sferospațială; determinarea indicilor de calitate a suprafeței prelucrate în funcție de forma conturului periferic al sculei, cinematica mișcărilor sculei și regimurilor de rectificare; determinarea abaterilor geometrice și stabilirea erorilor tehnologice admisibile ale danturilor roților dințate; identificarea naturii erorilor tehnologice și abaterilor geometrice în funcție de precizia de prelucrare a roților dințate; elaborarea recomandărilor practice privind asigurarea indicilor de calitate și de precizie a flancurilor danturilor transmisiilor planetare precesionale.

**Noutatea și originalitatea științifică** constă în elaborarea pentru prima dată a modelelor matematic și fizic ale unui nou principiu de generare a danturilor angrenajelor precesionale cu profil convex-concav variabil (nestandardizat) al dinților cu sculă-disc cu mișcare sferospațială. Principiul nou de generare permite: extinderea posibilităților tehnologice de generare a dinților danturilor cu diametre mai mici ( $d < 20$  mm), precum și mai mari, creșterea productivității generării profilului, asigurarea preciziei de rectificare a dinților transmisiilor precesionale cu profil nestandardizat variabil prin metoda rulării cu disc abraziv profilat periferic.

**Semnificația teoretică a lucrării.** Pentru prima dată a fost elaborat modelul matematic al procesului de generare a dinților cu scula – disc cu profil convex-concav nestandardizat, cu cinematica constituită din patru mișcări: *mișcarea autonomă* – mișcare principală de așchiere – rotirea sculei abrazive cu frecvența ( $n_1$ ), *mișcarea de așchiere auxiliară*, efectuată rapid ca o mișcare liniară de-a lungul dintelui, *mișcarea de rulare* – rotirea lentă a roții la un unghi  $\Delta\theta$  în timpul unei curse duble a sculei abrazive de-a lungul dintelui, *mișcarea coordonată cu rularea roții* – deplasarea capului portsculă într-o direcție tangențială față de punctul de contact.

**Valoarea aplicativă.** A fost propus și realizat în echipamente un procedeu nou de generare a suprafețelor dinților cu profil variabil convex-concav cu sculă-disc cu mișcare sferospațială cu un punct fix (au fost obținute 29 brevete de invenție), au fost elaborate, executate și implementate utilajul, dispozitivele și sculele.

**Implementarea rezultatelor obținute.** Rezultatele cercetărilor au fost implementate la ARP GmbH Alpirsbach (Germania), conform actului de implementare. Lucrarea *Transmisii planetare precesionale*, în anul 1998, a fost apreciată cu înalta distincție în domeniul științei și tehnicii – Premiul de Stat al Republicii Moldova. În calitate de coautor, mi s-a oferit titlul de Laureat al Premiului de Stat al RM în Domeniul Științei și Tehnicii. Anumite părți (capitole) ale tezei sunt incluse în programa de învățământ a Departamentului *Tehnologia Construcțiilor de Mașini* pentru pregătirea specialiștilor la specialitatea 521.1.

## АННОТАЦИЯ

диссертации **Мазуру Сергея** *Технологические способы нарезания нестандартных профилей зацеплений прецессионных передач*, представленной на соискание учёной степени доктора habilitat технических наук.

**Структура диссертации.** Диссертация включает введение, шесть глав, общие выводы и рекомендации, список литературы из 348 источников, 3 приложений, 322 страниц основного текста, 215 рисунка, 7 таблиц.

**Публикации по теме диссертации.** Полученные результаты опубликованы в 109 научных работах (две монографии, статьи в специализированных журналах, доклады на международных конференциях, в том числе 29 изобретений).

**Ключевые слова:** прецессионная передача, нестандартное зацепление, профиль, зуб, скорость, технология нарезания, шлифование, погрешность, кинематика процесса, технологическая система, профилирование, сила, нарезание, инструмент, абразив, фрезерование, заготовка, станок, приспособление, термообработка, жесткость, шевингование, финишная обработка, линия зацепления, скорость, глубина резания.

**Область исследований:** Научные основы проблематики технологических способов нарезания нестандартных зацеплений прецессионных передач.

Исследования, представленные в диссертации и на основе опубликованных работ, **позволили решить главную научную проблему:** разработка теории профилирования зубчатого колеса с использованием инструмента в виде диска с профилированной периферией, а также на основе установленных законов, связей разработать систему обеспечения, точности профилирования зуба.

**Целью работы** является улучшение технологических методов нарезания нестандартных зацеплений прецессионных передач.

**Задачи исследования:** разработка концепции кинематики технологического процесса профилирования конвексно-конкавного зацепления прецессионных передач с переменным и нестандартным профилем инструмента в форме диска с профилированной периферией; разработка физико-математической модели процесса профилирования конвексно-конкавного зацепления с помощью инструмента-диска методом обкатки с прецессирующим движением; разработка физической модели реализации процесса профилирования конвексно-конкавного зацепления с помощью инструмента-диска методом обкатки с прецессирующим движением; определение качественных показателей поверхности, обрабатываемой в зависимости от формы периферии инструмента, кинематики перемещения инструмента и режимов резания; определение геометрических отклонений и допустимых технологических погрешностей зубьев зубчатых колес; определение характера технологических погрешностей и геометрических отклонений в соответствии с точностью обработки зубчатых передач; разработка практических рекомендаций для обеспечения качества и точности поверхности зацепления планетарных прецессионных передач.

**Научная новизна и оригинальность работы.** Впервые разработана математическая и физическая модель нового технологического процесса профилирования конвексно-конкавного зацепления прецессионных передач с переменным и нестандартным профилем с инструментом в форме диска с профилированной периферией. Принцип нового способа позволяет: расширить технологические возможности нарезания зубьев зубчатых колес с минимальными диаметрами ( $d < 20$  мм) и выше, повысить производительность обработки профиля, обеспечить точность зубьев прецессионных передач с переменным нестандартным профилем методом обкатки абразивным инструментом в форме диска с профилированной периферией.

**Теоретическая значимость работы.** Впервые была разработана математическая модель нового технологического процесса профилирования конвексно-конкавного зацепления прецессионных передач с переменным и нестандартным профилем с кинематикой, состоящей из 4 движений: *автономное движение* – основное движение резания – вращение абразивного инструмента с частотой ( $n1$ ), *вспомогательное движение резания*, быстрое перемещение, выполняемое как линейное вдоль зуба, *движение обката* – медленное вращение колеса на угол  $\Delta\theta$  во время двойного хода абразивного инструмента вдоль зуба, *скоординированное движение с вращением колеса* – перемещение шлифовальной головки в тангенциальном направлении относительно точки контакта.

**Прикладное значение работы.** Предложены и выполнены в технологической оснастке новые способы обработки прецессионного зацепления с нестандартным профилем зубьев с прецессирующим инструментом в форме диска с профилированной периферией (получены 29 изобретений), были разработаны, изготовлены и внедрены: оборудование, приспособления и инструменты.

**Внедрение научных результатов.** Результаты исследований приняты к внедрению на *ARP GmbH Alpirsbach* (Германия); работа *Планетарные прецессионные передачи* в 1998 году была удостоена Государственной Премии Республики Молдова в области науки и техники. Отдельные главы диссертации были использованы в учебном процессе департамента *Технологии машиностроения* для подготовки специалистов по специальности 521.1.

## SUMMARY

The thesis *Technological processes generating non-standard profiles of precessional gear* presented by **Mazuru Sergiu** for conferring the scientific degree of Doctor of Technical Sciences

**Thesis structure.** The thesis includes introduction, six chapters, conclusions and recommendations, bibliography of 349 titles, 3 annexes, 322 basic text pages, 215 figures, 7 tables.

**Publications on the thesis topic.** The results are published in 109 scientific works (two monographs, articles in journals, communications at international conferences, including 29 patents).

**Keywords:** precessional transmission, gear non-standardized, profile, tooth, technology tooting, grinding, error, cinematic technology system, engendering, force, cutting tools, grinding, milling, blank, eccentricity, machine tool, device, heat treatment, stiffness, roller, contact line, speed, cutting depth, cinematic process.

**Field of study:** The scientific basis of technological methods of engendering non-standard profiles of precessional gear.

**The aim of the work.** The aim is to elaborate the technological processes for generating the profiles of precession gear teeth with non-standard variable profile with the extension of the technological possibilities, to increase the quality and precision of the profiled surfaces.

**Research objectives:** elaboration of the kinematic concept of the technological process of generating by rolling of precession gears with variable and non-standard profile with peripheral profile tool; elaboration of the physico-mathematical model of the rolling process of the convex-concave profile with spherical-disk movement tool; elaboration of the physical model of realizing the process of generating the convex-concave profile with the "disk-tool" with the sphero-spatial motion; the determination of the surface quality indexes processed depending on the shape of the tool peripheral shape, the tool movement kinematics and the rectification procedures; Determination of geometric deviations and determination of admissible technological errors of toothed gear teeth; identifying the nature of technological errors and geometric deviations according to the precision of machining the gears; developing practical recommendations to ensure the quality and precision of the dental flanks of the treacherous planetary transmissions.

**Novelty and originality of scientific:** consists in the premiere development of the mathematical and physical models of a new principle of generating the teeth of precession gears with variable (non-standard) convex-concave profile of the teeth with a spherical-disk movement tool. The new generation principle allows: to extend the technological possibilities of dental teeth generation with smaller diameters ( $d < 20$  mm) and to the largest ones, to increase the productivity of the profile generation, ensures the precision of the teeth of the precession transmissions with variable non-standard profile by the rolling method with peripherally shaped abrasive disk.

**Theoretical significance.** For the first time, the mathematical model of the teeth generation process with non-standard convex-concave dies was developed with kinematics consisting of 4 movements: *autonomous movement* – main cutting movement – rotation of the abrasive tool with the frequency ( $n1$ ), *the movement of auxiliary cutting*, quickly performed as a linear movement along the tooth, *rolling motion* – slow rotation of the wheel at an angle  $\Delta\theta$  during a double stroke of the abrasive tool along the tooth, *coordinated movement with wheel running* – displacement of the head in a tangential direction to the point of contact.

**The value of the work.** The new convex-concave-shaped teeth surface design with a spherical-disk movement tool with a fixed point has been proposed and made in the equipments (29 inventions patents have been obtained, the equipment was developed, executed and implemented, devices and tools.

**Implementation of scientific results.** The results were implemented at ARP GmbH Alpirsbach (Germany), according to the implementing act. The work *Pre-Planetary Transmissions* in 1998 was appreciated with the highest destination in the field of science and technology – the State Prize of Republic of Moldova. As a co-author I was awarded the title of Laureate of the State Prize of the RM in the field of Science and Technology. Certain chapters of the thesis are included in the curriculum of the Department of Machine Building Technology for the training of specialists in specialty 521.1.

**MAZURU SERGIU**

**PROCEDEE TEHNOLOGICE DE GENERARE  
A PROFILURILOR NESTANDARDE  
ALE ANGRENAJELOR PRECESIONALE**

**242.05 – Tehnologii, procedee și utilaje de prelucrare**

Autoreferatul tezei de doctor habilitat în științe tehnice

---

Bun de tipar: 15.05.2019

Formatul hârtiei: 60x84 1/16

Hârtie ofset. Tipar RISO

Tirajul: 50 ex.

Coli de tipar: 3,0

Comanda nr. 49

---

UTM, MD 2004, Chișinău, bd. Ștefan cel Mare și Sfânt, nr. 168

Editura *Tehnica* – UTM, or. Chișinău, str. Studenților, 9/9