

UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI

Cu titlu de manuscris
CZU 621.91 658.512

STRONCEA AUREL

**OPTIMIZAREA STRUCTURILOR DIMENSIONALE LA
PROIECTAREA ASISTATĂ DE CALCULATOR A
TEHNOLOGIILOR DE PRELUCRARE MECANICĂ**

**242.05. TEHNOLOGII, PROCEDEE ȘI UTILAJE DE
PRELUCRARE**

Rezumatul tezei de doctor în științe ingineresti

CHIȘINĂU, 2023

Teza a fost elaborată la **Departamentul Ingineria Fabricației, Universitatea Tehnică a Moldovei.**

Conducător științific:

TOCA Alexei, conf. univ., dr.

Referenți oficiali:

NEDELCU Dumitru, prof. univ., dr. ing., Universitatea Tehnică "Gh. Asachi"
din Iași, România

OJEGOV Alexandr, conf. univ., dr., Universitatea de Stat "A. Russo" din Bălți

Componenta Consiliului Științific Specializat:

BOSTAN Ion , prof. univ., dr. hab., academician	- președinte CSS
TRIFAN Nicolae , conf. univ., dr.	- secretar științific CSS
DULGHERU Valeriu , prof. univ., dr. hab.	- membru al CSS
MAZURU Sergiu , conf. univ., dr. hab.	- membru al CSS
SLĂTINEANU Laurențiu , prof. univ., dr. ing. (România)	- membru al CSS

Susținerea va avea loc la 19 decembrie 2023, ora 14:00, în ședința Consiliului Științific Specializat D 242.05-23-99 la Universitatea Tehnică a Moldovei, str. Studenților 9/8, blocul 6, aud. 6-210, Chișinău, MD 2045, Republica Moldova

Teza de doctor și rezumatul pot fi consultate la biblioteca Universității Tehnice a Moldovei și pe pagina web a ANACEC (www.anacec.md).

Rezumatul a fost expediat la 16 noiembrie 2023

Secretar științific al Consiliului Științific Specializat

TRIFAN Nicolae, conf. univ., dr. *semnătura*



Conducător științific

TOCA Alexei, conf. univ., dr.

semnătura



Autor

STRONCEA Aurel

semnătura



(© Stroncea Aurel, 2023)

CUPRINS

REPERE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII	4
1. PROBLEMATICA STRUCTURILOR DIMENSIONALE LA PROIECTAREA PROCESELOR TEHNOLOGICE	10
Alocarea toleranțelor constructive și tehnologice	10
Alocarea toleranțelor cu diagrame de toleranțe	11
Alocarea toleranțelor prin metoda grafurilor	11
Optimizarea proceselor tehnologice	12
Relația cost–toleranță	12
2. METODE DE ANALIZĂ ÎN TOLERANȚE A STRUCTURILOR DIMENSIONALE TEHNOLOGICE	13
Structuri dimensionale tehnologice	13
Metode de analiză dimensională	13
Metoda de analiză dimensională bazată pe compensarea erorilor	14
Esența compensării erorilor	14
Compensarea erorilor pentru adaosuri de prelucrare	15
Compensarea erorilor cotelor tehnologice în structurile dimensionale	16
3. FORMAREA PRECIZIEI ÎN STRUCTURILE DIMENSIONALE TEHNOLOGICE	17
Formarea preciziei cotelor tehnologice	17
Optimalitatea structurilor dimensionale elementare	18
Optimalitatea structurilor dimensionale tehnologice complexe	18
Sinteza structurilor dimensionale tehnologice complexe optime.	19
4. STRUCTURI DIMENSIONALE TEHNOLOGICE OPTIME	21
Scenarii optime de prelucrare	21
Alocarea toleranțelor de prelucrare la nivelul capacității de precizie a sistemului tehnologic	22
Adaosuri de prelucrare minime	23
Optimalitatea structurilor dimensionale tehnologice	23
Gradul de optimalitate a structurilor dimensionale tehnologice bazate pe similitudinea cu structurile dimensionale constructive	24
Optimizarea structurilor dimensionale tehnologice prin redimensionarea constructivă	25
CONCLUZII ȘI RECOMANDĂRI	26
Direcții de cercetare pentru viitor	29
Bibliografie	29
Adnotare	32
Annotation	33
Аннотация	34

REPERE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII

Actualitatea temei. Republica Moldova se înscrie tot mai ferm în circuitul internațional industrial, realizând activități de proiectare și de fabricare a produselor industriale, diferitor sisteme tehnice etc. Suportul tehnico-tehnologic al acestor activități este unul de talie internațională atât în etapa de proiectare, cât și în etapa de fabricație, fiind utilizate instrumente de proiectare asistată de calculator a produselor și proceselor.

Lucrarea este inițiată pornind de la faptul că practica proiectării constructive implică tot mai frecvent piese prelucrate mecanic cu structuri dimensionale tot mai complexe. Acest lucru se datorează posibilităților tehnologice în creștere ale mașinilor-unelte CNC, care sunt morfologic transformabile. Astfel, crește substanțial complexitatea structurilor dimensionale tehnologice, care, spre deosebire de cele constructive, includ suplimentar în calitate de elemente-cote adaosurile de prelucrare și o parte de cote formate anterior. Structurile dimensionale tehnologice complexe se manifestă prin multiplicarea interinfluențelor și restricțiilor dimensionale. Este necesară asigurarea preciziei cotelor constructive prin intermediul cotelor tehnologice. Structurile tehnologice complexe provoacă creșterea toleranțelor adaosurilor de prelucrare și, efectiv, creșterea adâncimilor de așchiere luate în considerare. Ambele efecte reduc nivelul de asigurare tehnologică a preciziei de prelucrare, fiind necesară o precizie tehnologică mai înaltă la adâncimi de așchiere mai mari. Este o perspectivă problematică, deoarece performanțele mașinilor-unelte se dezvoltă pe direcțiile controlului numeric și prelucrărilor la viteze mari, prelucrări care necesită stabilitatea așchierii prin limitarea valorii adaosurilor de prelucrare.

O altă modalitate constă în evaluarea corectă a toleranțelor cotelor tehnologice și toleranțelor adaosurilor de prelucrare a structurilor tehnologice complexe. Metodele statistice de analiză nu corespund criteriului de robustețe. Este promițătoare, în acest sens, înlocuirea analizei dimensionale în toleranțe prin metoda de maximum și minimum care reflectă "cel mai rău caz" cu analiza de maximum și minimum cu compensarea erorilor. Compensarea erorilor are loc exclusiv în structurile dimensionale (pentru o cotă tehnologică separată nu are sens) și se poate manifesta pozitiv atât pentru precizia cotelor tehnologice, cât și pentru toleranța adaosurilor de prelucrare. Așadar, este important să fie constatate și caracterizate situațiile de manifestare a compensării erorilor și măsura efectelor acesteia.

Pentru prelucrarea unei piese cu structură dimensională constructivă definită pot fi propuse mai multe tehnologii de prelucrare mecanică, adică pot fi propuse diferite structuri dimensionale tehnologice. Unele structuri dimensionale tehnologice vor asigura precizia piesei, iar altele nu. Astfel, structurile dimensionale tehnologice devin motive și surse de optimizare. Importante sunt nu numai structurile dimensionale tehnologice "reușite", care pot fi considerate precedente structurale, dar și modalitatea de punere în corespondență a structurilor dimensionale constructive a structurilor dimensionale tehnologice situațional reușite. Optimalitatea unei structuri dimensionale tehnologice este asigurată când aceasta reflectă adecvat și interactiv

structura dimensională constructivă a piesei și implică în cea mai bună manieră resursele tehnologice tehnice, informaționale, baze de cunoștințe etc.

Descrierea situației în domeniul de cercetare. Ingineria mecanică are ca sarcină proiectarea și fabricarea unor produse competitive pe piață, care ar fi caracterizate printr-un cost minim al ciclului de viață. Această problemă trebuie să fie rezolvată eficient în etapa de pregătire tehnologică a fabricației.

În procesul proiectării procesului tehnologic sunt practicate analize și calcule pentru a evita soluțiile neadecvate. Este recunoscut faptul că analiza dimensională permite a fi proiectate procese tehnologice, care necesită corecții minimale în condiții reale de fabricare. Acum se cere tot mai insistent ca analiza dimensională să fie parte componentă a procesului de proiectare tehnologică, care l-ar ghida spre un rezultat întotdeauna acceptat. În acest sens, elaborarea unor metodologii de sinteză a soluțiilor tehnologice de proiect este o problemă actuală, soluționarea căreia ar permite elaborarea unor procese tehnologice eficace și eficiente.

Procesele de optimizare a proiectării tehnologice au fost studiate de mulți cercetători printre care pot fi menționați Kumar M.S., Huang M., Sivakumar K., González Contreras, Thilak M, Jeang A., Матвеев В.В., Мокрушин Ю.А., Перминов А.В. și alții. În lucrările publicate în ultimul timp sunt tratate aspectele: de alocare a toleranțelor constructive și tehnologice (optimă concurențială, integrată, integrată multiobiectivă, echilibrată pentru costuri minime sau pentru pierderi acceptabile ale calității etc.); de alocare a toleranțelor tehnologice bazată pe asigurarea tehnologică (capabilitatea procesului); de alocare a toleranțelor tehnologice cu asigurarea robusteții fabricării; de definire a bazelor tehnologice prin analiza toleranțelor de prelucrare cu efecte de alocare a toleranțelor tehnologice maxim posibile, cu minimizarea erorilor de instalare etc.; de utilizare a diversilor algoritmi genetici de planificare și de optimizare a proceselor tehnologice; de utilizare a diagramelor de toleranță și a grafurilor pentru proiectarea tehnologiei, selectarea bazelor tehnologice, alocarea toleranțelor tehnologice etc.; de optimizare a costurilor prelucrării determinate de toleranțele tehnologice, de alegerea bazelor tehnologice etc.

Se constată că eficientizarea proiectării tehnologice este strâns legată de factorii-cheie cum sunt structura dimensională constructivă a piesei, structura dimensională tehnologică și structura dimensională funcțională a sistemului tehnologic, care trebuie să fie bine definite, adecvat analizate separat și în toate aspectele de interinfluență a unuia cu alta. Factorii de proces tehnologic trebuie să fie veridici, să fie evaluați cât se poate de corect pentru a nu admite noncalitate, pe de o parte, și costuri excesive pe de altă parte.

În acest sens, o problemă importantă este elaborarea unei metodologii de sinteză a structurilor dimensionale optime a proceselor tehnologice de prelucrare mecanică prin care să se asigure prelucrări la precizia obiectiv suficientă și necesară în condiții specifice de proiectare asistată de calculator și de fabricație și, în același timp, să devină elemente ale bazelor de date și de cunoștințe tehnologice.

Pornind de la cele relatate, au fost formulate scopul și obiectivele cercetării.

Scopul tezei de doctorat constă în elaborarea mecanismelor de optimizare a structurilor dimensionale tehnologice orientate spre creșterea calității proiectării și eficienței proceselor tehnologice de prelucrare mecanică.

Obiectivele cercetării:

- elaborarea metodologiei de determinare a caracteristicilor structurilor dimensionale tehnologice ce ar asigura robustețea soluțiilor tehnologice și nu ar admite evaluări cu excесе ale valorilor;
- elaborarea metodei de rezolvare a sistemelor de lanțuri dimensionale tehnologice liniare în condițiile centralizării prelucrărilor mecanice;
- stabilirea criteriilor de optimalitate a structurilor dimensionale tehnologice pe niveluri ierarhice: faza tehnologică, instalarea tehnologică, procesul tehnologic;
- elaborarea mecanismului de creare a structurilor dimensionale tehnologice optime în sistemul proces tehnologic–sistem tehnologic–piesă–semifabricat;
- elaborarea mecanismului de sinteză geometrică a structurilor dimensionale tehnologice optime din componentele: fază tehnologică (cota tehnologică, toleranța cotei și a adaosului de prelucrare), instalare (mulțimea de cote tehnologice, de toleranțe ale cotelor și ale adaosurilor de prelucrare);
- elaborarea criteriilor de constituire a scenariilor optime de prelucrare și a precedentelor structurale tehnologice optime;
- elaborarea algoritmului de proiectare dimensională optimală a tehnologiilor de prelucrare mecanică.

Ipotezele de cercetare:

- structurile elementare dimensionale tehnologice sunt optime dacă cota constructivă este formată prin propria și unica cotă tehnologică;
- sinteza structurilor dimensionale tehnologice complexe din structurile elementare optime nu întotdeauna conduce la un rezultat optim datorită constrângerilor sistemice;
- factorii interni de optimalitate a structurilor dimensionale tehnologice sunt mulțimea toleranțelor cotelor tehnologice și mulțimea toleranțelor adaosurilor de prelucrare;
- mediul în care este determinată optimalitatea structurilor dimensionale tehnologice este constituit din structurile dimensionale constructive ale piesei de prelucrat, funcționale ale sistemului tehnologic și de execuție a semifabricatului;
- criteriul de optimalitate a structurilor dimensionale tehnologice poate fi stabilit în spațiu de doi parametri interrelaționați: toleranța cotei (precizia de prelucrare) și toleranța adaosului de prelucrare (asigurarea tehnologică a preciziei);
- criteriu de optimalitate a structurilor dimensionale tehnologice poate fi și costul determinat de semifabricat, precizia prelucrărilor (mulțimea toleranțelor cotelor tehnologice) și volumul adaosurilor de prelucrare înlăturate (mulțimea toleranțelor adaosurilor);
- determinarea toleranțelor cotelor tehnologice și toleranțelor adaosurilor de prelucrare prin metoda de maximum și minimum corespunde excesiv criteriului

de robustețe și trebuie luate în considerare efectele de diminuare a acestora de la compensarea erorilor.

Metodologia cercetării. Structurile dimensionale constructive, tehnologice ale sistemelor tehnologice sunt reprezentate prin grafuri, care reflectă atât fiecare dimensiune și toleranța acesteia, cât și poziția în lanțurile dimensionale.

Analiza structurilor dimensionale, alocarea toleranțelor tehnologice, determinarea toleranțelor adaosurilor de prelucrare este realizată prin intermediul diagramelor de toleranță rezolvate atât în varianta "maximum–minimum", cât și în varianta "maximum–minimum cu efecte de compensare a erorilor".

Optimalitatea structurilor dimensionale este evaluată prin măsura creșterii preciziei cotelor tehnologice în comparație cu precizia cotelor constructive respective și prin măsura creșterii toleranțelor adaosurilor de prelucrare provocate de particularitățile specifice ale structurii dimensionale tehnologice. În calitate de criteriu sintetic de optimalitate este acceptat costul prelucrărilor determinat de precizie și de volumul aşchiilor înlăturate.

Delimitări. Structurile dimensionale cercetate se referă la suprafețele plane paralele ale corpurilor preponderent de revoluție, care urmează a fi prelucrate pe mașini-unelte CNC, inclusiv centre de prelucrare, în conformitate cu principiul centralizării prelucrărilor.

Noutatea științifică:

- Studiul efectelor de compensare a erorilor a permis stabilirea structurilor dimensionale tehnologice elementare și situațiilor în care aceste efecte se manifestă prin micșorarea toleranțelor adaosurilor de prelucrare de 1.5-1.7 ori, creșterea toleranțelor cotelor - elemente de închidere a lanțurilor dimensionale și a cotelor tehnologice formate în lanț cu 15-20% pentru aceleași cerințe de precizie.
- Identificarea metodei de rezolvare a lanțurilor dimensionale tehnologice complexe cu stabilirea mecanismului de formare a toleranțelor cotelor tehnologice, a toleranțelor adaosurilor de prelucrare prin cumulara toleranțelor tuturor cotelor-țintă pe lungimea lanțului de dimensiuni cu luarea în considerare a efectelor de compensare a erorilor.
- A fost demonstrată optimalitatea structurilor dimensionale tehnologice într-un spațiu de doi factori corelați ce determină capabilitatea procesului de prelucrare mecanică și se referă la minimizarea creșterii preciziei cotelor tehnologice în raport cu cea a cotelor constructive și la minimizarea creșterii toleranțelor adaosurilor de prelucrare.
- A fost demonstrat faptul că structurile dimensionale tehnologice optime pot fi create, respectând similitudinea acestora cu structurile dimensionale constructive ale piesei și semifabricatului și cu structura dimensională funcțională morfologic transformabilă a sistemului tehnologic cu ulterioarele adaptări structurale reciproce.
- În baza analizei mecanismelor de formare a toleranțelor adaosurilor de prelucrare a fost stabilit modul de creare a scenariilor optime de prelucrare prin secvențierea

cu baze tehnologice de instalare a structurilor dimensionale tehnologice în părți cu lungimi echilibrate.

Problema științifică soluționată constă în fundamentarea științifică a creării structurilor dimensionale tehnologice și scenariilor de prelucrare optime, precedentelor structurale utilizabile la proiectarea constructivă în detaliu și la proiectarea tehnologică, inclusiv asistată de calculator.

Semnificația teoretică constă în noi cunoștințe privind proiectarea proceselor tehnologice optime, în aspectele alocării toleranțelor tehnologice, utilizării bazelor tehnologice, asigurării capabilității tehnologice.

Rezultatele științifice înaintate spre susținere:

- efectele dimensionale în toleranțe și mecanismul formării preciziei cotelor constructive prin cotele tehnologice la prelucrarea mecanică;
- mecanismul de creștere a valorii toleranței adaosului de prelucrare în structurile dimensionale tehnologice complexe;
- mecanismul de creștere a preciziei cotelor tehnologice în structurile dimensionale complexe datorită compensării erorilor;
- metoda de rezolvare a lanțurilor dimensionale tehnologice cu efecte de compensare a erorilor;
- constituirea structurii dimensionale tehnologice optime în baza criteriului de optimalitate - similitudinea cu structura dimensională constructivă;
- constituirea structurilor dimensionale constructive optime pentru prelucrarea mecanică pe mașini-unelte CNC și utilizarea în calitate de precedente la proiectarea tehnologică asistată de calculator;
- metoda de redimensionare echivalentă constructivă pentru adaptarea optimală a structurilor dimensionale constructive cu cele tehnologice cu efecte de micșorare simultană a cerințelor de precizie a cotelor tehnologice și a toleranțelor adaosurilor de prelucrare;
- metoda de stabilire a scenariilor optime de prelucrare (instalărilor) prin divizarea structurilor dimensionale tehnologice cu baze tehnologice în părți echilibrate după criteriul valorilor toleranțelor adaosurilor de prelucrare.

Importanța practică și valoarea aplicativă a lucrării. Lucrarea vine cu recomandări de utilizare practică a diferitelor sisteme de cotare constructivă a pieselor în etapa de proiectare în detaliu, care ar asigura un nivel înalt de fabricare dimensională; de creare a unor structuri dimensionale tehnologice la proiectarea prelucrărilor ce ar asigura un răspuns tehnologic optimizat structurilor constructive date; de adaptare reciprocă a structurilor dimensionale constructive și tehnologice prin redimensionarea echivalentă constructivă și prin utilizarea resurselor de transformare morfologică a sistemelor tehnologice moderne CNC; de utilizare a modulelor structurale optime în calitate de precedente constructive sau tehnologice, inclusiv la proiectarea asistată de calculator. Rezultatele cercetărilor și recomandările formulate permit proiectanților tehnologiilor de prelucrare mecanică să mențină nivelul suficient al asigurării tehnologice prin neadmiterea creșterii inacceptabile a toleranțelor adaosurilor de prelucrare (adâncimii de așchiere) și neadmiterea creșterii preciziei de

prelucrare. Astfel, datele statistice cu referire la precizia și condițiile de prelucrare obținute pentru structurile dimensionale elementare pot fi argumentat aplicate și structurilor dimensionale complexe.

Implementarea rezultatelor cercetărilor. Rezultatele cercetărilor sunt utilizate în procesul de studii ciclul I (licență) la disciplina *Proiectarea dimensional-optimală a tehnologiilor de prelucrare mecanică*, la proiectarea de an și de licență (compartiment obligatoriu). Au fost editate note de curs cu aceeași denumire (ISBN 978-9975-45-598-5). Metodologia de analiză dimensională abordată în lucrare este utilizată de compania Van Dijk FEM engineering BV (Olanda) la *proiectarea constructivă ca instrument de proiectare pentru fabricabilitate*.

Aprobarea rezultatelor științifice: rezultatele cercetărilor au fost prezentate și discutate la conferințe științifice internaționale după cum urmează: Modern Technologies in Industrial Engineering - ModTech2023 (13-15 octombrie 2023, Chișinău, RM), Modern Technologies in Industrial Engineering - ModTech2018 (13-16 iunie 2018, Constanța, România), Innovative Manufacturing Engineering & Energy - IMAN&E2018 (31 mai-2 iunie 2018, Chișinău, RM), Tehnologii Moderne, Calitate, Restructurare - TMCR, edițiile: TMCR2005 (19-21 mai, Chișinău), TMCR2004 (27-29 mai, Iași, România), TMCR2003 (29 mai-01 iunie 2003, Chișinău, RM), TMCR2002 (23-25 mai 2002, Iași, România), TMCR2001 (23-25 mai, Chișinău), TMCR2000 (25-27 mai 2000, Iași, România), TMCR1999 (27-29 mai 1999, Chișinău, RM), Conferința Internațională de Inginerie Integrată - C21 (25-26 aprilie 2002, Timișoara), Conferința Internațională Машиностроение и Техносфера XXI века, Donețk, Ucraina edițiile 2021, 2020, 2018, 1999 ș.a.

Publicații la tema tezei. Rezultate esențiale obținute au fost publicate în 27 lucrări științifice, 5 dintre care ca unic autor: un articol în *Journal of Engineering Science* (2023), un articol în *Meridian Ingineresc* (2004), un articol în *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 400* (2018), un articol în *MATEC Web of Conferences 178* (2018), un articol în *Fizică și Tehnica: Procese, Modele, Experimente* (2012), 5 articole în *Buletinul Institutului Politehnic Iași* (secția Construcții de Mașini 2004, 2002, 2000), un articol în *Machine Building* (2003), 2 articole în culegerea internațională de lucrări științifice *Прогрессивные Технологии и Системы Машиностроения* (2001, 2000), 8 articole în culegerile de lucrări ale *Conferinței Internaționale TMCR* (2003, 2001, 1999), 5 articole în culegeri de lucrări ale Conferinței Internaționale *Машиностроение и Техносфера XXI века* (2021, 2020, 2018, 2005, 1999). A fost obținut un brevet de invenție, a fost editat un ghid de proiectare dimensională tehnologică (2019).

Volumul și structura tezei. Lucrarea include introducere, patru capitole, concluzii finale, recomandări, bibliografie din 132 titluri, anexe, 101 figuri și 11 tabele inserate în 135 pagini text de bază.

Cuvinte-cheie: structură dimensională constructivă, structură dimensională tehnologică, optimizare structurală, toleranțe constructive, toleranțe tehnologice, lanț dimensional, CAPP, diagramă de toleranțe, compensarea erorilor, similitudine a structurilor dimensionale, redimensionare constructivă echivalentă, bază tehnologică, toleranța adaosului de prelucrare.

1. PROBLEMATICA STRUCTURILOR DIMENSIONALE LA PROIECTAREA PROCESELOR TEHNOLOGICE

Alocarea toleranțelor constructive și tehnologice. Proiectanții de produse mapează cerințele tehnice dimensionale în capacitățile funcționale ale produselor [1], alocând, de obicei, toleranțe adecvate [2].

Ingineria toleranțelor este aplicată atât la proiectarea constructivă, cât și la cea tehnologică. Alocarea toleranțelor constructive și tehnologice trebuie să garanteze și funcționalitatea structurii constructive ca piesă în ansamblu și funcționalitatea structurii tehnologice ca proces tehnologic [3]. Totuși, obiectivele alocării optime ale toleranțelor se deosebesc în proiectarea constructivă și în cea tehnologică [4]. Proiectantul constructiv alocă toleranțe cotelor finale, asigurând, astfel, funcționalitatea piesei în ansamblu, iar proiectantul tehnologic este preocupat de problema realizării valorilor toleranțelor în câteva etape de prelucrare (operații, instalări, faze). Astfel, toleranțele sunt specificate din considerente diferite: sau pentru funcționalitatea piesei în produs, sau pentru fabricabilitatea piesei. În consecință, fiecare toleranță a cotei constructive trebuie să fie transformată într-un set de toleranțe ale cotelor în fabricație printr-o secvență de operații [5].

Corectitudinea dimensionării piesei în toleranțe se face prin analiza de optimizare în două niveluri: analiza și optimizarea toleranțelor internă a piesei și în analiza piesei ca entitate integră [2, 6]. În cadrul analizei interne a toleranțelor piesei lanțurile dimensionale în toleranțe sunt calculate pentru fiecare linie importantă ce determină poziția spațială relativă a suprafețelor în condiții proprii de funcționare. Analiza externă a toleranțelor piesei se concentrează pe precizia realizabilă a proceselor de fabricație, a mașinilor-unelte și sculelor, a combinației de faze tehnologice.

Proiectanții de tehnologii se axează pe toleranțele adecvate modului în care efectele unei operații tehnologice pot influența efectele altei operații [7]. Astfel, o toleranță „optimă” care ia în considerare doar o etapă a tehnologiei nu este, în general, optimă pentru altă etapă. Proiectarea tehnologică în toleranțe necesită cunoașterea profundă a standardelor de dimensionare și a toleranțelor, cunoașterea procesului de fabricație și a preciziei asigurate [8].

Proiectarea în toleranțe trebuie să ia în considerare numeroase probleme de fabricație pentru a permite o fabricare profitabilă a produselor de calitate. Proiectarea tehnologică este adesea văzută ca o verigă între proiectarea constructivă și fabricație, dar care poate transforma problematici din fabricație în problematici de proiectare [5]. În timp ce toleranțele constructive sunt tratate cu accent pe cerințele unui ansamblu mecanic sau ale unei piese aparte, toleranțele tehnologice sunt necesare pentru a crea un proiect eficient tehnologic la fabricarea pieselor.

Un model de optimizare al alocării simultane a toleranțelor cotelor constructive și a celor tehnologice este elaborat, luând în considerare valoarea pierderii calității și degradarea produsului în timp [9]. Produsele pot avea caracteristici de calitate multiple și aceste caracteristici nu sunt corelate obligatoriu. Modelul prevede studierea, în

primul rând, a pierderii calității așteptate a produsului cu caracteristici de calitate multiple pentru a surprinde pierderea concomitentă într-un mediu de toleranță.

Alocarea toleranțelor cu diagrame de toleranțe. Cea mai cunoscută metodă de transfer a cerințelor de precizie constructive în cerințe tehnologice este metoda diagramei de toleranțe denumită ΔL (fig. 1.1) [10]. Diagramele de toleranțe s-au dovedit în ultimele decenii a fi o tehnică simplă și eficientă pentru analiza toleranțelor de fabricație în procesele de prelucrare [11]. Tehnica se bazează pe capacitatea de asociere a toleranțelor dimensionale în procesele de prelucrare. Scopul proceselor de prelucrare este de a atinge toleranțele constructive necesare pieselor, fie direct, fie ca o compoziție a diferitelor toleranțe de lucru [12]. Diagrama toleranțelor permite realizarea unei asocieri între toleranțele cotelor tehnologice și toleranțele constructive, astfel încât se poate face o legătură între ele și pot fi realizate calcule și analize în termeni de toleranțe. Diagrama de toleranțe este o alternativă a sarcinilor complexe de calcule combinatorice [10], fiind valabilă pentru majoritatea pieselor și poate fi utilizată în diferite scopuri cum ar fi analiza orientării și fixării, ingineria concurențială etc. [13].

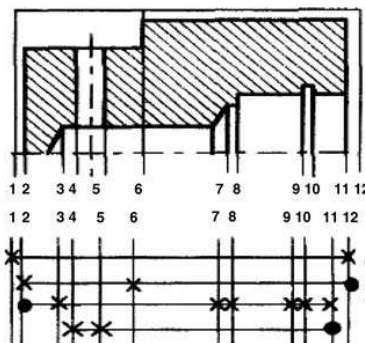


Fig. 1.1. Metoda ΔL de transfer a cerințelor de precizie constructive în cerințe tehnologice [10]

Diagrama toleranțelor este folosită pentru a determina cumulearea toleranțelor dimensiunilor rezultate și compararea cu toleranțele cotelor constructive pentru a se asigura că piesa poate fi prelucrată în conformitate cu cerințele tehnice de precizie specificate în desenul de execuție [14]. Diagrama toleranțelor este utilizată și la determinarea cumulării toleranțelor adaosurilor de prelucrare. Acestea se compară cu toleranțele admisibile ale adaosurilor de prelucrare în condiții concrete. Prin aceasta se constată că rămâne suficient material pentru următoarele adaosuri de prelucrare. Ca rezultat, diagrama toleranțelor oferă și dimensiunile de prelucrare, adică cotele tehnologice.

Alocarea toleranțelor prin metoda grafurilor. O altă metodă de calculare și alocare a toleranțelor este metoda grafurilor. Limbajul grafurilor face posibilă reprezentarea structurii dimensionale complexe într-o manieră simplă dar profundă și reprezintă o vedere de ansamblu asupra problemei [15]. Analiza dimensională în toleranțe prin metoda grafurilor permite stabilirea modurilor de relație a lanțurilor de dimensiuni și a toleranțelor. O altă aplicare a grafurilor tratează problema dimensională ca rezultat al schimbării pozițiilor suprafețelor prelucrate, fapt ce dă posibilitatea de a analiza erorile de orientare. Grafurile, în acest sens, permit planificarea eficientă a configurației unei instalări tehnologice care este o problemă complexă de optimizare [16].

Metoda grafurilor este abordată și în problema planificării proceselor cu optimizare conform algoritmului genetic "colonia de furnici" [17]. Graful inițial reprezintă mulțime de noduri - faze tehnologice alternative și mulțime de arce – succesiuni de faze acceptabile sau constrângeri constatate (precedențe). Succesiunile de faze devin preferabile și precedente atractive pentru alte situații prin analogie cum este ghidată colonia de furnici de feromoni (fig. 1.2).

Optimizarea proceselor tehnologice. Procesele tehnologice au structură ierarhică: proces tehnologic, operație, instalare, poziție, fază, trecere tehnologică. Fiecare componentă are propria sa structură și proprii parametri de funcționare. Astfel, proiectarea unui proces tehnologic prevede rezolvarea mai multor sarcini la diferite niveluri ierarhice, soluții care pot avea mai multe variante. Chiar și pentru piesele relativ simple procesul tehnologic proiectat poate avea inițial un număr mare de variante și combinații de operații, putând fi realizate prin diferite metode de prelucrare, cu diferite scheme de instalare, faze tehnologice, scule etc. Fiecare dintre nivelurile de optimizare a soluțiilor tehnologice necesită utilizarea diverselor criterii. Însă sunt preferabile procesele de optimizare de la aspectele cele mai generale până la detalierea lor, ceea ce corespunde abordării descendente. Astfel, soluția optimă în proiectarea proceselor tehnologice se bazează pe optimizarea soluțiilor tehnologice parțiale la fiecare nivel ierarhic de proiectare [18].

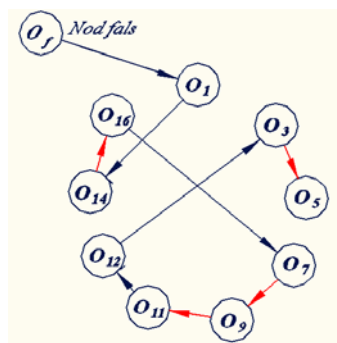


Fig. 1.2. Ordinea de prelucrare final acceptată [17]

Optimizarea structurală a proceselor tehnologice constă în alegerea celei mai bune structuri (ordinea operațiilor, configurația instalărilor, fazele tehnologice și ordinea acestora etc.) cu efect de îmbunătățire a parametrilor structurali, cu orice alt efect valoros situațional [19].

Alocarea toleranțelor tehnologice în regim asistat de calculator a devenit în prezent o problemă importantă în integrarea CAPP și CAD/CAM [10]. Produsul este constituit dintr-un număr finit de componente - piese de prelucrat pentru care forma geometrică, dimensiunile, poziția spațială, orientarea sunt variabile de proiectare, adică pot avea mai multe variante. În proiectul constructiv al piesei se doresc a fi alocate toleranțe suficient de mici pentru funcționarea adecvată, iar în proiectul tehnologic se doresc valori ale toleranțelor de prelucrare acceptabile pentru procesele de fabricație, adică cât e posibil de mari. Toleranțele tehnologice sunt considerate legături, o punte de trecere de la proiectul constructiv la produsul funcțional.

Relația cost–toleranță. Alocarea toleranțelor tehnologice are efecte asupra costurilor de prelucrare. Forma cea mai răspândită pentru costul prelucrării C determinat de toleranță este $C = C_F + C_V(T)$. Aici C_F este costul fix independent de

toleranță, iar $C_V(T)$ este costul variabil care crește odată cu micșorarea toleranței [20].

Concluziile rezultate din analiza surselor bibliografice au servit drept bază pentru formularea scopului și obiectivelor cercetării și atingerea acestora.

2. METODE DE ANALIZĂ A TOLERANTELOR STRUCTURILOR DIMENSIONALE TEHNOLOGICE

Rezultatele principale obținute în capitolul 2 constau în următoarele:

- stabilirea efectului structural de creștere a preciziei de prelucrare (de mărire a toleranțelor cotelor tehnologice) și de micșorare a toleranțelor adaosurilor de prelucrare (de creștere a gradului de asigurare tehnologică a preciziei) în comparație cu cele stabilite prin metoda tradițională de maximum și minimum datorită manifestării fenomenului compensării erorilor;

- stabilirea mecanismului de compensare a erorilor în structurile dimensionale tehnologice complexe cu evaluarea valorilor de compensare pentru cotele tehnologice, elemente de închidere și elemente succesive în lanțul dimensional, pentru adaosuri de prelucrare.

Structuri dimensionale tehnologice. Structurile dimensionale tehnologice elementare au două aspecte [94]. Primul aspect se referă la atribuirea fiecărei cote constructive a unei cote tehnologice prin intermediul căreia cea constructivă se formează în tehnologie. Cota constructivă este, în acest caz, element de închidere al lanțului dimensional tehnologic. Aici se poate observa situația când o cotă constructivă se formează prin intermediul propriei și unice cote tehnologice (fig. 2.1, a) și situația când cota constructivă se formează prin intermediul propriei cote tehnologice și a uneia sau mai multor cote tehnologice istorice (fig. 2.1, b). Aceste cote străine închid lanțul dimensional tehnologic pe cea mai scurtă cale.

Cel de-al doilea aspect se referă la urmărirea transformării cotei respective de pe semifabricat prin intermediul mai multor cote tehnologice proprii (eventual și străine) în cota finală – constructivă. Deseori, pe semifabricat nu sunt formate cote ce ar corespunde celor constructive pe piesă. În acest caz, în una din fazele procesului de prelucrare mecanică se formează o astfel de cotă. Seria de lanțuri dimensionale se închid cu adaosurile de prelucrare corespunzătoare (fig. 2.2).

Metode de analiză dimensională. Analiza structurilor dimensionale constructive, cât și a structurilor dimensionale tehnologice în aspectul lor de precizie se face în toleranțe prin rezolvarea lanțurilor dimensionale. Cele mai răspândite metode sunt metodele de maximum și minimum și probabilistică.

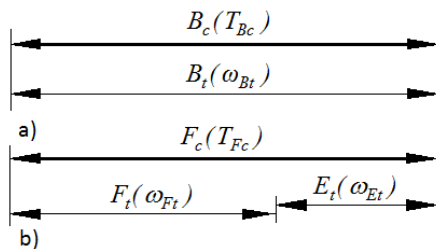


Fig. 2.1. Structuri dimensionale tehnologice în care cota constructivă este element de închidere [21]

Metoda de maximum și minimum se bazează pe formarea independentă a cotelor, asigură obținerea soluțiilor robuste, dar mai poartă denumirea de "cel mai rău caz", astfel încât se lasă de înțeles că strictețea este în exces. Metoda probabilistică de asemenea se bazează pe formarea independentă a cotelor, oferă soluții mai puțin stricte, admite o

anumită probabilitate de formare a rebutului recuperabil sau irecuperabil. Acest fapt nu este admis dacă fabricația nu este de serii mari și în condițiile pieselor cu structuri dimensionale complexe prelucrate pe mașini-unelte CNC.

Metoda de analiză dimensională bazată pe compensarea erorilor.

Utilizarea metodei de maximum și minimum nu este satisfăcătoare, deoarece precizia asigurată este estimată la nivel mai jos decât cea reală. Altfel spus, pentru cotele - elemente ale lanțurilor dimensionale se stabilește o precizie de prelucrare mai înaltă decât este necesar în realitate. Acest fapt are loc datorită efectelor de compensare a erorilor de care nu se ține cont [22].

Esența compensării erorilor. Compensarea erorilor se produce în structuri dimensionale constituite de cel puțin două cote tehnologice interdependente în proces de formare. Această interdependență a dimensiunilor tehnologice poate fi explicată prin faptul că în structura toleranțelor cotelor tehnologice componente există erori de prelucrare - vectori cu aceeași direcție (cedarea elastică, uzura sculelor, orientarea etc.). În consecință, un element, care în conformitate cu structura lanțului dimensional este de mărire pentru elementul de închidere (fig. 2.3, a), prin unele componente ale toleranței sale tehnologice este de mărire, iar prin altele, din contra, este de micșorare, și invers (fig. 2.3, c). În astfel de situații, lanțul dimensional tehnologic nu mai este omogen din motiv că influențele componentelor sale nu sunt strict de mărire sau strict de micșorare. Prezența în lanțurile dimensionale a unor elemente cu influență contradictorie modifică modalitatea de cumulare a erorilor – o parte din erori se compensează reciproc [22].

Metoda de maximum și minimum prevede că toleranța cotei-element de închidere ω_A cumulează toleranțele elementelor componente. Prezența în structura toleranței a elementului L (de micșorare, fig. 2.3, a) a erorilor cu efecte de mărire provoacă apariția fenomenului de compensare a erorilor $\overrightarrow{\omega_L^c}$ și $\overrightarrow{\omega_M^c}$. Compensarea se produce numai la mărirea componentelor cu efect comun al ambelor elemente și reprezintă valoarea minimă a celor două erori compensabile ale cotelor M și L [22]:

$$\omega^c = \text{Min}\{\omega_M^c, \omega_L^c\}. \quad (2.1)$$

Astfel, toleranța elementului de închidere va fi determinată din relația:

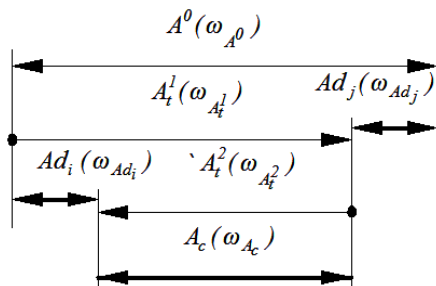


Fig. 2.2. Structuri dimensionale tehnologice în care adaosurile de prelucrare sunt elemente de închidere [21]

$$\omega_{\Delta}^c = \omega_M + \omega_L - 2 \cdot \omega^c. \quad (2.2)$$

Compensarea erorilor modifică valoric câmpul de toleranță al elementului de închidere, deplasându-l față de poziția ce corespunde metodei de maximum și minimum (fig. 2.3, c) pe direcția vectorului sumar compensatoriu la distanța $\vec{\delta} = \vec{\omega}^c$.

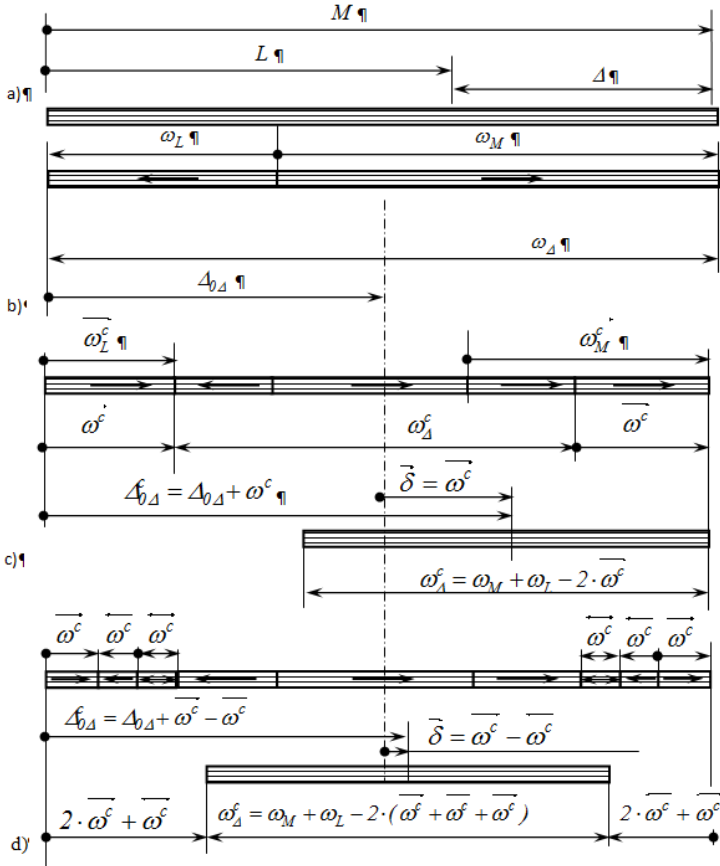


Fig. 2.3. Mecanismul de compensare a erorilor prin modificarea mărimii câmpului de toleranță al elementului de închidere și a poziției acestuia [22]

Compensarea erorilor pentru adaosuri de prelucrare. Este bine cunoscut că analiza dimensională pentru suprafețele de revoluție (calculul adaosurilor de prelucrare și a dimensiunilor intermediare) la fazele succesive $i-1$ și i se face în variante diferite în situațiile când precizia este asigurată individual $\omega_{Ad} = \omega^{i-1} + \omega^i$ (dimensiuni considerate independente reciproc la formare) și când precizia este asigurată automat pe mașini-unelte reglate din timp $\omega_{\Delta} = \omega^{i-1} - \omega^i$ (dimensiuni formate interdependent în baza legii copierii erorilor).

Deosebirea constă în modalitatea calculării valorii toleranței adaosului de prelucrare - element de închidere al lanțului dimensional tehnologic ca sumă a toleranțelor cotelor tehnologice succesive și ca diferență a acestora. În cea de a doua situație se consideră că cedarea elastică a sistemului tehnologic are efect dominant, fapt demonstrat de practica industrială.

Formarea interdependentă a cotelor tehnologice și compensarea erorilor, de fapt, reflectă același fenomen de autoorganizare sau de sinergetică internă a procesului de prelucrare în aspectul sau dimensional. Toleranța elementului de închidere al lanțului dimensional în variantele compensării erorilor și, respectiv, manifestării legii copierii erorilor este determinată din relațiile:

$$\begin{aligned}\omega_{Ad} &= \omega^{i-1} + \omega^i - 2\omega^c; \\ \omega_{Ad} &= \omega^{i-1} - \omega^i.\end{aligned}\quad (2.3)$$

Rezultatele obținute din abordările bazate pe efectele de compensare și pe legea copierii erorilor vor fi identice dacă $\omega^{i-1} - \omega^i = \omega^{i-1} + \omega^i - 2 \cdot \omega^c$, adică $\omega^c = \omega^i$. Din figura 2.4 se poate observa că pot fi considerate compensabile erorile provocate de cedarea elastică ε^{cedare} , de uzură ε^{uzura} și de instalare ε^{instal} atât pentru cotele succesive ale suprafețelor de revoluție, cât și ale suprafețelor frontale. Astfel, calculul toleranțelor adaosurilor de prelucrare și la prelucrarea suprafețelor plane se poate realiza conform relației $\omega_{Ad} = \omega^{i-1} - \omega^i$.

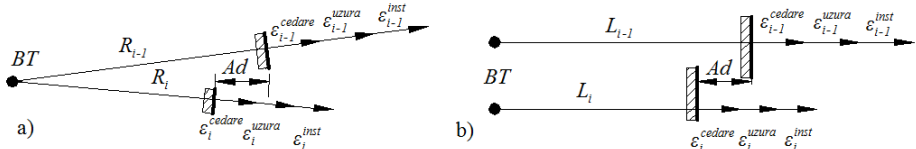


Fig. 2.4. Erori compensabile la calculul toleranțelor adaosurilor de prelucrare:
a) pentru suprafețele de revoluție; b) pentru suprafețele plane.

Compensarea erorilor cotelor tehnologice în structurile dimensionale.

Efectele de compensare a erorilor se manifestă și în cazul cotelor liniare între suprafețele plane, cu normalele orientate în aceeași direcție. Cota liniară poate fi element de închidere (fig. 2.5) sau următoarea cotă în lanț (fig. 2.6). În ambele cazuri, compensarea se produce cu valoarea sumei domeniilor comune:

$$\begin{aligned}&\text{Min}\{\varepsilon_L^{cedare}; \varepsilon_M^{cedare}\}, \\ &\text{Min}\{\varepsilon_L^{uzura}; \varepsilon_M^{uzura}\},\end{aligned}$$

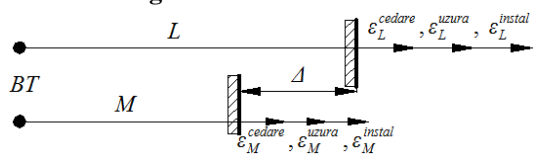


Fig. 2.5. Erori compensabile la formarea cotei
- element de închidere Δ

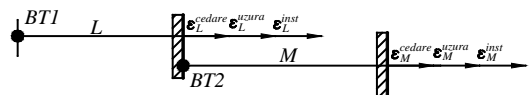


Fig. 2.6. Erori compensabile la formarea
cotelor tehnologice în lanț

$Min\{\varepsilon_L^{inst}; \varepsilon_M^{inst}\}$. Pentru cotele liniare are loc compensarea erorilor, dar nu este posibilă în valoarea $\omega^c = \omega_i$, astfel încât se pot lua în considerare următoarele relații:

$$\omega_\Delta = Max\{\omega_L; \omega_M\} - u \cdot Min\{\omega_L; \omega_M\} \quad (2.4)$$

$$\omega_M = Max\{\omega_L; \omega_M\} - u \cdot Min\{\omega_L; \omega_M\} \quad (2.5)$$

Respectiv, pentru cota tehnologică - element de închidere (fig. 2.5) și pentru cota tehnologică următoare în lanț (fig. 2.6). Aici u reprezintă ponderea erorilor compensate în structura câmpului de toleranță al cotei analizate.

Astfel, se poate afirma că precizia de prelucrare pentru elementul de închidere a lanțurilor dimensionale sau pentru cota tehnologică formată în lanț este estimată în raport cu cea reală ca una mai joasă prin metoda de maximum și minimum, ca una mai înaltă prin metoda bazată pe legea copierii erorilor și ca soluție exactă prin metoda compensării erorilor.

3. FORMAREA PRECIZIEI ÎN STRUCTURILE DIMENSIONALE TEHNOLOGICE

Structurile, în general, și cele dimensionale se impun cu propriile proprietăți și influențe asupra componentelor proprii, inclusiv în aspect de precizie. Rezultatele principale obținute în capitolul 3 constau în următoarele:

- stabilirea faptului că în procesul unui act elementar de prelucrare (faza tehnologică) crește precizia cotei tehnologice-țintă și simultan scade precizia cotelor asociate celei țintă; acest fapt este pus la baza urmăririi evoluției preciziei cotelor în metodologia de analiză dimensională elaborată;

- odată cu dezvoltarea sistemelor tehnologice CNC atât structurile dimensionale constructive, cât și cele tehnologice devin mai complexe, iar interdependența acestora la proiectarea tehnologică devine mai simplă datorită transformării morfologice a sistemului tehnologic.

- formularea optimalității structurii dimensionale tehnologice prin aplicarea principiului similitudinii cu structurile dimensionale ale piesei, semifabricatului și sistemului tehnologic.

Formarea preciziei cotelor tehnologice. Suprafețele piesei de prelucrat în cadrul operației (instalării) tehnologice pot fi de două tipuri: suprafețe neprelucrate (o parte dintre acestea pot servi în calitate de baze tehnologice) și suprafețe prelucrate. Prelucrările modifică trei mulțimi de relații dimensionale [23, 24]:

- dintre suprafețele-baze tehnologice și suprafețele prelucrate - cotele tehnologice-țintă;

- dintre suprafețele neprelucrate în cadrul operației și suprafețele prelucrate - cotele asociate cotelor tehnologice-țintă;

- dintre suprafețe prelucrate în cadrul operației (situațional pot fi cote tehnologice-țintă sau cote asociate cotelor-țintă).

Precizia cotelor-țintă dintre suprafețele prelucrate și bazele tehnologice este determinată nemijlocit de precizia sistemului tehnologic ST (cota A , fig. 3.1).

Precizia cotelor asociate celor tehnologice-țintă este în scădere, toleranța acestora crește cu toleranța adaosului de prelucrare îndepărtat (cota R , fig. 3.1):

$$\omega_{R_t^i} = \omega_{R_t^{i-1}} + \omega_{Ad_i} \quad (3.1)$$

Optimalitatea structurilor dimensionale elementare. Dacă cota constructivă $B_c(T_{Bc})$ este formată numai prin propria cotă tehnologică $B_t(\omega_{Bt})$, atunci situația se consideră optimală și $B_c = B_t$, $T_{Bc} = \omega_{Bt}$ sau $T_{Bc} = \omega_{Bt} - 2 \cdot \omega_{Bt}^c$, dacă se manifestă efecte de compensare a erorilor (fig. 2.1, a) [21].

Dacă la formarea cotei constructive $F_c(T_{Fc})$ lanțul dimensional se închide cu propria cotă tehnologică și cu o altă cotă istorică deja existentă, atunci precizia cotei constructive se realizează neoptimal datorită creșterii cerințelor de precizie față de cotele tehnologice care alcătuiesc lanțul dimensional (fig. 2.1, b). Astfel, $F_c = F_t + E_t$, $T_{Fc} \geq \omega_{Ft} + \omega_{Et}$ sau în varianta cu compensarea erorilor: $T_{Fc} \geq \omega_{Ft} - 2 \cdot \omega_{Ft}^c + \omega_{Et} - 2 \cdot \omega_{Et}^c$ [21].

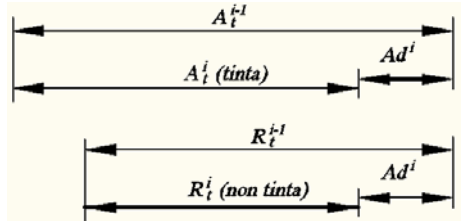


Fig. 3.1. Efectul de scădere a preciziei cotelor non-țintă asociate cu suprafața prelucrată prin eliminarea adaosului

Optimalitatea structurilor dimensionale tehnologice complexe. Utilizarea analizei dimensionale a simplificat foarte mult sarcina de proiectare a tehnologiilor mecanice, eliminând nevoia de teste repetabile în fabricație [22, 23, 25]. Acestea din urmă au fost înlocuite cu calcule repetitive, deși o astfel de sinteză a tehnologiilor de prelucrare este un proces destul de complicat din cauza numărului mare de parametri dimensionali. Soluția modernă a problemelor de optimizare se realizează în cadrul conceptului de inginerie concurențială, dezvoltând proiecte acceptabile și coordonate reciproc ale structurilor semifabricatelor, pieselor, proceselor tehnologice și ale sistemelor tehnologice (fig. 3.2).

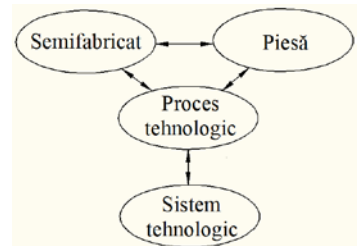


Fig. 3.2. Sistem de optimizare tehnologică

Aceste patru obiecte menționate au caracter specific individual, se dezvoltă în conformitate cu esența lor fizică, dar formează un sistem prin stabilirea legăturilor de influență reciprocă. Modificarea unuia dintre aceste obiecte neapărat va conduce la modificări în celelalte trei obiecte. Soluția optimă pentru oricare obiect este cea unică de preferat în raport cu altele, pornind de la o anumită condiționare determinată și de celelalte obiecte.

Dacă tehnologia de prelucrare mecanică dezvoltată conține mai multe operații (instalări), atunci se formează structuri dimensionale parțiale separate prin prelucrări de la mai multe baze tehnologice BT_i , care, eventual, coincid cu bazele constructive

($BT \equiv BC$) (fig. 3.3). Structura dimensională a piesei în întregime este formată prin „asamblarea” structurilor dimensionale parțiale $SD_1, SD_2, SD_3, SD_4, SD_n$ prin intermediul dimensiunilor dintre bazele tehnologice $SD_{12}, SD_{23}, SD_{34}, SD_{4n}$ într-un singur întreg.

În cazul tehnologiilor de prelucrare mecanică cu multe operații (instalări) cu formarea structurilor dimensionale parțiale separate prin prelucrare de la o singură bază tehnologică respectarea principiului orientării invariante poate îmbunătăți semnificativ procesul de „asamblare” a structurilor dimensionale parțiale ($SD_1, SD_2, SD_3, SD_4, SD_n$) într-un întreg. Cu toate acestea, erorile de fixare a instalărilor repetate afectează precizia (fig. 3.4).

Utilizarea mașinilor CNC și a centrelor de prelucrare este justificată la fabricarea pieselor cu structuri dimensionale complexe prin procese tehnologice cu minimum de operații și instalări. Structurile dimensionale parțiale formate sunt constituite din mai multe dimensiuni (fig. 3.5). În afara complexității dimensionale înalte, piesele în fabricile moderne se produc în serii tot mai mici și în condiții de garanții tot mai înalte de precizie dimensională. Astfel, tehnologiile dezvoltate urmează a fi dimensional garantate, adică robuste. O recuperare a unei oarecare dimensiuni devine problematică.

Sinteza structurilor dimensionale tehnologice complexe optime. Pornind de la condițiile de optimalitate a structurilor dimensionale elementare și de la faptul că sistemul tehnologic are structură dimensională morfologic transformabilă, că structura dimensională a semifabricatului poate fi în variante alternative și numai structura dimensională a piesei este integră și unic definită, se poate trage concluzia că o structură dimensională integră a procesului tehnologic este optimală dacă este asemănătoare (similară) cu structurile dimensionale constructive ale piesei și

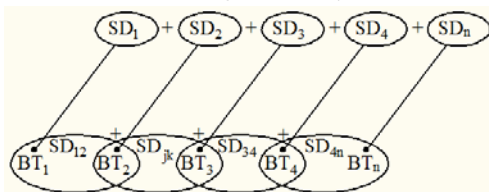


Fig. 3.3. Formarea structurii dimensionale (SD) a piesei prin instalări de la o serie de baze tehnologice (BT) [21]

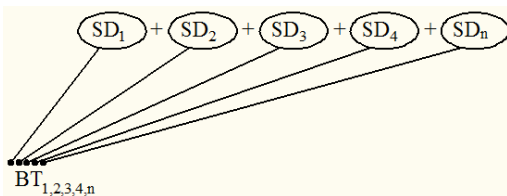


Fig. 3.4. Formarea structurii dimensionale (SD) a piesei prin reinstalări de la aceeași bază tehnologică (BT) [21]

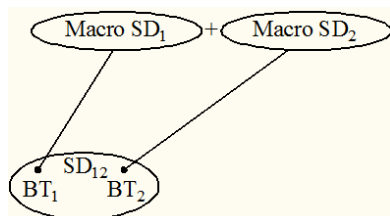


Fig. 3.5. Formarea structurii dimensionale (SD) a piesei prin instalări de la un număr mic de baze tehnologice (BT)

semifabricatului și este asigurată pe deplin de o structură dimensională a sistemului tehnologic tot similară (fig. 3.6).

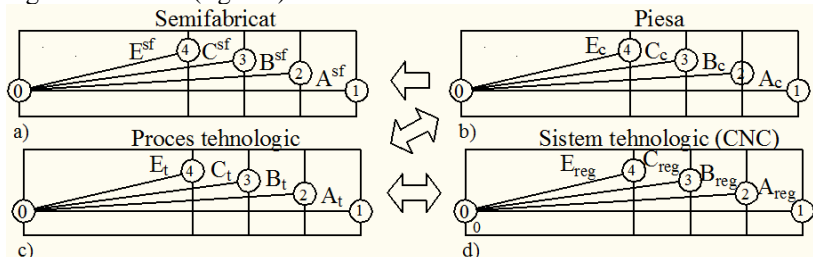


Fig. 3.6. Similitudinea structurilor dimensionale ale semifabricatului, piesei, sistemului tehnologic CNC și procesului tehnologic

Sinteza structurii dimensionale tehnologice începe cu reprezentarea structurii dimensionale constructive a piesei în formă de graf al relațiilor dimensionale liniare constructive. În baza acestui graf se elaborează graful relațiilor dimensionale tehnologice, respectând principiul similitudinii grafurilor, principiu ce asigură optimalitatea structurilor dimensionale tehnologice elementare (fig. 2.1, a) [21, 26, 27]. Astfel, fiecare cotă constructivă poate fi formată prin propria cotă tehnologică ($A_c \equiv A_t$, $B_c \equiv B_t$, $C_c \equiv C_t, \dots$). Urmează verificarea suportului tehnologic, adică, dacă graful relațiilor dimensionale tehnologice include structuri dimensionale ce pot fi create de către sistemul tehnologic prin transformare morfologică. Necesară este și dimensionarea semifabricatului similar piesei.

Următoarea etapă este sinteza structurilor dimensionale tehnologice pe instalări, respectând principiul similitudinii (fig. 3.7). Instalarea este acea entitate a procesului tehnologic, la care se formează structurile dimensionale complexe din elemente primare. În cadrul instalărilor se stabilesc relațiile dintre dimensiunile tehnologice formate, toleranțele acestora și toleranțele adaosurilor de prelucrare. Tot în cadrul instalărilor se manifestă mai stabil efectele benefice ale compensării erorilor pentru precizia de prelucrare.

Una dintre problemele principale ale instalării reprezintă alegerea schemei de orientare și fixare. În graful relațiilor dimensionale tehnologice bazele tehnologice reprezintă un început de înlanțuire - bifurcare a cotelor tehnologice formate și asigurate de sistemul tehnologic CNC. Grafurile relațiilor dimensionale liniare constructive au capacitatea de a sugera cele mai corecte soluții în acest sens. Graful reprezentat ca exemplu în figura 3.6 are doi poli, 0 și 1, corelați prin dimensiunea A_c . Suprafețele 0 și 1 pot și trebuie să fie utilizate în calitate de baze tehnologice de instalare cu acțiune pe direcția formării cotelor tehnologice.

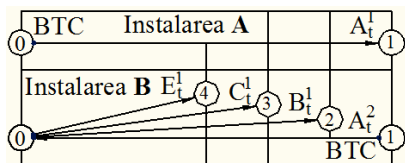


Fig. 3.7. Constuirea structurilor dimensionale pe instalări respectând principiul similitudinii

4. STRUCTURI DIMENSIONALE TEHNOLOGICE OPTIME

Rezultatele principale obținute în capitolul 4 constau în următoarele:

- stabilirea efectului structural de creștere a toleranțelor adaosurilor de prelucrare în structurile dimensionale tehnologice și de descreștere a gradului de asigurare tehnologică a preciziei;
- stabilirea modului de alegere a bazei tehnologice astfel, încât structurile dimensionale tehnologice parțiale pe instalări au număr de componente în lanțuri egale sau aproape egale, fapt ce asigură cele mai mici efecte de creștere a toleranțelor adaosurilor de prelucrare;
- stabilirea modului de alocare a toleranțelor de prelucrare la nivelul capacității de precizie a sistemului tehnologic, fapt ce exclude evaluarea în exces a toleranțelor adaosurilor de prelucrare;
- formularea optimalității structurilor dimensionale tehnologice complexe în condiția că fiecare cotă tehnologică este formată în limitele intervalului de optimalitate definit empiric și fizico-tehnic obiectiv pentru structuri dimensionale elementare prin cuplul de toleranțe al cotei tehnologice și ale adaosului de prelucrare;
- demonstrarea posibilității de optimizare a structurilor dimensionale tehnologice complexe prin redimensionarea constructivă echivalentă.

Scenarii optime de prelucrare. Din punct de vedere geometric, similitudinea grafurilor relațiilor dimensionale constructive și tehnologice reflectă optimalitatea structurală elementară – o cotă constructivă se formează printr-o serie de cote tehnologice proprii [28].

Toleranțele cotelor tehnologice pe parcursul prelucrărilor se modifică situațional, descresc dacă cota respectivă este cotă-țintă și cresc dacă aceasta este cotă non-țintă și se modifică asociat cu formarea altei cote-țintă. Creșterea toleranțelor cotelor non-țintă este cu atât mai mare cu cât acestea au un număr de ordine mai mare, pornind de la baza tehnologică. Cotele non-țintă devin, în cele din urmă, cote tehnologice-țintă și sunt formate la precizia cerută. Faptul că pe parcurs cotele non-țintă au avut toleranțe mari duce la necesitatea înlăturării adaosurilor de prelucrare cu toleranțe mari. Figura 4.1 ilustrează faptul că toleranțele adaosurilor de prelucrare însumează (metoda de maximum și minimum) toleranțele tuturor cotelor tehnologice, pornind de la baza tehnologică la fazele precedente și actuale [21, 27]. Cea mai dezavantajoasă situație se manifestă în primele faze tehnologice aplicate pe semifabricat (starea 0, fig. 4.1).

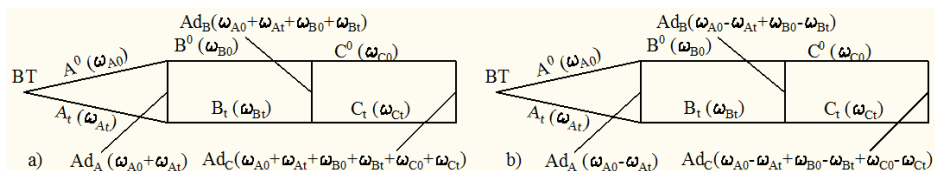


Fig. 4.1. Creșterea valorilor toleranțelor adaosurilor de prelucrare la formarea cotelor tehnologice în lanț evaluată prin metodele: a) de maximum și minimum, b) de maximum și minimum cu compensarea erorilor.

Fenomenul compensării erorilor reduce din creșterea toleranțelor cotelor tehnologice non-țintă și din creșterea toleranțelor adaosurilor de prelucrare și permite o evaluare mai corectă a asigurării tehnologice a preciziei de prelucrare (fig. 4.1, b).

O structură tehnologică în formă de graf al relațiilor dimensionale liniare (fig. 4.2, a) poate fi descompusă în variante pentru prima instalare A, utilizând în calitate de primă bază tehnologică (BTC) suprafața frontală 1 (fig. 4.2, b) sau suprafața frontală 8 (fig. 4.2, c) [28, 26]. E de preferat cea de a doua variantă, deoarece în lanțuri vor fi numai câte 2 cote tehnologice și la prelucrarea suprafeței 4 toleranța adaosului va fi $Ad_4(\omega_{G^I} + \omega_{G^2} + \omega_{C^0} + \omega_{C^I})$. Dacă se alege prima variantă (fig. 4.3, b), cel mai lung

lanț va include 3 componente și la prelucrarea suprafeței 5 toleranța adaosului va avea mai multe componente: $Ad_5(\omega_{G^0} + \omega_{G^I} + \omega_{D^0} + \omega_{D^I} + \omega_{F^0} + \omega_{F^I})$. Se poate

constata că în calitate de primă bază tehnologică de contact se alege suprafața (nodul în graful relațiilor dimensionale liniare tehnologice) care divizează cel mai lung lanț în părți egale sau aproape egale.

Dacă numărul de elemente în lanțurile posibile sunt egale, atunci în calitate de primă bază tehnologică de contact se va lua nodul din graful relațiilor dimensionale liniare tehnologice prin care se formează lanțul cu cea mai mare sumă a toleranțelor pe semifabricat. Se va lua în calcul și precizia ultimelor cote tehnologice din lanțuri. Anume la formarea acestor cote se manifestă cele mai mari toleranțe ale adaosurilor de prelucrare, fapt ce nu favorizează asigurarea tehnologică a preciziei. Important este și numărul de lanțuri. Astfel, în calitate de primă bază tehnologică de contact se va lua nodul din graful relațiilor dimensionale liniare tehnologice prin care se formează cele mai multe lanțuri. Criteriile de alegere a primei baze tehnologice menționate nu întotdeauna pot fi simultan aplicate. Așadar, criteriile date sunt direcții de analiză și numai analiza dimensională a variantelor poate da rezultatul optim.

Alocarea toleranțelor de prelucrare la nivelul capacității de precizie a sistemului tehnologic. Criteriul de optimalitate a structurii dimensionale elementare (fig. 2.1, a) impune cerința ca toleranța cotei tehnologice să fie mai mică sau egală cu toleranța cotei constructive $\omega_i \leq T_c$, fiind preferată în procesul analizei situația $\omega_i = T_c$. La dimensionarea constructivă a pieselor există situații când cota liniară dintre două suprafețe frontale este specificată la precizie joasă (uneori extrem de joasă). Sistemul tehnologic este un sistem determinist, astfel încât toleranțele cotelor

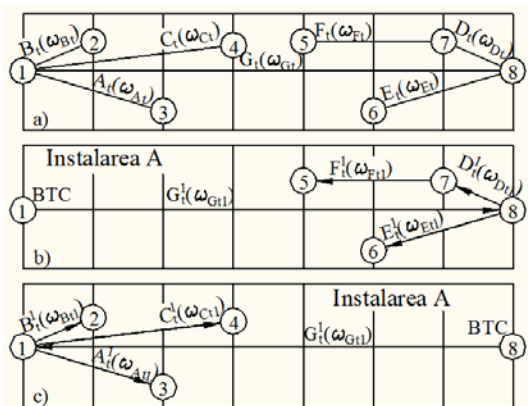


Fig. 4.2. Descompunerea structurii dimensionale tehnologice a) în variante b) și c) de structuri pentru instalarea A

tehnologice vor fi cele real asigurate și nu cele legate de toleranțele cotelor constructive $\omega_t = \omega_t^{real} < T_c$. În acest mod, toleranțele adaosurilor de prelucrare vor fi determinate adecvat și fără creșteri neargumentate.

Optimalitatea structurilor dimensionale tehnologice. Datele statistice referitoare la precizia de prelucrare incluse în îndrumare se referă la structurile dimensionale elementare (fig. 4.3). Argumentarea experimentală se face prin prelucrări de la baza tehnologică BT cu formarea dimensiunii

$L^I(\omega_{L^I})$ din dimensiunea $L^0(\omega_{L^0})$. Din

lanțul dimensional elementar prezentat se poate trage concluzia că avansarea în precizie $\omega_{L^0} \rightarrow \omega_{L^I}$ este limitată de creșterea toleranței adaosului de prelucrare $(\omega_{L^0} + \omega_{L^I})$. Legătura cuplului limita empirică fizico-tehnică a toleranței cotei

tehnologice (ω_{L^stat}) – limita empirică fizico-tehnică a toleranței adaosului de prelucrare (ω_{Ad^stat}) reprezintă intervalul de optimalitate (fig. 4.4). Astfel, intervalul de optimalitate are caracter fizico-tehnic obiectiv independent structural.

O structură dimensională tehnologică complexă este considerată optimă dacă fiecare cotă tehnologică este formată cu precizia și cu toleranța adaosului de prelucrare în limitele intervalului de optimalitate definit empiric și fizico-tehnic pentru structurile dimensionale elementare [21, 27].

În structurile dimensionale complexe se manifestă două fenomene: creșterea "structurală" a toleranței adaosurilor de prelucrare și simultan descreșterea acestora prin efectul de compensare a erorilor (rezultatul însumat - creșterea) și descreșterea "structurală" a toleranțelor cotelor tehnologice și creșterea acestora prin efectul de compensare a erorilor. Efectele structurale pot fi minore și nu afectează procesul de asigurare a preciziei cotelor tehnologice dacă $\omega_L^{lim} < \omega_L < T_L$ și $\omega_{Ad} < \omega_{Ad}^{lim}$; pot fi majore sau din

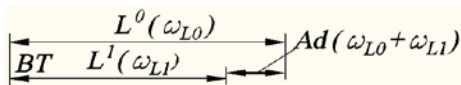


Fig. 4.3. Formarea legăturii toleranța cotei tehnologice-toleranța adaosului de prelucrare

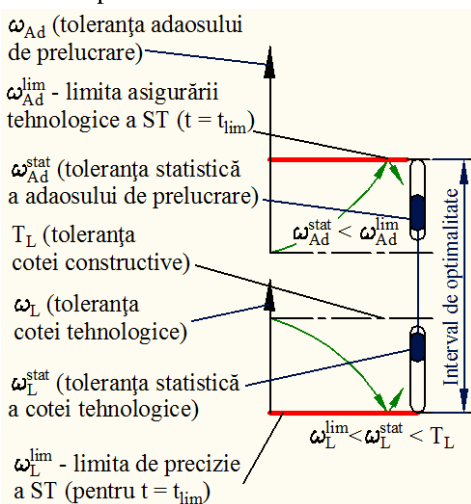


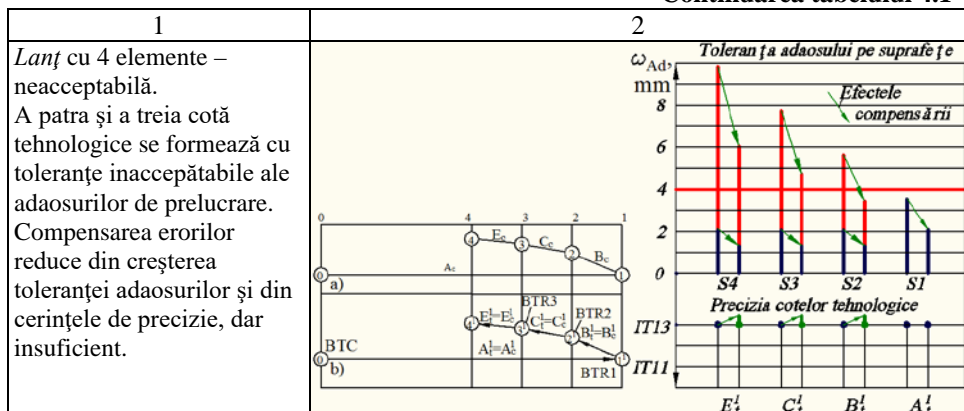
Fig. 4.4. Interdependența toleranța statistică a cotei tehnologice – toleranța statistică a adaosului de prelucrare pentru structura dimensională tehnologică elementară

cauza creșterii inadmisibile a toleranței adaosurilor de prelucrare $\omega_{Ad} > \omega_{Ad}^{lim}$, sau din cauza creșterii inadmisibile a preciziei de prelucrare $\omega_L < \omega_L^{lim}$, sau din ambele cauze simultan (fig. 4.4).

Gradul de optimalitate a structurilor dimensionale tehnologice bazate pe similitudinea cu structurile dimensionale constructive. Pentru compararea în valori numerice au fost analizate mai multe structuri dimensionale ale unei serii de suprafețe frontale 1, 2, 3 și 4 cu coordonatele de poziționare în raport cu suprafața 0 respectiv la 200, 150, 100 și 50 mm. Intervalul de optimalitate este definit ca limită a toleranței adaosului de prelucrare de 4 mm (condiție-limită la strunjirea cu viteză mare, compania Seco Tools) și treapta de precizie 11.5 (convențional). Caracteristicile structurilor dimensionale tehnologice sunt date în tabelul 4.1 [21, 26, 27, 29].

Tabelul 4.1. Caracteristica de optimalitate a unor structuri tehnologice

Caracteristica structurii dimensionale	Structuri dimensionale constructivă, tehnologică și efectele structurale tehnologice
1	2
<p><i>Evantai - optimală.</i> Orice cotă tehnologică este unică în lanț și se formează cu precizie statistică. Compensarea erorilor duce la micșorarea toleranței adaosurilor.</p>	<p>Toleranța adaosului pe suprafețe Efectele compensării</p> <p>Precizia cotelor tehnologice</p>
<p><i>Evantai deplasat - acceptabilă.</i> Orice cotă tehnologică este a doua în lanț. Efecte structurale de creștere a toleranței adaosului de prelucrare. Compensarea erorilor reduce din creșterea toleranței adaosurilor și din cerințele de precizie.</p>	<p>Toleranța adaosului pe suprafețe Efectele compensării</p> <p>Precizia cotelor tehnologice</p>
<p><i>Evantai-lanț cu 3 elemente - acceptabilă.</i> A treia cotă tehnologică din lanț se formează cu toleranța adaosului marită structural. Compensarea erorilor reduce din creșterea toleranței adaosurilor și din cerințele de precizie.</p>	<p>Toleranța adaosului pe suprafețe Efectele compensării</p> <p>Precizia cotelor tehnologice</p>



Optimizarea structurilor dimensionale tehnologice prin redimensionarea constructivă. Proiectul tehnologic poate fi îmbunătățit prin redimensionarea constructivă acceptată sau redimensionarea constructivă echivalentă. Unul dintre motivele redimensionării constructive constă în neasigurarea tehnologică a preciziei de prelucrare din cauza toleranțelor mari ale adaosurilor de prelucrare [21, 26, 27, 29]. Piesa este redimensionată altfel în variante cu recalcularea toleranțelor și abaterilor-limită ale noilor cote constructive cu evaluarea efectelor tehnologice. Valorice și în toleranțe vechile cote constructive rămân intacte. Faptul că se testează diferite variante de redimensionare permite să se stabilească așa-numitele precedente tehnologice optime și precedentele constructive recomandate în calitate de optime. Redimensionarea constructivă echivalentă prevede similitudinea structurilor dimensionale constructive și tehnologice noi, astfel încât structura dimensională constructivă veche și structura dimensională tehnologică nouă nu mai sunt similare. Deoarece orice redimensionare constă în înlocuirea unei cote cu altele două sau cu mai multe, cota înlocuită, fiind element de închidere, se manifestă creșterea preciziei cotelor componente. Astfel, redimensionarea constructivă echivalentă se face în scopul micșorării toleranțelor adaosurilor de prelucrare datorită creșterii preciziei prelucrărilor (fig. 4.5).

Pentru o structură dimensională constructivă în lanț au fost analizate câteva variante de redimensionare echivalentă și efectele structurale. Se constată că prin redimensionarea constructivă echivalentă pot fi create structuri dimensionale tehnologice cu parametri în limitele intervalului de optimalitate. În figura 4.6 se observă ca variantele 1 și 2 ale structurilor dimensionale tehnologice nu pot fi acceptate din cauza depășirii limitei toleranței adaosului de prelucrare (suprafețele 3 și 4) și, respectiv, din cauza depășirii limitei de precizie (suprafețele 1 și 2). Varianta 3 poate fi considerată optimală, deoarece se înscrie în intervalul de optimalitate.

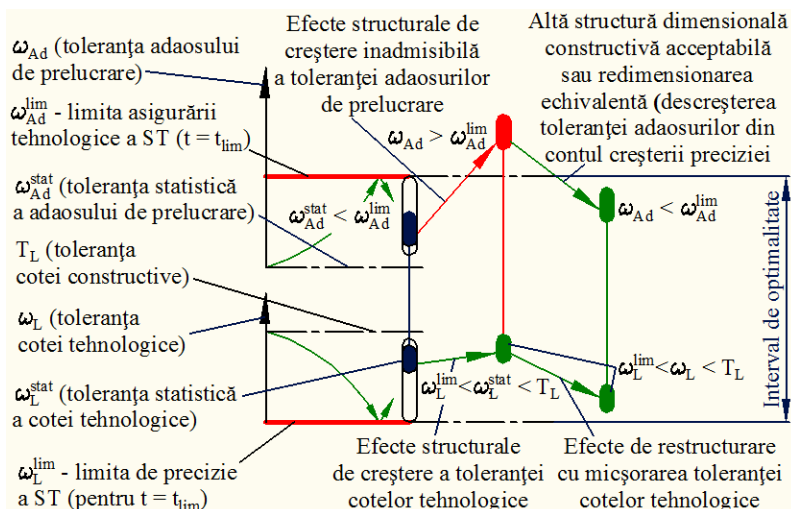


Fig. 4.5. Îmbunătățirea proiectului tehnologic prin redimensionarea constructivă

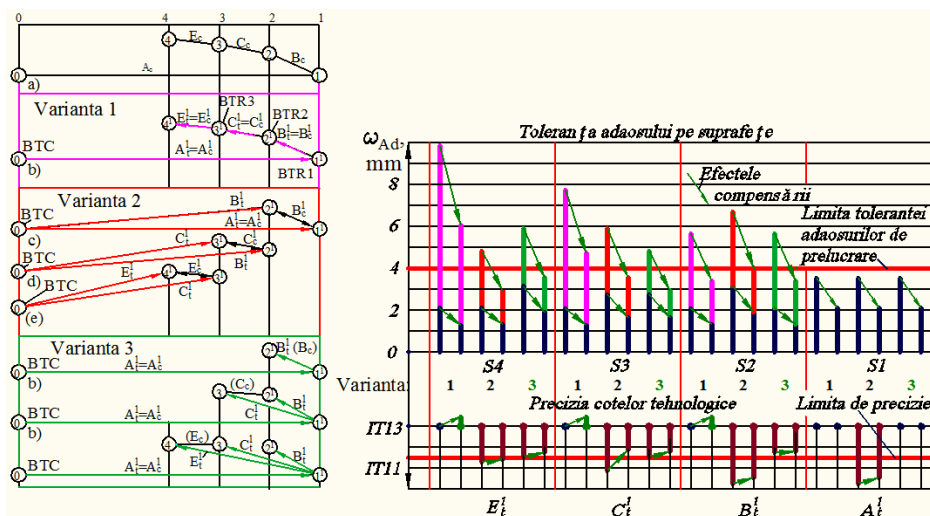


Fig. 4.6. Efectele redimensionării constructive echivalente asupra optimalității structurilor dimensionale tehnologice

CONCLUZII ȘI RECOMANDĂRI

Concluzii. În urma cercetărilor efectuate pot fi formulate următoarele concluzii:

1. Pentru a asigura robustețea soluțiilor tehnologice a fost elaborată metodologia de analiză dimensională bazată pe luarea în considerare a efectelor de

compensare a erorilor. Au fost analizate sursele și situațiile de compensare a erorilor, au fost demonstrate efectele de diminuare a toleranțelor adaosurilor de prelucrare de 1.5–1.7 ori și a toleranțelor dimensiunilor liniare cu 15–20% în raport cu cele determinate prin metoda de maximum și minimum [21, 22].

2. Metoda dezvoltată de rezolvare a sistemelor complexe de lanțuri dimensionale tehnologice caracteristice centralizării prelucrărilor pe mașini-unelte CNC este bazată pe monitorizarea formării toleranțelor cotelor tehnologice-țintă, cotelor asociate, a adaosurilor de prelucrare și manifestării situaționale a efectelor de compensare a erorilor. S-a constatat că interdependența este caracteristică întregului proces tehnologic, astfel orice cotă tehnologică formată este pasibilă influenței de către toate cotele deja formate, elementele de legătură creditare fiind cotele asociate celor țintă și adaosurile de prelucrare [28].

3. Structurile dimensionale tehnologice optime se creează prin mecanismul bazat pe influența și adaptabilitatea reciprocă a structurilor dimensionale ale obiectelor: piesă, proces tehnologic, sistem tehnologic, semifabricat. Criteriul de bază propus este similitudinea structurilor dimensionale ale acestor patru obiecte. Structura dimensională tehnologică reprezentată prin graful relațiilor dimensionale tehnologice liniare este considerată optimă, dacă este similară grafului relațiilor dimensionale constructive ale piesei de prelucrat și este asigurată de structura dimensională a sistemului tehnologic situațional adaptabilă până la similitudine. Semifabricatul optim este, eventual, dimensionat similar piesei. Similitudinea structurilor dimensionale reflectă primul pas de optimalitate la nivel de elemente structurale [21, 28, 29].

4. Optimalitatea procesului tehnologic se bazează pe optimalitatea elementelor sale. Faza tehnologică este dimensional optimă dacă o unică cotă tehnologică-țintă definește o cotă constructivă, iar lanțul tehnologic elementar include două cote tehnologice (precedentă și următoare) intermediare de adaosul de prelucrare îndepărtat. Structura dimensională a fazei tehnologice este caracterizată de cuplul de toleranțe al cotei tehnologice formate și al adaosului de prelucrare înlăturat, cuplu ce determină atât precizia, cât și condițiile de asigurare a preciziei. În componența instalării, o fază tehnologică geometric optimă poate să nu mai fie optimă, deoarece mărimea toleranței adaosului de prelucrare cumulează toleranțele tuturor cotelor tehnologice-țintă, inclusiv a cotei la formarea căreia participă, pornind de la baza tehnologică [21, 26, 27, 29].

5. Crearea structurilor dimensionale pe instalări și grupe de faze tehnologice se face prin secvențierea structurii dimensionale tehnologice întregi și transformarea acestora într-o serie de structuri complementare. Secvențierea optimă se produce prin definirea bazelor tehnologice inițiale de proces, care divizează lanțurile dimensionale lungi în părți componente cât mai echilibrate ca lungime [21, 26, 27, 28]. La dimensionarea constructivă a pieselor, dar și la proiectarea tehnologică se va ține cont de precedentele tehnologice deja aprobate.

6. În structurile dimensionale tehnologice complexe se manifestă două fenomene: creșterea "structurală" a toleranței adaosurilor de prelucrare și simultan descreșterea acestora prin efectul de compensare a erorilor (rezultatul însumat - creșterea) și descreșterea "structurală" a toleranțelor cotelor tehnologice și creșterea

acestora prin efectul de compensare a erorilor. Efectul acestor fenomene deseori duce la asigurarea tehnologică insuficientă a preciziei. Soluția rezidă în redimensionarea constructivă a piesei într-o altă variantă funcțional acceptabilă sau în redimensionarea constructivă echivalentă valabilă în limitele proiectului tehnologic. O structură dimensională tehnologică complexă este considerată optimală dacă fiecare cotă tehnologică este formată cu precizia și cu toleranța adaosului de prelucrare în limitele intervalului de optimalitate definit empiric fizico-tehnic pentru structurile dimensionale elementare [21, 26, 27].

Recomandări. Cercetările structurilor dimensionale tehnologice realizate în cadrul tezei de doctor permit formularea unei serii de recomandări practice.

- Se recomandă ca dimensiunile critice la proiectarea constructivă de ansamblu să formeze structuri dimensionale constructive de tip "evantai", "evantai deplasat" sau "lanț" cu un număr cât mai mic posibil (3-4) de elemente în orice lanț. Este preferat un număr mai mic de cote în lanț în cazul lanțurilor de precizie mai înaltă.

- Se recomandă ca precizia dimensiunilor libere sau necritice ale pieselor să fie reglementate prin sintagma "la nivelul preciziei economice a mașinii-unelte CNC".

- Pentru a forma o structură dimensională tehnologică optimală se recomandă ca aceasta să fie similară cu structurile dimensionale constructive ale piesei și semifabricatului și să fie asigurată pe deplin de o structură dimensională a sistemului tehnologic tot similară transformabilă morfologic.

- În calitate de metodă de analiză dimensională se recomandă metoda de maximum și minimum cu compensarea erorilor, care permite determinarea mai adecvată atât a preciziei de prelucrare, cât și a asigurării tehnologice a acesteia.

- Dacă în rezultatul divizării structurii dimensionale întregi tehnologice prin intermediul bazelor tehnologice nu sunt asigurate condiții favorabile pentru precizie, se recomandă redimensionarea echivalentă constructivă, adică, trecerea la o structură constructivă echivalentă celei inițiale, dar mai avantajoasă tehnologic. Simultan se va redimensiona constructiv și semifabricatul (în limitele determinate de metoda de obținere a semifabricatului). Sistemul tehnologic CNC este transformabil morfologic și ușor se adaptează oricărei structuri tehnologice. Soluțiile favorabile ale structurilor dimensionale obținute pot și trebuie să devină "precedențe" optime constructive și tehnologice.

Direcții de cercetare pentru viitor:

- Cercetările în domeniul proiectării produselor și proceselor de origine mecanică se manifestă tot mai profund în cadrul conceptelor moderne cum este Industria 4.0.
- Cercetările optimizării integrative în cadrul abordării concurențiale în aspectul structurilor constructive de ansamblu, constructive ale piesei, tehnologice.
- Dezvoltarea conceptului precedentelor constructive și tehnologice este valoros din punct de vedere al adoptării soluțiilor în timp util și proiectării asistate de calculator.
- Proiectarea dimensională manifestată pozitiv pentru produsele fabricate prin tehnologii substructive (prin așchiere) poate fi aplicată cu succes produselor supuse tehnologiilor aditive și/sau tehnologiilor hibride (substructive–aditive).

Bibliografie

1. WANG, Y., CALHOUN, S., BOSMAN, L., SUTHERLAND, J.W.W. Tolerance allocations on products: a life cycle engineering perspective. In: *26th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference. Procedia CIRP*, 2019, vol. 80, pp. 174–179. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.01.089>.
2. PENG, H.P., JIANG, X.Q., XU, Z.G., LIU, X.J. Optimal tolerance design for products with correlated characteristics by considering the present worth of quality loss. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, vol. 39, pp. 1-8. DOI:10.1007/s00170-007-1205-7.
3. KUMAR, M.S., KANNAN, S.M., JAYABALAN, V. A new algorithm for optimum tolerance allocation of complex assemblies with alternative process selection. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, vol. 40, pp. 819–836. DOI: 10.1007/s00170-008-1389-5
4. JUDIC J.-M. Process tolerancing: a new approach to better integrate the truth of the processes in tolerance analysis and synthesis. In: *Proceedings of the 14th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing (CAT)*, 2016, vol. 43, pp. 244-249. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.024>.
5. HALLMANN, M., SCHLEICH, B., WARTZACK, S. From tolerance allocation to tolerance-cost optimization: a comprehensive literature review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 107, pp. 4859–4912. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05254-5>.
6. ZHU, J., WANG, Y., MENG, Z. An applied methodology for tolerance design based on concurrent engineering. *Mechanical Sciences*, 2021, vol. 12, pp. 765–776. <https://doi.org/10.5194/ms-12-765-2021>.
7. KUMAR, M.S., KANNAN, S.M. Optimum manufacturing tolerance to selective assembly technique for different assembly specifications by using genetic algorithm. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, vol. 32, pp. 591–598. DOI: 10.1007/s00170-005-0337-x.
8. AYADI, B., BEN SAID, L., BOUJELBENE, M., BETROUNI, S.A. Three-dimensional synthesis of manufacturing tolerances based on analysis using the ascending approach. *Mathematics*, 2022, Vol. 10, No. 203, 26 p. <https://doi.org/10.3390/math10020203>.
9. HEPING, P. Concurrent tolerancing for design and manufacturing based on the present worth of quality loss. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, vol. 59, pp. 929–937. DOI: 10.1007/s00170-011-3542-9.
10. JABALLI, K. et al. Dimensioning of the intermediate states of the machined phases “DISMP” approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, vol. 45, pp. 907–921. Doi 10.1007/s00170-009-2040-9.
11. JIA, H.B. et al. A tolerance method for industrial image-based inspection. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, vol. 43, p.11-12. DOI:10.1007/s00170-008-1801-1.
12. GONZÁLEZ CONTRERAS, F. Maximization of process tolerances using an analysis of setup capability. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 67, pp. 2171–2181. DOI: 10.1007/s00170-012-4638-6.

13. JANAKIRAMAN, V., SARAVANAN, R. Concurrent optimization of machining process parameters and tolerance allocation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, vol. 51, pp. 357–369. DOI:10.1007/s00170-010-2602-x.
14. SORNSIRI, C., CHUNGCHOO, C. Application of tolerance charting using rooted tree graph for allocating manufacturing specifications onto the precision machined part: detailed explanation of manufacturing a standard weight of mass. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, Vol. 12, No18, pp. 7838-7852, ISSN 0973-4562, disponibil: https://www.ripublication.com/ijaer17/ijaerv12n18_97.pdf.
15. ZHU, J., KATO, M., TANAKA, T., YOSHIOKA, H., SAITO, Y. Graph based automatic process planning system for multi-tasking machine. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2015, vol.9, No.3, p.1-14. DOI: 10.1299/jamdsm.2015jamdsm0034.
16. GEETHA, K., RAVINDRAN, D., KUMAR, M.S. ISLAM, M.N. Multi-objective optimization for optimum tolerance synthesis with process and machine selection using a genetic algorithm. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, Vol. 67, pp. 2439–2457. DOI 10.1007/s00170-012-4662-6.
17. WANG, J.F., WU, X., FAN, X. A two-stage ant colony optimization approach based on a directed graph for process planning. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 80, pp. 839–850. DOI: 10.1007/s00170-015-7065-7.
18. КОНДАКОВ, А.И. Формирование рациональной структуры маршрутных процессов изготовления деталей машин. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2014, № 3. pp. 61-66. ISSN 0536-1044. Disponibil: <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-ratsionalnoy-struktury-marshrutnyh-protsessov-izgotovleniya-detaley-mashin/viewer>.
19. URINOV, N.F. SAIDOVA, M.H. YULDOSHEV, M.N. Analysis of types of optimization of technological processes of manufacture of parts. *International Journal on Human Computing Studies*, 2021, vol. 03, issue 8, pp. 22-26. e-ISSN: 2615-8159, disponibil: <https://media.neliti.com/media/publications/352575-analysis-of-types-of-optimization-of-tec-27983377.pdf>.
20. GUST, P., SERSCH, A., STEGER, T., SCHLUER, CH. Analysis of approaches of tolerance allocation regarding to economic efficiency. In: *Proceedings of the Design Society: 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19)*, 2019, pp. 3481-3490. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.355>.

Publicații ale autorului tezei

21. **STRONCEA, A.** Improving the designing of mechanical technologies through optimized dimensional structures. *Journal of Engineering Science*, 2023, No 30 (1), pp. 8-21. [https://doi.org/10.52326/jes.utm.2023.30\(1\).01](https://doi.org/10.52326/jes.utm.2023.30(1).01).
22. TOCA, A., STINGACI I., **STRONCEA, A.** Esența și efectele compensării erorilor la prelucrarea mecanică. *Fizică și tehnică: procese, modele, experimente*, 2012, no 2, pp. 37-43. ISSN 1857-0437. Disponibil: https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/37474.

23. TOCA, A., **STRONCEA, A.** Unele aspecte ale analizei dimensionale cu efecte de compensare a erorilor. In: *Conferința Internațională de Inginerie Integrată*. Timișoara, 2002. CD ISBN 973-8247-92-6.
24. TOCA A., **STRONCEA, A.**, GONCEAR S. Some reason about forming the sizes' accuracy. *Buletinul Institutului Politehnic Iași*, 2000, tomul XLVI, supliment I, pp. 145-148. ISSN 1011-2855.
25. TOCA, A., **STRONCEA, A.**, RUȘICA, I., REUȚA, V. Compensarea erorilor la prelucrarea mecanică. *Meridian Ingineresc*, UTM, 2004, nr. 2, pp. 84-89. ISSN 1683-853X.
26. TOCA, A., **STRONCEA, A.**, STINGACI, I., RUSICA I. Synthesis of optimal dimensional structure of the technological processes of machining. In: *Proceedings ModTech 2018. IOP Publishing. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 400, 2018, 022054. DOI: 10.1088/1757-899X/400/2/022054.
27. TOCA, A., **STRONCEA, A.**, STINGACI, I., RUSICA, I. The optimal dimensional design of machining technologies. In: *Proceedings IManE&E 2018, MATEC Web of Conferences* 178, 01005, 2018, p.6. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817801005>.
28. TOCA, A., **STRONCEA, A.**, RUȘICA, I. *Proiectarea dimensională optimală a tehnologiilor de prelucrare mecanică*. Note de curs. Chișinău: Tehnica-UTM, 2019. 58 p. ISBN 978-9975-45-598-5.
29. TOCA, A., **STRONCEA, A.**, RUSHICA, I., NITULENCO, T. Particularities of the technological dimensional structures when processing on machining centers. In: *Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXVII международной научно-технической конференции*, ДонНТУ, 2021. с. 537. - 542. ISSN 2079-2670.

Alte publicații ale autorului citate în teză

1. **STRONCEA, A.** Cu privire la modelarea parametrică 3D. In: Culegere de lucrări științifice Tehnologii Moderne, Calitate, Restructurare, Chișinău: UTM, 2003, vol. 3. pp. 547-550. ISBN 9975-9748-0-5, ISBN 9975-9748-3-X (vol. 3)
2. TOCA, A., **STRONCEA, A.**, RUȘICA, I. Analiza dimensională cu efecte de compensare a erorilor. In: Tehnologii Moderne, Calitate, Restructurare. Culegere de lucrări științifice. Chișinău, 2003, vol. 1, pp. 564 - 574. ISBN 9975-9748-0-5, ISBN 9975-9748-1-3 (vol I)
3. TOCA, A., **RUSHICA, I.**, **STRONCEA, A.** About forming the sizes' accuracy. *Machine Building*, 2003 (55), No 11-12, pp. 237-242. ISSN 2573-7419 https://www.researchgate.net/publication/344455049_about_forming_the_sizes'_accuracy
4. TOCA, A., **STRONCEA, A.**, RUȘICA, I. Influence of a constructive and technological dimensional links on conditions of formation the sizes' machining accuracy. *Buletinul Institutului Politehnic Iași*, 2002, tomul XLVIII, supliment I, Iași, pp. 269 - 276. ISSN 1011-2855
5. TOCA, A., **STRONCEA, A.** Unele aspecte ale procesului de asigurare a preciziei la prelucrarea mecanică. In: Tehnologii Moderne, Calitate, Restructurare. Culegere de lucrări științifice, UTM: 2001, vol. 1, pp. 565 - 570. ISBN 9975-9638-0-3, ISBN 9975-9638-1-1 (vol. 1)

ADNOTARE

Aurel Stroncea „Optimizarea structurilor dimensionale la proiectarea asistată de calculator a tehnologiilor de prelucrare mecanică”. Teză de doctor în științe ingineresti, Chișinău, 2023.

Structura tezei: lucrarea include introducerea, patru capitole, concluzii finale, bibliografie din 132 titluri, anexe, 101 figuri și 11 tabele inserate în 135 pagini text de bază. În baza rezultatelor studiului au fost publicate 27 articole științifice, dintre care 5 de unic autor, 1 manual, 1 material didactic, a fost obținut 1 brevet de invenție.

Cuvinte-cheie: structură dimensională constructivă, structură dimensională tehnologică, optimizare structurală, toleranțe constructive, toleranță tehnologică, lanț dimensional, CAPP, diagramă de toleranțe, compensarea erorilor, similitudine a structurilor dimensionale, redimensionare constructivă echivalentă, bază tehnologică, toleranța adaosului de prelucrare.

Scopul lucrării: elaborarea mecanismelor de optimizare a structurilor dimensionale tehnologice orientate spre creșterea calității proiectării și eficienței proceselor tehnologice de prelucrare mecanică.

Obiectivele cercetării: elaborarea metodologiei de determinare a caracteristicilor structurilor dimensionale tehnologice robuste; elaborarea metodei de rezolvare a sistemelor de lanțuri dimensionale tehnologice liniare în condițiile centralizării prelucrărilor mecanice; stabilirea criteriilor de optimalitate a structurilor dimensionale tehnologice pe niveluri ierarhice ale procesului tehnologic; elaborarea mecanismului de creare a structurilor dimensionale tehnologice optime prin sinteză din componente; elaborarea criteriilor de constituire a scenariilor optime de prelucrare și a "precedențelor" structurale tehnologice optime; elaborarea algoritmului de proiectare dimensională optimă a tehnologiilor de prelucrare mecanică.

Rezultatul obținut care contribuie la soluționarea unei probleme științifice importante constă în fundamentarea științifică a creării structurilor dimensionale tehnologice optime, scenariilor de prelucrare optime, precedentelor structurale utilizabile la proiectarea constructivă în detaliu și la proiectarea tehnologică, inclusiv asistată de calculator.

Semnificația teoretică: noi detalieri în cunoștințe privind proiectarea proceselor tehnologice optime în aspectele alocării toleranțelor tehnologice, utilizării bazelor tehnologice, asigurării capabilității tehnologice.

Valoarea aplicativă: în lucrare sunt propuse recomandări de utilizare practică la proiectarea și cotarea construcțiilor pieselor ce asigură un nivel înalt de fabricabilitate; la proiectarea tehnologică ce asigură un răspuns tehnologic optimizat structurilor constructive neoptime prin adaptarea constructivă echivalentă; prin utilizarea modulelor structurale optime în calitate de "precedențe" constructive sau tehnologice, inclusiv la proiectarea asistată de calculator.

Implementarea rezultatelor științifice: rezultatele cercetărilor sunt utilizate în procesul de studii ciclul I (licență) la disciplina *Proiectarea dimensional-optimală a tehnologiilor de prelucrare mecanică* și la proiectarea de an și de licență (compartiment obligatoriu). Au fost editate note de curs cu aceeași denumire (ISBN 978-9975-45-598-5). Compania Van Dijk FEM engineering BV (Olanda) utilizează rezultatele cercetării în proiecte ca instrument de proiectare pentru fabricabilitate.

ANNOTATION

Aurel Stroncea „*Optimization of dimensional structures at the computer-aided design of mechanical processing technologies*”. *PhD thesis, Chişinău, 2023.*

Thesis content: The thesis itself includes introduction, four chapters, final conclusions, 132 references, appendixes, 135 text pages basic text, 101 figures and 11 tables. Based on the results of the study, 27 scientific articles were published, of which 5 were single-author, 1 manual, 1 didactic material, and 1 invention patent was obtained.

Keywords: constructive dimensional structure, technological dimensional structure, structural optimization, constructive tolerances, technological tolerances, dimensional chain, CAPP, tolerance charting, error compensation, the similarity of dimensional structures, equivalent constructive resizing, locating datum surface, tolerance of the machining allowance.

Purpose of the work: the development of mechanisms for optimizing the dimensional technological structures aimed at increasing the quality of the design and the efficiency of the technological processes of mechanical processing.

Research objectives: development of the methodology for determining the characteristics of robust technological dimensional structures; the development of the method of solving the systems of linear technological dimensional chains for the conditions of the centralization of mechanical processing; establishing optimality criteria of technological dimensional structures on hierarchical levels of the technological process; the development of the mechanism for creating optimal technological dimensional structures by synthesis from components; the elaboration of the criteria for establishing the optimal processing scenarios and the optimal technological structural "precedents"; development of the optimal dimensional design algorithm of mechanical processing technologies.

Result obtained, which contributes to the solution of an important scientific problem, consists in the scientific substantiation of the creation of optimal technological dimensional structures, of optimal processing scenarios, of structural "precedents" usable for constructive design in detail and technological design, including computer-aided design.

Theoretical meaning: new details in knowledge about the design of optimal technological processes in the aspects of allocation of technological tolerances, use of technological bases, ensuring technological capability.

Applicative value: the work comes with recommendations for practical use in designing and constructive dimensioning of parts that ensure a high level of manufacturability; to the technological design that ensures an optimized technological response to non-optimal constructive structures through equivalent constructive adaptation; by using optimal structural modules as constructive or technological "precedents", including at computer-aided design.

Application of the scientific results. The research results are used in the study process in the first cycle (license) in the discipline "Dimensional-optimal design of mechanical processing technologies" and also in individual and diploma projects (compulsory section). Course notes with the same name were edited (ISBN 978-9975-45-598-5)ю The company Van Dijk FEM engineering BV (Netherlands) uses the research results in projects as a design tool for manufacturability.

АННОТАЦИЯ

Аурел Стронча *„Оптимизация размерных структур для автоматизированного проектирования технологий механообработки“*. Диссертация на соискание ученой степени Доктора Технических Наук Кишинёв, 2023.

Содержание диссертации: работа включает введение, четыре главы, основные выводы, библиографию из 132 источников, приложений, 135 страниц основного текста, 101 рисунок и 9 таблиц. Результаты диссертации опубликованы в 27 научных статьях, 5 из которых без соавторов, защищены 1 патентом, опубликован 1 учебник и курс лекций.

Ключевые слова: конструкторская размерная структура, технологическая размерная структура, структурная оптимизация, конструкторский допуск, технологический допуск, размерная цепь, САПР ТП, диаграмма допусков, компенсация погрешностей,

подобие размерных структур, эквивалентное конструкторское изменение размера, технологическая база, допуск припуска на обработку.

Цель работы: разработка механизмов оптимизации технологических размерных структур, направленных на повышение качества проектирования и эффективности технологических процессов механической обработки.

Задачи исследования: разработка методики определения характеристик робастности технологических размерных структур; разработка метода решения систем линейных технологических размерных цепей для условий централизации механической обработки; установление критериев оптимальности технологических размерных структур на иерархических уровнях технологического процесса; разработка механизма создания оптимальных технологических размерных конструкций путем синтеза из компонентов; разработка критериев установления оптимальных технологических сценариев обработки и оптимальных технологических структурных «прецедентов»; разработка алгоритма оптимального размерного проектирования технологий механической обработки.

Решение важной научной проблемы заключается в научном обосновании создания оптимальных технологических размерных структур, оптимальных сценариев обработки, структурных «прецедентов», пригодных и для конструкторского проектирования и для технологического проектирования, в том числе компьютерного автоматизированного.

Теоретическая значимость: новые детали в знаниях о проектировании оптимальных технологических процессов в аспектах назначения технологических допусков, выбора и использования технологических баз, технологической обеспеченности процесса.

Прикладная ценность проявляется: при конструировании деталей для обеспечения технологичности; при технологическом проектировании для обеспечения оптимизированных решений за счет эквивалентной конструкторской адаптации; использованием оптимальных модулей в качестве конструкторских или технологических «прецедентов», в том числе при автоматизированном проектировании.

Внедрение научных результатов: Результаты исследования использованы в учебном процессе на первом цикле по дисциплине «Размерно-оптимальное проектирование технологий механической обработки», также при курсовом и дипломном проектировании (обязательный раздел). Опубликован курс лекций с тем же названием (ISBN 978-9975-45-598-5). Компания Van Dijk FEM Engineering BV (Нидерланды) использует результаты этих исследований в проектах как инструмент обеспечения технологичности.

STRONCEA AUREL

**OPTIMIZAREA STRUCTURILOR DIMENSIONALE LA PROIECTAREA
ASISTATĂ DE CALCULATOR A TEHNOLOGIILOR DE PRELUCRARE
MECANICĂ**

242.05 – TEHNOLOGII, PROCEDEE ȘI UTILAJE DE PRELUCRARE

Rezumatul tezei de doctor în științe ingineresti

Bun de tipar 14.11.2023	Formatul hârtiei 60x84 1/16
Hârtie ofset. Tipar RISO	Tirajul 50 ex
Coli de tipar 2.25	Comanda nr. 112

MD 2004, Chișinău, bd. Ștefan cel Mare și Sfânt, 168, UTM MD
2004, Chișinău, str. Studenților, 9/9, Editura "Tehnica-UTM"