

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**

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

Teză de doctor în științe ingineresti

Conducător științific:



TOCA Alexei
dr., conf. univ.

Autor



CHIȘINĂU, 2023

© Stroncea Aurel, 2023

CUPRINS	Pag.
ADNOTARE	5
ANNOTATION	6
АННОТАЦИЯ	7
LISTA TABELELOR	8
LISTA FIGURILOR	8
LISTA ABREVIERILOR	14
LISTA SIMBOLIZĂRILOR	15
INTRODUCERE	16
1. PROBLEMATICA STRUCTURILOR DIMENSIONALE LA PROIECTAREA PROCESELOR TEHNOLOGICE	24
1.1. Alocarea toleranțelor în structurile dimensionale constructive	24
1.2. Alocarea toleranțelor în structurile dimensionale tehnologice	26
1.3. Constituirea și analiza structurilor dimensionale tehnologice cu diagrama toleranțelor	31
1.4. Constituirea și analiza structurilor dimensionale prin grafuri tehnologice	36
1.5. Optimizarea structurală a proceselor tehnologice	38
1.6. Criterii de optimalitate structurală a tehnologiilor de prelucrare mecanică	42
1.7. Metode de reprezentare a relației cost–toleranță	44
1.8. Proiectarea tehnologică asistată de calculator și noile tendințe de dezvoltare	47
1.9. Abordări robuste și concurențiale în proiectarea constructivă și tehnologică	49
1.10. Concluzii	50
2. METODE DE ANALIZĂ ÎN TOLERANȚE A STRUCTURILOR DIMENSIONALE TEHNOLOGICE	52
2.1. Metode de analiză dimensională	52
2.1.1. Metoda de analiză dimensională bazată pe independența formării preciziei cotelor tehnologice	52
2.1.2. Metoda de analiză dimensională bazată pe interdependența formării preciziei cotelor tehnologice	54
2.1.3. Metoda de analiză dimensională bazată pe compensarea erorilor	56
2.2. Metoda de rezolvare a lanțurilor dimensionale tehnologice bazată pe diagrama de toleranțe	63
2.3. Concluzii	69

3. FORMAREA PRECIZIEI ÎN STRUCTURILE DIMENSIONALE TEHNOLOGICE	71
3.1. Formarea preciziei cotelor tehnologice la prelucrarea mecanică	71
3.2. Formarea preciziei cotelor tehnologice în cadrul unei instalări	73
3.3. Optimalitatea structurilor dimensionale tehnologice	76
3.3.1. Optimalitatea structurală a tehnologiilor de prelucrare mecanică indusă de dezvoltarea sistemelor tehnologice	79
3.3.2. Optimizarea structurală a tehnologiilor de prelucrare mecanică indusă de robustețea soluțiilor	83
3.3.3. Optimalitatea structurilor dimensionale elementare	84
3.3.4. Sinteza structurilor dimensionale tehnologice complexe optime	88
3.4. Concluzii	98
4. STRUCTURI DIMENSIONALE TEHNOLOGICE OPTIME	99
4.1. Scenarii optime de prelucrare	99
4.2. Alocarea toleranțelor de prelucrare la nivelul capacității de precizie a sistemului tehnologic	110
4.3. Adaosuri de prelucrare minime	112
4.4. Adaptarea reciprocă a structurilor dimensionale constructive și tehnologice	114
4.4.1. Gradul de optimalitate a structurilor dimensionale tehnologice bazat pe similitudinea cu structurile dimensionale constructive	114
4.4.2. Optimizarea structurilor dimensionale tehnologice prin redimensionarea constructivă	127
4.5. Costul prelucrării mecanice determinat de caracteristicile structurale ale procesului tehnologic	141
4.6. Concluzii	142
CONCLUZII ȘI RECOMANDĂRI	144
CERCETĂRI ULTERIOARE	149
BIBLIOGRAFIE	151
ANEXE	165
Anexa 1. Certificate de competență	165
Anexa 2. Act de implementare a rezultatelor științifice, UTM	167
Anexa 3. Act de implementare a rezultatelor științifice, Van Dijk FEM engineering	168
DECLARAȚIA PRIVIND ASUMAREA RĂSPUNDERII	169
CURRICULUM VITAE	170

ADNOTARE

la teza de doctor cu tema „*Optimizarea structurilor dimensionale la proiectarea asistată de calculator a tehnologiilor de prelucrare mecanică*” prezentată de către Aurel Stroncea pentru obținerea titlului științific de doctor în științe ingineresti la specialitatea 242.05.

Tehnologii, procedee și utilaje de prelucrare, Chișinău, 2023

Structura tezei: lucrarea include introducerea, patru capitole, concluzii finale, bibliografie din 132 titluri și anexe, 135 pagini de text de bază, 101 figuri și 11 tabele. Rezultatele studiului au fost publicate în 27 articole științifice, dintre care 5 semnate numai de autorul tezei, 1 manual, 1 lucrare – 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, similitudinea 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 precedentelor structurale tehnologice optime; elaborarea algoritmului de proiectare dimensională optimă a tehnologiilor de prelucrare mecanică.

Noutatea și originalitatea științifică rezidă în următoarele: identificarea metodei de rezolvare a lanțurilor dimensionale tehnologice complexe cu stabilirea mecanismului de formare a toleranțelor adaosurilor de prelucrare; stabilirea scenariilor optime de prelucrare prin secvențierea structurilor dimensionale tehnologice în părți cu lungimi echilibrate; identificarea caracterului optim al structurilor dimensionale tehnologice și constructive în baza similitudinii acestora și a ulterioarei adaptări structurale reciproce și controlul descreșterii cuplate a valorilor toleranțelor cotelor tehnologice și a adaosurilor de prelucrare pentru asigurarea capabilității procesului.

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: lucrarea vine cu 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 adaptare constructivă echivalentă; prin utilizarea modulelor structurale optime în calitate de precedente constructive sau tehnologice, inclusiv la proiectarea asistată de calculator.

Implementarea rezultatelor științifice: rezultatele cercetărilor sunt utilizate în procesul de studii la 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 ca instrument de proiectare pentru fabricabilitate.

ANNOTATION

for the PhD thesis „*Optimization of dimensional structures at the computer-aided design of mechanical processing technologies*” presented by Aurel Stroncea for conferring the degree of Doctor of Engineering, specialty 242.05. *Processing's technologies, processes and equipment*, 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.

Scientific novelty and originality reside in: identifying the method of solving the complex technological dimensional chains with the establishment of the mechanism of forming the tolerances of the processing additions; establishing optimal processing scenarios by sequencing technological dimensional structures in parts with balanced lengths; the identification of the optimal character of the technological and constructive dimensional structures based on their similarity and the subsequent mutual structural adaptation with the control of the coupled decrease of the tolerances values of the technological quotas and of the machining allowances to ensure the capability of the process.

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). The company Van Dijk FEM engineering BV (Netherlands) uses the research results in projects as a design tool for manufacturability.

АННОТАЦИЯ

для диссертации *„Оптимизация размерных структур для автоматизированного проектирования технологий механообработки”* представленной Аурелом Стронча для присвоения ученой степени Доктора Технические Наук по специальности 242.05. *Технологии , процессы и оборудование обработки, Кишинёв, 2023.*

Содержание диссертации: работа включает введение, четыре главы, основные выводы, библиографию из 132 источников, приложений, 135 страниц основного текста, 101 рисунок и 11 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 робастных 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.

Научная новизна и оригинальность заключается в: выявлении способа решения сложных технологических размерных цепей с установлением механизма формирования допусков припусков на обработку; установление оптимальных сценариев обработки путем разделения технологических размерных структур на части со сбалансированными длинами; выявление оптимального характера технологических и конструкторских размерных структур на основе их подобия и последующей взаимной адаптации с контролем сопряженного уменьшения допусков технологических размеров и технологических припусков для обеспечения реализуемости процесса

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.

LISTA TABELELOR	Pag.
Tabelul. 3.1. Adaosuri de prelucrare maxime pentru 4 și 3 faze tehnologice la formarea suprafeței $\varnothing 100h7$ (exemplu)	83
Tabelul 4.1. Valorile toleranțelor adaosurilor de prelucrare pentru structurile dimensionale constructive și tehnologice similare de tip evantai	120
Tabelul 4.2. Valorile toleranțelor adaosurilor de prelucrare pentru structurile dimensionale constructive și tehnologice similare de tip evantai deplasat	122
Tabelul 4.3. Valorile toleranțelor adaosurilor de prelucrare pentru structurile dimensionale constructive și tehnologice similare de tip evantai–lanț	124
Tabelul 4.4. Valorile toleranțelor adaosurilor de prelucrare pentru structurile dimensionale constructive și tehnologice similare de tip lanț	127
Tabelul 4.5. Măsura creșterii preciziei dimensiunilor tehnologice pentru structurile dimensionale constructive și tehnologice (cazul evantai deplasat–evantai)	131
Tabelul 4.6. Valorile toleranțelor adaosurilor de prelucrare pentru structurile dimensionale constructive și tehnologice (cazul evantai deplasat–evantai)	132
Tabelul 4.7. Măsura creșterii preciziei dimensiunilor tehnologice pentru structurile dimensionale constructive și tehnologice (cazul lanț–evantai)	135
Tabelul 4.8. Valorile toleranțelor adaosurilor de prelucrare pentru structurile dimensionale constructive și tehnologice (cazul lanț–evantai)	135
Tabelul 4.9. Măsura creșterii preciziei dimensiunilor tehnologice pentru structurile dimensionale constructive și tehnologice (cazul lanț–evantai deplasat)	137
Tabelul 4.10. Valorile toleranțelor adaosurilor de prelucrare pentru structurile dimensionale constructive și tehnologice (cazul lanț–evantai deplasat)	138

LISTA FIGURILOR	Pag.
Fig. 1.1. Optimizarea alocării simultane a toleranțelor cotelor constructive și a celor tehnologice: a) ansamblu angrenaj conic și lanțurile de dimensiuni ale acestuia; b) dimensiunile critice ale corpului 1; c) dimensiunea critică a capacului 3 [26]	30
Fig. 1.2. Metoda ΔL de transfer a cerințelor de precizie constructive în cerințe tehnologice [20]	32
Fig. 1.3. Structura diagramei de toleranțe [38]	33
Fig. 1.4. Relația dintre toleranțele de poziție ale suprafeței și toleranțele cotelor tehnologice. Reprodus după [34].	34
Fig. 1.5. Metoda toleranței de poziție a suprafeței în comparație cu metoda diagramei toleranțelor. Reprodus după [34].	34

Fig. 1.6. Schema dimensională a procesului tehnologic de prelucrare a arborelui (a) și graful relațiilor dimensionale tehnologice (b) [47]	37
Fig. 1.7. Graful relațiilor constructive al piesei a) și exemplu de graf al relațiilor tehnologice cu număr redus de noduri după etapa 1 b) [48]	39
Fig. 1.8. Ordinea de prelucrare final acceptată [48]	39
Fig. 1.9. Modificarea în salturi a funcției cost–toleranță ($T_i - C_i$) la schimbarea metodei de prelucrare. Reprodus după [59].	44
Fig. 1.10. Algoritm de optimizare a cuplului cost–toleranță. Reprodus după [4].	45
Fig. 1.11. Interdependența dintre toleranță, valoare și cost. Reprodus după [62].	45
Fig. 2.1. Exemplu de structură dimensională constructivă a unei piese (cote liniare)	52
Fig. 2.2. Exemple de structuri dimensionale tehnologice în care cota constructivă este element de închidere [94]	53
Fig. 2.3. Exemple de structuri dimensionale tehnologice în care adaosurile de prelucrare sunt elemente de închidere [94]	53
Fig. 2.4. Lanț dimensional geometric	54
Fig. 2.5. Lanțuri dimensionale geometrice definite de o geometrie specifică la determinarea erorilor de orientare	55
Fig. 2.6. Relația grafică $Ad_{max} - Ad_{min}$ pentru suprafețe de revoluție	55
Fig. 2.7. Mecanismul de compensare a erorilor prin modificarea mărimii câmpului de toleranță al elementului de închidere și a poziției acestuia [100]	57
Fig. 2.8. Lanțuri dimensionale tehnologice în dezechilibru rezolvate în raport cu: a) elementele de închidere; b) elementele componente [104]	58
Fig. 2.9. Lanțuri dimensionale echivalente construite și rezolvate pentru: a) elementele de închidere; b) elementele componente [104]	59
Fig. 2.10. Lanț dimensional tehnologic echivalent cu abateri-limită structurate pe efecte - vectori de compensare a erorilor de diferite direcții [104]	60
Fig. 2.11. Erori compensabile la calculul toleranțelor adaosurilor de prelucrare pentru: a) suprafețe de revoluție; b) suprafețe plane	62
Fig. 2.12. Erori compensabile la calculul toleranței cotei – element de închidere Δ în lanțuri dimensionale liniare pentru suprafețe frontale	63
Fig. 2.13. Erori compensabile la formarea cotelor tehnologice în lanț	63
Fig. 2.14. Piesă și grafurile relațiilor dimensionale tehnologice	64
Fig. 2.15. Constituirea lanțurilor dimensionale tehnologice pentru rezolvare prin metoda de maxim și minim	65
Fig. 2.16. Constituirea lanțurilor dimensionale tehnologice pentru rezolvare prin metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor	66

Fig. 2.17. Gruparea lanțurilor dimensionale tehnologice pentru rezolvare prin metoda de maxim și minim	67
Fig. 2.18. Gruparea lanțurilor dimensionale tehnologice pentru rezolvare prin metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor	68
Fig. 3.1. Formarea preciziei de prelucrare a cotelor dintre suprafața prelucrată și baza tehnologică: a) fără manifestarea erorii de instalare; (b) cu manifestarea erorii de instalare	74
Fig. 3.2. Formarea preciziei cotei – element de închidere a lanțului dimensional tehnologic [102]	74
Fig. 3.3. Formarea erorii de instalare [100]	75
Fig. 3.4. Formarea preciziei cotelor dintre suprafețele prelucrate	76
Fig. 3.5. Sistem de optimizare tehnologică	76
Fig. 3.6. Formarea structurii dimensionale (SD) a piesei prin instalări de la o serie de baze tehnologice (BT) [94]	79
Fig. 3.7. Formarea structurii dimensionale (SD) a piesei prin reinstalări de la aceeași bază tehnologică (BT) [94]	79
Fig. 3.8. Centralizarea prelucrărilor prin strunjire, frezare, găurire etc. (exemplu reprezentativ [120])	81
Fig. 3.9. Dezvoltarea centralizării prelucrărilor cu frezarea melcată etc. (exemplu reprezentativ [120])	81
Fig. 3.10. Completarea potențialului centralizării prelucrărilor cu rectificare și călire Laser (exemplu reprezentativ [120])	81
Fig. 3.11. Formarea structurii dimensionale (SD) a piesei prin instalări plecând de la un număr mic de baze tehnologice (BT)	82
Fig. 3.12. Două situații de formare a preciziei cotelor constructive: a) printr-o unică cotă proprie tehnologică; b) prin cotă proprie tehnologică și o altă cotă tehnologică	85
Fig. 3.13. Creșterea preciziei cotei tehnologice B_t față de precizia cotei proprii constructive B_c în funcție de ponderea cotei tehnologice străine A_t (exemplu: $B_c = 200$ mm)	85
Fig. 3.14. Variante de structuri dimensionale tehnologice cu diferite numere de elemente structurale ale lanțurilor dimensionale	86
Fig. 3.15. Transformarea cotei tehnologice-țintă prin eliminarea adaosurilor de prelucrare: a) de la o singură bază tehnologică; b) cu schimbarea bazelor tehnologice	87
Fig. 3.16. Efectul de scădere a preciziei cotelor non-țintă asociate cu suprafața prelucrată prin eliminarea adaosului	88
Fig. 3.17. Relația dintre funcție și structură la proiectarea tehnologică	89

Fig. 3.18. Interacționarea obiectelor-factori la proiectarea structurilor dimensionale tehnologice	90
Fig. 3.19. Structura dimensională a sistemului tehnologic transformabilă morfologic	91
Fig. 3.20. Similitudinea structurilor dimensionale ale: a) semifabricatului; b) piesei; c) procesului tehnologic; d) sistemului tehnologic (variantă de dimensionare de la o bază unică constructivă, tehnologică și "zero CNC")	92
Fig. 3.21. Similitudinea structurilor dimensionale ale: a) semifabricatului; b) piesei; c) procesului tehnologic; d) sistemului tehnologic (variantă de dimensionare de la baze în lanț constructive, tehnologice și "zero CNC")	92
Fig. 3.22. Structură dimensională constructivă a piesei în formă de graf neorientat (studiul de caz 1)	93
Fig. 3.23. Structura dimensională tehnologică în formă de graf neorientat similară celei constructive (studiul de caz 1)	93
Fig. 3.24. Structuri dimensionale tehnologice în formă de grafuri orientate divizate pe instalări și grupe de faze tehnologice (studiul de caz 1)	95
Fig. 3.25. Structura dimensională constructivă a piesei în formă de graf neorientat (studiul de caz 2)	96
Fig. 3.26. Structura dimensională tehnologică în formă de graf neorientat similară celei constructive (studiul de caz 2)	96
Fig. 3.27. Structuri dimensionale tehnologice în formă de grafuri orientate divizate pe instalări și grupe de faze tehnologice (studiul de caz 2)	97
Fig. 4.1. Elaborarea planului de formare a cotelor tehnologice pentru două variante de structuri dimensionale liniare constructive a) și d); două scenarii de prelucrare: succesiv - toate cotele tehnologice în limitele instalării b) și e); inițial definitiv cota tehnologică B_t^2 , ulterior restul cotelor tehnologice în limitele instalării c) și f)	100
Fig. 4.2. Evoluția toleranțelor cotelor tehnologice și adaosurilor. Metoda de maxim și minim (studiul de caz 1)	102
Fig. 4.3. Evoluția toleranțelor cotelor tehnologice și adaosurilor. Metoda de maxim cu minim și compensarea erorilor (studiul de caz 1)	102
Fig. 4.4. Evoluția toleranțelor cotelor tehnologice și adaosurilor. Metoda de maxim și minim (studiul de caz 2)	103
Fig. 4.5. Evoluția toleranțelor cotelor tehnologice și adaosurilor. Metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor (studiul de caz 2)	103
Fig. 4.6. Evoluția toleranțelor cotelor tehnologice și adaosurilor. Metoda de maxim și minim (studiul de caz 3)	104

Fig. 4.7. Evoluția toleranțelor cotelor tehnologice și adaosurilor. Metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor (studiul de caz 3)	104
Fig. 4.8. Evoluția toleranțelor cotelor tehnologice și adaosurilor. Metoda de maxim și minim (studiul de caz 4)	105
Fig. 4.9. Evoluția toleranțelor cotelor tehnologice și adaosurilor. Metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor (studiul de caz 4)	105
Fig. 4.10. Compararea rezultatelor de estimare a valorilor toleranțelor adaosurilor de prelucrare prin metoda de maxim și minim (semifabricat turnat, clasa 9t) și metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor (semifabricat turnat, clasa 9)	106
Fig. 4.11. Grafuri neorientate similare ale relațiilor dimensionale liniare constructive și tehnologice cu suprafețe plasate oglindă	108
Fig. 4.12. Graf al relațiilor dimensionale liniare tehnologice cu număr egal de elemente în lanțuri	110
Fig. 4.13. Schema determinării componentelor adaosului minim de prelucrare prin metoda grafo-analitică [110]	113
Fig. 4.14. Poziții-limită ale componentelor adaosului de prelucrare minim în diferențe: a) determinată de eroarea de instalare; b) determinată de spațiul stratului defectat	114
Fig. 4.15. Formarea legăturii toleranța cotei tehnologice–toleranța adaosului de prelucrare	115
Fig. 4.16. Legătura toleranța statistică a cotei tehnologice–toleranța statistică a adaosului de prelucrare pentru structura dimensională tehnologică elementară	115
Fig. 4.17. Formarea toleranțelor adaosurilor de prelucrare în dependență de poziția cotei tehnologice în lanț: a) metoda de maxim și minim; b) metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor	116
Fig. 4.18. Formarea preciziei cotelor tehnologice în condițiile efectelor structurale minore (acceptabile)	117
Fig. 4.19. Efecte structurale majore inacceptabile pentru formarea preciziei cotelor tehnologice	117
Fig. 4.20. Structuri dimensionale constructive și tehnologice similare de tip evantai	119
Fig. 4.21. Grafuri ale legăturilor dimensionale pentru cotele constructive (a), cotele tehnologice (b, c) și adaosurile de prelucrare (d) (caz evantai) [112, 116]	119
Fig. 4.22. Efecte de micșorare a toleranțelor adaosurilor de prelucrare în structurile dimensionale constructive și tehnologice similare de tip evantai	120
Fig. 4.23. Structuri dimensionale constructive și tehnologice similare de tip evantai deplasat	121
Fig. 4.24. Grafuri ale legăturilor dimensionale pentru dimensiunile constructive (a), dimensiunile tehnologice (b, c) și adaosurile de prelucrare (d, e) (caz evantai deplasat)	121

Fig. 4.25. Efecte de micșorare a toleranțelor adaosurilor de prelucrare și de micșorare a preciziei cotelor tehnologice în structurile dimensionale constructive și tehnologice similare de tip evantai deplasat	123
Fig. 4.26. Structuri dimensionale constructive și tehnologice de tip evantai-lanț	123
Fig. 4.27. Grafuri ale relațiilor dimensionale pentru dimensiunile constructive (a), dimensiunile tehnologice (b, c) și adaosurile de prelucrare (d) (caz evantai-lanț)	124
Fig. 4.28. Efecte de micșorare a toleranțelor adaosurilor de prelucrare și de micșorare a preciziei cotelor tehnologice în structurile dimensionale constructive și tehnologice similare de tip evantai-lanț	125
Fig. 4.29. Structuri dimensionale constructive și tehnologice de tip lanț	125
Fig. 4.30. Grafuri ale legăturilor dimensionale pentru dimensiunile constructive (a), dimensiunile tehnologice (b, c) și adaosurile de prelucrare (d) (caz lanț) [112, 116]	126
Fig. 4.31. Efecte de micșorare insuficientă a toleranțelor adaosurilor de prelucrare și de micșorare a preciziei cotelor tehnologice în structurile dimensionale constructive și tehnologice similare de tip lanț	127
Fig. 4.32. Algoritmul de redimensionare constructivă și de creare a precedentelor structurale tehnologice și constructive optimale	129
Fig. 4.33. Structuri dimensionale constructive și tehnologice de tip evantai deplasat-evantai	130
Fig. 4.34. Grafuri ale legăturilor dimensionale pentru dimensiunile constructive (a), dimensiunile tehnologice (b, c) și adaosurile de prelucrare (d) (caz evantai deplasat-evantai) [112]	131
Fig. 4.35. Efectele redimensionării constructive echivalente: micșorarea toleranțelor adaosurilor de prelucrare din contul creșterii preciziei de prelucrare	132
Fig. 4.36. Efecte de depășire a limitei de precizie a sistemului tehnologic la redimensionarea constructivă echivalentă	133
Fig. 4.37. Structuri dimensionale constructive și tehnologice de tip lanț-evantai	133
Fig. 4.38. Grafuri ale legăturilor dimensionale pentru dimensiunile constructive (a), dimensiunile tehnologice (b, c, d, e, f, g) și adaosurile de prelucrare (i) (caz lanț-evantai) [112]	134
Fig. 4.39. Structuri dimensionale constructive și tehnologice de tip lanț-evantai deplasat	136
Fig. 4.40. Grafuri ale legăturilor dimensionale pentru dimensiunile constructive (a), dimensiunile tehnologice (b, c, d) și adaosurile de prelucrare (e-h) (caz lanț-evantai deplasat)	136

Fig. 4.41. Efectele redimensionării constructive echivalente asupra optimalității structurilor dimensionale tehnologice	138
Fig. 4.42. Redimensionarea constructivă echivalentă cu efecte de nedepășire a limitelor asigurării tehnologice și celei de precizie a sistemului tehnologic	139
Fig. 4.43. Modificarea valorii și poziției intervalului de optimalitate pentru prelucrării la viteze mari	139
Fig. 4.44. Cazuri de formare a cotei tehnologice B_t : $B_t = A_c + B_c$ și $B_t = A_c - B_c$	140
Fig. 4.45. Creșterea preciziei dimensiunilor tehnologice în comparație cu precizia dimensiunilor constructive [94]	140

LISTA ABREVIERILOR

CAD	Computer Aided Design (EN) - Proiectarea Asistată de Calculator
CAPP	Computer Aided Process Planning (EN) - Planificarea Proceselor Asistată de Calculator
A-CAPP	Autonomous-CAPP (EN) - Planificarea Autonomă a Proceselor Asistată de Calculator
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
CAM	Computer Aided Manufacturing (EN) - Fabricație Asistată de Calculator
CNC	Computer Numerical Control (EN) - Comandă Numerică de la Calculator
HSM	High Speed Machining (EN) - Prelucrarea la Viteze Mari
CPS	Cyber Physical System (EN) - Sistem Fizico-Cibernetice
BC	Bază constructivă
BT	Bază tehnologică
BTC	Bază tehnologică de contact
BTR	Bază tehnologică de reglare
ST	Sistem tehnologic
SD	Structură dimensională

LISTA SIMBOLIZĂRILOR

Simboluri latine

T	Toleranță
i	Valoarea unității de toleranță (în context)
a	Număr de unități de toleranță (în context)
Ad	Adaos de prelucrare
N_{Ad}	Număr de adaosuri de prelucrare

N_{BT}	Număr de baze tehnologice
N_{op}	Număr de operații tehnologice
N_{inst}	Număr de instalări tehnologice
$N_{ft.}$	Număr de faze tehnologice
N_{CT}	Număr de cote tehnologice
N_{CC}	Număr de cote constructive
C	Costul în relația cost–toleranță
a	Costul fix în relația cost–toleranță
b	Parametru de influență a toleranței asupra costului variabil în relația cost–toleranță
k	Parametru de influență a toleranței asupra costului variabil în relația cost–toleranță
ES	Abatere-limită superioară
EI	Abatere-limită inferioară
S	Suprafață prelucrată mecanic
u	Coeficient de pondere a erorilor compensate
R_z	Rugozitate
F	Adâncimea stratului defectat
<i>Simboluri grecești</i>	
ω	Toleranță tehnologică
ω^c	Valoarea minimă comună a erorilor compensabile
ω_{reg}	Toleranța reglării
ω_{asch}	Toleranța tehnologică provocată de efectele fizico-tehnice ale aşchierii
ε	Eroare
A_0	Coordonata mijlocului câmpului de toleranță
ω_A	Toleranța elementului de închidere
$\vec{\delta}$	Vectorul de poziție modificată a câmpului de toleranță
ξ	Parametru numeric situațional la calcularea abaterilor-limită cu compensare
η	Parametru numeric situațional la calcularea abaterilor-limită cu compensare
ρ	Abaterea spațială a suprafeței

ÎNTRUDUCERE

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 poate fi rezolvată eficient în etapa de pregătire tehnologică a fabricației.

Procese industriale au evoluat foarte mult. Seriile produselor au devenit mici, micșorându-se și mai mult, utilajele industriale au devenit preponderent CNC, fabricația de la varianta clasică tradițională a suferit o serie de schimbări, devenind flexibilă, integrată de calculator, fabricație suplă, fabricație agilă, e-fabricație, fabricație avansată, fabricație inteligentă, fabricație în nori etc.

Deciziile tehnico-tehnologice se iau din mai multe variante posibile și se bazează pe puterea mare de calcul. Proiectarea asistată de calculator de la orientările pe domenii și aplicații separate se integrează din ce în ce mai mult, acoperind întreg ciclul de viață al produsului (CAD/CAE/CAPP/CAM/PDM/PLM...), iar fiecare dintre componente obține particularități de funcționare în timp real și de autonomie.

Conceptul Industrie 4.0 prevede integrarea, comunicarea și colaborarea în timp real a tuturor factorilor procesului de producție indiferent de proveniență: umană, tehnică, cibernetică, informațională, iar procesele gestionate se extind și în afara întreprinderii. Industria modernă se transformă din industria produsului în industria serviciilor, fapt ce pune accente mai pronunțate pe comunicare și colaborare, indiferent de locația fizică. Produsul este tratat ca un serviciu, dar totuși, nucleul proceselor reprezintă proiectarea constructivă, tehnologică și fabricarea acestuia.

În condițiile fabricării în serii medii, mari și în masă cu utilizarea mașinilor-unelte clasice activitățile de proiectare a tehnologiilor aveau caracter de propunere, testare, corectare până la atingerea unei structuri dimensionale de precizie acceptabile. Proiectul tehnologiei era elaborat în departamentul tehnologului principal, testat în condiții de secție productivă și corectat la apariția eventualelor neconformități cu cicluri repetabile (proces “ping-pong”) [1]. În cazul mașinilor-unelte speciale, tehnologia era adusă la o structură acceptabilă de către producătorul utilajului cu referință exclusiv la utilajul concret și la entitatea de prelucrat pe acesta.

Astăzi, când seriile mari sunt o raritate și se utilizează preponderent mașini-unelte moderne cu control numeric (CNC), proiectarea proceselor tehnologice prin metoda “ping-pong” nu mai este valabilă nici tehnic, nici economic. Odată cu apariția acestor mașini-unelte sofisticate și costuri ridicate, cuplate cu costurile mai mari ale forței de muncă, parametrii optimi de funcționare a tehnologiei devin esențiali pentru producerea pieselor în mod economic. În acest sens, este necesară cercetarea și monitorizarea sistematică a procesului și a variabilelor

produsului pentru a îmbunătăți fabricabilitatea acestuia, fiabilitatea, calitatea și performanța pe teren [2, 3]. Optimizarea parametrilor de funcționare este o activitate importantă în operarea mașinilor-unelte, în special a mașinilor-unelte cu control numeric computerizat (CNC).

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. Proiectul tehnologiei elaborat parcurge câteva etape: propunere, testare prin calcule dimensionale de precizie, corectare și iarăși testare prin calcule. Numai după aceasta departamentul tehnologului principal trimite procesul tehnologic pentru a fi testat și aprobat în condiții de secție productivă. Dacă inițial testarea prin analiza dimensională de precizie se făcea pentru procesele tehnologice deja proiectate cu un verdict de tip „acceptat” sau „respins - de corectat”, 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 metodici de sinteză a soluțiilor tehnologice de proiect este o problemă actuală, soluționarea căreia ar permite elaborarea unor procese tehnologice eficace și eficiente [1].

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), pe adaptarea fabricării etc.;
- 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.

Comunicarea informațională dintre piesă, procesul tehnologic și sistemul tehnologic trebuie să se bazeze pe factori importanți de proces ce produc interacționarea eficace și eficientă a acestora. Acești factori se referă la structurile dimensionale constructive ale piesei, structurile dimensionale tehnologice ale procesului și structurile dimensionale funcționale ale sistemului tehnologic, care trebuie să fie bine definite, adecvat analizate separat și în toate aspectele de interinfluență a unuia cu altul. 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.

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 la etapa de proiectare cât și la etapa de fabricație, fiind utilizate instrumente de proiectare asistată de calculator a produselor și a 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. Se datorează acest lucru 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 în sine 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 în structuri tehnologice complexe. Metodele statistice de

analiză nu corespund criteriului de robustețe. Este promițătoare, în acest sens, înlocuirea analizei dimensionale în toleranțe prin metoda de maxim și minim, care reflectă "cel mai rău caz", cu analiza de maxim și minim cu compensarea erorilor. Compensarea erorilor are loc exclusiv în structuri 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. Este important să fie constatate și caracterizate situațiile de manifestare a compensării erorilor și măsura efectelor acesteia.

Pentru prelucrarea unei piese cu o structura 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 structurilor dimensionale constructive a structurilor dimensionale tehnologice situațional reușite. Optimalitatea unei structuri dimensionale tehnologice este asigurată atunci 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.

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 excese 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 componente: faza tehnologică (cota tehnologică, toleranța cotei și a adaosului de

prelucrare), instalarea (mulțimi 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 optimă 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 spațiul 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 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 maxim și minim 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 de maxim și minim, cât și în varianta de maxim și minim cu compensarea 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 tehnologiei. În calitate de criteriu sintetic de optimalitate este acceptat costul piesei prelucrate (semifabricat, prelucrare–precizie, prelucrare–volum de aşchii înlăturate).

Delimitări

Structurile dimensionale abordate în această lucrare nu includ dimensiuni ale suprafețelor de revoluție, deoarece la prelucrarea acestora există o unică și singură bază tehnologică care poate fi materializată în mai multe feluri. Astfel, problematica structurilor dimensionale este una mai simplă.

În lucrarea de față nu sunt abordate structurile dimensionale în plan (2D) cu poziții unghiulare ale suprafețelor. Rezultatele obținute, totuși, au impact și asupra acestora. Nu sunt tratate structurile ce includ toleranțele geometrice.

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.

CONȚINUTUL TEZEI

În **Introducere** este argumentată necesitatea cercetărilor optimizării proiectării proceselor tehnologice de prelucrare mecanică în condiții asistate de calculator. Este evaluată relevanța influenței particularităților structurilor dimensionale constructive și tehnologice pentru soluțiile optime de alocare a toleranțelor de prelucrare, de alegere a schemelor de instalare, de orientare a pieselor pentru prelucrare etc. Se constată că alinierea la noile concepte de dezvoltare industrială, utilizarea algoritmilor moderni de proiectare tehnologică și de optimizare trebuie alimentată cu soluții ce pot constitui elemente ale bazelor de date și de cunoștințe tehnologice.

În **primul capitol** sunt caracterizate structurile dimensionale constructive și tehnologice, sunt analizate diverse aspecte ale proiectării tehnologice și ale rolului structurilor dimensionale în acest proces. Se arată evoluția planificării proceselor de la metodologiile generice și în variante la metodologiile cu utilizarea algoritmilor mai noi - genetici. Subiectele principale se referă la algoritmi de alocare optimă ai toleranțelor cotelor constructive și tehnologice, alegerea optimă a instalărilor, ținând cont de caracterul modern definit în conceptul ingineriei concurențiale cu rezultate robuste, cu asigurarea capabilității procesului, cu costuri globale minime etc. Sunt analizate instrumentele de analiză a structurilor dimensionale cum ar fi diagrama de toleranțe și grafurile tehnologice în diverse aspecte și scopuri de utilizare. Se arată

că optimizarea proiectării tehnologice se poate face în conformitate cu multe criterii, cele mai importante dintre care au caracter structural. Optimizarea structurală a proceselor tehnologice în final trebuie să se manifeste economic și acest lucru poate fi evaluat prin relația cost-toleranță.

În rezultatul analizelor efectuate sunt formulate scopul și obiectivele cercetării.

Capitolul doi prezintă stabilirea metodelor de cercetare a preciziei tehnologice în aspectele determinării proprietăților structurilor dimensionale tehnologice și a factorilor de structură. Sunt caracterizate metodele de analiză dimensională bazate pe formarea preciziei cotelor tehnologice: independent (de maxim și minim), dependent (geometrice) și compensarea erorilor (de maxim și minim cu compensarea erorilor). Compensarea erorilor este tratată ca rezultatul formării parțial dependent (corelat) și parțial independent al cotelor - elemente componente ale lanțului dimensional. Efectele de compensare a erorilor permit obținerea unei precizii mai înalte a elementului de închidere în comparație cu precizia estimată prin metoda de maxim și minim sau fac posibilă executarea dimensiunilor - elemente ale lanțului dimensional tehnologic la o precizie inferioară celei calculate prin metoda de maxim și minim. În ambele situații sunt date soluții în abateri-limită. Se face o analiză a situațiilor de compensare a erorilor pentru adaosuri de prelucrare, pentru cote - elemente de închidere a lanțurilor dimensionale și pentru cote tehnologice înlănțuite. Este dezvoltată metodologia de rezolvare a lanțurilor dimensionale bazată pe diagrama de toleranțe.

Capitolul trei este dedicat cercetării formării preciziei în structurile dimensionale tehnologice. Sunt luate în considerare deosebirile dintre formarea preciziei cotelor tehnologice-țintă și a celor asociate. Se discută condițiile de formare a preciziei în cadrul instalării, fiind respectat principiul orientării invariante. Optimizarea structurilor dimensionale tehnologice este tratată ca un proces de interacțiune a structurilor dimensionale ale semifabricatelor, pieselor, proceselor tehnologice și ale sistemelor tehnologice. Atenție deosebită se atrage tendințelor mai largi de optimizare structurală induse de dezvoltarea tehnică a sistemelor tehnologice și de necesitatea asigurării robusteții soluțiilor. Structurile dimensionale tehnologice integre se formează prin "asamblarea" (integrarea) structurilor dimensionale parțiale. Sunt formulate condițiile de optimalitate a structurilor dimensionale tehnologice elementare, sunt formulate problemele de sinteză a structurilor dimensionale complexe, care pot să nu fie optime chiar dacă conțin structuri elementare optime. Este formulat principiul de similitudine a structurilor dimensionale constructive ale piesei, tehnologice ale procesului, funcțională a sistemului tehnologic și constructivă a semifabricatului ca un prim-pas spre asigurarea optimalității.

În **capitolul patru** sunt dezvoltate direcțiile de creare a structurilor dimensionale tehnologice optime în baza a două criterii: creșterea cât mai mică a preciziei cotelor tehnologice

în raport cu precizia cotelor constructive și asigurarea capabilității procesului prin neadmiterea creșterii excesive a toleranțelor adaosurilor de prelucrare. Sunt formulate condițiile de constituire a scenariilor optime de prelucrare bazate pe „ruperea” lanțurilor dimensionale lungi în părți echilibrate mai scurte cu baze tehnologice. Sunt analizate situațiile de disonanță dintre cerințele de precizie joase impuse unor cote constructive și, în consecință, a cotelor tehnologice respective și capabilitățile sistemului tehnologic. Se arată că există structuri dimensionale tehnologice optime conform unui criteriu și neacceptabile conform celui de-al doilea criteriu. Optimalitatea se poate asigura prin adaptarea structurilor dimensionale constructive la structurile dimensionale optime (redimensionare efectivă) sau prin aceeași adaptare, redimensionând piesa constructiv echivalent.

În compartimentul **concluzii finale** sunt trecute în revistă constatările esențiale ale autorului lucrării și sunt trase concluzii importante ca urmare a cercetărilor din cadrul întregii lucrări orientate spre realizarea obiectivelor formulate inițial.

1. PROBLEMATICA STRUCTURILOR DIMENSIONALE LA PROIECTAREA PROCESELOR TEHNOLOGICE

1.1. Alocarea toleranțelor în structurile dimensionale constructive

Dimensionarea pieselor în construcția de mașini se face în cote, în toleranțe dimensionale și în toleranțe geometrice (abateri de formă a suprafețelor, abateri de poziție relativă). În contextul lucrării date, toleranțele geometrice nu sunt abordate. Astfel, structura dimensională constructivă a unei piese include în calitate de elemente mulțimea cotelor constructive, mulțimea toleranțelor dimensionale, mulțimea bazelor constructive, mulțimea legăturilor dintre cotele constructive (lanțuri dimensionale, poziția cotelor în lanțuri etc.) și are caracter integrat.

Dezvoltarea cu succes a produselor de înaltă calitate necesită îndeplinirea mai multor cerințe contradictorii, conflictele de interese și obiectivele concurente dominând și modelând procesul de dezvoltare a produsului [4]. La perfectarea proiectului produsului în diferitele faze ale acestuia se cere crearea unor stări de echilibru între obiectivele și cerințele contradictorii și în special între calitate și cost. Pot fi menționate trei momente cardinale menite să asigure calitatea unui produs: proiectarea sistemică cu definirea configurației produsului, evaluarea și selectarea soluțiilor de robustețe; proiectarea în detaliu cu stabilirea parametrilor constructivi; proiectarea în toleranțe. Astfel, ideile generale sunt transformate sistematic în soluții conceptuale, apoi într-un proiect detaliat documentat al produsului.

În etapa de proiectare, proiectanții de produse mapează cerințele în capacitățile funcționale ale produselor. În comparație cu alte etape ale ciclului de viață al produsului, costul de proiectare este relativ scăzut, cu toate acestea, etapa are un impact semnificativ asupra costurilor altor etape [5].

Scopul principal al definirii toleranțelor cotelor este de a asigura funcționalitatea ansamblului de piese și a pieselor în ansambluri. Acest fapt trebuie “tolerat” în așa fel, încât toate cerințele stabilite pentru produsul tehnic complet asamblat să poată fi îndeplinite pe tot parcursul ciclului său de viață. Acesta este singurul mod de a preveni limitările funcționale și defectele de calitate ale produsului. Pe de altă parte, toleranțele influențează substanțial și procesul de fabricație.

Deoarece din fabricație nu pot rezulta piese absolut identice cu dimensiuni ce coincid cu nominalele declarate, acestor valori nominale li se atribuie toleranțe. Fabricarea oricărei piese mecanice în dimensiunea exactă specificată este imposibilă din cauza mai multor factori implicați [6]. Factorii importanți sunt asociați cu erorile procesului, începând cu instalarea

pieselor în mașina-unelte, precizia mașinii-unelte și calificarea operatorului [7]. Problemele de toleranță dimensională sunt, de asemenea, determinate și de procesul de măsurare.

Până în prezent au fost elaborate multe metode de alocare a toleranțelor cotelor constructive. Proiectanții constructivi alocă, de obicei, toleranțe adecvate funcționalității produselor (pieselor). Elementelor unei piese, care sunt importante pentru funcționarea sa, trebuie să le fie stabilite caracteristici în toleranțe de un anumit tip și valoare pentru a-i asigura funcționarea corectă [8]. Proiectanții de tehnologii adesea nu iau în considerare etapa de exploatare și se axează pe toleranțele adecvate modului în care efectele unui proces pot influența efectele altui proces, axându-se și pe costuri. Astfel, o toleranță „optimă” care ia în considerare doar o etapă a ciclului de viață al unui produs nu este, în general, optimă atunci când sunt luate în considerare și alte etape [9, 10]. Toleranțele, ca un aspect important al procesului de dezvoltare a produsului, pot prezenta o gamă de variații dimensionale și geometrice ale fiecărei dimensiuni pentru a asigura că produsul are o performanță și o funcție corespunzătoare. Proiectarea în toleranțe necesită cunoașterea profundă a standardelor de dimensionare și a toleranțelor, cunoașterea procesului de fabricație și a costurilor de producție [11].

Autorii lucrării [12] arată că procesul de dezvoltare al unui produs include definirea cerințelor de proiect, identificarea lanțurilor de dimensiuni, dimensionarea geometrică inițială și stabilirea toleranțelor, analiza variațiilor, reconstituirea specificațiilor tehnice, validarea calculelor și îmbunătățirea continuă. Efectuarea acestor activități în toleranțe necesită cunoștințe și abilități cuprinzătoare în domeniul toleranțelor în proiectarea constructivă și tehnologică, fabricație, calitate și costuri de fabricație pentru a selecta specificațiile de toleranță adecvate. Identificarea lanțurilor dimensionale are drept scop principal stabilirea surselor variațiilor, cum ar fi toleranțele diferitelor componente, toleranțele diferitelor caracteristici ale procesului etc. Însă există mulți factori care influențează toleranța cerințelor de proiectare, astfel este necesară o ordonanțare a acestora la analize [13, 14]. Identificarea lanțurilor de dimensiuni este una dintre cele mai dificile sarcini la proiectarea în toleranțe. Când lanțul de dimensiuni este identificat, trebuie proiectate desenele și cotarea acestora în toleranțe. Valorile inițiale ale toleranțelor sunt stabilite pe baza funcționalității piesei, capacității procesului de prelucrare și a obiectivelor de cost. E de menționat că o toleranță mică duce la o calitate înaltă, dar cresc costurile de producție [13, 14].

Când se discută despre abaterile caracteristicilor pieselor, trebuie să se ia în considerare procesul de proiectare, structura constructivă, procesele secvențiale de fabricație, asamblarea rezultatelor proceselor parțiale de fabricație într-o structură integră, utilizarea piesei [8]. Cerințele funcționale față de piesă au o mare influență asupra soluției selectate în procesul de

proiectare, iar toleranțele dimensionale sunt unele dintre principalele surse ale calității în producția industrială. Autorii lucrării [12] menționează că există câteva abordări pentru a spori calitatea, eficiența și robustețea pieselor, prin care direcțiile de dezvoltare a sistemelor tehnice conduc la piese cu o valoare mai mare și un grad de eficiență mai înalt: stabilitatea toleranțelor (lipsa influențelor din partea altor toleranțe), analiza toleranțelor, mărirea valorilor toleranțelor (micșorarea preciziei fără a afecta funcționalitatea), decuplarea toleranțelor (excluderea interinfluențelor), evitarea toleranțelor (mai bine fără cerințe specificate în toleranțe) [8].

Corectitudinea dimensionării piesei în toleranțe se face prin analiza de optimizare în două niveluri. Autorii lucrării [12] recomandă ca analiza și optimizarea toleranțelor să fie împărțite în analiza internă a piesei și în analiza piesei ca entitate integră [8]. După analiza toleranțelor piesei întregi, fiecare componentă cu zone de toleranță modificate trebuie analizată din nou în regim intern. În cadrul analizei interne a toleranțelor piesei lanțurile dimensionale în toleranțe vor trebui calculate pentru fiecare linie importantă ce determină poziția spațială relativă a suprafețelor în condiții proprii de funcționare. Astfel, se poate obține abaterea sumară în condiții reale de funcționare. Analiza internă a toleranțelor piesei se concentrează și pe precizia realizabilă a proceselor de fabricație, a mașinilor-unelte și sculelor, a combinației de faze tehnologice și a aspectelor economice. Predicțiile privind preciziile proceselor de fabricație pot fi făcute numai cu o anumită doză de incertitudine (incertitudinea de fabricație). Metodele de simulare și de calcul pot oferi proiectantului posibilitatea de a obține informații privind precizia așteptată a proceselor.

1.2. Alocarea toleranțelor în structurile dimensionale tehnologice

O structură dimensională tehnologică include în calitate de elemente mulțimea cotelor tehnologice, mulțimea toleranțelor dimensionale tehnologice, mulțimea adaosurilor de prelucrare pe suprafețe, mulțimea toleranțelor adaosurilor de prelucrare, mulțimea bazelor tehnologice, mulțimea legăturilor dintre cotele tehnologice (lanțuri dimensionale tehnologice, poziția cotelor tehnologice și a adaosurilor de prelucrare în lanțuri etc.). Structurile dimensionale tehnologice au caracter secvențial și complementar.

Un proces tehnologic va asigura în mod garantat calitatea pieselor fabricate dacă valorile toleranțelor tehnologice vor fi cu puțin mai mari decât suma erorilor de prelucrare. Determinarea sumei erorilor de prelucrare este un proces destul de complicat, mai ales în etapa elaborării variantelor proiectelor tehnologice. Astfel, în prezent, principala modalitate de alocare a valorilor toleranțelor cotelor tehnologice este utilizarea preciziei medii statistice (economice)

caracteristică unei anumite metode de prelucrare. Tabelele cu informații privind precizia de prelucrare economică a prelucrării se conțin în îndrumare sau în bazele de date corporative.

La definirea structurii operației de prelucrare mecanică în aspectul alocării toleranțelor tehnologice se țin cont de datele privind utilajele tehnologice, metodele de prelucrare, metodele de reglare și de asigurare a preciziei. Astfel, valorile toleranțelor alocate vor fi în concordanță cu condițiile de executare a operației tehnologice. Stabilirea valorilor optime și economic justificate ale toleranțelor tehnologice se referă la fiecare fază tehnologică și instalare aparte [15].

Abordarea toleranțelor este unul dintre aspectele importante atât pentru funcționalitatea piesei, cât și pentru costul de fabricație al acesteia, fiind o tehnică-cheie în mediul integrat de proiectare asistată de calculator și fabricație asistată de calculator [16]. Autorii acestei lucrări menționează că sistemele convenționale de proiectare și de fabricație traversează două etape secvențiale și separate ale procedurilor de proiectare în toleranțe. Primul aspect este relevant pentru toleranțele dimensiunilor pieselor produsului, iar al doilea este relevant pentru toleranțele dimensiunilor formate în proces.

Utilizarea datelor de referință privind precizia statistică și a regulilor de alocare a toleranțelor tehnologice în diferite metode de prelucrare, diferite utilaje, pentru anumite configurații ale operațiilor și instalărilor tehnologice reprezintă în prezent un suport informațional important pentru un tehnolog de proiectare, care îi permite, chiar în fazele inițiale de proiectare, să stabilească prin calcule preciziile necesare ale dimensiunilor tehnologice.

În lucrarea [17] autorii menționează importanța legăturii dintre toleranțele alocate produsului (constructive) și toleranțele alocate tehnologiei. Alocarea toleranțelor în proiectarea produsului implică un proces paralel de alocare a toleranțelor tehnologice adecvate dimensiunilor componentelor individuale, astfel încât produsul să poată fi fabricat economic, iar funcția să poate fi îndeplinită corect. Dezvoltarea rapidă a tehnologiei informatice, puterea înaltă de calcul a făcut posibilă rezolvarea problemelor de optimizare a toleranțelor în multe opțiuni pe bază de combinații. Importanță este luarea în considerare a factorilor de timp și de costuri. În procesele de proiectare tehnologică, toleranțele dimensionale sunt variabile de proiectare atât constructivă, cât și tehnologică și trebuie determinate la nivel optim [18].

Autorii lucrării [6] consideră că analiza toleranțelor dimensionale poate fi tratată ca o problemă directă, deoarece toleranțele componentelor sunt luate în considerare algebric în lanț, plecând de la un nominal specificat, iar din acest proces rezultă o singură soluție - intervalul de toleranță total. Procesul opus, sinteza toleranței, este cunoscut și cu denumirea de alocare a toleranței, care împarte valoarea toleranței între componente în funcție de diferite criterii [19]. Acest proces poate avea o infinitate de soluții diferite. Prin urmare, procesul de sinteză în

toleranțe poate fi considerat, prin natura sa, o problemă inversă. Deși acest lucru ar putea fi considerat simplu, în esență nu este așa, deoarece componentele prelucrate au și limitări de proces care trebuie luate în considerare.

Autorii lucrării [20] afirmă că alocarea toleranțelor tehnologice în regim asistat de calculator a devenit în prezent o problemă importantă în integrarea CAPP și CAD/CAM. Ingineria simultană (concurențială) este o modalitate importantă alternativă de garanție a calității activităților competitive de producție. 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 (CAPP) 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.

Ingineria toleranțelor este aplicată atât la proiectarea constructivă, cât și la proiectarea tehnologică și se manifestă în două feluri: alocarea toleranțelor pentru fiecare dimensiune și analiza toleranțelor, ținând cont că există mai multe dimensiuni care formează sisteme. Alocarea toleranțelor constructive și tehnologice trebuie să garanteze și funcționalitatea structurii constructive ca piesă și funcționalitatea structurii tehnologice ca proces tehnologic [21].

Computerizarea proceselor de alocare a toleranțelor joacă astăzi un rol important în planificarea proceselor asistate de calculator (CAPP). Sunt depuse eforturi mari pentru a crea modele matematice în scopul alocării toleranțelor tehnologice, folosind algoritmi de optimizare [4].

Pe lângă alte aspecte importante, proiectarea în toleranțe trebuie să ia în considerare numeroase probleme de fabricație pentru a permite o fabricare profitabilă a produselor de calitate [4]. Autorii lucrării date arată că proiectarea tehnologică este adesea văzută ca o verigă între proiectarea constructivă și fabricație, dar care poate transforma problematici din fabricație în problematici de proiectare. 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.

Proiectanții de produse se concentrează adesea pe precizia componentelor necesară pentru a îndeplini funcția de proiect, dar adesea dau o atenție limitată costului de prelucrare, care este strâns legat de precizia procesului de fabricație. Inginerii de proces selectează de obicei tipurile și parametrii de proces, luând în considerare calitatea, randamentul și costul de producție [5].

Obiectivele alocării optime a toleranțelor se deosebesc în proiectarea constructivă și în cea tehnologică [22]. Proiectantul constructiv alocă toleranțe cotelor finale, asigurând, astfel, funcționalitatea piesei în ansamblu, iar proiectantul tehnologic este preocupat de problema realizării în câteva etape de prelucrare (operații, instalări, faze) a toleranțelor cotelor de proiect în fabricație, care sunt deja definite. Astfel, toleranțele sunt specificate din considerente diferite: 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 pentru o secvență de operații [4].

Autorii [5] subliniază că toleranțele alocate de către proiectanții de produse ar putea intra în conflict cu obiectivele inginerilor de proces. În alocarea toleranțelor este important să se ia în considerare proiectarea tehnologică ca parte a relației cost–toleranță. Problema de alocare a toleranțelor atât constructive, cât și tehnologice este, de obicei, modelată ca o problemă de optimizare multivariabilă neliniară constrânsă. Când sunt disponibile mai multe procese, proiectantul de tehnologii alocă toleranțe, luând în considerare preciziile și costurile proceselor alternative și diferite combinații ale acestor procese pentru a produce componente individuale, astfel încât calitatea generală a produsului și costul să poată fi optimizate.

Optimizarea parametrilor de proces este un alt domeniu de cercetare în alocarea toleranțelor. Adesea, această cercetare urmărește găsirea parametrilor care minimizează costul total de fabricație cu o constrângere asupra toleranței generale [23]. Optimizarea concomitentă a cuplului cost–toleranță trebuie să țină cont de funcționalitate și de fabricabilitate. Se poate spune că toleranțele tehnologice trebuie să corespundă optim funcționalității piesei de prelucrat [4].

Autorii lucrării [24] au propus o metodă de alocare a toleranțelor, care nu numai că a permis selectarea proceselor de prelucrare, dar a luat în considerare și influențele parametrilor de prelucrare. În lucrarea [25] au fost adoptate două tehnici de optimizare a procesului de prelucrare cu trei obiective combinate: minimizarea însumării toleranțelor, minimizarea costurilor de fabricație și minimizarea pierderii de calitate.

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 [26, 27]. 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. Valoarea actuală a pierderii calității așteptate, exprimată ca funcție a toleranțelor tehnologice, este consolidată în costul total de asamblare, luând în considerare degradarea produsului. Urmează optimizarea valorilor toleranțelor stabilite

pentru a realiza un sistem de toleranțe comun privind proiectarea constructivă și tehnologică. Metoda este ilustrată prin exemplul din figura 1.1. Legătura dintre sistemele dimensionale în toleranțe a ansamblului și a pieselor componente se face prin dimensiunile critice. Aceste dimensiuni pe piese au influență majoră asupra preciziei ansamblului și asupra funcționalității. Astfel, stabilirea toleranțelor optime din punct de vedere funcțional (ajustaje), constructiv (toleranțe constructive) și din punct de vedere tehnologic (toleranțe tehnologice) reprezintă o abordare sistemică pe trei niveluri ierarhice: suprasistem, sistem, subsistem.

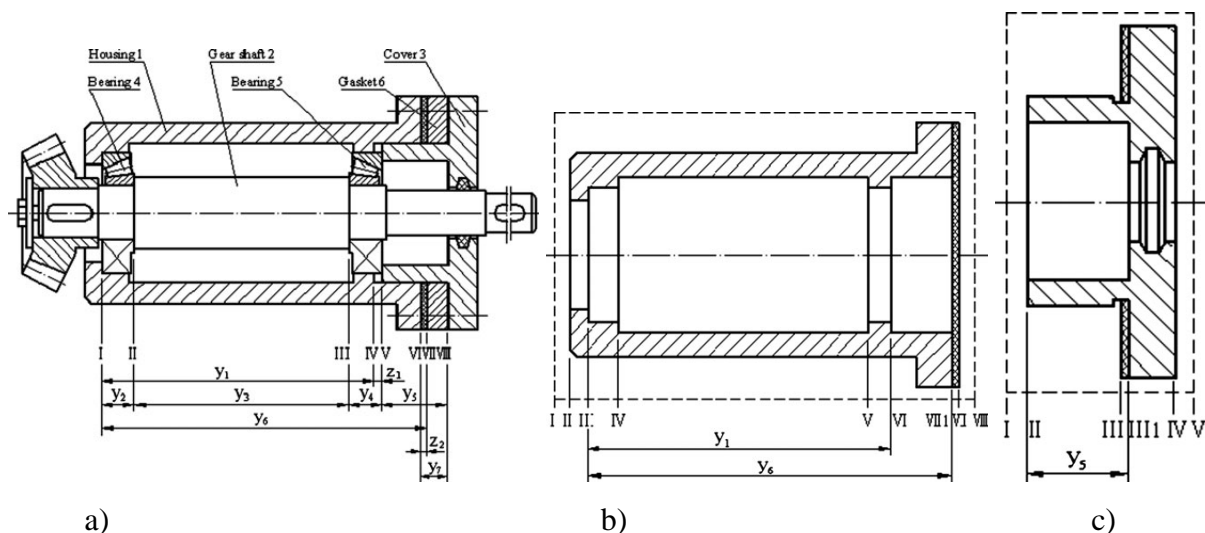


Fig. 1.1. Optimizarea alocării simultane a toleranțelor cotelor constructive și a celor tehnologice: a) ansamblu angrenaj conic și lanțurile de dimensiuni ale acestuia; b) dimensiunile critice ale corpului 1; c) dimensiunea critică a capacului 3 [26].

Experiența tradițională constă în faptul că toleranțele sunt atribuite dimensiunilor tehnologice în scopul asigurării costului minim, fiind neglijată restricția legată de capacitatea de fabricație a mașinilor-unelte disponibile [28]. Ca urmare, este dificilă obținerea performanțelor de fabricație economice și antrenarea în proces a mașinii-unelte adecvate toleranțelor de proiect. Această problemă este tot mai vizibilă și obține soluții eficiente. Autorii lucrării [29] au stabilit modelele de optimizare liniară secvențială bazate pe capacitățile procesului. Această abordare poate genera alocarea toleranțelor cotelor tehnologice simultan cu reducerea costurilor de fabricație și cu creșterea capacității de fabricație, adică de asigurare tehnologică [30, 31, 32]. Important este ca modelele utilizate să se bazeze nu pe abaterile standard ale procesului, dar să poată folosi pe deplin cunoștințele din contextul real de fabricație și să se ia în considerare fezabilitatea reală a rezultatului alocării toleranțelor. Astfel, se poate asigura întreg setul de performanțe cum ar fi fabricabilitatea produsului și robustețea toleranțelor în condiții reale de asigurare tehnologică [28]. Robustețea procesului, calitatea și costurile trebuie să fie criterii pentru stabilirea toleranțelor cotelor tehnologice. La alocarea toleranțelor urmează a fi respectate

următoarele condiții: echilibrul dintre cost și calitate (precizie) în condițiile asigurării tehnologice garantate (toleranțele de proiect pot fi asigurate în contextul real și situațional de fabricație [8]. Acest lucru este important și în contextul flexibilității tehnologice, când tehnologiile pot fi realizate situațional pe diferite sisteme tehnologice și în diferite variante structurale.

Metoda de proiectare tehnologică în toleranțe în condițiile capacității tehnologice concrete poate fi realizată în trei etape [28]:

- Pentru fiecare element constituent tip al lanțului dimensional tehnologic sunt enumerați factorii tehnologici potențiali (metoda de prelucrare, mașina-unelte, scule, dispozitive, disponibilitate). Astfel, poate fi confirmată capacitatea procesului în condiții optime cost–toleranță sau se pot alocă toleranțe pasibile de obținut, dar cu nonoptimalitatea cuplului cost–toleranță.
- Din factorii tehnologici potențiali este construit procesul tehnologic pentru care se alocă toleranțele. Acest proces tehnologic trebuie să fie robust. Parametrii procesului sunt cuplurile constituite din dimensiunea tehnologică X_{ij} și capacitatea de proces Cp_{ij} . Aici i este dimensiunea, iar j este metoda de prelucrare cu asigurare tehnologică.
- Optimizarea robustă a toleranțelor pe baza unui algoritm, care ar conduce la o schemă de alocare a toleranțelor, metode de prelucrare fezabile și indicele optim de capacitate a procesului. Se stabilește existența soluțiilor fezabile și adecvarea capacității procesului.

1.3. Constituirea și analiza structurilor dimensionale tehnologice cu diagrama toleranțelor

Cea mai cunoscută metodă de transfer a cerințelor de precizie constructive în cerințe tehnologice este metoda denumită ΔL [20]. Conform acesteia, fiecare dimensiune constructivă cu toleranța sa este reprezentată prin dimensiuni de prelucrare tehnologice și toleranțele respective. Pentru a facilita transferul menționat se utilizează reprezentarea grafică unică (combinată) a suprafețelor prelucrate și a celor finale. În varianta cea mai răspândită suprafețele sunt paralele (fig.1.2). Metoda ΔL permite dezvoltarea lanțurilor dimensionale în toleranțe, care este tradusă în specificații dimensionale sau specificații simple de poziție reciprocă. Autorii menționează că această metodă nu ține cont de orientarea piesei la prelucrare și nu poate fi folosită pentru a rezolva situații în sistemele de referință formate din mai multe suprafețe. În acest sens, sunt recomandate abaterile-limită simetrice „ \pm ”. Toleranțele tehnologice oferă un set complet de monitorizare a fiecărei dimensiuni în proces de modificare la gradul necesar pentru a

satisface cerințele constructive de funcționare sau de interschimbabilitate ale pieselor prelucrate mecanic.

Tradițional, specificarea și alocarea atribuirea toleranțelor constructive și tehnologice (de proces) sunt realizate în cadrul a două departamente separate – de proiectare produs și de fabricație [4]. Transferul în termeni de toleranță între departamente joacă un rol important, deoarece astfel devine posibilă convertirea toleranțelor constructive în toleranțe tehnologice de fabricație prin utilizarea metodelor de analiză și sinteză a toleranțelor. Acest lucru se face mai ușor, folosind un limbaj grafic - o diagramă de toleranță ca un plan de proces și de control al dimensiunilor unei piese de prelucrat

cu toleranțele sale. Tehnicile de lucru cu diagrama toleranțelor sunt orientate spre atingerea echilibrului dintre toleranțele constructive și cele tehnologice, echilibru asigurat prin lărgirea toleranțelor tehnologice fără a afecta toleranțele constructive.

Atât în abordarea tradițională, cât și în cea computerizată soluțiile optime pentru proiectarea tehnologică au fost obținute, fiind utilizate diagramele de toleranțe [16, 18]. Acestea au fost dezvoltate pentru a se asigura că dimensiunile tehnologice de proces și toleranțele acestora îndeplinesc cerințele funcționale.

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 [33]. Tehnica se bazează pe capacitatea de asociere a toleranțelor dimensionale în procesele de prelucrare. Scopul proceselor de prelucrare este de a atinge toleranțele de proiectare necesare pieselor, fie direct, fie ca o compoziție a diferitelor toleranțe de lucru [34]. Diagrama toleranțelor permite realizarea unei asocieri între toleranțele cotelor tehnologice și toleranțele de proiect (constructive), astfel încât se poate face o legătură între ele și pot fi realizate calcule și analize în termeni de toleranțe. Diagrama toleranțelor este o alternativă a sarcinilor complexe de calcule combinatorice [20], fiind valabilă pentru majoritatea pieselor și poate fi utilizată în diferite scopuri cum ar fi analiza orientării și fixării, ingineria concurențială etc. [35, 36].

Diagrama toleranțelor necesită doar date privind toleranțele care pot fi asigurate pentru cotele tehnologice formate în procesele tehnologice în anumite condiții, iar problema se rezolvă într-un mod suficient de simplu. Această abordare nu face o distincție între diferitele surse de eroare (fixare, mașină-unealtă, proces etc.) [34]. Din punct de vedere matematic, diagrama

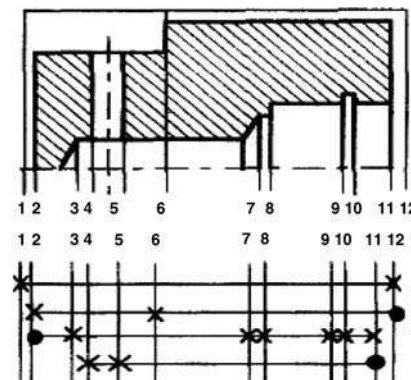


Fig. 1.2. Metoda ΔL de transfer a cerințelor de precizie constructive în cerințe tehnologice [20]

toleranțelor stabilește echivalența dintre toleranțele cotelor constructive și toleranțele de lucru (cotelor tehnologice), iar procesul are loc în mai multe etape sau în iterații.

Una dintre variantele diagramei toleranțelor se referă la tehnicile orientate spre soluția optimă, care s-a dovedit a fi cea mai eficientă. Echilibrarea diagramei toleranțelor este adesea considerată ca o legătură importantă între sistemele de proiectare asistată de calculator (CAD) și de planificare a proceselor asistată de calculator (CAPP) [37].

O diagramă de toleranță simplă este reprezentată în figura 1.3.

Diagrama toleranțelor este folosită pentru a determina cumulearea toleranțelor dimensiunilor rezultate (dreapta jos) [38]. Acestea din urmă sunt comparate cu toleranțele cotelor constructive (stânga jos) pentru a se asigura că piesa poate fi prelucrată în conformitate cu cerințele tehnice de precizie specificate în desenul de execuție. 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.

Una dintre îmbunătățirile diagramei de toleranță se referă la trecerea de la toleranța dimensiunii la toleranța poziției spațiale a suprafeței prelucrate. Metoda toleranței de poziție a suprafeței (Tolerance Position Surface - TPS) [39] este o îmbunătățire a tehnicii de reprezentare grafică a toleranțelor. Îmbunătățirea se referă la descompunerea în două părți a capacității asociate cu toleranța dimensională: prima parte provenind de la dispozitivul de fixare, iar a doua parte de la prelucrarea pe mașina-uneltă [34]. Această descompunere permite separarea cerințelor de capacitate ale celor două surse principale: dispozitivul de fixare și procesul de prelucrare mecanică. Fiind separate sursele, pot fi identificate și efectele de capacitate provenite din aceste surse. Metoda TPS permite luarea în considerare independentă a influențelor asupra toleranțelor cotelor tehnologice datorită separării proceselor de configurare a sistemului tehnologic și de prelucrare. Se consideră că influența configurației sistemului tehnologic se manifestă prin toleranța poziției suprafeței luate ca bază tehnologică față de suprafața dispozitivului. Este evident că acest lucru depinde atât de piesă, cât și de dispozitivul

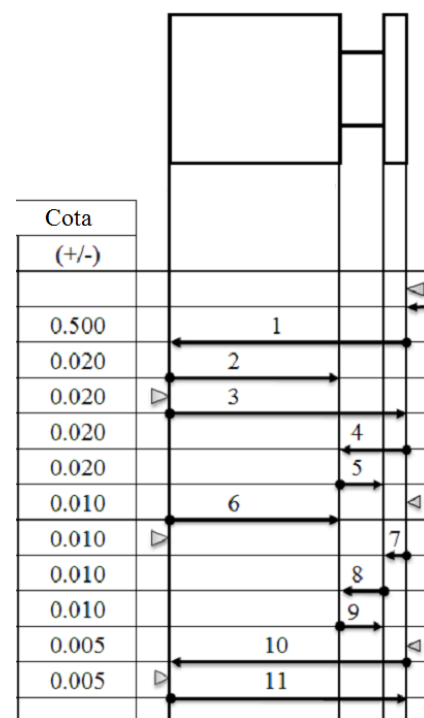


Fig. 1.3. Structura diagramei de toleranțe [38]

de fixare utilizat în configurare. Rezultatul interacțiunii acestor două suprafețe reprezintă o componentă a toleranței cotei tehnologice (fig. 1.4).

Primul beneficiu al acestei abordări constă în posibilitatea de a studia influențele din diferite surse cum ar fi toleranțele de poziție a suprafeței de orientare și a celor prelucrate, fiind utilizat principiul superpoziției efectelor. Al doilea avantaj constă în faptul că metoda TPS permite obținerea unor lanțuri dimensionale în toleranțe mai simple și mai bine percepute în condițiile când în aceeași configurație a sistemului tehnologic există mai multe suprafețe prelucrate [39, 40].

În metoda diagramei toleranțelor, toate cotele tehnologice au inițial o bază tehnologică de instalare, astfel încât toleranțele acestora sunt stabilite între fiecare dintre suprafețele prelucrate și suprafața de orientare (cotele 10 și 11, fig. 1.5).

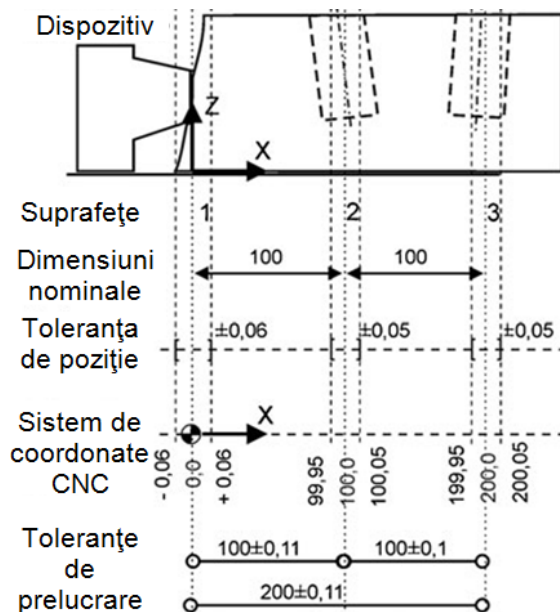


Fig. 1.4. Relația dintre toleranțele de poziție a suprafeței și toleranțele cotelor tehnologice. Reprodus după [34].

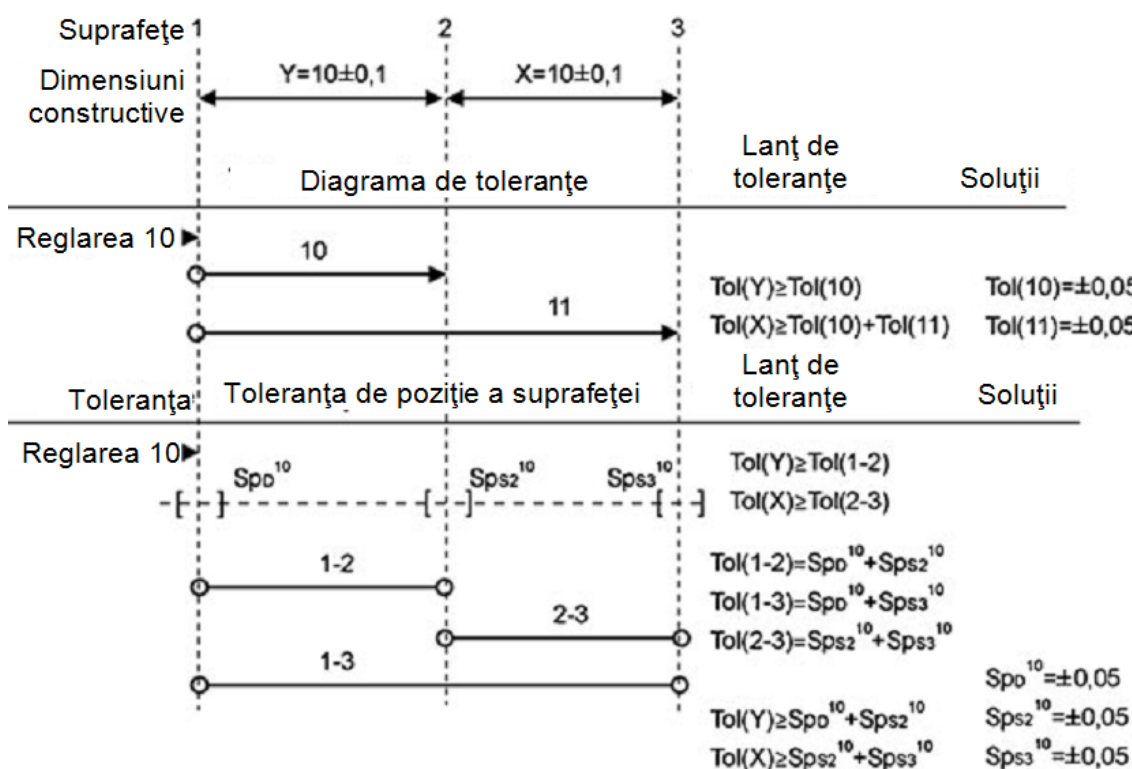


Fig. 1.5. Metoda toleranței de poziție a suprafeței în comparație cu metoda diagramei toleranțelor. Reprodus după [34].

Utilizarea metodei TPS conduce la faptul că toleranțele cotelor tehnologice pot fi stabilite între oricare dintre suprafețele instalării tehnologice. Valoarea toleranței fiecărei cote tehnologice reprezintă suma toleranțelor de poziție a suprafețelor ce determină cota tehnologică [34]. Acesta este un avantaj mare, deoarece permite alegerea cotelor tehnologice în mod similar cu cotele constructive pe piesă. Altfel spus, structura dimensională tehnologică devine flexibilă și adaptabilă la structura dimensională constructivă, iar toleranțele cotelor tehnologice nu se vor deosebi mult de toleranțele cotelor constructive. Drept consecință directă, lanțurile dimensionale tehnologice sunt semnificativ simplificate.

Metoda TPS reprezintă configurații ale reglajului și ale funcționării mașinilor-unelte CNC cu formarea cotelor tehnologice măsurate între pozițiile succesive ale suprafețelor - funcționare în coordonate relative. Toleranța de poziție a suprafeței de orientare are influență numai asupra cotei tehnologice ce se formează nemijlocit de la baza tehnologică și nu are nici o influență asupra toleranțelor cotelor tehnologice următoare. Acesta este de fapt efectul respectării principiului orientării invariante.

Prin metoda TPS pot fi simplificate structurile dimensionale tehnologice, adaptate aceste structuri dimensionale la structurile dimensionale constructive. Acest fapt presupune o creștere a toleranțelor cotelor tehnologice și o reducere a costurilor de fabricație. E de subliniat că simplificarea menționată are efect evident când în cadrul instalării tehnologice există mai multe suprafețe prelucrate. Foarte important este faptul că structurile dimensionale tehnologice nu numai că se adaptează mai ușor la structurile dimensionale constructive, dar sunt capabile să utilizeze capacitățile funcționale ale mașinilor-unelte CNC programabile în coordonate absolute și relative de la zeroul mașinii sau de la zerouri flotante.

Un alt model alternativ de reprezentare a capacității în procesele de prelucrare este cel al erorilor de localizare pe suprafețe atât de referință, cât și de prelucrate [41]. Relațiile geometrice în toleranțe printre caracteristicile sau entitățile geometrice ale caracteristicilor sunt considerate criterii foarte importante pentru planificarea configurației sistemului tehnologic. Aceste relații au influență asupra celor trei etape ale proiectării configurației după cum urmează: formarea instalării (setării), selecția bazelor și secvențierea setării. Următoarele metode de configurare sunt utilizate în mod obișnuit pentru a respecta toleranțe între două caracteristici (suprafețe) [42]:

- prelucrarea celor două caracteristici în aceeași setare, la aceeași instalare;
- utilizarea unei caracteristici ca bază tehnologică de instalare pentru prelucrarea celeilalte caracteristici;
- utilizarea unei terțe caracteristici în calitate de bază tehnologică pentru a prelucra cele două caracteristici în două configurații ale sistemului tehnologic (două instalări) diferite.

Cea mai avantajoasă este prima configurare, deoarece lanțurile dimensionale sunt cele mai scurte. Cea de a doua configurare are rezultate, de obicei, mai puțin precise. Metoda a treia de configurare este una puțin avantajoasă, or, reinstalarea provoacă apariția erorilor de fixare.

În lucrarea [38] se menționează că la prelucrarea unui produs există o serie de faze tehnologice, iar inginerii de proces trebuie să conștientizeze faptul creării unor situații de cumulare a toleranțelor și că astfel este afectat modul de atribuire a toleranțelor cotelor tehnologice. Cel mai eficient mod de gestionare a problemei cumulării toleranțelor în tehnologie este utilizarea unei diagrame de toleranțe. Diagrama de toleranțe este un instrument grafic utilizat pentru a asigura o dezvoltare corectă a dimensiunilor tehnologice și a toleranțelor cerute de procesul de fabricație. Cea mai esențială sarcină a diagramei de toleranță este identificarea lanțului dimensional de toleranță, care este o etapă critică în determinarea dimensiunilor tehnologice și alocarea toleranțelor.

Conform autorilor lucrării [38], lanțurile dimensionale sunt constituite între suprafețele prelucrate. Dimensiunile piesei și ale adaosurilor de prelucrare sunt situațional elemente de închidere ale lanțurilor, în timp ce dimensiunile tehnologice sunt elemente constitutive. Fiecărei dimensiuni (legături) constitutive i se atribuie în mod corespunzător o toleranță, care va contribui în cele din urmă la închiderea lanțului de dimensiuni.

De regulă, un lanț dimensional include un element de închidere și câteva elemente constitutive care împreună contribuie la închiderea lanțului dimensional. Dezvoltarea unui lanț dimensional începe cu schițarea constituentelor din diagrama toleranțelor. Constituentele sunt reprezentate de dimensiunile medii cu o plasare a lor corespunzătoare pe diagramă. Următorul pas este monitorizarea schimbărilor pozițiilor suprafeței când se face pe ea o prelucrare, iar următoarea poziție a suprafeței se va obține prin îndepărtarea adaosului de prelucrare cu deplasarea suprafeței pe direcția respectivă [43].

1.4. Constituirea și analiza structurilor dimensionale prin grafuri tehnologice

Teoria grafurilor s-a dezvoltat a fi un instrument grafic și matematic puternic în înțelegerea și soluționarea problemelor complexe mari care apar în inginerie, informatică etc. Metoda grafurilor se referă la interpretarea grafică a interacțiunii componentelor și a modului în care modelul de interconectare a componentelor influențează acțiunea la nivel de sistem. Abordarea cercetării cu grafuri oferă o metodologie orientată pentru modelarea sistemelor cu factori interdisciplinari. Limbajul grafurilor face posibilă reprezentarea structurii unei probleme complexe într-o manieră simplă cu un dublu avantaj: graful permite exprimarea structurii

profunde a situației date și reprezintă o vedere de ansamblu asupra problemei. Astfel, graful este un ghid valoros pentru soluțiile intuitive și raționale [44, 45].

O serie de cercetători folosesc metoda grafurilor în analiza toleranțelor de fabricație, inclusiv asistată de calculator. Fazele tehnologice de prelucrare sunt reprezentate ca arce pe un graf orientat. Arcele sunt conectate la noduri pentru a reprezenta o secvență finită de proces. Unul dintre neajunsurile menționate este faptul că prelucrările se fac în etape, iar graful reprezintă o stare finală. Problema a fost depășită prin tehnicile arborelui înrădăcinat (ierarhic) care generează reprezentări - arborele aciclic (în rădăcinat) al planurilor de proces. Un dezavantaj al tehnicii grafurilor constă în faptul că toleranțele geometrice sunt ignorate.

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 [46]. Abordarea bazată pe grafuri în planificarea configurațiilor instalărilor se concentrează pe proiectarea dispozitivelor de fixare a pieselor în procesul de fabricare. Pentru utilizarea industrială este necesară o abordare grafică mai eficientă și mai ușor de înțeles.

Metoda grafurilor la proiectarea tehnologică pentru o piesă de tip arbore a fost utilizată în lucrarea [47]. Exemplul tehnologiei de prelucrare este dat în figura 1.6. Cotele constructive sunt notate cu litera K cu un număr de ordine.

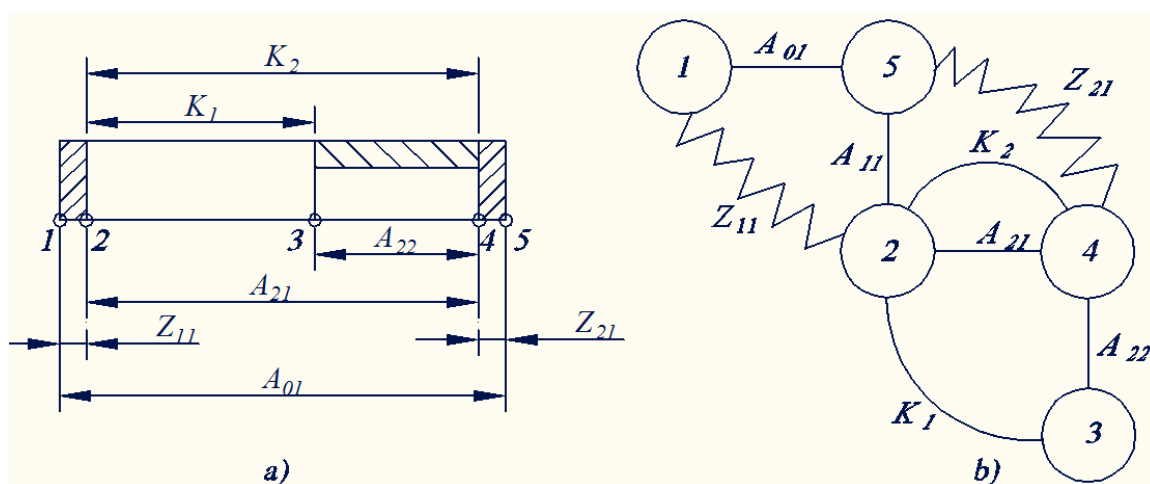


Fig. 1.6. Schema dimensională a procesului tehnologic de prelucrare a arborelui (a) și graful relațiilor dimensionale tehnologice (b) [47]

Cotele tehnologice sunt notate cu litera A cu un număr de ordine ce reflectă starea acestuia de la semifabricat la piesă. Tehnologia de prelucrare conține, de obicei, toate dimensiunile, dar în exemplul analizat cele diametrice sunt omise, fiind folosite doar cele axiale.

Se poate menționa că notările nu sunt sugestive, nu reflectă clar legăturile dimensionale dintre suprafețe. În schimb, graful include adaosurile de prelucrare - fapt pozitiv, dar notările sunt aceleași - neclare. Graful constituit demonstrează clar că adaosurile de prelucrare reprezintă:

$$\begin{aligned} Z_{11} &= A_{01} - A_{11} \text{ și} \\ Z_{21} &= A_{11} - A_{21}. \end{aligned} \quad (1.1)$$

Este clar cum se formează cotele constructive finale pe piesă:

$$\begin{aligned} K_1 &= A_{21} - A_{22} \text{ cu toleranța } \omega_{K_1} = \omega_{A_{21}} + \omega_{A_{22}} \text{ și} \\ K_2 &= A_{21} \text{ cu toleranța } \omega_{K_2} = \omega_{A_{21}}. \end{aligned} \quad (1.2)$$

În lucrările [48, 49] este abordată problema planificării proceselor prin metoda grafurilor cu optimizarea genetică "colonia de furnici" (abordarea "colonie de furnici" este un algoritm de optimizare bazat pe comunicarea tacită, feromoni la furnici, și găsirea de soluții pe niveluri ierarhice autonome). Se menționează două etape cu activități și proceduri distincte:

- Problema planificării proceselor (proiectării tehnologice) este reprezentată ca un graf orientat. Graful constă din noduri orientate/neorientate și din relații de tipul "SAU". Nodurile înglobează toate fazele tehnologice alternativ posibile pentru fiecare caracteristică. Arcele orientate denotă constrângerile de precedență dintre operații. Arcele neorientate indică căile posibile de selectat. Relațiile "SAU" denotă alternanța fazelor tehnologice afiliate aceleiași caracteristici de fabricație.

- Cel de-al doilea moment este bazat pe abordarea "colonie de furnici" în două etape utilizate pentru a optimiza planul de proces pe baza grafului orientat. În etapa 1, nodurile sunt purtătorii de feromoni. Colonia de furnici este ghidată de feromoni și de informațiile euristice ale nodurilor pentru a forma un set de noduri preferențiale. Graful inițial va fi redus la un simplu graf cu noduri ponderate, constând din nodurile favorabile și arcele orientate/neorientate dintre nodurile stabilite în etapa 1. În etapa 2, arcele orientate/neorientate devin purtători de feromoni. "Colonia de furnici" este astfel ghidată de informațiile euristice ale nodurilor și feromonilor arcelor pentru a realiza planul optim de proces cu obiectivul de a minimiza costul total de producție.

Figura 1.7, a) reprezintă un exemplu de graf pentru un oarecare proces de prelucrare a unei piese. Fiecare nod este conectat cu alte noduri cu o mulțime de legături, fiecare dintre care reprezintă o alternativă de act tehnologic. Relațiile de tip "SAU" sunt menite să impună alegerea iminentă a unei variante, astfel încât cealaltă alternativă este exclusă [48, 49].

Precedențele de succes în alte situații similare servesc în calitate de constrânger utilizate pentru selecția fazelor tehnologice. După etapa 1 de selecție, numărul de noduri pe graf se reduce

substanțial (fig. 1.7, b). Urmează stabilirea ordinii, adică stabilirea arcelor operaționale. În figura 1.8 este reprezentat rezultatul acestor două etape de selecție bazat pe precedente (noduri și arce).

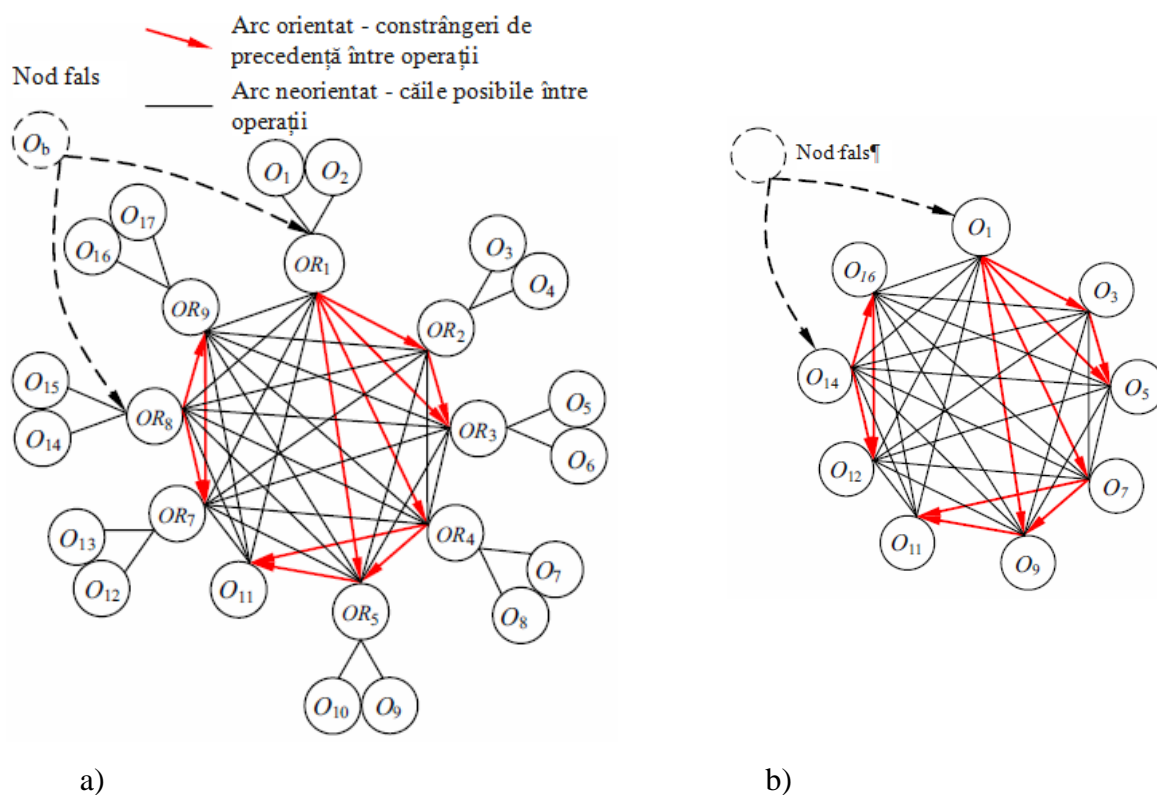


Fig. 1.7. Graful relațiilor constructive al piesei, a), și exemplu de graf al relațiilor tehnologice cu număr redus de noduri după etapa 1, b) [48].

1.5. Optimizarea structurală a proceselor tehnologice

O soluție este optimă (din latină *optimus* - cea mai bună), dacă este mai preferată decât altele dintr-un motiv sau altul. În inginerie, optimul este cea mai bună opțiune, decizie, alegere etc. dintre cele permise în prezența unei reguli de preferință generale sau parțiale (cu referire la cuple). O astfel de regulă se numește criteriul optimității, iar indicatorii de calitate vor servi ca măsură de preferință. Se poate vorbi despre opțiunea optimă doar dacă sunt îndeplinite două condiții: prezența a cel puțin două opțiuni comparabile ce necesită alegere și cel puțin a unui criteriu de alegere. Fiecare alegere a variantei optime este specifică, deoarece este făcută după unul sau câteva criterii. Opțiunea optimă este strans legată de sistemul de criterii. Impunerea altui sistem de criterii va conduce la altă variantă optimă [50].

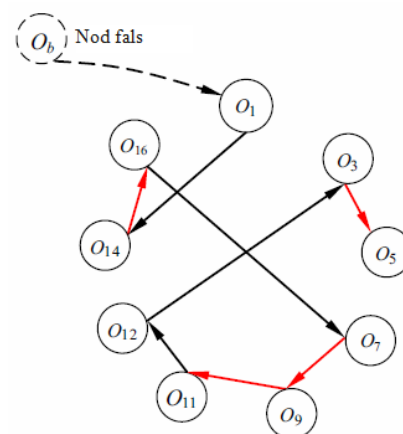


Fig. 1.8. Ordinea de prelucrare final acceptată [48]

Procesele tehnologice au următoarea 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 [51, 52].

Diferitele variante ale procesului tehnologic se deosebesc prin structură și prin parametri, prin diferiți indicatori de performanță cum ar fi timpul consumat, costurile, productivitatea, consumul de scule și de material etc. Noțiunea de flexibilitate tehnologică insistă asupra variantelor de tehnologii relativ echivalente în condițiile de schimbare permanentă a condițiilor externe pentru a asigura stabilitatea fabricației. Este clar că alegerea se poate face dintre variantele ce din punct de vedere tehnic asigură pe deplin cerințele tehnice impuse de desenul de execuție, care reprezintă un etalon de necontestat. Nu se iau în calcul opțiunile ce nu asigură rezultatul tehnic cerut. Alte criterii reprezintă motivul de selecție, de optimizare, printre ele cel mai bine perceput fiind criteriul direct economic – costul. Pot fi utilizate și rentabilitatea maximă, consumul minim de energie etc. Există criterii tehnico-economice cu conotație de orientare a procesului de optimizare spre cel mai bun rezultat. Printre ele poate fi menționată precedența, productivitatea maximă, timpul minim, fiabilitatea echipamentelor, capacitatea tehnologică de producție maximă, stabilitatea etc. Criteriile tehnice se referă la precizia de prelucrare, calitatea suprafețelor, proprietățile fizico-mecanice ale stratului superficial, durabilitatea sculelor etc. Pot fi utilizate criterii structurale cu referire la operație, instalare, poziție, reglare etc. [53].

În practica modernă, procesele de optimizare se bazează mult pe metodele matematice analitice sau numerice orientate spre stabilirea celor mai bune opțiuni dintr-o varietate mare de alternative. Din punct de vedere al modalității de căutare a optimului, există patru grupe de metode de optimizare: analitică, recursivă, iterativă, stocastică [51]. Dacă problema poate fi descrisă cu funcții și constrângeri sub formă de ecuații matematice, atunci devine valabilă metoda analitică. Astfel, este asigurată optimalitatea regimurilor de așchiere, parametrilor sculelor așchietoare etc. Metodele recursive se referă la găsirea prin calcule repetate a celor mai

bune combinații ale variabilelor. Metodele iterative se referă la modalitățile de calcul al valorii funcției-obiectiv la unul sau mai multe puncte de probabilitate pentru a determina cel mai bun punct. Calculul se efectuează până când valoarea criteriului adoptat se va deosebi de valoarea prestabilită cât mai puțin. Astfel, pot fi stabilite numai valorile optime locale. Metodele stocastice se bazează pe căutarea aleatorie a soluțiilor optime prin proceduri de colectare și prelucrare a informațiilor. Metoda este caracterizată de simplitate, fiabilitate, suficientă precizie și ușurința în programare [54]. Aceste metode de căutare aleatorie a optimului au devenit foarte populare și sunt utilizate pentru diferite sarcini de proiectare a proceselor tehnologice de fabricație a pieselor în prezența unui număr mare de factori aleatorii, care nu pot fi descriși într-o formă matematică tradițională.

În lucrarea [51] se subliniază că pentru a realiza optimizarea proceselor tehnologice sunt necesare: un model matematic al prelucrării piesei; criteriul sau criteriile de optimalitate; funcția-scop; sistemul de restricții, de constrângeri și de precedente; parametri de intrare, de ieșire și cei interni clar definiți; unul sau mai mulți parametri variabili controlați care se manifestă prin legături cu parametri interni. Criteriile de optimalitate ale proceselor tehnologice pot fi foarte diferite și trebuie să corespundă cerințelor: se referă clar la tehnologia suficient de deplin descrisă, au sens fizic clar și sunt măsurabile fără ambiguități la o precizie acceptabilă, sunt descrise matematic în formă simplă.

Optimizările proceselor tehnologice pot fi [55]:

- structurală, care constă în alegerea celei mai bune structuri (ordinea operațiilor, configurația instalărilor, fazele tehnologice și ordinea acestora etc.) cu efect de îmbunătățire a parametrilor structurali, de minimizare a costurilor sau cu orice alt efect valoros situațional;
- parametrică, care se referă la parametri optimi cum ar fi toleranțele dimensiunilor tehnologice, adaosurilor de prelucrare, regimurile de așchiere, geometria sculelor etc.;
- structural-parametrică, care reprezintă o combinație a primelor două și reflectă o abordare integrată, mai ales în cazul proiectării tehnologice asistate de calculator și este cea mai complexă.

E de menționat că optimizarea parametrică se poate face numai după ce structura este definită, iar optimizarea structurală necesită cunoașterea parametrilor ce trebuie luați în considerare. Astfel, apare necesitatea de optimizare în iterații. Procesul iterativ de optimizare se face pe toate nivelurile și constă în repetarea multiplă a procedurilor de analiză, sinteză și evaluare. Analiza datelor, condițiilor și constrângerilor inițiale permite stabilirea limitelor posibilelor soluții tehnologice. Cu ajutorul procedeelor de sinteză se obțin soluții tehnologice

admisibile sub acțiunea unui set de constrângeri limitative. Cele mai bune soluții în funcție de un anumit criteriu sunt selectate prin procedurile de evaluare [55].

1.6. Criterii de optimalitate structurală a tehnologiilor de prelucrare mecanică

Autorii [56] consideră că selectarea unei opțiuni tehnologice care să asigure calitatea și rentabilitatea pieselor în fabricație pe baza optimizării relațiilor dimensionale și de precizie necesită definirea parametrilor tehnologici optimi. În această etapă se rezolvă una dintre problemele de bază - suportul tehnologic al condițiilor tehnice pentru fabricarea piesei. Autorii consideră că trebuie îndeplinite următoarele condiții de optimalitate:

1) Suma numărului de operații și de faze tehnologice pentru întreg procesul tehnologic trebuie să fie minimă $\sum n_i \rightarrow \min$.

2) Suma elementelor în lanțurile dimensionale tehnologice în care elementul de închidere este adaosul de prelucrare trebuie să fie egală cu 3 (cota tehnologică anterioară, cota tehnologică actuală și adaosul de prelucrare) $\sum m_j = 3$. Procesul tehnologic optim va consta din blocuri tehnologice elementare similare. În același timp, bazele tehnologice trebuie să coincidă cu bazele constructive de măsurare.

3) Suma adaosurilor de prelucrare eliminate de pe toate suprafețele trebuie să fie minimă $\sum Ad_k \rightarrow \min$.

4) Suma toleranțelor dimensiunilor tehnologice operaționale care sunt elemente ale lanțului dimensional cu dimensiunea constructivă în calitate de element de închidere nu trebuie să depășească toleranța acestei dimensiuni $T \geq \sum T_l$.

În lucrarea [57], condiția de optimalitate structurală este formulată în termeni de număr de cote tehnologice care pentru întreg procesul tehnologic trebuie să fie minim. Astfel, numărul minim posibil de cote tehnologice $N_{CT} \rightarrow \min$. Numărul de cote tehnologice este determinat din relația $N_{CT\min} = N_{CC} + 2 \cdot N_{Ad}$, unde N_{CC} - numărul de cote constructive, N_{Ad} - numărul de adaosuri de prelucrare eliminate. De fapt, prin aceasta se afirmă că fiecare cotă constructivă liniară se formează prin propria cotă tehnologică și necesită două prelucrări ale celor două suprafețe. Menționăm că există situații când cota constructivă este dată de la o suprafață ce nu necesită prelucrare mecanică și atunci $N_{CT\min} = N_{CC} + 1 \cdot N_{Ad}$. Se pare a fi o îmbunătățire a evaluării, dar următoarele analize arată că nu este pe deplin satisfăcută asigurarea capabilității tehnologice.

Optimalitatea procesului tehnologic este asigurată mai ușor dacă dimensionarea piesei, semifabricatului și a schițelor operaționale se face în trepte, pe o singură direcție, ce coincide cu

succesiunea schimbării bazelor tehnologice. Acest mod de cotare este avansat tehnologic, deoarece asigură o eroare minimă în fabricație și la măsurare. Dimensiunile stabilite prin metoda lanțului pot fi obținute cu o eroare minimă doar dacă sunt formate printr-una dintre metodele de formare automată pe mașini-unelte reglate din timp.

Analizele desenelor diferitelor piese și ale proceselor lor tehnologice denotă faptul că în multe cazuri desenele de execuție sunt întocmite fără a ține cont de cerințele tehnologice de dimensionare. Acest lucru se remarcă, în special, pentru piesele care urmează a fi prelucrate pe mașini-unelte CNC sau centre de prelucrare, dar au structuri dimensionale corespunzătoare prelucrării pe mașini tradiționale. Adesea se formează costuri suplimentare în dezvoltarea și fabricarea pieselor de produs, care pot fi reduse semnificativ dacă, la pregătirea desenelor de lucru ale pieselor, dimensionarea este efectuată, ținând cont de cerințele tehnologice actuale pentru fabricarea acestora.

În lucrarea [58], autorii consideră următoarele criterii de optimalitate ai structurilor geometrice ale proceselor tehnologice:

- numărul minim de baze tehnologice $N_{BT} \rightarrow \min$;
- minimizarea mărimii adaosurilor de prelucrare minime $Ad_{min} \rightarrow \min$;
- minimizarea toleranței adaosurilor de prelucrare $\omega_{Ad} \rightarrow \min$
- minimizarea abaterilor toleranțelor cotelor - elemente de închidere de la cele inițial determinate de cerințele tehnice $\sum \Delta\omega_c \rightarrow \min$;
- minimizarea sumei cotelor tehnologice ce se repetă în lanțurile dimensionale $\sum L_{rep} \rightarrow \min$.

Autorii [58] consideră un proces tehnologic optim prin minimizarea unui criteriu total (sintetic), și anume, $K_{\Sigma} = \sum_{i=1}^5 r_i K_i \rightarrow \min$, unde r_i este ponderea criteriului i , K_i este valoarea criteriului i . Fiecare criteriu parțial a fost evaluat prin ponderea acestuia:

- numărul de baze tehnologice N_{BT} - 0.1;
- adaosurile de prelucrare minime Ad_{min} - 0.15;
- toleranța adaosurilor de prelucrare ω_{Ad} - 0.45;
- abaterile toleranțelor cotelor - elemente de închidere de la cele inițial determinate de cerințele tehnice $\sum \Delta\omega_c$ - 0.15;
- suma elementelor în lanțurile dimensionale - 0.15.

Autorii menționează că ponderile date în lucrare nu sunt valori constante, ele vor fi altele în funcție de cerințele ce se impun procesului tehnologic.

1.7. Metode de reprezentare a relației cost–toleranță

O problemă majoră în dezvoltarea produselor este costul de fabricație care crește odată cu creșterea preciziei, de cele mai multe ori la scară exponențială, mai ales dacă este specificată o inspecție sută la sută [6]. Deci, este nevoie de un anumit compromis în ceea ce privește costurile pentru a se adapta restricțiilor de precizie a piesei de prelucrat.

Selectarea metodei de prelucrare este strâns legată de problema alocării toleranțelor de prelucrare. Fiecare metodă de prelucrare în anumite condiții de asigurare tehnologică (mașina-unealtă, scula, regimurile de așchiere, materialul de prelucrat, particularitățile constructive ale piesei etc.) oferă un anumit interval de toleranțe, iar procesul ales va depinde de valoarea toleranței alocate. Dacă se admite o altă metodă de prelucrare (fig. 1.9), se produce un salt și parametrii funcției cost–toleranță se modifică discontinuu, făcând problema imposibil de tratat analitic [59, 60]. Această dificultate poate fi depășită prin definirea unei singure funcții care se întinde pe întregul interval de toleranță. În figura 1.9 întreg intervalul de toleranță este acoperit de trei procese de prelucrare diferite, fiecare cu funcția proprie cost–toleranță. Curba de compromis, care poate fi rezultatul unei interpolări de date discrete, este de același tip cu cele trei originale, dar are o curbă continuă pe tot intervalul de toleranță.

Autorii lucrării [59] menționează că indiferent de ipotezele privind procesele de fabricație, costurile fixe nu au nicio influență asupra pantei curbei, deci, asupra alocării toleranței optime. Prin urmare, poate fi ignorată ori de câte ori nu este necesară o estimare absolută a costului total.

Algoritmul asigurării unui cuplu optim cost–calitate este dat în figura 1.10. În general, procesele cu precizie mai mare vor avea un cost operațional direct mai mare și, în plus, unii

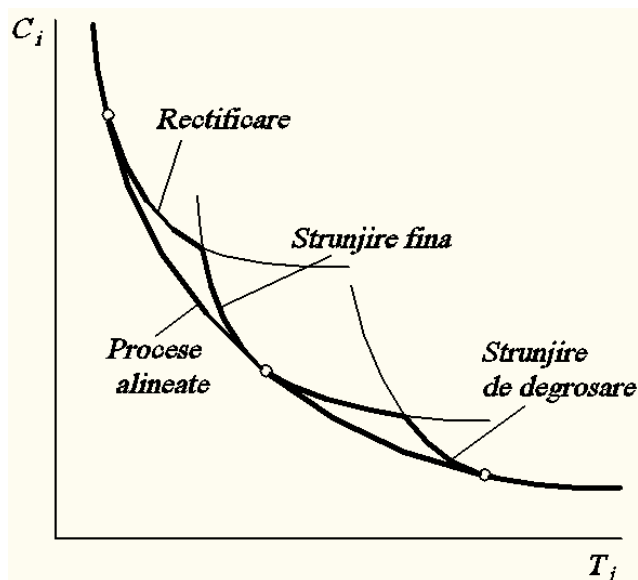


Fig. 1.9. Modificarea în salturi a funcției cost–toleranță ($T_i - C_i$) la schimbarea metodei de prelucrare. Reprodus după [59].

factori indirecti, cum ar fi forța de muncă, vor afecta precizia și costul procesului. Toleranțele pieselor componentelor individuale pot provoca dificultăți la asamblare și scăderea performanței generale a produsului. Aceste costuri sunt de obicei luate în considerare în procesele de producție [5, 61].

Toleranțele au o influență semnificativă asupra eficienței economice a produselor și proceselor. Influența economică a toleranței nu trebuie subestimată, mai ales având în vedere faptul că costurile corectării erorilor de proiectare cresc de zeci de ori de la o fază la alta în timpul dezvoltării produsului [62, 63].

Figura 1.11 ilustrează caracteristicile proceselor de prelucrare în sensul toleranțelor alocate, costurilor și valorii obținute [62]. La toleranțe mari costurile sunt mici, dar valoarea nu este satisfăcătoare. Se observă că la toleranțe tot mai mici valoarea nu mai crește, astfel costurile mari nu determină neapărat creșterea valorii. Există un interval de toleranțe favorabil și costurilor, și valorii obținute. În acest interval favorabil curba costurilor are structura dată în figura 1.9. Din punct de vedere tehnic, ca rezultat al proiectării tehnologice o dimensiune poate avea diferite toleranțe într-un interval admisibil. Economic este avantajoasă o toleranță cât mai mare, fapt ce implică întotdeauna costuri mai mici de fabricație.

Se cunoaște că metodele de prelucrare mecanică și tot ce asigură tehnologic formarea preciziei pieselor de prelucrat au un anumit grad de flexibilitate. O reglare mai riguroasă, scule mai rezistente la uzură, regimuri modificate pot asigura precizia cerută. Astfel, se poate realiza cel mai simplu caz de optimizare parametrică în limitele proceselor de fabricație neschimbate [62].

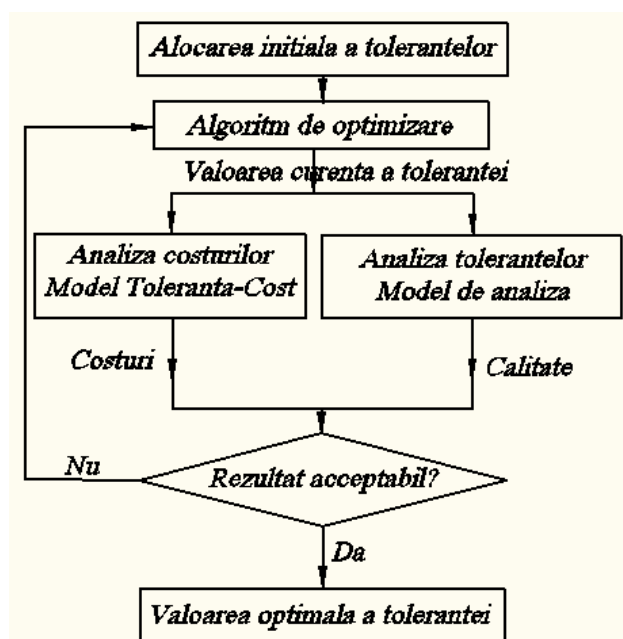


Fig. 1.10. Algoritm de optimizare a cuplului cost-toleranță. Reprodus după [4].

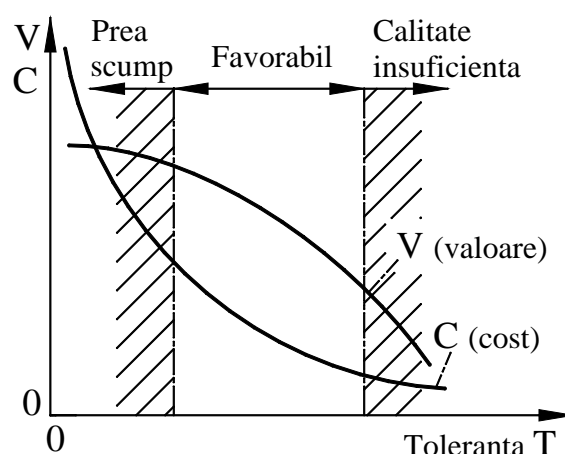


Fig. 1.11. Interdependența dintre toleranță, valoare și cost. Reprodus după [62].

Pentru evaluarea legăturii cost–toleranță poate fi utilizată orice funcție adecvată fenomenului, dar este de dorit o soluție analitică, astfel încât să poată fi evidențiate tendințele și proprietățile interesante ale toleranțelor optime. Forma cea mai răspândită pentru costul prelucrării C determinat de toleranță este [62, 64]:

$$C = C_F + C_V(T), \quad (1.3)$$

unde C_F este un cost fix independent de toleranță, iar $C_V(T)$ un cost variabil care scade odată cu creșterea toleranței. Partea variabilă este mult dependentă de costurile calității și reflectă diferențele de gradient în intervalul de toleranțe cu valori mici (fig. 1.12). Aici, la micșorarea toleranței, costurile au gradient mare, iar valoarea – gradient mic. Costurile de calitate reprezintă probabil partea majoră din costul variabil sub toleranța naturală a procesului, în timp ce costurile de operare prevalează la toleranțe mai mici.

Funcții cost–toleranță. În literatură sunt propuse o mulțime de variante de funcții cost–toleranță. Mulțimea aceasta este cauzată de situațiile extrem de variate de prelucrare: metode de prelucrare, mașini-unelte, metode de reglare, metode de asigurare a preciziei, scule așchietoare etc. Funcțiile propuse pot fi clasificate după numărul de parametri luați în considerare, dintre care un parametru este pentru costul fix C_F și unul sau mai mulți parametri sunt pentru costul variabil $C_V(T)$. Mai mulți parametri luați în considerare încearcă să facă această funcție mai adecvată în aproximarea datelor privind costurile reale, dar face funcția mai dificil de utilizat.

Pot fi enumerate funcții cost–toleranță cu doi și cu trei parametri [59]:

- funcția liniară $C = a - b \cdot \omega$;
- funcția reciprocă $C = a + b / \omega$ [65, 66, 67, 68];
- funcția reciprocă pătrată $C = a + b / \omega^2$ [69, 70];
- funcția exponențială reciprocă $C = a + b / \omega^{-e}$ [62];
- funcția reciprocă la putere $C = a + b / \omega^k$ [71, 72];
- funcția exponențială $C = a + b / e^{k\omega}$ [73, 74].

În aceste relații, C este costul prelucrării, ω este toleranța tehnologică, parametrul a caracterizează costurile fixe determinate de sistemul tehnologic, b și k caracterizează influența toleranței tehnologice asupra costului, iar e este baza logaritmului natural.

Ultima dintre relațiile menționate corespunde cel mai mult prelucrărilor pe mașini-unelte CNC [59].

Funcțiile cost–toleranță depind în mare măsură de calitatea datelor pe care se bazează și reprezintă o descriere simplificată a relației reale dintre specificația de toleranță și costurile de fabricație. Deși această simplificare poate conduce la abateri de la costurile reale suportate, este

totuși o modalitate bună de a estima costurile de producție cauzate de toleranțe. În plus, aceste funcții pot fi utilizate pentru a determina toleranțe optimizate din punct de vedere al costurilor, folosind metode cunoscute de optimizare matematică [62].

1.8. Proiectarea tehnologică asistată de calculator și noile tendințe de dezvoltare

Proiectarea tehnologică asistată de calculator (Computer Aided Process Planning - CAPP) poate fi definită ca o funcție de transformare a specificațiilor proiectului constructiv într-un set de specificații secvențiale în timp – proces tehnologic de prelucrare a unei piese dintr-o formă inițială de semifabricat într-o formă finală bună de asamblat. Secvențele procesului sunt descrise ca organizare (structură), ca parametri, ca utilaje și scule utilizate. De obicei, pentru rezolvarea acestor probleme se utilizează diagrama toleranțelor și metode eficiente de urmărire a lanțului de dimensiuni, fiind astfel stabilită relația dintre datele de prelucrare și toleranțele alocate.

Autorii lucrării [75] afirmă că într-un sistem de planificare a proceselor asistată de calculator (CAPP) trebuie efectuate două activități de bază importante: 1) recunoașterea caracteristicilor; 2) selectarea și secvențierea (detalierea) operațiilor de prelucrare. Recunoașterea caracteristicilor se referă la instrumentele de preluare a caracteristicilor (suprafețelor, dimensiunilor, toleranțelor dimensionale, toleranțelor geometrice etc.) din modelele CAD 2D și 3D și de transformare a lor în caracteristici tehnologice.

Pentru a crește eficiența proceselor de fabricație a pieselor, tehnicile de optimizare sunt aplicate și procesului CAPP. Timpul și costul de fabricație pot fi reduse, folosind parametri optimizați. În lucrarea [76] este aplicat algoritmului genetic la planificarea optimizată a proceselor asistate de computer în mediile de producție distribuite.

CAPP este de multe ori considerat parte a sistemului CAM (Computer Aided Manufacturing – Fabricație Asistată de Calculator), dar funcțiile fiind diferite, ambele sisteme, CAM și CAPP, se dezvoltă în strânsă legătură, însă separat [77, 78]. Se poate considera că CAPP acționează ca o legătură sinergetică dintre CAD și CAM. Sinergia se manifestă când CAM se integrează cu CAD (CAD/CAM), devenind o legătură directă și nu se manifestă în raport cu fiecare dintre aceste sisteme separat. CAPP integrează și optimizează performanțele sistemului integrat în fluxul interorganizațional, generând procese de fabricație și estimări de cost pentru orice proiect constructiv și modificări de proiect [79, 80].

Proiectarea tehnologică cu CAPP se poate face prin mai multe abordări. Primele două dezvoltate dintre acestea sunt: în variante (de recuperare) și generativ [81].

Sistemele CAPP în variante se bazează pe principiile tehnologiei de grup și utilizează pe larg clasificări și codificări ale pieselor. Pentru anumite piese codificate corespunzător sunt stocate tehnologii aprobate și valabile pentru fiecare familie de piese. Aceste baze de date sunt

permanent dezvoltate. O nouă piesă pentru care urmează a fi elaborat procesul tehnologic este codificată conform regulilor tehnologiilor de grup și cu acest cod se face o căutare în fișierul familiei respective de piese pentru a determina dacă există un fișier standard pentru codul de piesă dat. Dacă rezultatul este pozitiv, tehnologia este recuperată (de aici și dubla denumire a abordării). Procesul tehnologic recuperat este supus, după caz, modificărilor care pot fi minore sau majore. Această capacitate de a interveni cu modificări (editări) în procesul tehnologic standard conferă sistemului numele alternativ de CAPP în variante. Dacă nu se găsește o tehnologie conform codului dat, se caută tehnologii sub numere de cod similare sau înrudite, tehnologiile recuperate fiind ajustate, editate și înregistrate în baza de date [81, 82].

Sistemele CAPP generative nu caută tehnologii existente pentru a le ajusta la noile necesități, ci creează planul de proces, utilizând logici de decizie, formule, algoritmi și date bazate pe geometrii de piese care sunt utilizate ca intrări în sistem. În aceste sisteme sunt importante bazele de cunoștințe pentru rezolvarea problemelor specifice de generare a procesului tehnologic de la zero pentru fiecare piesă nouă care i-a fost prezentată. Pot fi subliniate încă două momente de principiu: compatibilitatea descrierii piesei pentru care urmează a fi generată tehnologia și capacitatea de a aplica cunoștințele și logica de planificare conținută în baza de cunoștințe la o descriere a pieselor noi [81, 82].

Una dintre direcțiile moderne de optimizare a secvențierii operațiilor în CAPP este legată de utilizarea algoritmilor genetici cum ar fi de exemplu:

- de recoacere simulată (asemănător recoacerii fizice a metalelor), care prevede aducerea sistemului într-o stare când legăturile necesare pot fi stabilite mai ușor și sistemul devine mai susceptibil la schimbare [83, 84];
- tehnica de optimizare a comportamentului în coloniile de furnici (din engleză - *ants colony algorithm* [48]), care prevede localizarea soluțiilor optime dintr-un spațiu ce reprezintă toate soluțiile posibile [85] așa cum o fac furnicile adevărate.

Sistemele CAPP moderne utilizează similitudini cu alte procese din lumea reală și informațională nu numai în calitate de algoritmi de optimizare, dar și de proprie funcționare. Astfel, există sisteme CAPP organizate după principiul organizării bazelor de cunoștințe [86], obținând noi caracteristici și aplicații odată ce se dezvoltă baza de cunoștințe. Complexitatea în creștere a pieselor de prelucrat și a dezvoltării proceselor de fabricație impune noi cerințe sistemelor CAPP, care pot fi conectate web (Internetul Industrial al Obiectelor) pentru a partaja date între diferite aplicații de planificare a procesului [82].

Aplicațiile sistemelor CAPP moderne își extind ariile spre sistemele virtuale de fabricație prin extinderea spațiului de factori luați în considerare la luarea deciziilor. Este vorba, în primul rând, de managementul lanțului de aprovizionare [82].

Conceptul de dezvoltare industrială Industrie 4.0 a orientat tendințele moderne de integrare informațională a tuturor proceselor industriale și a provocat apariția noțiunii de funcționare autonomă [87]. Aceasta înseamnă că componentele unui sistem în condiții concrete își pot stabili obiective, alege mijloace de rezolvare a problemelor, pot rezolva problemele în colaborare cu alte elemente ale sistemului. Această tendință a schimbat și sistemele de proiectare tehnologică, care tind să devină autonome (A-CAPP) în sistemul de producție inteligent. Autorii lucrării [88] constată că spre deosebire de sistemele CAPP obișnuite, sistemele A-CAPP cuprind arii tradiționale, dar și arii noi, fapt ce schimbă radical numărul de factori luați în considerare: managementul programării evenimentelor, planificarea procesului de fabricație, planificarea procesului tehnologic, planificarea programului de prelucrare cu control numeric, simularea și evaluarea procesului, gestionarea cunoștințelor de proces, metodele procesului și cunoștințele, resursele de fabricație etc. Sunt redefinite intrările pentru A-CAPP, care provin din trei surse noi [88]:

- sistemul tehnologic de execuție (Manufacturing Execution System – MES), care accesează date în timp real ale resurselor de fabricație și înregistrează toate problemele de încărcare neuniformă a mașinilor-unelte, echipamentelor și dacă există premise de blocaje a cozii de sarcini;
- sistemul fizico-cibernet (Cyber Physical System – CPS), care prin intermediul rețelei de senzori colectează datele de stare și de funcționare în timp real a resurselor de fabricație (mașini-unelte, echipamente, roboți etc.);
- sistemul de management al cunoștințelor de proces, care transformă, prin intermediul metodelor de analiză și clasificare a datelor, informațiile colectate despre caracteristicile de prelucrare, metodele de prelucrare, sculele de așchiere, dispozitivele de fixare, instrumentele de măsurare etc. în cunoștințe de proces și le stochează în biblioteca de cunoștințe.

1.9. Abordări robuste și concurențiale în proiectarea constructivă și tehnologică

Toate etapele de proiectare constructivă și tehnologică sunt influențate de paradigma proiectării robuste [4, 89]. Robustețea poate fi definită ca măsura insensibilității unei entități în raport cu abaterile elementelor sale. Îmbunătățirea robusteții unei entități este tratată din punct de vedere al calității, fiabilității și costurilor. Se consideră că la proiectarea în toleranțe, aspectul robusteții este în principal realizat prin optimizare simultană (concomitentă, concurențială) a dimensiunilor și a toleranțelor pentru a obține un proiect robust la cost minim.

Abordările separate ale proiectării constructive și ale fabricației cu proiectare tehnologică au dominat și au fost comune tuturor o lungă perioadă de timp. Fluxul revoluționar al ingineriei

simultane (concurențiale) a făcut ca proiectarea constructivă în toleranțe și cea tehnologică în toleranțe să fie reunite constant în cadrul proiectării integrate în toleranțe [4, 16]. Prin îmbinarea ambelor discipline, pot fi luate în considerare simultan diferite aspecte ale proiectării tehnologice cum ar fi: prelucrarea pe sisteme tehnologice cu mai multe posturi, utilizarea diagramelor de toleranțe, programarea proceselor de fabricație [17, 68]. Astfel de abordări integrate îmbină mai adecvat proiectarea constructivă cu proiectarea tehnologică și fabricația prin transferul informațiilor relevante despre toleranțele cotelor constructive și ale celor tehnologice. În acest fel, elementele legate de toleranțe din proiectul constructiv pătrund în proiectul tehnologic cu o legătură inversă de pătrundere a elementelor similare tehnologice în proiectul constructiv. Din acest motiv, abordarea în toleranțe joacă un rol-cheie în procesul de dezvoltare a produsului [90].

Ingineria simultană (concurențială, concomitentă) este definită ca o modalitate eficientă de a dezvolta simultan produse și procese aferente acestuia, astfel încât procesele de fabricație sunt concepute în echipe multifuncționale constituite din specialiști în diverse domenii (marketing, proiectare conceptuală, proiectare constructivă, proiectare tehnologică, fabricație, asamblare, inspecție, calitate etc.), care lucrează împreună încă din primele etape ale proiectului dezvoltării produsului. În proiectarea simultană, cerințele etapelor de proiectare (constructivă și tehnologică), fabricație și inspecție față de toleranțe sunt integrate pentru a echilibra optim toleranțele finale ale produsului și proceselor [12, 91].

Proiectarea simultană (concurențială) în toleranțe este încurajată de posibilitățile tehnice moderne de calcul în creștere. Astfel, îmbinarea tot mai mare a proiectării constructive, proiectării tehnologice și a fabricației este reflectată de alocarea tot mai frecventă concomitentă a toleranțelor constructive și tehnologice [4, 92]. Autorii [93] au elaborat o metodă de alocare optimă a toleranțelor dimensionale, folosind hipergrafuri ierarhice. Una dintre modalitățile de îmbunătățire a eficienței proiectării și de reducere a perioadei și costurilor de fabricație este integrarea celor două etape separate de proiectare și fabricație în una singură. Într-un mediu concurențial pot fi folosite informațiile din proiectarea tehnologică în toleranțe în interesul proiectării constructive a ansamblului și a pieselor acestuia, iar informațiile din proiectarea constructivă în toleranțe – în interesul proiectării tehnologice [16].

1.10. Concluzii

În urma analizei surselor bibliografice pot fi trase următoarele concluzii:

- Actualmente, analiza dimensională este tratată ca un instrument de verificare și testare prin simulare a soluțiilor tehnologice deja formulate și nu este încă un instrument de proiectare

tehnologică, mai ales cu privire la structurile dimensionale constructive și tehnologice complexe realizate pe mașinile-unelte CNC.

- Alocarea toleranțelor constructive și a celor tehnologice se efectuează pentru a garanta atât funcționalitatea structurii constructive ca piesă în ansamblu, cât și funcționalitatea structurii tehnologice ca proces tehnologic. Criteriile de evaluare în aceste cazuri sunt diferite, astfel încât se cer abordări integrate, de exemplu, prin conceptul de inginerie concurențială.
- Alocarea și analiza toleranțelor tehnologice se efectuează în mod obișnuit prin diagrama toleranțelor, care permite realizarea unei asocieri, a unei legături între toleranțele cotelor tehnologice și toleranțele constructive deja stabilite și pot fi obținute rezultate valorice.
- Un alt instrument de alocare și analiză a toleranțelor tehnologice este metoda grafurilor, care face posibilă reprezentarea structurilor dimensionale complexe într-o manieră simplă, permite o viziune profundă asupra acestor structuri, dar și o vedere de ansamblu. Metoda permite generarea soluțiilor de prelucrare și de instalare în variante, utilizarea mai multor algoritmi de analiză și sinteză și este de perspectivă în combinație cu metoda diagramei toleranțelor.
- Pentru a asigura robustețea soluțiilor tehnologice se utilizează preponderent metoda de maxim și minim de rezolvare a lanțurilor dimensionale în toleranțe, care conduce la evaluarea prea strictă a toleranțelor tehnologice și la evaluarea în exces a toleranțelor adaosurilor de prelucrare, devenind necesară o abordare mai adecvată și situațională bazată pe analizele sistemice ale interacțiunilor elementelor structurilor dimensionale cum ar fi compensarea erorilor.
- Criteriile de optimalitate a proceselor tehnologice formulate de mai mulți autori au caracter de elemente, rareori structurale, din care ulterior sunt constituite criterii sintetice în bază de ponderi, devenind necesară o abordare bazată pe mecanismele de creare și optimizare a structurilor dimensionale tehnologice care pornește de la structurile dimensionale constructive.
- Pentru proiectarea tehnologiilor asistate de calculator este importantă formarea bazelor de cunoștințe și în primul rând cu referire la structurile dimensionale constructiv-tehnologice optime.

2. METODE DE ANALIZĂ ÎN TOLERANȚE A STRUCTURILOR DIMENSIONALE TEHNOLOGICE

2.1. Metode de analiză dimensională

2.1.1. Metoda de analiză dimensională bazată pe independența formării preciziei cotelor tehnologice

Analiza structurilor dimensionale constructive, cât și a structurilor dimensionale tehnologice în aspectul lor de precizie se face în toleranțe. Structura dimensională constructivă a piesei include nominalele dimensiunilor, abaterile-limită (toleranțele). Se consideră definită aceasta structură, dacă toate suprafețele paralele (frontale, plane) au poziții dimensional identificabile (fig. 2.1).

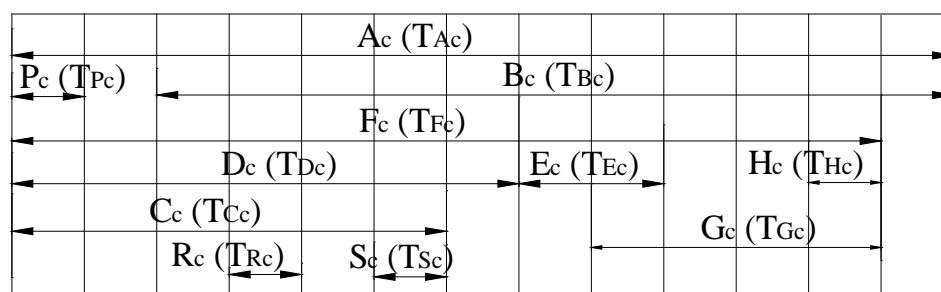


Fig. 2.1. Exemplu de structură dimensională constructivă a unei piese (cote liniare)

Structurile dimensionale tehnologice elementare au două aspecte. Primul aspect se referă la atribuirea fiecărei dimensiuni 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. 2.2, a) și situația când cota constructivă se formează prin intermediul propriei cote tehnologice și a uneia sau mai multor cote tehnologice istorice (fig. 2.2, b). Aceste cote străine închid lanțul dimensional tehnologic pe cea mai scurtă cale. În același timp, acestea pot fi elemente ale altor lanțuri dimensionale tehnologice.

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 o astfel de cotă se formează. Seria de lanțuri dimensionale se închid cu adaosurile de prelucrare corespunzătoare (fig. 2.3).

Problemele de precizie se rezolvă prin două variante de bază: prin metoda de maxim și minim și prin metoda probabilistică.

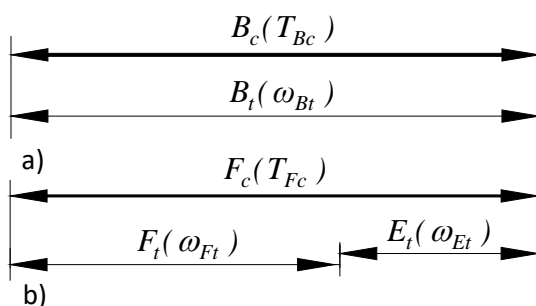


Fig. 2.2. Exemple de structuri dimensionale tehnologice în care cota constructivă este element de închidere [94]

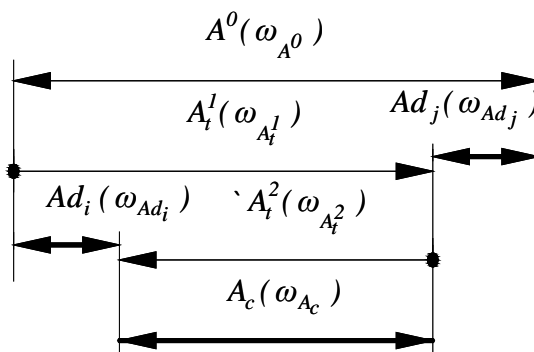


Fig. 2.3. Exemple de structuri dimensionale tehnologice în care adaosurile de prelucrare sunt elemente de închidere [94]

Metoda de analiză de maxim și minim prevede ca suma toleranțelor cotelor tehnologice care alcătuiesc elementul de închidere al lanțului dimensional constructiv să nu depășească toleranța acestei cote de închidere, $T \geq \sum \omega_{t_i}$. Aici T – toleranța cotei constructive – element de închidere al lanțului dimensional tehnologic, ω_{t_i} – toleranța cotei tehnologice i . E de menționat că anume independența formării dimensiunilor tehnologice în limitele câmpurilor de toleranță conduce la cumulara acestor câmpuri ca sumă nealgebrică.

Metoda probabilistică prevede ca rădăcina pătrată din suma pătratelor toleranțelor cotelor tehnologice, care alcătuiesc elementul de închidere al lanțului dimensional constructiv, să nu depășească toleranța acestei cote de închidere, $T \geq \sqrt{\sum \omega_{t_i}^2}$. Ca și în cazul precedent, se manifestă independența formării dimensiunilor în limitele câmpurilor de toleranță, iar $\sum \omega_{t_i} > T$. Depășirea valorii acestui câmp de toleranță face să existe un anumit risc de neasigurare a preciziei cotei constructive [95].

Fiecare dintre aceste două metode are propriile particularități și se utilizează în situațiile când avantajele sunt mai mari decât dezavantajele. În cazul când este necesară interschimbabilitatea totală, se utilizează metoda de maxim și minim. Când este admisibil un risc economic argumentat de imprecizie al unor dimensiuni se utilizează metoda probabilistică.

Proiectarea dimensională a ansamblurilor deseori se bazează pe analiza prin metoda probabilistică, fiind stabilite toleranțe mai mari pentru elementele componente, iar în calitate de element de închidere este luată o dimensiune de precizie joasă sau un element de compensare.

Fiecare piesă din ansamblu are propriile dimensiuni formate independent de alte piese. Ieșirea din situație este selectarea situațională a pieselor din set, astfel încât să se realizeze asamblarea. La extrema metodei se regăsește asamblarea selectivă.

Metoda de analiză probabilistică este utilizată și în cazul proiectării tehnologiilor de prelucrare mecanică. Dar spre deosebire de cazul ansamblurilor, nerespectarea preciziei uneia din dimensiunile constructive implică prelucrări suplimentare de recuperare, altfel nu se va asigura interschimbabilitatea.

Robustețea este definită ca măsura insensibilității unei entități în raport cu abaterile (variațiile) elementelor sale [96] și se manifestă în două feluri: prin evitarea cauzelor abaterilor și prin rezistența la efectele provocate de abateri. Rezistența la efecte se produce fără eliminarea cauzelor variațiilor. „Proiectarea robustă se concentrează pe îmbunătățirea funcției fundamentale a produsului sau a procesului, facilitând astfel proiectarea flexibilă și ingineria concomitentă” [71].

În cazul proiectării proceselor tehnologice de prelucrare mecanică, evitarea cauzelor variațiilor nedorite se referă la monitorizarea și controlul tuturor surselor abaterilor și formarea tuturor dimensiunilor la preciziile necesare. Prin urmare, la prelucrarea pe centre de prelucrare CNC se ia în considerare scenariul prin metoda maxim și minim, adică se utilizează metoda de analiză "cel mai rău caz" [94, 97]. Perminov A.V. [57] consideră chiar, că utilizarea metodei de maxim și minim în analiza preciziei este una dintre direcțiile de optimizare a tehnologiilor de prelucrare mecanică.

2.1.2. Metoda de analiză dimensională bazată pe interdependența formării preciziei cotelor tehnologice

Dimensiunile, câmpurile de toleranță, lanțurile de dimensiuni sunt obiecte geometrice, care asociază obiectele reale la geometrii ideale reprezentate grafic sau matematic. Din punct de vedere geometric, într-un lanț dimensional atât nominalul dimensiunii – element de închidere, cât și toleranța acestuia se determină ca sumă algebrică. Mai mult, element de închidere poate fi orice element al lanțului dimensional. Pentru o suprafață cilindrică (fig. 2.4) se poate scrie:

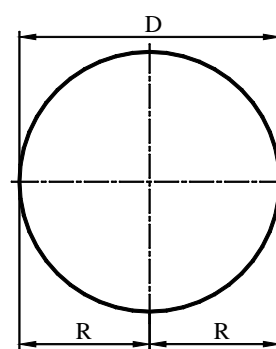


Fig. 2.4. Lanț dimensional geometric

$$\begin{aligned} D &= R + R \text{ și } \omega_D = \omega_R + \omega_R ; \\ R &= D - R \text{ și } \omega_R = \omega_D - \omega_R . \end{aligned} \quad (2.1)$$

O situație similară se observă la determinarea erorii de orientare (fig. 2.5), care este egală cu toleranța distanței dintre baza tehnologică de contact (BTC) și baza constructivă de măsurare (BCM). Aceste distanțe și toleranțe pentru cota H și respectiv h sunt:

$$\begin{aligned} R/\sin\alpha - R \text{ și } \omega_R(1/\sin\alpha - 1); \\ R/\sin\alpha + R \text{ și } \omega_R(1/\sin\alpha + 1). \end{aligned} \quad (2.2)$$

Acest lucru se explică prin faptul că elementele lanțurilor dimensionale geometrice sunt legate reciproc parametric, adică sunt absolut dependente.

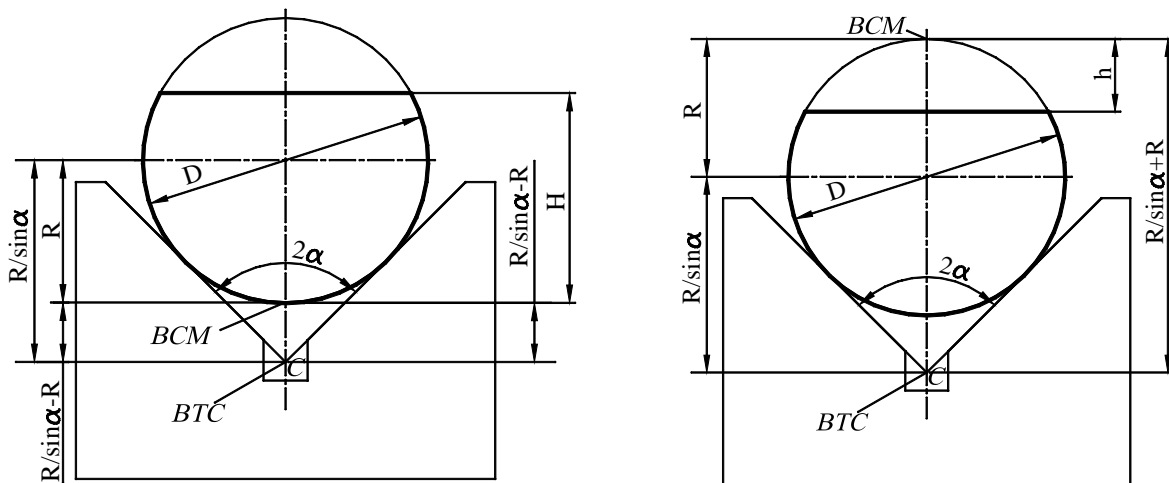


Fig. 2.5. Lanțuri dimensionale geometrice definite de o geometrie specifică la determinarea erorilor de orientare

Astăzi este bine cunoscută metoda de calcul al adaosurilor de prelucrare și a dimensiunilor intermediare utilizată pentru suprafețele de revoluție la formarea preciziei în regim automat pe mașini-unelte reglate. Pornind de la manifestarea legii copierii erorilor cu referire la cele de formă a suprafețelor, de poziție reciprocă a suprafețelor și dimensionale, se constată că toleranța adaosului de prelucrare ω_{Ad} , care este și element de închidere în lanțul dimensional, se calculează ca diferența valorilor câmpurilor de toleranță ale celor două dimensiuni tehnologice megieșe $\omega_{Ad} = \omega^{i-1} - \omega^i$ (fig. 2.6). Legea copierii erorilor arată că două dimensiuni tehnologice la prelucrarea uneia și aceleiași suprafețe vor avea valori în zone similare ale câmpurilor de toleranță. Explicația este una – există o interdependență la formarea acestor cote tehnologice în sensul plasării similare a dimensiunilor în câmpurile de toleranță.

Din cele relatate putem constata existența a trei variante de interacțiune între elementele componente ale lanțului dimensional:

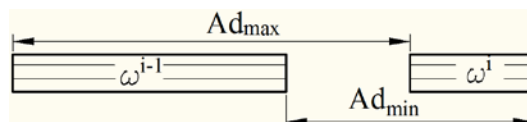


Fig. 2.6. Relația grafică $Ad_{max} - Ad_{min}$ pentru suprafețe de revoluție

- a) împrăștierea dimensiunilor sunt independente și aleatoare – analiza se efectuează prin metoda de maxim și minim sau prin metoda probabilistică, după caz;
- b) împrăștierea dimensiunilor sunt absolut dependente parametric – analiza se efectuează după regulile geometrice;
- c) împrăștierea dimensiunilor sunt parțial independente și parțial dependente – există situații de analiză a formării dimensiunilor suprafețelor de revoluție cu recunoașterea dominantei – legii copierii erorilor.

2.1.3. Metoda de analiză dimensională bazată pe compensarea erorilor

Situațiile de formare a preciziei dimensiunilor tehnologice sunt foarte variate. „Utilizarea metodei de maxim și minim 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 [98] de care nu se ține cont” [99, 100].

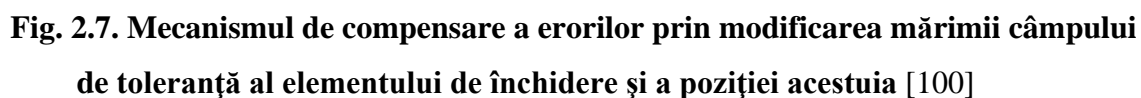
Esența compensării erorilor. Formarea interdependentă a dimensiunilor tehnologice poate fi explicată prin faptul că în anumite situații în structura toleranțelor tehnologice ale cotelor componente există erori de prelucrare - vectori cu aceeași direcție (cedarea elastică, uzura sculelor, orientarea etc.). Un element, care în conformitate cu structura lanțului dimensional este de mărire pentru elementul de închidere (fig. 2.7, a), prin unele elemente ale toleranței sale tehnologice este de mărire, iar prin altele, din contra, este de micșorare, și invers (fig. 2.7, c). În astfel de situații, lanțul dimensional tehnologic nu mai este omogen din motiv că influențele elementelor 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” [100].

Metoda de maxim și minim prevede că toleranța cotei-element de închidere ω_{Δ} cumulează toleranțele elementelor componente. Prezența în structura toleranței elementului L (de micșorare, fig. 2.7, 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 ambelor elemente și reprezintă valoarea minimă a celor două erori compensabile ale cotelor M și L [98, 100]:

$$\omega^c = \text{Min}\{\omega_M^c, \omega_L^c\}. \quad (2.3)$$

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

$$\omega_{\Delta}^c = \omega_M + \omega_L - 2 \cdot \omega^c. \quad (2.4)$$



Astfel, relația (2.2) devine mai structurată și va avea forma (fig. 2.7, d) [78, 97, 100, 101, 102, 103]:

$$\omega_A^c = \omega_M + \omega_L - 2 \cdot (\overrightarrow{\omega^c} + \overleftarrow{\omega^c} + \overleftrightarrow{\omega^c}). \quad (2.5)$$

Vectorul rezultat $\vec{\delta} = \overrightarrow{\omega^c} + \overleftarrow{\omega^c}$ determină poziția modificată a câmpului de toleranță al elementului de închidere. Vectorul $\overleftrightarrow{\omega^c}$, având direcție nedeterminabilă, nu modifică poziția câmpului de toleranță.

Efectele compensării erorilor asupra rezolvării lanțurilor dimensionale. Lanțurile dimensionale tehnologice cu manifestarea efectelor de compensare a erorilor au caracter situațional, adică sunt condiționate de circumstanțe ce trebuie stabilite clar. Aceeași cotă tehnologică se poate manifesta prin efecte de compensare a erorilor în componența unui lanț dimensional, iar în componența altui lanț – nu. Or, prezența acestora în structura diferitor lanțuri dimensionale este una foarte probabilă.

Efectele de compensare a erorilor conduc la dezechilibrarea lanțului dimensional rezolvat în raport cu elementul de închidere prin metoda de maxim și minim (fig. 2.8, a), dar și în cazul rezolvării în raport cu elementele componente (fig. 2.8, b).

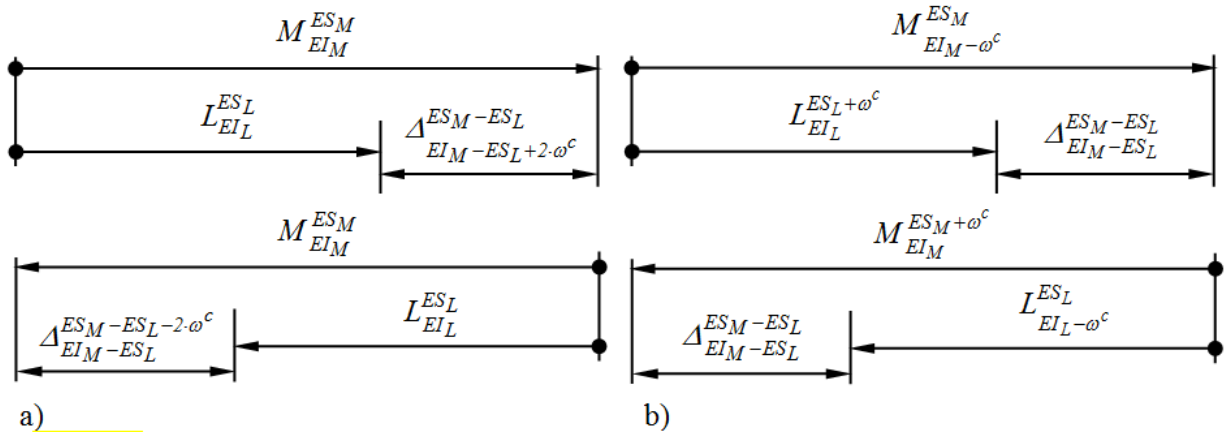


Fig. 2.8. Lanțuri dimensionale tehnologice în dezechilibru rezolvate în raport cu:
a) elementele de închidere; b) elementele componente [104].

Soluții corecte pot fi obținute prin utilizarea conceptului de lanț dimensional echivalent în care echilibrul este restabilit prin modificarea toleranței și abaterilor-limită ale cotelor elemente componente ale lanțului dimensional (fig. 2.9, a, b). Această modificare este valabilă numai în cadrul lanțului concret [100].

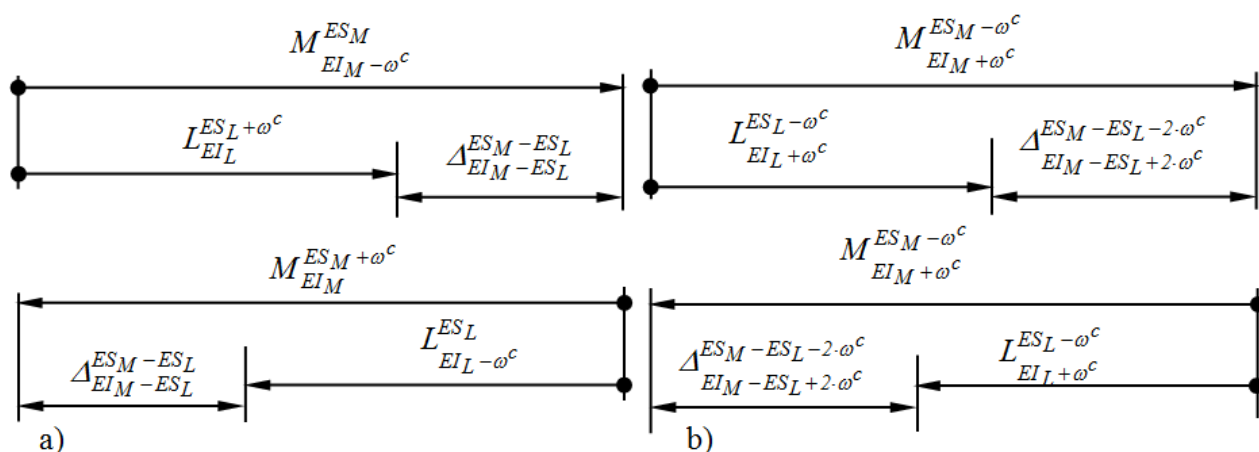


Fig. 2.9. Lanțuri dimensionale echivalente construite și rezolvate:

a) pentru elementele de închidere; b) pentru elementele componente [104].

Efectele de compensare a erorilor permit „obținerea unei precizii mai înalte a elementului de închidere în comparație cu precizia estimată prin metoda de maxim și minim” [100]. Abaterile-limită ale elementelor lanțului dimensional echivalent pot fi determinate din relațiile (fig. 2.8, a și fig. 2.9, a) :

$$\begin{aligned} ES_M^c &= ES_M + \xi \cdot \omega^c, \\ EI_M^c &= EI_M + (\xi + 1) \cdot \omega^c, \\ ES_L^c &= ES_L + \eta \cdot \omega^c, \\ EI_L^c &= EI_L + (\eta + 1) \cdot \omega^c \end{aligned} \quad (2.6)$$

aici ES^c , EI^c , ES , EI sunt abateri-limită ale dimensiunilor M , L (fig. 2.7) în variantele, respectiv, cu compensarea erorilor și fără compensarea erorilor, ξ - parametru numeric situațional ($\xi = 0$ și $\xi = -1$, respectiv pentru situația de coincidență și de necoincidență a direcției vectorului compensator ω^c cu direcția elementului de mărire a lanțului dimensional), $\eta = |\xi| - 1$.

Într-un alt aspect, compensarea erorilor are ca efect posibilitatea executării cotelor tehnologice din lanțul dimensional la o precizie mai joasă decât cea calculată prin metoda de maxim și minim. Abaterile-limită ale cotelor din lanțul dimensional echivalent pot fi determinate din relațiile (fig. 2.8, b și fig. 2.9, b):

$$\begin{aligned} ES_M^c &= ES_M - \xi \cdot \omega^c, \\ EI_M^c &= EI_M - (\xi + 1) \cdot \omega^c, \\ ES_L^c &= ES_L - \eta \cdot \omega^c, \\ EI_L^c &= EI_L - (\eta + 1) \cdot \omega^c \end{aligned} \quad (2.7)$$

Relațiile (2.4) și (2.5) sunt valabile în situațiile când toate componentele compensării (cedarea elastică a sistemului tehnologic, uzura sculelor etc.) au aceeași direcție și în acest mod este cunoscută și direcția vectorului compensator $2 \cdot \vec{\omega}^c$. Vectorul $\vec{\delta} = \vec{\omega}^c$ (fig. 2.7, c) determină poziția modificată a câmpului de toleranță.

Vectorii compensatori datorăți orientării, reglării pot avea direcții diferite, adică aleatorii. Prin urmare, compensarea erorilor se manifestă efectiv prin trei vectori. Doi vectori $\vec{\omega}^c$, $\overleftarrow{\omega}^c$ au direcții opuse, iar cel de-al treilea are direcție aleatorie $\overleftarrow{\omega}^c$. Efectul cumulativ este reprezentat prin relația $\omega^c = \text{Min}\{\omega_M^c, \omega_L^c\}$. Pentru toleranța elementului de închidere al lanțului dimensional se poate scrie:

$$\omega_A^c = \omega_M + \omega_L - 2 \cdot (\vec{\omega}^c + \overleftarrow{\omega}^c + \overleftarrow{\omega}^c) \quad (2.8)$$

Poziția finală a câmpului de toleranță după compensarea erorilor este determinată de deplasarea $\vec{\delta} = \vec{\omega}^c + \overleftarrow{\omega}^c$, iar vectorul $\overleftarrow{\omega}^c$ datorită caracterului aleator are influență nedefinită (fig. 2.7, d). Lanțul dimensional tehnologic echivalent în care abaterile-limită sunt structurate este reprezentat în figura 2.10.

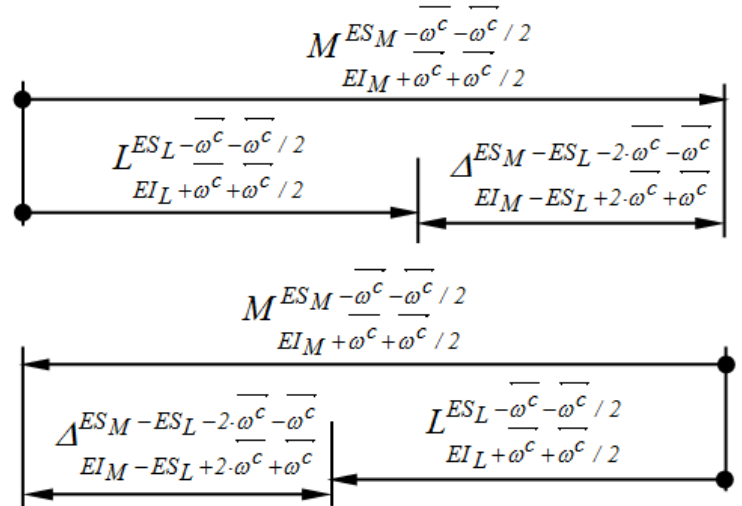


Fig. 2.10. Lanț dimensional tehnologic echivalent cu abateri-limită structurate pe efecte - vectori de compensare a erorilor de diferite direcții [104]

Fiind făcute aceste precizări, se poate afirma că prima posibilitate de reducere a valorilor toleranțelor

cotelor tehnologice M și L componente în lanțul dimensional echivalent datorită compensărilor $\vec{\omega}^c$, $\overleftarrow{\omega}^c$ și $\overleftarrow{\omega}^c$ este reflectată în relațiile [100]:

$$\begin{aligned} ES_M^c &= ES_M + \xi \cdot \vec{\omega}^c + (|\xi| - 1) \cdot \overleftarrow{\omega}^c - \overleftarrow{\omega}^c / 2 \\ EI_M^c &= EI_M + (\xi + 1) \cdot \vec{\omega}^c + |\xi| \cdot \overleftarrow{\omega}^c + \overleftarrow{\omega}^c / 2 \\ ES_L^c &= ES_L + (|\xi| - 1) \cdot \vec{\omega}^c + \xi \cdot \overleftarrow{\omega}^c - \overleftarrow{\omega}^c / 2 \\ EI_L^c &= EI_L + |\xi| \cdot \vec{\omega}^c + (\xi + 1) \cdot \overleftarrow{\omega}^c + \overleftarrow{\omega}^c / 2 \\ \Delta_{oA}^c &= \Delta_{oA} + (\xi - |\xi| + 1) \cdot (\overleftarrow{\omega}^c - \overleftarrow{\omega}^c) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Aici $\Delta_{o\Delta}$ și $\Delta_{o\Delta}^c$ sunt coordonatele mijlocului câmpurilor de toleranță ale cotei - element de închidere în lanțurile dimensionale tehnologice, respectiv tradițional și echivalent.

A doua posibilitate se referă la mărirea toleranțelor (scăderea preciziei de executare) cotelor M și L în lanțul dimensional echivalent provocată de compensarea erorilor $\overrightarrow{\omega^c}$, $\overleftarrow{\omega^c}$ și $\overleftrightarrow{\omega^c}$, iar efectul constă în păstrarea valorii toleranței impuse elementului de închidere. În acest caz, sunt valabile relațiile [100]:

$$\begin{aligned}
 ES_M^c &= ES_M - \xi \cdot \overrightarrow{\omega^c} - (|\xi| - 1) \cdot \overleftarrow{\omega^c} + \overleftrightarrow{\omega^c} / 2 \\
 EI_M^c &= EI_M - (\xi + 1) \cdot \overrightarrow{\omega^c} - |\xi| \cdot \overleftarrow{\omega^c} - \overleftrightarrow{\omega^c} / 2 \\
 ES_L^c &= ES_L - (|\xi| - 1) \cdot \overrightarrow{\omega^c} - \xi \cdot \overleftarrow{\omega^c} + \overleftrightarrow{\omega^c} / 2 \\
 EI_L^c &= EI_L - |\xi| \cdot \overrightarrow{\omega^c} - (\xi + 1) \cdot \overleftarrow{\omega^c} - \overleftrightarrow{\omega^c} / 2 \\
 \Delta_{oM}^c &= \Delta_{oM} + \frac{\overrightarrow{\omega^c} \cdot (1 + 2 \cdot \xi) - \overleftarrow{\omega^c} \cdot (1 - 2 \cdot |\xi|)}{2} \\
 \Delta_{oL}^c &= \Delta_{oL} - \frac{\overrightarrow{\omega^c} \cdot (1 - 2 \cdot |\xi|) - \overleftarrow{\omega^c} \cdot (1 + 2 \cdot \xi)}{2}
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

unde Δ_{oM}^c , Δ_{oL}^c și Δ_{oM} , Δ_{oL} - coordonatele mijlocului câmpurilor de toleranță ale dimensiunilor M și L în varianta echivalentă cu luarea în considerare a compensării erorilor și respectiv tradițional. Toleranțele cotelor M și L în lanțul dimensional echivalent se măresc cu valoarea $\overrightarrow{\omega^c} + \overleftarrow{\omega^c} + \overleftrightarrow{\omega^c}$, iar elementul de închidere Δ își păstrează neschimbată coordonata mijlocului câmpului de toleranță $\Delta_{o\Delta}^c = \Delta_{o\Delta}$.

Este bine cunoscut că analiza dimensională pentru suprafețele de revoluție (calculul adaosurilor de prelucrare și a dimensiunilor intermediare) la faze 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 mașinile reglate din timp $\omega_{Ad} = \omega^{i-1} - \omega^i$ (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 megieșe 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 experiența exploatării tehnologiilor industriale calculate în acest mod. În alte situații, pentru cotele liniare, de exemplu, este necesară o analiză suplimentară

pentru punerea în valoare a efectelor compensării erorilor.

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:

$$\begin{aligned}\omega_{Ad} &= \omega^{i-1} + \omega^i - 2\omega^c ; \\ \omega_{Ad} &= \omega^{i-1} - \omega^i .\end{aligned}\quad 2.11)$$

Rezultatele obținute din abordările bazate pe efectele de compensare și pe legea copierii erorilor vor fi identice dacă $\omega^{i-1} - \omega^i = \omega^{i-1} + \omega^i - 2 \cdot \omega^c$. Rezulta că $\omega^c = \omega^i$, adică se compensează, de fapt, toate componentele – erori ale câmpului de toleranță al cotei tehnologice formate în faza i (ω^i). Este o condiție de neîndeplinit și, în consecință, varianta bazată pe legea copierii erorilor evaluează precizia cotelor tehnologice formate la un nivel mai înalt decât cel real [78, 97, 100, 101, 102, 103]. În același timp, cum a fost menționat mai devreme, această modalitate s-a arătat valabilă și eficientă la calcularea adaosurilor de prelucrare pentru suprafețele de revoluție. În acest caz, pot fi considerate compensabile erorile provocate de cedarea elastică ε^{cedare} , de uzură ε^{uzura} și de instalare ε^{instal} (fig. 2.11, a). În cazul prelucrării suprafețelor frontale compensabile există aceleași erori de prelucrare (fig. 2.11, b), astfel calculul toleranțelor adaosurilor de prelucrare și pentru prelucrarea suprafețelor plane se poate realiza conform relației $\omega_{Ad} = \omega^{i-1} - \omega^i$.

Efectele de compensare a erorilor se manifestă în același mod și în cazul cotelor liniare între suprafețele plane, cu normalele orientate în aceeași direcție (fig. 2.12). Toleranța elementului de închidere Δ se determină ca diferența dintre toleranțele cotelor tehnologice de mărire și de micșorare $\omega_{\Delta} = \omega_L - \omega_M$ conform structurii lanțului dimensional tehnologic $\Delta = L - M$.

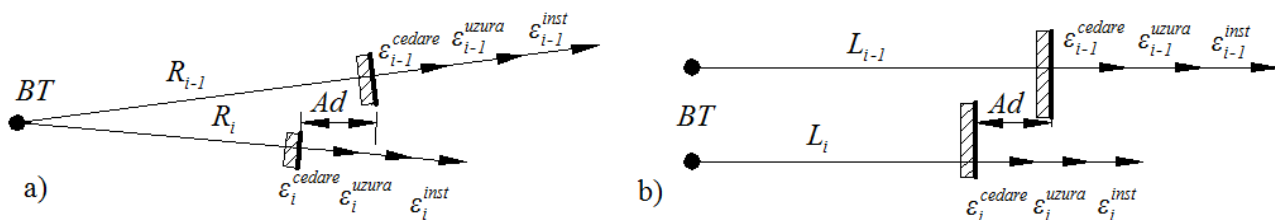


Fig. 2.11. Erori compensabile la calculul toleranțelor adaosurilor de prelucrare:
a) pentru suprafețele de revoluție; b) pentru suprafețele plane.

Efectele de compensare a erorilor se manifestă și în cazul formării cotelor tehnologice în lanț, adică atunci, când următoarea cotă tehnologică este formată de la suprafața precedentă formată în aceeași acțiune tehnologică (fig. 2.13). Prima cota L se formează de

la baza tehnologică și pentru aceasta compensarea erorilor nu se manifestă. Pentru cota M , deja există două suprafețe poziția cărora fiind modificată succesiv în aceeași direcție. Toleranța cotei M se va micșora cu suma domeniilor comune ale vectorilor cuplelor:

$$\text{Min}\{\varepsilon_L^{\text{cedare}}; \varepsilon_M^{\text{cedare}}\} + \text{Min}\{\varepsilon_L^{\text{uzura}}; \varepsilon_M^{\text{uzura}}\} + \text{Min}\{\varepsilon_L^{\text{instal}}; \varepsilon_M^{\text{instal}}\}.$$

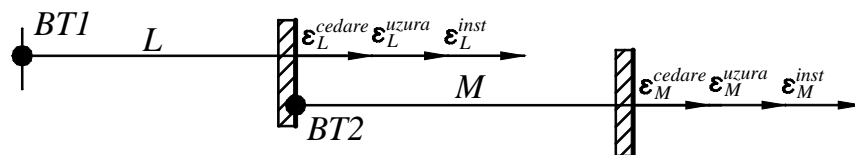


Fig. 2.12. Erori compensabile la calculul toleranței cotei – element de închidere Δ în lanțuri dimensionale liniare pentru suprafețele frontale

Fig. 2.13. Erori compensabile la formarea cotelor tehnologice în lanț

Dacă pentru cotele liniare are loc compensarea, dar nu este posibilă în valoarea $\omega^c = \omega_i$, se pot lua în considerare următoarele relații: $\omega_\Delta = \text{Max}\{\omega_L; \omega_M\} - u \cdot \text{Min}\{\omega_L; \omega_M\}$ (fig. 2.12) și $\omega_M = \text{Max}\{\omega_L; \omega_M\} - u \cdot \text{Min}\{\omega_L; \omega_M\}$ (fig. 2.13). 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 maxim și minim, ca una mai înaltă prin metoda bazată pe legea copierii erorilor și ca soluție exactă prin metoda compensării erorilor.

2.2. Metoda de rezolvare a lanțurilor dimensionale tehnologice bazată pe diagrama de toleranțe

Scenariile de prelucrare adoptate în formă de grafuri ale relațiilor dimensionale tehnologice servesc ca bază pentru constituirea lanțurilor dimensionale tehnologice, fiind deja stabilită ordinea instalărilor și a formării cotelor (fig. 2.14).

Deoarece piesele reale au suprafețe frontale plasate neuniform pe direcția normală, se construiește o rețea de linii paralele ce reprezintă aceleași suprafețe, însă la distanțe egale (fig. 2.15, fig. 2.16). Cu linii paralele la distanțe mai mici se evidențiază pozițiile suprafețelor respective în starea lor inițială 0 pe semifabricat, 1, 2... după numărul de stări (prelucrări). Se trec pe schemă cotele semifabricatului. Urmează monitorizarea formării cotelor în conformitate cu grafurile relațiilor dimensionale tehnologice [105, 106].

Baza tehnologică de la care se formează cota tehnologică este notată peintr-un cerc plin. De la baza tehnologică se formează cota-țintă cu toleranța acesteia $B^1(\omega_{B1})$ prin eliminarea adaosului 1 de pe suprafața 1. Adaosul de prelucrare eliminat cu toleranța calculată după metoda de maxim și minim se notează $Ad_1^1(\omega_{B0} + \omega_{B1})$ (fig. 2.15) și după metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor $Ad_1^1(\omega_{B0} - \omega_{B1})$ (fig. 2.16). În cazul de față, adaosul de prelucrare este element de închidere în lanțul tehnologic $B^0 \rightarrow B^1$. Simultan se notează modificările cotelor asociate C , D și A , care ajung din starea inițială 0 în starea 1, fiind elemente de închidere ale lanțurilor dimensionale, respectiv: $C^0 - Ad_1^1$, $D^0 - Ad_1^1$ și $A^0 - Ad_1^1$. Toleranțele cotelor respective asociate se măresc cu toleranța adaosului de prelucrare. Se pot nota noile stări ale cotelor după cum urmează: $C^1(\omega_{C0} + \omega_{B0} + \omega_{B1})$, $D^1(\omega_{D0} + \omega_{B0} + \omega_{B1})$ și $A^1(\omega_{A0} + \omega_{B0} + \omega_{B1})$ pentru metoda de maxim și minim și $C^1(\omega_{C0} + \omega_{B0} - \omega_{B1})$, $D^1(\omega_{D0} + \omega_{B0} - \omega_{B1})$ și $A^1(\omega_{A0} + \omega_{B0} - \omega_{B1})$ pentru metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor. Urmează formarea cotelor $C^2(\omega_{C2})$ și $D^2(\omega_{D2})$ ca și cote-țintă cu toleranțele de prelucrare definite s.a.m.d. [106].

În această etapă se cunosc toleranțele cotelor semifabricatului, piesei și ale cotelor-țintă. Urmează gruparea lanțurilor dimensionale pe cote tehnologice pentru stabilirea ordinii rezolvării (fig. 2.17, fig. 2.18). Lanțurile dimensionale constituite și grupate se deosebesc între ele prin numărul de cote tehnologice-țintă (ecuații) și numărul de adaosuri de prelucrare (necunoscute).

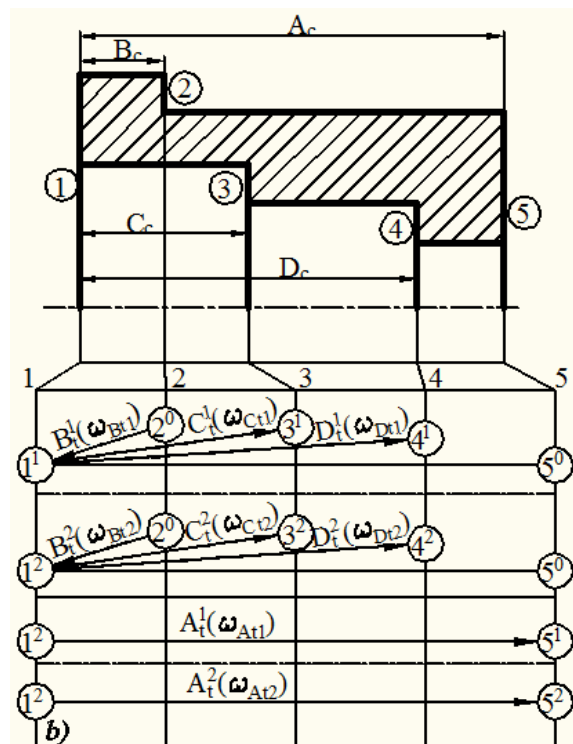


Fig. 2.14. Piesă și grafurile relațiilor dimensionale tehnologice

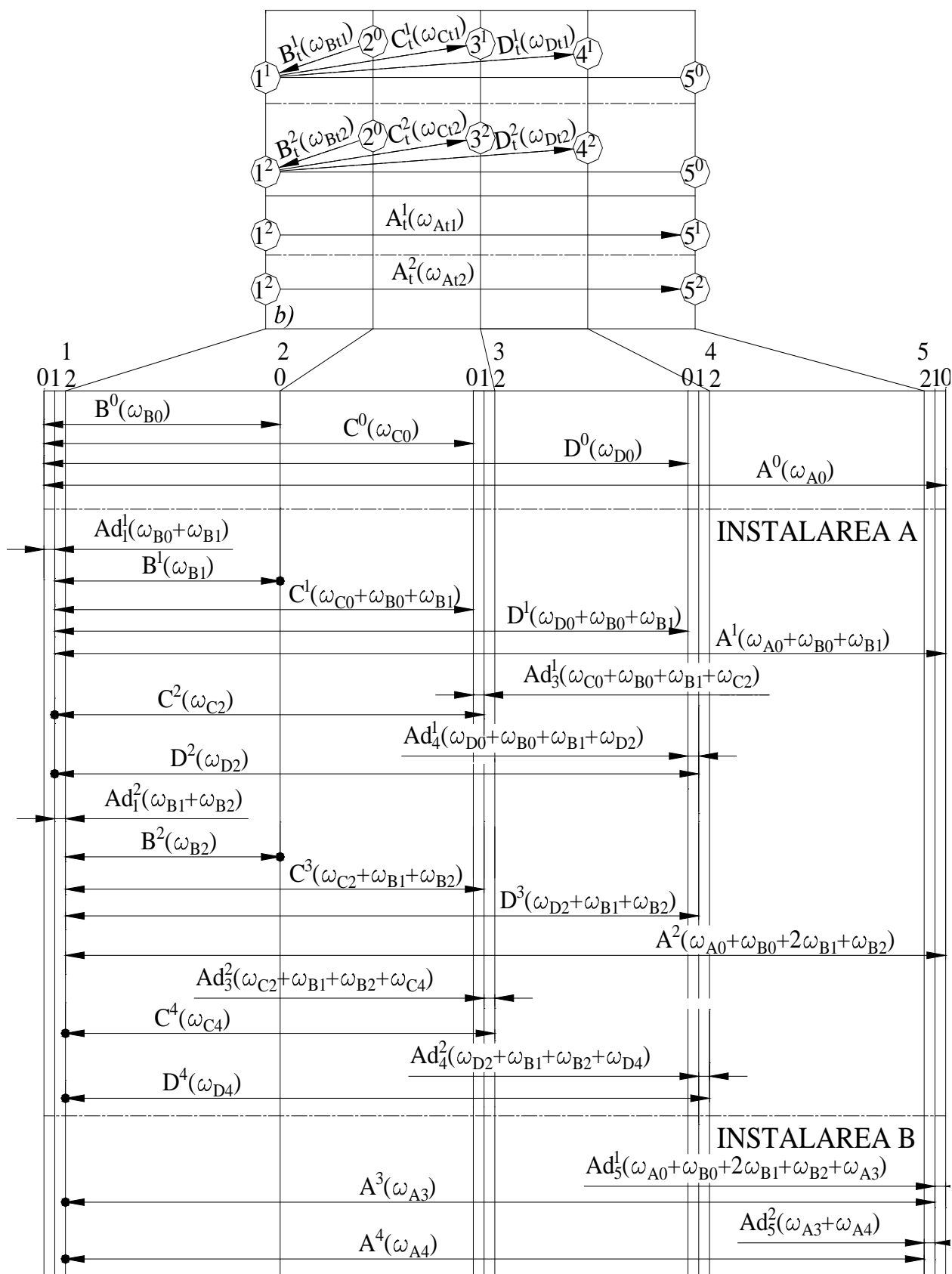


Fig. 2.15. Constituirea lanțurilor dimensionale tehnologice pentru rezolvare prin metoda de maxim și minim

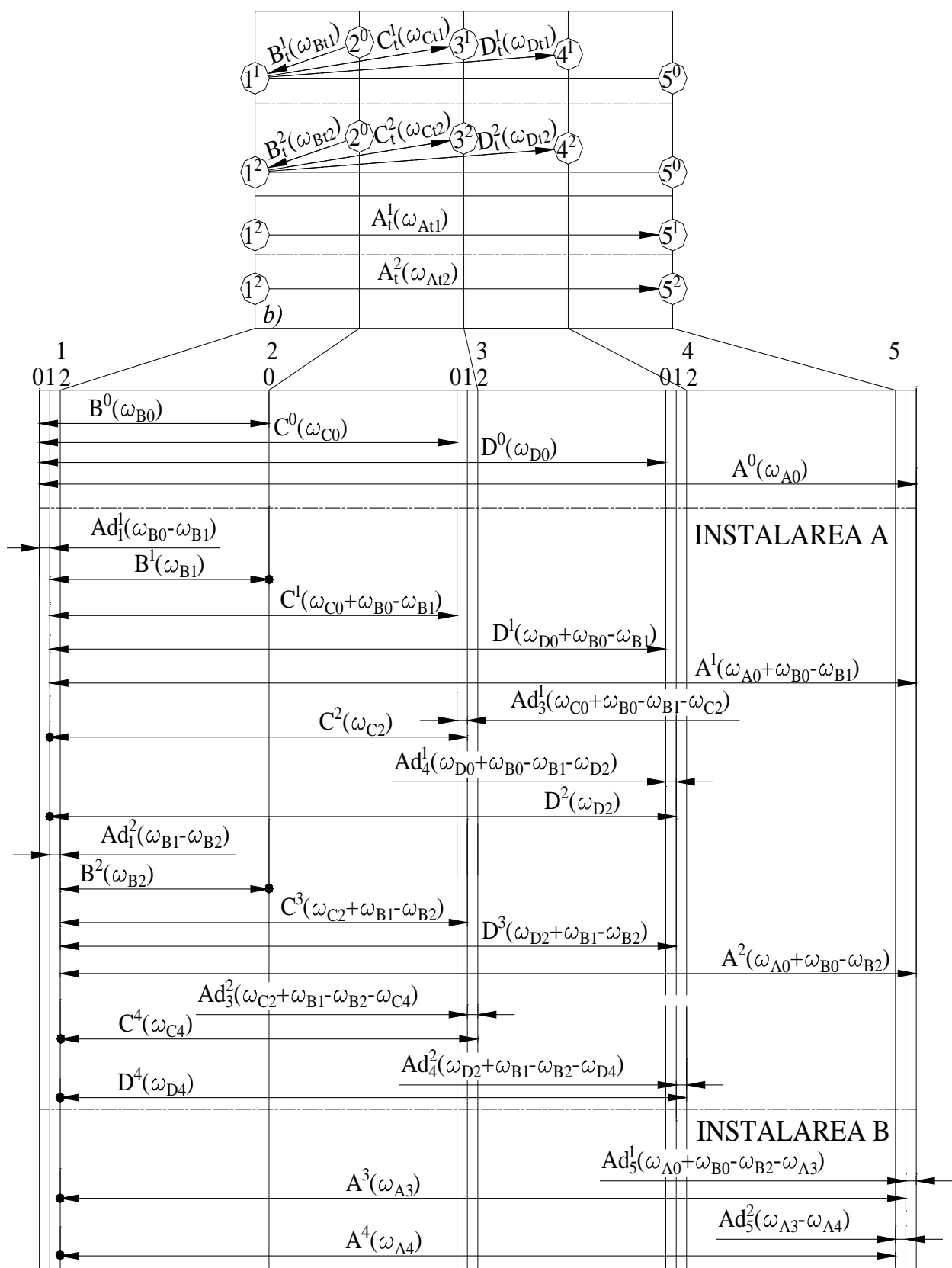


Fig. 2.16. Constituirea lanțurilor dimensionale tehnologice pentru rezolvare prin metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor

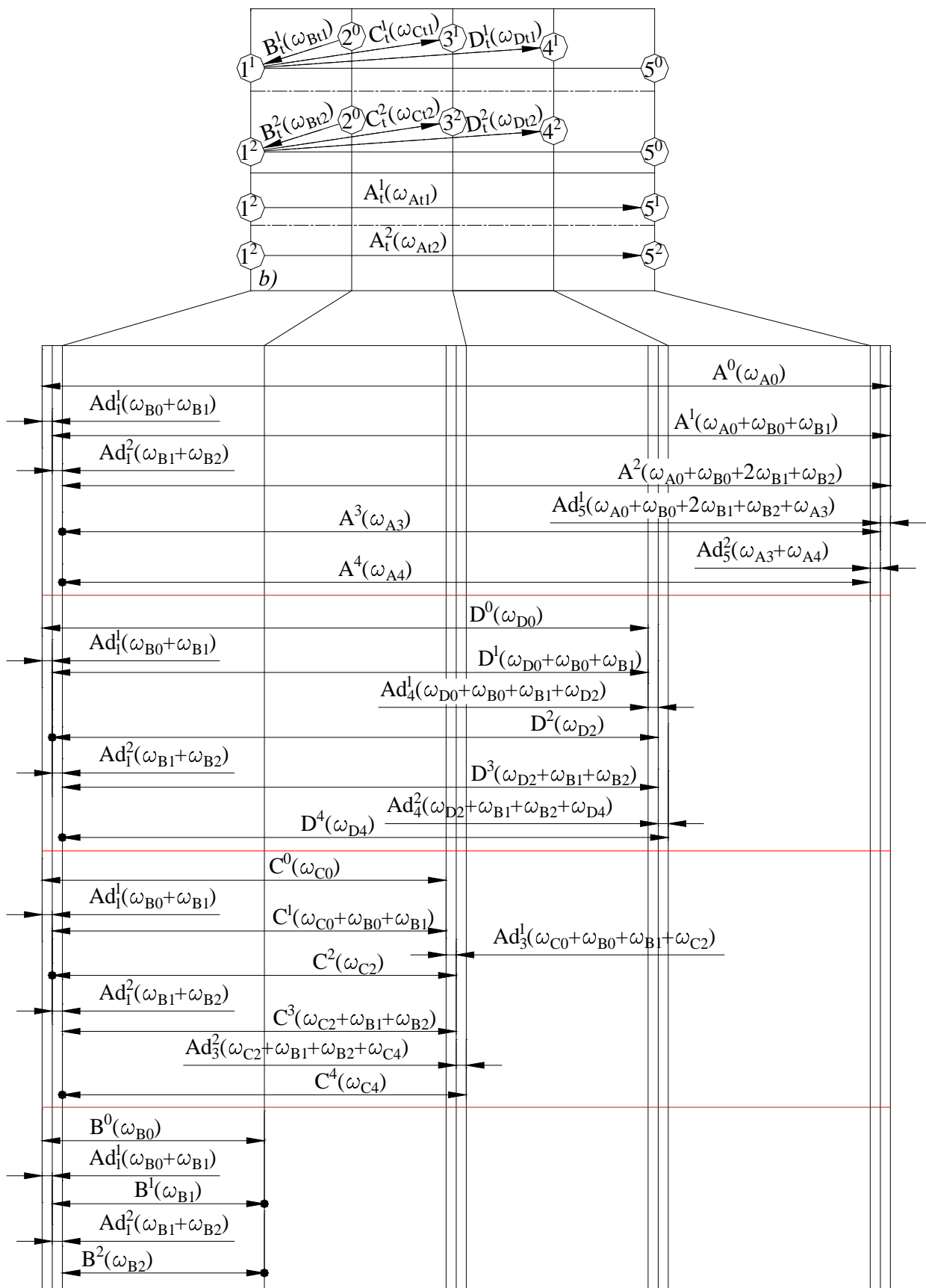


Fig. 2.17. Gruparea lanțurilor dimensionale tehnologice pentru rezolvare prin metoda de maxim și minim

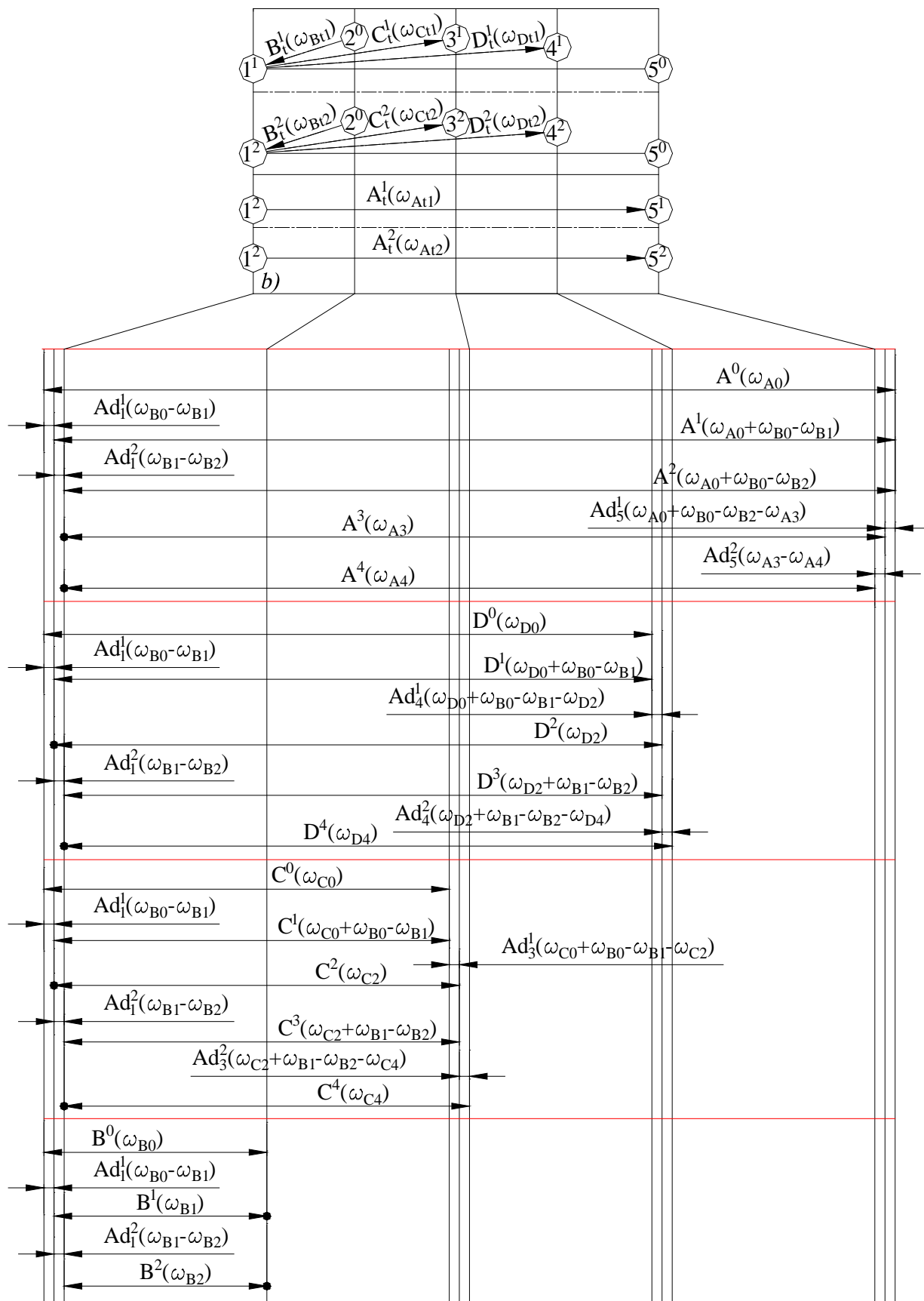


Fig. 2.18. Gruparea lanțurilor dimensionale tehnologice pentru rezolvare prin metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor

Lanțurile dimensionale C , D și A au câte două cote tehnologice-țintă și câte 4 adaosuri de prelucrare. Prin analogie cu sistemele mecanice static nedeterminate (rezistența materialelor) putem afirma că aceste lanțuri sunt dimensional nedeterminate. Lanțurile dimensionale B conțin două cote tehnologice-țintă și două adaosuri, fiind astfel dimensional determinate.

Rezolvarea lanțurilor dimensionale se face în raport cu elementul de închidere în următoarea ordine [98, 106, 107].

1. Se determină coordonata mijlocului câmpului de toleranță al adaosului de prelucrare (element de închidere): $\Delta_{0Ad} = \Delta_0 \uparrow - \Delta_0 \downarrow$. Aceasta este o relație matematic scrisă, dar nu este strictă, în care săgețile arată caracterul influenței elementului component asupra elementului de închidere: de mărire \uparrow sau de micșorare \downarrow . În altă formă avem:

$$\Delta_{0Ad} = \frac{ES + EI}{2} \uparrow - \frac{ES + EI}{2} \downarrow. \quad (2.12)$$

2. Se determină toleranța adaosului de prelucrare:

$$\omega_{Ad} = \omega^{i-l} \pm \omega^i, \quad (2.13)$$

unde semnul “+” corespunde metodei de maxim și minim, iar semnul “-” – metodei de maxim și minim cu compensarea erorilor.

3. Se determină dimensiunea nominală a adaosului (indicii k și j sunt omiși):

$$Ad_{nom} = Ad_{min} - \Delta_{0Ad} + \omega_{Ad} / 2. \quad (2.14)$$

4. Se determină abaterile-limită ale adaosului de prelucrare din relațiile:

$$\begin{aligned} EI_{Ad} &= Ad_{min} - Ad_{nom} \\ ES_{Ad} &= EI_{Ad} + \omega_{Ad} \end{aligned} \quad (2.15)$$

5. Se determină dimensiunea nominală a cotei necunoscute din lanț după caz:

$$B_{nom}^{i-l} = B_{nom}^i \pm Ad_{nom} \quad (2.16)$$

6. În cazul când elementul de închidere este o cotă intermediară, rezolvarea cu rezultat intermediar se obține în abateri-limită în raport cu elementul de închidere:

$$\begin{aligned} ES &= ES \uparrow - EI \downarrow \\ EI &= EI \uparrow - ES \downarrow \end{aligned} \quad (2.17)$$

2.3. Concluzii

- Un prim-nivel de analiză a structurilor dimensionale tehnologice este stabilirea cotelor tehnologice prin intermediul cărora se formează cotele constructive în calitate de elemente de închidere și stabilirea condițiilor de asigurare a preciziei de prelucrare. Cel de-al doilea nivel

de analiză în toleranțe se referă la cotele tehnologice și la adaosurile de prelucrare în calitate de elemente de închidere.

- În condițiile prelucrării pe mașinile-unelte CNC, în calitate de metodă de analiză dimensională a fost adoptată metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor, fapt ce permite o evaluare mai exactă a toleranțelor cotelor tehnologice și a toleranțelor adaosurilor de prelucrare.
- Compensarea erorilor se produce datorită faptului că în structura toleranțelor componentelor lanțului dimensional există erori - vectori de aceeași direcție, astfel încât formarea ambelor componente se produce parțial dependent, corelat. Au fost elaborate soluții privind toleranțele și abaterile-limită atât ale elementului de închidere, cât și ale cotelor-componente.
- Au fost stabilite mecanismele de compensare a erorilor în structurile dimensionale tehnologice complexe pentru cotele tehnologice ca elemente de închidere și ca elemente succesive într-un lanț dimensional, pentru adaosurile de prelucrare.
- A fost demonstrată posibilitatea de a calcula toleranțele adaosurilor de prelucrare ca diferență a toleranțelor cotelor tehnologice precedentă și actuală ($\omega_A = \omega^{i-1} - \omega^i$), situația fiind similară cu cea care se manifestă la prelucrarea suprafețelor de revoluție practică pe larg.
- A fost demonstrată posibilitatea de a calcula toleranțele adaosurilor de prelucrare ca diferență ponderată a toleranțelor cotelor tehnologice precedentă și actuală ($\omega_A = \omega^{i-1} - u \cdot \omega^i$).
- A fost stabilit efectul 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 maxim și minim datorită manifestării compensării erorilor.
- A fost elaborată o metodă originală de rezolvare a lanțurilor dimensionale tehnologice bazată pe diagrama toleranțelor și ghidată de grafurile relațiilor dimensionale tehnologice, ordinea rezolvării lanțurilor fiind stabilit în funcție de gradul de nedeterminare a lanțurilor dimensionale tehnologice grupate pe cote.

3. FORMAREA PRECIZIEI ÎN STRUCTURILE DIMENSIONALE TEHNOLOGICE

3.1. Formarea preciziei cotelor tehnologice la prelucrarea mecanică

Una dintre problemele esențiale ale proiectării tehnologiilor de prelucrare mecanică prin așchiere constă în stabilirea căilor de asigurare a preciziei dimensiunilor pieselor. Proiectarea tehnologiilor se bazează pe analize ce permit [98]: a) stabilirea legăturii dintre precizia tehnologică (de prelucrare) și precizia constructivă (a dimensiunilor constructive) specificată de desenul de execuție și b) stabilirea legăturii dintre precizia mașinilor-unelte utilizate și precizia tehnologică (de prelucrare). Precizia constructivă, precizia tehnologică și precizia sistemului tehnologic sunt trei grupe de parametri ce interacționează, având esențe diferite și diferite mecanisme de realizare. Pentru înțelegerea acestora, se utilizează analiza dimensională, care permite stabilirea legăturilor în etapa de proiectare a procesului tehnologic, stabilirea preciziei tehnologice (de prelucrare), alegerea corectă a preciziei mașinii-unelte (sistemului tehnologic), stabilirea cerințelor de precizie a dispozitivelor tehnologice, depistarea situațiilor critice, realizarea proiectelor tehnologice echilibrate.

Pe sistemele tehnologice (mașină-unelte, dispozitiv de instalare, scule așchietoare) sunt formate distanțe liniare sau unghiulare între propriile elemente. Unul dintre elemente este de referință, iar altul – cel care permite formarea distanței. Elementul de referință poate fi reprezentat prin [108] suprafețe ce aparțin sau unui organ de lucru al mașinii-unelte, sau dispozitivului, prin zerourile specificate pe mașinile-unelte CNC etc. Alt element este reprezentat de muchia(le) așchietoare a sculei ce formează suprafața prelucrată. În acest fel, precizia sistemului tehnologic are caracter de precizie de poziționare a organelor de lucru și se manifestă prin precizia de reglare (ω_{reg}) a distanțelor de reglare (L_{reg}). Precizia de reglare ω_{reg} este o proprietate, o caracteristică a sistemului tehnologic, dar și a metodei și a instrumentelor de reglare utilizate.

În procesul prelucrării, sistemul tehnologic formează distanțe care reprezintă dimensiuni tehnologice pe sistemul tehnologic L_{tech}^{ST} . Precizia dimensiunilor tehnologice pe sistemul tehnologic depinde de precizia reglării sistemului tehnologic și de erorile provenite din efectele de ordin fizico-tehnic al așchierii ω_{asch} (încălzirea și uzura sculei, cedarea elastică sub acțiunea forțelor de așchiere asupra elementelor sistemului tehnologic și piesei de prelucrat, acțiunea forțelor de fixare și a celor dinamice etc.) cu caracter sistematic și aleator. Atât sistemele tehnologice comercializate, cât și procesele de așchiere sunt bine studiate, iar informația cu

privire la această precizie se conține în pașapoartele tehnice și în materialele statistice incluse în îndrumare sau în bazele de date corporative. Regulamentele de exploatare a sistemelor tehnologice prevăd testarea periodică a mașinilor-unelte cu referire la precizia tehnologică, astfel informația respectivă devenind actualizată. Precizia sistemului tehnologic poate fi determinată din relația[108] :

$$\omega_{tehn}^{ST} = \omega_{reg} + \omega_{asch} . \quad (3.1)$$

Dimensiunile tehnologice formate pe piesa de prelucrat (L_{tech}^{pies}) se deosebesc de dimensiunile formate pe sistemul tehnologic. Pe sistemul tehnologic distanțele sunt măsurate între elemente cu suprafețe bine pregătite pentru acest lucru. Astfel, în primul rând, precizia dimensiunilor pe piesă este mai joasă datorită imperfecțiunilor geometrice (abaterea spațială ρ_{BT}) ale suprafeței piesei luată ca bază tehnologică:

$$\omega_{tehn}^{piesa} = \omega_{tehn}^{ST} + \rho_{BT} . \quad (3.2)$$

În al doilea rând, instalarea se produce cu eroarea de instalare ε_{inst} , care modifică poziția spațială a piesei de prelucrat. Precizia dimensiunilor tehnologice pe piesă este caracterizată prin relația [104, 108, 109]:

$$\omega_{tehn}^{piesa} = \omega_{tehn}^{ST} + \rho_{BT} + \varepsilon_{inst} . \quad (3.3)$$

Pe piesa gata trebuie să fie formate dimensiuni constructive L_{constr}^{piesa} , prin care este asigurată funcționalitatea acesteia. Modul de dimensionare a pieselor ține cont preponderent de funcționalitate și, numai în al doilea rând de particularitățile sistemului tehnologic pe care se va realiza prelucrarea și se vor asigura condiții favorabile de formare a preciziei. Drept consecință, la prelucrare nu toate dimensiunile constructive de pe piesă L_{constr}^{piesa} coincid cu dimensiunile tehnologice L_{tehn}^{piesa} , adică, nu se respectă întotdeauna principiul coincidenței bazelor, iar precizia dimensiunilor constructive se va asigura prin două sau mai multe dimensiuni tehnologice.

Principiul coincidenței bazelor se referă la baza tehnologică și baza constructivă [110]. Dimensiuni constructive există exclusiv pe piesa gata. Semifabricatele (matrițate, turnate etc.) sunt dimensionate conform normelor respective metodei de obținere. Doar o parte din dimensiunile semifabricatului sunt similare celor constructive și doar o parte din suprafețe sunt și pe semifabricat și pe piesă. Pentru altă parte, această similitudine dimensională se obține prin prelucrarea suprafețelor. În acest sens, se poate vorbi de cote constructive derivate și nu de cote constructive, și de suprafețe - baze constructive derivate și nu de baze constructive [104, 108, 109]. În procesul de transformare a semifabricatului în piesă gata bazele constructive și cotele

constructive se formează într-o ordine determinată de structura procesului tehnologic. Când o suprafață (chiar nefinită) reprezintă baza constructivă derivată, ea, suprafața, este pasibilă de utilizat în calitate de bază tehnologică pentru a respecta principiul coincidenței bazelor. În practica de toate zilele, noțiunea derivată nu se folosește. Suprafața care își modifică poziția prin prelucrare este considerată aceeași suprafață în stări succesive (S_1^1 , S_1^2 , S_1^3 ...).

În structura instalărilor tehnologice, cotele constructive sunt utilizate, de regulă, în calitate de cote constructive-țintă formate prin intermediul cotelor tehnologice-țintă, precizia cărora este scopul fazei tehnologice. Utilizarea cotelor constructive în calitatea acestora de cote-țintă reprezintă cea mai scurtă cale spre rezultatul final – precizia cotei constructive pe piesă [104, 108, 109]. În așa mod se poate stabili mai lesne o serie de cote tehnologice de precizie în creștere, ultima cotă tehnologică determinând precizia cotei constructive.

3.2. Formarea preciziei cotelor tehnologice în cadrul unei instalări

În condițiile moderne de realizare a tehnologiilor de prelucrare mecanică s-au schimbat esențial procesele de asigurare a preciziei dimensionale. Rolul deciziilor luate de operatorul mașinii-unelte a încetat să fie factor de prim-plan, deși în alt sens rămâne important. A devenit importantă cunoașterea și luarea în considerare a compensării erorilor ca factor de sporire a preciziei prelucrărilor. Analiza dimensională cu luarea în considerare a efectelor de compensare a erorilor permite o estimare mai veridică și mai exactă a preciziei de prelucrare, fiind astfel exclusă rezerva nejustificată a acesteia. În acest fel, cotele tehnologice în calitate de elemente ale lanțurilor dimensionale tehnologice pot fi realizate cu toleranțe mai mari (cu precizie mai joasă).

Se cunoaște că suprafețele piesei de prelucrat în cadrul operației tehnologice pot fi de două tipuri: suprafețe neprelucrate, o parte dintre acestea pot servi în calitate de baze tehnologice; suprafețe prelucrate. Prelucrările realizate modifică trei mulțimi de relații dimensionale [101, 111]:

- prima mulțime de relații dimensionale modificate este dintre suprafețele-baze tehnologice și suprafețele prelucrate (cotele tehnologice-țintă);
- a doua mulțime de relații dimensionale modificate este dintre unele suprafețe prelucrate și alte suprafețe prelucrate în cadrul operației (situațional pot fi cote tehnologice-țintă sau cote asociate cotelor-țintă);
- a treia mulțime de relații dimensionale modificate este dintre suprafețele neprelucrate în cadrul operației și suprafețele prelucrate (cote asociate cotelor tehnologice-țintă).

La formarea unei cote tehnologice-țintă, alte cote sunt asociate acesteia, ultimele ulterior devenind cote-țintă pot provoca apariția propriilor cote asociate.

Mulțimile de cote menționate se caracterizează prin diferite mecanisme de formare a preciziei.

Precizia cotelor-țintă dintre suprafețele bazei tehnologice și cele prelucrate în cadrul operației este determinată nemijlocit de precizia sistemului tehnologic (ST). Una dintre situații (fig. 3.1, a) se manifestă în condițiile lipsei erorii de instalare, fiind valabilă relația $\omega_L = \omega_L^{ST}$. A doua situație (fig. 3.1, b) are loc în prezența erorii de instalare și $\omega_L = \omega_L^{ST} + \varepsilon_{inst}$. În ambele cazuri precizia cotelor se poate îmbunătăți datorită manifestării efectelor de compensare a erorilor ($2 \cdot \omega^c$), care are caracter interoperațional [100]: $\omega_L = \omega_L^{ST} - 2 \cdot \omega^c$ (fig. 3.1, a) și $\omega_L = \omega_L^{ST} + \varepsilon_{inst} - 2 \cdot \omega^c$ (fig. 3.1, b). Formarea cotelor dintre suprafețele prelucrate se poate realiza în două situații deosebite [102, 108].

Una dintre situații prevede formarea cotelor tehnologice M și N de la baza tehnologică, iar cota L dintre suprafețele prelucrate este element de închidere (fig. 3.2). Eroarea de instalare la formarea ambelor cote tehnologice M și N este nenulă, iar pentru cota L se manifestă compensarea deplină a acestei erori, astfel, se poate scrie (fig. 3.2, a):

$$\omega_L = \omega_M^{ST} + \omega_N^{ST} - 2 \cdot \varepsilon_{inst} \quad (3.4)$$

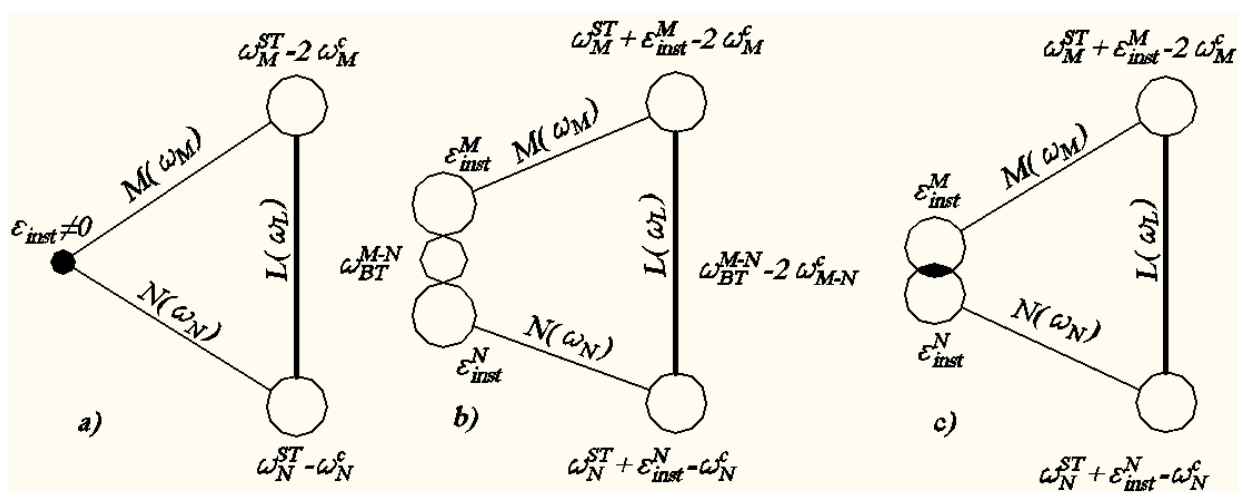


Fig. 3.2. Formarea preciziei cotei - element de închidere a lanțului dimensional tehnologic [102]

Dacă la formarea cotelor M și N se manifestă compensări de erori pe propriile linii,

atunci toleranța cotei L va fi determinată din relația:

$$\omega_L = \omega_M^{ST} + \omega_N^{ST} - 2 \cdot \varepsilon_{inst} - 2 \cdot \omega_M^c - 2 \cdot \omega_N^c. \quad (3.5)$$

Dacă prelucrarea se face de la aceeași bază tehnologică, dar la instalări diferite, atunci erorile de fixare nu pot fi compensate, fiind compensate numai cele de orientare și pentru cota L vom avea:

$$\omega_L = \omega_M^{ST} + \omega_N^{ST} + 2 \cdot \varepsilon_{fix} - 2 \cdot \varepsilon_{orient}^c - 2 \cdot \omega_M^c - 2 \cdot \omega_N^c. \quad (3.6)$$

Cea de-a doua situație prevede utilizarea diferitelor baze tehnologice la formarea cotelor M și N (fig. 3.2, b). În acest caz, erorile de instalare la formarea cotelor respective se manifestă independent, rămânând totuși posibilitatea de compensare a erorilor. Pentru cotele M și N la determinarea toleranțelor sunt valabile relațiile: $\omega_M = \omega_M^{ST} + \varepsilon_{inst}^M - 2 \cdot \omega_M^c$ și $\omega_N = \omega_N^{ST} + \varepsilon_{inst}^N - 2 \cdot \omega_N^c$. Pentru elementul de închidere L , ținând cont de toleranța distanței dintre bazele tehnologice ω_{BT}^{M-N} , se poate scrie: $\omega_L = \omega_M^{ST} + \varepsilon_{inst}^M - 2 \cdot \omega_M^c + \omega_N^{ST} + \varepsilon_{inst}^N - 2 \cdot \omega_N^c + \omega_{BT}^{M-N}$. În a doua situație se poate manifesta o compensare parțială a erorilor de instalare de la diferitele baze tehnologice $2 \cdot \omega_{M-N}^{comp}$, atunci precizia elementului de închidere L va crește puțin:

$$\omega_L = \omega_M^{ST} + \varepsilon_{inst}^M - 2 \cdot \omega_M^c + \omega_N^{ST} + \varepsilon_{inst}^N - 2 \cdot \omega_N^c + \omega_{BT}^{M-N} - 2 \cdot \omega_{M-N}^c \quad (3.7)$$

Din cele relatate se observă că cotele ce sunt elemente de închidere pot fi evaluate obiectiv la precizii mai înalte datorită luării în considerare a efectelor de compensare a erorilor.

Aplicarea principiului orientării invariante face posibilă coincidența cotelor tehnologice cu cele constructive derivate. Dacă se urmărește formarea cotei dintre două suprafețe și una dintre ele este suprafața de referință, atunci toleranța de reglare ω_{regl} este determinată numai de eroarea de poziționare în coordonata suprafeței ε_{poz} (fig. 3.3, a) [100, 103]. Acest lucru este caracteristic

prelucrărilor pe mașini-unelte CNC în coordonate relative. Dacă punctul sau suprafața de referință nu se găsește pe una dintre suprafețele prelucrate, atunci valoarea ω_{regl} va însuma $2\varepsilon_{poz}$ (fig. 3.3, b).

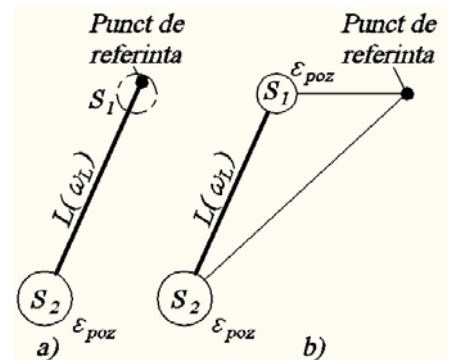


Fig. 3.3. Formarea erorii de instalare [100]

Pe mașini-unelte distanța L^{ST} se formează cu precizia reglării ω_{regl} . Dimensiunea pe piesă L^{piesa} dintre suprafața de referință S_1 și suprafața S_2 se formează cu precizia sistemului tehnologic ω_L^{ST} (fig. 3.4, a). După prelucrare, suprafața S_1 este plasată în limitele câmpului de toleranță a cotei M determinat de precizia sistemului tehnologic ω_M^{ST} (fig. 3.4, b). Este compensată în întregime eroarea de instalare, situațional sunt compensate eroarea de reglare și erorile de prelucrare. Pentru toleranța cotei L este valabilă relația:

$$\omega_L = \omega_L^{ST} + \omega_M^{ST} - 2 \cdot \varepsilon_{inst} - 2 \cdot \varepsilon_{regl} - 2 \cdot \omega^c. \quad (3.8)$$

Din cazul analizat se poate trage concluzia că efectele compensării erorilor sunt benefice pentru evaluarea corectă a preciziei cotelor tehnologice formate în lanț.

Adaosul de prelucrare este cota ce se formează între cele două stări ale aceleiași suprafețe, una dintre care este generată, iar alta dispare și este element de închidere. Astfel, cota-adaos de prelucrare are caracter temporal.

Dacă se utilizează relațiile (3.3) și (3.4) în raport cu adaosul de prelucrare, se poate ajunge la concluzia că efectele utilizării principiului orientării invariante fac posibilă creșterea preciziei sistemelor tehnologice $\omega_{tech}^{T.S.}$ datorită micșorării toleranței adaosului de prelucrare și sporirii stabilității procesului de așchiere.

Din cele expuse se poate trage concluzia că în cadrul unei instalări se respectă principiul orientării invariante, sunt create condiții favorabile compensării erorilor, astfel fiind posibilă asigurarea mai ușoară a preciziei de prelucrare necesare.

3.3. Optimalitatea structurilor dimensionale tehnologice

Una dintre sarcinile importante ale ingineriei mecanice este obținerea de produse competitive în sensul minimizării costurilor totale în etapele întregului ciclu de viață al produsului. Acest lucru este valabil mai ales pentru etapele de proiectare–dezvoltare a proceselor tehnologice și de fabricație cu cerințe de cost minim, menținând în același timp o productivitate ridicată în condițiile unei manopere de înaltă calitate. Astfel, proiectarea procesului tehnologic este o etapă foarte importantă a activităților procesului de fabricație. De calitatea proceselor tehnologice, de profunzimea analizei realizate depinde, în multe cazuri, eficiența proceselor de fabricație, mărimea costurilor inițiale, precum și costurile legate de eliminarea greșelilor [57].

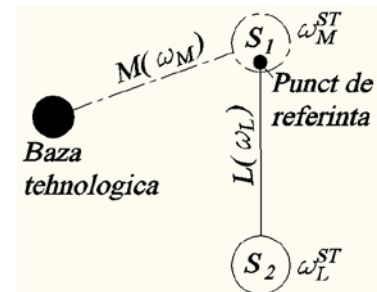


Fig. 3.4. Formarea preciziei cotelor dintre suprafețele prelucrate

Analiza dimensională ocupă un loc special în cadrul tehnologiilor de proiectare în ceea ce privește etapa de proiectare tehnologică, precum și etapa de proiectare constructivă în calitate de procese interconectate [112, 113, 114, 115, 116].

O trăsătură caracteristică a majorității problemelor tehnologice este multivarianța [94]. Acest lucru se datorează posibilității de fabricare a unui produs, folosind structuri diferite de operații și de succesiuni ale acestora în procesul tehnologic, o varietate largă de metode de prelucrare, de utilaje, echipamente și scule. Și, din moment ce există mai multe soluții posibile, există opțiuni atât mai bune, cât și mai puțin bune, dar există totuși și cea mai bună opțiune. Evaluarea și măsurarea nivelului de calitate se face în baza unor criterii din timp stabilite de origine tehnică, organizatorică și economică.

În acest context, una dintre cele mai importante probleme reprezintă sinteza structurii dimensionale optime a procesului tehnologic de prelucrare, structurii ce trebuie specificată în etapa de pregătire a producției [56, 112, 114, 115, 116]. Căutarea unei opțiuni tehnologice care să asigure calitatea și rentabilitatea fabricării pe baza optimizării relațiilor dimensionale și de precizie necesită stabilirea parametrilor tehnologici optimi [117, 118]. Relațiile dimensionale și de precizie sunt condiționate de nivelul suportului tehnologic, de prezența condițiilor tehnice adecvate pentru fabricarea piesei care pot deveni limitatorii.

Utilizarea analizei dimensionale a simplificat foarte mult sarcina de proiectare a tehnologiilor mecanice, eliminând nevoia de teste repetabile în fabricație [100, 101, 103]. 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. Cele mai mari dificultăți apar în dezvoltarea schemelor de stabilire a dimensiunilor tehnologice, al căror număr, datorită numeroaselor opțiuni de instalare, este destul de mare. Analiza tuturor variantelor de scheme de stabilire a dimensiunilor tehnologice pentru a o găsi pe cea optimă necesită mult timp. Totuși, experiența a arătat că efectuarea analizei dimensionale iterative pentru mai multe opțiuni conduce nu numai la soluții bune, ci și la structuri tehnologice optimizate.

Soluția modernă a unor astfel de probleme 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. 3.5).

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

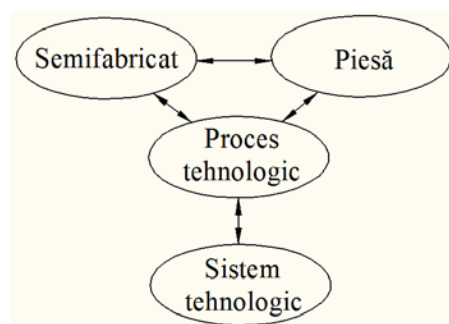


Fig. 3.5. Sistem de optimizare tehnologică

unuia dintre aceste obiecte neapărat va conduce la modificări în celelalte trei obiecte, astfel încât se manifestă mai multe soluții tehnic posibile pentru acestea. Soluția optimă pentru oricare obiect este cea unică de preferat în raport cu altele, pornind de la o anumită condiționare sau regulă de alegere. Așadar, se poate constata că alegerea soluțiilor optime este un proces continuu și se produce în conformitate cu diverse criterii.

Problema optimizării structurale a procesului tehnologic poate fi formulată ca problema alegerii celei mai bune structuri ale acestuia. Este necesar, în primul rând, să fie formulate anumite cerințe față de ansamblul de operații prevăzute și, în al doilea rând, să se introducă unele criterii de preferință ale unei structuri față de alta. La elaborarea procesului tehnologic, optimizarea structurală este utilizată în raport cu următoarele etape ale procesului de proiectare [55]: selecția semifabricatelor și a metodelor de fabricație a acestora, întocmirea unui traseu de prelucrare, selecția bazelor tehnologice, dezvoltarea operațiunilor tehnologice.

Una dintre cele mai importante etape ale optimizării structurale a procesului tehnologic este alegerea operațiilor tehnologice de prelucrare mecanică. Caracterul operațiilor și specificul mașinilor-unelte utilizate influențează semnificativ complexitatea prelucrării și costul tehnologic asociat. Optimizarea structurală a proceselor tehnologice în întregime ia în considerare fiecare sarcină de proiectare tehnologică cu referire la semifabricat, sistem tehnologic, tehnologie prin proceduri separate [55]. Astfel, procesul de proiectare este împărțit în mai multe subprocesse interdependente cu rezultate în multe variante.

Eficiența procesului de proiectare poate fi crescută substanțial dacă pe fiecare direcție de proiectare se face selecția de variante raționale. Cele mai bune soluții pe direcții nu înseamnă și cea mai bună soluție în ansamblu. De exemplu, selecția semifabricatului după criteriul prețului de cost cel mai mic nu este complet obiectivă, deoarece va condiționa o prelucrare mai scumpă. Semifabricatul mai scump va oferi o prelucrare mai ieftină. Evident, soluția optimă se află la mijlocul celor două extreme, dar costul de prelucrare poate fi calculat numai după dezvoltarea întregului proces tehnologic. În consecință, sensul de optimizare pe direcții separate este compromis. În același timp, determinarea reușită a criteriilor de optimizare pe direcții parțiale permite canalizarea efortului spre o variantă optimă în ansamblu.

Stabilirea numărului și succesiunii optime de operații tehnologice se face în baza analizei constructiv-funcționale a desenului de execuție al piesei și al desenului de ansamblu din care face parte piesa de prelucrat. Acesta este punctul de plecare pentru a evalua complexitatea și dificultatea realizării piesei. Stabilirea conținutului și tipul operațiilor tehnologice și succesiunea acestora este influențată de complexitatea piesei de prelucrat și a suprafețelor care o alcătuiesc, de gradul de acuratețe al cotelor și condițiilor impuse, de performanța dotărilor și echipamentelor, dar și de experiența specialiștilor ce lucrează în activitatea de proiectare [119].

3.3.1. Optimizarea structurală a tehnologiilor de prelucrare mecanică indusă de dezvoltarea sistemelor tehnologice

În ordine cronologică, procesul de dezvoltare a proiectării tehnologiilor mecanice a fost permanent sincronizat cu procesul de îmbunătățire a suportului tehnic al acestor tehnologii [102]. La început, tehnologiile au fost dezvoltate în condiții de utilizare a mașinilor-unelte universale cu capacități tehnologice reduse la o singură metodă de prelucrare. Divizibilitatea tehnologiei în operații cu sarcini unilaterale specifice și de mică amploare a oferit posibilitatea de a respecta la maximum principiul coincidenței bazelor tehnologice de instalare și constructive de măsurare pentru a obține condiții favorabile de asigurare a preciziei.

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. 3.6). 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: $SD_1 + SD_{12} + SD_2 + SD_{23} + SD_3 + SD_{34} + SD_4 + \dots + SD_n$.

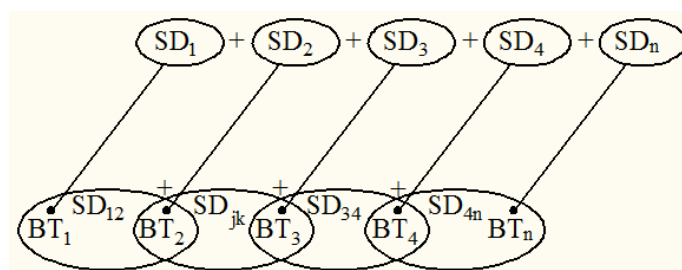


Fig. 3.6. Formarea structurii dimensionale (SD) a piesei prin instalări de la o serie de baze tehnologice (BT) [94]

O altă variantă se realizează pentru tehnologii de prelucrare mecanică care conțin 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 la instalațiile repetate afectează precizia (fig. 3.7).

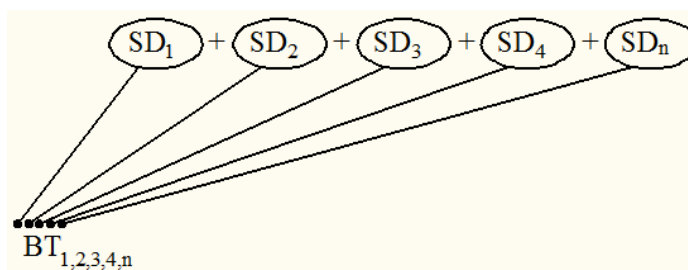


Fig. 3.7. Formarea structurii dimensionale (SD) a piesei prin reinstalări de la aceeași bază tehnologică (BT) [94]

Numărul relativ mic de dimensiuni în fiecare structură parțială, dar și posibilitățile de a alege în calitate de baze tehnologice suprafețele - baze constructive nu provoacă necesitatea de creștere

situațională a preciziei cotelor tehnologice și pentru analiză poate fi folosită metoda de maxim și minim. Mai mult, chiar dacă există necesitatea de creștere a preciziei unor cote tehnologice, este relativ ușor de stabilit instalarea și cota cu toleranța tehnologică mai mică decât cea limită admisă și probabilitatea rebutului dimensional.

Numărul mare de instalări oferă posibilitatea de a soluționa problemele de precizie tehnologică pentru fiecare operație și/sau instalare aparte fără interinfluențe cu alte operații și/sau instalări. Deci, structurile dimensionale parțiale sunt formate independent.

Odată cu creșterea numărului de dimensiuni în structurile dimensionale parțiale (mai mult de 5 conform [98]) se manifestă probleme structurale cu sporirea excesivă a preciziei cotelor tehnologice și apare necesitatea de a utiliza analiza dimensională a metodei probabilistice pentru a ameliora situația. Această necesitate devine iminentă dacă sistemele tehnologice nu mai asigură precizia necesară a dimensiunilor. Prelucrările se fac pe mașini-unelte de precizie mai joasă cu asumarea riscurilor economice respective.

La cealaltă extremă istorică se găsesc tehnologiile realizate pe mașini-unelte CNC și pe centre de prelucrare. Identificarea și luarea în considerare a acestor deosebiri și a noilor caracteristici tehnologice este importantă pentru a asigura precizia necesară a piesei și utilizarea eficientă a mașinilor-unelte scumpe [77, 78]. Natura acestor caracteristici structurale ale proceselor tehnologice proiectate pentru centrele de prelucrare CNC rezidă în centralizarea maximă a prelucrărilor. Centralizarea prelucrărilor constă în faptul că piesa reprezintă obiectul central al sistemului tehnologic și solicitările sunt aplicate secvențial prin diferite metode de prelucrare, cu ajutorul diverselor scule așchietoare. Datorită transformării morfologice a centrelor de prelucrare (dar și a altor mașini-unelte CNC), acestea se modifică, în sens clasic, de fiecare dată în alte mașini-unelte: mașina de frezat, strungul, mașina de găurit etc. Acest proces are loc în timp. La început, centrele de prelucrare CNC includeau metode de prelucrare mecanică cu parametri de viteză (turație) comparabile și relativ joase cum ar fi la strunjire, frezare, găurire etc. (fig. 3.8). Apoi a fost nevoie de comasarea în aceleași mecanisme a diferitelor mișcări de generare a suprafețelor.

Următorul pas a fost realizat prin adăugarea metodelor de frezare melcată, care se potrivesc datorită turațiilor relativ mici ale arborilor principali, dar cinematica este deosebită și specifică (fig. 3.9).

Mai complexă a fost centralizarea prelucrărilor, pornind de la turația suficient de mare necesară la rectificarea rotundă interioară (fig. 3.10, a). Odată cu rezolvarea problemei turației, imediat în mulțimea de funcții a centrului de prelucrare s-au adăugat și tratamentele termice cu fascicul Laser (fig. 3.10, b). Călirea Laser are beneficii suplimentare, deoarece exclude deformările remanente ale obiectului tratat termic prin răcire eficientă locală.



Fig. 3.8. Centralizarea prelucrărilor prin strunjire, frezare, găurire etc. (exemplu reprezentativ [120])

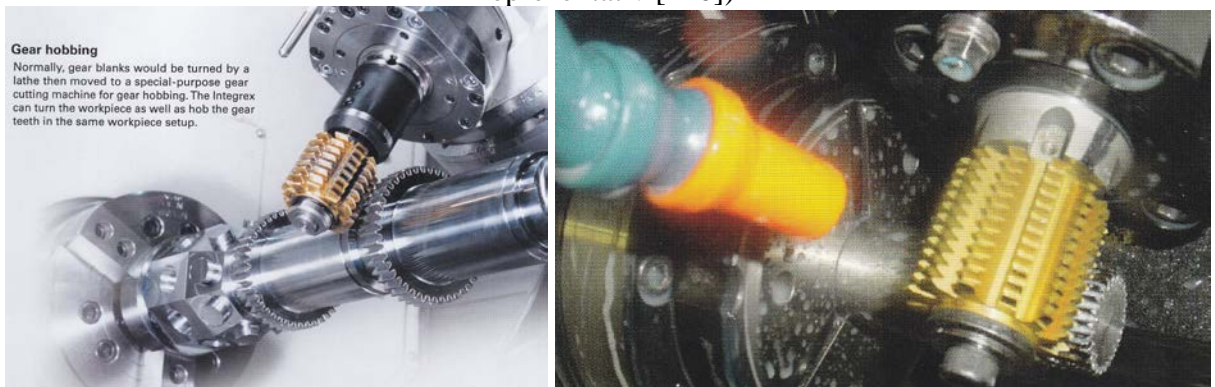


Fig. 3.9. Dezvoltarea centralizării prelucrărilor cu frezarea melcată etc. (exemplu reprezentativ [120])

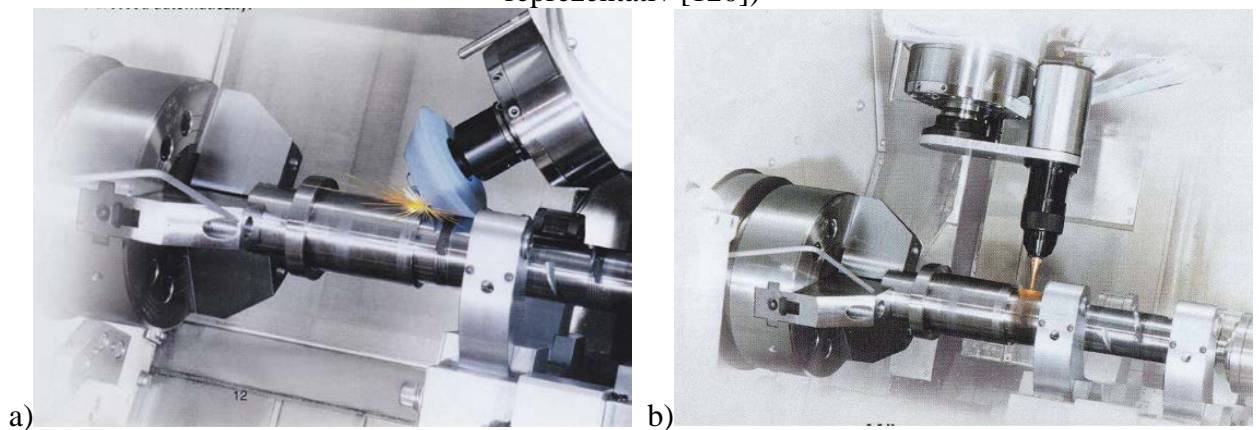


Fig. 3.10. Completarea potențialului centralizării prelucrărilor cu rectificare și călire Laser (exemplu reprezentativ [120])

Astfel, utilajele moderne multifuncționale permit formarea unui set de suprafețe amplasate în mod diferit și prin metode diferite de prelucrare. Piese pot fi, de obicei, prelucrate din una sau două instalații.

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 multe dimensiuni (fig. 3.11). 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. Contradicția se rezolvă în folosul robusteții preciziei tehnologiei dezvoltate.

Unul dintre efectele utilizării mașinilor-unelte de tip centru de prelucrare este asigurarea preciziei dimensiunilor datorită respectării principiului orientării invariante și a efectelor de compensare a erorilor.

Al doilea efect pozitiv pentru înlesnirea asigurării preciziei este rigiditatea net mărită a centrelor de prelucrare în comparație cu mașinile-unelte tradiționale. Centrele de prelucrare, fiind mecanisme spațiale mai complexe decât cele ale mașinilor-unelte tradiționale, au structuri interne mai performante în sensul rigidității și stabilității structurale.

Al treilea efect pozitiv pentru precizia dimensională la prelucrarea pe centrele de prelucrare este faptul că acestea funcționează preponderent în conformitate cu conceptul prelucrării la viteze mari (High Speed Machining – HSM) [121]. Precizia dimensională, de formă și de poziție la prelucrarea cu viteze mari este mai înaltă comparativ cu prelucrarea tradițională datorită forțelor de așchiere cu mult mai mici și concentrării fluxului termic preponderent în așchii evacuate [122, 123]. Astfel, se pot prelucra la viteze mari piese cu pereți subțiri fără ca elementele nerigide să sufere deformări inadmisibile. Piesele fabricate prin prelucrarea la viteze mari au suprafețe de un finisaj foarte bun. Durabilitatea sculelor este substanțial mărită, fapt ce permite sculei să formeze succesiv mai multe suprafețe.

Toate acestea conduc la reducerea numărului de faze tehnologice necesare pentru a asigura precizia dimensională a cotelor liniare și a celor diametrale. Un calcul tradițional al adaosurilor de prelucrare pentru suprafața de revoluție $\varnothing 100h7$ arată că în condițiile unei singure instalări, pornind de la o suprafață cu dimensiunea conform clasei de precizie la turnare 9 (IT16), adaosul total pentru 3 faze este mai mic decât cel pentru 4 faze tehnologice. Este semnificativ

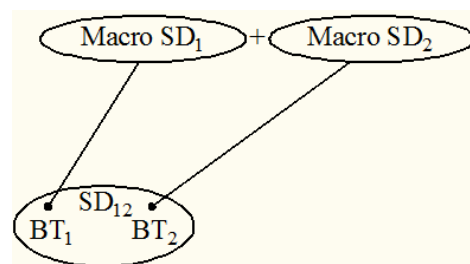


Fig. 3.11. Formarea structurii dimensionale (SD) a piesei prin instalări plecând de la un număr mic de baze tehnologice (BT)

faptul că ultimele faze tehnologice în ambele cazuri se produc în condiții practic absolut identice (adâncimi de aşchiere de 0.32 și 0.35 mm (tab. 3.1).

Tabelul. 3.1. Adaosuri de prelucrare maxime pentru 4 și 3 faze tehnologice la formarea suprafeței $\varnothing 100h7$ (exemplu reprezentativ)

IT13	IT12	IT11	IT10	IT9	IT8	IT7	Total
6.37		0.84		0.45		0.32	8.10
6.00			0.75			0.35	7.10

Din cele relatate se poate trage concluzia că *una dintre direcțiile de optimizare a proiectelor proceselor tehnologice în condițiile asigurării suportului tehnologic cu mașini-unelte CNC și centre de prelucrare se manifestă prin minimizarea numărului de operații, numărului de instalări și a numărului de faze tehnologice* $N_{op} \rightarrow \min$, $N_{inst} \rightarrow \min$, $N_{f.t.} \rightarrow \min$.

Structurile proceselor tehnologice de prelucrare a pieselor pe acest tip nou de mașini-unelte, în special în aspect dimensional, diferă semnificativ de structurile tehnologiilor proiectate și realizate pe mașini-unelte convenționale.

Dept consecință a acestei direcții de optimizare este comasarea într-o operație a fazelor tehnologice de degroșare și a celor de finisare. Nu mai există iminenta separare a acestor două grupe de faze tehnologice atât prin soluțiile tehnologice adoptate, cum ar fi aşchierea la viteze mari cu forțe de aşchiere substanțial mai mici, cât și prin soluțiile cu efecte metalurgice – tratamente termice de relaxare a tensiunilor interioare remanente în materialul semifabricatului provocate de turnare sau matrițare. Altă soluție utilizată pentru relaxare este tratarea cu ultrasunet. Excepție face prelucrarea pieselor din oțeluri greu de prelucrat, care, după orice prelucrare mecanică, sunt supuse tratamentului termic de blocare a formării microdefectelor. Dar și în acest caz, prelucrarea la viteze mari este capabilă să nu producă sau să diminueze pericolele de microfisurare.

3.3.2. Optimalitatea structurală a tehnologiilor de prelucrare mecanică indusă de robustețea soluțiilor

Utilizarea mașinilor-unelte CNC și a centrelor de prelucrare este justificată pentru fabricarea pieselor cu structuri dimensionale complexe. Metodele probabilistice de analiză dimensională în condițiile unui număr mare de dimensiuni nu sunt satisfăcătoare pentru aprecierea deciziilor luate. Prin urmare, se ia în considerare scenariul determinat de metoda de maxim și minim. Noțiunea de robustețe a proiectelor proceselor tehnologice prevede neadmiterea "zgomotului" sau neadmiterea manifestării acestuia. O evaluare incorectă a preciziei de formare a cotelor tehnologice atât în direcția riscurilor de rebut (evaluare probabilistă), cât și

în direcția formării rezervelor excesive de precizie prin metoda de maxim și minim reprezintă același zgomot. Cunoașterea situațiilor și măsurii de compensare a erorilor permite formarea cotelor tehnologice la precizia justificată. Astfel, *altă direcție de optimizare a proiectării și, în consecință, a proceselor tehnologice prevede asigurarea robusteții prin faptul că se acceptă metoda de maxim și minim și suma toleranțelor cotelor tehnologice care alcătuiesc elementul de închidere al lanțului dimensional nu depășește toleranța acestuia din urmă* $T \geq \sum \omega_{t_i}$. În cazul când este posibilă stabilirea și măsurarea efectelor compensării erorilor, condiția de robustețe are forma $T \geq \sum \omega_{t_i} - \sum \omega_{t_i}^c$. Dacă efectele compensării sunt mai greu de evaluat și de măsurat, se admite utilizarea metodei maxim și minim.

3.3.3. Optimalitatea structurilor dimensionale elementare

În procesul tehnologic proiectat pentru fiecare cotă constructivă se alege o cotă tehnologică prin intermediul căreia cotă constructivă respectivă este formată atât în sens pur dimensional, cât și în cel de precizie (în toleranțe). Rezultatul formării cotelor tehnologice sunt cotele constructive - elemente de închidere a lanțurilor dimensionale tehnologice.

Structura dimensională a piesei include multe dimensiuni constructive cu propriile toleranțe $A_c(T_{Ac}^{piesa})$, fiecare dintre acestea fiind formată în tehnologie de propria dimensiune tehnologică cu propria sa toleranță tehnologică. Această situație este considerată optimă, deoarece precizia dimensiunii tehnologice se transformă în precizia dimensiunii constructive direct și fără pierderi (fig. 3.12, a) [57, 94, 124]:

$$\begin{aligned} A_c &= A_t, \\ T_{Ac}^{piesa} &= \omega_{At}. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Dacă la formarea cotei tehnologice se manifestă efecte de compensare a erorilor, precizia cotei constructive se asigură mai lesne și

$$T_{Ac}^{piesa} = \omega_{At} - 2 \cdot \omega_{At}^c. \quad (3.10)$$

Se observă adesea structuri dimensionale în care lanțul dimensional tehnologic este închis nu numai prin dimensiunea tehnologică proprie, dar cu implicarea uneia (eventual mai multor) dimensiuni tehnologice (istorice) deja existente (fig. 3.12, b). Astfel, precizia cerută a dimensiunii constructive se realizează prin creșterea cerințelor de precizie a dimensiunilor tehnologice care alcătuiesc lanțul dimensional conform relațiilor [94, 124]:

$$\begin{aligned} B_c &= B_t + A_t, \\ T_{B_c}^{piesa} &\geq \omega_{B_t} + \omega_{A_t}. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Conform standardelor ISO [125, 126], valorile toleranțelor sunt definite ca produsul dintre numărul unităților de toleranță a și valoarea unității de toleranță i . Astfel, condiția de asigurare a preciziei poate fi scrisă în

$$\text{forma } a_{B_c} \cdot i_{B_c} \geq a_{B_t} \cdot i_{B_t} + a_{A_t} \cdot i_{A_t}.$$

După transformări și în condiția aceleiași precizii pentru ambele cote tehnologice $a_{B_t} = a_{A_t} = a_{AB_t}$ obținem

$$a_{B_c} / a_{AB_t} = (i_{B_t} + i_{A_t}) / i_{B_c}. \quad (3.12)$$

Acest raport arată de câte ori (în unități de toleranță) crește precizia cotelor tehnologice față de precizia cotelor constructive în funcție de valorile relative ale dimensiunilor B_t / B_c și A_t / B_c (fig. 3.13).

Dacă se ține cont de compensarea erorilor la formarea cotelor tehnologice, putem scrie

$$T_{B_c}^{piesa} \geq \omega_{B_t} - 2 \cdot \omega_{B_t}^c + \omega_{A_t} - 2 \cdot \omega_{A_t}^c. \quad (3.13)$$

Din cele relatate se poate concluziona că optimă este structura dimensională elementară, în care fiecare dimensiune constructivă este formată doar prin propriile dimensiuni tehnologice.

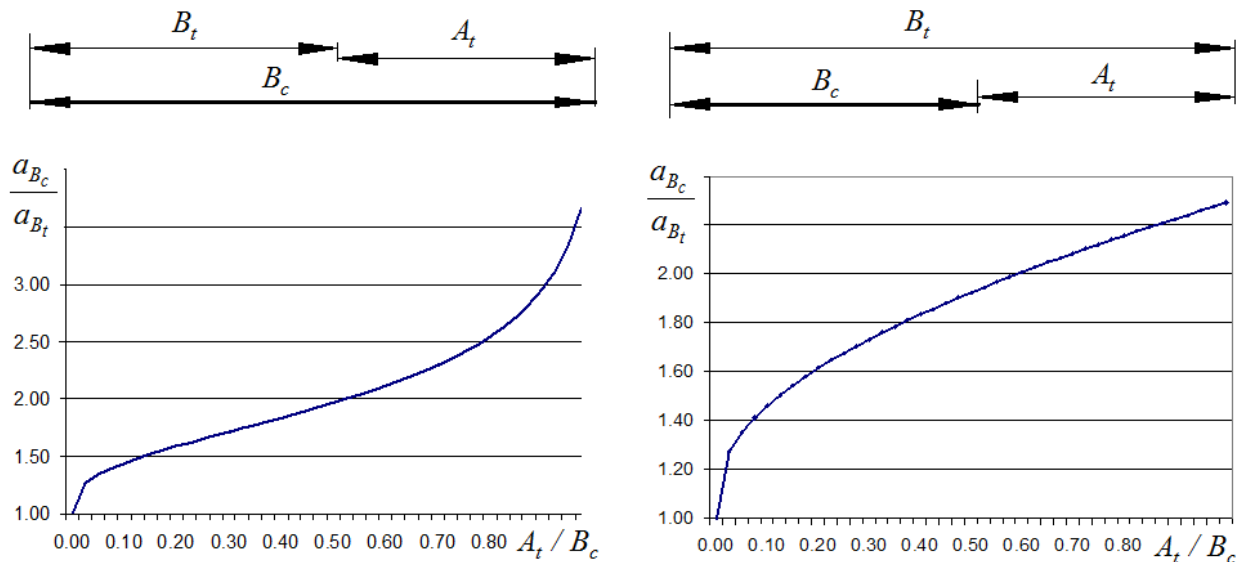


Fig. 3.13. Creșterea preciziei cotei tehnologice B_t față de precizia cotei proprii constructive B_c în funcție de ponderea cotei tehnologice străine A_t (exemplu, $B_c = 200$ mm)

Dacă extindem această concluzie asupra mai multor cote constructive și asupra ambelor situații din figura 3.12, putem afirma că structura dimensională este optimă dacă diferența dintre numărul de cote tehnologice structural manifestate N_{CT} și numărul de cote constructive N_{CC} este minimă:

$$N_{CT} - N_{CC} \rightarrow \min. \quad (3.14)$$

Optimă este situația din figura 3.12, a) cu $N_{CT} - N_{CC} = 0$. În cazul figurii 3.12, b), $N_{CT} - N_{CC} = 1$.

Deoarece tehnologiile de prelucrare mecanică prevăd lucrul cu serii de faze tehnologice cu precizia în creștere pentru a forma o cotă constructivă și a asigura precizia acesteia, relația de optimalitate (3.2) poate fi scrisă astfel:

$$\sum N_{CT} - N_{CC} \rightarrow \min. \quad (3.15)$$

Aici, însumarea se face pe multiplele faze tehnologice care sunt planificate. Se poate considera că, în condițiile structurilor dimensionale complexe și ale tehnologiilor realizate pe mașini-unelte CNC și centre de prelucrare, aceeași cotă constructivă se formează prin aceeași structură dimensională tehnologică elementară (fig. 3.12), indiferent de faza tehnologică pe linia ascendentă a preciziei.

Fazele tehnologice se realizează prin eliminarea adaosurilor de prelucrare, numărul de faze fiind egal cu numărul de adaosuri eliminate. Cotele pe semifabricat pot fi considerate și ele cote tehnologice istorice. Astfel, în relația (3.2) se pot însuma cotele tehnologice și adaosurile de prelucrare, ambele fiind parte ale structurilor dimensionale tehnologice. Astfel, pentru situațiile din figura 3.14, b) avem $\sum N_{CT} - N_{CC} = 4$ și, respectiv, din figura 3.14, d) $\sum N_{CT} - N_{CC} = 5$.

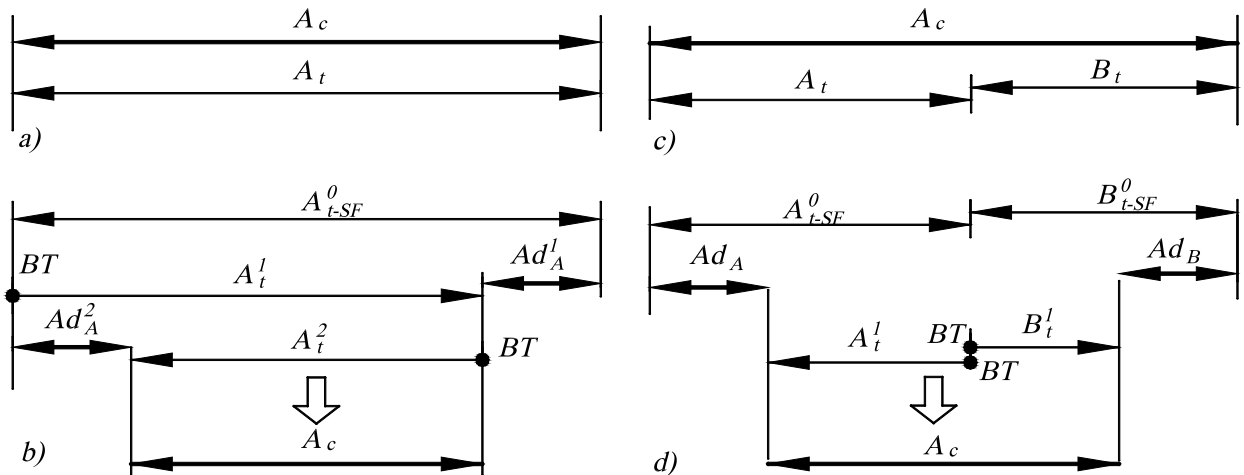


Fig. 3.14. Variante de structuri dimensionale tehnologice cu diferite numere de elemente structurale ale lanțurilor dimensionale

Optimalitatea opțiunii descrise în figura 3.14, a) poate fi încălcată, deoarece unica dimensiune A_t considerată optimă poate intra ca una istorică într-un alt lanț dimensional. Aceasta va necesita o creștere a preciziei și, în consecință, se va produce o creștere forțată a preciziei propriiei dimensiuni constructive A_c . Dacă această dimensiune este una critică, adică este element component într-un lanț dimensional de ansamblu, va fi necesară o reproiectare a acestui lanț, eventual, cu o descreștere a cerințelor de precizie față de alte elemente.

Orice pereche de dimensiuni tehnologice se formează datorită eliminării adaosului de prelucrare, scopul fiind creșterea preciziei unei anumite dimensiuni tehnologice (fig. 3.15). Adaosul de prelucrare în acest caz este element de închidere a lanțului dimensional tehnologic.

Dacă ambele dimensiuni tehnologice sunt formate de la aceeași bază tehnologică, atunci toleranța adaosului de prelucrare este definită prin metoda de maxim și minim ca $\omega_{Ad_i} = \omega_{A_t^{i-1}} + \omega_{A_t^i}$, cu efecte de compensare a erorilor – $\omega_{Ad_i} = \omega_{A_t^{i-1}} + \omega_{A_t^i} - 2 \cdot \omega^c$. Odată cu schimbarea bazei tehnologice, toleranța adaosului de prelucrare crește cu mărimea toleranței distanței dintre suprafețele-baze tehnologice acceptate $\omega_{Ad_i} = \omega_{A_t^{i-1}} + \omega_{A_t^i} + \Delta_{BT}$ și $\omega_{Ad_i} = \omega_{A_t^{i-1}} + \omega_{A_t^i} + \Delta_{BT} - 2 \cdot \omega^c$, respectiv, prin metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor.

Creșterea toleranței adaosului de prelucrare maxim este echivalentă cu creșterea adâncimii de așchiere și cu necesitatea sporirii numărului de treceri tehnologice. Adâncimile mari de așchiere sunt îndeosebi inacceptabile în cazul utilizării prelucrărilor de mare viteză.

De aici putem formula următoarea direcție de optimizare a proiectării și, în consecință, a proceselor tehnologice: *numărul de elemente în lanțul dimensional tehnologic, în care adaosul de prelucrare este elementul de închidere, trebuie să fie, dacă este posibil, egal cu 3 (dimensiunea în faza tehnologică actuală, dimensiunea în faza tehnologică precedentă și dimensiunea intermediară dintre ele – adaosul de prelucrare $\sum m_j = 3$). Această afirmație este, de fapt, o formulare diferită a principiului orientării invariante. Procesul tehnologic optim va*

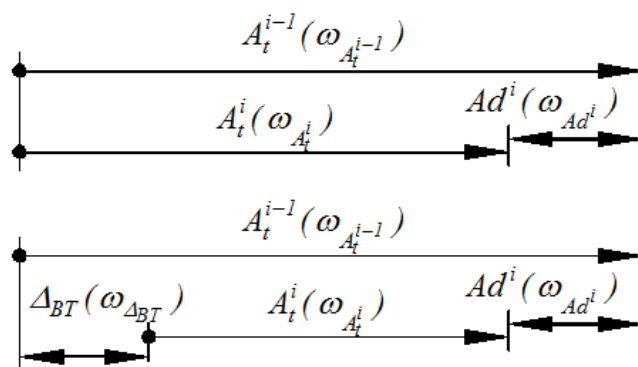


Fig. 3.15. Transformarea cotei tehnologice-țintă prin eliminarea adaosurilor de prelucrare: a) de la o singură bază tehnologică; b) cu schimbarea bazelor tehnologice.

consta din blocuri tehnologice elementare similare. În același timp, bazele tehnologice trebuie să coincidă cu bazele constructive de măsurare [94].

E de menționat că eliminarea adaosului de prelucrare pentru a spori precizia unei dimensiuni tehnologice conduce la o scădere a preciziei tuturor celorlalte dimensiuni asociate cu suprafața prelucrată (fig. 3.16). Dimensiunile non-țintă (R_t^i), în acest caz, sunt elemente de închidere în lanțuri dimensionale și toleranța lor este mărită cu toleranța adaosului de prelucrare care trebuie eliminat $\omega_{R_t^i} = \omega_{R_t^{i-1}} + \omega_{Ad_i}$.

Dimensiunea capătă o valoare intermediară și ulterior în calitate de dimensiune-țintă va fi adusă la precizia necesară [94, 127].

Productivitatea proceselor tehnologice este asociată cu eliminarea adaosurilor de prelucrare de pe suprafețe și acestea sunt asociate cu consumul de scule, cu timpul consumat de sistemele tehnologice, de operatori etc. Următoarea direcție de optimizare a proiectării și, în consecință, a proceselor tehnologice poate fi formulată după cum urmează. *Suma (suma de volum) adaosurilor maxime de prelucrare ($Ad_{max} = Ad_{min} + \omega_{Ad}$) îndepărtate de pe toate suprafețele piesei trebuie să fie minimă $\sum Ad_k \rightarrow \min$, iar fiecare adaos de prelucrare maxim necesar obținerii preciziei nu trebuie să depășească o anumită valoare-limită $Ad_{kmax} \leq [Ad_k]$. Limitarea adâncimii de așchiere este o restricție aplicată prelucrării la viteze mari.*

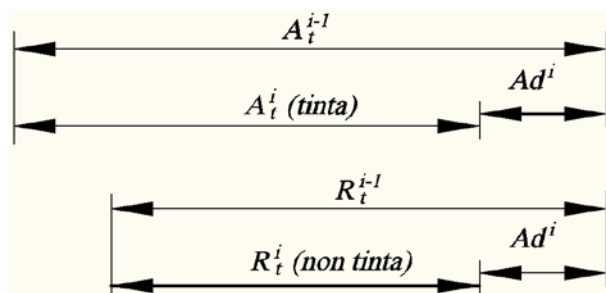


Fig. 3.16. Efectul de scădere a preciziei cotelor non-țintă asociate cu suprafața prelucrată prin eliminarea adaosului

3.3.4. Sinteza structurilor dimensionale tehnologice complexe optime

Una dintre cele mai complicate probleme în timpul elaborării procesului tehnologic de fabricație este sinteza structurii dimensionale. În acest sens, este necesară nu numai analiza dimensională a unui proces tehnologic dezvoltat, ci și realizarea pe această bază a unei structuri dimensionale optime.

În modelele moderne de proiectare conceptuală sinteza de noi soluții tehnologice se bazează pe determinarea relațiilor dintre funcția tehnologiei în dezvoltare și structura acesteia de manifestare în condițiile date. Tehnologia trebuie să obțină o anumită funcționalitate în corespundere cu obiectivul formulat. Astfel, tehnologia determină compoziția elementelor structurale, care, pe de o parte, fiind asamblate prin conexiuni, constituie tehnologia propriu-zisă,

iar pe de altă parte, prin elementele sale structurale integrate, asigură performanță și funcționare (fig. 3.17) [128].

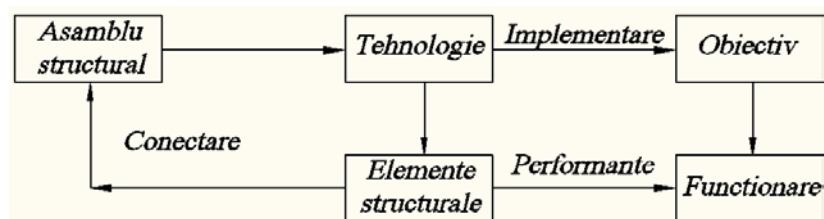


Fig. 3.17. Relația dintre funcție și structură la proiectarea tehnologică [128]

Fiecare tehnologie este creată pentru a atinge un obiectiv dat. Astfel, tehnologia trebuie să îndeplinească o serie de funcții și pentru aceasta trebuie să conțină mai multe elemente structurale sub formă de unități de proces ce se assemblează, formând o structură integră. În procesul de descompunere a tehnologiei se creează un arbore de elemente structurale ale acesteia care reprezintă compoziția tehnologiei. Pentru a obține structura tehnologiei, aceasta este considerată sistem, în care elementele structurale sunt interconectate pentru a asigura îndeplinirea în comun a acestor funcții [129].

În inginerie, sinteza este de obicei numită o procedură de proiectare, în urma căreia diferite elemente sunt combinate într-un singur întreg: un sistem, o mașină, un dispozitiv, un proces etc. În științele tehnice, extinderea conceptului de sinteză este împărțită în trei componente: sinteza proiectării, sinteza parametrilor și sinteza structurii. În teoria proiectării asistate de calculator, procedurile de acest tip sunt printre cele mai complexe și mai puțin studiate [130].

Este cunoscută noțiunea de funcție tehnologică, care se referă la capacitatea unui sistem tehnologic de a realiza o sarcină tehnologică în anumite condiții. Problema constă în dezvoltarea unei structuri de proces tehnologic care să îndeplinească funcția tehnologică dată și să corespundă unui set de condiții suplimentare. În acest fel, tehnologia sintetizată reprezintă inițial o cutie neagră. Intrările acesteia reprezintă impulsuri și efecte semnificative din mediu, iar ieșirile sunt conexiuni ale tehnologiei cu mediul. În rezultatul sintezei, cutia neagră se transformă în cutie albă, în care sunt definite elementele componente și conexiunile esențiale dintre ele [130]. Dezvoltarea acestui model de sinteză se poate face prin metoda grafurilor orientate, care este una dintre cele mai eficiente metode de sinteză structurală.

Sinteza structurală este un element metodologic central utilizat în sistemele de proiectare asistată de calculator. Pentru a genera structuri funcționale se recurge la căutarea de noi combinații dintre structurile elementare posibile. Principalele ipoteze în baza cărora o astfel de abordare se dovedește a fi eficace și eficientă sunt [130]:

- tehnologia proiectată are o structură dezvoltată cu un număr mare de elemente și legături;
- componentele tehnologiei din această clasă au abilități combinatorice bune, iar aceasta înseamnă că funcționarea lor se bazează pe aceleași legități și este posibilă combinarea diferitelor elemente în compozițiile altor obiecte alternative.

Piesa pentru care este proiectat procesul tehnologic de prelucrare mecanică se caracterizează prin structură dimensională constructivă care reflectă, în primul rând, funcționalitatea acesteia. Natura structurii dimensionale constructive este definită de proiectant care ține cont de asigurarea tehnologică cu mașini-unelte, dar nu în detrimentul funcționalității piesei.

La proiectarea tehnologică interacționează și formează un unic sistem structurile dimensionale constructive ale piesei și semifabricatului (de tip obiect) și structurile dimensionale de tip proces ale sistemului tehnologic CNC și ale tehnologiei proiectate (fig. 3.18).

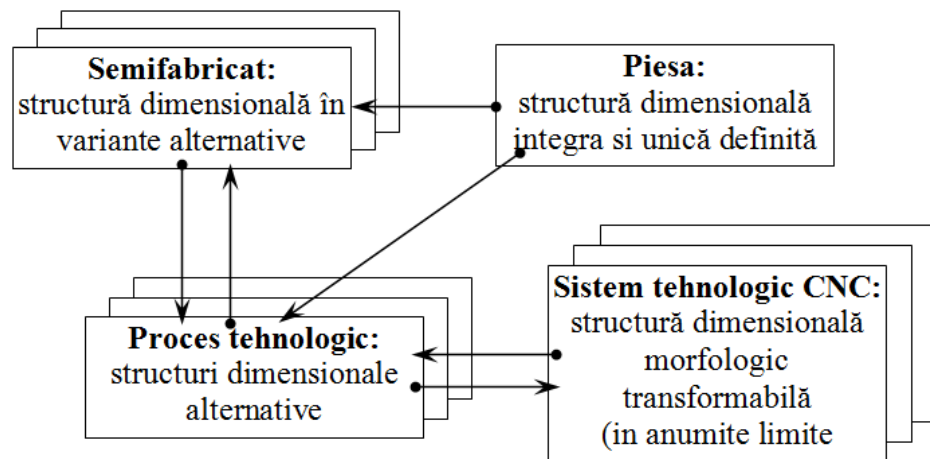


Fig. 3.18. Interacțiunea obiectelor-factori la proiectarea structurilor dimensionale tehnologice

Structura dimensională constructivă a piesei este unică și integră și reprezintă punctul de pornire al proiectării tehnologice. Aceasta nu este una de ales, dar poate să se modifice în limitele respectării funcționalității din necesitatea adaptării tehnologice, devenind din nou unică și integră. Pot, de asemenea, să fie operate schimbări echivalente în structura dimensională a piesei, astfel încât dimensiunile critice (participante la asamblare) să nu fie modificate în sensul preciziei.

Structura dimensională constructivă a semifabricatului are variante alternative. Variantele reprezentative se aleg astfel, încât trecerea de la o variantă la alta modifică precizia și se modifică numărul de faze tehnologice necesare prelucrării suprafețelor. Acest fapt schimbă substanțial rezultatele proiectării tehnologice. Dimensionarea semifabricatului se face în conformitate cu particularitățile metodelor de obținere a semifabricatelor, într-o variantă unele

dimensiunile pot fi prezente, iar în alta pot lipsi. În limitele acestor particularități nu există nici un motiv pentru a dimensiona semifabricatul altfel decât piesa. Așadar, structurile dimensionale constructive ale semifabricatelor în variante vor fi asemănătoare cu structura dimensională a piesei.

La mașinile-unelte CNC mișcările sculei pot fi programate în raport cu originea sistemului de coordonate (sistem de coordonate absolut) sau în raport cu o poziție special selectată drept origine - de obicei pe suprafața de bază a dispozitivului sau, după caz, a piesei (sistem de coordonate flotant), sau de fiecare dată în raport cu precedenta poziție a sculei (sistem de coordonate relativ sau incremental). Indiferent de sistemul de coordonate utilizat în programare, unitatea de control a mașinii-unelte îl va converti în sistemul de coordonate absolut. Cu alte cuvinte, o mașină-uneltă CNC folosește un sistem de măsurare fixat pe mașină pentru a controla mișcarea sculei. Aceasta înseamnă că valoarea nominală a mișcării sculei, după o serie de mișcări, este egală cu suma valorilor nominale ale mișcărilor.

Din cele relatate se constată că structura dimensională a sistemului tehnologic CNC este morfologic transformabilă (fig. 3.19). Distanțele dintre punctele de bază sunt programabile în coordonate absolute în raport cu o poziție considerată "zero" (1-3, 1-2, 1-4, 4-5, 4-6, 4-8, 13-11, 13-12) și în coordonate relative (5-7, 8-13, 12-10, 10-9). Pozițiile cu bifurcări (1, 4, 13) pot fi salvate în calitate de "zero flotant". În terminologia tehnologică, fiecare poziție specifică este asociată cu baza tehnologică de reglare, iar distanțele dintre poziții cu dimensiunile formate.

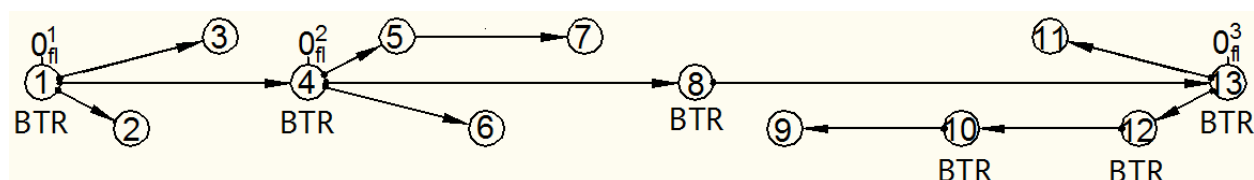


Fig. 3.19. Structura dimensională a sistemului tehnologic transformabilă morfologic

Astfel, structura dimensională a procesului tehnologic poate fi creată din elemente-noduri prezentate în structura dimensională CNC. Dacă considerăm cumularea elementelor structurale ale sistemului tehnologic în proces de funcționare, putem constata existența unei structuri dimensionale a sistemului tehnologic.

Deci, se poate trage concluzia că o structură dimensională integră a procesului tehnologic este optimă dacă este asemănătoare (similară) cu structurile dimensionale constructive ale piesei și semifabricatului și este asigurată pe deplin de o structură dimensională a sistemului tehnologic tot similară. În lucrarea [124], optimalitatea structurii dimensionale a procesului tehnologic a fost condiționată de similitudinea structurii dimensionale tehnologice cu structura dimensională constructivă a piesei, astfel încât fiecare dimensiune constructivă este formată exclusiv prin propria sa dimensiune tehnologică (fig. 3.20, a). Această structură tehnologică optimă (răspunde la întrebarea "cum?") trebuie să asigure o cât mai scurtă cale spre realizarea structurii

dimensionale constructive a piesei (răspunde la întrebarea "ce?"), pornind de la structura dimensională a semifabricatului (răspunde la întrebarea "din ce?"). Asigurarea tehnologică este condiționată de sistemul tehnologic CNC.

În figurile 3.20 și 3.21 sunt date exemple de sisteme dimensionale tehnologice (c) create, respectând principiul similitudinii cu sistemele dimensionale constructive ale piesei (b), semifabricatului (a) și cu sistemul dimensional de asigurare tehnologică (sistemului tehnologic) (d). Sistemele dimensionale sunt reprezentate prin grafuri neorientate (constructive ale piesei și semifabricatului) și orientate (tehnologice și de asigurare tehnologică CNC).

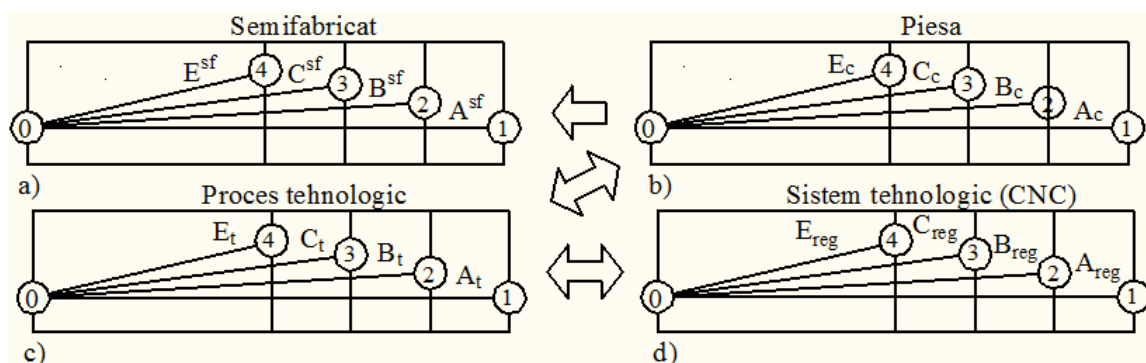


Fig. 3.20. Similitudinea structurilor dimensionale ale: a) semifabricatului; b) piesei; c) procesului tehnologic; d) sistemului tehnologic (variantă de dimensionare de la o bază unică constructivă, tehnologică și "zero CNC").

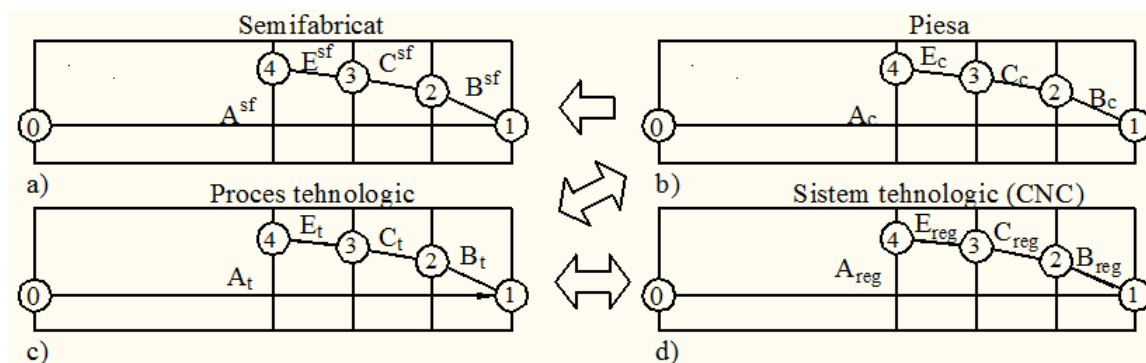


Fig. 3.21. Similitudinea structurilor dimensionale ale: a) semifabricatului; b) piesei; c) procesului tehnologic; d) sistemului tehnologic (variantă de dimensionare de la baze în lanț constructive, tehnologice și "zero CNC").

Sinteza structurii dimensionale tehnologice începe cu analiza structurii dimensionale constructive a piesei în formă de graf al relațiilor dimensionale liniare constructive (fig. 3.22). În baza acestui graf se elaborează graful relațiilor dimensionale tehnologice, respectând principiul similitudinii grafurilor, principiu ce asigură optimalitatea structurilor dimensionale tehnologice elementare (fig. 3.23). Prin această similitudine se formulează obiectivul de a obține o tehnologie optimă. Astfel, fiecare cotă constructivă este formată prin propria cotă tehnologică ($A_c \equiv A_t$, $B_c \equiv B_t$, $C_c \equiv C_t$, ...). Simultan, are loc verificarea suportului tehnologic, adică, dacă

graful relațiilor dimensionale tehnologice include structuri dimensionale ce pot fi create de către sistemul tehnologic.

Graful relațiilor dimensionale liniare tehnologice reflectă structura dimensională a tehnologiei proiectate, dar mai specifică și numărul de stări ale suprafeței prelucrate, care este egal cu numărul fazelor tehnologice realizate, având cota tehnologică respectivă în calitate de cotă-țintă. Așadar, se observă că la prelucrarea unei suprafețe oarecare se modifică toate dimensiunile date de la această suprafață, dar numai una dintre ele este cotă-țintă.

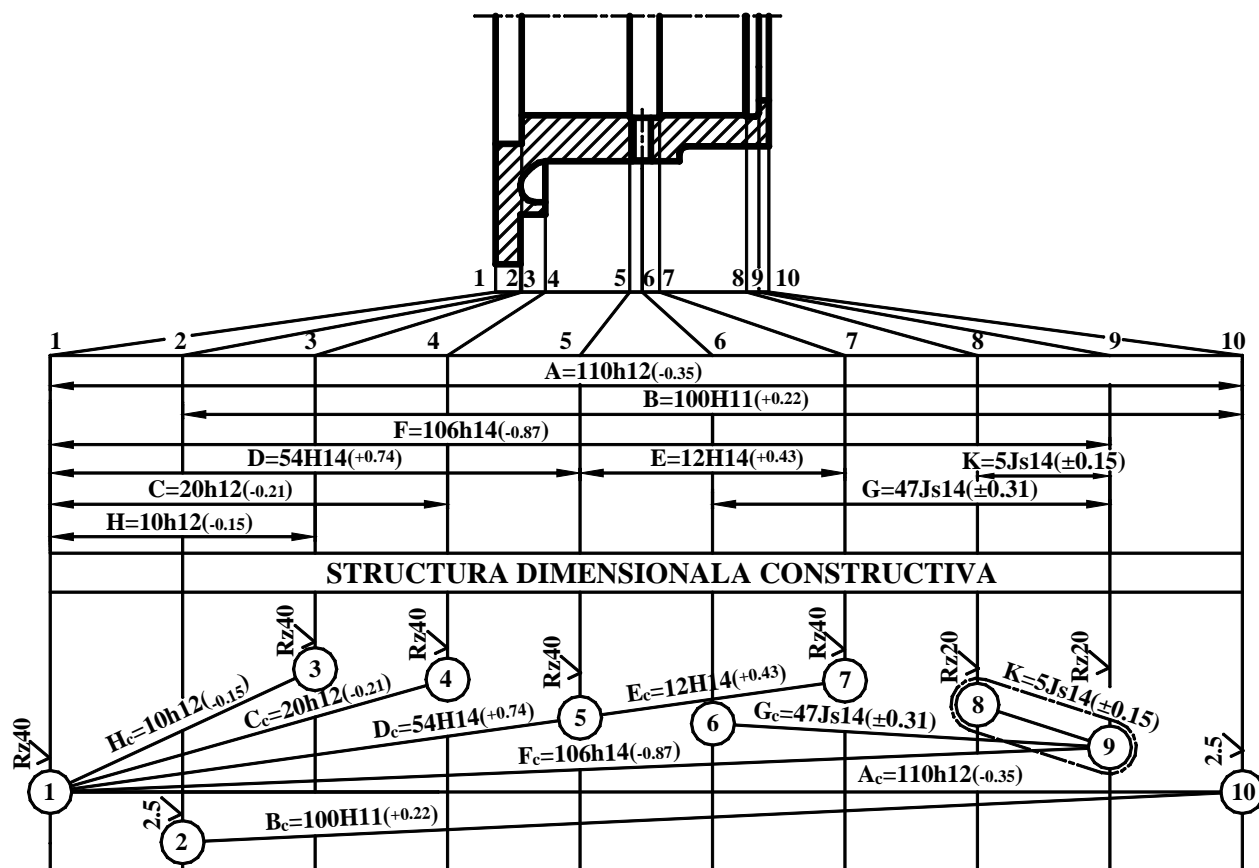


Fig. 3.22. Structura dimensională constructivă a piesei în formă de graf neorientat (studiul de caz 1)

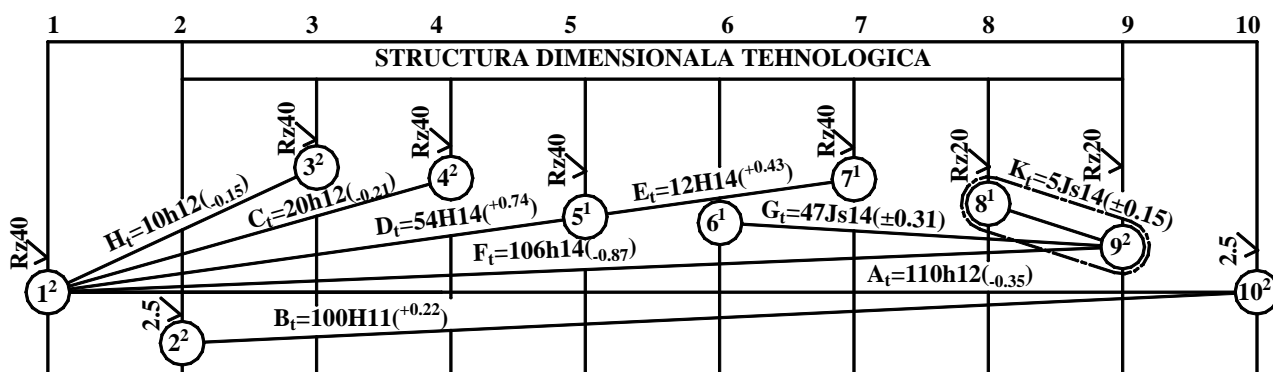


Fig. 3.23. Structura dimensională tehnologică în formă de graf neorientat similară celei constructive (studiul de caz 1)

Următoarea etapă este sinteza structurilor dimensionale tehnologice pe instalări. Instalarea este acea entitate a procesului tehnologic, la care se formează structurile dimensionale complexe din elemente primare, cum sunt arătate în figura 3.12. În cadrul instalărilor se stabilesc relațiile dintre dimensiunile tehnologice formate, toleranțele lor și toleranțele adaosurilor de prelucrare. Tot în cadrul instalărilor se manifestă mai stabil efectele benefice pentru precizie ale compensării erorilor. Structurile dimensionale ale instalărilor se pot "asambla" ca entități finite sau pot fi dezvoltate la alte instalări. În cazul considerat, în această lucrare cu suportul tehnologic al mașinilor-unelte CNC și a centrelor de prelucrare, cel puțin două instalări pot fi realizate pe aceeași mașină-unealtă, astfel încât "asamblarea" structurilor dimensionale formate se produce automat tehnic de către sistemul tehnologic (fără intervenție umană) cu o precizie înaltă.

Una dintre problemele principale ale instalării reprezintă dezvoltarea posibilelor scheme de orientare și fixare [119]. În graful relațiilor dimensionale tehnologice bazele tehnologice reprezintă un început de înlanțuire - bifurcare a cotelor tehnologice formate și asigurate de sistemul tehnologic CNC. Important este accesul fizic la suprafețele de prelucrat în cadrul instalării. Grafurile relațiilor dimensionale liniare constructive au capacitatea de a sugera cele mai corecte soluții în acest sens. Graful reprezentat ca exemplu în figura 3.22 are doi poli, 1 și 10, corelați prin dimensiunea A_c . Suprafețele 1 și 10 pot și trebuie utilizate ca elemente ale bazei de instalare cu acțiune pe direcția formării cotelor tehnologice. Evident, sunt necesare și alte elemente de orientare pentru formarea completului de orientare, care ar putea să nu fie univoc acceptabile.

În figura 3.24 sunt arătate grafurile relațiilor dimensionale liniare pentru două instalări cu divizarea lor pe grupe de dimensiuni formate prin faze tehnologice de precizie în ascendență. La prima instalare în calitate de element al bazei tehnologice de contact (BTC) este luată suprafața 10 în starea inițială 0 pe semifabricat (10^0). De la această bază se formează cota A_t^1 , apoi de la suprafața 1 în starea 1 (1^1), care devine bază tehnologică de reglare (BTR), se formează cotele tehnologice H_t^1 , C_t^1 și F_t^1 (fig. 3.24, a). În termenii CNC, poziția nominală a suprafeței 1^1 reprezintă un zero flotant. A doua grupă de cote tehnologice se formează în același regim, doar că se adaugă cotele tehnologice D_t^1 , E_t^1 și G_t^1 , care trebuie să fie formate în raport cu suprafața 1 definitiv prelucrată (1^2). Cota K_t^1 nu se formează prin reglare și este determinată de lățimea cuștitului de degajare.

Ordinea prelucrărilor este determinată de graf cu posibile variante alternative, una dintre ele putând fi după cum urmează:

Instalarea A:

$$BTC10^0 : A_t^1(1^1);$$

$$BTR1^1 : H_t^1(3^1), C_t^1(4^1), F_t^1(9^1);$$

$$BTC10^0 : A_t^2(1^2);$$

$$BTR1^2 : H_t^2(3^2), C_t^2(4^2), F_t^2(9^2, 8^1), G_t^1(6^1), D_t^1(5^1), E_t^1(7^1).$$

Instalarea B:

$$BTC1^2 : A_t^3(10^1);$$

$$BTR10^1 : B_t^1(2^1);$$

$$BTC1^2 : A_t^4(10^2);$$

$$BTR10^2 : B_t^2(2^2);$$

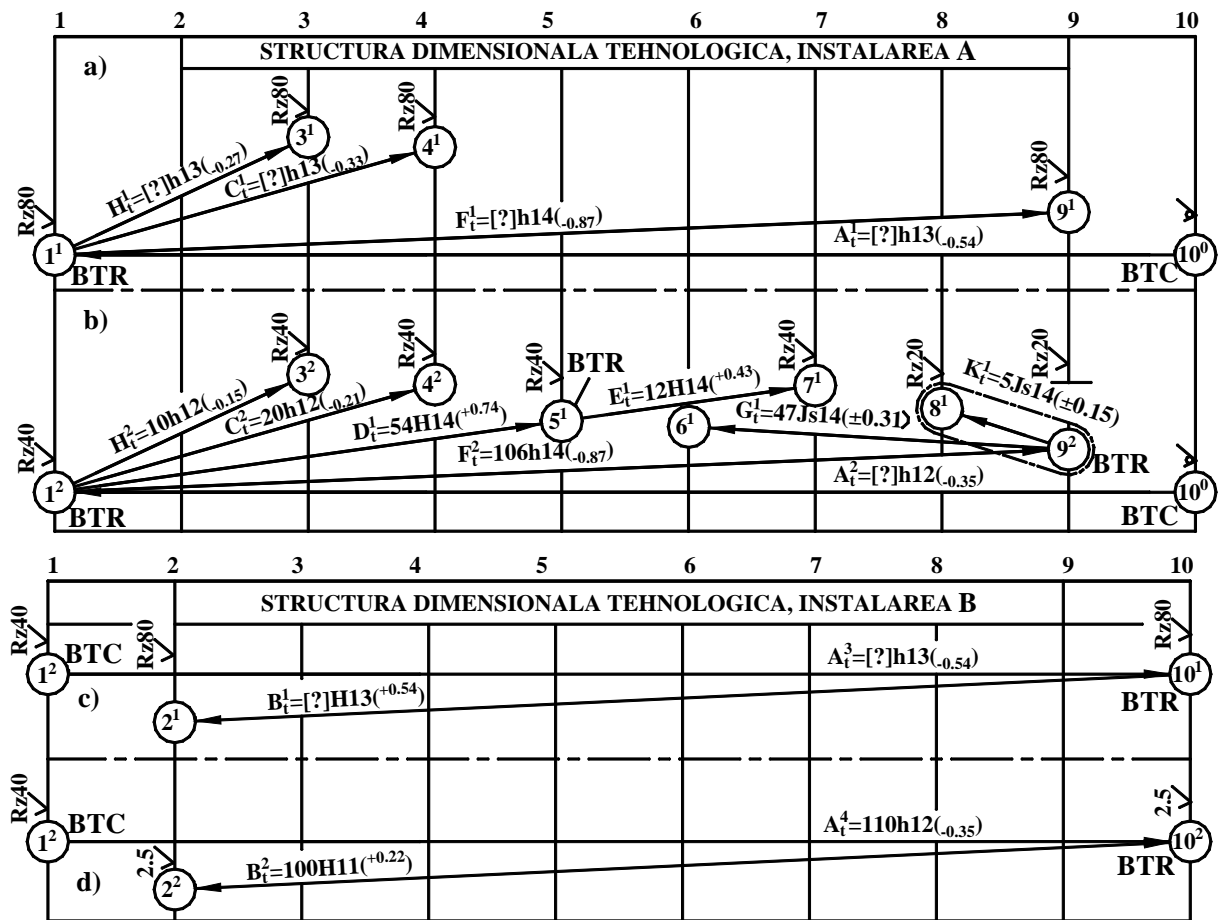


Fig. 3.24. Structuri dimensionale tehnologice în formă de grafuri orientate divizate pe instalări și grupe de faze tehnologice (studiul de caz 1)

Un tip aparte și specific de situații este dat în figura 3.25 și se caracterizează prin faptul că o cotă constructivă C_c este dată de la o suprafață 4 ce nu trebuie sau nu poate fi prelucrată mecanic până la o suprafață 1 prelucrată mecanic prin așchiere.

Precizia acestei cote poate fi suficient de joasă (exemplu: $C_c = 20Js15(\pm 0.42)$). Suprafața prelucrată mecanic din acest cuplu, deseori este de precizie înaltă și necesită nu numai

o singură prelucrare, participând la definirea preciziei de poziție reciprocă. Soluția tehnologică constă în utilizarea suprafeței ce nu necesită prelucrare mecanică în calitate de primă bază tehnologică. Astfel, această cotă devine primul element al structurii dimensionale tehnologice.

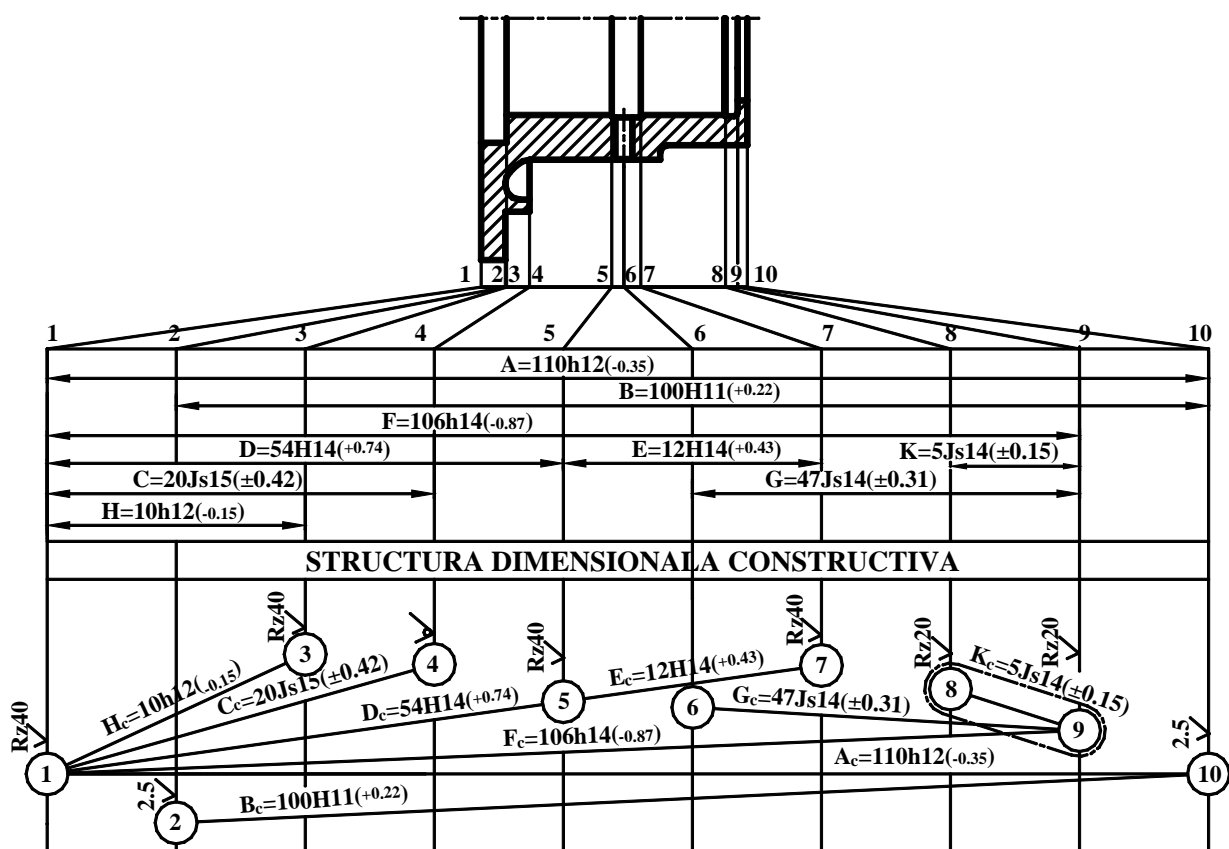


Fig. 3.25. Structura dimensională constructivă a piesei în formă de graf neorientat (studiul de caz 2)

Structura dimensională tehnologică similară celei constructive este dată în figura 3.26 și este asemănătoare cu cea din cazul 1 analizat (fig. 3.24), cu excepția cotei C_t definite altfel.

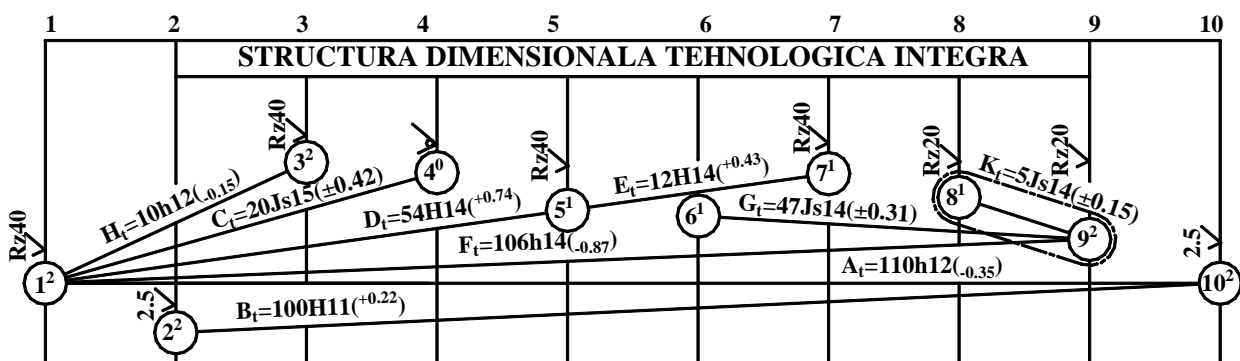


Fig. 3.26. Structura dimensională tehnologică în formă de graf neorientat similară celei constructive (studiul de caz 2)

Deosebiri majore se manifestă la instalarea A (fig. 3.27).

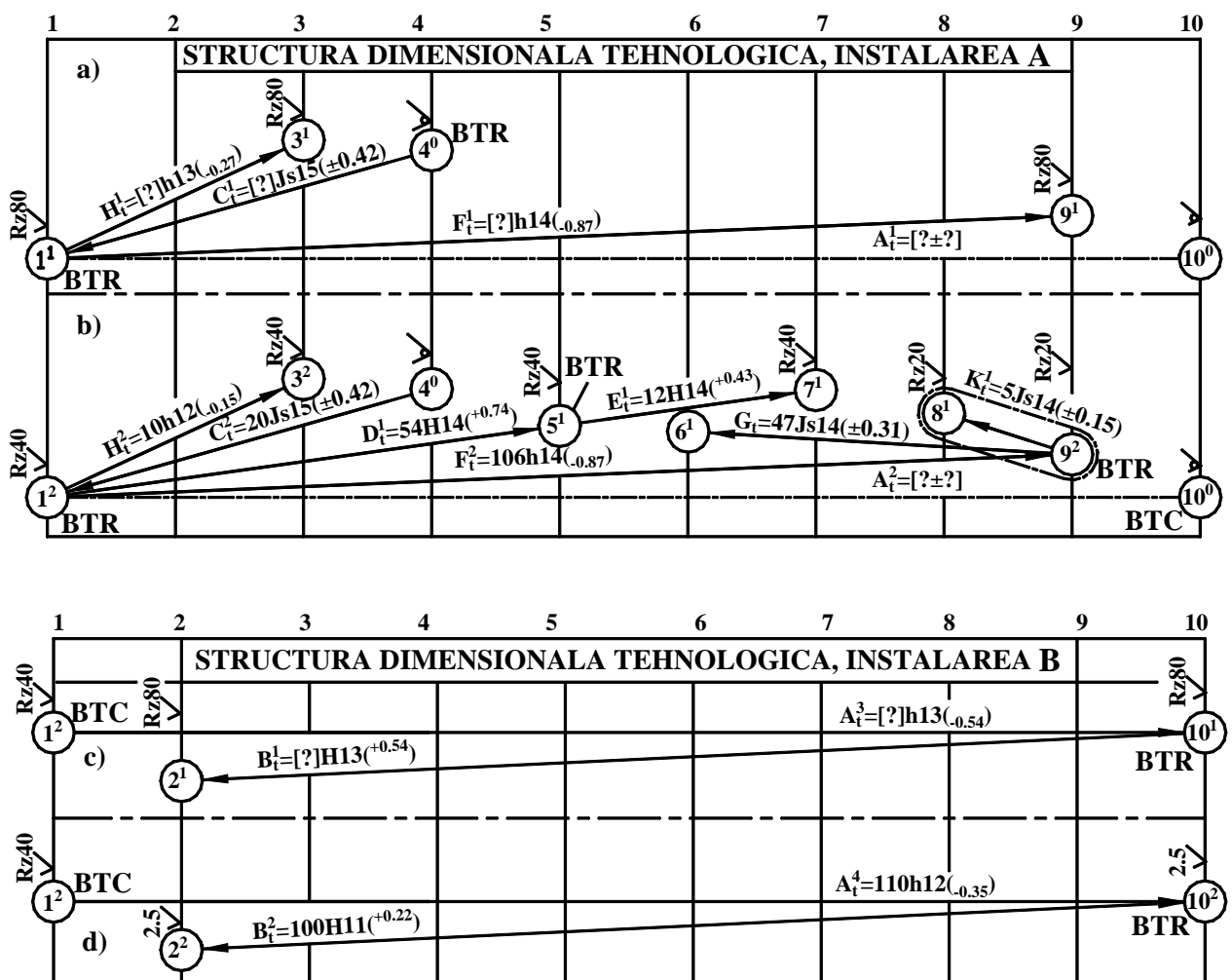


Fig. 3.27. Structuri dimensionale tehnologice în formă de grafuri orientate divizate pe instalări și grupe de faze tehnologice (studiul de caz 2)

Ordinea prelucrărilor este determinată de graf cu unica alternativă menționată mai sus după cum urmează:

Instalarea A:

$$BTR\ 4^0 : C_t^1(I^1);$$

$$BTR\ 1^1 : H_t^1(3^1), F_t^1(9^1);$$

$$BTR\ 4^0 : C_t^2(I^2);$$

$$BTR\ 1^2 : H_t^2(3^2), F_t^2(9^2, 8^1), G_t^1(6^1), D_t^1(5^1), E_t^1(7^1)$$

Instalarea B:

$$BTC\ 1^2 : A_t^3(10^1);$$

$$BTR\ 10^1 : B_t^1(2^1);$$

$$BTC\ 1^2 : A_t^4(10^2);$$

$$BTR\ 10^2 : B_t^2(2^2);$$

3.4. Concluzii

- Relațiile dimensionale tehnologice, inclusiv în toleranțe, se stabilesc în cadrul instalărilor tehnologice, fiind respectat principiul orientării invariante, dar și cu posibilitatea de respectare a principiului coincidenței bazelor prin alternarea bazelor tehnologice de reglare.
- În procesul unui act elementar tehnologic (faza tehnologică) are loc formarea unei cote tehnologice-țintă precizia căreia crește, dar simultan scade precizia cotelor asociate celei țintă, acest fapt fiind pus la baza evoluției preciziei cotelor în metodologia de analiză dimensională elaborată.
- O structură dimensională tehnologică elementară este optimală, dacă cota constructivă corespunzătoare este formată prin intermediul unei proprii și singure cote tehnologice, iar aceasta din urmă se transformă, prin eliminarea adaosurilor de prelucrare în câteva etape, din cotă pe semifabricat în cotă tehnologică finală.
- Optimizarea structurilor dimensionale tehnologice se poate realiza sistemic și în contextul integrat a patru sisteme structurale: semifabricat, piesă, proces tehnologic, sistem tehnologic.
- O structură dimensională integră a procesului tehnologic este optimală dacă este asemănătoare (similară) cu structurile dimensionale constructive ale piesei și semifabricatului (posibil în variante alternative) și este asigurată pe deplin de o structură dimensională a sistemului tehnologic tot similară prin transformări morfologice.
- Sinteza structurii dimensionale tehnologice începe cu constituirea structurii dimensionale constructive a piesei în formă de graf al relațiilor dimensionale liniare constructive, iar în baza acestuia se elaborează graful similar al relațiilor dimensionale tehnologice, fapt ce asigură optimalitatea structurii dimensionale tehnologice. Urmează divizarea grafului tehnologic în grafuri caracteristice instalărilor și grupelor de faze tehnologice.
- Proiectele proceselor tehnologice cu suportul mașinilor-unelte CNC și centrelor de prelucrare se optimizează prin minimizarea numărului de operații, numărului de instalări și a numărului de faze tehnologice ($N_{op} \rightarrow \min$, $N_{inst} \rightarrow \min$, $N_{f.t.} \rightarrow \min$), iar întreaga structură dimensională tehnologică se efectuează prin asamblarea de blocuri mari structurale, astfel încât parametrii de precizie ai mașinii-unelte sunt transferați cu o pondere maxim de mare direct piesei, fără influența omului.

4. STRUCTURI DIMENSIONALE TEHNOLOGICE OPTIME

4.1. Scenarii optime de prelucrare

Procesul tehnologic este conceput în formă de graf neorientat al relațiilor dimensionale tehnologice similar (asemănător) grafului relațiilor dimensionale constructive. Acest graf, de fapt, reflectă starea ultimelor cote tehnologice în sens cronologic. În realitate, în procesul tehnologic se formează cote tehnologice cu caracter intermediar, care sunt caracteristice seriilor de faze tehnologice. Apare necesitatea de a constitui structuri dimensionale intermediare reunite în instalări. Acest lucru se poate face în variante, fiecare dintre care reprezintă condiții specifice de asigurare a preciziei.

Din punct de vedere geometric, similitudinea garafurilor relațiilor dimensionale constructive și tehnologice reflectă optimalitatea structurală elementară – o cotă constructivă se formează printr-o serie de cote tehnologice proprii (fig. 2.2, a). Această serie include și adaosurile de prelucrare în calitate de elemente componente ale lanțurilor dimensionale. Adaosurile de prelucrare au caracter geometric (nominal, toleranța), structural și sunt elemente de legătură și de influență între diferite lanțuri dimensionale tehnologice. Or, la prelucrarea oricărei suprafețe în scopul formării unei cote tehnologice-țintă se modifică și alte cote formate anterior de la suprafața acum prelucrată.

De aici se poate trage concluzia că proprietățile unei structuri dimensionale formate din elemente dimensionale optime pot să nu fie optime datorită legăturilor neoptime stabilite.

Un al doilea moment ce trebuie luat în considerare este faptul că adaosul de prelucrare are și caracter fizico-tehnic parametric și reprezintă adâncimea de așchiere cu influențe asupra procesului. În acest ultim sens, adaosul de prelucrare reprezintă o restricție valorică. Amintim că așchiera la viteze mari se face în condițiile unor secțiuni de așchii constante ca mărime, adică adâncimea de așchiere și variația acesteia sunt limitate.

În continuare vom analiza câteva variante de constituire a structurilor dimensionale tehnologice pe instalări și grupe de faze tehnologice pentru identificarea toleranțelor cotelor tehnologice și a adaosurilor de prelucrare conform metotologiei elaborate anterior cu și fără luarea în considerare a efectelor de compensare a erorilor [112, 113, 114, 115, 116].

În figura 4.1 sunt date două structuri dimensionale constructive liniare pentru care sunt constituite grafurile relațiilor dimensionale constructive și similare acestora grafurile relațiilor dimensionale tehnologice. Structurile constructive se deosebesc prin faptul că în prima dintre acestea cotele tehnologice formează lanțuri continue din două elemente cum ar fi: $B_t - C_t$, $B_t - D_t$ și $B_t - A_t$, iar în cea de a doua structură unul dintre lanțuri are trei elemente $B_t - C_t - D_t$

și altul are două $B_i - A_i$. În baza aceluiași graf neorientat al relațiilor dimensionale tehnologice (fig. 4.1, a, d) pot fi utilizate două scenarii diferite pentru a constitui grafurile relațiilor dimensionale tehnologice pe instalări.

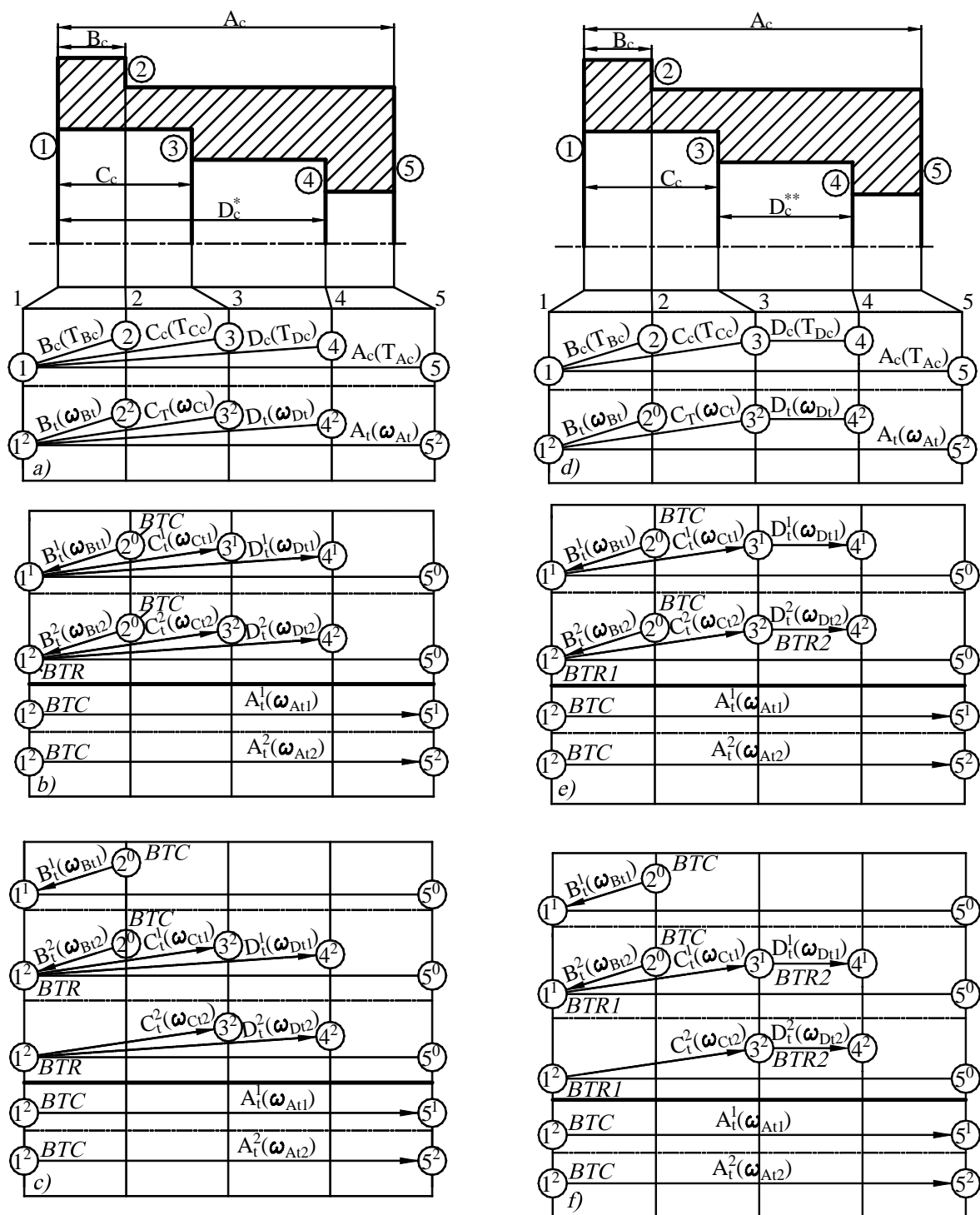


Fig. 4.1. Elaborarea planului de formare a cotelor tehnologice pentru două variante de structuri dimensionale liniare constructive a) și d); două scenarii de prelucrare: succesiv - toate cotele tehnologice în limitele instalării b) și e); inițial definitiv cota tehnologică B_i^2 , ulterior restul cotelor tehnologice în limitele instalării c) și f).

Prima dintre acestea prevede formarea cotelor tehnologice la fiecare dintre cele două etape de prelucrări conform lanțurilor $B_t - C_t$, $B_t - D_t$, $B_t - A_t$ sau $B_t - C_t - D_t$, $B_t - A_t$ (fig. 4.1, b, c). Formal, scenariul poate fi exprimat prin seria de relații-instrucțiuni:

$$\begin{aligned} BTC\ 2^0 &: B_t^1(1^1); \\ BTR\ 1^1 &: C_t^1(3^1), D_t^1(4^1); \\ BTC\ 2^0 &: B_t^2(1^2); \\ BTR\ 1^2 &: C_t^2(3^2), D_t^2(4^2); \\ BTC\ 1^2 &: A_t^1(5^1); \\ BTC\ 1^2 &: A_t^2(5^2); \end{aligned}$$

Al doilea scenariu prevede formarea definitivă a cotei tehnologice B_t^2 , adică prelucrarea definitivă a suprafeței 1 și numai după aceasta să înceapă formarea celorlalte cote tehnologice conform lanțurilor menționate (fig. 4.1, e, f). Scenariul poate fi exprimat prin seria de relații-instrucțiuni:

$$\begin{aligned} BTC\ 2^0 &: B_t^1(1^1); \\ BTC\ 2^0 &: B_t^2(1^2); \\ BTR\ 1^2 &: C_t^1(3^1), D_t^1(4^1); \\ BTR\ 1^2 &: C_t^2(3^2), D_t^2(4^2); \\ BTC\ 1^2 &: A_t^1(5^1); \\ BTC\ 1^2 &: A_t^2(5^2). \end{aligned}$$

Pentru a avea și caracteristici valorice, pentru comparație se consideră exemplul:

- piesele au dimensiunile și toleranțele finale la treapta de precizie IT11: $A_c = 100_{-0.22}$, $B_c = 20_{-0.13}$, $C_c = 40_{+0.162}$, $D_c^* = 80_{+0.19}$ sau $D_c^{**} = 40_{+0.162}$;
- semifabricatele sunt turnate la clasa de precizie 9 (aproximativ IT16), sunt dimensionate similar dimensionării pieselor și au toleranțele: $\omega_{A_0} = 2.0$, $\omega_{B_0} = 1.2$, $\omega_{C_0} = 1.4$, $\omega_{D_0^*} = 1.8$ sau $\omega_{D_0^{**}} = 1.4$;
- precizia cotelor tehnologice este asigurată prin două prelucrări, inițial la treapta de precizie IT13 și în final – la IT11.

Rezolvarea lanțurilor dimensionale tehnologice în versiunile de maxim și minim și de maxim și minim cu compensarea erorilor în toleranțe cu referire la cotele tehnologice în schimbare și adaosurile de prelucrare sunt date în continuare. Pentru fiecare parametru analizat (toleranța cotei tehnologice, toleranța adaosului de prelucrare) sunt aduse date obținute prin ambele metode.

Structura toleranțelor cotelor tehnologice și a adaosurilor de prelucrare:

• **Studiu de caz 1 conform figurii 4.1, b:**

$$B^0(\omega_{B^0}) \rightarrow B^1(\omega_{B^1}) \rightarrow B^2(\omega_{B^2});$$

$$C^0(\omega_{C^0}) \rightarrow C^1(\omega_{C^0} + \omega_{B^0} + \omega_{B^1}) \rightarrow C^2(\omega_{C^2}) \rightarrow C^3(\omega_{C^2} + \omega_{B^1} + \omega_{B^2}) \rightarrow C^4(\omega_{C^4});$$

$$C^0(\omega_{C^0}) \rightarrow C^1(\omega_{C^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^1}) \rightarrow C^2(\omega_{C^2}) \rightarrow C^3(\omega_{C^2} + \omega_{B^1} - \omega_{B^2}) \rightarrow C^4(\omega_{C^4});$$

$$D^0(\omega_{D^0}) \rightarrow D^1(\omega_{D^0} + \omega_{B^0} + \omega_{B^1}) \rightarrow D^2(\omega_{D^2}) \rightarrow D^3(\omega_{D^2} + \omega_{B^1} + \omega_{B^2}) \rightarrow D^4(\omega_{D^4});$$

$$D^0(\omega_{D^0}) \rightarrow D^1(\omega_{D^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^1}) \rightarrow D^2(\omega_{D^2}) \rightarrow D^3(\omega_{D^2} + \omega_{B^1} - \omega_{B^2}) \rightarrow D^4(\omega_{D^4});$$

$$A^0(\omega_{A^0}) \rightarrow A^1(\omega_{A^0} + \omega_{B^0} + \omega_{B^1}) \rightarrow A^2(\omega_{A^0} + \omega_{B^0} + \omega_{B^1} + \omega_{B^2}) \rightarrow A^3(\omega_{A^3}) \rightarrow A^4(\omega_{A^4});$$

$$A^0(\omega_{A^0}) \rightarrow A^1(\omega_{A^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^1}) \rightarrow A^2(\omega_{A^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^2}) \rightarrow A^3(\omega_{A^3}) \rightarrow A^4(\omega_{A^4});$$

$$Ad_1^1(\omega_{B^0} + \omega_{B^1}); \quad Ad_1^2(\omega_{B^1} + \omega_{B^2});$$

$$Ad_1^1(\omega_{B^0} - \omega_{B^1}); \quad Ad_1^2(\omega_{B^1} - \omega_{B^2});$$

$$Ad_3^1(\omega_{C^0} + \omega_{B^0} + \omega_{B^1} + \omega_{C^2}); \quad Ad_3^2(\omega_{C^2} + \omega_{B^1} + \omega_{B^2} + \omega_{C^4});$$

$$Ad_3^1(\omega_{C^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^1} - \omega_{C^2}); \quad Ad_3^2(\omega_{C^2} + \omega_{B^1} - \omega_{B^2} - \omega_{C^4});$$

$$Ad_4^1(\omega_{D^0} + \omega_{B^0} + \omega_{B^1} + \omega_{D^2}); \quad Ad_4^2(\omega_{D^2} + \omega_{B^1} + \omega_{B^2} + \omega_{D^4});$$

$$Ad_4^1(\omega_{D^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^1} - \omega_{D^2}); \quad Ad_4^2(\omega_{D^2} + \omega_{B^1} - \omega_{B^2} - \omega_{D^4});$$

$$Ad_5^1(\omega_{A^0} + \omega_{B^0} + 2 \cdot \omega_{B^1} + \omega_{B^2} + \omega_{A^3}); \quad Ad_5^2(\omega_{A^3} + \omega_{A^4});$$

$$Ad_5^1(\omega_{A^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^2} - \omega_{A^3}); \quad Ad_5^2(\omega_{A^3} - \omega_{A^4});$$

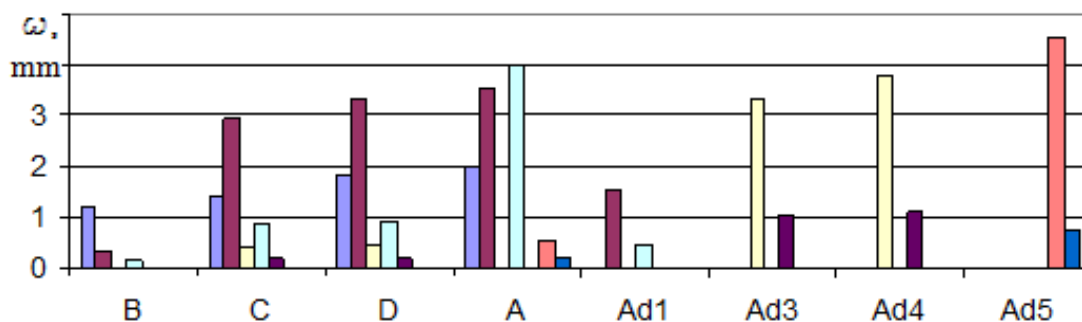


Fig. 4.2. Evoluția toleranțelor cotelor tehnologice și adaosurilor de prelucrare. Metoda de maxim și minim (studiul de caz 1).

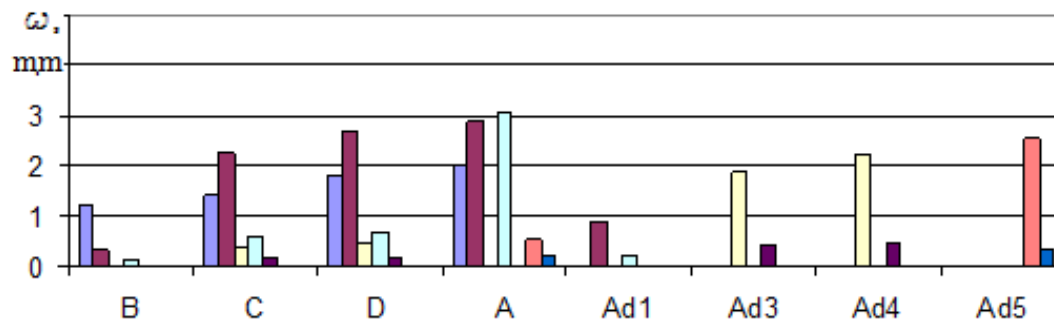


Fig. 4.3. Evoluția toleranțelor cotelor tehnologice și adaosurilor de prelucrare. Metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor (studiul de caz 1).

• **Studiu de caz 2 conform figurii 4.1, c:**

$$B^0(\omega_{B^0}) \rightarrow B^1(\omega_{B^1}) \rightarrow B^2(\omega_{B^2});$$

$$C^0(\omega_{C^0}) \rightarrow C^1(\omega_{C^0} + \omega_{B^0} + \omega_{B^1}) \rightarrow C^2(\omega_{C^0} + \omega_{B^0} + 2 \cdot \omega_{B^1} + \omega_{B^2}) \rightarrow C^3(\omega_{C^3}) \rightarrow C^4(\omega_{C^4});$$

$$C^0(\omega_{C^0}) \rightarrow C^1(\omega_{C^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^1}) \rightarrow C^2(\omega_{C^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^2}) \rightarrow C^3(\omega_{C^3}) \rightarrow C^4(\omega_{C^4});$$

$$D^0(\omega_{D^0}) \rightarrow D^1(\omega_{D^0} + \omega_{B^0} + \omega_{B^1}) \rightarrow D^2(\omega_{D^0} + \omega_{B^0} + 2 \cdot \omega_{B^1} + \omega_{B^2}) \rightarrow D^3(\omega_{D^3}) \rightarrow D^4(\omega_{D^4});$$

$$D^0(\omega_{D^0}) \rightarrow D^1(\omega_{D^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^1}) \rightarrow D^2(\omega_{D^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^2}) \rightarrow D^3(\omega_{D^3}) \rightarrow D^4(\omega_{D^4});$$

$$A^0(\omega_{A^0}) \rightarrow A^1(\omega_{A^0} + \omega_{B^0} + \omega_{B^1}) \rightarrow A^2(\omega_{A^0} + \omega_{B^0} + 2 \cdot \omega_{B^1} + \omega_{B^2}) \rightarrow A^3(\omega_{A^3}) \rightarrow A^4(\omega_{A^4});$$

$$A^0(\omega_{A^0}) \rightarrow A^1(\omega_{A^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^1}) \rightarrow A^2(\omega_{A^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^2}) \rightarrow A^3(\omega_{A^3}) \rightarrow A^4(\omega_{A^4});$$

$$Ad_1^1(\omega_{B^0} + \omega_{B^1}); \quad Ad_1^2(\omega_{B^1} + \omega_{B^2});$$

$$Ad_1^1(\omega_{B^0} - \omega_{B^1}); \quad Ad_1^2(\omega_{B^1} - \omega_{B^2});$$

$$Ad_3^1(\omega_{C^0} + \omega_{B^0} + 2 \cdot \omega_{B^1} + \omega_{B^2} + \omega_{C^3}); \quad Ad_3^2(\omega_{C^3} + \omega_{C^4});$$

$$Ad_3^1(\omega_{C^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^2} - \omega_{C^3}); \quad Ad_3^2(\omega_{C^3} - \omega_{C^4});$$

$$Ad_4^1(\omega_{D^0} + \omega_{B^0} + 2 \cdot \omega_{B^1} + \omega_{B^2} + \omega_{D^3}); \quad Ad_4^2(\omega_{D^3} + \omega_{D^4});$$

$$Ad_4^1(\omega_{D^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^2} - \omega_{D^3}); \quad Ad_4^2(\omega_{D^3} - \omega_{D^4});$$

$$Ad_5^1(\omega_{A^0} + \omega_{B^0} + 2 \cdot \omega_{B^1} + \omega_{B^2} + \omega_{A^3}); \quad Ad_5^2(\omega_{A^3} + \omega_{A^4});$$

$$Ad_5^1(\omega_{A^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^2} - \omega_{A^3}); \quad Ad_5^2(\omega_{A^3} - \omega_{A^4});$$

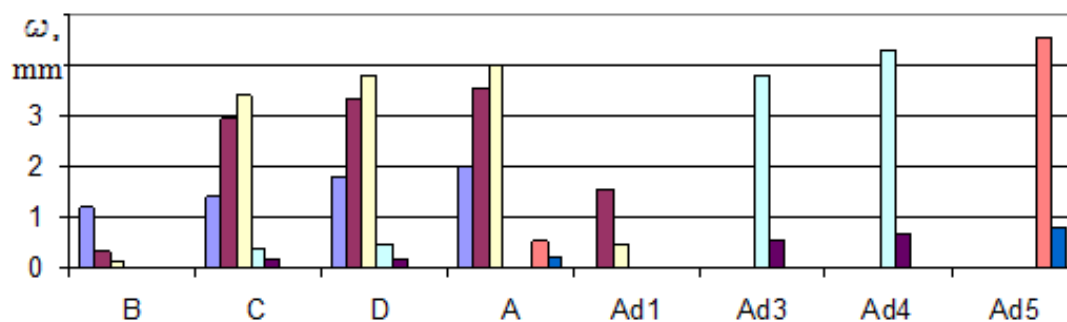


Fig. 4.4. Evoluția toleranțelor cotelor tehnologice și adaosurilor de prelucrare. Metoda de maxim și minim (studiul de caz 2).

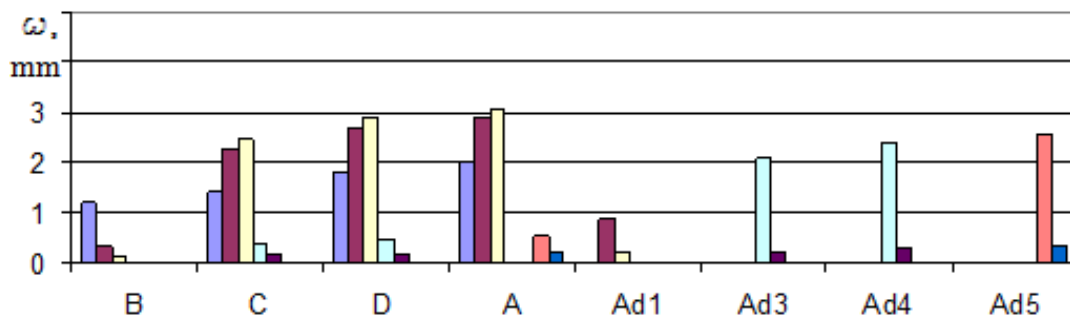


Fig. 4.5. Evoluția toleranțelor cotelor tehnologice și adaosurilor de prelucrare. Metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor (studiul de caz 2).

• **Studiu de caz 3 conform figurii 4.1, d:**

$$B^0(\omega_{B^0}) \rightarrow B^1(\omega_{B^1}) \rightarrow B^2(\omega_{B^2});$$

$$C^0(\omega_{C^0}) \rightarrow C^1(\omega_{C^0} + \omega_{B^0} + \omega_{B^1}) \rightarrow C^2(\omega_{C^2}) \rightarrow C^3(\omega_{C^2} + \omega_{B^1} + \omega_{B^2}) \rightarrow C^4(\omega_{C^4});$$

$$C^0(\omega_{C^0}) \rightarrow C^1(\omega_{C^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^1}) \rightarrow C^2(\omega_{C^2}) \rightarrow C^3(\omega_{C^2} + \omega_{B^1} - \omega_{B^2}) \rightarrow C^4(\omega_{C^4});$$

$$D^0(\omega_{D^0}) \rightarrow D^1(\omega_{D^0} + \omega_{C^0} + \omega_{B^0} + \omega_{B^1} + \omega_{C^2}) \rightarrow D^2(\omega_{D^2}) \rightarrow$$

$$\rightarrow D^3(\omega_{D^2} + \omega_{C^2} + \omega_{B^1} + \omega_{B^2} + \omega_{C^4}) \rightarrow D^4(\omega_{D^4});$$

$$D^0(\omega_{D^0}) \rightarrow D^1(\omega_{D^0} + \omega_{C^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^1} - \omega_{C^2}) \rightarrow D^2(\omega_{D^2}) \rightarrow$$

$$\rightarrow D^3(\omega_{D^2} + \omega_{C^2} + \omega_{B^1} - \omega_{B^2} - \omega_{C^4}) \rightarrow D^4(\omega_{D^4});$$

$$A^0(\omega_{A^0}) \rightarrow A^1(\omega_{A^0} + \omega_{B^0} + \omega_{B^1}) \rightarrow A^2(\omega_{A^0} + \omega_{B^0} + 2 \cdot \omega_{B^1} + \omega_{B^2}) \rightarrow A^3(\omega_{A^3}) \rightarrow A^4(\omega_{A^4});$$

$$A^0(\omega_{A^0}) \rightarrow A^1(\omega_{A^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^1}) \rightarrow A^2(\omega_{A^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^2}) \rightarrow A^3(\omega_{A^3}) \rightarrow A^4(\omega_{A^4});$$

$$Ad_1^1(\omega_{B^0} + \omega_{B^1}); \quad Ad_1^2(\omega_{B^1} + \omega_{B^2});$$

$$Ad_1^1(\omega_{B^0} - \omega_{B^1}); \quad Ad_1^2(\omega_{B^1} - \omega_{B^2});$$

$$Ad_1^1(\omega_{B^0} + \omega_{B^1}); \quad Ad_1^2(\omega_{B^1} + \omega_{B^2});$$

$$Ad_1^1(\omega_{B^0} - \omega_{B^1}); \quad Ad_1^2(\omega_{B^1} - \omega_{B^2});$$

$$Ad_3^1(\omega_{C^0} + \omega_{B^0} + \omega_{B^1} + \omega_{C^2}); \quad Ad_3^2(\omega_{C^2} + \omega_{B^1} + \omega_{B^2} + \omega_{C^4});$$

$$Ad_3^1(\omega_{C^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^2} - \omega_{C^3}); \quad Ad_3^2(\omega_{C^2} + \omega_{B^1} - \omega_{B^2} - \omega_{C^4});$$

$$Ad_4^1(\omega_{D^0} + \omega_{C^0} + \omega_{B^0} + \omega_{B^1} + \omega_{C^2} + \omega_{D^2}); \quad Ad_4^2(\omega_{D^2} + \omega_{C^2} + \omega_{B^1} + \omega_{B^2} + \omega_{C^4} + \omega_{D^4});$$

$$Ad_4^1(\omega_{D^0} + \omega_{C^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^1} - \omega_{C^2} - \omega_{D^2}); \quad Ad_4^2(\omega_{D^2} + \omega_{C^2} + \omega_{B^1} - \omega_{B^2} - \omega_{C^4} - \omega_{D^4});$$

$$Ad_5^1(\omega_{A^0} + \omega_{B^0} + 2 \cdot \omega_{B^1} + \omega_{B^2} + \omega_{A^3}); \quad Ad_5^2(\omega_{A^3} + \omega_{A^4});$$

$$Ad_5^1(\omega_{A^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^2} - \omega_{A^3}); \quad Ad_5^2(\omega_{A^3} - \omega_{A^4});$$

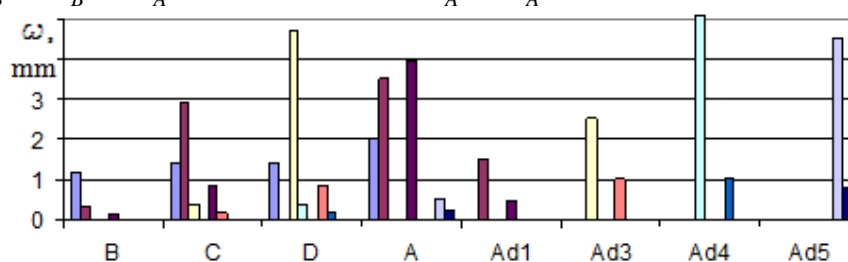


Fig. 4.6. Evoluția toleranțelor cotelor tehnologice și adaosurilor de prelucrare. Metoda de maxim și minim (studiul de caz 3).

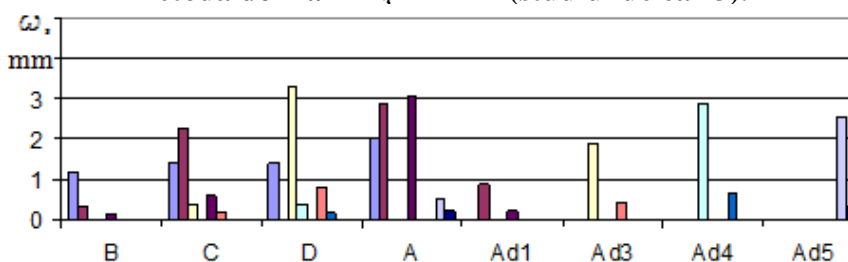


Fig. 4.7. Evoluția toleranțelor cotelor tehnologice și adaosurilor de prelucrare. Metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor (studiul de caz 3).

• **Studiu de caz 4 conform figurii 4.1, f:**

$$B^0(\omega_{B^0}) \rightarrow B^1(\omega_{B^1}) \rightarrow B^2(\omega_{B^2});$$

$$C^0(\omega_{C^0}) \rightarrow C^1(\omega_{C^0} + \omega_{B^0} + \omega_{B^1}) \rightarrow C^2(\omega_{C^0} + \omega_{B^0} + 2 \cdot \omega_{B^1} + \omega_{B^2}) \rightarrow C^3(\omega_{C^3}) \rightarrow C^4(\omega_{C^4});$$

$$C^0(\omega_{C^0}) \rightarrow C^1(\omega_{C^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^1}) \rightarrow C^2(\omega_{C^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^2}) \rightarrow C^3(\omega_{C^3}) \rightarrow C^4(\omega_{C^4});$$

$$D^0(\omega_{D^0}) \rightarrow D^1(\omega_{D^0} + \omega_{C^0} + \omega_{B^0} + 2 \cdot \omega_{B^1} + \omega_{B^2} + \omega_{C^3}) \rightarrow D^2(\omega_{D^2}) \rightarrow \\ \rightarrow D^3(\omega_{D^2} + \omega_{C^3} + \omega_{C^4}) \rightarrow D^4(\omega_{D^4});$$

$$D^0(\omega_{D^0}) \rightarrow D^1(\omega_{D^0} + \omega_{C^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^2} - \omega_{C^3}) \rightarrow D^2(\omega_{D^2}) \rightarrow \\ \rightarrow D^3(\omega_{D^2} + \omega_{C^3} - \omega_{C^4}) \rightarrow D^4(\omega_{D^4});$$

$$A^0(\omega_{A^0}) \rightarrow A^1(\omega_{A^0} + \omega_{B^0} + \omega_{B^1}) \rightarrow A^2(\omega_{A^0} + \omega_{B^0} + 2 \cdot \omega_{B^1} + \omega_{B^2}) \rightarrow A^3(\omega_{A^3}) \rightarrow A^4(\omega_{A^4});$$

$$A^0(\omega_{A^0}) \rightarrow A^1(\omega_{A^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^1}) \rightarrow A^2(\omega_{A^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^2}) \rightarrow A^3(\omega_{A^3}) \rightarrow A^4(\omega_{A^4});$$

$$Ad_1^1(\omega_{B^0} + \omega_{B^1}); \quad Ad_1^2(\omega_{B^1} + \omega_{B^2});$$

$$Ad_1^1(\omega_{B^0} - \omega_{B^1}); \quad Ad_1^2(\omega_{B^1} - \omega_{B^2});$$

$$Ad_3^1(\omega_{C^0} + \omega_{B^0} + 2 \cdot \omega_{B^1} + \omega_{B^2} + \omega_{C^3}); \quad Ad_3^2(\omega_{C^3} + \omega_{C^4});$$

$$Ad_3^1(\omega_{C^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^2} - \omega_{C^3}); \quad Ad_3^2(\omega_{C^3} - \omega_{C^4});$$

$$Ad_4^1(\omega_{D^0} + \omega_{C^0} + \omega_{B^0} + 2 \cdot \omega_{B^1} + \omega_{B^2} + \omega_{C^3} + \omega_{D^2}); \quad Ad_4^2(\omega_{D^2} + \omega_{C^3} + \omega_{C^4} + \omega_{D^4});$$

$$Ad_4^1(\omega_{D^0} + \omega_{C^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^2} - \omega_{C^3} - \omega_{D^2}); \quad Ad_4^2(\omega_{D^2} + \omega_{C^3} - \omega_{C^4} - \omega_{D^4});$$

$$Ad_5^1(\omega_{A^0} + \omega_{B^0} + 2 \cdot \omega_{B^1} + \omega_{B^2} + \omega_{A^3}); \quad Ad_5^2(\omega_{A^3} + \omega_{A^4});$$

$$Ad_5^1(\omega_{A^0} + \omega_{B^0} - \omega_{B^2} - \omega_{A^3}); \quad Ad_5^2(\omega_{A^3} - \omega_{A^4});$$

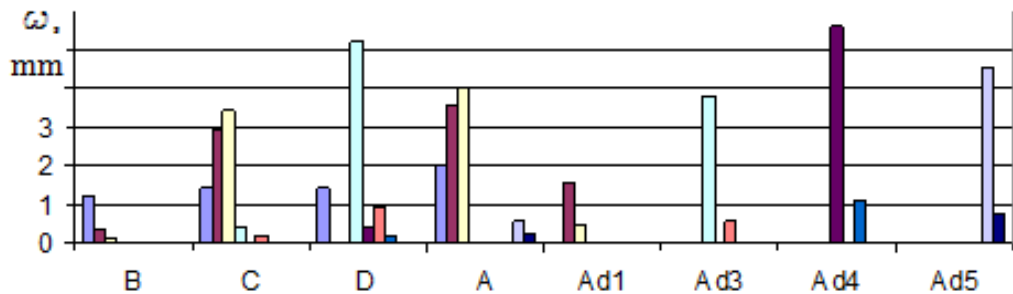


Fig. 4.8. Evoluția toleranțelor cotelor tehnologice și adaosurilor de prelucrare. Metoda de maxim și minim (studiul de caz 4).

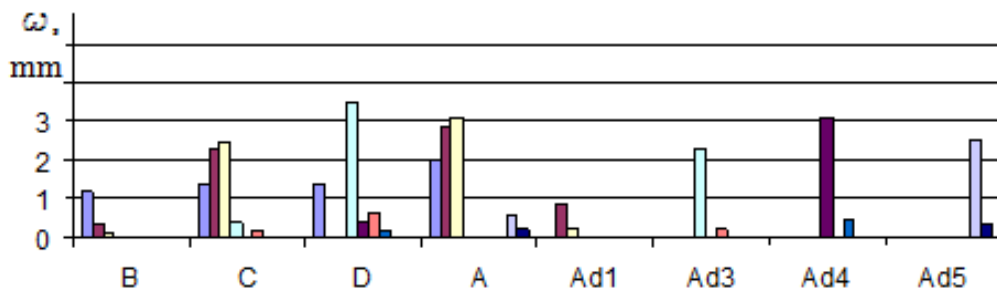


Fig. 4.9. Evoluția toleranțelor cotelor tehnologice și adaosurilor de prelucrare. Metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor (studiul de caz 4).

Utilizarea de metodei de maxim și minim cu compensarea erorilor schimbă substanțial structura toleranțelor cotelor tehnologice intermediare și a adaosurilor de prelucrare. Detaliat acest fapt se observă în datele cazurilor 1, 2, 3 și 4. Compararea rezultatelor numerice evaluate prin aceste două metode este dată în figurile 4.2 - 4.9 pentru fiecare caz. Metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor estimează toleranțele adaosurilor de prelucrare la valori substanțial mai mici decât prin metoda de maxim și minim tradițională. Altfel spus, condițiile fizico-tehnice de formare a cotelor tehnologice (asigurarea tehnologică) sunt estimate la nivel mai favorabil. În limitele exemplului numeric declarat mai devreme, condițiile similare pentru adaosurile de prelucrare sunt estimate prin metoda de maxim și minim cu semifabricat turnat la clasa 9t de precizie și prin metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor cu semifabricat turnat la clasa 9 de precizie, adică mai puțin precis cu o clasă (fig. 4.10).

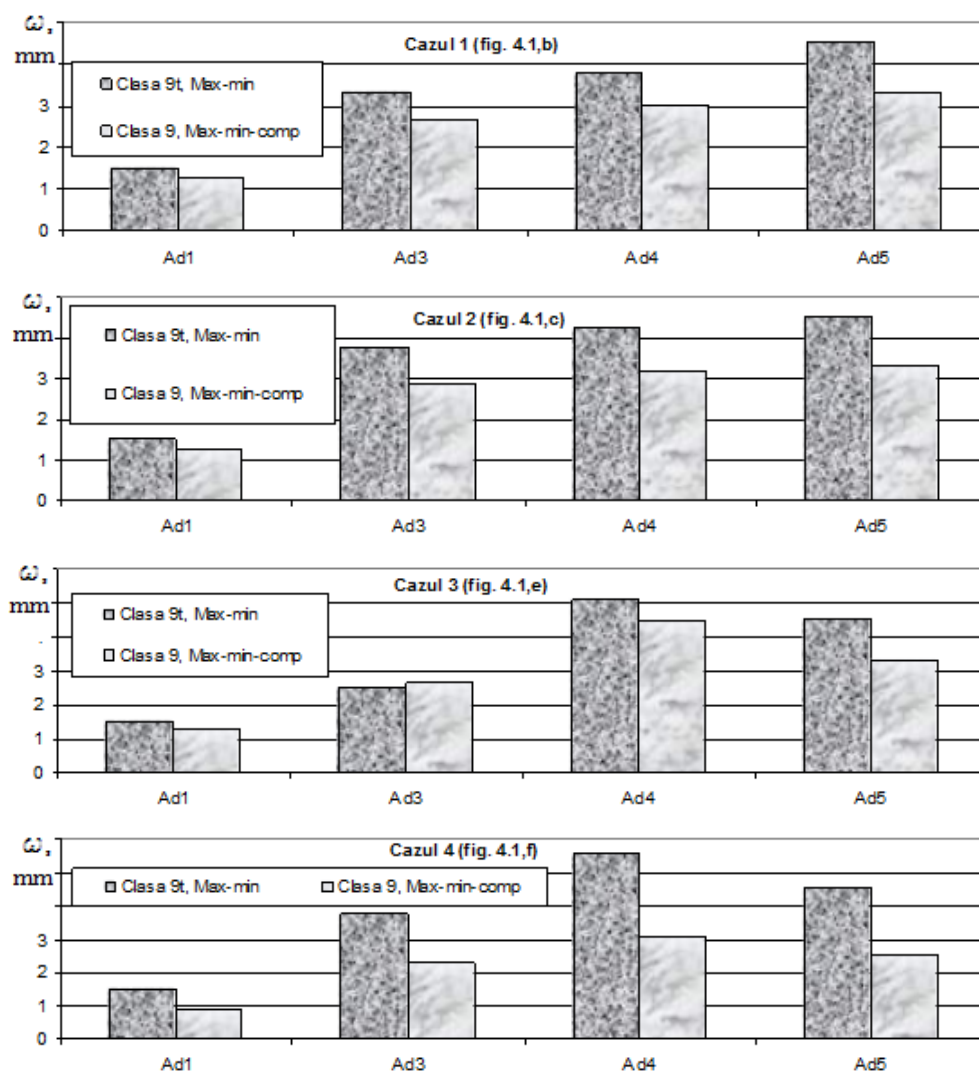


Fig. 4.10. Compararea rezultatelor de estimare a valorilor toleranțelor adaosurilor de prelucrare prin metoda de maxim și minim (semifabricat turnat, clasa 9t) și metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor (semifabricat turnat, clasa 9)

Din analiza datelor rezolvării lanțurilor dimensionale se poate observa că toleranțele cotelor tehnologice pe parcursul prelucrărilor se modifică substanțial, descresc dacă cota respectivă este cotă-țintă și cresc dacă aceasta se modifică asociat cu formarea altei cote-țintă. Cea mai mare creștere a toleranței se observă pentru cota tehnologică D (care este a treia în lanțul de cote, pornind de la baza tehnologică de contact, fig. 4.1, e, f) și include, respectiv, trei componente provenite de la cotele semifabricatului și alte două de la cotele din lanț deja formate $D^I(\omega_{D^0} + \omega_{C^0} + \omega_{B^0} + \omega_{B^I} + \omega_{C^2})$ (cazurile 3, 4). Toleranțele cotelor tehnologice C și D în situațiile când sunt în lanț pe poziția a doua (fig. 4.1, b, c) includ, respectiv, două toleranțe ale cotelor semifabricatului și câte o toleranță a cotei tehnologice deja formate $C^I(\omega_{C^0} + \omega_{B^0} + \omega_{B^I})$, $D^I(\omega_{D^0} + \omega_{B^0} + \omega_{B^I})$ (cazurile 1, 2). În cele din urmă, fiecare cotă tehnologică devine cotă-țintă și atinge precizia cerută.

Pentru formarea preciziei cotelor tehnologice trebuie să fie asigurate condiții fizico-tehnice, condiții care se manifestă prin adâncimea de așchiere adecvată. Or, adâncimea de așchiere se ia egală cu adaosul maxim de prelucrare și este exprimată prin relația:

$$t = Ad_{max} = Ad_{min} + \omega_{Ad} \quad (4.1)$$

În acest context, importante sunt valorile toleranțelor adaosurilor de prelucrare și în primul rând ale celor eliminate la prima prelucrare.

Mărimea toleranței adaosului de prelucrare este determinată de poziția în lanț a cotei tehnologice la formarea căreia participă. Dacă cota tehnologică este prima în lanț (cum este cota B_I), toleranța adaosului include o toleranță a cotei semifabricatului și una a cotei tehnologice formate $Ad_I^I(\omega_{B^0} + \omega_{B^I})$. Dacă cota tehnologică este pe poziția doi în lanț, în structura toleranței adaosului eliminat intră două toleranțe ale cotelor semifabricatului și două toleranțe ale cotelor din lanț formate: $Ad_3^I(\omega_{C^0} + \omega_{B^0} + \omega_{B^I} + \omega_{C^2})$, $Ad_4^I(\omega_{D^0} + \omega_{B^0} + \omega_{B^I} + \omega_{D^2})$.

Dacă cota tehnologică este a treia în lanț, toleranța adaosului va include 3 cuple de componente (cazul cotei tehnologice D_I , fig. 4.1, e, f) $Ad_4^I(\omega_{D^0} + \omega_{C^0} + \omega_{B^0} + \omega_{B^I} + \omega_{C^2} + \omega_{D^2})$ (cazurile 3, 4).

Mărimea toleranței adaosului de prelucrare depinde de mărimea cotei la formarea căreia participă și în acest sens cele mai mari influențe se observă la formarea cotelor tehnologice de gabarit. La valori mai mari ale cotei tehnologice, mai mari vor fi și toleranțele.

Dacă se aplică scenariul de formare a cotelor tehnologice după formarea definitivă a primei cote tehnologice din lanț (cum este B_t^2) (fig. 4.1, c, f), atunci în structurile toleranțelor următoare în ordinea formării cotelor tehnologice intermediare și toleranțelor adaosurilor de prelucrare respective apare un termen în plus $2 \cdot \omega_{B^I}$ (cazurile 2, 3):

$$C^2(\omega_{C^0} + \omega_{B^0} + 2 \cdot \omega_{B^I} + \omega_{B^2}),$$

$$D^2(\omega_{D^0} + \omega_{B^0} + 2 \cdot \omega_{B^I} + \omega_{B^2}),$$

$$A^2(\omega_{A^0} + \omega_{B^0} + 2 \cdot \omega_{B^I} + \omega_{B^2}), \quad Ad_1^I(\omega_{B^0} + \omega_{B^I}), \quad Ad_3^I(\omega_{C^0} + \omega_{B^0} + 2 \cdot \omega_{B^I} + \omega_{B^2} + \omega_{C^3}),$$

$$Ad_4^I(\omega_{D^0} + \omega_{B^0} + 2 \cdot \omega_{B^I} + \omega_{B^2} + \omega_{D^3}), \quad Ad_5^I(\omega_{A^0} + \omega_{B^0} + 2 \cdot \omega_{B^I} + \omega_{B^2} + \omega_{A^3}).$$

Dacă pentru formarea cotelor tehnologice C_t și D_t acest fenomen negativ poate fi evitat, deoarece toate trei cote, B_t , C_t și D_t , se formează în cadrul aceleiași instalări cu posibilitatea de a alege scenariul de prelucrare a suprafețelor, atunci pentru cota A_t prezența componentei $2 \cdot \omega_{B^I}$ este inevitabilă.

Cota tehnologică A_t se formează în cadrul altei instalări și "moștenește" acest fenomen de la acea instalare.

Pentru a stabili ordinea utilizării bazelor tehnologice și ordinea formării cotelor tehnologice vom analiza o structură dimensională (fig. 4.11) cu suprafețe plasate oglindă (A_t și E_t , B_t și E_t), dar și cu lanțuri de diferite lungimi, pornind de la potențialele baze tehnologice 1 și 8. De la suprafața 1 se observă două lanțuri: $E_t - D_t - F_t$ (3 elemente); $G_t - E_t$ (2 elemente). De la suprafața 8 sunt trei lanțuri a câte două elemente: $G_t - B_t$, $G_t - C_t$ și $G_t - A_t$.

Graful relațiilor dimensionale liniare tehnologice neorientat similar grafului relațiilor liniare constructive poate fi desfășurat pe instalări în două variante după cum urmează.

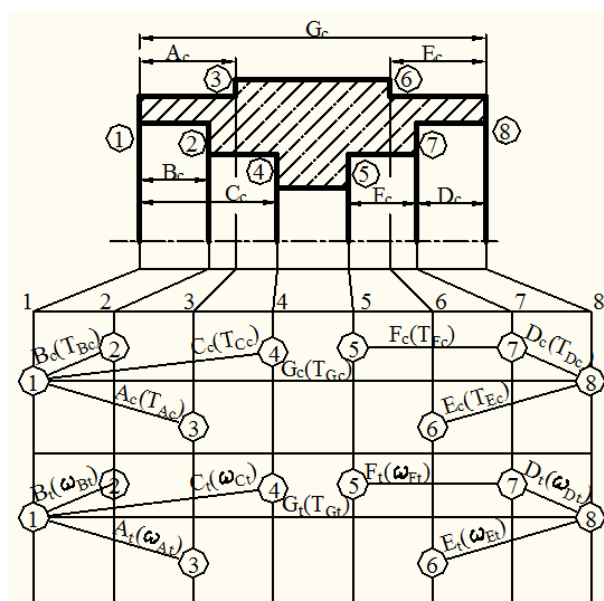
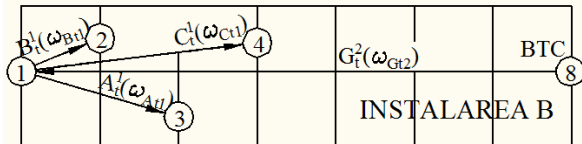
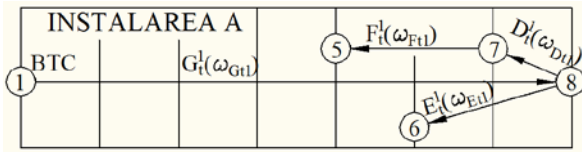
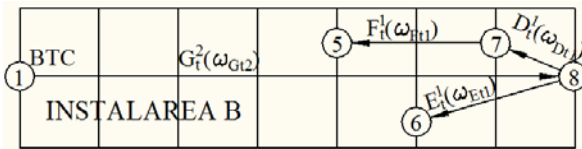
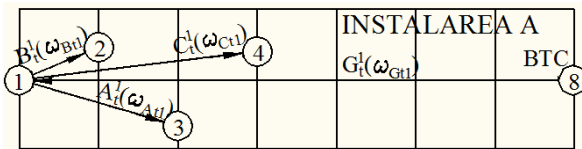


Fig. 4.11. Grafuri neorientate similare ale relațiilor dimensionale liniare constructive și tehnologice cu suprafețe plasate oglindă

Varianta A



Varianta B



$$Ad_8(\omega_{G^0} + \omega_{G^1});$$

$$Ad_6(\omega_{G^0} + \omega_{G^1} + \omega_{E^0} + \omega_{E^1});$$

$$Ad_7(\omega_{G^0} + \omega_{G^1} + \omega_{D^0} + \omega_{D^1});$$

$$Ad_5(\omega_{G^0} + \omega_{G^1} + \omega_{D^0} + \omega_{D^1} + \omega_{F^0} + \omega_{F^1});$$

$$Ad_1(\omega_{G^1} + \omega_{G^2});$$

$$Ad_3(\omega_{G^1} + \omega_{G^2} + \omega_{A^0} + \omega_{A^1});$$

$$Ad_2(\omega_{G^1} + \omega_{G^2} + \omega_{B^0} + \omega_{B^1});$$

$$Ad_4(\omega_{G^1} + \omega_{G^2} + \omega_{C^0} + \omega_{C^1});$$

$$Ad_1(\omega_{G^0} + \omega_{G^1});$$

$$Ad_3(\omega_{G^0} + \omega_{G^1} + \omega_{A^0} + \omega_{A^1});$$

$$Ad_2(\omega_{G^0} + \omega_{G^1} + \omega_{B^0} + \omega_{B^1});$$

$$Ad_4(\omega_{G^0} + \omega_{G^1} + \omega_{C^0} + \omega_{C^1});$$

$$Ad_8(\omega_{G^1} + \omega_{G^2});$$

$$Ad_6(\omega_{G^0} + \omega_{G^1} + \omega_{E^0} + \omega_{E^1});$$

$$Ad_7(\omega_{G^1} + \omega_{G^2} + \omega_{D^0} + \omega_{D^1});$$

$$Ad_5(\omega_{G^1} + \omega_{G^2} + \omega_{D^0} + \omega_{D^1} + \omega_{F^0} + \omega_{F^1});$$

Analiza datelor variantelor A și B arată că simetria geometrică a cotelor tehnologice $B_t \leftrightarrow D_t$ și $A_t \leftrightarrow E_t$ pe grafurile relațiilor dimensionale nu asigură adaosuri de prelucrare identice. În structura toleranței uneia dintre cote intră componentele $\omega_{G^0} + \omega_{G^1}$ cu mult mai mari decât componentele $\omega_{G^1} + \omega_{G^2}$ din cealaltă structură. Cea mai vulnerabilă, în acest sens, este cota tehnologică F_t (a treia la număr în lanț) la formarea căreia pot fi, în funcție de scenariul formării cotelor tehnologice, îndepărtate adaosuri cu toleranțe diferite, iar diferența constituie $\omega_{G^0} - \omega_{G^2}$. Într-o variantă se ia în considerare toleranța cotei pe semifabricat, iar în altă variantă toleranța aceleiași cote după prelucrarea mecanică, adică una substanțial mai mică. Astfel, poate fi formulată prima regulă. 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. Baza tehnologică întrerupe lanțul, care totuși se va manifesta mai târziu dar cu toleranțe mai mici. În exemplul dat, acest nod este 8, prin care se formează un lanț din trei elemente $E_t - D_t - F_t$. La

următoarea instalare, în structura toleranței tuturor adaosurilor va intra toleranța cu mult mai mică a cotei tehnologice formate prin prelucrare mecanică G_t .

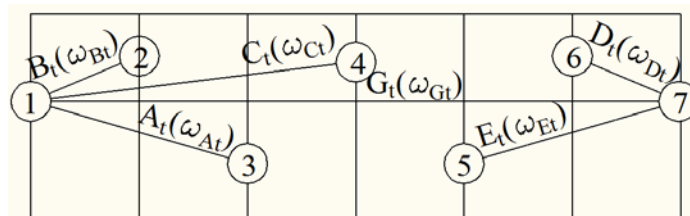


Fig. 4.12. Graf al relațiilor dimensionale liniare tehnologice cu număr egal de elemente în lanțuri

Dacă numărul de elemente în lanțurile posibile sunt egale (fig. 4.12), 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.

4.2. Alocarea toleranțelor de prelucrare la nivelul capacității de precizie a sistemului tehnologic

Sistemul dimensional tehnologic este un sistem de transformare a toleranțelor cotelor semifabricatului ω_j^0 în toleranțele cotelor constructive ale piesei ω_{cj} prin intermediul toleranțelor unei serii de cote tehnologice $\omega_{tj}^{i-2}, \omega_{tj}^{i-1}, \omega_{tj}^i$. Toleranțele seriei de cote tehnologice se stabilesc în funcție de numărul de faze tehnologice determinate de diferența $\omega_j^0 - \omega_{cj}$ și de capacitățile sistemului tehnologic ce se manifestă în fazele tehnologice respective $\omega_{stj}^{i-2}, \omega_{stj}^{i-1}, \omega_{stj}^i$. Capacitățile de precizie a sistemului tehnologic sunt limitatoare, astfel încât toleranțele cotelor tehnologice trebuie să fie iminent mai mari decât cele asigurate de sistemul tehnologic:

$$\begin{aligned}
\omega_{ij}^{i-2} &\geq \omega_{stj}^{i-2}, \\
\omega_{ij}^{i-1} &\geq \omega_{stj}^{i-1}, \\
\omega_{ij}^i &\geq \omega_{stj}^i.
\end{aligned} \tag{4.2}$$

Pe de altă parte, condiția de precizie prevede ca toleranța cotei constructive să fie mai mare decât a ultimei cote tehnologice (dacă se manifestă situația elemenrării optimă), adică: $\omega_{cj} \geq \omega_{ij}^i$. Atunci putem obține relația $\omega_{cj} \geq \omega_{ij}^i \geq \omega_{stj}^i$. În varianta de proiectare a tehnologiei și în condițiile concrete fizico-tehnice de formare a cotelor tehnologice sistemul tehnologic trebuie să asigure precizia cu o suficientă rezervă, iar cota tehnologică, la rândul său, o suficientă rezervă de precizie cotei constructive.

Sistemele tehnologice sunt de origine tehnică, fiind deterministe ca atare, dar funcționează într-un mediu determinist cu fluctuații (de exemplu, adâncimea de așchiere variabilă în limitele toleranței adaosului de prelucrare) astfel, încât atât cota tehnologică, cât și cea constructivă, în consecință, vor avea toleranța reală:

$$\omega_{stj}^i \rightarrow \omega_{ij}^{i,real} \rightarrow \omega_{cj}^{real}. \tag{4.3}$$

La dimensionarea constructivă a pieselor există situații când cota liniară dintre două suprafețe se specifică la precizie joasă (uneori extrem de joasă), dar din motive de precizie înaltă a formei sau a poziției relative suprafețele trebuie să fie prelucrate fin. Există structuri dimensionale constructive cu cote la trepte de precizie extrem de joase, una dintre suprafețe fiind prelucrată fin, iar cealaltă rămânând în stare de semifabricat. În aceste situații, toleranțele cotelor tehnologice vor fi cele reale determinate de toleranțele asigurate de sistemul tehnologic și nu toleranțele cotelor constructive.

Pe lângă constatarea realității, important este și faptul că toleranțele acestor cote tehnologice influențează toleranțele adaosurilor de prelucrare (cazurile 1–4 discutate anterior), care se vor adevăra mai mici decât cele estimate.

Deci, se constată că toate cotele tehnologice se vor forma cu toleranțele determinate de sistemul tehnologic în circumstanțele proceselor de așchiere. Circumstanțele legate de structurile dimensionale tehnologice influențează procesele de asigurare a preciziei prin intermediul adaosurilor de prelucrare mai mari sau mai mici.

Planul inițial de prelucrare este format în baza datelor despre precizia medie statistică de prelucrare. Se impune condiția când cotele constructive să fie asigurate prin intermediul cotelor tehnologice cu toleranțele cele mai mari posibile, dar aceste toleranțe nu pot fi stabilite mai mari decât cele asigurate de către sistemul tehnologic.

În condițiile exploatării sistemelor tehnologice cu resurse moderne de stocare a informațiilor tehnologice trebuie să se stabilească preciziile (toleranțele) situaționale ale

sistemelor tehnologice, care ar ține cont de metoda de prelucrare, materialul prelucrat, sculele așchietoare, adaosul maxim de prelucrare, regimul de așchiere etc.

Prima iterație se face pornind de la precizia medie statistică, iar după estimarea valorii adaosurilor de prelucrare și a capacităților sistemului tehnologic în aceste circumstanțe urmează alte iterații cu rezultate mai aproape de realitate.

În acest mod, structura dimensională optimă devine element al proiectului tehnologic optim, iar analiza dimensională în urma analizei și verificării unei decizii luate se transformă în instrument de luare a deciziilor argumentate – proiectare dimensională tehnologică.

4.3. Adaosuri de prelucrare minime

Adaosul de prelucrare este un element indispensabil al legăturilor dimensionale tehnologice și, pe lângă caracterul geometric (valoare, toleranță), are și rolul de adâncime de așchiere, care este limitativă pentru precizia de prelucrare și pentru consumuri. Astfel, fiecare adaos maxim de prelucrare nu trebuie să depășească valoarea permisă a adâncimii de așchiere pentru a obține precizie, iar suma (suma de volum) a adaosurilor maxime de prelucrare îndepărtate de pe toate suprafețele piesei trebuie să fie minime.

Adâncimea de așchiere este un factor ce determină capacitatea sistemului tehnologic de a realiza prelucrări la precizia necesară. Se știe că adâncimea de așchiere corespunde adaosului de prelucrare determinat din relația:

$$Ad_{max} = Ad_{min} + \omega_{Ad} . \quad (4.4)$$

Analiza diagramelor de toleranță permite stabilirea toleranțelor adaosurilor de prelucrare ω_{Ad} . Cel de-al doilea factor este valoarea adaosului minim Ad_{min} . Prin esența sa, adaosul minim reprezintă valoarea adaosului suficientă și necesară pentru o prelucrare garantată și formarea unei noi suprafețe în care lipsesc factorii precedentei suprafețe.

Pentru a stabili valorile adaosurilor minime pot fi folosite două metode. Prima este metoda tabelară, prin care se obțin întotdeauna date bune, adică valori ale adaosului minim în exces. Mai avantajoasă în sensul neadmiterii valorilor excesive ale adaosurilor de prelucrare este metoda grafo-analitică bazată pe elementele componente ale adaosului minim elaborată de profesorul Kovan la mijlocul secolului XX.

Conform metodei grafo-analitice, pentru suprafețele plane adaosurile de prelucrare minime sunt determinate din relația (fig. 4.13):

$$Ad_{min} = R_z^{i-1} + F^{i-1} + \rho^{i-1} + \varepsilon_{inst}^i , \quad (4.5)$$

unde: R_z^{i-1} – rugozitatea suprafeței de prelucrat; F^{i-1} – adâncimea stratului defectat al suprafeței de prelucrat; ρ^{i-1} – abaterea spațială (geometrică) a suprafeței de prelucrat; ε_{inst}^i – eroarea de

instalare ce provoacă modificarea poziției spațiale a suprafeței de prelucrat împreună cu piesa instalată.

Primii trei factori se formează în faza tehnologică precedentă $i-1$ de prelucrare a suprafeței, iar eroarea de instalare se referă la instalarea și faza tehnologică actuală i .

La determinarea valorii adaosului minim de prelucrare trebuie să se țină cont de orientarea suprafețelor frontale una dintre care este bază tehnologică, iar alta este suprafața formată prin prelucrare. Dacă normalele la aceste două suprafețe sunt opuse, atunci vectorul erorii de orientare ε_{inst}^i are direcția normalei suprafeței de prelucrat și pericolul de a avea un adaos mai mic decât este necesar nu există, din contra, adaosul de prelucrare minim devine mai mare cu această valoare și nu mai este minim. În aceste condiții, factorul ε_{inst}^i din relația (4.1) nu se ia în considerare și adaosul minim se calculează din relația:

$$Ad_{min} = R_z^{i-1} + F^{i-1} + \rho^{i-1}. \quad (4.6)$$

Cum se menționează în lucrarea [131], neajunsul principal al metodei grafo-analitice clasice de calcul al adaosurilor de prelucrare minime constă în faptul că valoarea adaosului de prelucrare depinde de parametrii suprafeței de prelucrat precedenți și nu depinde de parametrii ce trebuie obținuți. Tendința de a înlătura în întregime toate straturile-factori conduce la estimarea valorii adaosului minim de prelucrare în exces. Astfel, se propune luarea în considerare a factorilor de calitate a suprafeței de prelucrat și a celei prelucrate, iar calcularea valorii adaosului de prelucrare minim să se facă în diferențe din relația:

$$Ad_{min} = (R_z^{i-1} - R_z^i) + (F^{i-1} - F^i) + (\rho^{i-1} - \rho^i) + \varepsilon_{inst}^i \quad (4.7)$$

Relația (4.3) permite o estimare mai veridică a valorii adaosului de prelucrare minim, dar nu reflectă în toate cazurile situația reală. Doi dintre factori, și anume, abaterea spațială ρ și eroarea de instalare ε_{inst} , în rezultatul prelucrării mecanice în baza legii copierii erorilor, se micșorează substanțial:

$$\begin{aligned} \rho^i &= k_\rho \cdot \rho^{i-1}, \\ \varepsilon_{inst}^{i+1} &= k_\varepsilon \cdot \varepsilon_{inst}^i. \end{aligned} \quad (4.8)$$

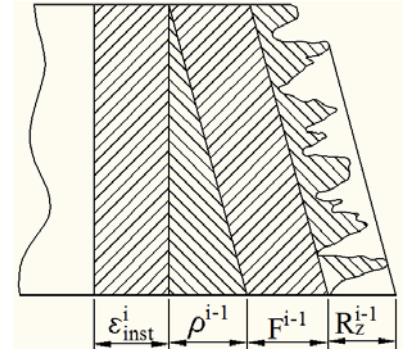


Fig. 4.13. Schema determinării componentelor adaosului minim de prelucrare prin metoda grafo-analitică [110]

Aici $k_\rho < 0.06$ și $k_\varepsilon < 0.06$. Adâncimea stratului defectat format după prelucrarea mecanică depinde de materialul piesei. Unele materiale la prelucrarea mecanică nu formează strat defectat (fontele, aliajele colore), iar altele formează un strat defectat comparabil ca mărime cu rugozitatea R_z . Se observă că natura și mecanismele de formare a componentelor adaosurilor de prelucrare minimă sunt diferite.

În figura 4.14 se demonstrează două poziții-limită ale componentelor adaosului de prelucrare minim în diferențe. Componentele caracteristice suprafeței prelucrate, pe de o parte, nu pot compromite spațiul erorii de instalare și pot ocupa un interval $\varepsilon_{inst}^i - \varepsilon_{inst}^{i+1}$ (fig. 4.14, a), iar pe de altă parte, nu pot pătrunde în spațiul stratului defectat în cazul când eroarea de instalare este mică sau nulă (fig. 4.14, b). Astfel, se poate constata intervalul de valori al adaosului de prelucrare minim:

$$\begin{aligned} (R_z^{i-1} - R_z^i) + (F^{i-1} - F^i) + (\rho^{i-1} - \rho^i) &\leq Ad_{min} \leq \\ &\leq (R_z^{i-1} - R_z^i) + (F^{i-1} - F^i) + (\rho^{i-1} - \rho^i) + \varepsilon_{inst}^i \end{aligned} \quad (4.4)$$

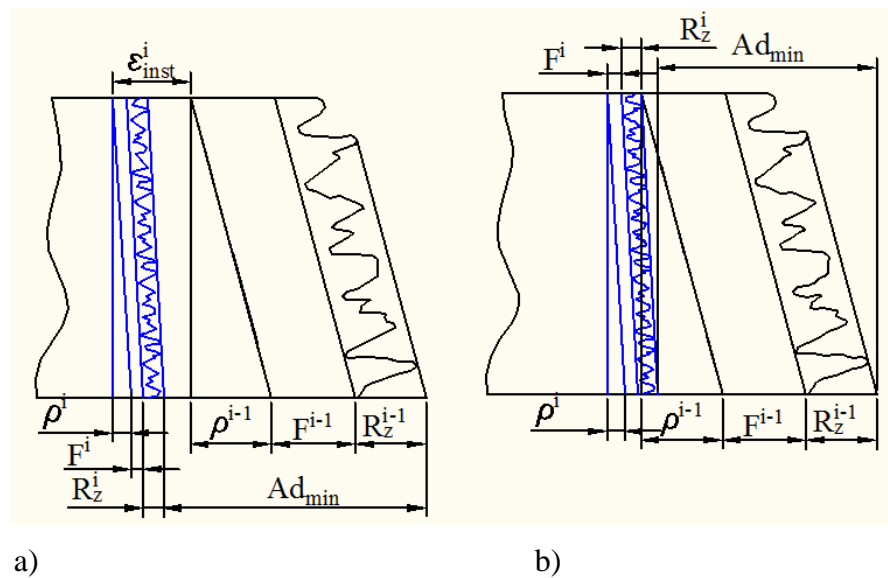


Fig. 4.14. Poziții-limită ale componentelor adaosului de prelucrare minim în diferențe:
a) determinată de eroarea de instalare; b) determinată de spațiul stratului defectat.

4.4. Adaptarea reciprocă a structurilor dimensionale constructive și tehnologice

4.4.1. Gradul de optimalitate a structurilor dimensionale tehnologice bazat pe similitudinea cu structurile dimensionale constructive

Datele statistice referitoare la precizia de prelucrare incluse în îndrumare se referă la structurile dimensionale elementare (fig. 4.15). 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 ($\omega_{L^0} \rightarrow \omega_{L^1}$) este limitată de creșterea toleranței adaosului de prelucrare ($\omega_{L^0} + \omega_{L^1}$), adică este limitată de creșterea adâncimii de așchiere.

Pentru aceasta este stabilită legătura dintre precizia de prelucrare și toleranța adaosului de prelucrare – una dintre condițiile asigurării tehnologice a preciziei. Prelucrările mecanice au caracter determinist cu perturbații în care probabilitatea de realizare a

evenimentelor este cunoscută. Perturbațiile se referă la faptul că aceeași precizie a cotei tehnologice actuale poate fi obținută, pornind de la diferite precizii ale cotei precedente și că

diferite precizii ale cotei tehnologice actuale pot fi obținute, pornind de la aceeași precizie a cotei precedente. Legătura toleranța cotei tehnologice–toleranța adaosului de prelucrare poate fi reprezentată prin intervale (fig. 4.16). La valori mai mari ale toleranței statistice a adaosului de prelucrare ω_{Ad}^{stat} se vor forma valori mai mari ale toleranței statistice a cotei tehnologice, și invers. Legătura cuplului limita statistică a toleranței cotei tehnologice (ω_L^{stat}) – limita statistică a toleranței adaosului de prelucrare (ω_{Ad}^{stat}) reprezintă intervalul de optimalitate (fig. 4.16). Astel, intervalul de optimalitate are caracter fizico-tehnic obiectiv independent de structura dimensională tehnologică.

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.

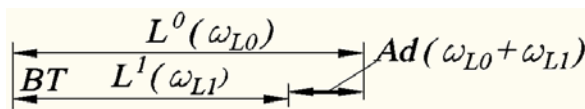


Fig. 4.15. Formarea legăturii toleranța cotei tehnologice–toleranța adaosului de prelucrare

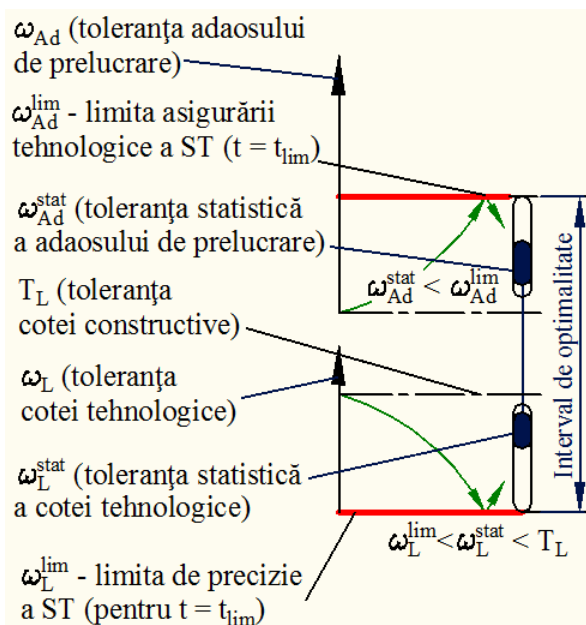


Fig. 4.16. Interdependența toleranța statistică a cotei tehnologice – toleranța statistică a adaosului de prelucrare pentru structura dimensională tehnologică elementară

La prelucrarea pe mașinile-unelte moderne CNC cotele tehnologice fac parte din structurile dimensionale complexe, care se manifestă prin două fenomene distincte.

Primul fenomen structural este legat de compensarea erorilor care are drept rezultat următoarele:

- ✓ creșterea preciziei de prelucrare pentru elementul de închidere al lanțului dimensional tehnologic (fig. 2.12) sau pentru cota tehnologică din lanț (fig. 2.13);
- ✓ micșorarea toleranțelor adaosurilor de prelucrare (îmbunătățirea asigurării tehnologice a preciziei de prelucrare) (fig. 2.11).

Cel de-al doilea fenomen structural este legat de creșterea toleranțelor adaosurilor de prelucrare (înăutățirea asigurării tehnologice a preciziei de prelucrare) așa cum este arătat în compartimentul 4.1. În structurile dimensionale tehnologice complexe, toleranțele adaosurilor de prelucrare depind de locul în lanțul dimensional ocupat de cota tehnologică formată. În cazul structurii dimensionale în lanț, toleranța adaosului crește odată cu creșterea numărului de ordine al elementului în lanț de la baza tehnologică și include toate toleranțele cotelor-țintă și ale semifabricatului, pornind de la baza tehnologică (fig. 4.17). Termenul prevede însumarea toleranțelor dacă se aplică metoda de maxim și minim ($\omega^{i-1} + \omega^i$) și însumarea toleranțelor cu efecte de compensare ($\omega^{i-1} + \omega^i - 2 \cdot \omega^c$ sau $\omega^{i-1} - \omega^i$).

Aceste fenomene au efecte opuse cu ponderi diferite, iar rezultatul final depinde de specificul structurilor dimensionale.

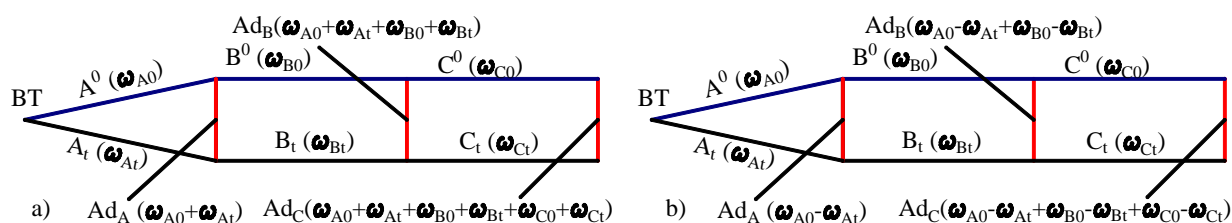


Fig. 4.17. Formarea toleranțelor adaosurilor de prelucrare în dependență de poziția cotei tehnologice în lanț: a) metoda de maxim și minim; b) metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor.

În figura 4.18 este reflectată situația în care efectele structurale sunt minore și nu afectează procesul de asigurare a preciziei cotelor tehnologice. Toleranța cotei constructive T_L este asigurată prin toleranța cotei tehnologice în valoare mai mare decât cea statistică datorită efectelor compensării erorilor, astfel încât $\omega_L^{lim} < \omega_L < T_L$. În același timp, toleranța adaosului de prelucrare nu depășește valoarea-limită admisibilă $\omega_{Ad} < \omega_{Ad}^{lim}$.

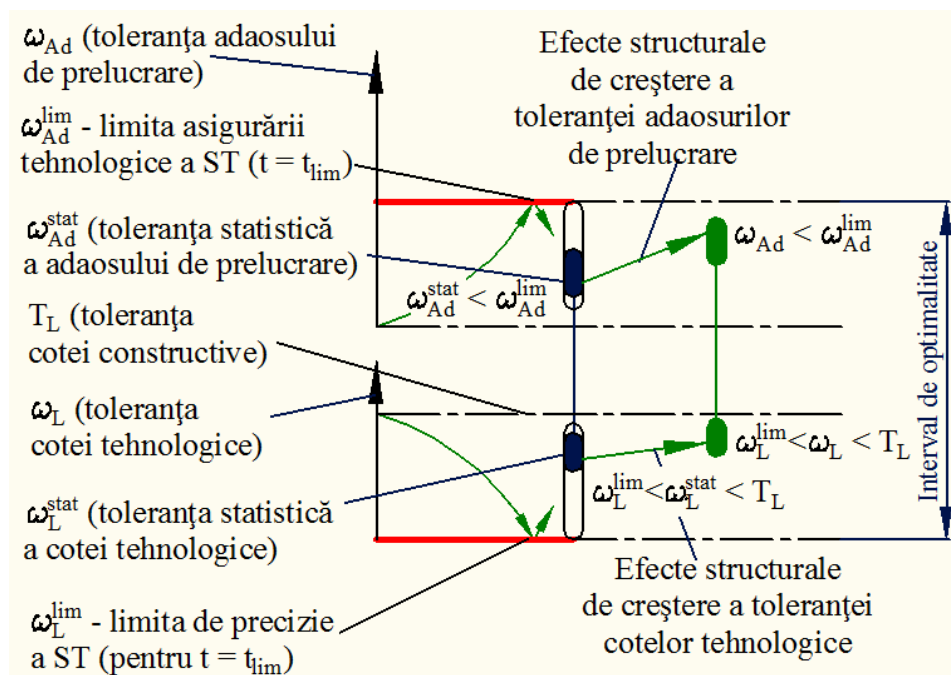


Fig. 4.18. Formarea preciziei cotelor tehnologice în condițiile efectelor structurale minore (acceptabile)

Efectele structurale legate de creșterea inadmisibilă a toleranței adaosului de prelucrare $\omega_{Ad} > \omega_{Ad}^{lim}$ pot conduce la neasigurarea tehnologică a preciziei (fig. 4.19).

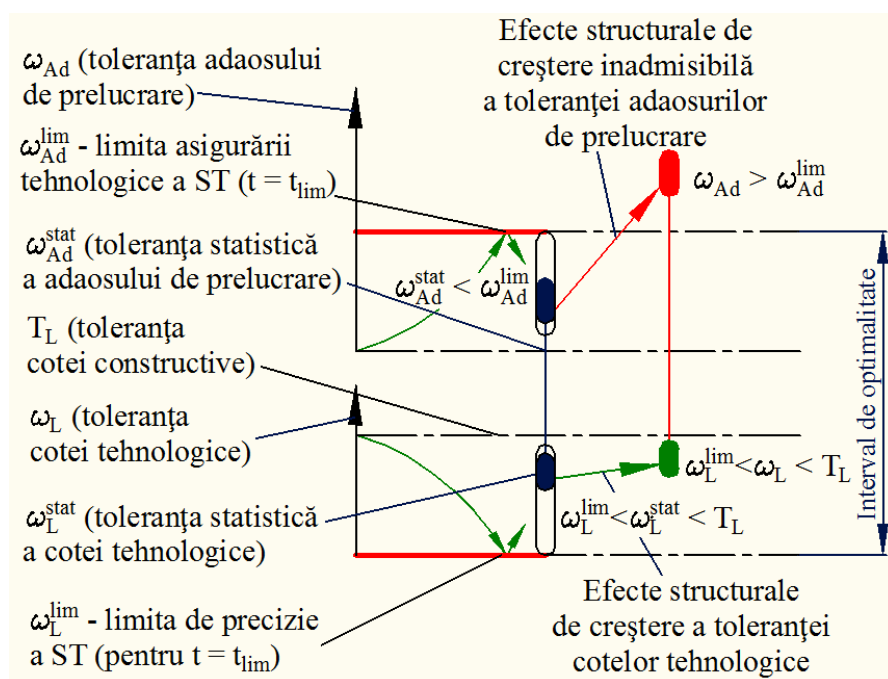


Fig. 4.19. Efecte structurale majore inacceptabile privind formarea preciziei cotelor tehnologice

Astfel, formarea unei structuri dimensionale complexe prin similitudinea totală *semifabricat-piesă-sistem tehnologic-tehnologie* nu conduce întotdeauna la o variantă optimă a

structurii dimensionale tehnologice după criteriul toleranței adaosurilor de prelucrare, deoarece se manifestă efecte structurale inacceptabile pentru asigurarea tehnologică.

În continuare sunt analizate o serie de variante și combinații de structuri dimensionale constructive și tehnologice [94, 112, 116]. Lanțurile dimensionale sunt rezolvate pentru prelucrarea suprafețelor frontale 1 (S_1), 2 (S_2), 3 (S_3) și 4 (S_4) cu coordonatele de poziționare în raport cu suprafața 0 respectiv la 200, 150, 100 și 50 mm în diverse variante de dimensionare, conform figurilor 4.20, 4.23, 4.26, 4.29. Intervalul de optimalitate este definit ca limită a toleranței adaosului de prelucrare de 4 mm (condiție limită la strunjire de viteză mare, compania Seco Tools) și treapta de precizie 11.5 (convențional). Planul inițial prevede că pentru formarea dimensiunilor constructive A_C , B_C , C_C și E_C toate suprafețele frontale (1, 2, 3, 4) sunt prelucrate de două ori, mai întâi la treapta de precizie 13, apoi la treapta 11. Semifabricatul turnat este realizat cu toleranțe dimensionale corespunzătoare treptei de precizie 16 (echivalent clasei de precizie 9). Dimensiunile pe semifabricat sunt notate: A_i^0 , B_i^0 , C_i^0 și E_i^0 . În cazul de față, 0 reprezintă, ca și de exemplu 1, 2 sau 3, starea suprafeței, dimensiunii. Stările pot fi notate generalizat cu $i=1, 2, 3...$

Precizia cotelor este reprezentată valoric prin câmpul de toleranță, care este produsul dintre valoarea unității de toleranță determinată de dimensiune $i = 0.45 * \sqrt[3]{L} + 0.001 * L$ și numărul unităților de toleranță a ce caracterizează precizia [125, 126].

În funcție de varianta specifică, fiecare dimensiune constructivă este formată fie numai din dimensiunea tehnologică proprie, fie din dimensiunea tehnologică proprie și alte dimensiuni tehnologice situaționale.

Se analizează redimensionarea constructivă echivalentă și în legătură cu aceasta se estimează necesitatea sporirii preciziei dimensiunilor tehnologice în comparație cu treapta 13 pentru prima fază tehnologică și cu treapta 11 în a doua etapă de prelucrare. Ca măsură a preciziei cotelor tehnologice este utilizat numărul de unități de toleranță a .

De asemenea, sunt analizate valorile toleranțelor adaosurilor de prelucrare eliminate în prima și a doua etapă de prelucrare. Acest lucru este important, deoarece adâncimea de așchiere este egală cu adaosul maxim de prelucrare $t = Ad_{max} = Ad_{min} + \omega_{Ad}$.

Analizele au fost efectuate, folosind metodele de maxim și minim și de maxim și minim cu compensarea erorilor [112, 113, 114, 115, 116]. Efectul compensării erorilor este reflectat

prin relația $\omega_{Ad} = \omega^{i-1} - \omega^i$ pentru adaosurile de prelucrare și prin relația $\omega_{Ad} = \omega_{i-1} - u \cdot \omega_i$ pentru cotele tehnologice, $u < 1$ fiind ponderea erorilor compensate situațional.

Structuri dimensionale constructive și tehnologice similare de tip evantai

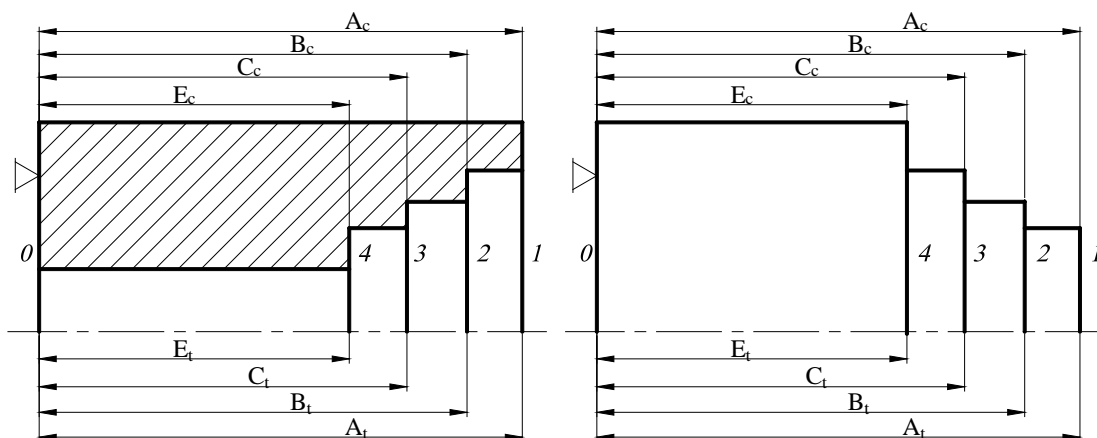


Fig. 4.20. Structuri dimensionale constructive și tehnologice similare de tip evantai

Toate dimensiunile constructive sunt date de la baza constructivă – suprafața 0, iar dimensiunile tehnologice sunt formate de la baza tehnologică (BTC) – aceeași suprafață 0 (fig. 4.20).

Din grafurile relațiilor dimensionale (fig. 4.21) se observă că condițiile pentru asigurarea preciziei dimensiunilor sunt optime, deoarece precizia dimensiunilor tehnologice nu este mai mare decât precizia dimensiunilor constructive:

$$\omega_{A_t^i} \leq \omega_{A_c^i}, \omega_{B_t^i} \leq \omega_{B_c^i}, \omega_{C_t^i} \leq \omega_{C_c^i}, \omega_{E_t^i} \leq \omega_{E_c^i} \quad (4.5)$$

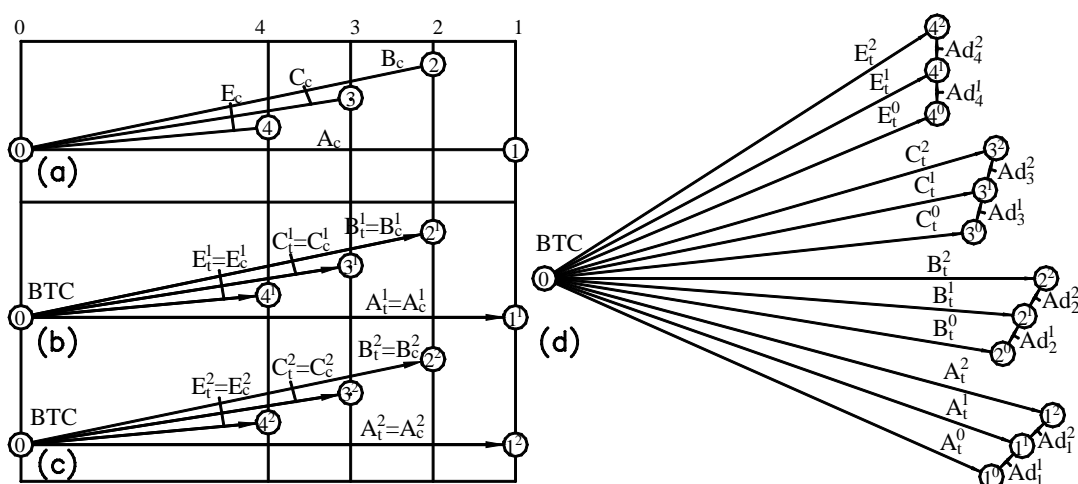


Fig. 4.21. Grafuri ale legăturilor dimensionale pentru cotele constructive (a); cotele tehnologice (b, c) și adaosurile de prelucrare (d) (caz evantai) [112, 116]

După prima și cea de-a doua etapă de prelucrare ($i = 1, 2$) toleranțele adaosurilor pentru suprafețele 1, 2, 3 și 4 se determină din relațiile (fig. 4.21, d):

$$\begin{aligned} \omega_{Ad_1^i} &= (\omega_{A_t^i} + \omega_{A_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{11^{i-1}}^c, & \omega_{Ad_2^i} &= (\omega_{B_t^i} + \omega_{B_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{22^{i-1}}^c, \\ \omega_{Ad_3^i} &= (\omega_{C_t^i} + \omega_{C_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{33^{i-1}}^c, & \omega_{Ad_4^i} &= (\omega_{E_t^i} + \omega_{E_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{44^{i-1}}^c. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Aici și în continuare relațiile sunt date în varianta de maxim și minim cu compensarea erorilor, iar varianta de maxim și minim rezultă din stabilirea $\omega^c = 0$.

Tabelul 4.1. Valorile toleranțelor adaosurilor de prelucrare pentru structurile dimensionale constructive și tehnologice similare de tip evantai

Toleranța adaosului, mm	Componente	Suprafețele prelucrate							
		1	2	3	4	1	2	3	4
		Metoda de maxim și minim				Metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor			
ω_{Ad^1}	statistică	3.55	3.17	2.73	2.10	2.11	1.91	1.65	1.32
	structurală	0	0	0	0	0	0	0	0
	total	3.55	3.17	2.73	2.10	2.11	1.91	1.65	1.32
ω_{Ad^2}	statistică	1.01	0.88	0.76	0.58	0.43	0.38	0.32	0.20
	structurală	0	0	0	0	0	0	0	0
	total	1.01	0.88	0.76	0.58	0.43	0.38	0.32	0.20

Se poate observa că nu există situații cu valori mărite ale toleranțelor de prelucrare față de valoarea de referință statistică (optimă) (tabelul 4.1).

Specificul acestor structuri dimensionale constructive și tehnologice similare constă în faptul că fiecare cotă tehnologică A_t , B_t , C_t și E_t se formează de la baza tehnologică independent de altele la precizia statistică. La cotele tehnologice nu se manifestă efectul de compensare a erorilor, deoarece cotele respective nu fac parte din structurile complexe. Pentru adaosurile de prelucrare, efectul de compensare a erorilor are loc, realizându-se structura complexă conform figurii 2.11. Grafic, specificul acestor structuri dimensionale este reflectat în figura 4.22. Strategia de prelucrare conform figurilor 4.20 și 4.21 este optimă.

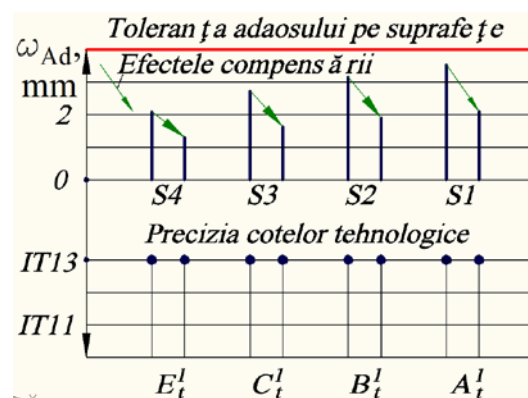


Fig. 4.22. Efecte de micșorare a toleranțelor adaosurilor de prelucrare în structurile dimensionale constructive și tehnologice similare de tip evantai

Structuri dimensionale constructive și tehnologice similare de tip evantai deplasat

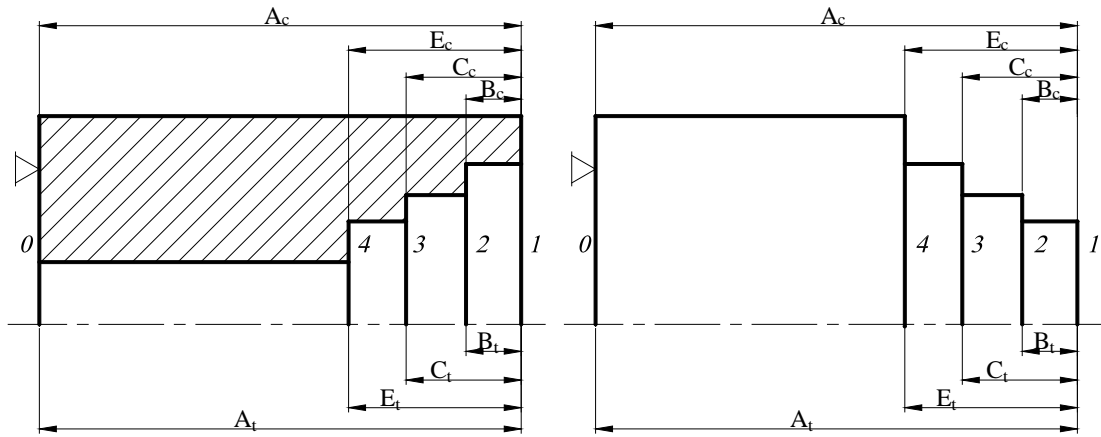


Fig. 4.23. Structuri dimensionale constructive și tehnologice similare de tip evantai deplasat

Una dintre dimensiunile constructive este dată de la baza constructivă – suprafața 0, iar restul dimensiunilor sunt date direct de la suprafața 4 (fig. 4.23). Prelucrarea se realizează prin dimensiuni tehnologice formate de la baza tehnologică de reglare (BTR) – suprafața 1.

Din grafurile relațiilor dimensionale (fig. 4.24, b, c) se observă că condițiile de asigurare a preciziei dimensiunilor sunt optime, deoarece precizia dimensiunilor tehnologice nu este mai mare decât precizia dimensiunilor constructive:

$$\omega_{A_i^i} \leq \omega_{A_c^i}, \omega_{E_i^i} \leq \omega_{E_c^i}, \omega_{C_i^i} \leq \omega_{C_c^i}, \omega_{B_i^i} \leq \omega_{B_c^i}, \quad (4.7)$$

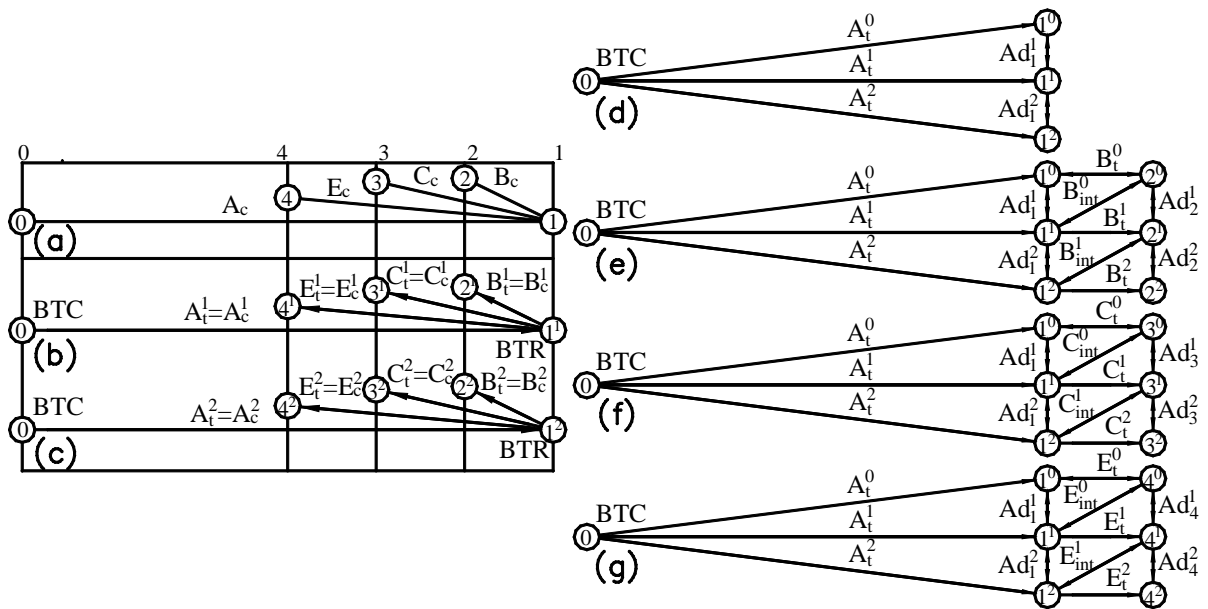


Fig. 4.24. Grafuri ale legăturilor dimensionale pentru dimensiunile constructive (a), dimensiunile tehnologice (b, c) și adaosurile de prelucrare (d, e) (caz evantai deplasat).

Din figura 4.24, d) se constată că lanțurile dimensionale pentru adaosurile de prelucrare ale suprafețelor 2, 3 și 4 includ ca elemente componente adaosul de prelucrare al suprafeței 1.

Toleranțele adaosurilor de prelucrare pentru suprafețele 1, 2, 3 și 4 după prima etapă de prelucrare pot fi determinate după cum urmează:

$$\begin{aligned}
 \omega_{Ad_1^i} &= (\omega_{A_t^i} + \omega_{A_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{1^i 1^{i-1}}^c, \\
 \omega_{Ad_2^i} &= (\omega_{B_t^i} + \omega_{B_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{2^i 2^{i-1}}^c + (\omega_{A_t^i} + \omega_{A_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{1^i 1^{i-1}}^c, \\
 \omega_{Ad_3^i} &= (\omega_{C_t^i} + \omega_{C_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{3^i 3^{i-1}}^c + (\omega_{A_t^i} + \omega_{A_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{1^i 1^{i-1}}^c, \\
 \omega_{Ad_4^i} &= (\omega_{E_t^i} + \omega_{E_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{4^i 4^{i-1}}^c + (\omega_{A_t^i} + \omega_{A_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{1^i 1^{i-1}}^c.
 \end{aligned}
 \tag{4.8}$$

Tabelul 4.2. Valorile toleranțelor adaosurilor de prelucrare pentru structurile dimensionale constructive și tehnologice similare de tip evantai deplasat

Toleranța adaosului, mm	Componente	Suprafețele prelucrate							
		1	2	3	4	1	2	3	4
		Metoda de maxim și minim				Metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor			
ω_{Ad^1}	statistică	3.55	2.10	2.73	3.17	2.11	1.32	1.65	1.91
	structurală	0	3.55	3.55	3.55	0	2.11	2.11	2.11
	total	3.55	5.65	6.28	6.72	2.11	3.43	3.76	4.02
ω_{Ad^2}	statistică	1.01	0.58	0.76	0.88	0.43	0.2	0.32	0.38
	structurală	0	1.01	1.01	1.01	0	0.43	0.43	0.43
	total	1.01	1.59	1.77	1.89	0.43	0.63	0.75	0.81

Specificul acestor structuri dimensionale constructive și tehnologice similare constă în faptul că fiecare dintre cotele tehnologice B_t , C_t și E_t se formează în calitate de cea de-a doua cotă din lanțurile formate cu cota tehnologică A_t de la baza tehnologică. Pentru cotele tehnologice B_t , C_t și E_t se manifestă efectul de compensare a erorilor, deoarece cotele respective fac parte din structuri complexe ($A_t \rightarrow B_t$, $A_t \rightarrow C_t$, $A_t \rightarrow E_t$), conform mecanismului dat în figura 2.13. Pentru adaosurile de prelucrare, efectul de compensare a erorilor are loc, realizându-se structura complexă conform figurii 2.11.

Din tabelul 4.2 se poate observa că creșterea toleranței adaosurilor de prelucrare provocate de efectele structurale se produce pentru cotele B_t , C_t și E_t în valoarea toleranței statistice a cotei tehnologice A_t . Grafic, specificul acestor structuri dimensionale este reflectat în figura 4.25.

Efectele structurale bazate pe formarea lanțurilor conduc la creșterea toleranțelor adaosurilor de prelucrare. Această creștere nu este mare, deoarece numărul de elemente în lanț este de numai 2. Efectele structurale bazate pe compensarea erorilor se manifestă prin micșorarea toleranțelor adaosurilor de prelucrare (asigurare tehnologică mai ușoară) și simultan prin creșterea toleranțelor cotelor tehnologice (scăderea preciziei de prelucrare necesare). Strategia de prelucrare conform figurilor 4.23 și 4.24 este acceptabilă, fiind corespunzătoare situației reprezentate în figura 4.18.

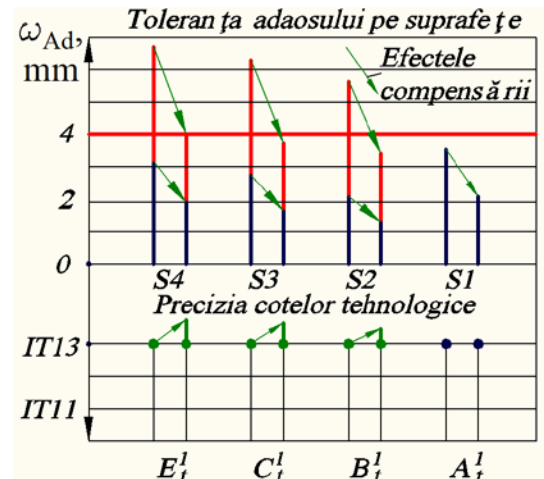


Fig. 4.25. Efecte de micșorare a toleranțelor adaosurilor de prelucrare și de micșorare a preciziei cotelor tehnologice în structurile dimensionale constructive și tehnologice similare de tip evantai deplasat

Structuri dimensionale constructive și tehnologice similare de tip evantai–lanț

O parte dintre dimensiunile constructive sunt date de la baza constructivă – suprafața 0, iar cealaltă parte sunt date în lanț de la suprafețele 4 și 3 (fig. 4.26). Dimensiunile tehnologice se formează după aceeași structură de la baza tehnologică de contact BTC – suprafața 0 și, succesiv, de la bazele tehnologice de reglare – suprafețele de referință de reglare 4 și 3 (BTR1, BTR2).

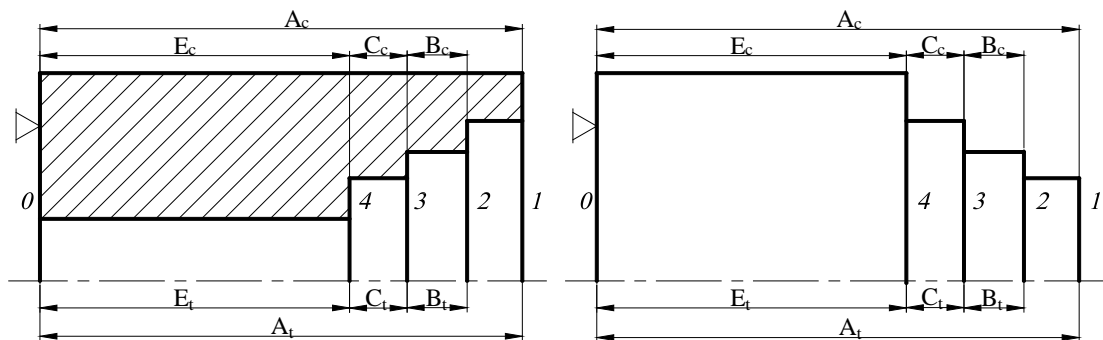


Fig. 4.26. Structuri dimensionale constructive și tehnologice de tip evantai–lanț

Din grafurile legăturilor dimensionale (fig. 4.27, b, c) se observă că condițiile de asigurare a preciziei dimensiunilor sunt optime, deoarece precizia dimensiunilor tehnologice nu este mai mare decât precizia dimensiunilor constructive:

$$\omega_{A_t^i} \leq \omega_{A_c^i}, \omega_{B_t^i} \leq \omega_{B_c^i}, \omega_{C_t^i} \leq \omega_{C_c^i}, \omega_{E_t^i} \leq \omega_{E_c^i} \quad (4.9)$$

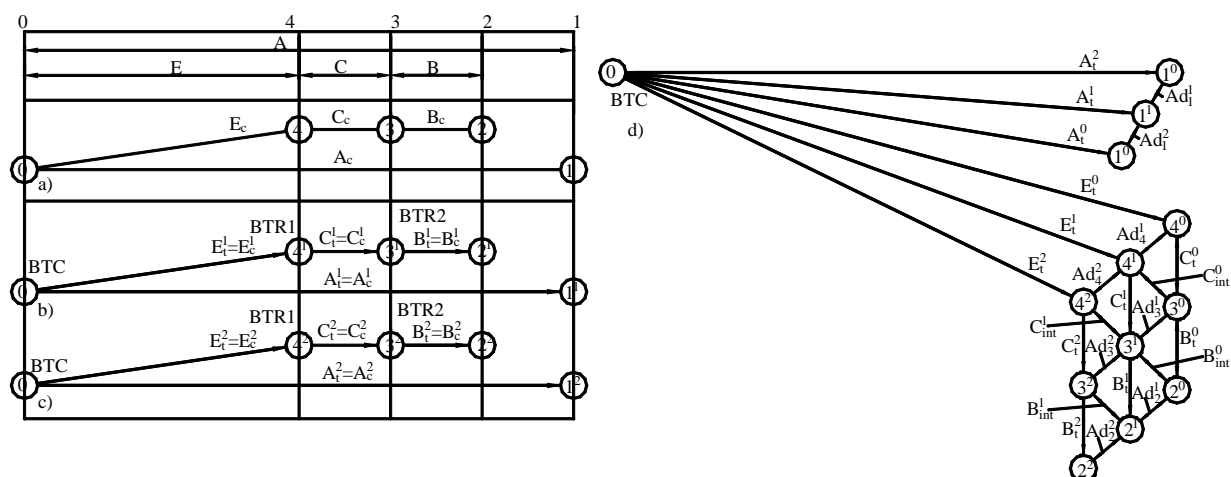


Fig. 4.27. Grafuri ale relațiilor dimensionale pentru dimensiunile constructive (a), dimensiunile tehnologice (b, c) și adaosurile de prelucrare (d) (cazul evantai-lanț).

Din figura 4.27, d) se constată că toleranțele adaosurilor de prelucrare pentru suprafețele 1, 4, 3 și 2 după etapele de prelucrare pot fi determinate din relațiile:

$$\begin{aligned}
 \omega_{Ad_1^i} &= (\omega_{A_t^i} + \omega_{A_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{A_t^{i-1}}^c, \\
 \omega_{Ad_2^i} &= (\omega_{B_t^i} + \omega_{B_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{B_t^{i-1}}^c + (\omega_{C_t^i} + \omega_{C_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{C_t^{i-1}}^c + \\
 &\quad + (\omega_{E_t^i} + \omega_{E_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{E_t^{i-1}}^c, \\
 \omega_{Ad_3^i} &= (\omega_{C_t^i} + \omega_{C_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{C_t^{i-1}}^c + (\omega_{E_t^i} + \omega_{E_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{E_t^{i-1}}^c, \\
 \omega_{Ad_4^i} &= (\omega_{E_t^i} + \omega_{E_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{E_t^{i-1}}^{cmp}
 \end{aligned}
 \tag{4.10}$$

Tabelul 4.3. Valorile toleranțelor adaosurilor de prelucrare pentru structurile dimensionale constructive și tehnologice similare de tip evantai-lanț

Toleranța adaosului, mm	Componente	Suprafețele prelucrate							
		1	2	3	4	1	2	3	4
		Metoda de maxim și minim				Metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor			
ω_{Ad_1}	statistică	3.55	2.1	2.1	2.1	2.11	1.32	1.32	1.32
	structurală	0	4.20	2.1	0	0	2.64	1.32	0
	total	3.55	6.3	4.2	2.1	2.11	3.96	2.64	1.32
ω_{Ad_2}	statistică	1.01	0.58	0.58	0.58	0.43	0.2	0.2	0.2
	structurală	0	1.16	0.58	0	0	0.4	0.2	0
	total	1.01	1.74	1.16	0.58	0.43	0.6	0.4	0.2

Specificul acestor structuri dimensionale constructive și tehnologice similare constă în faptul că cotele tehnologice plasate în formă de evantai de la baza tehnologică (A_t și E_t) se formează în condiții statistice, iar pentru acestea nu se manifestă efectele de compensare a

erorilor. Efectele de compensare a erorilor se manifestă pentru cotele tehnologice C_t și B_t amplasate în lanț după cota E_t , formând structuri complexe în lanț din două elemente $E_t \rightarrow C_t$ și din trei elemente $E_t \rightarrow C_t \rightarrow B_t$ cu începutul în baza tehnologică. Pentru adaosurile de prelucrare, efectul de compensare a erorilor are loc, realizându-se mecanismul conform figurii 2.11.

Din tabelul 4.3 se observă că efectul structural de creștere a toleranței adaosurilor la prelucrarea suprafețelor 3 și 2 este egal cu suma toleranțelor statistice ale cotelor tehnologice de la baza tehnologică până la suprafața luată în considerare. Cea mai nefavorabilă situație este pentru suprafața 2 prelucrată în scopul formării cotei cu numărul 3 în lanțul dimensional. A_t .

Grafic, specificul acestor structuri dimensionale este reflectat în figura 4.28.

Efectele structurale bazate pe compensarea erorilor fac ca strategia de prelucrare conform figurilor 4.26 și 4.27 să fie acceptabilă, fiind corespunzătoare situației reprezentate în figura 4.18.

Structuri dimensionale constructive și tehnologice de tip lanț

Una dintre dimensiunile constructive este dată de la baza constructivă – suprafața 0, iar restul dimensiunilor sunt date în lanț de la suprafețele 1, 2 și 3 (fig. 4.29).

Prelucrarea se realizează prin dimensiuni tehnologice formate pe bază tehnologică 0 (BTC) și în lanț de la bazele tehnologice de reglare 1, 2, 3 (BTR1, BTR2, BTR3).

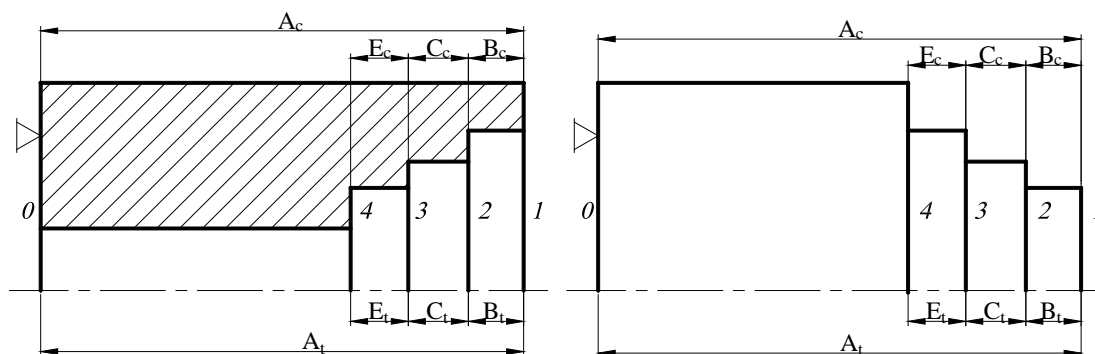


Fig. 4.29. Structuri dimensionale constructive și tehnologice de tip lanț

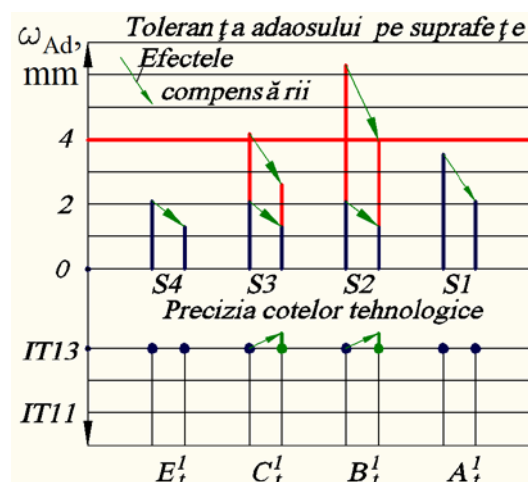


Fig. 4.28. Efecte de micșorare a toleranțelor adaosurilor de prelucrare și de micșorare a preciziei cotelor tehnologice în structurile dimensionale constructive și tehnologice similare de tip evantai-lanț

Din grafurile legăturilor dimensionale (fig. 4.30, b, c) se observă că condițiile de asigurare a preciziei dimensiunilor sunt optime, deoarece precizia dimensiunilor tehnologice nu este mai mare decât precizia dimensiunilor constructive:

$$\omega_{A_t^i} \leq \omega_{A_c^i}, \quad \omega_{B_t^i} \leq \omega_{B_c^i}, \quad \omega_{C_t^i} \leq \omega_{C_c^i}, \quad \omega_{E_t^i} \leq \omega_{E_c^i} \quad (4.11)$$

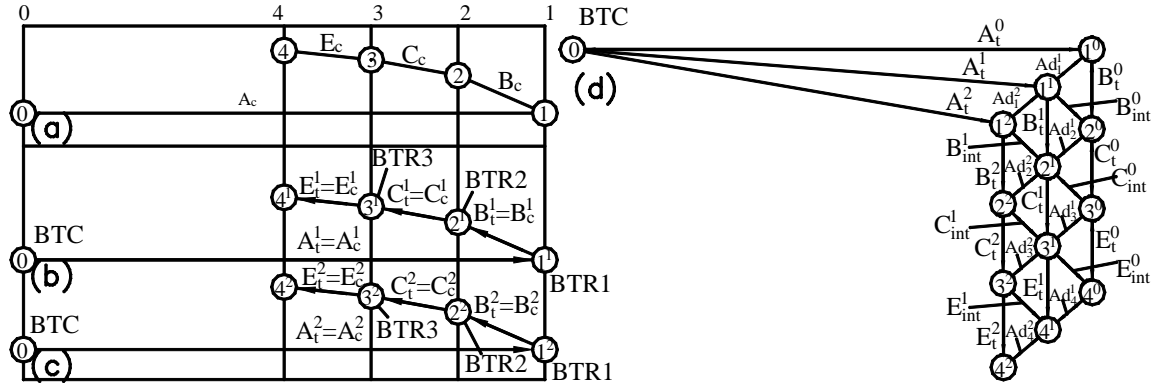


Fig. 4.30. Grafuri ale legăturilor dimensionale pentru dimensiunile constructive (a), dimensiunile tehnologice (b, c) și adaosurile de prelucrare (d) (caz lanț) [112, 116].

Din figura 4.30, d) se constată că legăturile dimensionale pentru adaosurile de prelucrare ale suprafețelor 2, 3 și 4 includ ca elemente constitutive toate adaosurile de prelucrare ale suprafețelor prelucrate anterior. Toleranțele adaosurilor de prelucrare pentru suprafețele 1, 2, 3 și 4 după prima etapă de prelucrare pot fi determinate ca [112]:

$$\begin{aligned} \omega_{Ad_1^i} &= (\omega_{A_t^i} + \omega_{A_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{A_t^{i-1}}^c, \\ \omega_{Ad_2^i} &= (\omega_{B_t^i} + \omega_{B_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{B_t^{i-1}}^c + (\omega_{A_t^i} + \omega_{A_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{A_t^{i-1}}^c, \\ \omega_{Ad_3^i} &= (\omega_{C_t^i} + \omega_{C_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{C_t^{i-1}}^c + (\omega_{B_t^i} + \omega_{B_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{B_t^{i-1}}^c + (\omega_{A_t^i} + \omega_{A_t^{i-1}}) - \\ &\quad - 2 \cdot \omega_{A_t^{i-1}}^c, \\ \omega_{Ad_4^i} &= (\omega_{E_t^i} + \omega_{E_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{E_t^{i-1}}^c + (\omega_{C_t^i} + \omega_{C_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{C_t^{i-1}}^c + \\ &\quad + (\omega_{B_t^i} + \omega_{B_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{B_t^{i-1}}^c + (\omega_{A_t^i} + \omega_{A_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{A_t^{i-1}}^c. \end{aligned} \quad (4.12)$$

Specificul acestor structuri dimensionale constructive și tehnologice similare constă în faptul că cotele tehnologice plasate în formă de lanț de la baza tehnologică, realizându-se structuri de diferite lungimi: cu un element A_t , cu două elemente $A_t \rightarrow B_t$, cu trei elemente $A_t \rightarrow B_t \rightarrow C_t$, cu patru elemente $A_t \rightarrow B_t \rightarrow C_t \rightarrow E_t$ și eventual cu mai multe. Primul element A_t se formează în condiții statistice și pentru acestea nu se manifestă efectele de compensare a erorilor. Efectele de compensare a erorilor se manifestă pentru cotele tehnologice B_t , C_t și

E_t ce formează structuri complexe în lanț (fig. 2.13). Pentru adaosurile de prelucrare, efectul de compensare a erorilor are loc, realizându-se mecanismul reprezentat în figura 2.11. Grafic, specificul acestor structuri dimensionale este reflectat în figura 4.31.

Tabelul 4.4. Valorile toleranțelor adaosurilor de prelucrare pentru structurile dimensionale constructive și tehnologice similare de tip lanț

Toleranța adaosului, mm	Componente	Suprafețele prelucrate							
		1	2	3	4	1	2	3	4
		Metoda de maxim și minim				Metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor			
ω_{Ad^1}	statistică	3.55	2.1	2.1	2.1	2.11	1.32	1.32	1.32
	structurală	0	3.55	5.65	7.75	0	2.11	3.43	4.75
	total	3.55	5.65	7.75	9.85	2.11	3.43	4.75	6.07
ω_{Ad^2}	statistică	1.01	0.58	0.58	0.58	0.43	0.2	0.2	0.2
	structurală	0	1.01	1.59	2.17	0	0.43	0.63	0.83
	total	1.01	1.59	2.17	2.75	0.43	0.63	0.83	1.03

Din tabelul 4.4 se observă că efectul structural de creștere a toleranței adaosurilor la prelucrarea suprafețelor 2, 3 și 4 este egal cu suma toleranțelor statistice ale cotelor tehnologice de la baza tehnologică până la suprafața luată în considerare. Cea mai nefavorabilă situație este pentru suprafața 4 prelucrată în scopul formării cotei cu numărul de ordine 4 în lanțul dimensional.

În acest caz, se poate afirma că efectele structurale bazate pe compensarea erorilor nu sunt suficiente pentru a face strategia de prelucrare conform figurilor 4.29 și 4.30 acceptabilă, aceasta din urmă fiind corespunzătoare situației reprezentate în figura 4.19.

4.4.2. Optimizarea structurilor dimensionale tehnologice prin redimensionarea constructivă

Proiectul tehnologic al produsului și al componentelor acestuia (pieselor) se bazează pe proiectul constructiv de ansamblu, apoi pe al pieselor. În ambele etape se urmărește asigurarea

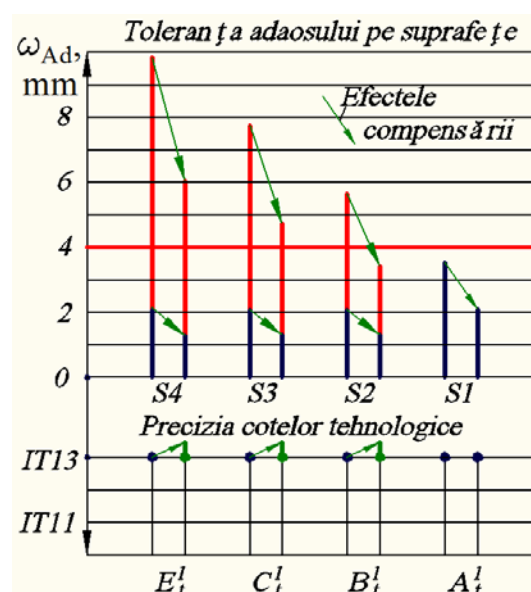


Fig. 4.31. Efecte de micșorare insuficientă a toleranțelor adaosurilor de prelucrare și de micșorare a preciziei cotelor tehnologice în structurile dimensionale constructive și tehnologice similare de tip lanț

funcționalității produsului și pieselor. Proiectarea constructivă a produsului mecanic (ansamblului) constă în crearea structurilor dimensionale constructive și alocarea (distribuirea) toleranțelor componentelor structurale. Experiența acumulată, în acest sens, este una ce prevede diverse variante funcțional echivalente cu consecințe prietenoase sau mai puțin prietenoase pentru tehnologie.

Proiectarea constructivă a pieselor constă în crearea structurii dimensionale a acesteia în toleranțe bazată pe utilizarea precedentelor structurale deja aprobate de practică și considerate acceptabile, dacă nu optime. Din proiectul constructiv de ansamblu în proiectele constructive ale pieselor trec în mod direct și apriori cotele constructive critice, cotele participante în lanțurile dimensionale de ansamblu pentru care s-a făcut alocarea toleranțelor. Alte cote constructive și toleranțele acestora sunt stabilite, pornind de la experiența acumulată în domeniu, existând variante echivalente.

Dacă proiectele tehnologice ale pieselor nu pot satisface pe deplin cerințele de precizie sau cerințele de asigurare tehnologică a preciziei (nu pot fi considerate optimale), atunci există posibilități de reproiectare constructivă a ansamblului sau a pieselor, reproiectare ce se face în ziua de azi în limitele conceptului ingineriei concurențiale (simultane, paralele). Esența reproiectării constructive constă în selectarea unei alte variante constructive de ansamblu sau de piese din numărul celor echivalente funcțional, astfel încât proiectul tehnologic să corespundă cerințelor de calitate. Această procedură în formă de algoritm este dată în figura 4.32.

O altă posibilitate de îmbunătățire a proiectului tehnologic este redimensionarea constructivă echivalentă a piesei în variante cu evaluarea efectelor tehnologice. Piesa este redimensionată altfel, cu recalcularea toleranțelor și abaterilor-limită ale noilor cote constructive, vechile cote constructive și precizia acestora rămânând intacte. Faptul că se testează diferite variante de redimensionare permite să se stabilească așa-numitele precedente tehnologice optimale și precedentele constructive recomandate în calitate de optimale (fig. 4.32).

Motivul redimensionării constructive este neasigurarea tehnologică a preciziei de prelucrare din cauza toleranțelor mari ale adaosurilor de prelucrare (fig. 4.31). 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 din contul creșterii preciziei prelucrărilor.

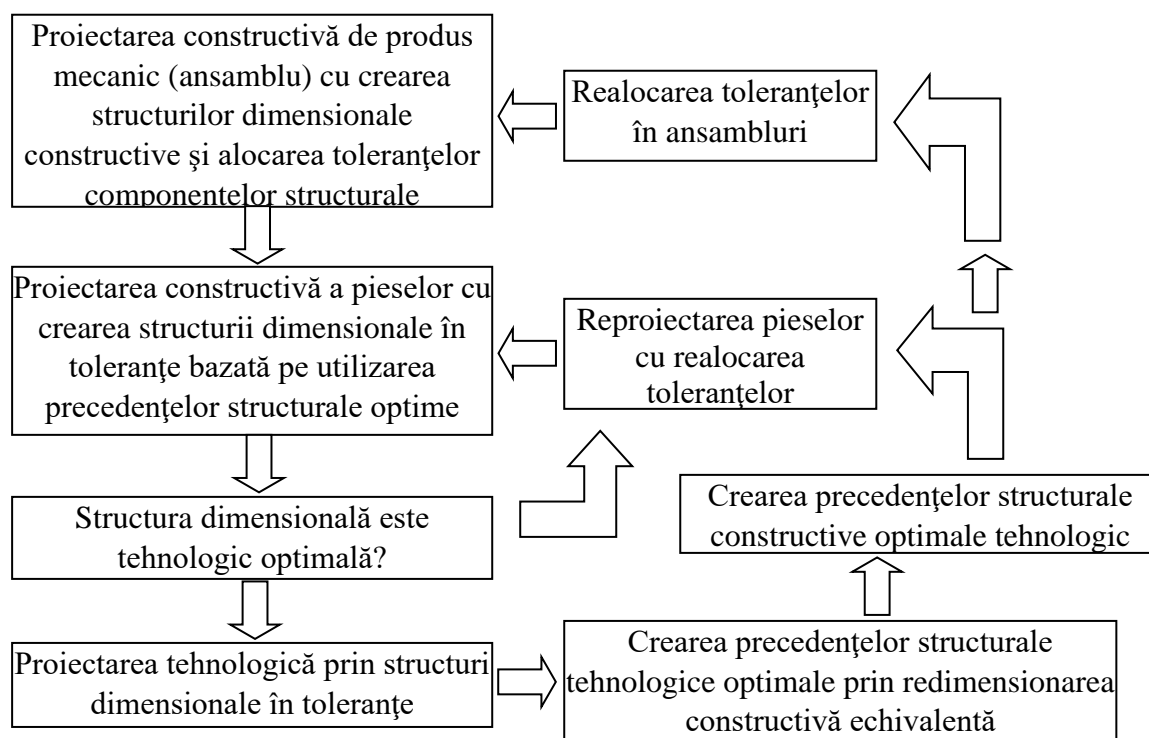


Fig. 4.32. Algoritmul de redimensionare constructivă și de creare a precedentelor structurale tehnologice și constructive optime

Vom analiza efectele redimensionării constructive echivalente în condițiile exemplului enunțat în compartimentul 4.4.1.

Redimensionarea constructivă echivalentă cu crearea structurilor dimensionale constructive și tehnologice evantai deplasat–evantai

Una dintre dimensiunile constructive este dată de la baza constructivă – suprafața 0, iar restul dimensiunilor sunt date de la o altă bază constructivă – suprafața 1 (fig. 4.33). Prelucrarea se realizează prin cote tehnologice formate exclusiv de la baza tehnologică 0 (BTC).

Din grafurile legăturilor dimensionale (fig. 4.34, b, c) se observă că condițiile de asigurare a preciziei cotelor nu sunt optime, deoarece preciziile dimensiunilor tehnologice B_i , C_i și E_i sunt constrânse, condiționate reciproc prin cota tehnologică A_i în conformitate cu relațiile:

$$\begin{aligned}
 \omega_{A_i^i} &\leq \omega_{A_c^i}, & \omega_{B_i^i} + \omega_{A_i^i} - 2 \cdot \omega_{I^i 2^i}^c &\leq \omega_{B_c^i}, \\
 \omega_{C_i^i} + \omega_{A_i^i} - 2 \cdot \omega_{I^i 3^i}^c &\leq \omega_{C_c^i}, & \omega_{E_i^i} + \omega_{A_i^i} - 2 \cdot \omega_{I^i 4^i}^c &\leq \omega_{E_c^i}
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

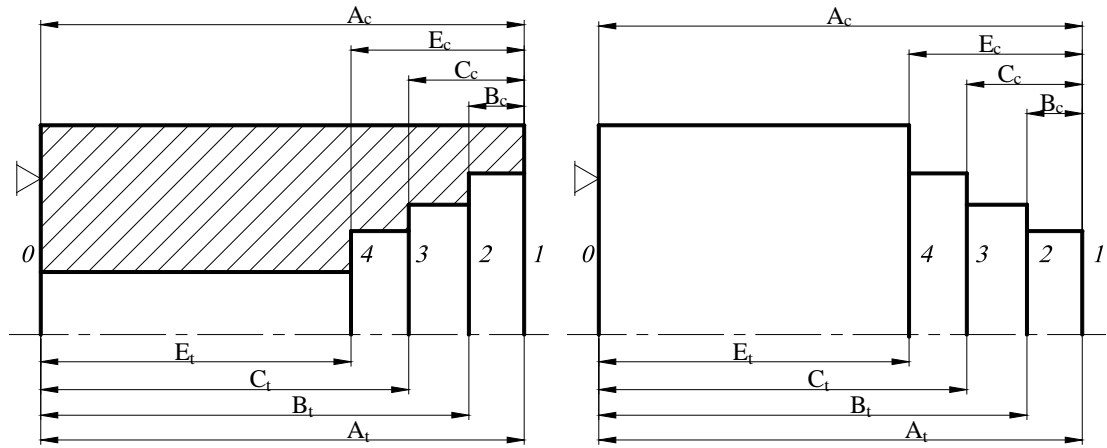


Fig. 4.33. Structuri dimensionale constructive și tehnologice de tip evantai deplasat–evantai

Rezultatul constrângerilor este sporirea preciziei tuturor cotelor tehnologice (micșorarea toleranțelor cotelor tehnologice – micșorarea numărului de unități de toleranță) în raport cu cazul ideal de egalitate a preciziilor cotelor constructive și tehnologice.

Micșorarea câmpurilor de toleranță a cotelor tehnologice: A_t^i , B_t^i , C_t^i și E_t^i este reprezentată de coeficienții α , β , γ și δ . Compensarea erorilor este dată prin coeficientul u și aplicat cotelor tehnologice mai mici din fiecare cuplu posibil.

Condițiile (4.13) pot fi transcrise în forma:

$$\begin{aligned}
 \alpha \cdot i_{A_t^i} \cdot a_{A_t^i} &\leq \omega_{A_c^i}, \\
 \beta \cdot i_{B_t^i} \cdot a_{B_t^i} + \alpha \cdot i_{A_t^i} \cdot a_{A_t^i} - u \cdot \beta \cdot i_{B_t^i} \cdot a_{B_t^i} &\leq \omega_{B_c^i}, \\
 \gamma \cdot i_{C_t^i} \cdot a_{C_t^i} + \alpha \cdot i_{A_t^i} \cdot a_{A_t^i} - u \cdot \gamma \cdot i_{C_t^i} \cdot a_{C_t^i} &\leq \omega_{C_c^i}, \\
 \delta \cdot i_{E_t^i} \cdot a_{E_t^i} + \alpha \cdot i_{A_t^i} \cdot a_{A_t^i} - u \cdot \delta \cdot i_{E_t^i} \cdot a_{E_t^i} &\leq \omega_{E_c^i}
 \end{aligned}
 \tag{4.14}$$

Acest sistem are o infinitate de soluții reprezentate prin următoarele relații:

$$\beta = \frac{\omega_{B_c^i} - \alpha \cdot i_{A_t^i} \cdot a_{A_t^i}}{(1-u) \cdot i_{B_t^i} \cdot a_{B_t^i}}, \quad \gamma = \frac{\omega_{C_c^i} - \alpha \cdot i_{A_t^i} \cdot a_{A_t^i}}{(1-u) \cdot i_{C_t^i} \cdot a_{C_t^i}}, \quad \delta = \frac{\omega_{E_c^i} - \alpha \cdot i_{A_t^i} \cdot a_{A_t^i}}{(1-u) \cdot i_{E_t^i} \cdot a_{E_t^i}}
 \tag{4.15}$$

Soluția ideală ar fi formarea tuturor cotelor la aceeași treaptă de precizie, adică la același număr de unități de toleranță. Acest lucru nu este posibil, deoarece ar putea apărea situația când două cote tehnologice să fie formate la același număr de unități de toleranță, altele având o precizie mai joasă, chiar mai joasă de treapta 13 (a cotei constructive) (tab. 4.5).

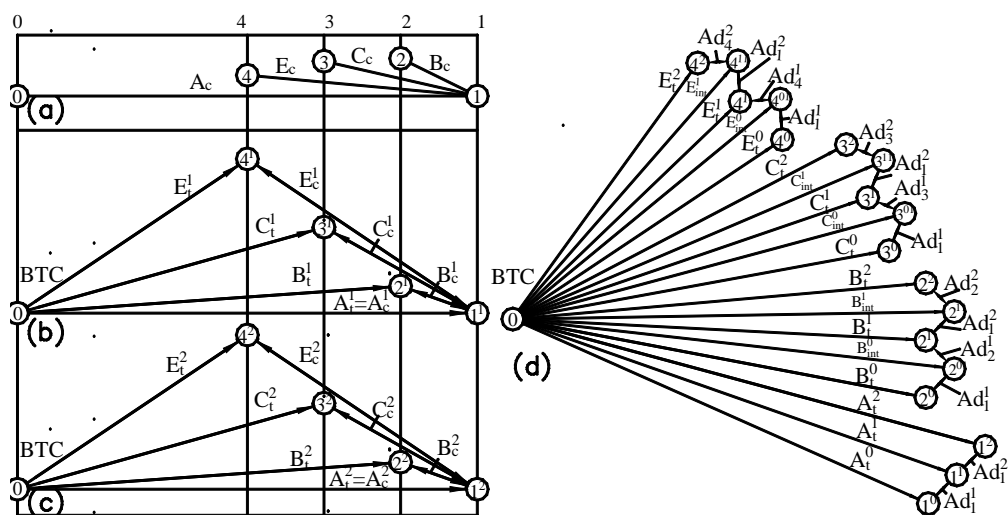


Fig. 4.34. Grafuri ale legăturilor dimensionale pentru dimensiunile constructive (a), dimensiunile tehnologice (b, c) și adaosurile de prelucrare (d) (caz evantai deplasat–evantai) [112].

Tabelul 4.5. Măsura creșterii preciziei dimensiunilor tehnologice pentru structurile dimensionale constructive și tehnologice (cazul evantai deplasat–evantai)

Faza	A_c, B_c, C_c, E_c	Metoda de maxim și minim				Metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor			
		A_t	B_t	C_t	E_t	A_t	B_t	C_t	E_t
		Numarul de unități de toleranță, a ; treapta de precizie							
1	250	72	72	153	271	83	83	193	350
	13	10–11	10–11	12	13	10–11	10–11	12–13	>13
2	100	35	35	55	95	41	41	66	119
	11	<9	<9	9–10	11	9	9	10	>11

Din figura 4.34, d) se constată că legăturile dimensionale pentru adaosurile de prelucrare ale suprafețelor 2, 3 și 4 includ ca elemente constitutive toleranțele de prelucrare ale suprafeței 1 (Ad_1^1 sau Ad_1^2). Toleranțele adaosurilor de prelucrare pentru suprafețele 1, 2, 3 și 4 după cele două etape de prelucrare pot fi determinate astfel:

$$\begin{aligned}
 \omega_{Ad_1^1} &= (\omega_{A_t^1} + \omega_{A_t^{1-1}}) - 2 \cdot \omega_{A_t^{1-1}}^c, \\
 \omega_{Ad_2^1} &= (\omega_{B_t^1} + \omega_{B_t^{1-1}}) - 2 \cdot \omega_{B_t^{1-1}}^c + (\omega_{A_t^1} + \omega_{A_t^{1-1}}) - 2 \cdot \omega_{A_t^{1-1}}^c, \\
 \omega_{Ad_3^1} &= (\omega_{C_t^1} + \omega_{C_t^{1-1}}) - 2 \cdot \omega_{C_t^{1-1}}^c + (\omega_{A_t^1} + \omega_{A_t^{1-1}}) - 2 \cdot \omega_{A_t^{1-1}}^c, \\
 \omega_{Ad_4^1} &= (\omega_{E_t^1} + \omega_{E_t^{1-1}}) - 2 \cdot \omega_{E_t^{1-1}}^c + (\omega_{A_t^1} + \omega_{A_t^{1-1}}) - 2 \cdot \omega_{A_t^{1-1}}^c
 \end{aligned}
 \tag{4.16}$$

Tabelul 4.6. Valorile toleranțelor adaosurilor de prelucrare pentru structurile dimensionale constructive și tehnologice (cazul evantai deplasat–evantai)

Toleranța adaosului, mm	Componente	Suprafețele prelucrate							
		1	2	3	4	1	2	3	4
		Metoda de maxim și minim				Metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor			
ω_{Ad^1}	statistică	3.55	3.17	2.73	2.1	2.11	1.91	1.65	1.32
	structurală	0	0	0	0	0	0	0	0
	total	3.55	3.17	2.73	2.1	2.11	4.02	3.76	3.43
ω_{Ad^2}	statistică	1.01	0.88	0.76	0.58	0.43	0.38	0.32	0.2
	structurală	0	0	0	0	0	0	0	0
	total	1.01	0.88	0.76	0.58	0.43	0.38	0.32	0.2

Din tabelul 4.6 se observă că redimensionarea constructivă echivalentă analizată a permis formarea cotelor tehnologice la precizia statistică, dar din contul creșterii preciziei cotelor tehnologice (tab. 4.5, fig. 4.35).

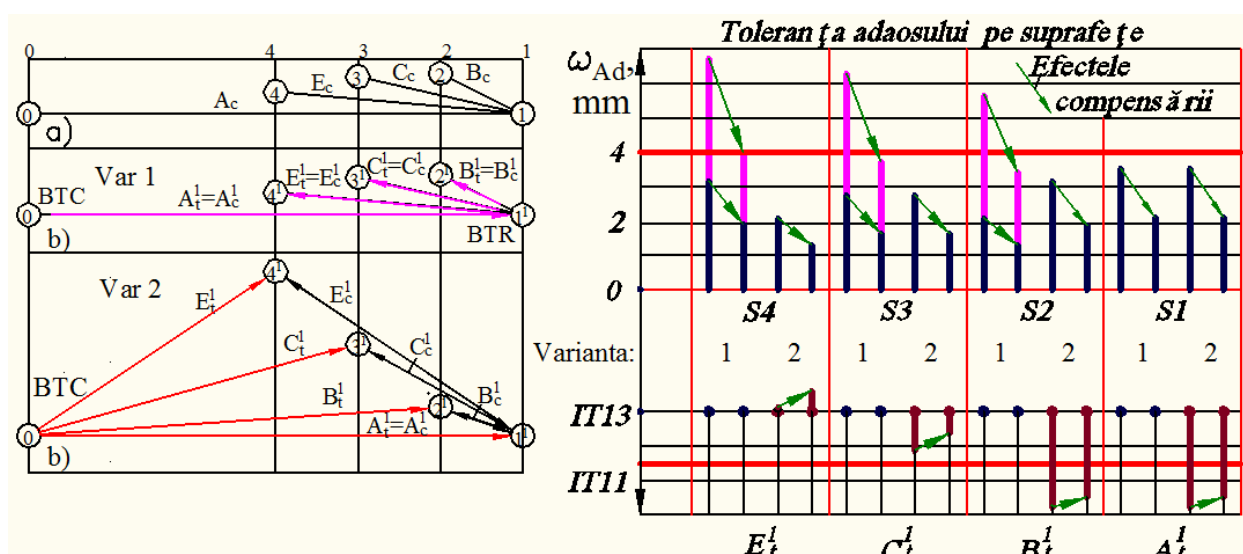


Fig. 4.35. Efectele redimensionării constructive echivalente: micșorarea toleranțelor adaosurilor de prelucrare din contul creșterii preciziei de prelucrare

Creșterea preciziei de prelucrare este limitată de capacitatea tehnologică a mașinii-unelte. Scopul de micșorare a toleranței adaosurilor de prelucrare nu este îndreptățit în cazul depășirii limitei de precizie a sistemului tehnologic (fig. 4.36).

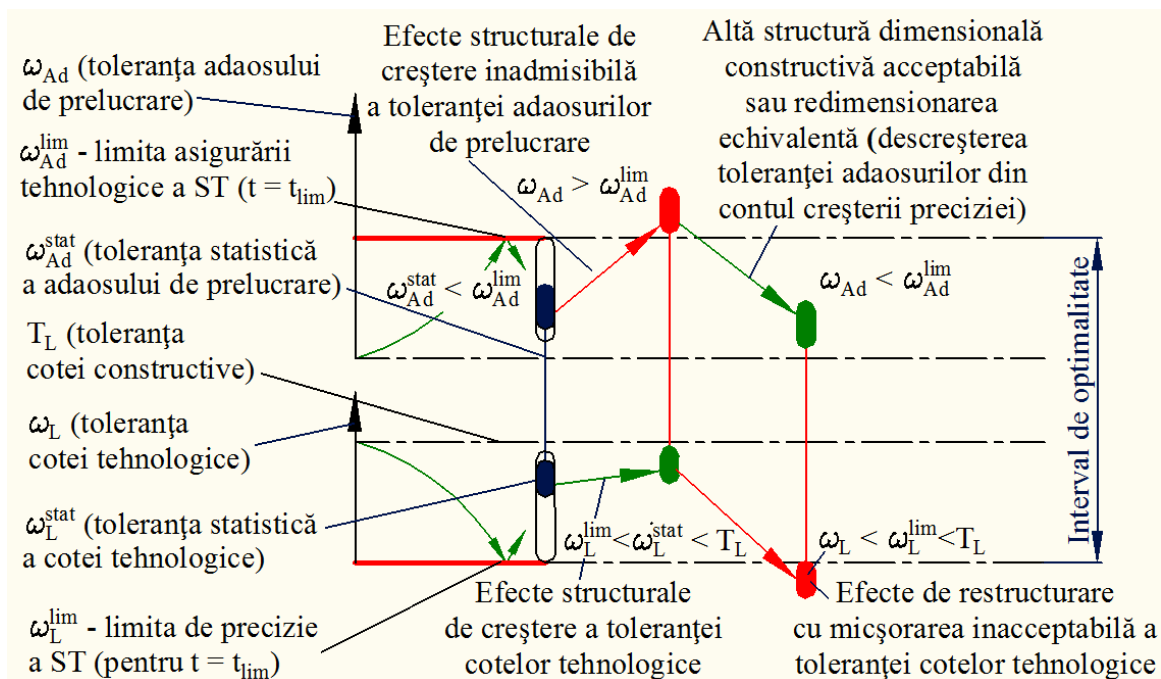


Fig. 4.36. Efecte de depășire a limitei de precizie a sistemului tehnologic la redimensionarea constructivă echivalentă

Redimensionarea constructivă echivalentă cu crearea structurilor dimensionale constructive și tehnologice lanț-avantai

Una dintre dimensiunile constructive este dată de la baza constructivă – suprafața 0, iar restul dimensiunilor sunt date în lanț de la suprafața 4 (fig. 4.37). Prelucrarea se realizează prin dimensiuni tehnologice de la baza tehnologică 0 (BTC).

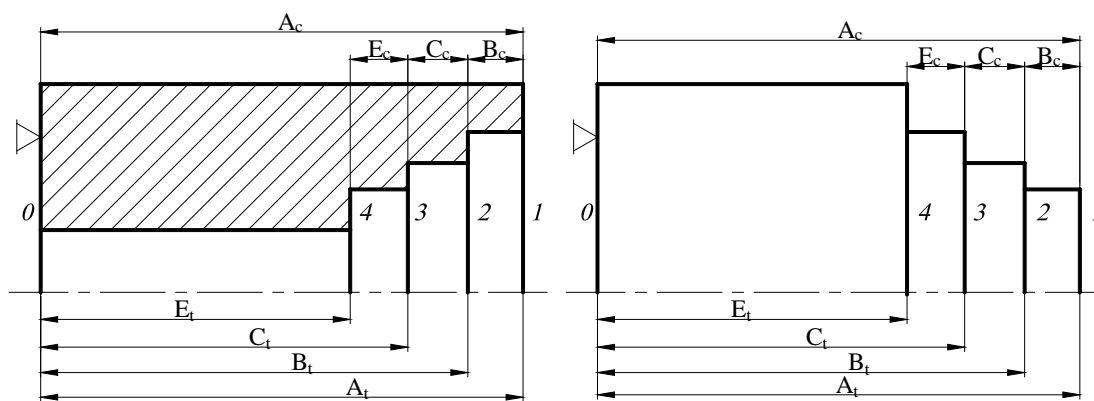
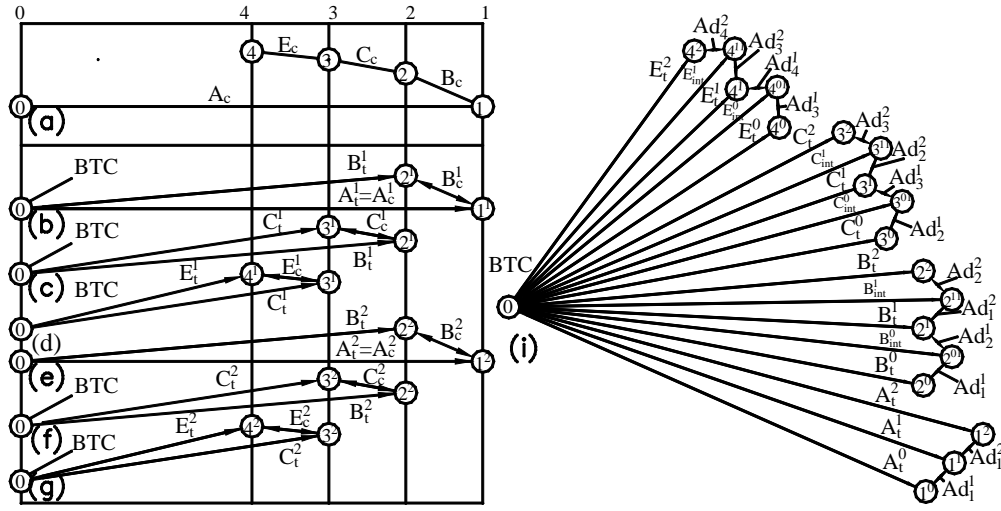


Fig. 4.37. Structuri dimensionale constructive și tehnologice de tip lanț-avantai

Din grafurile legăturilor dimensionale (fig. 4.38, b, c) se observă că condițiile de asigurare a preciziei dimensiunilor nu sunt optime, deoarece preciziile dimensiunilor tehnologice B_t , C_t și E_t sunt mai mari decât precizia dimensiunilor constructive respective:

$$\begin{aligned}
\omega_{A_t^i} &\leq \omega_{A_c^i}, \\
\omega_{B_t^i} + \omega_{A_t^i} - 2 \cdot \omega_{1^i 2^i}^c &\leq \omega_{B_c^i}, \\
\omega_{C_t^i} + \omega_{B_t^i} - 2 \cdot \omega_{2^i 3^i}^c &\leq \omega_{C_c^i}, \\
\omega_{E_t^i} + \omega_{C_t^i} - 2 \cdot \omega_{3^i 4^i}^c &\leq \omega_{E_c^i}
\end{aligned}
\tag{4.17}$$



**Fig. 4.38. Grafuri ale legăturilor dimensionale pentru dimensiunile constructive (a), dimensiunile tehnologice (b, c, d, e, f, g) și adaosurile de prelucrare (i) (cazul lanț-
evantai) [112].**

Micșorarea câmpurilor de toleranță a cotelor tehnologice: A_t^i , B_t^i , C_t^i și E_t^i este reprezentată de coeficienții α , β , γ și δ . Compensarea erorilor este dată prin coeficientul u și aplicat cotelor tehnologice mai mici din fiecare cuplu posibil.

Condițiile (4.17) pot fi transcrise în forma:

$$\begin{aligned}
\alpha \cdot i_{A_t^i} \cdot a_{A_t^i} &\leq \omega_{A_c^i}, \\
\beta \cdot i_{B_t^i} \cdot a_{B_t^i} + \alpha \cdot i_{A_t^i} \cdot a_{A_t^i} - u \cdot \beta \cdot i_{B_t^i} \cdot a_{B_t^i} &\leq \omega_{B_c^i}, \\
\gamma \cdot i_{C_t^i} \cdot a_{C_t^i} + \beta \cdot i_{B_t^i} \cdot a_{B_t^i} - u \cdot \gamma \cdot i_{C_t^i} \cdot a_{C_t^i} &\leq \omega_{C_c^i}, \\
\delta \cdot i_{E_t^i} \cdot a_{E_t^i} + \gamma \cdot i_{C_t^i} \cdot a_{C_t^i} - u \cdot \delta \cdot i_{E_t^i} \cdot a_{E_t^i} &\leq \omega_{E_c^i}
\end{aligned}
\tag{4.18}$$

Acest sistem are o infinitate de soluții reprezentate prin următoarele relații:

$$\beta = \frac{\omega_{B_c^i} - \alpha \cdot i_{A_t^i} \cdot a_{A_t^i}}{(1-u) \cdot i_{B_t^i} \cdot a_{B_t^i}}, \quad \gamma = \frac{\omega_{C_c^i} - \beta \cdot i_{B_t^i} \cdot a_{B_t^i}}{(1-u) \cdot i_{C_t^i} \cdot a_{C_t^i}}, \quad \delta = \frac{\omega_{E_c^i} - \gamma \cdot i_{C_t^i} \cdot a_{C_t^i}}{(1-u) \cdot i_{E_t^i} \cdot a_{E_t^i}}
\tag{4.19}$$

Soluția acceptabilă este aceeași ca și în cazul precedent – precizia a două cote tehnologice egală, restul pot avea precizii mai joase (tabelul 4.7).

Tabelul 4.7. Măsura creșterii preciziei dimensiunilor tehnologice pentru structurile dimensionale constructive și tehnologice (cazul lanț–evantai)

Faza	$A_c, B_c,$ C_c, E_c	Metoda de maxim și minim				Metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor			
		A_t	B_t	C_t	E_t	A_t	B_t	C_t	E_t
	Numarul de unități de toleranță, a ; treapta de precizie								
1	250 13	72 10–11	72 10–11	96 11	117 11–12	84 10–11	84 10–11	152 11–12	125 11–12
2	100 11	35 <9	35 <9	47 9–10	57 9–10	41 9	41 9	74 10	61 10

Din figura 4.38, d) se constată că legăturile dimensionale pentru adaosurile de prelucrare ale suprafețelor 2, 3 și 4 includ ca elemente constitutive adaosurile de prelucrare ale suprafeței prelucrate anterior. Toleranțele adaosurilor de prelucrare pentru suprafețele 1, 2, 3 și 4 după cele două etape de prelucrare pot fi determinate astfel:

$$\begin{aligned}
 \omega_{Ad1^i} &= (\omega_{A_t^i} + \omega_{A_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{1^i 1^{i-1}}^c, \\
 \omega_{Ad2^i} &= (\omega_{B_t^i} + \omega_{B_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{2^i 2^{i-1}}^c + (\omega_{A_t^i} + \omega_{A_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{1^i 1^{i-1}}^c, \\
 \omega_{Ad3^i} &= (\omega_{C_t^i} + \omega_{C_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{3^i 3^{i-1}}^c + (\omega_{B_t^i} + \omega_{B_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{2^i 2^{i-1}}^c, \\
 \omega_{Ad4^i} &= (\omega_{E_t^i} + \omega_{E_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{4^i 4^{i-1}}^c + (\omega_{C_t^i} + \omega_{C_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{3^i 3^{i-1}}^c.
 \end{aligned}
 \tag{4.20}$$

Tabelul 4.8. Valorile toleranțelor adaosurilor de prelucrare pentru structurile dimensionale constructive și tehnologice (cazul lanț–evantai)

Toleranța adaosului, mm	Componente	Suprafețele prelucrate							
		1	2	3	4	1	2	3	4
		Metoda de maxim și minim				Metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor			
ω_{Ad1}	statistică	3.55	3.17	2.73	2.1	2.11	1.91	1.65	1.32
	structurală	0	3.55	3.17	2.73	0	2.11	1.91	1.65
	total	3.55	6.72	5.90	4.83	2.11	4.02	3.56	2.97
ω_{Ad2}	statistică	1.01	0.88	0.76	0.58	0.43	0.38	0.32	0.2
	structurală	0	1.01	0.88	0.76	0	0.43	0.38	0.32
	total	1.01	1.89	1.64	1.34	0.43	0.81	0.7	0.52

Din tabelul 4.8 se observă că, deoarece redimensionarea constructivă echivalentă se face în cupluri $B \rightarrow A$, $C \rightarrow B$, $E \rightarrow C$, componenta structurală de creștere a toleranței adaosurilor de prelucrare este egală cu toleranța statistică a cotei A pentru cota B , toleranța statistică a cotei B pentru cota C , toleranța statistică a cotei C pentru cota E .

Redimensionarea constructivă echivalentă cu crearea structurilor dimensionale constructive și tehnologice lanț-evantai deplasat

Una dintre dimensiunile constructive este dată de la baza constructivă – suprafața 0, iar restul dimensiunilor sunt date în lanț de la suprafața 4 (fig. 4.39). Prelucrarea se realizează printr-o dimensiune tehnologică formată de la baza tehnologică de contact (suprafața 0), iar restul dimensiunilor tehnologice se formează de la baza tehnologică de reglare (BTR) – suprafața 1.

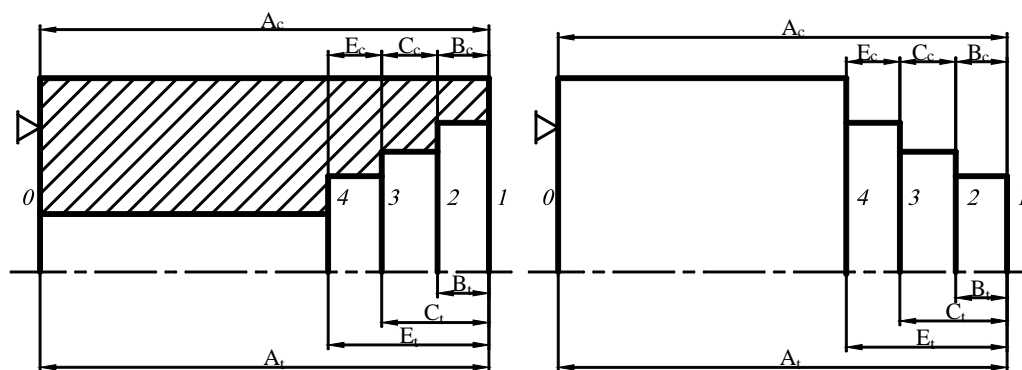


Fig. 4.39. Structuri dimensionale constructive și tehnologice de tip lanț-evantai deplasat

Din grafurile legăturilor dimensionale (fig. 4.34, b, c) se observă că condițiile de asigurare a preciziei cotelor nu sunt optime, deoarece preciziile dimensiunilor tehnologice B_t , C_t și E_t sunt constrânse, condiționate reciproc prin cota tehnologică A_t în conformitate cu relațiile:

$$\omega_{A_t^i} \leq \omega_{A_c^i}, \quad \omega_{B_t^i} \leq \omega_{B_c^i}, \quad \omega_{C_t^i} + \omega_{B_t^i} - 2 \cdot \omega_{2^i 3^i}^c \leq \omega_{C_c^i}, \quad \omega_{E_t^i} + \omega_{C_t^i} - 2 \cdot \omega_{3^i 4^i}^c \leq \omega_{E_c^i} \quad (4.21)$$

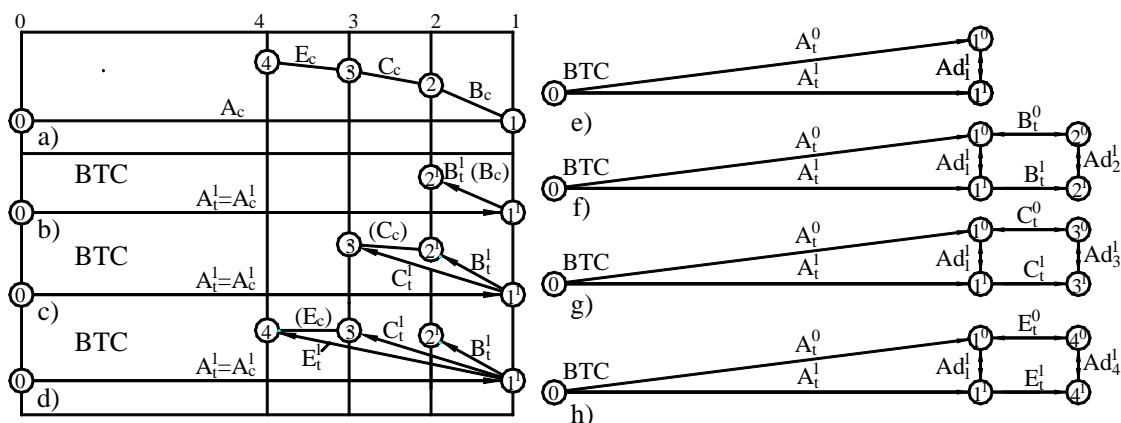


Fig. 4.40. Grafuri ale legăturilor dimensionale pentru dimensiunile constructive (a), dimensiunile tehnologice (b, c, d) și adaosurile de prelucrare (e-h) (cazul lanț-evantai deplasat).

Rezultatul constrângerilor este sporirea preciziei tuturor cotelor tehnologice (micșorarea toleranțele cotelor tehnologice – micșorarea numărului de unități de toleranță) cu excepția cotei A_t^i , care se formează la nivel statistic independent de alte cote.

Micșorarea câmpurilor de toleranță a cotelor tehnologice: B_t^i , C_t^i și E_t^i este reprezentată de coeficienții β , γ și δ . Compensarea erorilor este dată prin coeficientul u și aplicat cotelor tehnologice mai mici din fiecare cuplu posibil.

Condițiile (4.21) pot fi transcrise în forma:

$$\begin{aligned}\beta \cdot i_{B_t^i} \cdot a_{B_t^i} &\leq \omega_{B_c^i}, \\ \gamma \cdot i_{C_t^i} \cdot a_{C_t^i} + \beta \cdot i_{B_t^i} \cdot a_{B_t^i} - u \cdot \gamma \cdot i_{C_t^i} \cdot a_{C_t^i} &\leq \omega_{C_c^i}, \\ \delta \cdot i_{E_t^i} \cdot a_{E_t^i} + \gamma \cdot i_{C_t^i} \cdot a_{C_t^i} - u \cdot \delta \cdot i_{E_t^i} \cdot a_{E_t^i} &\leq \omega_{E_c^i}\end{aligned}\quad 4.22)$$

Acest sistem are o infinitate de soluții reprezentate prin următoarele relații:

$$\begin{aligned}\gamma &= \frac{\omega_{C_c^i} - \beta \cdot i_{B_t^i} \cdot a_{B_t^i}}{(1-u) \cdot i_{C_t^i} \cdot a_{C_t^i}}, \\ \delta &= \frac{\omega_{E_c^i} - \gamma \cdot i_{C_t^i} \cdot a_{C_t^i}}{(1-u) \cdot i_{E_t^i} \cdot a_{E_t^i}}\end{aligned}\quad 4.23)$$

Soluția acceptabilă este aceeași ca și în cazul precedent – precizia a două cote tehnologice egală, restul pot avea precizii mai joase (tabelul 4.9).

Tabelul 4.9. Măsura creșterii preciziei dimensiunilor tehnologice pentru structurile dimensionale constructive și tehnologice (cazul lanț–evantai deplasat)

Faza	$A_c, B_c,$ C_c, E_c	Metoda de maxim și minim				Metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor			
		A_t	B_t	C_t	E_t	A_t	B_t	C_t	E_t
	Numarul de unități de toleranță, a ; treapta de precizie								
1	250 13	250 13	145 <12	133 11–12	133 11–12	250 10–11	147 <12	147 <12	146 <12
2	100 11	100 11	54 9–10	54 9–10	65 10	100 11	59 <10	59 <10	73 10–11

Din figura 4.40, e-h) se constată că legăturile dimensionale pentru adaosurile de prelucrare ale suprafețelor 2, 3 și 4 includ ca elemente constitutive adaosurile de prelucrare ale suprafeței 1 prelucrate anterior. Toleranțele adaosurilor de prelucrare pentru suprafețele 1, 2, 3 și 4 după cele două etape de prelucrare pot fi determinate astfel:

$$\begin{aligned}\omega_{Ad_1^i} &= (\omega_{A_t^i} + \omega_{A_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{A_t^{i-1}}^c, \\ \omega_{Ad_2^i} &= (\omega_{B_t^i} + \omega_{B_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{B_t^{i-1}}^c + (\omega_{A_t^i} + \omega_{A_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{A_t^{i-1}}^c, \\ \omega_{Ad_3^i} &= (\omega_{C_t^i} + \omega_{C_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{C_t^{i-1}}^c + (\omega_{A_t^i} + \omega_{A_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{A_t^{i-1}}^c, \\ \omega_{Ad_4^i} &= (\omega_{E_t^i} + \omega_{E_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{E_t^{i-1}}^c + (\omega_{A_t^i} + \omega_{A_t^{i-1}}) - 2 \cdot \omega_{A_t^{i-1}}^c.\end{aligned}\quad (4.24)$$

Tabelul 4.10. Valorile toleranțelor adaosurilor de prelucrare pentru structurile dimensionale constructive și tehnologice (cazul lanț-evantai deplasat)

Toleranța adaosului, mm	Componente	Suprafețele prelucrate							
		1	2	3	4	1	2	3	4
		Metoda de maxim și minim				Metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor			
ω_{Ad^1}	statistică	3.55	2.1	2.73	3.17	2.11	1.32	1.65	1.91
	structurală	0	3.55	2.1	2.73	0	2.11	1.32	1.65
	total	3.55	5.65	4.83	5.9	2.11	3.43	2.97	3.56
ω_{Ad^2}	statistică	1.01	0.64	0.76	0.82	0.43	0.14	0.32	0.44
	structurală	0	1.01	0.64	0.76	0	0.43	0.14	0.32
	total	1.01	1.65	1.4	1.58	0.43	0.57	0.46	0.76

Din tabelul 4.10 se observă că componenta structurală de creștere a toleranței adaosurilor de prelucrare este egală cu toleranța statistică a cotei A pentru cota B , toleranța statistică a cotei B pentru cota C , toleranța statistică a cotei C pentru cota E .

Efectele redimensionării constructive echivalente sunt analizate, utilizând figura 4.41.

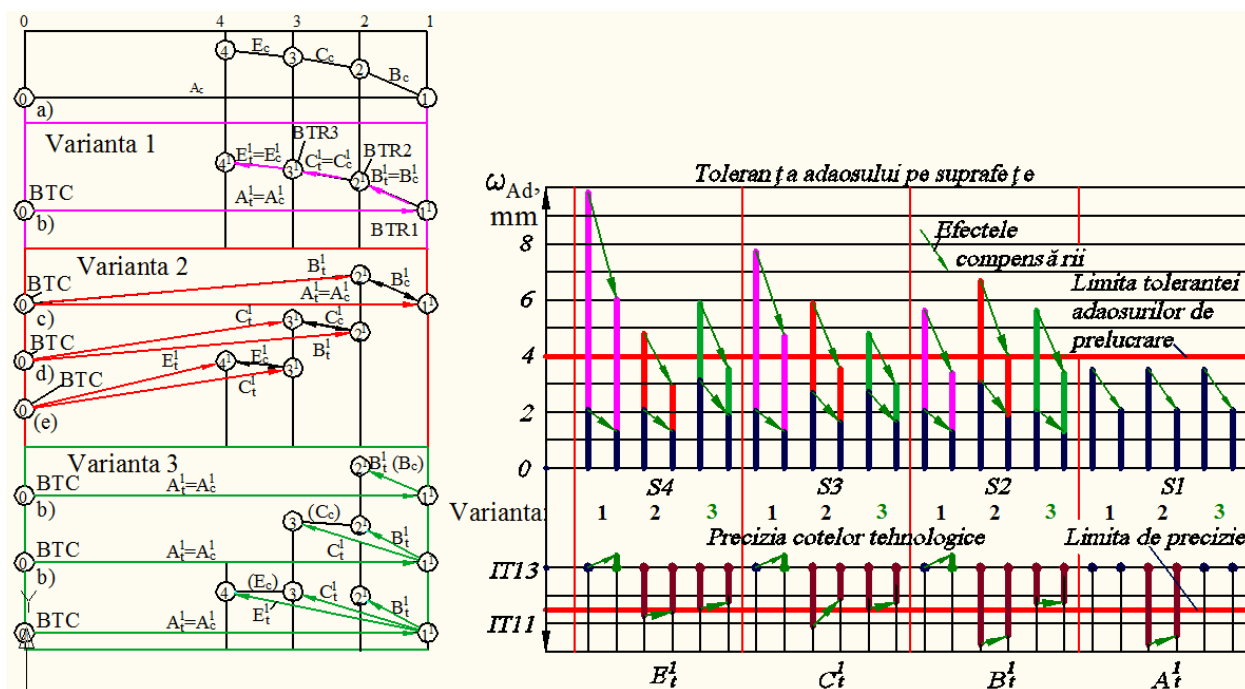


Fig. 4.41. Efectele redimensionării constructive echivalente asupra optimalității structurilor dimensionale tehnologice

Se observă ca ambele variante de redimensionare atât de tip lanț-evantai, cât și de tip lanț-evantai deplasat provoacă micșorarea substanțială a toleranțelor adaosurilor de prelucrare și nu este depășită limita de precizie a sistemului tehnologic (fig. 4.42). Totuși, este preferabilă schema lanț-evantai deplasat, care necesită o mai mică creștere a preciziei cotelor tehnologice.

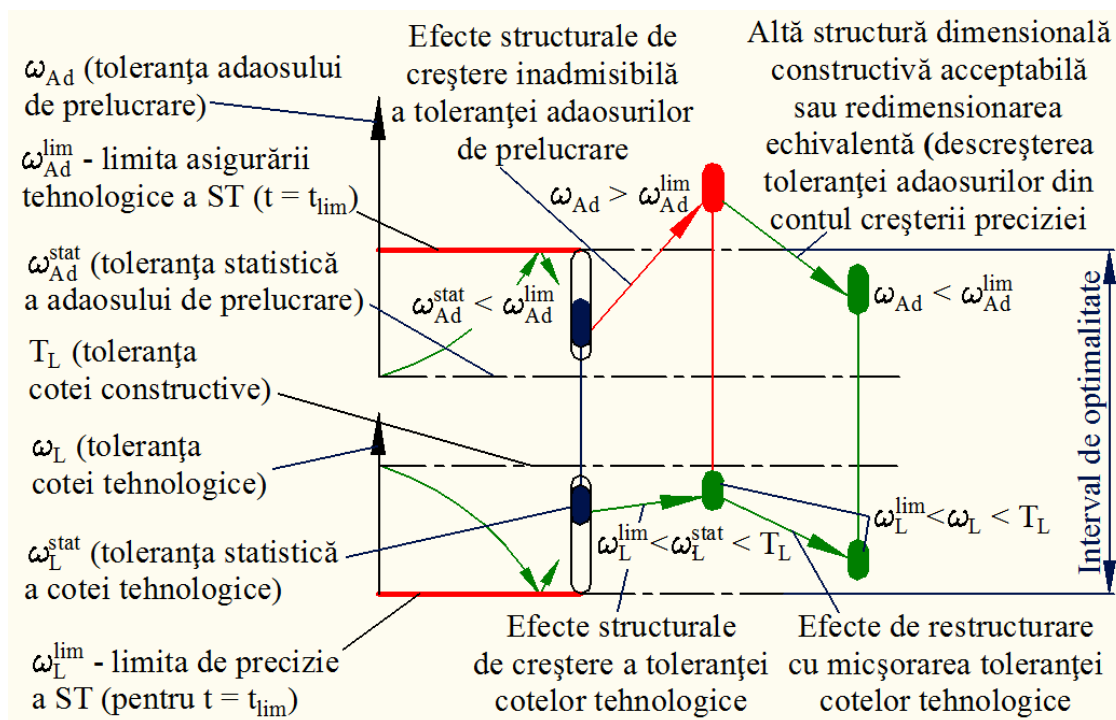


Fig. 4.42. Redimensionarea constructivă echivalentă cu efecte de nedepășire a limitelor asigurării tehnologice și celei de precizie a sistemului tehnologic

Redimensionarea constructivă echivalentă devine foarte importantă pentru tehnologiile realizate pe mașini-unelte CNC conform prevederilor conceptului prelucrării la viteze mari (High Speed Machining) care necesită o stabilitate sporită a procesului de așchiere realizată la adâncimi mici de așchiere (valori mici a toleranței adaosurilor de prelucrare) (fig. 4.43). În schimb, datorită forțelor mici de așchiere și a performanțelor înalte de rigiditate a mașinilor-unelște CNC este posibilă o precizie substanțial mai înaltă.

În structurile dimensionale tehnologice analizate se manifestă două situații deosebite (fig. 4.44):

- cotele constructive A_c și B_c au aceeași direcție și se cumulează ($A_c + B_c$) pentru a defini cota tehnologică B_t ;
- cotele constructive A_c și B_c au direcții opuse și se scad ($A_c - B_c$) pentru a defini cota tehnologică B_t .

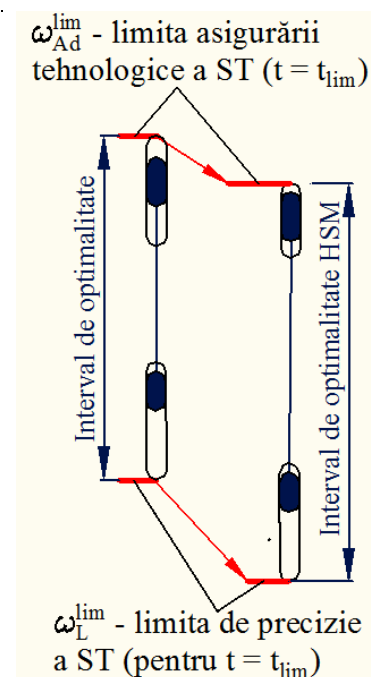


Fig. 4.43. Modificarea valorii și poziției intervalului de optimalitate pentru prelucrării la viteze mari

În cazul $A_c = 100(IT13)$ și $B_c / A_c = 0.02...0.98$, numărul de unități de toleranță a_{B_t} ale cotei tehnologice B_t este între 0,13...0,8 din numărul de unități de toleranță ale dimensiunii constructive B_c (fig. 4.45). Precizia necesară dimensiunii tehnologice crește de la IT13 la IT9...IT12. Această schemă tehnologică pentru dimensiuni mici este deosebit de dezavantajoasă.

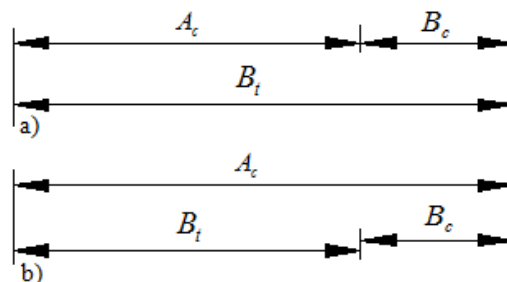


Fig. 4.44. Cazuri de formare a cotei tehnologice B_t :

$$B_t = A_c + B_c \text{ și } B_t = A_c - B_c.$$

Structurile dimensionale constructive reale sunt foarte complexe și variate, astfel încât optimalitatea unor secvențe ale structurii exclude asigurarea optimalității altor secvențe, fiind necesare adaptări structurale reciproce.

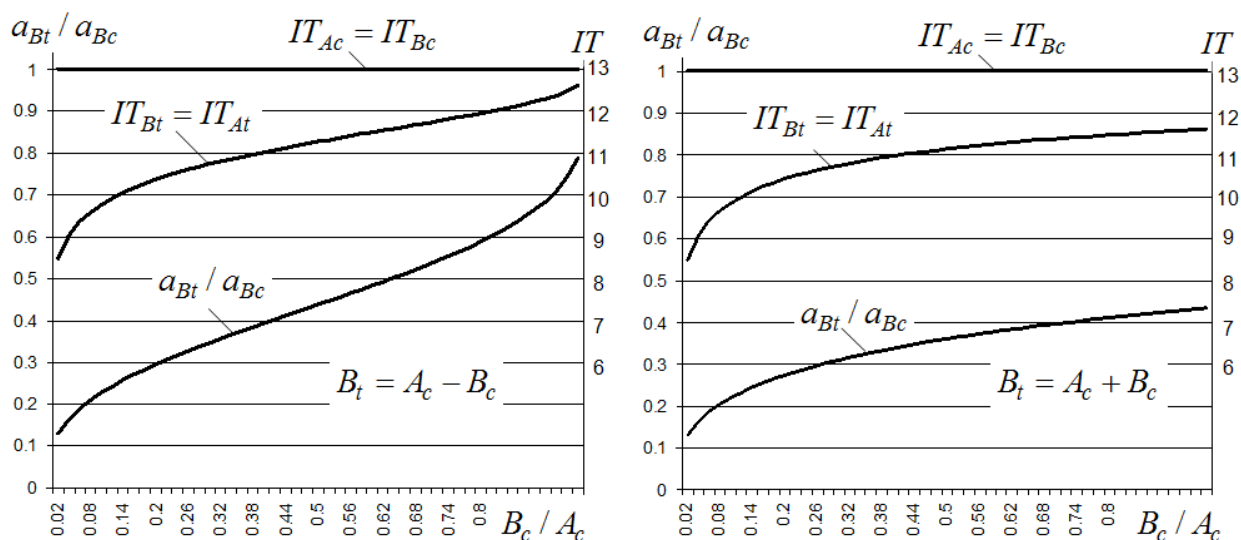


Fig. 4.45. Creșterea preciziei dimensiunilor tehnologice în comparație cu precizia dimensiunilor constructive [94]

Schemele de prelucrare cu formarea dimensiunilor tehnologice de la unica bază tehnologică sunt caracterizate de condiții nefavorabile pentru formarea preciziei dimensiunilor constructive derivate, deoarece precizia dimensiunilor tehnologice este mai mare decât precizia dimensiunilor constructive, în schimb, mai puțin variate, mai stabile sunt toleranțele adaosurilor de prelucrare.

Schemele de prelucrare cu succedarea bazei tehnologice de contact cu baze tehnologice de reglare se caracterizează prin condiții favorabile pentru formarea preciziei dimensiunilor constructive derivate, deoarece relațiile dimensionale includ doar două elemente, dar se

manifestă cu variații mari ale toleranțelor adaosurilor, deoarece acestea depind de schimbări multiple ale bazelor tehnologice.

4.5. Costul prelucrării mecanice determinat de caracteristicile structurale ale procesului tehnologic

Proiectarea dimensională tehnologică permite urmărirea și stabilirea toleranțelor tuturor cotelor tehnologice. O parte dintre acestea sunt cote tehnologice-țintă cu toleranțe controlabile de sistemul tehnologic, iar altă parte sunt cote intermediare asociate celor țintă. Acestea din urmă sunt elemente de legătură de la toleranțele cotelor tehnologice-țintă la toleranțele adaosurilor de prelucrare. Capabilitatea sistemului tehnologic este limitată de adâncimea de așchiere, adică de adaosul maxim compus din adaosul minim determinat fizico-tehnic și din toleranța adaosului determinată de structura dimensională tehnologică.

Formarea fiecărei cote tehnologice-țintă i se produce prin prelucrarea unei suprafețe plane cu aria S_i asociate cotei. Adoptăm funcția cost-toleranță în formă exponențială cu trei variabile $C^{Pr} = a + b / e^{k \cdot \omega}$ [59] recunoscută mai adecvată pentru prelucrările CNC. Aici a , b și k sunt coeficienți stabiliți experimental pentru fiecare sistem tehnologic în condițiile unei întreprinderi concrete. Atunci, la formarea unei cote tehnologice-țintă, costul formării preciziei va fi proporțional cu mărimea relativă a suprafeței date în raport cu mărimea tuturor suprafețelor prelucrate $S_i / \sum S_i$:

$$C_i^{Pr} = \frac{S_i \cdot \left(a + \frac{b}{e^{k \cdot \omega_i}} \right)}{\sum_i^n S_i}. \quad (4.25)$$

Această relație însumată pentru întreg procesul tehnologic (pentru toate suprafețele prelucrate, la formarea tuturor cotelor tehnologice-țintă) are forma:

$$C_{\Sigma}^{Pr} = \frac{\sum_i^n \left(S_i \cdot \left(a + \frac{b}{e^{k \cdot \omega_i}} \right) \right)}{\sum_i^n S_i}. \quad (4.26)$$

Costurile de prelucrare depind și de volumul de material eliminat prin așchiere. În acest caz, costurile sunt proporționale volumelor de material transformate în așchii $C^{Ad} = p + r \cdot \omega^{Ad}$. Aici p și r sunt parametrii ce reflectă partea fixă și cea variabilă a funcției cost-toleranță a adaosului. Ca și în cazul precedent, la formarea unei cote tehnologice-țintă costul eliminării așchiilor va fi proporțional cu mărimea relativă a suprafeței date în raport cu mărimea tuturor suprafețelor prelucrate $S_i / \sum S_i$:

$$C_i^{Ad} = \frac{S_i \cdot (p + r \cdot \omega_i^{Ad})}{\sum_i^n S_i} . \quad (4.27)$$

Această relație însumată pentru întreg procesul tehnologic (pentru toate suprafețele prelucrate, la formarea tuturor cotelor tehnologice-țintă) va avea forma:

$$C_{\Sigma}^{Ad} = \frac{\sum_i^n (S_i \cdot (p + r \cdot \omega_i^{Ad}))}{\sum_i^n S_i} . \quad (4.28)$$

Condiția de optimalitate va avea forma $C_{\Sigma}^{Pr} + C_{\Sigma}^{Ad} \rightarrow Min$ sau:

$$\frac{\sum_i^n \left(S_i \cdot \left(a + \frac{b}{e^{k \cdot \omega_i}} \right) \right) + \sum_i^n (S_i \cdot (p + r \cdot \omega_i^{Ad}))}{\sum_i^n S_i} \rightarrow Min . \quad (4.29)$$

Semifabricatul poate fi obținut prin diferite metode, astfel încât la diferite clase de precizie vor fi necesare alte faze tehnologice ca număr și intensitate și se vor manifesta diferite costuri ale semifabricatului C^{SF} . Condiția de optimalitate va avea forma $C^{SF} + C_{\Sigma}^{Pr} + C_{\Sigma}^{Ad} \rightarrow Min$ sau:

$$C^{SF} + \frac{\sum_i^n \left(S_i \cdot \left(a + \frac{b}{e^{k \cdot \omega_i}} \right) \right) + \sum_i^n (S_i \cdot (p + r \cdot \omega_i^{Ad}))}{\sum_i^n S_i} \rightarrow Min . \quad (4.30)$$

4.6. Concluzii

- Din punct de vedere geometric, similitudinea grafurilor relațiilor dimensionale constructive și tehnologice reflectă optimalitatea elementelor structurale – o cotă constructivă se formează printr-o serie de cote tehnologice proprii.
- Proprietățile unei structuri dimensionale formate din elemente dimensionale optime pot să nu fie optimale datorită efectelor structurale generate.
- În structurile dimensionale tehnologice complexe se manifestă efectul structural de creștere a toleranțelor adaosurilor de prelucrare cu efect de descreștere a gradului de asigurare tehnologică a preciziei și de creștere a preciziei de prelucrare necesare dacă cota constructivă se formează nu numai prin propria cotă tehnologică.

- Mărimea toleranței adaosului de prelucrare este determinată de poziția în lanț a cotei tehnologice la formarea căreia participă, cumulând toleranțele tuturor cotelor tehnologice-țintă, inclusiv a cotei la formarea căreia participă și a celor asociate.
- Prima bază tehnologică de instalare trebuie aleasă astfel, încât să divizeze structura dimensională tehnologică în părți cu număr de componente în lanțuri egale sau aproape egale, fapt ce asigură cele mai mici efecte de creștere a toleranțelor adaosurilor de prelucrare.
- Dacă numărul de elemente al lanțurilor divizate sunt egale, în calitate de primă bază tehnologică de instalare se va lua nodul din graful neorientat al relațiilor dimensionale liniare tehnologice de la care se formează lanțul cu cea mai mare sumă a toleranțelor pe semifabricat.
- Sistemele tehnologice sunt în esență deterministe și toate cotele tehnologice se formează cu toleranțe adecvate circumstanțelor procesului de așchiere; astfel, pentru cotele tehnologice corespunzătoare cotelor constructive de precizie joasă se vor stabili toleranțe la nivelul capacităților sistemului 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 și fizico-tehnic pentru structurile dimensionale elementare.
- Adaptarea de optimizare a structurilor dimensionale tehnologice se face prin redimensionarea constructivă echivalentă cu efecte de micșorare a toleranței adaosurilor de prelucrare datorită sporirii preciziei de prelucrare și cu condiția respectării intervalului de optimalitate. Situația este ameliorată de efectele de compensare a erorilor benefice pentru creșterea preciziei tehnologice și pentru micșorarea toleranței adaosurilor de prelucrare.

CONCLUZII ȘI RECOMANDĂRI

Concluzii. În rezultatul cercetărilor efectuate pot fi formulate următoarele concluzii finale generalizatoare:

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 maxim și minim [94, 100].

Contribuția autorului. *Ideile, soluțiile și aplicațiile se referă la următoarele:* explicația fenomenului de compensare a erorilor pornind de la erorile de prelucrare formate corelat; elaborarea soluțiilor privind toleranțele și abaterile-limită pentru elementul de închidere și pentru elementele componente ale lanțului dimensional la compensarea erorilor; caracterizarea situațiilor dimensional-structurale de compensare a erorilor pentru adaosurile de prelucrare și pentru cotele tehnologice; argumentarea modalității de determinare a toleranțelor ca diferență a toleranțelor cotelor tehnologice următoare și precedente pentru adaosurile de prelucrare și a modalității de determinare a toleranțelor cotelor tehnologice ca diferență ponderată a toleranțelor cotelor tehnologice în lanț. *Contribuțiile sunt dezvoltate și expuse în paragrafele tezei și în lucrările publicate:* 2.1 [78, 94, 97, 100, 101, 102, 103, 104]; 2.2 [105, 106, 107]; 3.2 [100, 103]; 4.1 [112, 113, 114, 115, 116]; 4.4 [94, 112, 113, 114, 115, 116]. *Semnificația teoretică:* cercetările fenomenelor și efectelor compensării erorilor permit dezvoltarea cunoștințelor privind mecanismele de formare a preciziei la prelucrarea mecanică în structurile dimensionale complexe. *Valoarea practică:* cunoașterea efectelor compensării erorilor, a situațiilor de manifestare a acestora permit proiectanților de tehnologii să evite evaluările în exces ale factorilor de proces (precizia tehnologică, asigurarea tehnologică a preciziei).

2. Metoda dezvoltată de rezolvare a sistemelor de lanțuri dimensionale tehnologice liniare cu multe dimensiuni interdependente caracteristice centralizării prelucrărilor pe mașini-unelte CNC se bazează pe monitorizarea formării toleranțelor cotelor tehnologice-țintă, cotelor asociate, adaosurilor de prelucrare și manifestării situaționale a efectelor de compensare a erorilor. S-a constatat că interdependența lor este caracteristică întregului proces tehnologic, astfel, orice cotă tehnologică formată este pasibilă influenței de către toate cotele deja formate, elementele de legătură ereditare fiind cotele asociate celor țintă și adaosurile de prelucrare [106, 107].

Contribuția autorului. *Ideile, soluțiile și aplicațiile se referă la următoarele:* formarea structurilor dimensionale mixte cu componente - cote constructive, cote tehnologice, adaosuri de

prelucrare; metoda de construire a grafurilor relațiilor dimensionale constructive și tehnologice, inclusiv pe instalări și grupe de faze tehnologice; modalitatea de urmărire a modificării valorilor toleranțelor cotelor tehnologice-țintă și a celor asociate; definirea gradului de nedeterminare dimensională a grupelor de lanțuri dimensionale; rezolvarea abaterilor-limită ale lanțurilor dimensionale în variantele de maxim și minim și de maxim și minim cu compensarea erorilor. *Contribuțiile sunt dezvoltate și expuse în paragrafele tezei și în lucrările publicate:* 2.1 [94]; 2.2 [105, 106, 107]; 3.1 [104, 108, 109]. *Semnificația teoretică:* metoda dezvoltată reprezintă o combinație reușită de proces soluționat prin diagrama de toleranțe și ghidat de graful relațiilor dimensionale. *Valoarea practică:* metoda reprezintă un instrument relativ simplu de rezolvare în toleranțe a problemelor de precizie tehnologică și de asigurare tehnologică a preciziei.

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 este reprezentat prin 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 [94, 107, 132].

Contribuția autorului. *Ideile, soluțiile și aplicațiile se referă la următoarele:* caracterizarea sistemelor de relații dimensionale tehnologice ce se manifestă și se schimbă în limitele unei instalări tehnologice; modul de interacționare și "asamblare" a structurilor dimensionale parțiale pe instalări în diferite situații; formularea condiției de optimalitate a structurilor dimensionale elementare; caracteristica optimalității structurale a tehnologiilor de prelucrare mecanică; formularea principiului similitudinii structurilor dimensionale ale piesei, semifabricatului, sistemului tehnologic și a procesului tehnologic pentru optimalitatea celei din urmă. *Contribuțiile sunt dezvoltate și expuse în paragrafele tezei și în lucrările publicate:* 3.2 [101, 111]; 3.3 [77, 78, 94]; 4.1 [112, 113, 114, 115, 116]. *Semnificația teoretică:* abordarea sistemică a rezolvării problemelor de optimizare este semnificativă atât teoretic, cât și practic. Principiul similitudinii structurilor elementelor sistemului este unul relativ nou formulat și realizat. *Valoarea practică:* modalitatea de atribuire procesului tehnologic a unei structuri dimensionale similare structurii dimensionale constructive a piesei este una bine înțeleasă de

proiectanții tehnologiilor, fiind practic ușor realizabilă și simplifică mult următorii pași de optimizare.

4. Optimalitatea procesului tehnologic se bazează pe optimalitatea elementelor sale. Faza tehnologică este dimensional optimală, 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 optimală poate să nu mai fie optimală, deoarece mărimea toleranței adaosului de prelucrare cumulează toleranțele tuturor cotelor tehnologice-țintă, inclusiv a cotei la formarea căreia participă. Astfel, mărimea toleranței adaosului de prelucrare este determinată de poziția în lanț a cotei tehnologice și este cu atât mai mare cu cât mai îndepărtată este cota de baza tehnologică. Optimalitatea instalării este caracterizată de optimalitatea tuturor fazelor tehnologice, adică de mulțimile cuplurilor toleranțelor cotelor tehnologice formate și ale adaosurilor de prelucrare înlăturate [94, 112, 116, 132].

Contribuția autorului. *Ideile, soluțiile și aplicațiile se referă la următoarele:* formularea noțiunii optimalității componentelor structurale ale procesului tehnologic ca interdependență a mulțimii cuplurilor toleranțelor cotelor tehnologice formate și ale adaosurilor de prelucrare înlăturate, fiecare cuplu determinând precizia de prelucrare și condițiile de asigurare a acesteia; demonstrarea faptului că toleranța adaosului de prelucrare cumulează toleranțele tuturor cotelor tehnologice-țintă, inclusiv a cotei la formarea căreia participă și este cu atât mai mare cu cât poziția cotei tehnologice în lanț este mai îndepărtată de baza tehnologică. *Contribuțiile sunt dezvoltate și expuse în paragrafele tezei și în lucrările publicate:* 2.1 [94]; 2.2 [106, 107]; 3.2 [102]; 3.3 [94]; 4.1 [112, 113, 114, 115, 116]; 4.2 [94]; 4.4 [94, 112, 116]. *Semnificația teoretică:* noi cunoștințe privind efectele structurilor dimensionale complexe asupra toleranțelor cotelor tehnologice și a adaosurilor de prelucrare, inclusiv a compensării erorilor. *Valoarea practică:* la proiectarea constructivă proiectantul va evita structurile dimensionale constructive în lanț cu multe elemente, care ar provoca probleme de neasigurare a preciziei la prelucrări. Nodurile de pe grafurile relațiilor dimensionale tehnologice sunt ușor de identificat în calitate de baze tehnologice.

5. Crearea structurilor dimensionale pe instalări și grupe de faze tehnologice se face prin secvențierea structurii dimensionale tehnologice întregi (grafului relațiilor dimensionale

tehnologice liniare) și transformarea acestuia într-o serie de grafuri complementare ale relațiilor dimensionale tehnologice. Secvențierea optimală se produce prin definirea bazelor tehnologice inițiale de proces, care divizează lanțurile dimensionale lungi în părți componente cât mai echilibrate ca lungime. Structurile dimensionale tehnologice secvențiate optimal reprezintă precedente atât pentru proiectul tehnologic asistat de calculator al unei alte piese, cât și precedente constructive ale proiectării și dimensionării pieselor [94, 107, 112, 116]. La dimensionarea constructivă a pieselor, dar și la proiectarea tehnologică se va ține cont de precedentele tehnologice deja aprobate.

Contribuția autorului. *Ideile, soluțiile și aplicațiile se referă la următoarele:* elaborarea modalității de descompunere a grafului neorientat al relațiilor dimensionale tehnologice în grafuri orientate reciproc complementare cu definirea instalărilor și ordinii fazelor tehnologice în limitele instalării; alegerea bazelor tehnologice astfel, încât secvențele lanțurilor dimensionale divizate să conțină un număr relativ egal de elemente; caracterizarea geometrică a secvențelor de structuri dimensionale constructive și tehnologice similare (precedente) în care numărul de elemente este de maximum 3, fapt ce le asigură optimalitatea determinată de cuplurile toleranțelor cotelor tehnologice formate și ale adaosurilor de prelucrare înlăturate. *Contribuțiile sunt dezvoltate și expuse în paragrafele tezei și în lucrările publicate:* 3.3 [94, 107]; 4.1 [112, 113, 114, 115, 116, 132]; 4.4 [94, 112, 116]. *Semnificația teoretică:* noi abordări formalizate structural privind proiectarea tehnologiilor valabile pentru utilizarea calculatorului. Proiectarea tehnologică devine un proces structurat și argumentat dimensional. *Valoarea practică:* este o metodologie de proiectare tehnologică formalizată și argumentată dimensional. Proiectarea tehnologică constructivă și tehnologică se poate face pe module – precedente constructive și tehnologice.

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 conduce 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 [94, 112, 116].

Contribuția autorului. *Ideile, soluțiile și aplicațiile se referă la următoarele:* aplicarea noțiunii de optimalitate a structurii dimensionale elementare prin corespunderea cuplului de toleranțe al adaosului de prelucrare și al cotei tehnologice cu intervalul de optimalitate determinat empiric fizico-tehnic; formularea și aplicarea metodologiei de redimensionare constructivă echivalentă în variante a piesei și de constituire a structurilor dimensionale tehnologice; rezolvarea sistemului de ecuații după criteriul minimizării toleranțelor adaosurilor de prelucrare și maximalizării toleranțelor cotelor tehnologice în variantele de maxim și minim și de maxim și minim cu compensarea erorilor. *Contribuțiile sunt dezvoltate și expuse în paragrafele tezei și în lucrările publicate:* 4.1 [112, 113, 114, 115, 116, 132]; 4.4 [94, 112, 116]. *Semnificația teoretică:* abordarea optimalității structurilor dimensionale tehnologice într-un spațiu de doi parametri interdependenți (toleranțele cotei tehnologice și ale adaosului de prelucrare), scopul fiind aducerea acestora în intervalul de optimalitate obiectiv existent. *Valoarea practică:* posibilitatea reală de a realiza prelucrări de precizia necesară în condițiile unor structuri dimensionale tehnologice complexe. Posibilitatea de a realiza prelucrări la viteze mari pe mașinile-unelte CNC, respectând restricțiile în raport cu adâncimile de așchiere.

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. Drept reper, în acest sens, poate servi numărul egal de cote în lanț al tuturor pieselor din ansamblul de complexitate comparabilă. Este preferat un număr mai mic de cote în lanț în cazul lanțurilor de precizie mai înaltă.

- 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.

- Dimensionarea constructivă a pieselor se face prin cote critice definite la nivelul ansamblului și de cote determinate la nivelul piesei. Deseori aceste ultime cote sunt definite la precizii joase (IT14, IT15, IT16). Această practică este valabilă la prelucrările mecanice clasice și nu poate fi acceptată la fabricarea CNC, deoarece toleranța cotei la prima prelucrare și toleranța cotei pe semifabricat împreună determină toleranța adaosului de prelucrare și, în

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

- Structura dimensională a pieselor este una integră. Piese constructiv simple au și o structură dimensională simplă. Piese proiectate pentru prelucrarea pe mașinile-unelte CNC au structuri dimensionale întregi complexe, care provoacă probleme la prelucrarea prin lanțuri dimensionale de lungime mare. Se recomandă ca la proiectarea constructivă a pieselor să se admită dezintegrarea structurii în module (structuri insulare), iar modulele structurale să fie formate de la baze constructive, poziția cărora se determină prin instrumentele de măsurare a mașinii-unelte CNC (palpare, scanare laser etc.). În acest fel, lungimea lanțurilor dimensionale devine apriori mai scurtă și mai prietenoasă tehnologic.

- Structurile dimensionale tehnologice complexe, pe de o parte, provoacă creșterea valorii toleranțelor cotelor-țintă (reducerea cerințelor de precizie) datorită compensării erorilor, iar pe de altă parte – creșterea valorii toleranțelor adaosurilor de prelucrare (înrautățirea asigurării tehnologice a preciziei). Procesele au efecte contradictorii. Astfel, în calitate de metodă de analiză dimensională se recomandă metoda de maxim și minim cu compensarea erorilor, care permite determinarea mai adecvată atât a preciziei de prelucrare, cât și a asigurării tehnologice a acesteia.

- Se recomandă ca structura dimensională integră tehnologică cu multe cote în lanțuri să fie divizată în părți componente cu mai puține cote în lanțurile parțiale prin utilizarea bazelor tehnologice, în calcul fiind luat lanțul cu cele mai multe dimensiuni.

- Dacă în urma 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.

CERCETĂRI ULTERIOARE

Cercetările în domeniul proiectării produselor și proceselor de origine mecanică se manifestă în cadrul tendințelor integrative moderne dezvoltate, inclusiv de conceptele moderne cum ar fi Industria 4.0, Fabricarea Avansată etc.

În aspectul optimizării integrative importante sunt cercetările structurilor dimensionale în prin prisma abordării concurențiale-simultane la nivel de structură constructivă de ansamblu, structură constructivă a piesei, structură tehnologică (procesului tehnologic). Ca bază metodologică de sistematizare a căutării soluțiilor pot servi structurile dimensionale pe niveluri construite în baza similitudinii structurale și acceptării precedentelor. Conceptul precedentelor este valoros și din punct de vedere al adoptării soluțiilor în timp util.

Crearea structurilor dimensionale din componente slab legate reciproc (insulare) ale pieselor poate rezolva eficient problematica tehnologică, în același timp poate fi un răspuns la problematica proiectării constructive de ansamblu în care funcționalitatea este asigurată nu numai în baza preciziei dimensionale, dar și în baza utilizării diferitelor fenomene fizico-tehnice de adaptare reciprocă.

Proiectarea dimensională se manifestă pozitiv în produsele supuse tehnologiilor substructive (prin aşchiere), astfel încât poate fi aplicată cu succes și în cazul produselor mecanice supuse tehnologiilor aditive și/sau tehnologiilor hibride (substructive–aditive). Problema este cu atât mai interesantă cu cât este și complexă datorită mulțimii mari de fenomene fizico-tehnice utilizate pentru adăugarea de material și rezultatelor dimensionale, de precizie, de suprafață, de proprietăți mecanice etc.

BIBLIOGRAFIE

1. TOCA, A., RUȘICA, I. Designing of a technologies of machining. *Buletinul Institutului Politehnic din Iași*, 2010, secția „Construcții de Mașini”, tomul LVI (LX), fasc. 2b, pp. 293-297. ISSN 1011-2855
2. KONDAKOV, A.I., VASILJEV, A.S. Evaluation of the types of multiproduct manufacturing of machine components and some aspects of their design. In: *Proceedings of the ICMTMTE 2018 - MATEC Web of Conferences 224*, 01121, 2018, 7 p. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201822401121>
3. EIFLER, T., MURTHY, B.S., HOWARD, T.J. Toward meaningful manufacturing variation data in design – feature based description of variation in manufacturing processes. In: *Proceedings of the 14th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing (CAT)*, 2016, vol. 43, pp. 190-195. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.161>
4. 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>
5. 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>
6. UMARAS, E., BARARI, AH., TSUZUKI, M. Intelligent design tolerance allocation for optimum adaptability to manufacturing using a monte carlo approach. *IFAC PapersOnLine*, 2019, vol. 52, issue 10, pp. 165–170. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.10.017
7. KHODAYGAN, S. A method for optimal reduction of locating error with the minimum adjustments of locators based on the geometric capability ratio of process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 94, pp. 3963–3978. DOI: 10.1007/s00170-017-1054-y
8. 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
9. 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

10. KUMAR, M.S., KANNAN, S.M., JAYABALAN, V. A new algorithm for minimizing surplus parts in selective assembly by using genetic algorithm. *International Journal of Production Research*, 2007, vol. 45, issue 20, pp. 4793–4822. <https://doi.org/10.1080/00207540600810085>
11. 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>
12. 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>
13. SIVAKUMAR, K., BALAMURUGAN, C., RAMABALAN, S. Evolutionary sensitivity-based conceptual design and tolerance allocation for mechanical assemblies. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, vol. 48, pp. 307–324. DOI: 10.1007/s00170-009-2256-8
14. SIVAKUMAR, K., BALAMURUGAN, C., RAMABALAN, S. Evolutionary multi-objective concurrent maximisation of process tolerances. *International Journal of Production Research*, 2012, Vol. 50, No. 12, pp. 3172–3191. <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2010.550637>
15. GHALI, M., TLIJA, M., AIFAOU, N., PAIREL, E. A CAD method for tolerance allocation considering manufacturing difficulty based on FMECA tool. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 91, pp. 2435–2446. DOI: 10.1007/s00170-016-9961-x
16. HUANG, M., ZHONG, Y. Dimensional and geometrical tolerance balancing in concurrent design. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, vol. 35, pp. 723–735. DOI: 10.1007/s00170-006-0749-2
17. BALAMURUGAN, C. et al. Concurrent optimal allocation of geometric and process tolerances based on the present worth of quality loss using evolutionary optimisation techniques. *Research in Engineering Design*, 2017, vol. 28, pp. 185–202. DOI: 10.1007/s00163-016-0230-7
18. МАСЯГИН, В.Б., ПОГОДАЕВ, В.П. Автоматическое обеспечение конструкторских допусков при размерных технологических расчетах с применением линейного программирования. *Омский Научный Вестник. Машиностроение и Машиноведение*, 2014, № 3 (133), с. 97-101. ISSN 1813-8225. Disponibil: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomaticheskoe-obespechenie-konstruktorskih-dopuskov-pri-razmernyh-tehnologicheskikh-raschetah-s-primeneniem-lineynogo>

19. ZIA, A., QIAO, L.H. Parts tolerance allocation based on assembly clearance analysis and product functional parameters. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, vol. 163, pp. 116–120. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.163.116
20. 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. Disponibil: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-009-2040-9>
21. 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
22. 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>
23. THILAK, M.; KUMAR, N.S.; GOVINDARAJALU, J. Optimal tolerance allocation through tolerance chain identification system. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, vol. 10, issue 78, pp. 160–168. ISSN 0973-4562. Disponibil: https://www.researchgate.net/publication/284170259_Optimal_Tolerance_Allocation_through_Tolerance_Chain_Identification_System
24. KUMAR, M.S., KANNAN, S.M., JAYABALAN, V. Construction of closed-form equations and graphical representation for optimal tolerance allocation. *International Journal of Production Research*, 2007, vol. 45, issue 6, pp. 1449–1468. <https://doi.org/10.1080/00207540600547422>
25. SIVAKUMAR, K., BALAMURUGAN, C., RAMABALAN, S. Simultaneous optimal selection of design and manufacturing tolerances with alternative manufacturing process selection. *Computer-Aided Design*, 2011, vol. 43(2), pp. 207–218. DOI: 10.1016/j.cad.2010.10.001
26. 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
27. LIU, S.-G., JIN, Q., WANG, P., XIE, R.-J. Closed-form solutions for multi-objective tolerance optimization. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, Vol. 70, pp. 1859–1866. DOI 10.1007/s00170-013-5437-4

28. MAO, J., CAO, Y.L., LIU, S.Q., YANG, J.X. Manufacturing environment-oriented robust tolerance optimization method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, vol. 41, pp. 57–65. DOI: 10.1007/s00170-008-1460-2
29. HUANG, M.F., ZHONG, Y.R. Optimized sequential design of two-dimensional tolerances. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, vol. 33, pp. 579–593. DOI: 10.5772/5063
30. LUO, J., LIU, X., WANG, H., YU, X., YANG X. Tolerance analysis for automobile transmission shaft based on minimum cost and reliability target. *Science Progress*, 2020, Vol. 103(4) pp. 1–15. DOI: 10.1177/0036850420959177
31. MAHSHID, R., MANSOURVAR, Z., HANSEN, H.N. Tolerance analysis in manufacturing using process capability ratio with measurement uncertainty. *Precision Engineering*, 2018, Vol. 52, pp. 201-210. ISSN: 1873-2372. Disponibil: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.12.008>
32. GHALI, M., TLIJIA, M., AIFAUI, N. An approach to unique transfer and allocation of tolerances considering manufacturing difficulty. In: *Proceedings of the 23ème Congrès Français de Mécanique CFM2017*, 2017, Lille, France, 13 p. Disponibil: https://hal.science/hal-03465405v1/file/bitstream_124446.pdf
33. JIA, H.B. et al. A tolerance method for industrial image-based inspection. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, vol. 43, pp. 11–12. DOI:10.1007/s00170-008-1801-1
34. 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
35. 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
36. BRUSCAS, G.M., ROMERO, F., ROSADO P., SERRANO, J. Fostering in-process inspection during process planning using tolerance charting. In: *Proceedings of the Manufacturing Engineering Society International Conference - MESIC 2013*, 2013, vol. 63, pp. 200-207. doi: 10.1016/j.proeng.2013.08.175
37. JEANG, A. Tolerance chart balancing with a complete inspection plan taking account of manufacturing and quality cost. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, vol. 55, pp. 675–687. DOI: 10.1007/s00170-010-3110-8

38. 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
39. GONZÁLEZ CONTRERAS, F. An improved tolerance charting technique using an analysis of setup capability. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, vol. 62, pp. 1205–1218. DOI: 10.1007/s00170-011-3874-5
40. SHAKARJIA, C.M., VIJAY SRINIVASAN, V. Theory and algorithm for planar datum establishment using constrained total least-squares. In: *Proceedings of the 14th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing (CAT)*, 2016, Vol. 43, pp. 232-237. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.104
41. BANSAL, S., NAGARAJAN, S., REDDY, N.V. An integrated fixture planning system for minimum tolerances. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, vol. 38, pp. 501–513. DOI: 10.1007/s00170-008-1416-6
42. WU, W., ZENG, J., HUANG, Z. A hybrid optimization approach for setup planning with tolerance constraints. In: *Proceedings of the MATEC Web of Conferences ICMMM 2018*, 2018, 249, 03012. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824903012>
43. WANG, X., SUN, C., YAO, Y., LIANG, L. Extension of the definition of tolerance and an application thereof in the calculation of dimension chains. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, Vol. 71, pp.1069-1076. DOI 10.1007/s00170-013-5533-5
44. ZUBAIR, A.F. et al. Graph based method for lathe machining part model. In: *Proceeding ICI_ME 2020, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1003*, 2000, 012142, p. 6. DOI: 10.1088/1757-899X/1003/1/012142
45. 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, pp. 1-14. DOI: 10.1299/jamdsm.2015jamdsm0034
46. 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

47. МУХОЛЗОЕВ, А.В. Алгоритм модуля автоматизированного расчета технологических размерных цепей. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*, 2015, № 15(3), с. 48–55. ISSN 1990-8504. Disponibil: <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritm-modulya-avtomatizirovannogo-rascheta-tehnologicheskikh-razmernyh-tsepey>
48. 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
49. WANG, J.F., FAN, X.L., WAN, S. A graph-based ant colony optimization approach for process planning. *The Scientific World Journal*, 2014, article ID 271895, 11 p. ISSN: 1537-744X. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/271895>
50. ROSYIDI, C.N., FATMAWATI, A., JAUHARI, W.A. An integrated optimization model for product design and production allocation in a make to order manufacturing system. *International Journal of Technology*, 2016, Vol. 7, No 5, pp. 819-830. DOI: <https://doi.org/10.14716/ijtech.v7i5.1173>
51. SAIDOVA, M.K., SHUKUROVA, M.S. Optimization of the technological process and selection of the optimality criteria. *Texas Journal of Engineering and Technology*, 2022, vol. 8, pp. 58-61. ISSN 2770-4491. Disponibil: <https://zienjournals.com/index.php/tjet/article/view/1641/1360>
52. 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-protsssov-izgotovleniya-detaley-mashin/viewer>
53. NAGARAJAN, L., MAHALINGAM, S.K., SALUNKHE, S., NASR, E.A. DAVIM, J.P., HUSSEIN, M.A.H. A novel methodology for simultaneous minimization of manufacturing objectives in tolerance allocation of complex assembly. *Applied Sciences*, 2021, Vol. 11, No 9164, 20 p. <https://doi.org/10.3390/app11199164>
54. LEDOUX, Y., TEISSANDIER, D., SEBASTIAN, P. Global optimisation of functional requirements and tolerance allocations based on designer preference modelling. *Journal of Engineering Design*, 2016, vol. 27, issue 9, pp.591–612. <https://doi.org/10.1080/09544828.2016.1191625>

55. 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>
56. МОКРУШИН, Ю.А., ШАМИН, В.Ю. Необходимость совершенствования проектирования технологических процессов в машиностроении. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. Машиностроение и машиноведение*. № 1(25), 2013, с. 123 – 130. ISSN 2072-3059
57. ПЕРМИНОВ, А.В. Синтез размерной структуры технологических процессов механической обработки с помощью матрицы размерных связей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. М.: Машиностроение, 2002, № 4, с. 26-30. ISSN 0536-1044
58. АРТЮХ, Р. Л., МАСЯГИН, В. Б., МОРГУНОВ, А. П. Разработка метода синтеза оптимальных технологических размерных структур на основе учета множественности критериев оптимизации. *Омский научный вестник. Машиностроение и машиноведение*, 2012, № 1(107), с. 53-58. ISSN 1813-8225. Disponibil: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-metoda-sinteza-optimalnyh-tehnologicheskikh-razmernykh-struktur-na-osnove-ucheta-mnozhestvennosti-kriteriev-optimizatsii>
59. ARMILLOTTI, A. Selection of parameters in cost-tolerance functions: review and approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, vol. 108, pp.167–182. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05400-z>
60. SHIN, S., CHO, B.R. Integrating a bi-objective paradigm to tolerance optimization. *International Journal of Production Research*, 2007, vol. 45, issue 23, pp. 5509–5525. <https://doi.org/10.1080/00207540701325181>
61. SANZ-LOBERA, A., SEBASTIAN, M.A., PEREZ, J.M. New cost tolerance model for mechanical part design. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, vol. 51, pp. 421–430. DOI:10.1007/s00170-010-2661-z
62. 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. ISSN 2220-4342 (Online), <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.355>

63. SINGH, P.K., JAIN, P.K., JAIN, S.C. Important issues in tolerance design of mechanical assemblies. Part 1: Tolerance analysis. In: *Proceeding of Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacturing*, 2009, vol. 223, issue 10, pp. 1225–1247. <https://doi.org/10.1243/09544054JE3404A>
64. SIVAKUMAR, K., BALAMURUGAN, C., RAMABALAN, S. Concurrent multi-objective tolerance allocation of mechanical assemblies considering alternative manufacturing process selection. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, vol. 53, pp. 711–732. DOI: 10.1007/s00170-010-2871-4
65. THILAK, M., SIVAKUMAR, K., JAYAPRAKASH, G. Optimal selection of machining datum and machining tolerance allocation through tolerance charting. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 2012, vol. 7, pp. 135-160. DOI: 10.1504/IJMTM.2012.047726
66. YU, K.T., SHEN, C.Y. Combining tolerance design and monitoring process capability in a design-manufacturing integration procedure. In: *Proceeding of Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacturing*, 2009, vol. 223, issue 11, pp.1389–1394. <https://doi.org/10.1243/09544054JE11197>
67. CHEN, Y., DING, Y., JIN, J., CEGLAREK, D. Integration of process oriented tolerancing and maintenance planning in design of multistation manufacturing processes. *IEEE Transactions on automation Science and Engineering*, 2006, vol. 3, issue 4, pp. 440–453. DOI: 10.1109/TASE.2006.872105
68. GEETHA, K., RAVINDRAN, D., SIVA KUMAR, M., ISLAM, M.N. Concurrent tolerance allocation and scheduling for complex assemblies. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2015, vol. 35, pp. 84–95. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.03.001>
69. HSIEH, K.L. The study of cost-tolerance model by incorporating process capability index into product lifecycle cost. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, vol. 28, pp. 638–642. DOI: 10.1007/s00170-004-2385-z
70. TSENG, Y.J., HUANG, F.Y. A multi-plant tolerance allocation model for products manufactured in a multi-plant collaborative manufacturing environment. *International Journal of Production Research*, 2009, vol. 47, pp. 733–749. <https://doi.org/10.1080/00207540701528792>

71. KHAN, J., TELI, S.N., HADA, B.P. Reduction of cost of quality by using robust design: a research methodology. *International Journal of Mechanical and Industrial Technology*, 2014, vol. 2, issue 2, pp. 122-128. ISSN 2348-7593 (Online). Disponibil: <https://core.ac.uk/download/pdf/55305468.pdf>
72. HELING, B., ASCHENBRENNER, A., WALTER, M.S.J., WARTZACK, S. On connected tolerances in statistical cost-optimization of assemblies with interrelated dimension chains. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 43, pp. 262–272. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.031>
73. PENG, H.P., JIANG, X.Q., LIU, X.J. Concurrent optimal allocation of design and process tolerances for mechanical assemblies with interrelated dimensions chains. *International Journal of Production Research*, 2008, vol. 46, pp. 6963–6979. <https://doi.org/10.1080/00207540701427037>
74. HUNG, T.C., CHUAN, K.Y. Multi-objective design and tolerance allocation for single- and multi-level systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2013, vol. 24, pp. 559–573. DOI: 10.1007/44845-011-0608-3
75. WANG, P., LIANG, M. An integrated approach to tolerance synthesis, process selection and machining parameter optimization problems. *International Journal of Production Research*, 2005, vol. 43, issue 11, pp. 2237–2262. <https://doi.org/10.1080/00207540500050063>
76. LI, L., FUH, J., ZHANG, Y., NEE, A. Application of genetic algorithm to computer-aided process planning in distributed manufacturing environments. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2005, vol. 21, issue 6, pp. 568-78. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2004.12.003>
77. **STRONCEA, A.** Elaborarea unei operații tehnologice cu ajutorul pachetului de programe CAMWORKS 2000. In: *Culegere de lucrări științifice Tehnologii Moderne, Calitate, Restructurare*, Chișinău: Tehnica-Info, 2001, vol. 4. pp. 222-227. ISBN 9975-9638-0-3, ISBN 9975-9638-4-6 (vol. 4)
78. **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)
79. КОНДАКОВ, А.И. Совершенствование подготовки производства деталей машин на основе применения формальных оценок подобия проектных решений. *Вестник ЮУрГУ. Серия Машиностроение*, 2016. том 16, № 3. с. 36–43. DOI: 10.14529/engin160305

80. PEDAGOPU, V.M., KUMAR, M. Integration of CAD/CAPP/CAM/CNC to augment the efficiency of CIM. *International Review of Applied Engineering Research*, 2014, Vol. 4, No 2, pp. 171-176. ISSN 2248-9967. Disponibil: https://www.ripublication.com/iraerspl/iraerv4n2spl_13.pdf
81. SALEH, S.A. Analysis of computer aided process planning techniques. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, 2009, vol.16, No.1, pp. 74-92. <https://doi.org/10.25130/tjes.16.1.06>
82. SOORI, M., ASMAEL, M. Classification of research and applications of the computer aided process planning in manufacturing systems. *Independent Journal of Management & Production*, 2021, vol. 12, No. 5, pp. 1250-1281. DOI: 10.14807/ijmp.972i5.1397
83. NALLAKUMARASAMY, G., SRINIVASAN, P., RAJA, K.V., MALAYALAMURTHI, R. Optimization of operation sequencing in CAPP using simulated annealing technique (SAT). *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 54, 721-728. DOI: 10.1007/s00170-010-2977-8
84. NALLAKUMARASAMY, G., SRINIVASAN, P.S., RAJA, K.V., MALAYALAMURTHI, R. Optimization of operation sequencing in CAPP using superhybrid genetic algorithms-simulated annealing technique. *ISRN Mechanical Engineering*, 2011, pp. 1-7. DOI: 10.1007/s00170-010-2977-8
85. *Ant colony optimization algorithms*, [citat 25.01.2023]. disponibil: https://en.wikipedia.org/wiki/ant_colony_optimization_algorithms
86. XU, H.M., YUAN, M.H., LI, D.B. A novel process planning schema based on process knowledge customization. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, vol. 44, pp. 161–172. DOI: 10.1007/s00170-008-1804-y
87. ORTIZ, J.H. Industry 4.0 - current status and future trends. *IntechOpen*, 2020, p. 134. eBook (PDF), ISBN 978-1-83880-086-4. DOI:10.5772/intechopen.86000
88. WEI, S. et al. A new method for manufacturing process autonomous planning in intelligent manufacturing system. In: *Procediings of International Conference on Advanced Information Systems Engineering*, 14 may 2019, pp. 51–63. ISSN 1865-1348, https://doi.org/10.1007/978-3-030-20948-3_5
89. GADALLAH, M.H. Least sensitive tolerance allocation. *International Journal of Quality Engineering and Technology*, 2011, vol. 2, no. 4, pp.344–356. DOI: 10.1504/IJQET.2011.043172
90. KROGSTIEA, L., EBROC, M., HOWARD T.J.. How to implement and apply robust design: insights from industrial practice. *Total Quality Management*, 2014, pp. 1387-1405. <http://dx.doi.org/10.1080/14783363.2014.934520>

91. MUSTAJIB, M.I. Concurrent Engineering of Tolerance Synthesis and Process Selection for Products with Multiple Quality Characteristics Considering Process Capability. *Makara Journal of Technology*, 2012, vol. 16, No 1, pp.7-14. DOI: 10.7454/mst.v16i1.1040
92. JEANG, A., CHEN, T., LI, H.C., LIANG, F. Simultaneous process mean and process tolerance determination with adjustment and compensation for precision manufacturing process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, vol. 33, pp. 1159–1172. DOI: 10.1007/s00170-006-0542-2
93. HUANG, M.F., ZHONG, Y.R., XU, Z.G. Concurrent process tolerance design based on minimum product manufacturing cost and quality loss. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, vol. 25, pp. 714–722. DOI: 10.1007/s00170-003-1911-8
94. **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)
95. DIETA, A., COUELLAN, N., GENDRE, X., MARTIN, J., NAVARRO, J.F. A statistical approach for tolerancing from design stage to measurements analysis. In: *Proceedings of the 16th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing - CIRP CAT 2020*, 2020, vol. 92, pp. 33–38. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.171>
96. *Robustness*. [citat 02.02.2023]. Disponibil: <https://en.wikipedia.org/wiki/Robustness>
97. TOCA, A., **STRONCEA, A.**, GONCEAR, S. Aspecte ale analizei dimensionale cu efecte de compensare a erorilor. In: *Culegere de lucrări științifice Tehnologii Moderne, Calitate, Restructurare*, 1999, vol. 1. Chișinău: Tehnica-Info, pp. 401-406. ISBN 9975-910-74-2
98. MATBEEB, B.B., ТВЕРСКОЙ, М.М., БОЙКОВ Ф.И. и др. *Размерный анализ технологических процессов*. М: Машиностроение, 1982, 264 с.
99. ASCHENBRENNER, A., SCHLEICH, B., WARTZACK, S. An overview and classification of tolerance compensation methods. In: *Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19)*, Delft, The Netherlands, 2019, pp. 3471-3480. DOI:10.1017/dsi.2019.354
100. TOCA, A., STINGACI I., **STRONCEA A.** Esența și efectele compensării erorilor la prelucrarea mecanică. *Fizică și tehnica: procese, modele, experimente*, 2012, no 2, pp. 37-43. ISSN 1857-0437. Disponibil: https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/37474
101. 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

102. 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)
103. 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
104. TOCA A., **STRONCEA A.**, GONCEAR S. Some aspects of the process of accuracy's assurance during mechanical working. *Buletinul Institutului Politehnic Iași*, 2000, tomul XLVI, supliment I, pp. 141 - 144. ISSN 1011-2855
105. **STRONCEA, A.** The dimensional analysis of manufacturing processes with using excel-97. *Buletinul Institutului Politehnic Iași*, 2000, tomul XLVI, supliment I, pp. 125 - 128. ISSN 1011-2855
106. **STRONCEA, A.** Analiza dimensională a proceselor tehnologice. Aplicații in EXCEL-97. In: *Culegere de lucrări științifice Tehnologii Moderne, Calitate, Restructurare*, Chișinău: Tehnica-Info, 1999, vol. 1, pp. 342-348. ISBN 9975-910-74-2
107. TOCA, A., **STRONCEA, A.**, RUȘICA, I. *Proiectarea dimensional optimală a tehnologiilor de prelucrare mecanică*. Note de curs. Chisinau: Tehnica-UTM, 2019. 58 p. ISBN 978-9975-45-598-5
108. 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
109. 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)
110. МАТАЛИН, А.А. *Технология машиностроения*. Санкт-Петербург: Издательство “Лань”, 2008. 512 с. ISBN 978-5-8114-0771-2
111. 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
112. 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

113. 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
114. TOCA, A., **STRONCEA, A.**, RUȘICA, I., REUȚA, V. Influence of a constructive and technological dimensional links and errors compensation on conditions of the sizes' machining accuracy. *Buletinul Institutului Politehnic Iași*, 2004, tomul L, fascicula Va, secția Construcția de Mașini, Iași, , pp. 173 - 180. ISSN 1011-2855
115. TOCA, A., **STRONCEA, A.**, RUȘICA, I., REUȚA, V. Sinteza structurii dimensionale optimele a procesului tehnologic de prelucrare mecanică. In: *Tehnologii Moderne, Calitate, Restructurare. Culegere de lucrări științifice*, UTM: 2005, vol. 1, pp. 250 - 257. ISBN 9975-3-2, ISBN 9975-9875-4-0 (vol. 1)
116. 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/matecconf/201817801005>
117. ВАСИЛЬЕВ, А.С., ДАЛЬСКИЙ, А.М., ЗОЛОТАРЕВСКИЙ, Ю.М., КОНДАКОВ, А.И. *Направленное формирование свойств изделий машиностроения*. Москва: Машиностроение, 2005. 352 с. ISBN 5-217-03268-5
118. СУСЛОВ, А.Г., ДАЛЬСКИЙ А.М. *Научные основы технологии машиностроения*. М.: Машиностроение, 2002. 684 с. ISBN 5-217-03108-5
119. MALEA, C.I., NITU, E.L. Optimization of the technological process and equipment of complex profiled parts. In: *IOP Publishing ModTech 2020, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 916*, 2020, pp. 1-12. DOI:10.1088/1757-899X/916/1/012058 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/916/1/012058/pdf>
120. *Mazak corporation*. [citat 02.02.2023]. Disponibil la: <https://www.mazak.com/>
121. ANKIT, J., VIVEK, B. Introduction to high speed machining (HSM). In book: *High Speed Machining. Indian Institute of Technology (ISM) Dhanbad*, 2020, pp. 1-25. DOI: 10.1016/B978-0-12-815020-7.00001-1
122. JAIN, A., BAJPAI, V. Introduction to high-speed machining (HSM). In: *High Speed Machining*, 2020, pp. 1-23. DOI: 10.1016/B978-0-12-815020-7.00001-1
123. IONESCU (BURLIBAȘA), C.C. *Contribuții teoretice și experimentale privind strunjirea cu viteze mari*. Rezumatul tezei de doctor. Iași, 2012. 68 p.

124. TOCA, A. About the mutual influence of design and technological dimensional structures at creation of the optimum technological processes to machining. In: *Proceedings of the 14th International Conference Modern Technologies, Quality and Innovation – ModTech 2010*, Slanic Moldova, Romania, 2010, pp. 623-626. ISSN 2066-3919
125. ISO 286-1:2010. *Geometrical product specifications (GPS) - ISO code system for tolerances on linear sizes - Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits*. Disponibil: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:286:-1:ed-2:97:en>
126. ISO 286-2:2010. *Geometrical Product Specifications (GPS) - ISO code system for tolerances on linear sizes - Part 2: Tables of standard tolerance classes and limit deviations for holes and shafts*. Disponibil: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:286:-2:ed-2:97:en>
127. TOCA, A., STINGACI, I., RUSICA, I. The dimensional design of machining technologies. In: *Proceedings IManEE 2016. IOP Publishing. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2016, 161, 012034, pp. 6. DOI:10.1088/1757-899X/161/1/012034
128. TARASOV, O., VASYLIEVA, L., ALTUKHOV, O., ANOSOV, V. Automation of the synthesis of new design solutions based on the requirements for the functionality of the created object. In: *Proceedings of the 9th International Conference Information Control Systems & Technologies*, 2020, pp. 161-175. ISSN 1613-0073. Disponibil: <https://ceur-ws.org/Vol-2711/paper13.pdf>
129. KURTOGLU, T., SWANTNER, A., CAMPBELL, M. Automating the conceptual design process: From black box to component selection. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 2008, vol. 24(1), pp. 49-62. (2010) DOI:10.1017/S0890060409990163
130. БОЖКО А. Н. Структурный синтез как задача дискретной оптимизации. *Электронное научно-техническое издание «Наука и Образование»*, 2010, N 9, с. 1-13. ISSN 1994-0408. Disponibil: <http://technomag.edu.ru/doc/158337.html>
131. МИХАЙЛОВ, А.Н. *Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения*. Донецк: ДонНТУ, 2009, 346 с. ISBN 966-7907-24-4
132. 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

ANEXE

Anexa 1. Certificate de competență

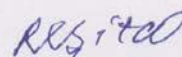




Anexa 2. Act de implementare a rezultatelor științifice, UTM

APROB:

Prorector pentru studii
conf. univ. dr. Reșitea Vladislav



ACT

privind utilizarea în procesul de studii la ciclul I de licență în cadrul departamentului "Ingineria Fabricației" a rezultatelor cercetării științifice realizate în teza de doctorat a Dlui Stroncea Aurel cu tema "Optimizarea structurilor dimensionale la proiectarea asistată de calculator a tehnologiilor de prelucrare mecanică"

Comisia în componența: președinte - decanul facultății "Inginerie Mecanică, Industrială și Transporturi" conf. univ. dr. Dîntu Sergiu, șef de departament "Ingineria Fabricației" conf. univ. dr. hab. Mazuru Sergiu și conf. univ. dr. Ciupercă Rodion în ședința din 05.06.2023 a examinat faptul utilizării în procesul de studii a rezultatelor științifice obținute de lectorul universitar Stroncea Aurel și a constituit acest act.

Comisia a stabilit că în baza cercetărilor științifice realizate:

- studenții argumentează soluțiile tehnologice și constructive în proiectele de an la disciplinele "Tehnologia Fabricării Flexibil Automatizate" și "Proiectarea Dispozitivelor și Verificatoarelor" și în proiectele de licență prin analize ale structurilor dimensionale și calcule dimensionale în toleranțe (compartment obligatoriu);
- metodologia elaborată de analiză a structurilor dimensionale a permis să se treacă de la abordarea "analiza dimensională" la abordarea "proiectarea dimensională", acest fapt fiind confirmat prin includerea în planul de studii actual la programul 0715.1 - TCM a cursului "Proiectarea Dimensional Optimală a Tehnologiilor de Prelucrare Mecanică" în locul cursului "Proiectarea și Analiza Dimensională a Tehnologiilor de Prelucrare Mecanică";
- implementarea rezultatelor în procesul de studii este înlesnită prin editarea unui ghid de proiectare dimensională (Toca A., Stroncea A., Rușica I. Proiectarea dimensională optimală a tehnologiilor de prelucrare mecanică. Note de curs. Chisinau: Tehnica-UTM, 2019. 58 p. ISBN 978-9975-45-598-5);
- Soluțiile tehnice în conformitate cu brevetul de invenție nr. MD 3807F2 (Mandrină pentru fixarea pieselor) sunt pe larg utilizate pentru demonstrarea studenților a efectelor de diminuare a erorilor de prelucrare legate de instalare.

Decanul FIMIT

Sef departament Ingineria Fabricației



Dr. conf. univ. Dîntu Sergiu

Dr. hab. conf. univ. Mazuru Sergiu

Dr. conf. univ. Ciupercă Rodion

Anexa 3. Act de implementare a rezultatelor științifice, Van Dijk FEM engineering

Subject: Act of implementation of research results

Date: 03-10-2023



van Dijk FEM engineering B.V.
Visserdijk Beneden 70
3319 GW Dordrecht
The Netherlands

KvK: 56229976
BTW: NL852031269B01

T: +31 6 425 711 84
E: ronald@vandijkfem.nl

We hereby confirm the fact that the methodology for designing of the dimensional structures of mechanical objects developed by engineer Stroncea Aurel (Technical University of Moldova) was appreciated as one that corresponds to the principles of DFM (Design for Manufacturing), was approved and is used in the engineering activity of the company Van Dijk FEM engineering BV. We find that the results obtained and the recommendations made are effective and can be developed in the future.

Administrator,

Dr. Ir. Ronald Van Dijk
(ronald@vandijkfem.nl)

DECLARAȚIA PRIVIND ASUMAREA RĂSPUNDERII

Subsemnatul, declar pe răspundere personală că materialele prezentate în teza de doctorat sunt rezultatul propriilor cercetări și realizări științifice. Conștientizez că, în caz contrar, urmează să suport consecințele în conformitate cu legislația în vigoare.

Aurel Stroncea

Semnătura



Data 14.11.2023

CURRICULUM VITAE

Aurel Stroncea

Str. Studenților, 9/8, Chișinău, MD - 2045, Republica Moldova



+373 022 50 99 45 📠 +373 0688 07 077

aurel.stroncea@tcm.utm.md

Născut la 01 ianuarie 1970

EXPERIENȚĂ ÎN CADRUL UTM

2005–prezent - Lector superior, UTM. Titular la disciplinele: CAD-CAE, CAM-CNC Tehnologii, PACPPT (proiectarea asistată de calculator a produselor și proceselor tehnologice), Tehnologii de Fabricare prin Adăugare de Material, BPAC, CALS Tehnologii.

2005–2006 - prodecan FIMCM

1995–2005 - Lector superior, UTM. Titular la disciplinele: Programarea MUCN, PACPPT (proiectarea asistată de calculator a produselor și proceselor), BPAC, CALS Tehnologii.

2000–2003 - Trainer la Autodesk Training Center

1994–2000 - Lector, Colegiul Electro-Mecanic, Chișinău

Educație:

2009–2011 - Master, UTM - Inginerie și Management în Construcția de Mașini

1997–2001 – Doctorand, Catedra TCM, UTM

1989–1994 - Student UTM - Tehnologia Fabricării Automatizate

1985–1989 - Colegiul Tehnic Bălți - Reglarea mașinilor-unelte cu CN

Cursuri și certificate:

2008 - Primavera, PDMS 11.6 SP4: Training course in 2D&3D Drafting, Structure, Pipe Modelling, Cable Modelling (International Contract Engineering)

2006 - SolidEdge 12 (SolidEdge România)

2005 - UGS (UGS, România)

2005 - SolidWoks (SolidWorks Russia)

1999 - AutoCAD (Autodesk, Bălți)

ALTĂ EXPERIENȚĂ PROFESIONALĂ

2011–prezent - director de afaceri si management, Noroc Consulting SRL, Moldova
(www.norocconsulting.com)

2008–2011 - managing director, ICS International Contract Engineering SRL, Moldova
(fondator International Contract Engineering LTD)

2005–2006 - manager-chief engineer Railtechnique SRL, Moldova (fondator Railtechniek van Herwijnen B.V, Olanda)

LISTA LUCRĂRILOR ȘTIINȚIFICE, ȘTIINȚIFICO-METODICE ȘI DIDACTICE

LUCRĂRI ȘTIINȚIFICE

• Articole în reviste științifice

1. **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), Cat. B+ (0,9 c.a.)
2. 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, ISI (0,38 c.a.)
3. 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>, (0,38 c.a.)
4. 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, (0,43 c.a.)
5. Toca A., **Stroncea A.**, Rușica I., Reuța V. Influence of a constructive and technological dimensional links and errors compensation on conditions of the sizes' machining accuracy. Buletinul institutului politehnic Iași, 2004, tomul L, fascicula Va, secția Construcția de Mașini, Iași, pp. 173 - 180. ISSN 1011-2855, (0,5 c.a.)
6. 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, (0,38 c.a.)
7. Toca A., Rushica I., **Stroncea A.** About forming the sizes' accuracy. Machine Building, 2003 (55) – Number 11-12, pp. 237 – 242, (0,38 c.a.)
8. 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, (0,5 c.a.)
9. **Stroncea A.** The dimensional analysis of manufacturing processes with using excel-97. Buletinul institutului politehnic Iași, 2000, tomul XLVI, supliment I, pp. 125 - 128. ISSN 1011-2855, (0,25 c.a.)
10. Toca A., **Stroncea A.**, Goncear S. Some aspects of the process of accuracy's assurance during mechanical working. Buletinul institutului politehnic Iași, 2000, tomul XLVI, supliment I, pp. 141 - 144. ISSN 1011-2855, (0,25 c.a.)
11. 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, (0,25 c.a.)

• **Articole în culegeri științifice**

12. Toca A., **Stroncea A.**, Rushica I., Nitulenco T. Particularities of the technological dimensional structures when processing on machining centers. Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXVII международной научно-технической конференции в г. Севастополе – Донецк: ДонНТУ, 2021. с. 537 - 542 ISSN 2079-2670, (0,38 с.а.)
13. Toca A., **Stroncea A.**, Rushica I., Nitulenco T. Dimensional accuracy of machining technologies. Машиностроение и техносфера 21 века. // Сборник трудов XXVII международной научно-технической конференции в г. Севастополе – Донецк, 2020, с. 440 - 445, ISBN: 2079-2670, (0,38 с.а.)
14. Toca A., **Stroncea A.**, Rushica I. Influence of constructive and technological dimensional structures on the technological accuracy and on the values of machining allowances. Машиностроение и техносфера 21 века. // Сборник трудов XXVII международной научно-технической конференции в г. Севастополе – Донецк, Том. 2, 2018, с. 300 - 306, ISBN: 2079-2670, (0,38 с.а.)
15. Тока А., **Стронча А.**, Рушика, И., Реуца В. К вопросу оптимальности размерной структуры технологического процесса механической обработки. Машиностроение и Техносфера 21 века. Сборник трудов 12 международной научно-технической конференции, том 3, Донецк, 2005, с. 271 - 276, ISBN 966-7907-8, (0,34 с.а.)
16. Toca A., **Stroncea A.**, Rușica I., Reuța V. Sinteza structurii dimensionale optimale a procesului tehnologic de prelucrare mecanică. In: Tehnologii Moderne, Calitate, Restructurare. Culegere de lucrări științifice, UTM: 2005, vol. 1, pp. 250 - 257. ISBN 9975-3-2, ISBN 9975-9875-4-0 (vol. 1), (0,5 с.а.)
17. **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), (0,25 с.а.)
18. 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), (0,66 с.а.)
19. Toca A., **Stroncea A.** Unele aspecte ale analizei dimensionale cu efecte de compensare a erorilor. In: Conferința Internațională de Inginerie Integrată. Timișoara, 2002, 6 p. CD ISBN 973-8247-92-6, (0,38 с.а.)
20. 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), (0,34 с.а.)
21. **Stroncea A.** Elaborarea unei operații tehnologice cu ajutorul pachetului de programe CAMWORKS 2000. In: Culegere de lucrări științifice Tehnologii Moderne, Calitate, Restructurare, Chișinău: Tehnica-Info, 2001, vol. 4. pp. 222-227. ISBN 9975-9638-0-3, ISBN 9975-9638-4-6 (vol. 4), (0,38 с.а.)
22. Тока А., Рушика И., **Стронча А.**, Гончар, С. Формирование точности обработки при соблюдении принципа постоянства баз. Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Международный сборник научных трудов. Выпуск 18, Donetsk, 2001, с. 35 - 40. ISBN 966-7907-00-7, (0,25 с.а.)

23. Тока А., Рушика И., **Стронча А.**, Гончар С. О роли принципов совмещения баз и постоянства баз в процессе обеспечения точности размеров. Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Международный сборник научных трудов. Выпуск 13. Донецк, 2000, с. 228 – 233, (0,28 с.а.)
24. **Stroncea A.** Analiza dimensională a proceselor tehnologice. Aplicații în EXCEL-97. In: Culegere de lucrări științifice Tehnologii Moderne, Calitate, Restructurare, Chișinău: Tehnica-Info, 1999, vol. 1, pp. 342-348. ISBN 9975-910-74-2, (0,5 с.а.)
25. Тока А., **Stroncea A.**, Гончар, С. Aspecte ale analizei dimensionale cu efecte de compensare a erorilor. In: Culegere de lucrări științifice Tehnologii Moderne, Calitate, Restructurare, 1999, vol. 1. Chișinău: Tehnica-Info, pp. 401-406. ISBN 9975-910-74-2, (0,38 с.а.)
26. Тока А., **Stroncea A.**, Гончар С. Cu privire la efectele de compensare a erorilor. In: Culegere de lucrări științifice Tehnologii Moderne, Calitate, Restructurare, 1999, vol. 1. Chișinău: Tehnica-Info, pp. 407-410. ISBN 9975-910-74-2, (0,25 с.а.)
27. Тока А., Рушика И., **Стронча А.**, Гончар, С. Аспекты размерного анализа с эффектами компенсации. Машиностроение и Техносфера на рубеже 21 века. Сборник трудов 6-й международной научно-технической конференции. Т. 3. Донецк, 1999, с. 106 - 108, (0,19 с.а.)

- **Brevete de invenție și alte obiecte de proprietate intelectuală, materiale la saloane de invenții**

28. Mazuru, S., Rușica I., **Stroncea A.**, Malțev M. *Mandrină pentru fixarea pieselor*. Brevet de invenție nr. MD 3807F2, acordat la 31.01.2009. Int. Cl.: B23B 31/00 (2006.01); B23B 31/02 (2006.01); Nr depozit: a 2005 0209, Data depozit: 2005.07.22.

LUCRĂRI ȘTIINȚIFICO-METODICE ȘI DIDACTICE

- **Manuale și cicluri de prelegeri** (aprobate de Consiliul metodic, Consiliul facultății)
29. Bostan I., Toca A., Dulgheru V., Boboc V., **Stroncea A.**, Pereu I., Vaculenco M., Mocreac S. Proiectarea asistată de calculator în construcția de mașini. Chișinău: Tehnica-Info, 2001, 205 p. ISBN 9975-63-076-6, (13,0 с.а.)
 30. Toca A., **Stroncea A.**, Rușica I. Proiectarea dimensională optimă a tehnologiilor de prelucrare mecanică. Note de curs. Chisinau: Tehnica-UTM, 2019. 58 p. ISBN 978-9975-45-598-5, (7,5 с.а.)

LISTA PROIECTELOR REALIZATE

1. **BOP Access Modifications.** Transocean Spitsbergen. Proiectare, calcule ingineresti pentru certificare de catre **DNVGL**, elaborarea documentatiei (work pack), utilizand instrumente CAD/CAE (SolidWorks si SolidWorks Simulation, Ansys), clientul Stavanger Engineering, 2023
2. **ALVHEIM ESCAPE ROUTE/ CARGO LIFT. Mek. Engineering Løftebord .** Aker BP. Proiectare, calcule ingineresti pentru certificare de catre **DNVGL**, elaborarea documentatiei

- (work pack), utilizand instrumente CAD/CAE (SolidWorks si SolidWorks Simulation, Ansys), clientul Stavanger Engineering, 2023
3. **VALARIS DS-4 , XMT Moonpool trolley with elevation capacity.** Proiectare, calcule ingineresti pentru certificare de catre **ABS**, elaborarea documentatiei (work pack), utilizand instrumente CAD/CAE (SolidWorks si SolidWorks Simulation, Ansys), clientul Stavanger Engineering, Petrobras, Norway, Brazilia, 2021-2022
 4. **Scarabeo 8-ROV.** Proiectare, calcule ingineresti pentru certificare de catre **DNVGL**, elaborarea documentatiei (work pack), utilizand instrumente CAD/CAE (SolidWorks si SolidWorks Simulation, STAAD), clientul Stavanger Engineering, Norway 2021-2022
 5. **Engineering - Slip Joint Cradle, Spiral Staircase + access to each service platform on MRT, Door on drill floor and an extension platform from door to MRT service platform, The wood protective fence between SJ and MRT:** Proiectare, calcule ingineresti pentru certificare de catre **DNVGL**, elaborarea documentatiei (work pack), utilizand instrumente CAD/CAE (Inventor si Inventor Simulation, NS Nastran), clientul COSL, New Plymouth, New Zealand, 2020-2021
 6. **Engineering - Packing machine for nets used in primarily aquaculture and fisheries:** Proiectare, calcule ingineresti pentru certificare de catre **DNVGL**, elaborarea documentatiei (work pack), utilizand instrumente CAD/CAE (Inventor si Inventor Simulation, NS Nastran), clientul MARINE FABRICATION A/S, Os, Norway, 2020-2021
 7. **Engineering- a full Well Test package onboard COSL Prospector** Proiectare, elaborarea documentatiei (work pack), calcule ingineresti pentru certificare de catre **DNVGL**, utilizand instrumente CAD/CAE (Inventor si Inventor Simulation, NS Nastran), clientul COSL, Stavanger, Norway, 2019
 8. **Engineering – 6 Marine lift for navy (GOODLIFT)** Proiectare, elaborarea documentatiei (work pack), calcule ingineresti utilizand instrumente CAD/CAE, desene pentru certificarea de catre **Loyds** (Solid Works, Solid Works Simulation, PDM), clientul Van Dijk FEM engineering BV, Delft, The Netherlands, 2018, 2020
 9. **3d Modeling and development of technical drawings for the FIAC sculpture** Proiectare, elaborarea documentatiei (work pack), calcule ingineresti pentru certificare de catre **DNVGL**, utilizand instrumente CAD/CAE (Solid Works, Solid Works Simulation, PDM), clientul SCCV LES PROMENADES DE BRETIGNY, Paris, Franta, 2018 si 2019
 10. **Engineering of Pipe work for EC-Drill mud return line as specified in "EC-Drill - WP - MRL Line" (RIG COSL INNOIVATOR)** Proiectare, elaborarea documentatiei (work pack), calcule ingineresti utilizand instrumente CAD/CAE (Inventor si Inventor Simulation), clientul COSL, Stavanger, Norway, 2018
 11. **Engineering of VSAT support platform (RIG COSL INNOIVATOR)** Proiectare, elaborarea documentatiei (work pack), calcule ingineresti pentru certificare de catre **DNVGL**, utilizand instrumente CAD/CAE (Inventor si Inventor Simulation, NS Nastran), clientul COSL, Stavanger, Norway, 2017

- 12. Engineering for Relief line for Well Test Equipment.** Proiectare, elaborarea documentatiei (work pack), calcule ingineresti pentru certificare de catre **DNVGL**, utilizand instrumente CAD/CAE (Inventor si Inventor Simulation), clientul COSL, Stavanger, Norway, 2017
- 13. Engineering - Cement House Deck Extension** Proiectare, elaborarea documentatiei (work pack), calcule ingineresti pentru certificare de catre **DNVGL**,utilizand instrumente CAD/CAE (Inventor si Inventor Simulation), clientul COSL, Stavanger, Norway, 2017
- 14. Consulting services for upgrades of drawings (RIG COSL INNOVATOR, COSL, PROMOTER, COSL PIONEER)** Verificarea, Mentinerea bazei de date cu desene), calcule ingineresti utilizand instrumente CAD/CAE (Inventor si AutoCAD, PIMS, WorkFlow), clientul COSL, Stavanger, Norway, 2016-2021
- 15. Packing Box** Proiectare, elaborarea documentatiei (work pack), calcule ingineresti utilizand instrumente CAD/CAE (SolidWorks si COSMOS), clientul MarineFabrication, Norway, 2016
- 16. Cradle for sleep Joint.** Proiectare, elaborarea documentatiei (work pack), calcule ingineresti pentru certificare de catre **DNVGL**, utilizand instrumente CAD/CAE SolidWorks si COSMOS, NS Nastran), clientul SEMCO Maritimes, Norway, 2015
- 17. The connection bridge conveyer between 2 SILO.** Proiectare, elaborarea documentatiei (work pack), calcule ingineresti utilizand instrumente CAD/CAE SolidWorks si COSMOS, NS Nastran), clientul Roxel Anestaad Maritimes, Norway, 2014.
- 18. 3D modeling of Ullrig.** Modelarea 3D a a rigului in baza noului de puncte optinute in urma scanarii 3D SolidWorks, Cyclon), clientul Westcon, Olen, Norway, 2014.
- 19. 3D modeling SendgeBerge** Modelarea 3D a puntei navei in baza noului de puncte optinute in urma scanarii 3D (Cyclon, PDMS), clientul BW Offshore, Oslo, Norway, 2013

COMPETENȚE LINGVISTICE

Româna - limba maternă

Rusa - nativ

Engleza - limbă profesională

Franceza - nivel începător