

**ESENȚA ȘI EFECTELE COMPENSĂRII ERORILOR LA PRELUCRAREA MECANICĂ****Toca A.\*, Stângaci I., Stroncea A.**

Universitatea Tehnică a Moldovei, bd. Ștefan cel Mare, 168, MD-2004, Chișinău, Republica Moldova

\*e-mail: [a\\_toca@mail.utm.md](mailto:a_toca@mail.utm.md)

În lucrare este analizat fenomenul compensării erorilor la prelucrarea mecanică, sunt prezentate modalitățile de determinare a toleranțelor și a abaterilor limită pentru elementele lanțurilor dimensionale tehnologice. Se arată, că respectarea principiului orientării invariante la prelucrare permite sporirea preciziei prin manifestarea fenomenului de compensare a erorilor și în primul rând a erorii de instalare. Condițiile de prelucrare devin mai stabile, toleranțele adaosurilor de prelucrare - mai mici.

Cuvinte-cheie: prelucrare mecanică, precizia prelucrării, analiza dimensională, compensarea erorilor, abateri limită.

In the paper the analysis of the effect errors' compensation of machining is made, there are shown the ways of definition of tolerance and limit deviation of component links and closing link of technological dimensional chains. It is shown, that the observance of a principle of persistence of bases while machining allows to increase the processing's accuracy at the expense of the effect of errors' compensation and, first of all, of the installation errors. The machining conditions become more stable, the machining allowances' tolerances smaller.

Keywords: machining, machining accuracy, dimensional analysis, errors' compensation, limit deviations.

**INTRODUCERE**

Conceptul contemporan al fabricării prin prelucrare mecanică prevede utilizarea utilajului în care sunt înglobate în afara funcțiilor de prelucrare și funcții de elaborare a proceselor tehnologice și a programelor de prelucrare. Varietatea mare de produse, schimbarea frecventă a condițiilor de funcționare duce la creșterea cerințelor față de calitatea proceselor tehnologice, mai ales, în sensul micșorării rolului tradițional al operatorului și micșorării numărului de intervenții ale operatorului cu corecții operative. Crește substanțial ponderea deciziilor tehnologice luate definitiv înainte de începerea prelucrării. Utilajul tehnologic este polifuncțional, ce permite executarea unui mare număr de faze tehnologice deosebite prin precizie și efectul tehnico-fizic utilizat în cadrul aceleiași operații. Nu mai este valabilă interdicția de comasare într-o operație a fazelor tehnologice de degroșare și finisare, călirea se poate face cu raze laser pe mașina unealtă de prelucrare mecanică fiind posibilă și rectificarea ulterioară a suprafețelor respective.

Aceste modificări cu caracter conceptual necesită noi soluții în procesul de asigurare a calității și în primul rând ai parametrilor preciziei de prelucrare, care este asigurată mai

lesne la respectarea principiilor coincidenței bazelor și orientării invariabile.

În cazul proceselor tehnologice cu multe operații tehnologice, la fiecare din următoarea schema de orientare poate fi aleasă astfel încât să fie respectat principiul coincidenței bazelor tehnologice de instalare și constructive de măsurare. Prelucrarea integrală a unei piese dintr-o singură instalare exclude pentru majoritatea cotelor posibilitatea respectării principiului coincidenței bazelor, deoarece cotele constructive sunt stabilite reieșind din funcționalitatea piesei, iar pe mașini unelte pot fi asigurate distanțe liniare sau unghiulare dintre organele de lucru. Astfel crește considerabil rolul principiului orientării invariante în situația când cotele se formează de la suprafața de orientare sau de la o suprafață generată în cadrul aceleiași operații.

Analiza dimensională a proceselor tehnologice este o metodologie care oferă posibilitatea stabilirii relațiilor dimensionale la etapa de elaborare a procesului tehnologic, permite stabilirea preciziei de prelucrare, alegerea corectă a mașinilor unelte după precizia de prelucrare, stabilirea normelor de precizie pentru echipamentul tehnologic, permite depistarea locurilor înguste, face ca procesele tehnologice să fie echilibrate [1, 2, 3]. În același timp, abordarea problematicii

analizei dimensionale se face de pe poziții deosebite. Tradițional, analiza dimensională pentru cotele liniare se face utilizându-se metoda maximului și minimumului, mai rar - metoda probabilităților. Metoda maximului și minimumului 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 mare decât este în realitate necesar. Acest fapt are loc datorită efectelor de compensare a erorilor [1, 2, 3, 4] de care, de obicei, nu se ține cont.

Analiza dimensională în varianta maximului și minimumului este bazată pe faptul că formarea tuturor cotelor-elemente ale lanțurilor dimensionale se produce în mod independent. Această independență face ca toleranța elementului de închidere să cumuleze toleranțele elementelor componente (Fig. 1, b). Logic este de afirmat, că la formarea cotelor în mod dependent sau parțial dependent, utilizarea metodei maximului și minimumului nu este corectă.

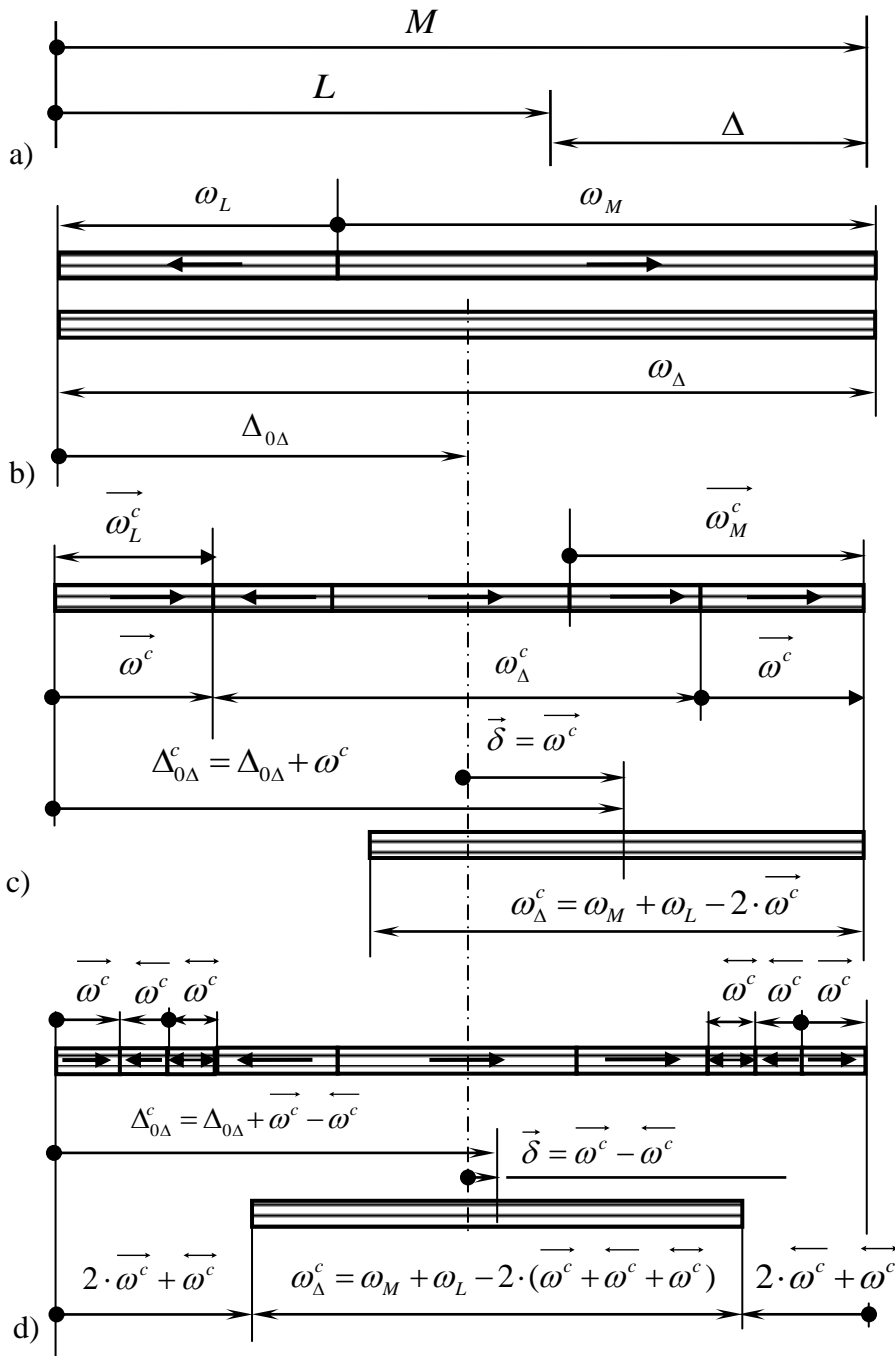


Fig. 1. Compensarea erorilor la prelucrarea mecanică: a) lanț dimensional tehnologic; b) rezolvare în varianta “maximum-minimum”; c) modificarea câmpului de toleranță al elementului de închidere; c) modificarea poziției câmpului de toleranță al elementului de închidere (rezolvare exactă).

## ESENȚA COMPENSĂRII ERORILOR

Formarea corelată a cotelor se explică prin existența în anumite situații în structura erorilor de prelucrare a componentelor - vectori de aceeași direcție (erori provocate de cedarea elementelor sistemului tehnologic, de uzura sculelor, de orientare, etc.). Astfel, de exemplu, un element de mărire (conform schemei lanțului dimensional, Fig. 1, a) prin unele componente ale toleranței sale este de mărire, prin altele este de micșorare și invers (fig. 1, c). În aceste situații lanțul dimensional nu mai este omogen deoarece nu mai include elemente cu o influență 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 de erori se compensează reciproc.

În conformitate cu metoda maximului și minimului toleranța elementului de închidere  $\omega_A$  este constituită prin cumulara toleranțelor elementelor componente. Prezența în componența câmpului de toleranță al elementului  $L$  (de micșorare) a erorilor cu efect de mărire duce la apariția erorilor compensabile  $\overrightarrow{\omega_L^c}$  și  $\overleftarrow{\omega_M^c}$ . Compensarea are loc numai la mărirea efectului comun ambelor elemente și reprezintă valoarea minimă a erorilor compensabile ale elementelor  $M$  și  $L$  adică:

$$\omega^c = \text{Min}\{\omega_M^c, \omega_L^c\} \quad (1)$$

Prin urmare, toleranța elementului de închidere se va determina din relația:

$$\omega_A^c = \omega_M + \omega_L - 2 \cdot \omega^c \quad (2)$$

Compensarea erorilor nu numai că modifică câmpul de toleranță al elementului de închidere, dar și-l deplasează față de poziția determinată prin metoda maximului și minimului (fig. 1, c) în direcția vectorului erorii de compensare la distanța  $\vec{\delta} = \overrightarrow{\omega^c}$ .

În caz general, efectul de compensare poate avea loc datorită existenței a trei perechi de vectori compensatori - cu direcții opuse și aleatorii  $\overrightarrow{\omega^c}$ ,  $\overleftarrow{\omega^c}$  și  $\overleftrightarrow{\omega^c}$ , fiecare dintre care se determină din relația de tipul (1), iar  $\omega_A^c$  va avea forma (Fig. 1, d):

$$\omega_A^c = \omega_M + \omega_L - 2 \cdot (\overrightarrow{\omega^c} + \overleftarrow{\omega^c} + \overleftrightarrow{\omega^c}) \quad (3)$$

Poziția modificată a câmpului de toleranță va fi determinată de vectorul rezultant  $\vec{\delta} = \overrightarrow{\omega^c} + \overleftarrow{\omega^c} + \overleftrightarrow{\omega^c}$  (vectorul  $\overleftrightarrow{\omega^c}$  nu modifică poziția câmpului de toleranță).

## EFECTELE COMPENSĂRII ERORILOR

Lanțurile dimensionale cu efecte de compensare au caracter situațional. Una și aceeași cotă poate face parte simultan din două sau mai multe lanțuri dimensionale, în care efectele de compensare pot fi diferite sau nule.

Efectele de compensare provoacă dezechilibrarea lanțului dimensional constituit prin metoda maximului și minimului. Soluții corecte pot fi obținute prin utilizarea conceptului de lanț dimensional echivalent în care echilibrul este asigurat de modificarea toleranței și abaterilor cotelor elemente componente. Această modificare este valabilă numai în cadrul lanțului concret.

Efectele de compensare a erorilor permit:

- obținerea unei precizii mai înalte a elementului de închidere în comparație cu precizia estimată prin metoda maximului și minimului;
- executarea cotelor - elemente componente ale lanțului dimensional - cu o precizie mai joasă de cât cea determinată prin metoda maximului și minimului.

Prima posibilitate este reflectată de micșorarea toleranțelor cotelor elemente componente  $M$  și  $L$  în lanțul dimensional echivalent cu  $\overrightarrow{\omega^c} + \overleftarrow{\omega^c} + \overleftrightarrow{\omega^c}$ , fiind valabile relațiile:

$$\begin{aligned} ES_M^c &= ES_M + \xi \cdot \overrightarrow{\omega^c} + (|\xi| - 1) \cdot \overleftarrow{\omega^c} - \overleftrightarrow{\omega^c} / 2 \\ EI_M^c &= EI_M + (\xi + 1) \cdot \overleftarrow{\omega^c} + |\xi| \cdot \overleftrightarrow{\omega^c} + \overrightarrow{\omega^c} / 2 \\ ES_L^c &= ES_L + (|\xi| - 1) \cdot \overrightarrow{\omega^c} + \xi \cdot \overleftarrow{\omega^c} - \overleftrightarrow{\omega^c} / 2 \\ EI_L^c &= EI_L + |\xi| \cdot \overleftrightarrow{\omega^c} + (\xi + 1) \cdot \overleftarrow{\omega^c} + \overrightarrow{\omega^c} / 2 \\ \Delta_{oA}^c &= \Delta_{oA} + (\xi - |\xi| + 1) \cdot (\overrightarrow{\omega^c} - \overleftarrow{\omega^c}) \end{aligned} \quad (4)$$

unde  $ES$ ,  $EI$ ,  $\Delta_{oA}$  și  $ES^c$ ,  $EI^c$ ,  $\Delta_{oA}^c$  - abateri limită ale cotelor elemente componente  $M$ ,  $L$  și coordonatele mijlocului câmpurilor de toleranță ale elementului de închidere în lanțul dimensional tradițional și respectiv în lanțul

echivalent,  $\xi$  - parametru ( $\xi = 0$  pentru cazul coincidenței vectorului  $\vec{\omega}^c$  cu direcția formării cotei - element de mărire a lanțului dimensional și  $\xi = -1$  pentru cazul incoincidenței lor),

A doua posibilitate este reflectată în relațiile:

$$\begin{aligned} ES_M^c &= ES_M - \xi \cdot \vec{\omega}^c - (|\xi| - 1) \cdot \overleftarrow{\omega}^c + \overleftarrow{\omega}^c / 2 \\ EI_M^c &= EI_M - (\xi + 1) \cdot \vec{\omega}^c - |\xi| \cdot \overleftarrow{\omega}^c - \overleftarrow{\omega}^c / 2 \\ ES_L^c &= ES_L - (|\xi| - 1) \cdot \vec{\omega}^c - \xi \cdot \overleftarrow{\omega}^c + \overleftarrow{\omega}^c / 2 \\ EI_L^c &= EI_L - |\xi| \cdot \vec{\omega}^c - (\xi + 1) \cdot \overleftarrow{\omega}^c - \overleftarrow{\omega}^c / 2 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\Delta_{oM}^c = \Delta_{oM} + \frac{\vec{\omega}^c \cdot (1 + 2 \cdot \xi) - \overleftarrow{\omega}^c \cdot (1 - 2 \cdot |\xi|)}{2}$$

$$\Delta_{oL}^c = \Delta_{oL} - \frac{\vec{\omega}^c \cdot (1 - 2 \cdot |\xi|) - \overleftarrow{\omega}^c \cdot (1 + 2 \cdot \xi)}{2}$$

unde  $\Delta_{oM}$ ,  $\Delta_{oL}$  și  $\Delta_{oM}^c$ ,  $\Delta_{oL}^c$  - coordonatele mijlocului câmpurilor de toleranță ale cotelor  $M$  și  $L$  elemente componente ale lanțurilor dimensionale tradițional și respectiv echivalent. În acest caz toleranțele cotelor elemente componente  $M$  și  $L$  în lanțul dimensional echivalent se majorează cu  $\vec{\omega}^c + \overleftarrow{\omega}^c + \overleftarrow{\omega}^c$ , coordonata mijlocului câmpului de toleranță a elementului de închidere  $\Delta$  rămâne neschimbată și determinată de relația  $\Delta_{o\Delta}^c = \Delta_{o\Delta}$ .

Analiza dimensională pentru cotele diametrice ale suprafețelor cilindrice (calculul adaosurilor de prelucrare, dimensiunilor intermediare, etc.) la faze succesive se face în mod diferit pentru cazurile când precizia este asigurată prin metoda individuală (cote formate independent) și pe mașini unelte reglate anterior (cote formate corelat în baza legii copierii erorilor). Deosebirea este reflectată în valoarea toleranței adaosului de prelucrare, respectiv:

$$\omega_{\Delta} = \omega_{i-1} + \omega_i, \quad (6)$$

$$\omega_{\Delta} = \omega_{i-1} - \omega_i. \quad (7)$$

Aici  $\Delta$  este element de închidere - adaosul de prelucrare,  $i-1$ , și  $i$  sunt faze tehnologice succesive.

În realitate, erorile provocate de cedarea elementelor sistemului tehnologic nu au un efect dominant, în afară, doar, de unele cazuri

specifice. Analiza dimensională cu efecte de compensare duce la relația

$$\omega_{\Delta} = \omega_{i-1} + \omega_i - 2 \cdot \omega^c. \quad (8)$$

Rezultatele obținute din abordările bazate pe efectele de compensare și pe acțiunea legii copierii erorilor vor coincide numai dacă  $\omega_{i-1} - \omega_i = \omega_{i-1} + \omega_i - 2 \cdot \omega^c$  sau  $\omega^c = \omega_i$ , ce corespunde, de fapt, condiției compensării tuturor componentelor erorilor de prelucrare la faza tehnologică  $i$ . Această condiție nu poate fi îndeplinită și, prin urmare, abordarea bazată pe legea copierii erorilor estimează precizia de prelucrare mai înaltă decât cea reală.

Astfel se poate afirma că precizia de prelucrare pentru elementul de închidere a lanțului dimensional este estimată prin metoda maximului și minimumului ca mai joasă (6), prin metoda bazată pe legea copierii erorilor ca mai înaltă (7), iar prin metoda ce ține cont de compensarea erorilor - ca soluție exactă (8).

#### COMPENSAREA ERORILOR LA PRELUCRĂRI DINTR-O INSTALARE

În procesul de prelucrare pe piese există două sisteme de suprafețe: suprafețe, starea cărora nu se modifică pe parcursul operației (suprafețe neprelucrate, suprafețe - baze tehnologice); suprafețe prelucrate.

În rezultatul prelucrărilor se modifică trei mulțimi de relații dimensionale:

- mulțimea relațiilor dimensionale dintre suprafețe prelucrate în cadrul operației și suprafețele - baze tehnologice;
- mulțimea relațiilor dimensionale dintre suprafețe prelucrate și suprafețele neprelucrate în cadrul operației;
- mulțimea relațiilor dimensionale dintre suprafețe prelucrate în cadrul operației;

Aceste trei mulțimi se deosebesc între ele prin modalitățile diferite de formare a preciziei.

Precizia cotelor dintre suprafețe prelucrate în cadrul operației și suprafețele - baze tehnologice este determinată în mod direct de precizia tehnologică a mașinii unelte (fig. 2, a):

$$\omega_L = \omega_{techL} \quad (9)$$

Cotele dintre suprafețele prelucrate și cele neprelucrate se formează în mod indirect de la baza tehnologică. Astfel precizia lor este determinată de precizia tehnologică a mașinii

unelte  $\omega_{tech}$ , scade datorită erorii de orientare  $\varepsilon_{loc}$  (fig. 2, b), se îmbunătățește datorită efectului de compensare a erorilor, care are caracter interoperațional ( $2 \cdot \omega_{comp}$ ) [2]:

$$\omega_L = \omega_{techL} + \varepsilon_{loc} - 2 \cdot \omega_{comp} \quad (10)$$

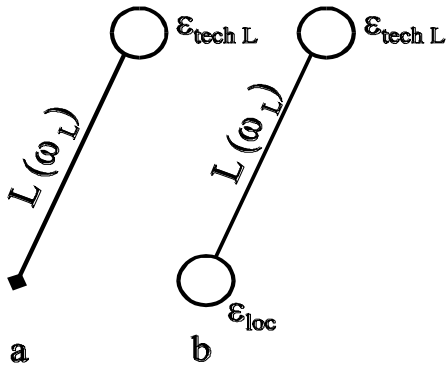


Fig. 2. Formarea preciziei de pre-lucrare a cotelor: a) dintre suprafața prelucrată și baza tehnologică; b) dintre suprafața prelucrată și suprafața neprelucrată.

Constituirea relațiilor dimensionale dintre suprafețele prelucrate este posibilă în două

variante. Una din ele prevede prelucrarea suprafețelor respective la cote controlate de la baza tehnologică. În rezultat, cotele dintre suprafețele prelucrate reprezintă elemente de închidere ale lanțurilor dimensionale (fig. 3). Eroarea de orientare este nulă la prelucrarea de la o singură bază tehnologică (Fig. 3, a), sau nenulă la prelucrarea de la diferite baze (fig. 3, b), și parțial se compensează (Fig. 3, c, zona hașurată) fiind parte a componentei  $2 \cdot \omega_{comp}$ .

Atunci:

$$\omega_L = \omega_{techM} + \omega_{techN} - 2 \cdot \omega_{comp} \quad (11)$$

În varianta a doua, cotele se formează în mod direct între suprafețele prelucrate fără participarea bazelor tehnologice (Fig. 4). În calitate de elemente de referință sunt:

- suprafețele prelucrate în cadrul operației actuale;
- orice suprafață de pe dispozitivul de instalare, de pe organul de lucru al mașinii unelte;
- puncte, suprafețe din spațiul de coordonate a mașinii unelte.

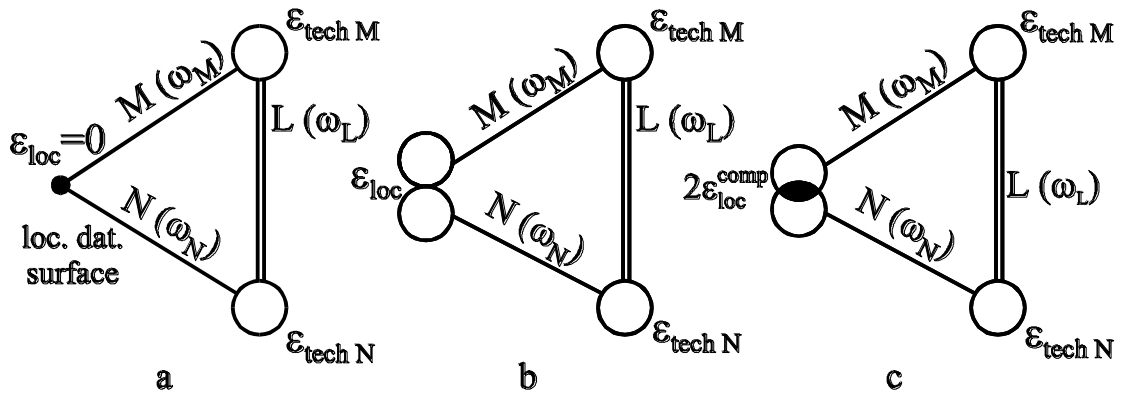


Fig. 3. Formarea preciziei cotei – element de închidere a lanțului dimensional. tehnologic

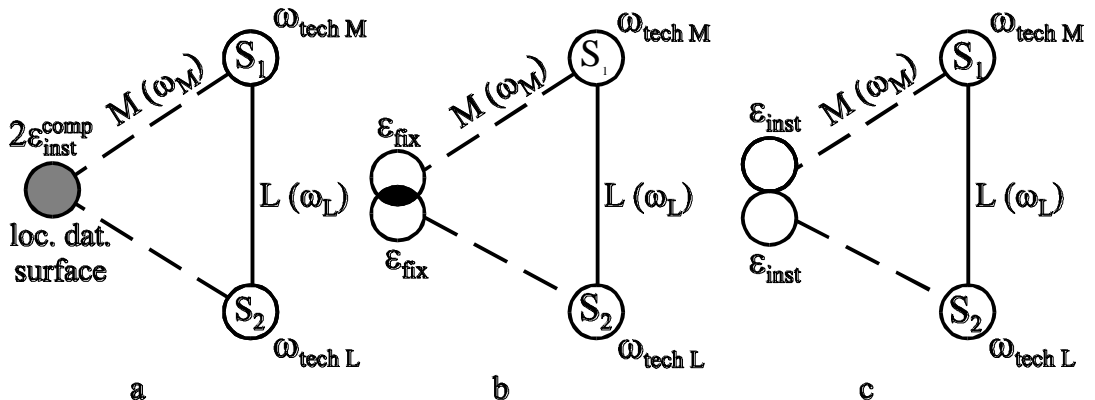


Fig. 4. Modalități de formare a preciziei de prelucrare a cotelor dintre suprafețele prelucrate.

Din fig. 4 se vede că eroarea de instalare nu influențează precizia cotei formate. Mai strictă este altă afirmație. Deoarece prelucrare are loc de la aceeași bază tehnologică – eroarea de instalare este compensată în întregime (fig. 4, a). În același context, se poate spune că la fixarea repetată a piesei apare o zonă ce nu se mai compensează – eroarea de fixare  $2\varepsilon_{fix}$  (Fig. 4, b). Schimbarea bazelor tehnologice duce la mărirea zonei de erori necompensabile determinată de valoarea erorii de instalare -  $2\varepsilon_{instal}$  (Fig. 4, c).

Respectarea principiului orientării invariante permite ca cota tehnologică să coincidă cu cota constructivă derivată. Dacă se formează o cotă dintre două suprafețe și punctul de referință se află pe una din ele, atunci precizia de reglare  $\omega_{sett-up}$  este influențată numai de eroarea poziționare în coordonata celeilalte suprafețe  $\varepsilon_{poz}$  (fig. 5, a). Situația este caracteristică prelucrărilor pe mașini cu control numeric în coordonate relative. Dacă punctul de referință se găsește în afara suprafețelor prelucrate, atunci în structura  $\omega_{sett-up}$  intră  $2\varepsilon_{poz}$  (Fig. 5, b).

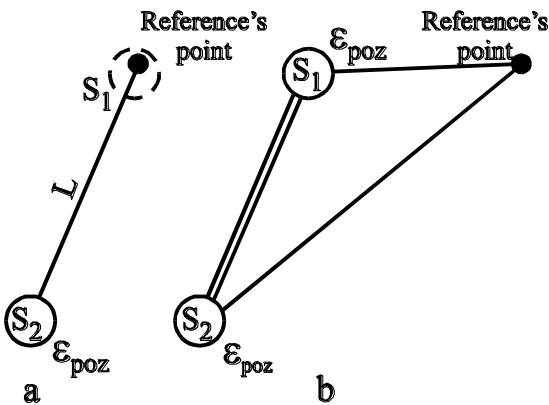


Fig. 5. Formarea erorii de instalare

Distanța  $L$  se formează pe mașini unelte cu precizia reglării  $\omega_{sett-up}$ . Cota pe piesă  $L$  dintre punctul de referință în apropierea suprafeței  $S_1$  și suprafața  $S_2$  se formează cu precizia tehnologică a mașinii unelte  $\omega_{techL}$  (fig. 6, a). Poziția suprafeței  $S_1$  după prelucrare este nedefinită în limitele propriilor erori de prelucrare și este determinată de

precizia cotei  $M$  formată de la baza tehnologică  $\omega_{techM}$  (fig. 6, b). Se compensează în întregime eroarea de instalare, situațional se compensează eroarea de reglare și erorile de prelucrare. Astfel avem:

$$\omega_L = \omega_{techL} + \omega_{techM} - 2 \cdot \varepsilon_{inst} - 2 \cdot \varepsilon_{sett-up} - 2 \cdot \omega_{comp} \quad (12)$$

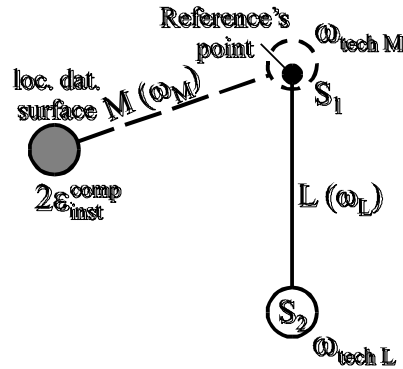


Fig. 6. Formarea preciziei cotelor dintre suprafețe prelucrate

Adaosul de prelucrare este și el o cotă cu caracter temporar, care se formează dintre o suprafață ce dispare în procesul prelucrării și o altă suprafață generată în rezultatul prelucrării. Utilizarea relației 12 pentru adaosuri permite să se afirme că efectul respectării principiului orientării invariante se manifestă prin creșterea preciziei tehnologice a mașinii unelte  $\omega_{tech}^{T.S.}$  datorită micșorării toleranței adaosului de prelucrare și sporirii stabilității procesului de așchiere.

### CONCLUZII

Conceptul contemporan în domeniul tehnologiilor de prelucrare mecanică a schimbat esențial accentele referitor procesul de asigurare a preciziei. Rolul operatorului ca factor decizional a scăzut odată cu creșterea ponderii soluțiilor tehnologice luate până la începutul prelucrărilor. Un rol deosebit aparține analizei dimensionale în varianta exactă ce ține cont de compensarea erorilor.

Utilizarea analizei dimensionale cu efecte de compensare permite o estimare mai exactă a preciziei de prelucrare în sensul că se exclude o rezervă nejustificată a preciziei de prelucrare. Cotele tehnologice – elemente componente ale lanțurilor dimensionale tehnologice pot fi executate la o precizie mai joasă.

Respectarea principiului orientării invariante oferă posibilitatea asigurării preciziei de prelucrare necesare mai lesne în baza efectelor de compensare a erorilor.

### BIBLIOGRAFIE

1. Матвеев В. В., Тверской М. М., Бойков Ф. И. Размерный анализ технологических процессов. Москва: Машиностроение, 1982. 264 с.

2. Блюменкранц Д. Л., Матвеев В. В. Система автоматизированного проектирования с использованием размерного анализа.

Вестник машиностроения, 1988, № 4, с. 33 - 38.

3. Toca A., Stroncea A., Gonciar S. Aspecte ale analizei dimensionale cu efecte de compensare a erorilor. Tehnologii Moderne. Calitate. Restructurare. Chișinău: Tehnica-Info, 1999, vol. 1, p. 401 – 406

4. Ratchev S., Liu S., Huang W., Becker A. A. Milling error prediction and compensation in machining of low-rigidity parts. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, vol. 44, Issue 15, p. 1629-1641.

Prezentat la redacție la 17 septembrie 2012