

## Capitolul 14

# ALEGEREA MATERIALELOR PENTRU APLICAȚIILE TEHNICE

### 14.1. Introducere

La alegerea materialelor pentru o aplicație tehnică trebuie avute în vedere două principii:

- \* materialele selectate trebuie să posede proprietățile fizico-chimice, mecanice și tehnologice corespunzătoare cerințelor impuse de aplicația în care sunt utilizate;

- \* materialele alese trebuie să conducă la soluții tehnice de rezolvare a aplicației care să fie convenabile economic, adică să poată fi transpuse în practică cu cheltuieli acceptabile privind elaborarea materialelor, obținerea semifabricatelor și realizarea produselor impuse de aplicație.

În scopul facilitării alegerii lor pentru diverse aplicații tehnice, s-a recurs la împărțirea materialelor în două mari clase:

- **materialele structurale (materialele de construcție)** sunt cele la care caracteristicile de rezistență mecanică sunt cele mai importante, ele fiind destinate confecționării elementelor (pieselor, componentelor) supuse la solicitări mecanice; în lucrarea de față, adresată în principal celor care se pregătesc sau care lucrează în domeniul ingineriei mecanice, sunt tratate cu precădere materialele din această clasă: materialele metalice (oțeluri, fonte și aliaje neferoase), materialele pe bază de substanțe macromoleculare, materiale ceramice și sticlele, lemnul și materialele compozite;

- **materialele funcționale** sunt cele la care caracteristicile cele mai importante sunt de natură electrică, magnetică, optică, chimică, etc., ele trebuind să asigure îndeplinirea rolului funcțional al unor elemente (piese, componente) pentru electrotehnică, electronică, automatică și informatică, tehnica măsurării,

*detecția și înregistrarea semnalelor de diverse naturi fizice, etc.*; materialele din această clasă (materialele semiconductoare, materialele magnetice, materialele ceramice cu proprietăți piezoelectrice, polimerii pentru cristale lichide, ceramicele electrooptice, materialele conductoare și superconducoare, etc.) nu au făcut obiectul acestei lucrări.

Tinând de cele expuse mai înainte, în acest capitol sunt tratate în principal aspectele privind alegerea materialelor structurale pentru aplicațiile tehnice.

## 14.2. Criteriile și metodele de selecție a materialelor

Prima etapă care trebuie parcursă la alegerea materialelor adecvate realizării unui produs constă în *cunoașterea tuturor condițiilor tehnice ce definesc funcționalitatea lui și comportarea sa în exploatare*:

- **condițiile privind solicitările mecanice** la care este supus produsul: complexitatea sistemului de solicitare (solicitări simple, de tip întindere compresie, încovoiere simplă sau forfecare pură, sau solicitări compuse), intensitatea solicitărilor, caracterul static sau dinamic al aplicării acestora, caracterul variabil în timp sau constant al solicitărilor (care implică apariția sau nu a fenomenului de degradare prin oboseală), posibilitatea ca solicitările să genereze fenomene de pierdere a stabilității unor componente ale produsului (a căror evitare impune asigurarea unor anumite rigidități ale componentelor), condițiile termice în care se aplică solicitările (solicitări la temperaturi scăzute, solicitări în condiții de temperatură normală sau solicitări în condiții termice care determină manifestarea fenomenului de fluaj), condițiile de mediu în care se aplică solicitările (mediu de lucru neutru, mediu corosiv sau abraziv) etc.;

- **condițiile privind caracteristicile fizice** ale materialului produsului, care determină sau influențează îndeplinirea funcțiilor pentru care acesta este realizat: densitatea, fuzibilitatea, rezistivitatea electrică, conductibilitatea termică, dilativitatea termică etc.;

- **condițiile privind precizia dimensională a produsului și calitatea suprafețelor acestuia**;

- **condițiile privind fiabilitatea și mentenabilitatea** produsului, *fiabilitatea fiind proprietatea produsului exprimată prin probabilitatea ca acesta să-și îndeplinească funcțiile în condiții prescrise, în cursul unei perioade de timp date, iar mentenabilitatea fiind proprietatea produsului exprimată prin probabilitatea ca acesta să poată fi supravegheat, întreținut și reparat într-o anumită perioadă de timp.*

În prezent, în gama condițiilor tehnice ale produselor industriale se includ

și cele privind protecția oamenilor și mediului înconjurător (**condițiile ecologice**) și **condițiile privind reciclabilitatea** (proprietatea produsului scos din uz de a putea fi transformat în deșeuri reintegrabile în natură sau valorificabile prin procese tehnologice de realizare a unor noi produse).

După analiza detaliată a condițiilor tehnice impuse produsului care trebuie obținut se formulează criteriile de selecție a materialelor necesare pentru fabricarea acestuia, grupate în categoriile prezentate în continuare:

**A. Criteriile privind proprietățile materialelor** sunt principalele criterii folosite pentru alegerea acestora; în această categorie sunt incluse:

– *criteriile privind caracteristicile mecanice* care trebuie asigurate (în condițiile de temperatură și mediu de lucru corespunzătoare produsului ce trebuie realizat): duritatea, rezistența la rupere, limita de curgere, modulul de elasticitate, alungirea procentuală după rupere, energia de rupere, rezistența la oboseală, rezistența la fluaj, etc.;

– *criteriile privind caracteristicile fizice* care trebuie asigurate: densitatea, temperatura de topire-solidificare, rezistivitatea electrică, coeficientul de dilatare termică, conductibilitatea termică, etc.;

– *criteriile privind caracteristicile chimice și structurale* impuse: compoziția chimică, structura, conținutul de impurități, rezistența la coroziune (în mediul de lucru și în condițiile de solicitare corespunzătoare produsului ce trebuie realizat);

– *criteriile privind caracteristicile semifabricatelor* necesare pentru obținerea produsului: forma, dimensiunile și masa semifabricatelor, calitatea suprafețelor semifabricatelor.

În mod obișnuit criteriile privind alegerea materialelor în funcție de proprietăți se formulează considerând diversele caracteristici care exprimă cantitativ proprietățile acestora. Astfel, dacă se notează cu  $CA_P$  nivelul limită (minim sau maxim) acceptabil (din punctul de vedere al aplicației pentru care trebuie ales materialul) al unei caracteristici de material și cu  $CA_M$  nivelul (aceleiași caracteristici) asigurat de materialele din gama considerată la selecție, criteriul se poate exprima analitic în una din următoarele forme:

$$CA_M \geq CA_P \text{ sau } CA_M \leq CA_P; \quad (14.1)$$

de exemplu, dacă într-o aplicație este necesar să se utilizeze materiale având rezistența la rupere mai mare decât  $300 \text{ N/mm}^2$ , criteriul de selecție a materialelor va fi  $R_m > 300 \text{ N/mm}^2$ , iar dacă aplicația impune ca materialele să aibă densitatea mai mică decât  $4000 \text{ kg/m}^3$ , criteriul de selecție a materialelor se poate scrie  $\rho \leq 4000 \text{ kg/m}^3$ .

Criteriile din această categorie pot fi ierarhizate în funcție de importanță, stabilindu-se pentru fiecare criteriu dacă este principal (de bază) sau secundar (auxiliar) și dacă este obligatorie sau facultativă respectarea sa. Pentru ierarhizarea criteriilor și stabilirea ponderii (coeficientului de importanță) cu care fiecare

criteriu trebuie considerat la luarea deciziilor privind alegerea materialelor se poate folosi metoda prezentată în figura 14.1, la aplicarea căreia se parcurg următoarele etape:

- se precizează criteriile care se iau în considerare  $K_1, K_2, \dots, K_i, K_j, \dots, K_n$ ;
- echipa de proiectare stabilește valorile ponderilor parțiale  $a_{ij}$ ,  $i \neq j$  și  $a_{ij} + a_{ji} = 1$  și întocmește un tablou numit matricea preferințelor; pentru stabilirea valorilor ponderilor  $a_{ij}$  se consideră pe rând perechile de criterii  $(K_i, K_j)$ ,  $i \neq j$  și, presupunând că numai criteriile  $K_i$  și  $K_j$  intervin în alegerea materialului, se estimează coeficientul de importanță al fiecărui criteriu (de exemplu,  $a_{31} = 0,7$  și  $a_{13} = 0,3$  rezultă considerând perechea de criterii  $(K_1, K_3)$  și apreciind că, în cazul când numai aceste două criterii se iau în considerare, respectarea criteriului  $K_1$  asigură în proporție de 70% luarea unei decizii bune la alegerea materialului);

- se calculează suma ponderilor parțiale corespunzătoare fiecărui criteriu (suma pondrilor înscrise pe fiecare coloană a matricei preferințelor)  $S_{pj} = \sum_{i=1}^n a_{ij}$  și

suma tuturor ponderilor parțiale înscrise în matrice  $S_p = \frac{n(n-1)}{2}$ ;

- se calculează ponderea cu care trebuie considerat fiecare criteriu la alegerea materialelor  $a_j = \frac{S_{pj}}{S_p}$ ,  $j = 1 \dots n$  ( $\sum_{j=1}^n a_j = 1$ ) și pe această baza se poate

face ierarhizarea după importanța a criteriilor.

Pentru ca numărul criteriilor utilizate la selecția materialelor în funcție de proprietăți să fie cât mai mic (în scopul facilitării alegerii) se apelează la formularea unor criterii bazate pe caracteristici sintetice (care înglobează mai multe caracteristici ale materialului). De exemplu, dacă pentru o aplicație trebuie ales un material care să asigure un nivel ridicat al rezistenței mecanice a pieselor și un nivel scăzut al masei acestora, criteriul de selecție a materialelor se formulează considerând caracteristica (sintetică) denumită rezistență mecanică specifică  $K_R$ , definită prin raportul dintre rezistența la rupere a materialului  $R_m$  și greutatea specifică  $\gamma$  ( $\gamma = \rho g$ ,  $\rho$  fiind densitatea materialului, iar  $g$  accelerația gravitațională)  $K_R = \frac{R_m}{\gamma}$ . De asemenea, dacă pentru o aplicația trebuie ales un

material care să asigure un nivel ridicat al rigidității pieselor (deformații elastice mici ale pieselor în prezența solicitărilor mecanice) și un nivel scăzut al masei acestora, criteriul de selecție a materialelor se formulează considerând caracteristica (sintetică) numită modul de elasticitate specific  $K_E = \frac{E}{\gamma}$ , iar dacă trebuie ales un material care să asigure în mod eficient o bună comportare a

pieselor la solicitări variabile, criteriul de selecție a materialelor se formulează considerând caracteristica (sintetică) numită rezistență relativă la oboseală

$$K_O = \frac{R_O}{R_m}, R_O \text{ fiind rezistența la oboseală a materialului (v. scap. 3.9).}$$

Valorile unor astfel de caracteristici sintetice asigurate de diversele materiale comerciale sunt prezentate în tabelul 14.1.

DEFINIREA CRITERIILOR		K <sub>1</sub> , ... K <sub>i</sub> , ... K <sub>j</sub> , ... K <sub>n</sub>						
ÎNTOCMIREA MATRICEI PREFERINȚELOR	CRITERIUL	K <sub>1</sub>	...	K <sub>i</sub>	...	K <sub>j</sub>	...	K <sub>n</sub>
	K <sub>1</sub>		...	a <sub>1i</sub>	...	a <sub>1j</sub>	...	a <sub>1n</sub>
	...	...	...	...	...	...	...	...
	K <sub>i</sub>	a <sub>i1</sub>	...		...	a <sub>ij</sub>	...	a <sub>in</sub>
	...	...	...	...	...	...	...	...
	K <sub>j</sub>	a <sub>j1</sub>	...	a <sub>ji</sub>	...		...	a <sub>jn</sub>
	...	...	...	...	...	...	...	...
	K <sub>n</sub>	a <sub>n1</sub>	...	a <sub>ni</sub>	...	a <sub>nj</sub>	...	
DETERMINAREA SUMEI PONDERILOR PARTIALE ALE CRITERIILOR		$S_{pj} = \sum_{i=1}^n a_{ij}$						
DETERMINAREA SUMEI TOTALE A PONDERILOR		$S_p = \sum_{j=1}^n S_{pj}$						
DETERMINAREA COEFICIENTILOR DE IMPORTANȚA AI CRITERIILOR		$a_j = \frac{S_{pj}}{S_p}$						

Fig. 14.1. Etapele metodei de stabilire a coeficienților de importanță ai criteriilor privind alegerea materialelor în funcție de proprietăți

După stabilirea și ierarhizarea în funcție de importanță a criteriilor de alegere a materialelor pe baza proprietăților pe care trebuie să le asigure în aplicația considerată, se poate face o primă selecție a materialelor. În acest scop se folosesc datele existente în standarde, normative, cataloage, manuale etc., privind caracteristicile diverselor materiale comerciale, documentele cele mai utilizate fiind standardele, deoarece, așa cum s-a putut constata în capitolele anterioare, acestea grupează materialele după destinație (de exemplu, în cazul materialelor metalice există standarde pentru oțelurile, fontele și aliajele neferoase recomandate pentru diferite utilizări), cuprind date concrete privind caracteristicile asigurate de fiecare marcă de material și indicații precise privind prelucrările tehnologice ce conduc la stările structurale corespunzătoare obținerii acestor caracteristici și facilitează astfel alegerea lor pentru o anumită aplicație.

Tabelul 14.1. Principalele caracteristici tehnice ale unor materiale comerciale

Materialul	$\rho$ , t/m <sup>3</sup>	$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	$E$ , kN/mm <sup>2</sup>	$K_R$ , km
Oțeluri carbon de uz general	7,8...7,9	350...550	200...210	4,6...7,1
Oțeluri aliate pentru construcția de mașini (tratate termic)	7,8...7,9	700...1300	200...210	9,1...16,8
Oțeluri pentru conducte și recipiente sub presiune (lamine termomecanic)	7,8...7,9	450...800	200...210	5,9...10,3
Oțeluri inoxidabile feritice	7,5...7,7	450...750	210...220	6,1...9,3
Oțeluri inoxidabile austenitice	7,8...8,0	520...850	190...200	6,8...10,8
Oțeluri inoxidabile duplex	7,8...7,9	600...950	200...210	7,8...12,3
Oțeluri maraging	7,7...7,8	1800...2500	200...210	24...33
Superaliaje tip Inconel	8,0...8,4	600...1200	140...210	7,6...14,6
Superaliaje tip Nimonic	8,0...8,2	1000...1400	180...220	12,7...17,4
superaliaje tip Hastelloy	8,2...9,2	650...1000	200...220	8,1...11,1
Alame	8,4...8,9	200...650	90...115	2,4...7,5
Bronzuri cu Sn sau cu Al	8,5...9,1	200...500	85...110	2,4...5,6
Aliaje Cu – Ni	8,9...9,1	400...900	140...190	4,6...10,1
Bronzuri cu beriliu	8,3...8,5	400...1200	115...135	4,9...14,4
Aliaje pe bază de Al deformabile (călite și îmbătrânite)	2,5...2,7	300...520	68...72	12...20
Aliaje pe bază de Ti	4,5...4,7	500...1300	107...110	11...28
Aliaje pe bază de Mg	1,7...1,8	110...180	43...47	6,6...10,2
Polietilenă	0,92...0,95	28...32	0,20...0,25	3,1...3,4
Polipropilenă	0,90...0,91	40...60	1,4...1,5	4,5...6,7
Politetrafluoretilenă (teflon)	2,1...2,3	20...40	0,50...0,60	1,0...1,8
Poliamide (nylon)	1,1...1,2	70...100	2,8...2,9	6,5...8,5
Policlorură de vinil	1,3...1,4	40...50	2,8...3,0	3,1...3,6
Lemn esență tare, uscat	0,70...1,00	60...100	10...11	8,7...10,2
Lemn esență moale, uscat	0,75...1,00	50...80	9...10	6,8...8,2
Compozite poliesteri + fibre de sticlă	1,8...2,2	3000...4500	70...90	170...210

Materialele care respectă toate criteriile privind proprietățile impuse de aplicația în care urmează a fi utilizate alcătuiesc **gama materialelor cu proprietăți adecvate**. Pentru alegerea celui mai potrivit material din această gamă se poate utiliza următoare metodologie:

- se consideră că gama materialelor cu proprietăți adecvate, notată  $GM_P$ , cuprinde  $m$  materiale (marcate  $M_k$ ,  $k = 1...m$ ), care îndeplinesc integral cele  $n$  criterii de selecție (notate  $j = 1...n$ ), având coeficienții de importanță  $a_j$ ,  $j = 1...n$  (stabiliți folosind, de exemplu, metoda prezentată anterior) și nivelele limită acceptabile ale caracteristicilor de material,  $CA_{Pj}$ ,  $j = 1...n$ ;
- din analiza care a condus la constituirea gamei materialelor cu proprietăți adecvate se cunosc, pentru toate materialele  $M_k$ ,  $k = 1...m$ , nivelurile caracteristicilor asigurate  $CA_{Mjk}$ ,  $j = 1...n$ ,  $k = 1...m$ , care respectă toate criteriile

$K_j, j = 1...n$ , scrise analitic în forma „min”  $CA_{M,jk} \geq CA_{P,j}$  sau în forma „max”  $CA_{M,jk} \leq CA_{P,j}$ ;

- pentru fiecare din materialele  $M_k, k = 1...m$  se stabilesc indicatorii parțiali  $I_{jk}, j = 1...n$ , care exprimă măsura în care materialul satisface criteriile de selecție  $K_j, j = 1...n$ ; indicatorii parțiali se calculează cu relații de forma:

$$I_{jk} = \frac{CA_{M,jk}}{CA_{P,j}}, j = 1...n, \text{ dacă criteriul de selecție } K_j \text{ este formulat analitic în forma}$$

„min”, sau  $I_{jk} = \frac{CA_{P,j}}{CA_{M,jk}}, j = 1...n$ , dacă criteriul de selecție  $K_j$  este formulat

analitic în forma „max”; evident, dacă fiecare din materialele  $M_k, k = 1...m$ , respectă toate criteriile de selecție  $K_j, j = 1...n, I_{jk} \geq 1$ ;

- pentru fiecare din materialele  $M_k, k = 1...m$ , se calculează **indicatorul global al proprietăților (caracteristicilor tehnice)**  $I_{CT,k}$ , folosind relația:

$$I_{CT,k} = \sum_{j=1}^n a_j I_{jk}, k = 1...m; \quad (14.2)$$

- se ierarhizează materialele  $M_k, k = 1...m$ , în ordinea descrescătoare a valorilor indicatorului  $I_{CT,k}, k = 1...m$ , materialul cu cea mai mare valoare a acestui indicator fiind (din punctul de vedere al caracteristicilor asigurate) cel mai potrivit pentru aplicația avută în vedere.

**B. Criteriile privind procesarea tehnologică** a materialelor în vederea obținerii semifabricatelor sau produselor se formulează în mod obișnuit într-o formă calitativă (atributivă), astfel încât îndeplinirea fiecărui criteriu de către un material (notată cu 1) să constituie un argument în favoarea alegerii acestuia pentru o anumită aplicație, iar neîndeplinirea fiecărui criteriu (notată cu 0) să diminueze șansele de alegere a acestui material. Un set de criterii de acest tip poate avea, de exemplu, următoarea alcătuire:

- \* materialul este disponibil pe piață în cantitățile și sub forma semifabricatelor necesare pentru realizarea produselor (materialul nu trebuie elaborat și transformat în semifabricate pe baza unor comenzi speciale lansate către producător);

- \* prelucrarea semifabricatelor la forma, dimensiunile și calitatea suprafețelor impuse de realizarea produselor se face cu tehnologii obișnuite, fără a fi necesară aplicarea unor procedee sau operații operații tehnologice speciale;

- \* prelucrarea semifabricatelor la forma, dimensiunile și calitatea suprafețelor impuse de realizarea produselor se face cu scule, dispozitive sau mașini universale (prelucrarea semifabricatelor nu necesită utilizarea de scule, dispozitive sau mașini speciale);

- \* obținerea caracteristicilor materialului impuse de condițiile tehnice ale

produsului care se realizează nu necesită aplicarea unor tratamente termice, chimice sau termochimice;

\* posibilitățile apariției defectelor de material sau de rebutare a produselor în timpul prelucrărilor tehnologice sunt minime.

Criteriile privind procesarea materialelor se pot ierarhiza în funcție de importanță, aplicând aceeași metodă ca și în cazul criteriilor privind proprietățile, adică pentru fiecare din criteriile  $K'_1, K'_2, \dots, K'_q$  incluse în setul de criterii privind procesarea materialelor, se stabilesc coeficienții de importanță  $a'_1, a'_2, \dots, a'_j, \dots, a'_q$ , ( $\sum_{j=1}^q a'_j = 1$ ) și se face apoi ierarhizarea criteriilor după valoarea coeficienților  $a'_j, j = 1 \dots q$ .

După stabilirea și ierarhizarea în funcție de importanță a criteriilor privind procesarea tehnologică, se trece la analiza măsurii în care materialele din gama  $GM_p \equiv \{M_1, M_2, \dots, M_k, \dots, M_m\}$  respectă aceste criterii, întocmind un tablou, numit matricea performanțelor tehnologice (de forma celui prezentat în fig. 14.2), în care elementele matricei, numite indicatorii parțiali ai performanțelor tehnologice  $I'_{jk}$ , exprimă măsura în care fiecare din materialele  $M_k, k = 1 \dots m$ , din  $GM_p$  îndeplinesc criteriile  $K'_j, k = 1 \dots q$ :

$$I'_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{daca materialul } M_k \text{ respecta criteriul } K'_j \\ 0, & \text{daca materialul } M_k \text{ nu respecta criteriul } K'_j \end{cases} \quad (14.3)$$

Pentru fiecare din materialele  $M_k, k = 1 \dots m$ , se calculează **indicatorul global al performanțelor tehnologice**  $IP_{T,k}$ , folosind relația:

$$I_{PT,k} = \sum_{j=1}^q a'_j I'_{jk}, k = 1 \dots m \quad (14.4)$$

și se poate face ierarhizarea materialelor din  $GM_p$  în ordinea descrescătoare a valorilor indicatorului  $IP_{T,k}, k = 1 \dots m$ , materialul cu cea mai mare valoare a acestui indicator fiind cel mai avantajos din punctul de vedere al comodității achiziționării și comportării la prelucrările tehnologice necesare transformării sale în produse.

**C. Criteriile privind costurile (cheltuielile)** aferente elaborării materialelor, transformării lor în semifabricate și prelucrării acestora pentru obținerea produselor sunt deosebit de importante, respectarea acestora determinând alegerea materialelor și tehnologiilor de fabricație care asigură realizarea în condiții economice (cu cheltuieli cât mai mici) a produselor necesare într-o aplicație tehnică.

În mod obișnuit, aceste criterii se formulează în funcție de **costul total al**



**realizării produselor** cu performanțele tehnice impuse de aplicația în care sunt utilizate. Pentru a compara materialele din  $GM_p$  prin prisma costurilor totale implicate de obținerea semifabricatelor și/sau de utilizarea acestora la realizarea produselor necesare unei aplicații se pot utiliza **costurile relative**  $C_r$ , definite prin relația:

$$C_{r,k} = \frac{C_{T,k}}{C_{Tref}}, \quad (14.5)$$

în care  $C_{T,k}$  reprezintă costul total al realizării semifabricatelor dintr-un material  $M_k \in GM_p$  și/sau al obținerii produselor necesare unei anumite aplicații, iar  $C_{Tref}$  este costul total al realizării aceluiași tip de semifabricate și/sau al obținerii aceluiași tip de produse dintr-un material de referință (din  $GM_p$  sau din afara acestei game). Câteva date cu caracter informativ privind costurile relative ale unor materiale (metalice și nemetalice) utilizate frecvent în aplicațiile tehnice sunt prezentate în tabelul 14.2.

CRITERIUL	PONDEREA CRITERIULUI	INDICATRII PARTIALI $I'_{jk}$ PENTRU MATERIALUL $M_k \in GM_p$					
		$M_1$	$M_2$	...	$M_k$	...	$M_m$
$K'_1$	$a'_1$	$I'_{11}$	$I'_{12}$	...	$I'_{1k}$	...	$I'_{1m}$
$K'_2$	$a'_2$	$I'_{21}$	$I'_{22}$	...	$I'_{2k}$	...	$I'_{2m}$
...	...	...	...	...	...	...	...
$K'_j$	$a'_j$	$I'_{j1}$	$I'_{j2}$	...	$I'_{jk}$	...	$I'_{jm}$
...	...	...	...	...	...	...	...
$K'_q$	$a'_q$	$I'_{q1}$	$I'_{q2}$	...	$I'_{qk}$	...	$I'_{qm}$
$I_{PT,k} = \sum_{j=1}^n a'_j I'_{jk}$		$I_{PT,1}$	$I_{PT,2}$	...	$I_{PT,k}$	...	$I_{PT,m}$

Fig. 14.2. Configurația matricei performanțelor tehnologice ale materialelor

Criteriul realizării cu costuri minime a produselor necesare unei aplicații tehnice se consideră la luarea deciziei finale privind alegerea materialelor, calculând pentru fiecare material  $M_k \in GM_p$  **indicatorul global al performanțelor tehnico-economice** (numit și **meritul global**)  $I_{PTE,k}$ ,  $k = 1...m$ , cu formula:

$$I_{PTE,k} = \frac{a_{CT} I_{CT,k} + a_{PT} I_{PT,k}}{C_{r,k}}, \quad k = 1...m, \quad (14.6)$$

în care  $a_{CT}$  este coeficientul de importanță global al criteriilor privind caracteristicile tehnice ale materialelor, iar  $a_{PT}$  – coeficientul de importanță global al criteriilor privind performanțele tehnologice ale materialelor ( $a_{CT} + a_{PT} = 1$ ); evident, materialele  $M_k \in GM_P$  care au meritul global cel mai ridicat trebuie să fie cele preferate pentru aplicația tehnică considerată.

Tabelul 14.2. Valorile informative ale costurilor relative ale unor materiale utilizate în tehnică

MATERIALUL	$C_r = \frac{C_T}{C_{Tref}} *$	MATERIALUL	$C_r = \frac{C_T}{C_{Tref}} *$
Oteluri de uz general (bare laminate)	1,0	Cupru, Bronzuri, Alame (produse obținute prin DP)	5,1...13
Oteluri de uz general (table, benzi, profile)	1,4...1,9	Cupru, Bronzuri, Alame (produse obținute prin turnare)	6,5...18
Oțeluri carbon pentru construcția de mașini (produse laminate)	1,7...2,8	Aliaje Cu – Ni (produse laminate sau turnate)	19...21
Oțeluri aliate pentru construcția de mașini (produse laminate)	2,5...4,5	Superaliaje de tip Nimonic, Incoloy, Inconel, Udimet	100...120
Oteluri carbon și slab aliate pentru scule	2,5...3,9	Titan și aliaje de Ti (produse obținute prin DP + TT)	25...40
Oțeluri inoxidabile și refractare (produse laminate)	6,1...9,6	Polietilenă, Polipropilenă, Polistyren	3,0...4,0
Fonte albe și cenușii (produse obținute prin turnare)	2,4...2,8	Policlorură de vinil, ABS, Rășini acrilice și fenolice	10...14
Fonte modificate (produse obținute prin turnare)	2,9...3,5	Politetrafluoretilenă (Teflon), Poliamide (Nylon)	36...45
Aluminiu și aliaje de Al (produse obținute prin DP + TT)	7,1...8,5	Fibre de sticlă	5,2...8,5
Aluminiu și aliaje de Al (produse obținute prin turnare)	8,1...9,8	Compozite polimerice cu fibre de sticlă sau de carbon	270...400

\* Costurile  $C_T$  și  $C_{Tref}$  sunt calculate în lei/kg de semifabricat

Dacă valorile indicatorului  $I_{PT,k}$  și costurile aferente prelucrării tehnologice pentru materialele din  $GM_P$  sunt apropiate, indicatorul global al performanțelor tehnico – economice  $I_{PTE,k}$ ,  $k = 1...m$ , se poate stabili cu formula:

$$I_{PTE,k} = \frac{I_{CT,k}}{C_{r,k}}, k = 1...m. \quad (14.7)$$

O metodă modernă ce poate fi utilizată la luarea deciziei finale privind selecția materialelor pentru o aplicație tehnică este **analiza valorii (analiza tehnico–economică a utilității)**, care are la bază următoarele principii:

- *orice produs este purtătorul material al unor funcții capabile să satisfacă anumite necesități ale utilizatorilor* (un produs nu trebuie privit ca un ansamblu de părți materiale, ci ca un ansamblu de utilități); ținând seama de acest principiu, analiza oricărui produs trebuie realizată pornind de la sistemul de

funcții al acestuia, în cadrul căruia funcțiile sunt împărțite în categorii de importanță: funcții de bază (principale), care corespund unor necesități reale (efective, directe) ale celor care utilizează produsul și funcții auxiliare (secundare), care contribuie la îndeplinirea normală a funcțiilor de bază sau care fac produsul mai ușor de vândut și cresc reputația pe piață a acestuia;

- *pentru orice produs trebuie să existe o corelație optimă între funcțiile asigurate și resursele alocate pentru realizarea acestora*, acest principiu fiind denumit principiul raportului maxim între utilitate sau valoare de întreținere și cost; ținând seama de acest principiu, la analiza oricărui produs trebuie calculată ponderea costurilor implicate de realizarea fiecărei funcții și trebuie examinată corelația ce există între aceasta și ponderea funcției (coeficientul de importanță al funcției) în asigurarea utilității (calității) globale a produsului.

Considerând că produsul analizat are  $f$  funcții și că la fiecare funcție corespunde un coeficient importanța  $\alpha_i$ ,  $i = 1..f$  ( $\sum_{i=1}^f \alpha_i = 1$ ) și o pondere a costului

de realizare  $c_i$ ,  $i = 1..f$ ,  $c_i = \frac{C_i}{C_T}$ ,  $C_i$  fiind costul aferent realizării funcției, iar

$C_T$  – costul total al produsului ( $\sum_{i=1}^f c_i = 1$ ), se poate construi un **grafic de corelare**

**utilitate – cost** de tipul celui prezentat în figura 14.3. Din analiza unor astfel de grafice rezultă care sunt funcțiile produsului pentru care costurile sunt disproporționate în raport cu contribuțiile lor la utilitate și se pot găsi modalitățile de eliminare a neconcordanțelor cu efecte negative asupra costurilor (eliminarea funcțiilor inutile sau operarea unor modificări tehnologice privind realizarea funcțiilor care implică costuri ridicate), pentru ca produsul obținut să se caracterizeze printr-un raport maxim utilitate/cost).

Aspectele anterior prezentate evidențiază cu claritate complexitatea problemelor privind alegerea materialelor pentru aplicațiile tehnice. Încercarea de a recomanda unele metode cantitative, care să constituie suportul luării deciziilor pertinente privind rezolvarea unor astfel de probleme, nu trebuie să conducă la ideea că aceste metode simplifică problemele, diminuează responsabilitatea membrilor echipei de proiectare și micșorează cerințele privind competența acestora. Aplicarea acestor metode este utilă și conduce la rezultate bune, dacă problema alegerii materialelor pentru o aplicație tehnică se tratează etapizat, de către o echipă de proiectare bine structurată (care cuprinde ingineri cunoscători ai aplicației ce se analizează, ingineri specializați în domeniul materialelor, ingineri specializați în domeniul tehnologiilor de fabricație, economiști specializați în domeniul costurilor etc.), ținând seama de următoarele recomandări:

- în prima etapă de rezolvare a problemei se analizează cu atenție

condițiile tehnice ce caracterizează produsul care trebuie realizat, se stabilesc principalele proprietăți (caracteristici) pe care trebuie să le posede materialul din care acesta urmează să fie confecționat și, pe această bază, se poate încerca selectarea clasei (familiei) de materiale potrivite pentru fabricarea produsului; de exemplu, dacă produsul care trebuie realizat este un recipient sub presiune care urmează a fi amplasat pe o aeronavă, materialul din care acesta urmează să fie confecționat trebuie să se caracterizeze prin rezistență mecanică ridicată, tenacitate mare și densitate cât mai mică, ceea ce conduce, așa cum se arată în schema din figura 14.4, la soluția alegerii unui material din familia compozitelor durificate cu fibre;

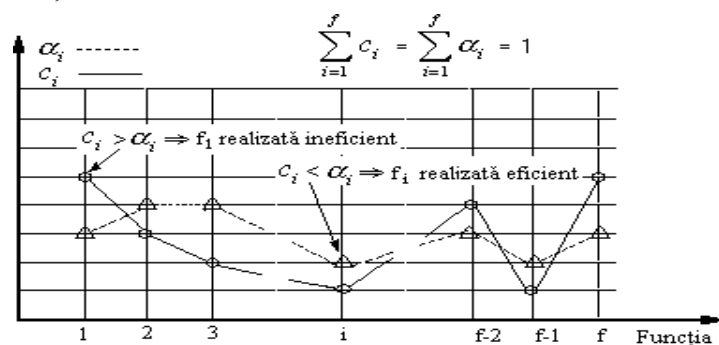


Fig. 14.3. Configurația unui grafic de corelare utilitate – cost obținut prin aplicarea analizei valorii la un produs industrial

- dacă în prima etapă de rezolvare a problemei criteriile privind proprietățile nu sunt suficiente pentru selectarea familiei de materiale adecvate aplicației avute în vedere, se pot adăuga acestora și criterii din celelalte categorii (criterii privind procesarea tehnologică sau criterii privind costurile); de exemplu, dacă produsul care trebuie realizat este un recipient de stocare a unui gaz combustibil (pentru utilizare casnică) sub presiune, materialul din care acesta urmează să fie confecționat trebuie să prezinte caracteristici ridicate de rezistență mecanică și tenacitate, condiții care, așa cum se arată în schema din figura 14.5, pot fi îndeplinite atât de materialele metalice, cât și de materialele compozite durificate cu fibre, decizia utilizării unui material metalic fiind justificată de compararea celor două familii de materiale prin prisma costurilor;

- după selectarea familiei din care trebuie să facă parte materialul ce va fi utilizat la confecționarea produsului, menținând în prim plan cerințele privind proprietățile și adăugând eventual acestora și criterii privind caracteristicile tehnologice sau costurile, se stabilesc categoriile, tipurile sau mărcile de materiale adecvate din această familie; de exemplu, pentru cele două aplicații descrise anterior alegerea tipurilor de materiale se realizează așa cum sugerează schemele prezentate în figurile 14.6 și 14.7;

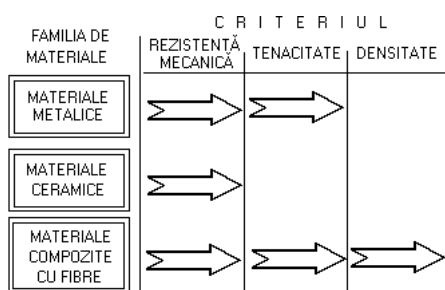


Fig. 14.4. Shema alegerii familiei de materiale pentru un recipient sub presiune amplasat pe o aeronavă

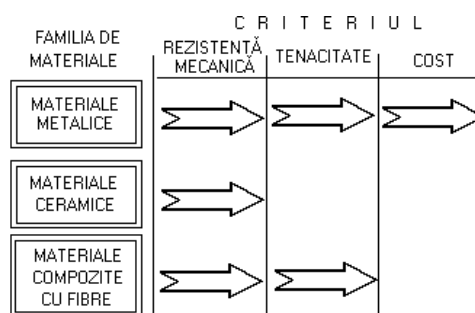


Fig. 14.5. Shema alegerii familiei de materiale pentru un recipient de stocare sub presiune a unui gaz combustibil

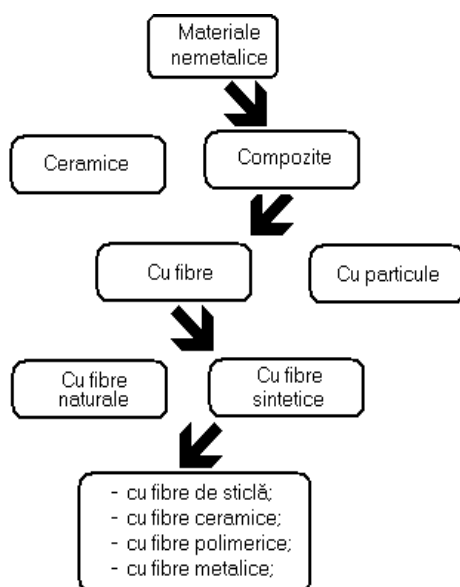


Fig. 14.6. Shema alegerii tipurilor de materiale compozite pentru un recipient sub presiune amplasat pe o aeronavă

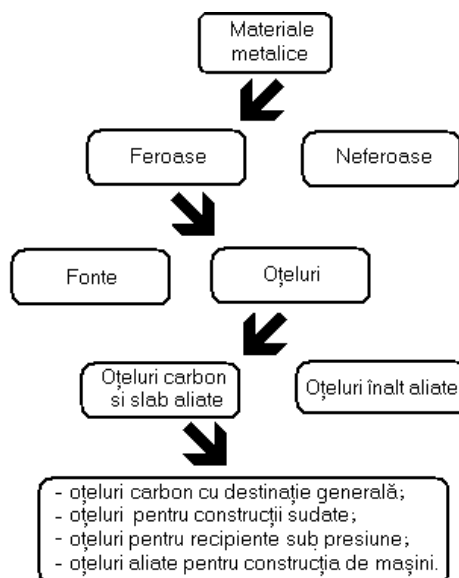


Fig. 14.7. Shema alegerii tipurilor de materiale metalice pentru un recipient sub presiune amplasat pe o aeronavă

• metodele prezentate anterior se pot utiliza în etapa finală, pentru a decide care dintre tipurile de materiale selectate în etapele precedente (care alcătuiesc gama materialelor cu proprietăți adecvate  $GM_p$ ) corespunde cel mai bine cerințelor tehnico-economice ce definesc aplicația avută în vedere; așa cum s-a arătat mai înainte, pentru ca eficiența aplicării acestor metode să fie corespunzătoare este necesar ca numărul materialelor  $M_k$  din  $GM_p$  să fie cât mai

mic, această cerință putând fi ușor respectată dacă se face o selecție a tipurilor de materiale pe baza informațiilor cuprinse în standarde, cataloage, normative sau prescripții tehnice; de exemplu, pentru aplicația constând în realizarea recipientului de stocare a gazului gombustibil (anterior discutată), mărcile de oțel adecvate (care alcătuiesc  $GM_p$  pentru această aplicație) se pot alege folosind prescripțiile din standardul SR EN 10028.

### 14.3. Un studiu de caz privind alegerea materialelor

Pentru a evidenția complexitatea problemei alegerii materialelor pentru aplicațiile tehnice se prezintă un studiu de caz privind materialele selectate și utilizate de diverși producători pentru realizarea prăjinilor de pompare a petrolului din zăcămintele.

În țara noastră și în multe alte țări de pe glob, pompajul de adâncime cu prăjini se utilizează ca metodă de extracție a petrolului (țițeiului) la 65...85% din sondele aflate în producție. La aplicarea acestei metode tehnologice de exploatare a sondelor, garnitura de prăjini (alcătuită din prăjini de pompare asamblate cap la cap) este una din componentele principale ale echipamentului de lucru, având rolul de a transmite mișcarea rectilinie alternativă de la instalația de suprafață la pistonul (cilindrul) pompei de adâncime cu care se realizează extracția țițeiului din zăcămintele.

Configurația constructivă a prăjinilor de pompare este dictată de rolul lor funcțional și de tipul materialului utilizat la confecționarea acestora și este prezentată în figura 14.8. În timpul utilizării într-o sondă aflată în exploatare, prăjinile de pompare sunt supuse unor solicitări axiale variabile, ciclurile de solicitare având perioada aproximativ egală cu durata unui ciclu de lucru al pompei de adâncime. Acest fapt este ilustrat în figura 14.9, care prezintă o modalitate de estimare a caracteristicilor ciclurilor de solicitare ale prăjinilor de pompare din diferite zone ale garniturii de prăjini ce echipează o sondă, pe baza interpretării dinamogramelor înregistrate la sonda respectivă.

Ciclurile de solicitare ale prăjinilor din compunerea garniturii de prăjini de la o sondă sunt (în mod obișnuit) ondulant-pozitive (cu coeficientul de asimetrie

$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = 0,3...0,7$ ) sau (mai rar, în condiții de funcționare defectuoasă a

instalației de pompare) alternante (cu  $-0,4 < R < 0$ ) și au ca tensiuni caracteristice: tensiunea maximă,  $\sigma_{\max} > 0$ ; tensiunea minimă  $\sigma_{\min} = R\sigma_{\max}$ ; tensiunea medie

$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{\sigma_{\max}(1+R)}{2} > 0$  și  $\sigma_v = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{\sigma_{\max}(1-R)}{2} \sigma_v$ . Ca

urmare, se poate aprecia că durabilitatea unei prăjini de pompare este în directă dependență cu mărimea coeficientului de siguranță  $c$ , dată de relația:

$$c = \frac{\sigma_{\max,1}}{\sigma_{\max}} = \frac{2 \frac{R_m}{\sigma_{\max}}}{(1-R) \frac{R_m}{\sigma_{-1}} + (1+R)}, \quad (14.8)$$

în care  $\sigma_{\max,1}$  este tensiunea maximă a ciclurilor limită care, având același coeficient de asimetrie ca și ciclurile solicitării de lucru, produc ruperea prin oboseală a prăjinii considerate,  $R_m$  este rezistența la rupere a materialului prăjinii, iar  $\sigma_{-1}$  – rezistența la oboseală (prin solicitare alternant-simetrică, cu  $R = -1$ ) a prăjinii de pompare în mediul de lucru din sondă (amestec țiței–ape de sondă, cu corozivitatea determinată de salinitate și de conținuturile de  $\text{CO}_2$  și  $\text{H}_2\text{S}$  dizolvate). Tensiunea maximă ( $\sigma_{\max}$ ) a ciclurilor solicitării de lucru a unei prăjinii are mărimea dată de raportul dintre forța maximă de solicitare axială a prăjinii,

$F_{\max}$  și aria secțiunii transversale a prăjinii  $S_p = \frac{\pi d^2}{4}$ .  $F_{\max}$  este rezultanta unui

grup de sarcini axiale ce are ca principale componente: greutatea proprie a prăjinilor de pompare  $F_g$ , greutatea coloanei de lichid pompat  $F_l$ , forța de flotabilitate a garniturii de prăjini  $F_{fl}$ , sarcinile (dinamice) datorate inerției și fenomenelor oscilatorii ale garniturii de prăjini  $F_d$ , forțele de frecare (între prăjini și țevile de extracție, între pistonul și cămașa pompei de adâncime, etc.)  $F_f$ . Intensitățile majorității acestor componente ( $F_g$ ,  $F_{fl}$ ,  $F_d$ ,  $F_f$ ) sunt direct proporționale cu greutatea specifică a materialului prăjinilor  $\gamma = \rho g$  și, ca urmare, intensitățile forței  $F_{\max}$  și tensiunii  $\sigma_{\max}$  (și, implicit, energia consumată la exploatarea unei sonde prin pompaj de adâncime) sunt în dependență liniară cu caracteristica  $\gamma$ .

Analizând relația (14.8) în contextul argumentelor anterior prezentate, se poate aprecia că durabilitatea prăjinilor de pompare crește o dată cu rezistența mecanică specifică a materialului din care sunt confecționate,  $K_R = \frac{R_m}{\gamma}$  și cu

mărimea rezistenței la oboseală relative  $K_O = \frac{\sigma_{-1}}{R_m}$ .

Comportarea în exploatare a prăjinilor de pompare are ca factor de influență și modulul de elasticitate longitudinal al materialului acestora  $E$ , rigiditățile la tracțiune și încovoiere ale prăjinilor fiind în directă proporționalitate cu această caracteristică; creșterea valorii modulului de elasticitate specific al

materialului prăjinilor  $K_E = \frac{E}{\gamma}$ , determină micșorarea deformațiilor axiale și

curburilor locale ale garniturii de prăjini ce echipează o sondă aflată în exploatare și asigură astfel o funcționare mai eficientă a instalației de pompare.

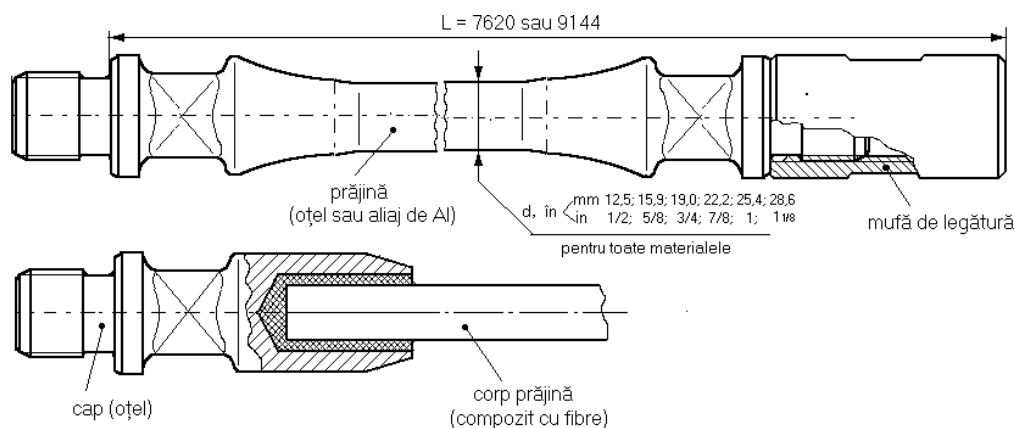


Fig. 14.8. Configurația constructivă și dimensiunile produsului prăjină de pompare

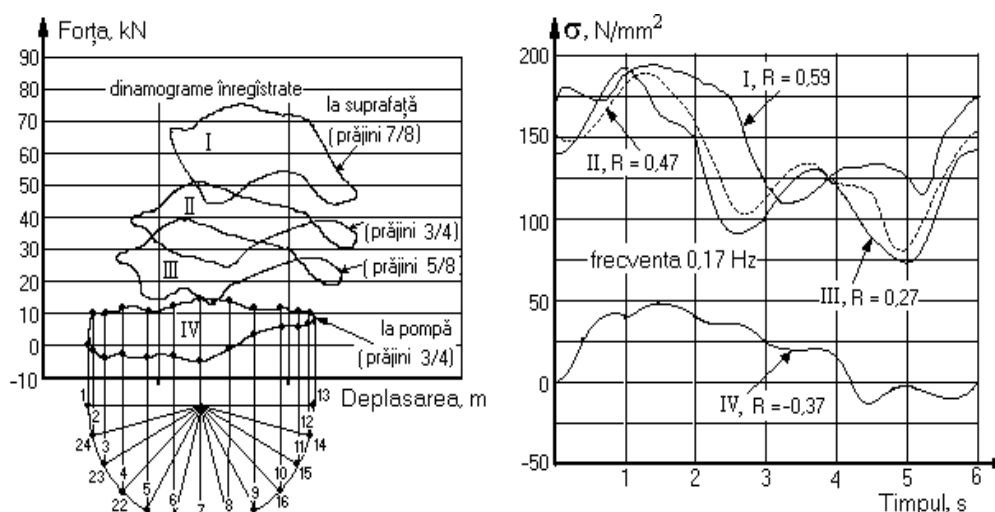


Fig. 14.9. Determinarea caracteristicilor ciclurilor de solicitare ale prăjinilor de pompare

Caracteristicile precizate anterior ( $K_R$ ,  $K_O$ ,  $K_E$ ) pot servi la efectuarea unei analize comparative a diverselor materiale utilizate sau cu perspective de utilizare la confecționarea prăjinilor de pompare.

**A. Oțelurile** sunt materialele tradiționale pentru prăjinile de pompare. Standardele și normele existente clasifică oțelurile pentru prăjini de pompare în următoarele clase de rezistență:

a) oțeluri grad C, recomandate pentru prăjinile supuse în exploatare la sarcini mici sau mijlocii, în medii de lucru slab corozive; caracteristicile de rezistență mecanică prescrise ( $R_m = 630...790 \text{ N/mm}^2$ ) sunt realizate de oțelurile



carbon sau slab aliate de tip C–Mn (cu  $\%C_m = 0,3...0,4 \%$  și  $\%Mn_m = 1,2...1,6 \%$ ) în stare normalizată;

b) oțeluri grad D, recomandate pentru prăjinile supuse în timpul pompajului la sarcini mari sau foarte mari, în medii de lucru cu corozivitate scăzută; caracteristicile de rezistență mecanică impuse ( $R_m = 790...965 \text{ N/mm}^2$ ) sunt realizate de oțeluri slab aliate de tip Cr–Mo ( $\%C_m = 0,3...0,45 \%$ ,  $\%Cr_m = 0,8...1,2 \%$  și  $\%Mo_m = 0,15...0,3 \%$ ) sau Cr–Ni–Mo ( $\%C_m = 0,3...0,4 \%$ ,  $\%Ni_m = 1,4...1,7 \%$ ,  $\%Cr_m = 1,4...1,7 \%$  și  $\%Mo_m = 0,15...0,3 \%$ ), în stările structurale conferite prin aplicarea unor TT finale de normalizare + revenire sau îmbunătățire;

c) oțeluri grad K, destinate prăjinilor solicate moderat în timpul pompajului, în medii de lucru saline (fără  $\text{H}_2\text{S}$ ); se recomandă utilizarea unui oțel Ni–Mo ( $\%C_m = 0,17...0,23 \%$ ,  $\%Ni_m = 1,65...2,0 \%$  și  $\%Mo_m = 0,2...0,3 \%$ ), cu TT final de normalizare + revenire înaltă;

d) oțeluri speciale, recomandate pentru prăjinile de pompare cu condiții grele de lucru: sarcini mari de pompare și medii saline contaminate cu  $\text{CO}_2$  (fără  $\text{H}_2\text{S}$ ) sau sarcini de pompare moderate și medii de lucru puternic corozive (medii saline cu  $\text{CO}_2$  și  $\text{H}_2\text{S}$ ); un exemplu tipic de oțel aparținând acestei clase este cel cu  $\%C_m = 0,35...0,42 \%$ ,  $\%Cr_m = 16...17 \%$ ,  $\%Ni_m = 1 \%$  și  $\%Mo_m = 1 \%$ , ce asigură (după calire+ revenire) caracteristici de rezistență mecanică la nivelul oțelurilor grad D și rezistențe la oboseală (în aer și în mediul coroziv de sondă) superioare celor prezentate de celelalte oțeluri pentru prăjini, așa cum arată diagramele din figura 14.10.

Cercetările întreprinse pentru creșterea caracteristicilor de exploatare ale prăjinilor de pompare din oțel au condus la concluziile următoare:

- Aplicarea TT final de îmbunătățire, în locul tratamentelor de normalizare sau normalizare + revenire, asigură rezistențe mecanice superioare ale prăjinilor și ameliorează comportarea lor la oboseală în aer și în mediile corozive saline, așa cum indică datele prezentate în tabelul 14.3; dificultățile tehnice ridicate de aplicarea călirii martensitice clasice (cu încălzirea pieselor în cuptor și răcirea ulterioară în băi de ulei sau apă) la prăjinile de pompare pot fi depășite dacă se utilizează încălzirea prin inducție cu curenți de medie frecvență (8000...10000 Hz) și răcirea cu jeturi de apă.

- Rezistența la oboseală (în aer sau în mediu coroziv) a prăjinilor de pompare este cu 40...55 % mai scăzută decât rezistența la oboseală a materialului din care sunt confecționate (determinată pe epruvete polizate); în figura 14.11 se prezintă sintetic modul în care starea suprafețelor prăjinilor și mediul de lucru influențează rezistența la oboseală a acestora. În cazul mediilor corozive, rezistența la oboseală este influențată substanțial și de frecvența ciclurilor de solicitare variabilă, așa cum indică diagramele prezentate în figura 14.12.

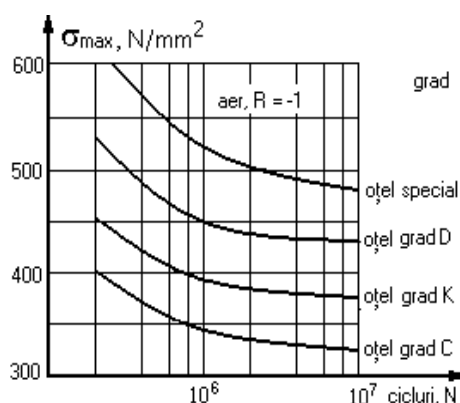


Fig. 14.10. Rezistența la oboseală în aer a oțelurilor pentru prăjinile de pompare

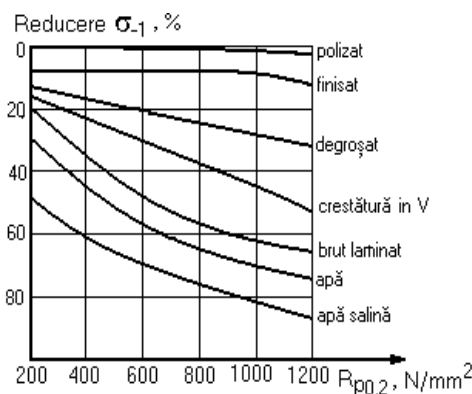


Fig. 14.11. Influențele stării suprafeței și mediului de lucru asupra rezistenței la oboseală a prăjinilor de pompare din oțel

• Creșterea rezistenței la oboseală a prăjinilor de pompare din oțel se poate realiza dacă se aplică acestora operații finale de durificare superficială (ecruisare prin rulare sau prin sablare cu jet de alicie, călire superficială, etc.), care induc tensiuni reziduale de compresiune în stratul superficial al pieselor. S-a constatat că rezistența la oboseală a prăjinilor  $\sigma_{-1}$  este în dependență liniară cu rezistența la rupere a oțelului din care sunt realizate  $R_m$ , cu rugozitatea suprafețelor acestora  $R_z$ , și cu mărimea tensiunilor reziduale de compresiune din stratul superficial al prăjinilor (introduse în cursul procesului tehnologic de fabricare sau prin operațiile de durificare superficială practicate)  $\sigma_r$ .

**B. Aliajele pe bază de aluminiu** reprezintă o altă categorie de materiale a cărei utilizare la confecționarea prăjinilor de pompare a fost cercetată. Cercetările au arătat că aliajele pe bază de Al potrivite pentru această aplicație sunt aliajele deformabile și durificabile structural prin TT, din clasa 7000 (de exemplu, aliajul 7075, cu  $\%Zn_m = 5,1...6,1\%$ ,  $\%Mg_m = 2,1...2,9\%$ ,  $\%Cu_m = 1,2...2,0\%$  și adaosuri de Mn, Cr, Ti, Zr); prin aplicarea unor TT de tipul T7, aceste aliaje capătă structuri alcătuite dintr-o matrice de soluție solidă a componentelor și faze durificatoare (semicoerente sau necoerente cu matricea) uniform distribuite în matrice, de tip  $MgZn_2$  (faze M' sau M);  $Al_2Mg_3Zn_3$  (faze T' sau T);  $Al_2CuMg$  (faze S' sau S) etc. La utilizarea acestor aliaje pentru confecționarea prăjinilor de pompare trebuie avute în vedere următoarele aspecte:

• Aliajele asigură prăjinilor rezistența la tracțiune  $R_m = 475...600 \text{ N/mm}^2$  și caracteristici  $K_E = 2,6 \cdot 10^6 \text{ m}$  (puțin mai mică decât a oțelurilor) și  $K_R = (1,75...2,20) \cdot 10^4 \text{ m}$  (mai mari ca la oțeluri, v. tabelul 14.3).

- Caracteristicile de rezistență mecanică se degradează în timp, dacă piesele din astfel de aliaje sunt menținute la temperaturi mai mari ca 150...200 °C (de exemplu, mențineri de 1000 ore la 200 °C pot determina diminuarea cu 50...60 % a  $R_m$ , v. scap. 9.6.1); existența acestui fenomen (datorat trecerii în stare stabilă a structurilor metastabile realizate prin TT aplicate) impune limitarea adâncimilor la care pot fi utilizate prăjinile din aliaje de Al și verificarea periodică a caracteristicilor lor mecanice (însoțită, eventual, de refacerea structurii printr-un nou TT de călire de punere în soluție + îmbătrânire).

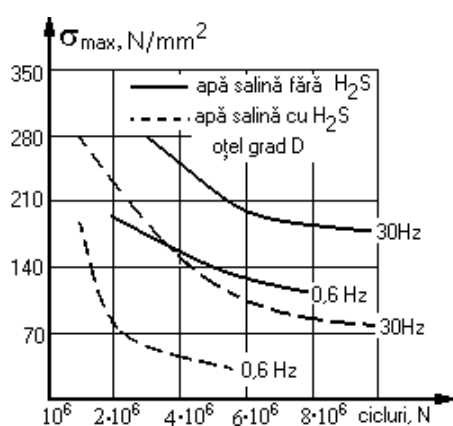


Fig. 14.12. Influențele mediului de lucru și frecvenței ciclurilor de solicitare asupra rezistenței la oboseală a prăjinilor de pompare din oțel grad D

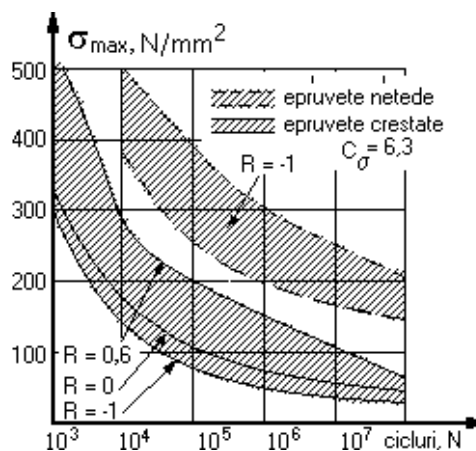


Fig. 14.13. Influențele asimetriei ciclurilor de solicitare și prezenței concentratorilor asupra rezistenței la oboseală a prăjinilor de pompare din aliaje pe bază de aluminiu

- Rezistența la oboseală (în aer) a aliajelor pe bază de aluminiu este influențată în măsură importantă de asimetria ciclurilor de solicitare și de prezența concentratorilor de tensiuni, așa cum sugerează diagramele din figura 14.13.

- Prezența mediilor corozive de lucru afectează rezistența la oboseală a aliajelor pe bază de aluminiu în măsură mult mai mică decât în cazul oțelurilor; aliajele au o bună rezistență la oboseală în mediile saline, chiar și în cazul contaminării acestora cu  $H_2S$  și  $CO_2$ , caracteristica  $K_O$  înregistrând valori 0,31...0,33, la nivelul celor tipice oțelurilor înalt aliate cu Cr.

**C. Compozitele cu fibre de sticlă** reprezintă o altă categorie de materiale aplicabile la confecționarea prăjinilor de pompare; pentru viitor (când costurile de fabricare vor înregistra scăderi datorită progresului tehnic și tehnologic) se întrevede și utilizarea compozitelor cu fibre de C, B sau whiskers (trihite) metalice sau ceramice. Compozitele cu fibre de sticlă folosite pentru realizarea prăjinilor de pompare (conform soluției constructive sugerate de fig.14.8) au

matricea de rășină poliesterică sau epoxidică (cu  $R_{mm} = 30...60 \text{ N/mm}^2$  și  $E_m = 6,9 \cdot 10^3 ... 7,1 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$ ) și fibre din sticlă E (cu  $R_{mf} = 3400 \text{ N/mm}^2$  și  $E_f \cong 7,24 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$ ) sau din sticlă S (cu  $R_{mf} = 4800 \text{ N/mm}^2$  și  $E_m = 8,55 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$ ). Prăjinile de pompărie din astfel de materiale se realizează printr-un proces de pultruziune (tragerea rășinii, armată cu fire paralele din rovirg de fibre de sticlă, printr-o matriță, concomitent cu gelifierea, întărirea și maturarea la cald a rășinii în prezența unor catalizatori). La utilizarea acestor materiale pentru confecționarea prăjinilor de pompărie trebuie avute în vedere următoarele aspecte tehnice:

- Caracteristicile  $K_E$  și  $K_R$  ale compozitelor cu fibre de sticlă sunt superioare celor prezentate de oțeluri, așa cum rezultă analizând datele prezentate în tabelul 14.3; aceste caracteristici sunt dependente de fracția volumică a fibrelor în structura compozitului  $f_v$ ,  $E$ , și  $R_m$  (la tracțiune) ale prăjinilor realizate din materiale compozite putându-se estima cu relații de forma (v. cap.12):

$$E = f_v E_f + (1 - f_v) E_m \quad (14.9)$$

$$R_m = R_{mf} [f_v + (1 - f_v) \frac{E_m}{E_f}] \quad (14.10)$$

Așa cum rezultă comparând datele prezentate în tabelul 14.3 și în diagramele din figura 14.14, valorile experimentale ale caracteristicilor  $E$  și  $R_m$  ale materialelor compozite diferă de cele calculate cu relațiile (14.9) și (14.10), deoarece compozitele realizate industrial nu asigură întotdeauna legături interfaciale perfecte între fibre și matrice (condiție ce stă la baza stabilirii acestor relații).

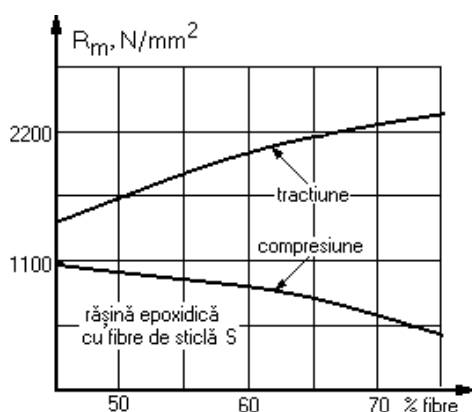


Fig. 14.14. Dependenta dintre rezistența la rupere și fracția volumică a fibrelor la compozitele pentru prăjini de pompărie

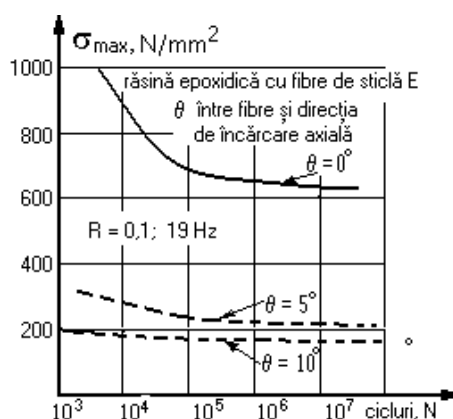


Fig. 14.15. Modificarea rezistenței la oboseală a prăjinilor de pompărie din materiale compozite în funcție de abaterile de la aranjamentul axial al fibrelor de sticlă

Tabelul 14.3. Principalele caracteristici tehnico-economice ale materialelor folosite la realizarea prăjinilor de pompare

Materialul	$C_r^*$	$E$ , N/mm <sup>2</sup>	Starea	$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	$K_{E,}^{**}$ Mm	$K_{R,}^{**}$ km	$K_O^{***}$ în aer	$K_O^{***}$ în apă salină
Oțel Grad C	1,0	$2,05 \cdot 10^5$	N	630...870	2,7	0,82...1,13	0,47...0,50 (0,22...0,27)	0,22...0,24 (0,07)
			C + r	810...850	2,7	1,06...1,11	0,50...0,56	0,32
Oțel Grad E	1,6	$2,10 \cdot 10^5$	N + r	790...965	2,7	1,03...1,26	0,48...0,51 (0,33...0,35)	0,24...0,27 (0,05)
			C + r	860...1030	2,7	1,12...1,34	0,49...0,50	0,20...0,27
Oțel Grad K			N	690...710	2,7	0,90...0,93	0,52 (0,31)	0,26
			N + r	620...640	2,7	0,81...0,83	0,49...0,52	0,26 (0,11)
			C + R	750...790	2,7	0,98...1,03	0,51...0,53	0,22...0,26
Oțel Special (aliat cu Cr)	5,9	$2,15 \cdot 10^5$	C + r	790...930	2,8	1,04...1,22	0,52	(0,35)
Aliaj de Al tip 7075	4,8	$7,03 \cdot 10^4$	T7	470...580	2,6	1,73...2,14	0,35	0,31
Compozit cu fibre de sticlă E	5,2	$5,60 \cdot 10^4$	80 % fibre	1600...1700	3,2	9,06...9,62	(0,25)	(0,24)

\* Costurile relative  $C_r$  calculate cu relația (14.5), considerând factorii  $C_T$  și  $C_{Tref}$  exprimați în lei/(m de prăjină);

\*\*  $K_R$  și  $K_{E_s}$  calculate cu următoarele densități  $\rho$ , în kg/m<sup>3</sup>: 7820 pentru oțelurile slab aliate (Grad C, Grad E și Grad K); 7750 pentru oțelurile speciale înalt aliate cu Cr; 2760 pentru aliajul de Al tip 7075 (AlZn6Mg2,5Cu1,5); 1800 pentru compozitul cu fibre de sticlă;

\*\*\*  $K_O$  calculate cu  $\sigma_{-1}$  determinat pe epruvete polizate; în paranteze sunt valorile lui  $K_O$  obținute cu  $\sigma_{-1}$  determinat pe baza rezultatelor unor încercări efectuate pe prăjini reale.

• Rezistența la oboseală în aer a prăjinilor de pompare din compozite cu fibre de sticlă este caracterizată prin valori  $K_O = 0,25...0,30$ ; rezistența la oboseală este mai ridicată dacă solicitările variabile se caracterizează numai prin eforturi de întindere (de exemplu,  $K_O$  calculat cu  $\sigma_{0,1}$  în loc de  $\sigma_{-1}$  are valori  $K_O = 0,37...0,42$ ), compozitele cu fibre unidirecționale având tendința de degradare rapidă când sunt solícitate la compresiune. Rezistența la oboseală nu este practic afectată de prezența mediilor corozive, compozitele cu fibre de sticlă având o foarte bună comportare în mediile apoase saline, în soluțiile de acizi sau baze și în prezența solvenților organici.

• Așa cum arată diagramele din figura 14.15, rezistența la oboseală a compozitelor cu fibre de sticlă pentru prăjinile de pompare este substanțial influențată de abaterile de la aranjamentul axial al armăturii (unidirecționale) din fibre și (la fel ca  $E$  și  $R_m$ ) de caracteristicile legăturilor realizate în procesul de fabricare la interfețele dintre fibre și matrice.

• Caracteristicile mecanice ale materialelor compozite sunt influențate negativ de creșterea temperaturii (ce produce degradarea matricei și legăturilor interfaciale dintre fibre și matrice); ca urmare prăjinile de pompare realizate din materiale compozite cu fibre de sticlă nu pot fi utilizate la temperaturi mai mari de 200 °C.

Studiul de caz prezentat evidențiază un aspect important privind alegerea materialelor pentru aplicațiile tehnice: produsele destinate utilizării în diverse condiții (privind solicitările mecanice, temperaturile și mediile de lucru) se pot realiza în mai multe variante, pentru fiecare variantă selectându-se materialul adecvat funcționării în deplină siguranță a produsului și care asigură raportul maxim utilitate/cost.

## Cuvinte cheie

analiza valorii, 330  
cicluri de solicitare, 334  
coeficient de asimetrie, 334  
coeficient de importanță, 323  
coeficient de siguranță, 334  
costuri relative, 329  
criterii de cost, 328  
criterii privind proprietățile, 323  
criterii tehnologice, 327  
fiabilitate, 322  
grafic de corelare utilitate-cost, 331  
indicator global, 327, 328, 329

indicator parțial, 327  
materiale funcționale, 321  
materiale structurale, 321  
matricea preferințelor, 324  
mentenabilitate, 322  
modul de elasticitate specific, 324  
prajini de pompare, 334  
proprietăți adecvate, 326  
pultruziune, 340  
reciclabilitate, 323  
rezistență mecanică specifică, 324  
rezistență relativă la oboseală, 325

## Bibliografie

1. Shackelford J.M., Introduction to materials science for engineers, MacMillan Publishing Company, New York, 1992
2. Broutman L.J., Composite materials. Fracture and fatigue, Academic Press, New York – London, 1974
3. \* \* \* Metals Handbook. Desk Edition, A.S.M., Metals Park, Ohio, 1985
4. \* \* \* Hütte – Manualul inginerului. Traducere din limba germană după ediția a 29-a, Editura Tehnică, București, 1995
5. Zecheru Gh., Ulmanu V., Drăghici Gh., Analiza comparativă a caracteristicilor de exploatare ale materialelor pentru prăjinile de pompare, în vol. „Noutăți în domeniul tehnologiilor și utilajelor pentru prelucrare la cald”, Brașov, 1992
6. Moțoiu R., Ingineria calității, Editura Chiminform Data, București, 1994
7. Ciurea S., Drăgulănescu N., Managementul calității totale, Editura Economică, București, 1995

## Teste de autoevaluare

**T.14.1.** Pentru care dintre următoarele aplicații trebuie ales un material din gama materialelor structurale: a) realizarea arborelui cotit al unui motor de autoturism; b) fabricarea catalizatorului pentru un reactor dintr-o instalație petrochimică; c) realizarea țevelor pentru tubulatura unei conducte care transportă gaze naturale sub presiune; d) fabricarea corpului unui rezervor sferic de depozitare a gazelor lichefiate?

**T.14.2.** Care dintre următoarele aplicații tehnice impun alegerea unui material din gama materialelor funcționale: a) realizarea conductorilor electrici; b) fabricarea unui magnet permanent; c) fabricarea unui tranzistor; d) fabricarea elementului activ al unui aprinzător piezoelectric?

**T.14.3.** Care dintre următoarele materiale pot fi încadrate în gama materialelor reciclabile: a) oțelurile; b) fontele; c) polietilena; d) sticla?

**T.14.4.** Care este rezistența mecanică specifică a unui material metalic cu  $R_m = 800 \text{ N/mm}^2$  și  $\rho = 4000 \text{ kg/m}^3$ : a)  $K_R \cong 20,4 \text{ km}$ ; b)  $K_R \cong 20,4 \text{ m}$ ; c)  $K_R \cong 10,4 \text{ km}$ ; d)  $K_R \cong 40,2 \text{ km}$ ?

**T.14.5.** Care dintre următoarele materiale asigură un modul de elasticitate specific  $K_E \cong 2,7 \cdot 10^6 \text{ m}$ : a) oțelul cu  $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$  și  $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ ;

b) aliajul de aluminiu cu  $E = 7,1 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$  și  $\rho = 2750 \text{ kg/m}^3$ ; c) aliajul pe bază de titan cu  $E = 1,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$  și  $\rho = 4150 \text{ kg/m}^3$ ; d) alama cu  $E = 1,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$  și  $\rho = 8550 \text{ kg/m}^3$ ?

**T.14.6.** Care dintre următoarele condiții pot fi incluse în gama condițiilor tehnice care definesc funcționalitatea și comportarea în exploatare ale unui produs: a) condițiile privind solicitările mecanice; b) condițiile privind fiabilitatea; c) condițiile privind reciclabilitatea; d) condițiile privind prețul de desfacere?

**T.14.7.** Materialul din care se confecționează un produs trebuie să satisfacă criteriul  $R_m \geq 600 \text{ N/mm}^2$ . Care este rezistența la tracțiune a unui material al cărui indicator parțial privind respectarea acestui criteriu este  $I = 1,4$ : a)  $R_m = 900 \text{ N/mm}^2$ ; b)  $R_m = 600 \text{ N/mm}^2$ ; c)  $R_m = 500 \text{ N/mm}^2$ ; d)  $R_m = 840 \text{ N/mm}^2$ ?

**T.14.8.** Materialul din care se confecționează un produs trebuie să satisfacă criteriul  $\rho \leq 4000 \text{ kg/m}^3$ . Care este densitatea unui material al cărui indicator parțial privind respectarea acestui criteriu este  $I = 1,4$ : a)  $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$ ; b)  $\rho = 7600 \text{ kg/m}^3$ ; c)  $\rho = 2860 \text{ kg/m}^3$ ; d)  $\rho = 5600 \text{ kg/m}^3$ ?

**T.14.9.** La alegerea materialului pentru un produs sunt impuse cinci criterii (calitative) privind procesarea sa tehnologică, toate criteriile având același coeficient de importanță. Care este indicatorul global al performanțelor tehnologice pentru un material care respectă numai trei din criteriile impuse: a)  $I_{PT} = 1,0$ ; b)  $I_{PT} = 0,8$ ; c)  $I_{PT} = 0,6$ ; d)  $I_{PT} = 0,4$ ?

**T.14.10.** La alegerea materialului pentru un produs sunt impuse patru criterii (calitative) privind procesarea sa tehnologică, coeficienții de importanță ai criteriilor fiind  $a'_1, a'_2, a'_3, a'_4$ . Care dintre criterii nu a fost îndeplinit de un material, dacă indicatorul global al performanțelor sale tehnologice are valoarea  $I_{PT} = a'_1 + a'_3 + a'_4$ : a) primul criteriu; b) al doilea criteriu; c) al treilea criteriu; d) al patrulea criteriu?

**T.14.11.** Care dintre următoarele principii se aplică la utilizarea analizei valorii la un produs industrial: a) orice produs este purtătorul material al unor funcții capabile să satisfacă necesitățile exprimate sau implicite ale utilizatorilor; b) orice produs trebuie privit ca un ansamblu de utilități; c) orice produs trebuie să asigure un raport maxim între utilitate sau valoare de întreținere și cost; d) orice produs trebuie privit ca un ansamblu de părți materiale și nu ca un ansamblu de utilități?

**T.14.12.** Un material  $M_k$  din gama materialelor cu proprietăți adecvate unei anumite aplicații are  $I_{CT,k} = 1,2$ ;  $I_{PT,k} = 0,8$  și  $C_{r,k} = 3$ . Știind că  $a_{ct} = 0,8$ , să se precizeze care este valoarea indicatorului global al performanțelor tehnico-economice pentru acest material: a)  $I_{PTE,k} = 0,733$ ; b)  $I_{PTE,k} = 0,373$ ; c)  $I_{PTE,k} = 0,455$ ; d)  $I_{PTE,k} = 1,222$ ?



## Aplicații

**A.14.1.** Pentru realizarea unei mașini trebuie confecționată o bară de tracțiune cu lungimea  $L = 0,5$  m și diametrul  $d \cong 15$  mm. Forța axială maximă care soliciță bara în timpul funcționării mașinii este  $F = 25000$  N. Să se stabilească ce criterii privind proprietățile trebuie impuse la alegerea materialului pentru această bară, dacă funcționarea în siguranță a mașinii impune respectarea următoarelor condiții tehnice: a) tensiunile din bară trebuie să respecte condiția  $\sigma \leq 0,8R_{p0,2}$ ,  $R_{p0,2}$  fiind limita de curgere a materialului barei; b) masa barei trebuie să fie  $m \leq m_0 = 0,5$  kg; c) deformația axială a barei nu trebuie să depășească valoarea  $\Delta L_0 = 1,5$  mm.

### Rezolvare

Tensiunile de întindere din bară au intensitatea maximă  $\sigma = \frac{4F}{\pi d^2}$  și trebuie să corespundă criteriului  $\sigma \leq 0,8R_{p0,2}$ ; se obține astfel condiția  $R_{p0,2} \geq \frac{4F}{0,8\pi d^2}$ .

Masa barei este  $m = \frac{\pi d^2}{4} L \rho$ ,  $\rho$  fiind densitatea materialului barei și trebuie să îndeplinească criteriul  $m \leq m_0$ ; se obține astfel condiția:  $\rho \leq \frac{4m_0}{\pi d^2 L}$ .

Deformația specifică axială a barei este  $\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{4F}{\pi d^2 \Delta L_0}$ ,  $E$  fiind modulul de elasticitate longitudinal al materialului barei și trebuie să respecte criteriul  $\varepsilon \leq \frac{\Delta L_0}{L}$ ; se obține astfel condiția  $E \geq \frac{4FL}{\pi d^2 \Delta L_0}$ .

Înlocuind datele din enunțul aplicației rezultă următoarele criterii de alegere a materialului barei de tracțiune:  $R_{p0,2} \geq 177$  N/mm<sup>2</sup>;  $\rho \leq 5660$  kg/m<sup>3</sup> și  $E \geq 47160$  N/mm<sup>2</sup>.

**A.14.2.** Pentru realizarea unei bare de tracțiune cilindrice din compunerea unei mașini s-a selectat o GM<sub>p</sub> cu cinci oțeluri, având caracteristicile precizate în tabelul 14.4. Pentru funcționarea în siguranță a mașinii trebuie respectate următoarele condiții tehnice: a) tensiunile generate în bară de aplicarea forței de întindere  $F$  trebuie să respecte condiția  $\sigma \leq 0,8R_{p0,2}$ ; b) bara trebuie să prezinte o bună tenacitate, asigurată dacă materialul acesteia îndeplinește simultan criteriile:

K<sub>1</sub>:  $\frac{R_{p0,2}}{R_m} \leq 0,9$ ; K<sub>2</sub>:  $A \geq 15 \%$  și K<sub>3</sub>:  $KV \geq 27 \text{ J}$  la  $-20^\circ\text{C}$ , având coeficienții de importanță  $a_1 = 0,3$ ;  $a_2 = 0,2$  și  $a_3 = 0,5$ . Să se decidă care dintre materialele din GM<sub>p</sub> corespunde cel mai bine aplicației.

#### Rezolvare

Prima dintre condițiile tehnice impuse de aplicație se utilizează pentru dimensionarea barei de tracțiune (determinarea diametrului barei); notând  $d_k$  diametrul barei în cazul realizării ei din materialul  $M_k \in \text{GM}_p$ ,  $k = 1...5$ , rezultă:

$$\sigma = \frac{4F}{\pi d_k^2} \leq 0,8R_{p0,2} \text{ și bara trebuie să aibă diametrul (minim) } d_k = \sqrt{\frac{4F}{0,8\pi R_{p0,2,k}}}.$$

Dacă se consideră  $d_1$  (corespunzător barei realizate din materialul M<sub>1</sub>) ca diametru

de referință, se obține  $d_k = d_1 \sqrt{\frac{R_{p0,2,k}}{R_{p0,2,1}}}$ ,  $k = 1...5$ .

Tabelul 14.4. Caracteristicile oțelurilor ce alcătuiesc GM<sub>p</sub> pentru aplicația A.14.2

$k$	Marca oțelului *	Caracteristicile mecanice minime				$\frac{R_{p0,2,k}}{R_{m,k}}$	$C_{r,k}^{**}$
		$R_{p0,2,k}$ , N/mm <sup>2</sup>	$R_{m,k}$ , N/mm <sup>2</sup>	$A_k$ , %	$KV_k$ la $-20^\circ\text{C}$ , J		
1	S235J2	235	510	24	27	0,461	1,0
2	S275J2	175	430	20	27	0,640	1,2
3	S355K2	355	620	16	40	0,573	1,4
4	P460NL1	460	620	17	47	0,742	1,8
5	12Ni14	355	640	22	55	0,554	2,7

\* toate oțelurile au  $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ ;

\*\* costurile relative calculate cu  $C_T$  și  $C_{T\text{ref}}$  în lei/(kg de semifabricat)

Masa barei de tracțiune cu lungimea  $L$  este  $m_{T,k} = \frac{\pi d_k^2}{4} L \rho$ , iar masa unei unități de lungime din bară (de exemplu,  $L = 1 \text{ m}$ ) are valoarea (în kg/m) dată de formula  $m_k = \frac{\pi d_k^2}{4} \rho$ ,  $k = 1...5$ . Dacă se consideră  $m_1$  (corespunzătoare barei

realizate din materialul M<sub>1</sub>) ca masă de referință, se obține:  $m_k = m_1 \frac{R_{p0,2,k}}{R_{p0,2,1}}$ ,

$k = 1...5$ . Evident, deoarece barele realizate din diversele materiale incluse în GM<sub>p</sub> au diametre  $d_k$  diferite și aceeași lungime, compararea acestor materiale prin prisma costurilor trebuie făcută cu ajutorul costurilor relative  $C_{r,k}$  calculate cu relația (14.5), considerând  $C_{T,k}$  și  $C_{T\text{ref}}$  exprimate în lei/(m de semifabricat); pentru

a determina costurile relative  $C_{r,k}$  se folosesc datele din tabelul 14.4 și relația

$$C_{r,k} = C_{r,k}^{\prime} \frac{m_k}{m_1} = C_{r,k}^{\prime} \frac{R_{p0,2,k}}{R_{p0,2,1}}.$$

Pentru fiecare dintre materialele  $M_k \in GM_P$  se determină indicatorii parțiali  $I_{jk}$ , corespunzători celor trei criterii ( $j = 1...3$ ) privind asigurarea tenacității barei:

- criteriul  $K_1$ :  $\frac{R_{p0,2}}{R_m} \leq 0,9$  are forma „max” și  $CA_{P,1} = 0,9$  și, ca

urmare:  $I_{1k} = 0,9 \frac{R_{p0,2,k}}{R_{m,k}}, k=1...5;$

- criteriile  $K_2$ :  $A \geq 15 \%$  și  $K_3$ :  $KV \geq 27 \text{ J la } -20^\circ\text{C}$  sunt formulate analitic în forma „min” și au  $CA_{P,2} = 15 \%$  și  $CA_{P,3} = 27 \text{ J}$  și, ca urmare:  $I_{2k} = \frac{A_k}{15}$  și

$$I_{3k} = \frac{KV_k}{27}, k = 1...5.$$

Utilizând valorile coeficienților  $a_j, j = 1...3$ , date în enunțul aplicației și folosind relația (14.2) se obțin valorile indicatorilor globali ai proprietăților  $I_{CT,k}, k = 1...5$ , iar cu ajutorul relației (14.7) se pot determina valorile indicatorilor globali ai performanțelor tehnico-economice  $I_{PTE,k}, k = 1...5$ .

Tabelul 14.5. Rezultatele obținute la rezolvarea aplicației A.14.2

$k$	$d_k$ , mm	$m_k$ , kg/m	$C_r^*$	$I_{1k}$	$I_{2k}$	$I_{3k}$	$I_{CT,k}$	$I_{PTE,k}$
1	$d_1$	$m_1$	1,000	1,952	1,60	1,00	1,406	1,406
2	$0,924d_1$	$0,855m_1$	1,026	1,406	1,33	1,00	1,188	1,158
3	$0,814d_1$	$0,662m_1$	0,927	1,571	1,07	1,48	1,425	1,537
4	$0,715d_1$	$0,511m_1$	0,920	1,213	1,13	1,74	1,460	1,587
5	$0,814d_1$	$0,662m_1$	1,787	1,625	1,47	2,04	1,802	1,008

\*  $C_r$  calculate considerând  $C_T$  și  $C_{Tref}$  în lei/(m de semifabricat)

Rezultatele care se obțin parcurgând toate etapele de lucru descrise anterior sunt redată în tabelul 14.5. Se observă că, dacă se consideră pentru luarea deciziei valorile indicatorului  $I_{CT,k}$ , materialul recomandat pentru confecționarea barei este oțelul 12Ni14, iar dacă se utilizează indicatorul  $I_{PTE,k}$  (care ține seama și de costurile implicate de realizarea barei de tracțiune) materialul ce trebuie ales pentru realizarea barei este oțelul P460NL1.

**A.14.3.** Pentru un produs industrial s-a aplicat analiza valorii și s-a constatat că acesta are trei funcții de bază (notate  $F_1, F_2, F_3$ ) și două funcții auxiliare (notate  $F_4, F_5$ ), coeficienții de importanță  $\alpha_i, i = 1...5$ , atribuiți fiecărei

funcții și ponderile  $c_i$ ,  $i = 1...5$ , corespunzătoare costurilor de realizare a fiecărei funcții având valorile prezentate în tabelul 14.6.

Tabelul 14.6. Coeficienții de importanță și ponderile costurilor de realizare ale funcțiilor ce definesc utilitatea produsului considerat în aplicația A.14.3

Funcția	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>5</sub>
$\alpha_i$	0,40	0,30	0,15	0,10	0,05
$c_i$	0,30	0,35	0,20	0,05	0,10

a) Să se construiască graficul de corelare utilitate – cost și să se precizeze funcțiile pentru care costurile sunt mai mari decât contribuțiile pe care le aduc aceste funcții la realizarea utilității globale a produsului.

b) Știind că s-au parcurs trei etape succesive de modernizare a produsului, în fiecare etapă modificându-se materialele și tehnologiile folosite la fabricarea acestuia, astfel încât costurile implicate de realizarea funcțiilor pentru care  $c_i > \alpha_i$  să se diminueze cu  $r_i = 20\%$ , să se determine cum s-au modificat ponderile  $c_i$ ,  $i = 1...5$ , după fiecare etapă de modernizare și să se construiască graficul de corelare utilitate – cost la finele programului de modernizare a produsului.

#### Rezolvare

a) Considerând că valorile coeficienților de importanță ai funcțiilor sunt în directă proporționalitate cu contribuțiile acestora la realizarea utilității globale a produsului, rezultă că graficul de corelare utilitate – cost are aspectul prezentat în figura 14.16. Examinând acest grafic și/sau datele prezentate în tabelul 14.6, se observă că funcțiile care se realizează cu cheltuieli prea mari în raport cu contribuțiile pe care le aduc la realizarea utilității produsului (sau calității produsului, dacă se are în vedere că standardele ISO din seria 9000, definesc calitatea unui produs ca fiind ansamblul caracteristicilor care conferă acestuia aptitudinea de a satisface nevoile exprimate sau implicate ale utilizatorilor) sunt F<sub>2</sub>, F<sub>3</sub> și F<sub>5</sub>.

b) Conform datelor din enunțul aplicației, în prima etapă de modernizare a produsului, prin modificări privind alegerea materialelor și tehnologiilor folosite la fabricarea lui s-au diminuat cheltuielile de realizare a funcțiilor F<sub>2</sub>, F<sub>3</sub> și F<sub>5</sub> cu

$$r_2 = r_3 = r_5 = 20\%. \text{ Deoarece ponderile } c_i \text{ sunt definite de relația } c_i = \frac{C_i}{C_T},$$

$$i = 1...5, \text{ în care } C_i \text{ reprezintă costul aferent realizării funcției } F_i, \text{ iar } C_T = \sum_{i=1}^5 C_i,$$

după prima etapă de modernizare (M1) cheltuielile aferente realizării fiecărei

$$\text{funcții au atins nivelurile } C_i' = (1 - \frac{r_i}{100})C_i = C_T(1 - \frac{r_i}{100})c_i, \quad i = 1...5, \text{ cheltuielile}$$

$$\text{totale pentru obținerea produsului au valoarea } C_T' = \sum_{i=1}^5 C_i' = C_T \sum_{i=1}^5 (1 - \frac{r_i}{100})c_i, \text{ iar}$$

ponderile cheltuielilor corespunzătoare realizării fiecărei funcții sunt

$$c_i' = \frac{C_i'}{C_T'} = \frac{(1 - \frac{r_i}{100})c_i}{\sum_{i=1}^5 (1 - \frac{r_i}{100})c_i}, i = 1...5.$$

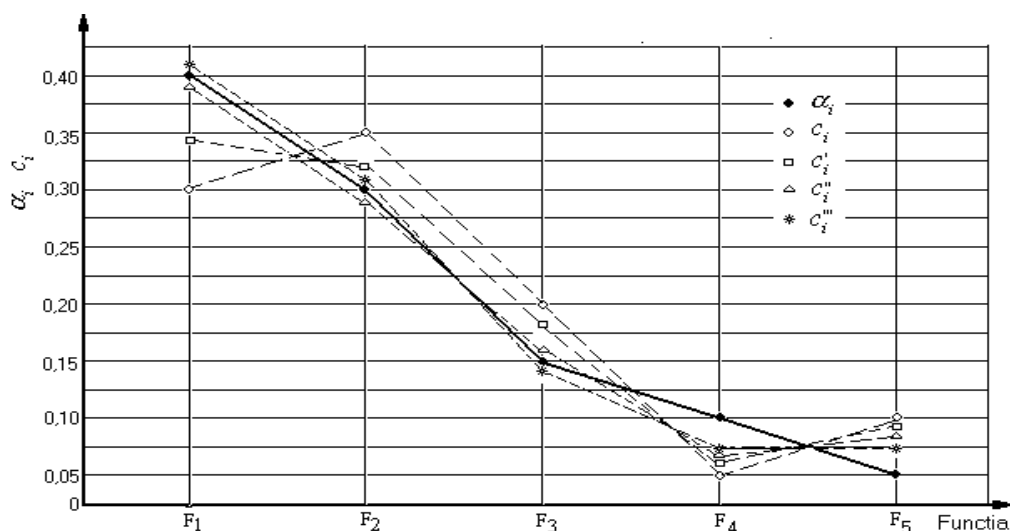


Fig.14.16. Graficele de corelare utilitate – cost ale produsului analizat în aplicația A.14.3

Tabelul 14.7. Rezultatele obținute la rezolvarea aplicației A.14.3

Etapă	Funcția	F1	F2	F3	F4	F5	Costul total
0	$\alpha_i$	0,400	0,300	0,150	0,100	0,050	$C_T$
	$c_i$	0,300	0,350	0,200	0,050	0,100	
M1	$r_{is}, \%$	0	20	20	0	20	$0,870C_T$
	$\alpha_i$	0,400	0,300	0,150	0,100	0,050	
	$c_i'$	0,345	0,322	0,184	0,057	0,092	
M2	$r_{is}, \%$	0	20	20	0	20	$0,766C_T$
	$\alpha_i$	0,400	0,300	0,150	0,100	0,050	
	$c_i''$	0,392	0,293	0,167	0,065	0,083	
M3	$r_{is}, \%$	0	0	20	0	20	$0,727C_T$
	$\alpha_i$	0,400	0,300	0,150	0,100	0,050	
	$c_i'''$	0,413	0,308	0,141	0,068	0,070	

În mod similar se pot determina modificările aduse ponderilor  $c_i$  de următoarele etape de modernizare a produsului (M2 și M3), rezultatele care se obțin considerând datele din enunțul aplicației fiind cele prezentate în tabelul 14.7 și în graficele din figura 14.16; se poate observa că modernizările aduse produsului au condus la reducerea cu aproximativ 27 % a costului total de realizare a acestuia și la obținerea unor rapoarte  $\frac{\alpha_i}{c_i}$  apropiate de unitate pentru toate funcțiile care-i definesc utilitatea.

**A.14.4.** Pentru realizarea cuvei de stocare a materiei prime a unei mașini destinate prelucrării maselor plastice s-a selectat o  $GM_P$  alcătuită din patru materiale  $M_k$ ,  $k = 1...4$  și, ținând seama de caracteristicile fizico – mecanice ale fiecărui material, s-a elaborat câte un proiect constructiv – tehnologic de obținere a cuvei, rezultând astfel patru variante ale produsului, notate  $V_k$ ,  $k = 1...4$ . Pentru selectarea celei mai bune variante de produs s-au stabilit patru criterii  $K_j$ ,  $j = 1...4$ ,

formulate astfel:  $K_1$ : volumul util al produsului  $V_u = \frac{V_{ic}}{V_{gc}} 100 \geq 85 \%$ ,  $V_{ic}$  fiind volumul interior al cuvei, iar  $V_{gc}$  – volumul de gabarit al cuvei,  $K_2$ : masa relativă a produsului  $M_r = \frac{M_c}{Q_{ac}} 100 \leq 75 \%$ ,  $M_r$  fiind masa cuvei, iar  $Q_{ac}$  – capacitatea de

încărcare a cuvei,  $K_3$ : consumul specific de material  $K_s = \frac{M_{sc}}{M_c} 100 \leq 140 \%$ ,  $M_{sc}$

fiind masa semifabricatului necesar pentru confecționarea cuvei și  $K_4$ : costul util al produsului  $C_u = \frac{C_T}{Q_{ac}} \leq 100$  mii lei/kg,  $C_T$  fiind costul total al realizării cuvei;

considerând că realizarea cuvei cu valori minime ale consumului specific de material și costului util sunt obiective principale, obținerea cuvei cu o masă relativă cât mai mare este un obiectiv secundar, iar asigurarea unui volum util maxim al cuvei este un obiectiv minor, s-au stabilit următoarele valori ale coeficienților de importanță ai criteriilor:  $a_1 = 0,1$ ;  $a_2 = 0,2$ ;  $a_3 = a_4 = 0,35$ .

Știind că valorile  $V_{u,k}$ ,  $M_{r,k}$ ,  $K_{s,k}$  și  $C_{u,k}$ ,  $k = 1...4$ , corespunzătoare celor patru variante ale produsului, sunt cele redate în tabelul 14.8, să se stabilească varianta care trebuie adoptată pentru realizarea acestuia.

#### Rezolvare

Varianta de produs care trebuie adoptată este cea caracterizată prin valoarea maximă a indicatorului global  $I_{CT,k}$ ,  $k = 1...4$ , calculat cu relația (14.2), considerând valorile coeficienților de importanță ai criteriilor  $a_j$ ,  $j = 1...4$ , precizate în enunțul aplicației și valorile indicatorilor parțiali  $I_{jk}$  determinate, folosind datele

din tabelul 14.8 și din enunțul aplicației, astfel: pentru criteriul  $K_1$ ,  $CA_{M,1k} \equiv V_{u,k}$  și  $CA_{P,1} \equiv 85\%$ ; pentru criteriul  $K_2$ ,  $CA_{M,2k} \equiv M_{r,k}$  și  $CA_{P,2} \equiv 75\%$ ; pentru criteriul  $K_3$ ,  $CA_{M,3k} \equiv K_{s,k}$  și  $CA_{P,3} \equiv 140\%$ , iar pentru criteriul  $K_4$ ,  $CA_{M,4k} \equiv C_{u,k}$  și  $CA_{P,4} \equiv 100$  mii lei/kg. Rezultatele obținute pe această cale, redate în tabelul 14.9, conduc la concluzia că varianta de produs care trebuie adoptată (cu cea mai mare valoare a indicatorului global) este  $V_2$ .

Tabelul 14.8. Caracteristicile variantelor produsului analizat în aplicația A.14.4

Criteriul $K_j$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
$a_j$	0,10	0,20	0,35	0,35
Varianta $V_k$	Valorile caracteristicilor $CA_{M,jk}$			
	$V_{u,k}$	$M_{r,k}$	$K_{s,k}$	$C_{u,k}$
$V_1$	85	40	105	90
$V_2$	90	40	110	70
$V_3$	95	60	105	100
$V_4$	95	75	120	70

Tabelul 14.9. Valorile indicatorilor parțiali și globali de caracterizare a variantelor produsului analizat în aplicația A.14.4

Criteriul $K_j$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	Indicatorul global $I_{CT,k}$
Forma	„min”	„max”	„max”	„max”	
$a_j$	0,10	0,20	0,35	0,35	
Varianta $V_k$	Valorile indicatorilor parțiali $I_{jk}$				
	$I_{1k}$	$I_{2k}$	$I_{3k}$	$I_{4k}$	
$V_1$	1,000	1,875	1,333	1,111	1,3304
$V_2$	1,059	1,875	1,273	1,429	1,4266
$V_3$	1,118	1,250	1,333	1,000	1,1784
$V_4$	1,118	1,000	1,167	1,429	1,2204

### Observație

Pentru rezolvarea unor aplicații de tipul celei anterior discutate se pot utiliza și alte metode, una dintre acestea fiind *metoda de estimare a utilității consecințelor*, recomandată de STAS 6401. La folosirea acestei metode se parcurg următoarele etape (prezentate considerând condițiile din enunțul aplicației anterior discutate):

- se analizează datele din tabelul 14.8 (denumit și *matricea utilităților*) și se marchează pe acesta variantele cele mai bune ale produsului (denumite *variante optime*), considerând pe rând fiecare din criteriile  $K_j, j = 1 \dots 4$ ;

- se acordă caracteristicilor corespunzătoare fiecărui criteriu  $K_j, j = 1 \dots 4$  un *grad de importanță*  $g_j \in \{1, 2, 3\}$ , atribuindu-se  $g_j = 3$ , dacă respectarea criteriului  $K_j$  corespunde realizării unui obiectiv principal,  $g_j = 2$ , dacă respectarea criteriului  $K_j$  corespunde realizării unui obiectiv secundar și  $g_j = 1$  dacă

respectarea criteriului  $K_j$  corespunde realizării unui obiectiv minor; în cazul aplicației analizate, considerând datele precizate în enunț, rezultă:  $g_1 = 1$ ,  $g_2 = 2$  și  $g_3 = g_4 = 3$ ;

- se întocmește un tablou (numit *matricea modificată a utilităților*), înlocuind valorile caracteristicilor din matricea utilităților cu  $g_j I_{jk}$ ,  $I_{jk}$  fiind niște indicatori parțiali, calculați considerând că aceste valori reprezintă  $CA_{M,jk}$  ale produsului analizat, iar nivelurile limită acceptabile  $CA_{P,j}$  sunt valorile (acelorași caracteristici) corespunzătoare variantelor optime; rezultatele parcurgerii acestei etape în cazul aplicației analizate sunt prezentate în tabelul 14.10;

Tabelul 14.10. Matricea modificată a utilităților pentru produsul analizat în aplicația A.14.4

Criteriul $K_j$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$U_{sk}$
Forma	„min”	„max”	„max”	„max”	
$g_i$	$g_1 = 1$	$g_2 = 2$	$g_3 = 3$	$g_4 = 3$	
Varianta $V_k$	Matricea modificată a utilităților				
	$g_1 I_{1k}$	$g_2 I_{2k}$	$g_3 I_{2k}$	$g_4 I_{4k}$	
$V_1$	$1 \frac{85}{95} = 0,895$	2	3	$3 \frac{70}{90} = 2,333$	8,228
$V_2$	$1 \frac{90}{95} = 0,947$	2	$3 \frac{105}{110} = 2,864$	3	8,811
$V_3$	1	$2 \frac{40}{60} = 1,333$	3	$3 \frac{70}{100} = 2,100$	7,433
$V_4$	1	$2 \frac{40}{75} = 1,067$	$3 \frac{105}{120} = 2,625$	3	7,692

- se calculează suma valorilor înscrise pe fiecare linie a matricei modificate a utilităților  $U_{sk}$ ,  $k = 1...4$ , numită *utilitatea sinteză* a variantei  $V_k$ , varianta de produs care are cea mai mare valoare a  $U_{sk}$  (numită *varianta optimă de produs*) fiind cea care trebuie adoptată; analizând rezultatele redate în tabelul 14.10, se observă că, în cazul aplicației analizate, varianta de produs care trebuie adoptată este  $V_2$ , așa cum a rezultat și prin metoda indicatorului global.