

## 2. DEFECȚIUNILE SISTEMELOR MECANICE

### 2.1. Neconformanțe și defecțiuni [1, 16, 17, 22]

În practică se utilizează noțiunile de *neconformanță* și *defecțiune* care având înțelesuri apropiate și nefiind identice, se impune a fi definite.

**Neconformanța** este o abatere a unei caracteristici de calitate de la nivelul dorit sau stare, care apare cu o severitate suficientă ca produsul sau serviciul asociat să nu îndeplinească cerința unei specificații.

**Defectul** este o abatere a unei caracteristici de calitate de la nivelul dorit, sau stare, care apare cu o severitate suficientă ca produsul sau serviciul asociat să nu satisfacă cerințele de utilizare dorite, normale sau rațional previzibile.

Defectul este evenimentul fundamental în teoria fiabilității.

Se constată că termenul de “neconformanță” este apt pentru a fi folosit de controlul calității la producători sau la recepția unui produs, iar cel de “defect” în exploatare. O transmisie poate, de exemplu, să fie neconformă dar să nu fie defectă. O defecțiune are întotdeauna asociată o neconformanță.

### 2.2. Procesul de defectare [1, 13, 16, 17, 22]

Havilland arată că, în urma cercetărilor asupra rezistenței materialelor, Beltrami a enunțat definiția: “Un punct de defect într-un obiect perfect este acela pentru care o lege de acumulare de energie dată încetează să fie valabilă”. Din această definiție rezultă postulatul: “Un punct de defect apare într-un obiect perfect atunci când energia înmagazinată după o anumită lege depășește o valoare critică”.

Studiile efectuate de Huber și Weibull asupra ruperii materialelor se bazează pe acest postulat: în cazul sistemelor mecanice, energia se înmagazinează de regulă, sub formă de deformații și/sau căldură. Trebuie presupus însă că există un timp limită necesar transformării energiei dintr-o formă în alta.

În cazul obiectelor reale, datorită neomogenității lor inerente, se poate considera că acestea sunt formate din asamblarea unor mici obiecte perfecte (verigi) având caracteristici diferite. Rezistența (sarcina) critică a unui obiect real este dată de veriga sa cea mai slabă. Pentru sarcinile aplicate pe perioade extrem de lungi se pot defini două rezistențe:

a) sarcina pe care un produs o poate suporta pe o perioadă de timp infinită fără modificare sau deteriorare. Aceasta este rezistența efectivă reală și este egală cu rezistența verigii celei mai slabe din produs;

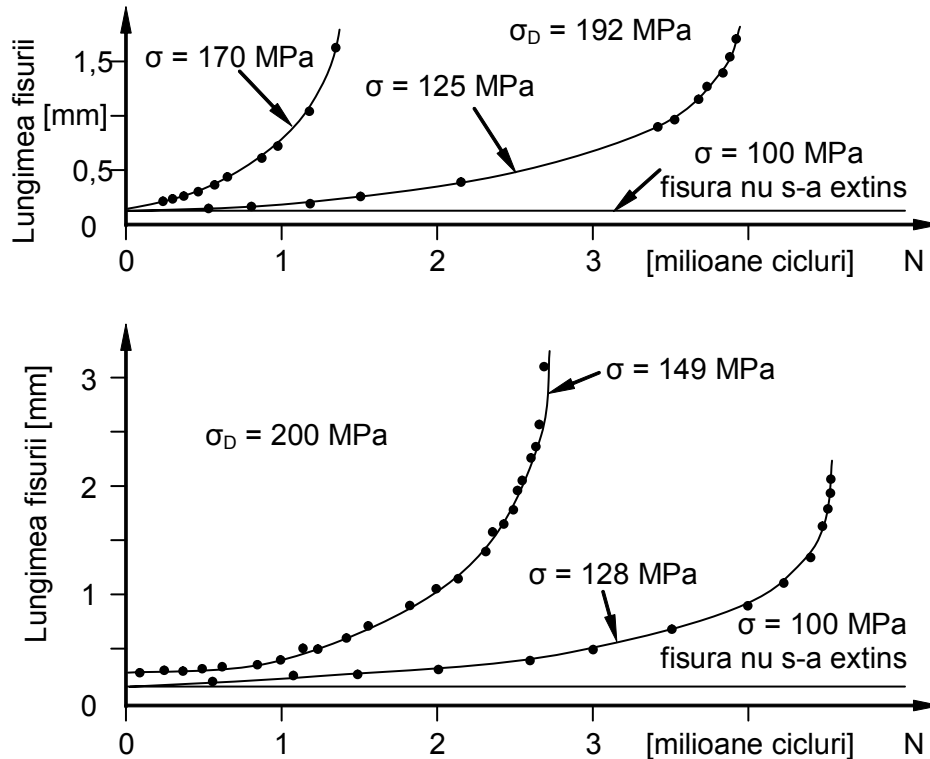
b) sarcina pe care un obiect o poate suporta pe o perioadă de timp infinită cu modificări, dar fără defectare. Aceasta este rezistența limită reală. Ea este egală cu rezistența unei verigi slabe intermediare, rezistență care este mai mare decât sarcina aplicată pe verigile rămase.

Curbele Wöhler - de rezistență la oboseală - ale oțelurilor constituie exemple ale acestor tipuri de rezistențe.

Evoluția unui defect în timp poate fi importantă. În cazul unui produs în care un număr de verigi au cedat, sarcina pe verigile rămase crește cu fiecare verigă căzută. Corespunzător, viteza de creștere a sarcinii este legată de înmulțirea defectării verigilor.

## 2. Defecțiunile sistemelor mecanice

Timpul necesar ca o verigă defectă să o afecteze pe următoarea devine mai scurt, procesul de defectare se accelerează conducând la “defectarea prin avalanșă”. În fig. 2.1 se prezintă ca exemplu de defect prin avalanșă, propagarea fisurii într-un arbore.



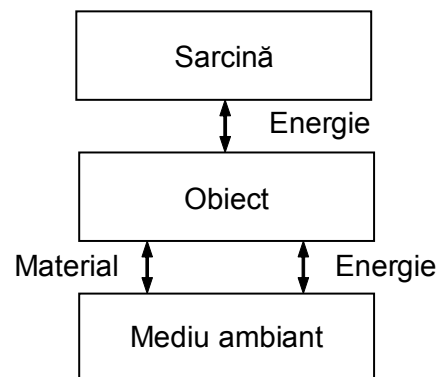
**Fig. 2.1.** Comportarea unor arbori la fisurare:  
 $\sigma$  - tensiunea de încercare;  $\sigma_D$  - rezistența la oboseală

În cazul unui obiect conținând multe defecte mici, ipoteza că acestea nu modifică repartiția energiei în obiect este aproape întotdeauna adevărată. Dacă însă obiectul conține defecte mari, repartiția energiei înmagazinate se schimbă esențial, apărând fenomenul de concentrare a tensiunilor. Cazul se regăsește când în material există fisuri sau incluziuni, de asemenea când sunt modificări importante de dimensiuni sau formă, ori muchii vii.

În afara sarcinii la care sunt supuse, obiectele reale sunt influențate și de mediu. Se constată că între mediul ambiant și obiect are loc un schimb de energie și de materie, care conduce frecvent la modificarea rezistenței.

În fig. 2.2 se prezintă schematic relațiile complexe ale unui obiect supus unei sarcini.

Din punct de vedere fiabilistic, rezistența unui produs real va fi mai mare decât sarcina numai o perioadă de timp, datorită scăderii rezistenței prin procesul de deteriorare. În momentul în care rezistența scade la valoarea sarcinii, obiectul se defectează, fiabilitatea devenind nulă, durata de viață (durabilitatea) încheindu-se, așa cum se observă în fig. 2.3.



**Fig. 2.2.** Obiect supus unei sarcini exterioare

## 2. Defecțiunile sistemelor mecanice

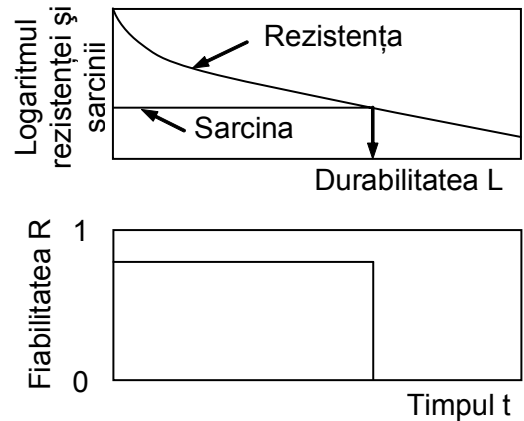
Graficul duratei de viață poate căpăta însă aluri diferite, dacă se ia în considerare efectul mediului ambiant, care nu poate fi evitat. Astfel, în fig. 2.4 se prezintă cele două cazuri distincte:

- a) deteriorarea obiectului este determinată numai de mediu, fiind independentă de sarcină;
- b) fenomenul de deteriorare este influențat simultan de mediul ambiant și sarcină.

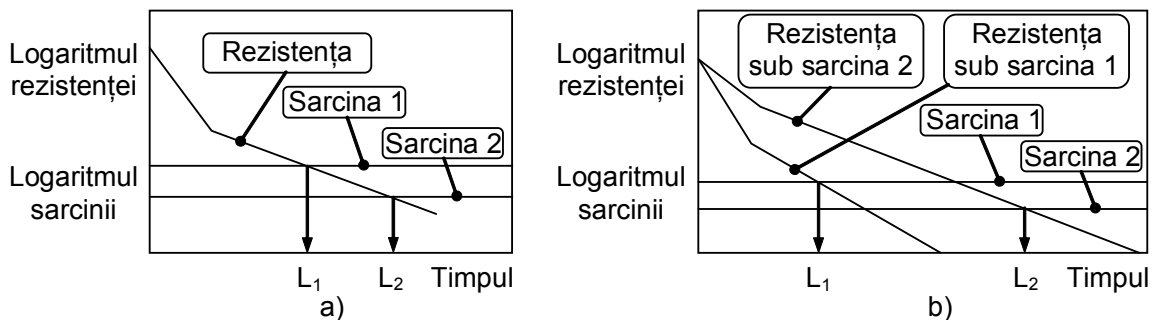
În realitate, procesul de defectare este mai complex, datorită faptului că sarcinile aplicate nu sunt constante, așa cum s-a considerat în fig. 2.3 ... 2.4, ci sunt variabile. Cazul sarcinilor ciclice se poate deduce ca o simplificare a cazului sarcinilor variabile prezentat schematic în graficele din fig. 2.5.

Durabilitatea în unități convenționale se poate determina trasând pe același grafic valoarea maximă probabilă a sarcinii (sarcină admisibilă) și cea a rezistenței, stabilind apoi timpul la care sarcina depășește pentru prima oară rezistența. Se disting două cazuri:

- rezistența constantă (cu excepția perioadei de rodaj, fig. 2.5, a), obiectele având o durabilitate probabilă și o durabilitate reală egale cu timpul de funcționare determinat de intersecția curbelor rezistenței și sarcinii admisibile, respectiv a sarcinii reale;
- rezistența scade în timp (fig. 2.5, b), durabilitățile determinându-se în mod similar primului caz.



**Fig. 2.3.** Durata de funcționare corectă (durata de viață)



**Fig. 2.4.** Evoluția duratei de funcționare corectă:  
a) rezistența independentă de sarcină ; b) rezistența în funcție de sarcină

În ambele cazuri nu se poate stabili exact momentul căderii ce corespunde celei mai mari sarcini probabile (sarcina admisibilă).

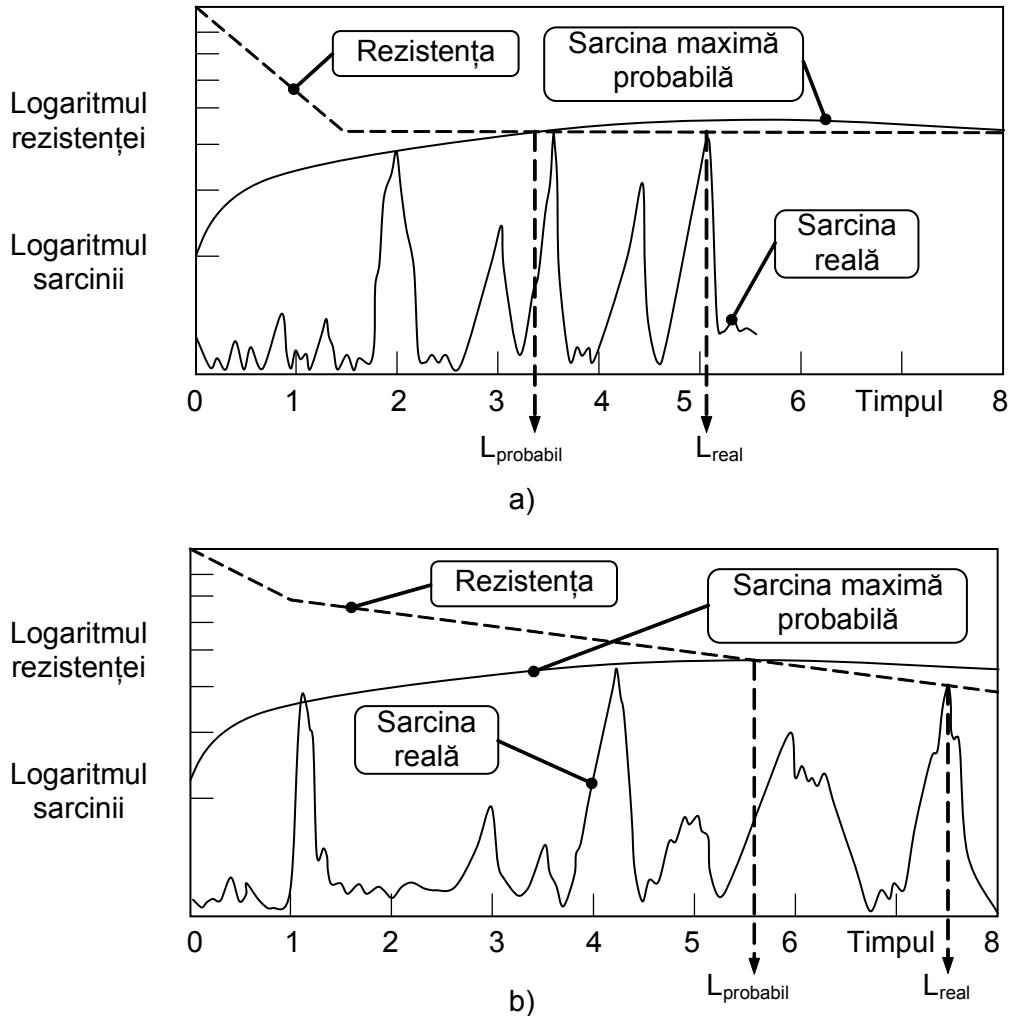
Durabilitatea reală poate fi mai mare sau mai mică decât cea probabilă. În cele mai multe cazuri pentru sarcina maximă se poate stabili un interval de încredere, conform fig. 2.6.

Aplicând această tehnică este posibil ca durabilitatea reală obținută să fie cuprinsă între două valori limită  $L_1$  și  $L_2$  cu o probabilitate de aproximativ 2/3.

Din cele arătate mai înainte se desprind următoarele:

## 2. Defecțiunile sistemelor mecanice

- nu este posibil să se descrie fiabilitatea unui obiect real, în speță a unei transmisii mecanice, supus unei sarcini și într-un mediu ambiant, fără a lua în considerație timpul, în special durabilitatea;
- dacă într-un obiect (sistem) există sau apare o sursă de deteriorare, reducerea sarcinii conduce la creșterea durabilității.
- fiabilitatea nu este proprietatea unui obiect, ci a sistemului complex format din obiect, mediu și sarcină.



**Fig. 2.5.** Durata funcționării corecte la solicitări variabile:  
 a - cazul rezistenței constante; b - cazul scăderii rezistenței în timp  
 ( $L_{\text{probabil}}$  = durabilitatea probabilă;  $L_{\text{real}}$  = durabilitatea reală)

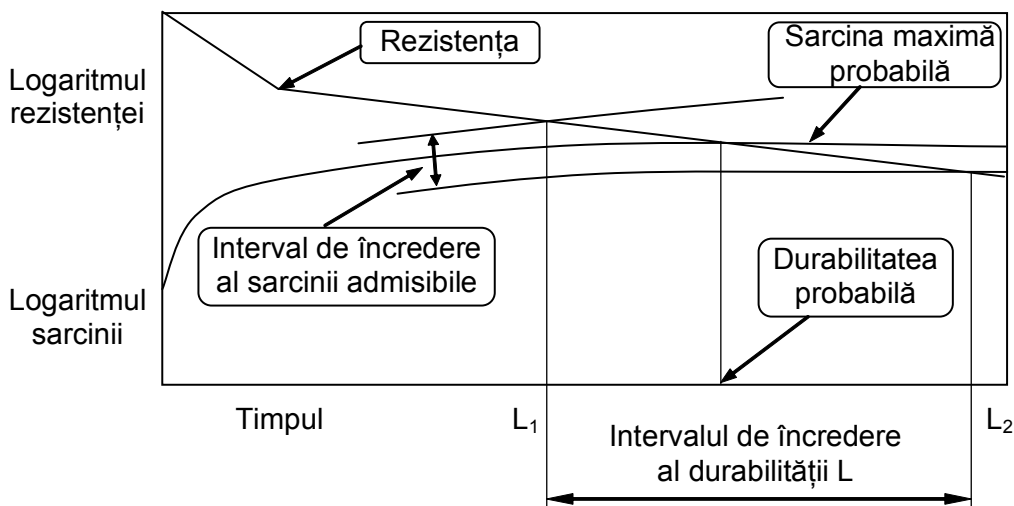
Există trei căi (principale) de creștere a durabilității unui obiect (sistem mecanic):

- creșterea rezistenței;
- reducerea sarcinii aplicate,
- reducerea vitezei de defectare.

Aceste trei căi, la care se adaugă principiul redundanței, reprezintă gradele de libertate ale soluționării problemelor de fiabilitate.

## 2. Defecțiunile sistemelor mecanice

Criteriile de clasificare a defectelor elementelor și sistemelor precum și criteriile de apreciere a capacității de funcționare, reprezentate în tabelul 2.1, dau o imagine asupra varietății acestora ca și asupra multitudinii posibilelor puncte nevralgice ale sistemelor mecanice.



**Fig. 2.6.** Sarcina variabilă aplicată unei piese. Intervale de încredere

**Tabelul 2. 1.** Criteriile de clasificare a defecțiunilor elementelor și sistemelor

| Nr. crt. | Criterii de clasificare                                  | Defecțiunea   |
|----------|--|---|
| 1.       | Modul de depistare                                       | Vizibilă; ascunsă   |
| 2.       | Mijlocul de eliminare a defecțiunii                      | Prin schimbarea piesei defecte; prin reglare; sistem mecanic nereparabil                      |
| 3.       | Consecințe   | Inerentă (datorită utilizării necorespunzătoare); critică majoră sau minoră (datorită uzurii) |
| 4.       | Gradul de dependență a defecțiunii                       | Dependentă; independentă  |
| 5.       | Posibilitatea eliminării cauzei defecțiunii              | Eliminabilă; neeliminabilă  |
| 6.       | Complexitatea intervenției pentru eliminarea defecțiunii | Simplă complexă   |
| 7.       | Viteza de apariție                                       | Brusc; progresivă   |
| 8.       | Frecvența apariției defecțiunii                          | Unică; sistematică  |
| 9.       | Nivelul de defectare                                     | Total; parțial  |
| 10.      | Ordinea de apariție                                      | Primară; secundară  |

Deosebit de importantă este clasificarea defecțiunilor după consecințele acestora, conform tabelului 2.2. Descrierea în documentația de execuție a clasificării consecințelor nerespectării fiecărei caracteristici (de calitate), respectiv specificații, permite proiectanților

## 2. Defecțiunile sistemelor mecanice

de tehnologii, executanților și controlului de calitate să facă diferențierea între elementele mai importante și mai puțin importante, concentrând atenția asupra elementelor cheie, cu consecințe economice importante.

**Tabelul 2.2.** Clasificarea defecțiunilor condiționate de procesul de uzare

| Implicațiile defectării                                   | CLASA                                |                                  |                                    |  |
|---|--------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|--|
|   | Critic                               | Major                            | Minor A                            | Minor B                                    |
| 1. Accidentări grave                                      | Probabilitate                        | Defectare progresivă previzibilă | Nu este cazul                      |  |
| 2. Defecte de funcționare                                 | Defectare bruscă imprevizibilă       | Defectare progresivă previzibilă | Reduce posibilitățile de utilizare | Reduce comoditatea utilizării              |
| 3. Funcționare sub parametri                              | Sigur                                |                                  | Probabil                           | Nu   |
| 4. Funcționare intermitentă greu de diagnosticat pe teren | Sigur                                | Probabil                         | Nu este cazul                      |  |
| 5. Reparabil pe teren                                     | Puțin probabil, oricum dificil       |                                  | Posibil                            |  |
| 6. Întreținere suplimentară. Scăderea duratei de viață    | Sigur                                |                                  | Probabil                           | Posibil în timp                            |
| 7. Efort suplimentar de instalare                         | Nu neapărat                          | Creștere majoră                  | Creștere minoră                    | Posibil să nu fie                          |
| 8. Aspect, finisare                                       | Defecte vizibile sau defecte ascunse |                                  | Beneficiarul observă defectele     | Beneficiarul poate să nu observe defectele |

În tabelul 2.3 se prezintă clasificarea defecțiunilor în funcție de procesul de uzare.

**Tabelul 2.3.** Clasificarea defecțiunilor condiționate de procesul de uzare

| După starea defecțiunii                  | După solicitare  | După pondere și efect  | După evoluție  | După rata de defectare $\lambda$   |
|--|--|--|--|--|
| Defecțiune totală<br>Defecțiune parțială | Defecțiune la:<br>- solicitarea admisibilă<br>- solicitarea neadmisibilă<br>Defecțiune derivată<br>Defecțiune independentă | Defecțiune critică<br>Defecțiune inadmisibilă<br>(d.p.d.v economic sau tehnic) | Defecțiune în salt<br>Defecțiune fără o anumită lege statistică<br>Defecțiune după anumite legi statistice | Defecțiune aleatoare ( $\lambda = ct.$ )<br>Defecțiune sistematică<br>Defecțiune prematură<br>$\lambda(t_2) < \lambda(t_1)$ la $t_2 < t_1$<br>Defecțiune tardivă<br>$\lambda(t_2) > \lambda(t_1)$ la $t_2 > t_1$ |

### **2.3. Defecțiuni generate de concepția constructivă [1, 16, 22]**

Defecțiunile de proiectare și tehnologice sunt defecțiuni premature și apar accidental cu scoaterea din funcțiune a sistemelor mecanice. Aceste defecțiuni au la bază, în special, ruperea unor organe de mașini componente (produsă la sarcinile de lucru nominale și după un timp foarte scurt de funcționare), griparea termică sau atermică (determinată de alegerea necorespunzătoare a cuplului de materiale și necorelația cu lubrifianțul și sistemul de ungere).

O categorie importantă de defecțiuni este generată de subevaluarea sarcinilor și condițiilor de mediu ambiant, ca și de utilizarea unor metode empirice sau neadecvate de dimensionare. Alegerea unei soluții constructive neadecvate sau a unei scheme cinematice insuficient studiate poate compromite, încă din faza de temă sau proiect tehnic, fiabilitatea oricărui sistem. Cu consecințe asupra disponibilității se încadrează proiectarea sistemelor mecanice la care este neglijat accesul ușor pentru întreținere, inspecție și reparare, în special pentru elementele vitale ale acestora.

Astfel, proiectarea necorespunzătoare a sistemului de etanșare a transmisiilor mecanice, care lucrează în medii abrazive, conduce la defecțiuni cauzate de prezența particulelor abrazive sau de infestarea lubrifianțului cu apă și scăderea implicită a portanței.

Totodată transmisiile mecanice care deserveșc instalații șt utilaje cu creșteri rapide și neprevăzut de mari ale sarcinilor exterioare trebuie prevăzute, încă din proiectare, cu dispozitive de siguranță (cuplaje limitatoare de moment, rigide sau elastice, transmisii prin fricțiune etc.).

În cazul în care funcționarea utilajelor și instalațiilor este limitată de sensul mișcării, transmisia mecanică de antrenare trebuie să rezolve și să asigure această funcțiune pe toată durata de lucru.

Funcționarea utilajelor și instalațiilor, într-o anumită gamă de viteze sau turații, impune ca transmisia mecanică să permită realizarea acestei game și, mai mult, să fie prevăzută cu dispozitive care, la depășirea fie a limitei superioare fie a limitei inferioare, să întrerupă funcționarea sau să comande o instalație de automatizare și reglare pentru uniformizarea mișcării.

Proiectarea rațională a sistemelor mecanice cu transmiterea de forță prin frecare (transmisii prin curele, variatoare elasto-hidrodinamice etc.) impune soluții care să evite încărcarea inutilă a contactului cuplei de frecare, mai ales atunci când sarcina exterioară este semnificativ mai mică decât sarcina introdusă de sistemul de încărcare (întinderea curelelor, dispozitive de apăsare etc.).

### **2.4. Defecțiuni datorate concepției tehnologice și de execuție [1, 16, 22]**

Defecțiunile tehnologice apar în special ca urmare a modificărilor constituenților structurali ai materialelor utilizate (macro- sau microstructură) în raport cu specificațiile prescrise. Controlul riguros al materialelor și luarea măsurilor organizatorice și tehnologice de încadrare în specificațiile tehnice constituie factori de creștere a fiabilității. Complexitatea sistemelor, mașinilor, dispozitivelor, sculelor și verificatoarelor, în corelație cu calificarea personalului conduce la erori care devin tot atâtea surse de defecțiuni (neconformanțe).

## 2. Defecțiunile sistemelor mecanice

---

Ca urmare a prelucrărilor mecanice necorespunzătoare a suprafețelor de lucru (modificarea fibrajului la prelucrarea la cald, prelucrări prin așchiere cu regim forțat de lucru) scade capacitatea portantă, în special la oboseală de contact. Prezența rugozităților și undulațiilor cu geometrii necorespunzătoare pe suprafețele active ale cuplelor de frecare conduce, atât la micșorarea capacității portante, cât și la mărirea nivelului de zgomot și vibrații.

Calitatea montajului introduce unii factorii perturbatori asupra fiabilității, în special prin jocurile sau strângerile exagerate.

Tehnologiile de control (de recepție de la subfurnizori, pe parcurs și final) pot, în mare măsură, să prevină livrarea de produse necorespunzătoare. Eficiența controlului de calitate este însă influențată de capabilitatea tehnologiei de fabricație. Din acest punct de vedere tehnologicitatea și controlabilitatea proiectului sunt factori decisivi.

### 2.5. Defecțiuni cauzate de uzare [8, 10, 11, 15, 22, 23]

În procesul funcționării, transmiterea fluxului de forță pentru anumite regimuri cinematice ale sistemelor mecanice implică existența unei viteze relative între diferite elemente ale acestora și a unor forțe normale și tangențiale.

Multitudinea parametrilor, cu interacțiune reciprocă, din zonele de contact ale cuplelor sistemelor mecanice face ca procesul de frecare și uzare să fie permanent prezent. Frecarea, evaluată prin coeficientul de frecare, poate fi utilă - cazul ambreiajelor cu fricțiune, variatoarelor cu contacte hertziene, transmisiilor prin curele - sau dăunătoare - cazul lagărelor cu alunecare sau cu rostogolire, angrenajelor cu roți dințate, transmisiilor cu lanț, etanșărilor cu contact etc.

Uzarea este întotdeauna dăunătoare și conduce, mai repede sau mai lent, la scoaterea din funcțiune a elementelor cu mișcare relativă ale sistemelor mecanice.

Defecțiunile condiționate de procesul de uzare pot apărea ca urmare a:

- soluțiilor constructive (alegerea necorespunzătoare a cuplului de material, a lubrifianțului, alegerea necorespunzătoare a formei cuplei macro și microgeometrice);
- proceselor tehnologice (lubrificația, montajul, ajustarea și reglarea elementelor cuplelor de frecare);
- condițiilor de exploatare (abateri de la regimul de lucru - sarcini, viteze- calitatea mediului de funcționare - temperatură, particule abrazive etc. );
- calității întreținerii (nerespectarea duratei de schimb a lubrifianților, timpului și tipului lubrifianțului de reungere).

Mecanismul formării particulelor de uzură este foarte complex și depinde de mulți factori, unii cu caracter contradictoriu, în funcție de condițiile de exploatare (sarcină, viteză, lubrifianț, temperatură etc.). Ca atare, apariția individuală a unei particule de uzură și, implicit, a unei surse elementare de defectare de natură aleatoare. În schimb, procesul de uzare în ansamblul său este considerat determinist la nivelul unei cuple și în prezența unor condiții de exploatare cunoscute (sarcina și viteza ca mărimi vectoriale, lubrifianțul cu proprietățile sale fizico-chimice și funcționale temperatura etc.).

Efectele negative ale uzării se pun în evidență prin: scăderea randamentului, consumul de lubrifianț, creșterea nivelului de zgomot și vibrații, modificarea raportului de transmitere, modificarea regimului termic și, în final, deteriorarea principalelor elemente ale sistemului mecanic fără posibilitate de reparare (blocări ca urmare a modificării



## 2. Defecțiunile sistemelor mecanice

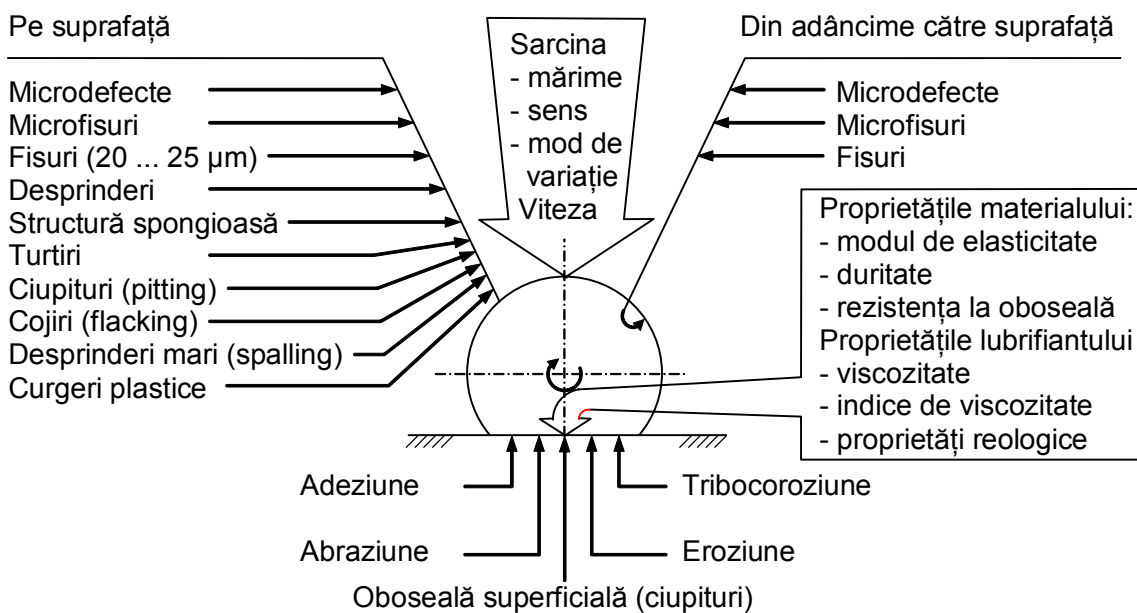
secțiunilor periculoase și creșterii sarcinilor dinamice etc.). În cazul utilajelor sau mașinilor - a căror funcție esențială este asigurarea unei anumite precizii cinematice (mașini-unelte, manipolatoare roboți industriali, poduri rulante etc.) - modificarea dimensiunilor de lucru ale elementelor componente, datorită uzurii, implică funcționarea lor incorectă și, prin urmare, se consideră că acestea s-au defectat.

În afara criteriului tehnic și tehnologic, la aprecierea stării limită de funcționare a sistemelor mecanice și a componentelor acestora se utilizează și criteriile economice și de siguranță. Criteriul economic are în vedere faptul că între uzură și cost există anumite legături care se manifestă prin scăderea randamentului, creșterea consumului de lubrifianț, în special ca urmare a degradării mecanice și a pierderilor prin etanșări. Sunt situații când un sistem (sau o componentă a acestuia) se consideră necorespunzător, deci defect sub aspect funcțional pentru motive economice, deși din punct de vedere tehnic nu s-a atins încă nivelul limită de uzare. Criteriul de siguranță se aplică în special pentru organele de mașini care echipează sisteme mecanice a căror defectare are implicații deosebite pentru securitatea oamenilor (domeniul construcțiilor aerospațiale, nucleare, instalațiilor chimice cu medii toxice etc.).

Un parametru important al calculului durabilității cuplurilor de frecare este valoarea limită a grosimii stratului uzat sau a altui parametru care limitează funcționarea (nivelul de vibrații și zgomot, jocul maxim, temperatura de lucru maximă, randamentul minim, alungirea maximă etc.).

În tabelul 2.4 sunt indicate principalele criterii de apreciere tehnică a stării limită de funcționare a organelor de mașini care transmit fluxul de forță în prezența unei viteze relative.

Modul de scoatere din funcțiune a unui organ de mașină depinde atât de caracteristicile geometrice și de material ale lui, cât și de condițiile de exploatare (sarcina, lubrifianțul, viteza etc.). În fig. 2.7 se prezintă o sinteză a principalelor cauze și forme de deteriorare care conduc la apariția particulelor de uzură.



**Fig. 2.7.** Principalele cauze și forme de deteriorare a organelor de mașini cu mișcare relativă

## 2. Defecțiunile sistemelor mecanice

Apariția uneia sau alteia dintre formele de uzare, indicate în fig. 2.7, este determinată de corelația *caracteristicilor mecanice* ale materialelor celor două elemente (ale cuplei) cu *caracteristicile lubrifiantului* - și ale eventualelor particule ce se găsesc în lubrifiant (abrazivi, aditivi etc.) - și cu *condițiile cinematice, geometrice și de încărcare*.

**Tabelul 2.4.** Aprecierea stării limită de funcționare a organelor de mașini cu mișcare relativă

| Denumirea cuplei de frecare   | Starea limită  |
|---|--|
| <p><i>Cuple cu contact punctual</i><br/>Rulmenți</p> <p>Rulmenți cu diametrul inelului interior <math>d</math> în mm:</p> <p>10-18<br/>18-23<br/>25-30<br/>30-40<br/>40-50<br/>50-65<br/>65-80<br/>80-100</p> | <p>Creșterea nivelului de vibrații:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 0...20 dB - rulmenți buni, condiții optime de funcționare</li> <li>• 20...35 dB - funcționare necorespunzătoare</li> <li>• 35...60 dB - este necesară înlocuirea rulmentului</li> </ul> <p>Jocul radial maxim, în <math>\mu\text{m}</math></p> <p>40<br/>45<br/>55<br/>65<br/>70<br/>85<br/>100<br/>115</p>   |
| <p><i>Cuple cu contact liniar</i></p> <p>Roți dințate;<br/>- cu dantura durificată</p> <p>- cu dantura nedurificată</p>   | <p>Uzarea prin oboseală superficială: 1,5-2,0% suprafață ocupată cu ciupituri din suprafața totală a flancurilor</p> <p>Uzarea de tip adeziv: grosimea limită a stratului uzat <math>h_{\text{lim}}=60 \dots 80</math> % din grosimea stratului durificat</p> <p>Uzarea prin oboseală superficială: 3,0-4,0% suprafață ocupată cu ciupituri din suprafața totală a flancurilor</p> <p>Uzarea de tip adeziv: grosimea limită a stratului uzat <math>h_{\text{lim}}=(0,1 \dots 0,3)</math> m, <math>m</math> fiind modulul standardizat al roții dințate</p> |
| <p><i>Cuple cu contact pe suprafețe cilindrice</i></p> <p>Lagăre (fus-cuzinet):</p> <p>- cu mișcare continuă</p> <p>- cu oscilații (articulație)</p> <p>Cilindri hidraulici</p>                               | <p><math>j_{\text{lim}} - (2 \dots 3) j_{\text{max montaj}}</math></p> <p><math>j_{\text{lim}} - (4 \dots 6) j_{\text{max montaj}}</math></p> <p>Grosime limită <math>h_{\text{lim}} = (0,04 \dots 0,1)</math> mm</p>  |
| <p><i>Cuple cu contact pe suprafețe plane</i></p> <p>Ambreiaje:</p> <p>- nituite</p> <p>- lipite</p>  | <p>0,1 ...0,15 mm deasupra niturilor</p> <p>70... 80% din grosimea inițială a materialului de fricțiune</p>  |

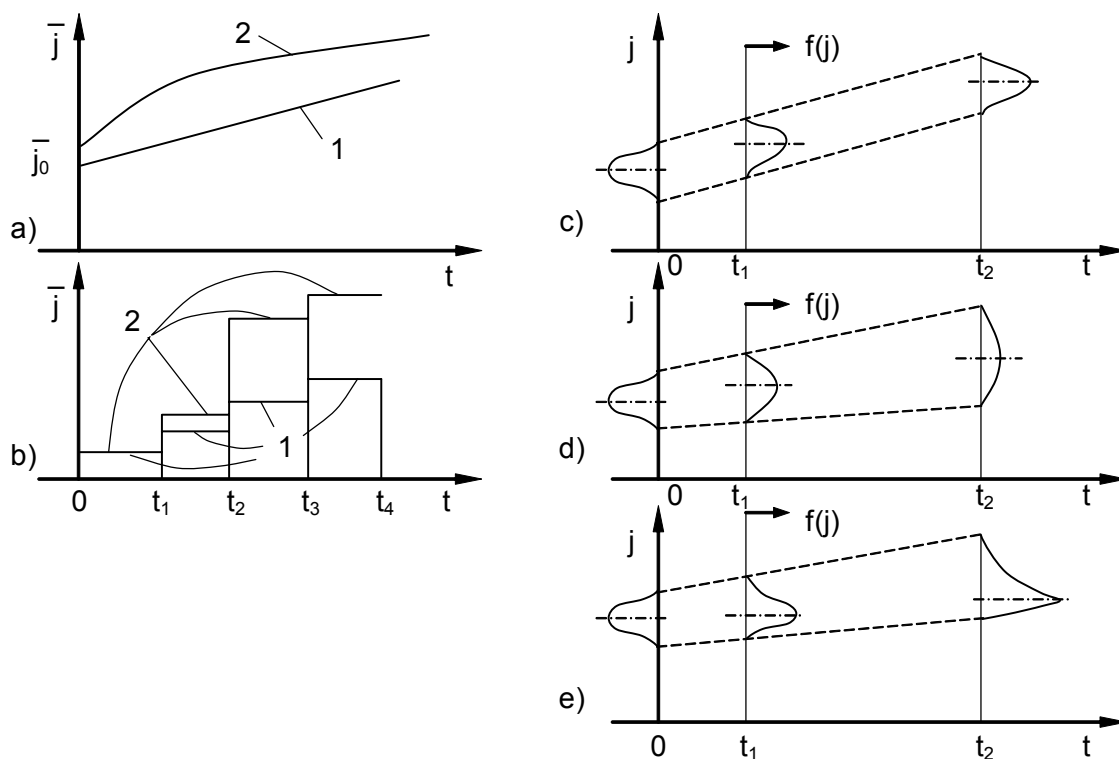
Acțiunea inevitabilă, continuă sau discretă, a desprinderii particulelor de uzură atrage după sine diminuarea capacității de funcționare, astfel că la o anumită stare de deteriorare, cupla să fie scoasă din uz.

## 2. Defecțiunile sistemelor mecanice

Ca atare, se poate considera că durabilitatea unui organ de mașină cu mișcare relativă este condiționată, în principal, de viteza de uzare și de nivelul limită al uzurii.

Dacă se consideră jocul  $j$  dintre două elemente ale cuplei de frecare ca fiind parametrul de care depinde buna funcționare și  $f(j)$  densitatea de probabilitate sau frecvența apariției acestui joc, atunci în timpul funcționării pot exista următoarele situații:

- jocul mediu  $\bar{j}$  crește continuu liniar sau neliniar (fig. 2.8. a curba 1 și, respectiv, 2);
- jocul crește discret, în trepte egale sau inegale (fig. 28, b curba 1, respectiv 2);
- densitatea de probabilitate a jocului rămâne constantă pe toată durata de funcționare (fig. 2.8, c);
- densitatea de probabilitate a jocului își păstrează legea de variație, însă se modifică parametrii legii (fig. 2.8, d);
- densitatea de probabilitate a jocului își modifică atât legea de variație, cât și parametrul (fig. 2.8, e).



**Fig. 2.8.** Variația jocului și a densității sale de probabilitate în timpul funcționării

Se observă (fig. 2.8, a) că există joc inițial  $j_0$  care provine din execuție și proiectare și care se modifică în timpul funcționării.

Atâta timp cât jocul este sub o valoare limită  $j_{lim}$ , cupla funcționează corect. În fig. 2.9 se observă că deteriorarea este proporțională cu aria hașurată situată sub curba  $f(j)$ .

Corespunzător timpului de funcționare  $t = t_2$ , ca urmare a creșterii jocului dintre elementele cuplei vor fi scoase din funcțiune un număr de cuple proporțional cu aria  $A_1$  iar pentru  $t = t_3$ , vor fi scoase din funcțiune toate cuplele.

## 2. Defecțiunile sistemelor mecanice

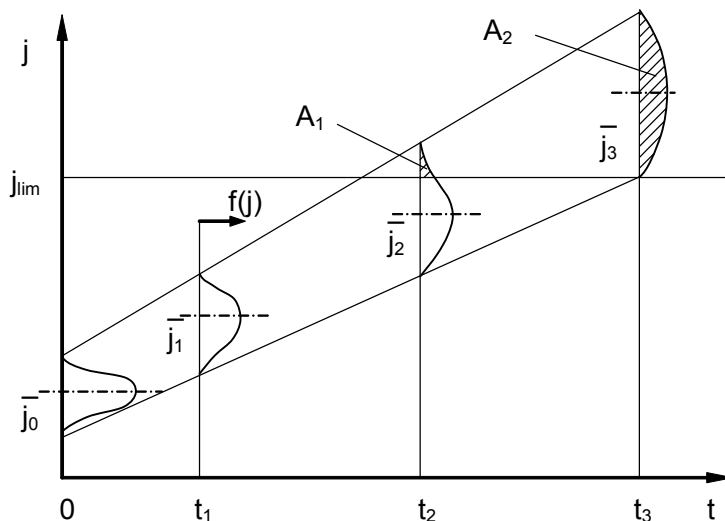
Un aspect important pentru durabilitatea unui organ de mașină cu mișcare relativă este acela că defectările cauzate de procesul de uzare sunt semnificativ influențate de condițiile de exploatare. Astfel, în fig. 2.10 se prezintă evoluția uzurii și a legii de repartiție a defectărilor unui lagăr cu alunecare.

Se constată că lubrifianțul 1 este necorespunzător din punctul de vedere al durabilității și că se schimbă și legea de repartiție a defectărilor (exponențială pentru lubrifianțul 1 și normală pentru lubrifianțul 2).

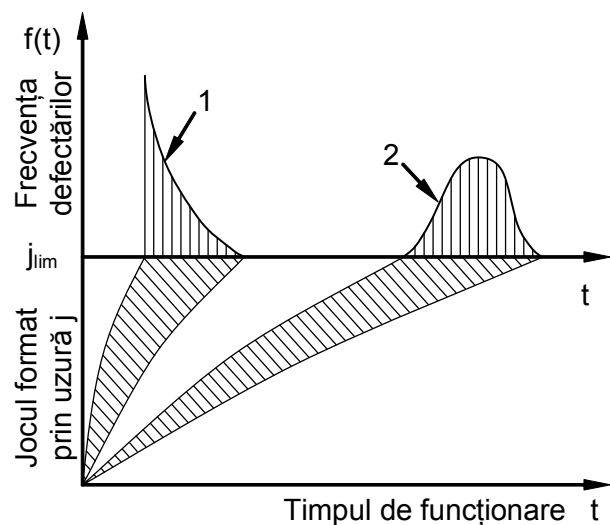
Când condițiile de funcționare ale unei cuple de frecare produc o variație în timp a grosimii stratului uzat  $h_u$  sau a jocului dintre elemente  $j$  care este descrisă de o familie de curbe, așa cum se observă din fig. 2.11, atunci din punctul de vedere al fiabilității, se pot analiza două cazuri:

- densitatea de repartiție a defectărilor  $f(h_u)$  sau  $f(j)$  pentru o anumită perioadă de funcționare;
- densitatea de repartiție a defectărilor  $f(t)$  până la atingerea unui nivel de uzare admisibil  $h_{u\text{ lim}}$  sau  $j_{\text{lim}}$ .

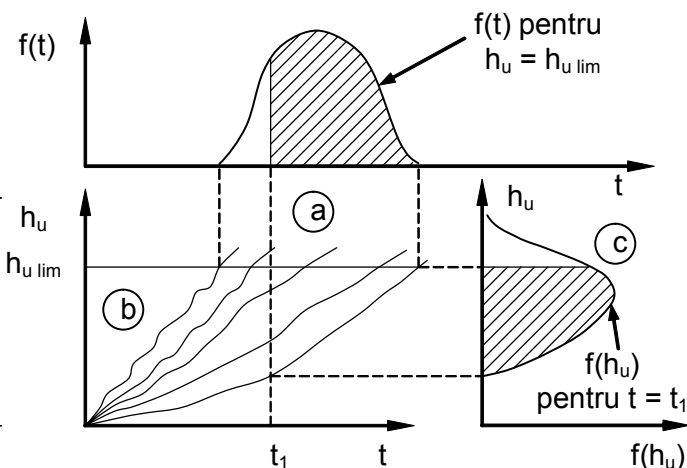
Suprafața hașurată din fig. 2.11, a indică probabilitatea ca o cuplă de frecare dintr-un sistem mecanic să funcționeze un timp mai mare decât  $t_1$  până la atingerea stării limită de uzare  $h_{u\text{ lim}}$ . Suprafața hașurată din fig. 2.11, c exprimă probabilitatea ca această cuplă de frecare să funcționeze timpul  $t_1$ , fără să atingă starea limită de uzare  $h_{u\text{ lim}}$ .



**Fig. 2.9.** Variația jocului în timpul funcționării și limitarea funcționării cuplei



**Fig. 2.10.** Variația jocului unui lagăr cu alunecare pentru doi lubrifianți:  
1 – necorespunzător; 2 – bun



**Fig. 2.11.** Evoluția legii de repartiție a defectărilor cu condițiile de funcționare

Curbele de uzură, din fig. 2. 11, b, se pot liniariza utilizând metode matematice adecvate, astfel încât să poată fi utilizate la determinarea prin calcul a durabilității și fiabilității organelor de mașini componente ale diferitelor sisteme mecanice.

## **2.6. Defecțiuni cauzate de deformații și șocuri [16, 19, 22]**

Solicitările organelor de mașini nu depășesc, în cele mai numeroase cazuri, starea elastică de deformație a macrogeometriei. Deși aceste deformații sunt mici, prezența lor poate perturba funcționarea altor organe de mașini. Astfel, deformațiile elastice torsionale și flexionale ale arborilor unei transmisii mecanice influențează funcționarea corectă a lagărelor cu alunecare sau cu rostogolire, necesare rezemării arborelui respectiv. Totodată, deformațiile arborelui influențează și funcționarea corectă a organelor de mașini care sunt montate pe arbore (roți dințate, roți de lanț, cuplaje etc. ). În general, deformațiile conduc la sarcini dinamice, vibrații și la repartizarea neuniformă a sarcinii pe suprafețele active ale unora dintre organele de mașini care transmit fluxul de forță nemijlocit (angrenaje, rulmenți cu role, variatoare cu fricțiune).

Deformațiile termice pot genera modificări ale distribuției de presiuni în contactele cuplelor cu mișcare relativă, rezultând valori ale tensiunii care să depășească limita de curgere a materialelor și deci apariția deformațiilor plastice.

Un aspect important, pus în evidență mai ales în ultimul deceniu, este acela al deformațiilor locale ale organelor de mașini care transmit fluxul de forță în regim de ungere limită, mixt sau elasto-hidrodinamic. Valoarea deformației hertziene și a microgeometriei suprafeței active este de același ordin de mărime, uneori chiar mai mare decât toleranța dimensională a suprafeței respective. Acest lucru face ca siguranța în funcționare a unor astfel de piese să fie influențată mai mult de echilibrul sarcină-deformație, decât de precizia inițială de execuție. Dacă peste efectul deformațiilor se suprapune și efectul uzării, atunci se poate aprecia că funcționarea sigură a unui sistem mecanic un anumit timp (durabilitatea impusă) este doar în mică măsură determinată de precizia dimensională inițială. Bineînțeles, nu trebuie să se tragă concluzia că o piesă executată cu abateri de formă și dimensionale va putea funcționa sigur corect. Însă o piesă, chiar dacă este executată corect din punct de vedere dimensional, se poate defecta foarte repede când condițiile de exploatare (sarcină, temperatură, mediul de ungere etc.) favorizează apariția deformațiilor și a unor intensități de uzare ridicate.

Deformarea stratului superficial este corelată cu rigiditatea locală a contactului. Rigiditatea reală se definește ca raportul dintre sarcina ce trebuie preluată și deformația după o anumită direcție. De regulă, direcția de deformație se acceptă ca fiind normală la suprafața de contact sau paralelă cu direcția sarcinii. În condițiile existenței pe suprafața de contact a neregularităților (abateri de formă, ondulații și rugozități), se apreciază rigiditatea reală  $S$  ca fiind raportul dintre variația mărimii sarcinii exterioare și variația deformației totale  $\delta$  produse pe direcția sarcinii.

De obicei, deformația corpului în ansamblul său este neglijabilă în raport cu deformația stratului superficial prevăzut cu neregularități.

Stratul superficial al suprafețelor are proprietăți, uneori esențial diferite față de cele ale materialului de bază. Aceste proprietăți (modul de elasticitate, duritate, conductibilitate electrică și termică etc.) se modifică și mai mult în procesul de frecare și uzare.

Din punctul de vedere al rigidității, modulul de elasticitate joacă un rol important

## 2. Defecțiunile sistemelor mecanice

---

Între parametrii fizici ai materialului cuplei, prezentând variații mari (până la de 4 ori) în funcție de direcția de deformare. Totodată, cercetările experimentale confirmă ipoteza că duritatea medie a unei suprafețe este dependentă de configurația rugozităților, modificându-se de până la de 5 ori.

Din punct de vedere fizic, procesul de deformare începe cu asperitățile, apoi cu undulațiile, abaterile de formă și în final, corpul în ansamblul său. Aspectele statistice și probabilistice ale microgeometriei conferă și procesului de deformare un aspect probabilistic, al cărui efect se resimte în procesul de frecare și uzare.

Defecțiunile cauzate de șocuri provin din acțiunea sarcinilor, corelată cu discontinuitatea de viteză. Caracteristicile statistice ale șocurilor se regăsesc în comportarea sistemelor mecanice și, în special, asupra acelor organe de mașini care nu sunt protejate cu dispozitive de siguranță.

Sistemele mecanice prevăzute cu dispozitive de amortizare a șocurilor sunt scoase din funcțiune atunci când dispozitivele respective se defectează. Aceste defecțiuni se manifestă prin ruperea unor elemente de legătură (știfturi, bolțuri) și întreruperea funcționării pentru înlocuirea elementelor rupte. Atunci când dispozitivele de amortizare funcționează pe principiul frecării, defectările se manifestă doar prin întreruperea temporară a funcționării. Dacă frecvența apariției șocurilor este mare, atunci limitatoarele sunt scoase din funcțiune ca urmare a uzării prin impact.

Analiza elementară a comportării sistemelor mecanice la șocuri ia în considerație comportarea la sarcini statice și mărimea multiplicatorului de impact. Variația statistică a multiplicatorului de impact va avea implicații asupra determinării durabilității și fiabilității transmisiei mecanice.

### **2.7. Defecțiuni cauzate de mediul ambiant [1, 16, 19, 22]**

Nesocotirea factorilor de stres ai mediului ambiant poate genera numeroase defecțiuni, constituind deseori cauza defecțiunilor primare. Ca tipuri de defecțiuni trebuie incluse și acelea provocate de conservarea, ambalarea și transportul sistemelor mecanice, componentelor acestora și pieselor de schimb. Principalii factori de stres ai mediului ambiant - temperatură, umiditate, microorganisme și fungi, accelerații, șoc mecanic și vibrații, radiații solare, radiații nucleare (Röntgen, cosmice), nisip și praf, ceață salină - dau o imagine asupra varietății solicitărilor la care poate fi supus un sistem mecanic. Neglijarea acestora conduce la defectări sistematice din categoria acelor de concepție constructivă, impunând ca factorii de mediu să fie definiți în tema de proiectare și specificați în notița tehnică sau alte materiale tehnice însoțitoare.

### **2.8. Defecțiuni provocate de factorul uman [1, 16, 19, 22]**

Lipsa de cunoaștere și lapsusul mintal constituie sursa principalelor defecțiuni provocate de factorul uman. La acestea se adaugă cele rezultate din neglijarea considerentelor ergonomice. Defecțiunile provocate de factorul uman se situează cu precădere la transportul, montajul, exploatarea și întreținerea sistemelor mecanice. Din această cauză, aspectele mentenabilității sunt cel mai puternic afectate.

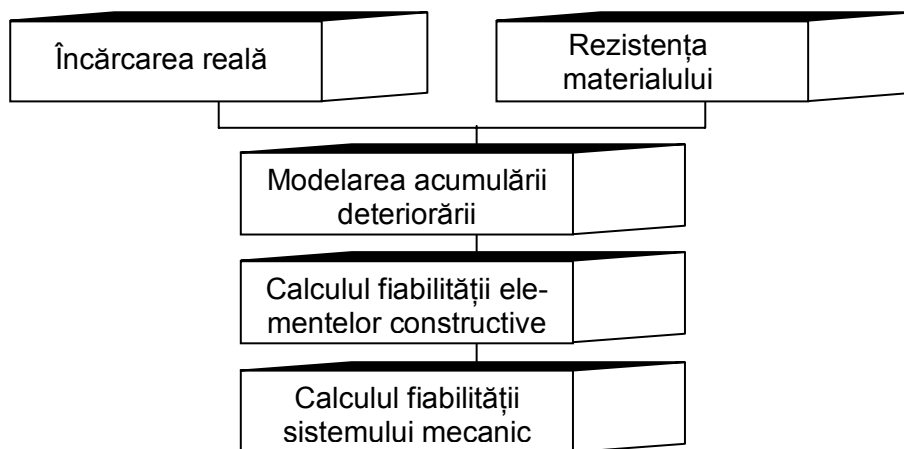
Prevenirea acestui tip de defecțiuni se poate realiza cel mai eficient în etapa de proiectare. Transmiterea de informații prin inscripționări clare și greu de șters, manuale de

întreținere și reparații etc., au o deosebită importanță. Sistemele automate de supraveghere și alarmă au un rol însemnat și prin prisma reducerii defecțiunilor provocate de factorul uman.

Tehnicile de analiză prin care se ia în considerare factorul uman sunt similare cu acelea pentru obținerea mentenabilității, folosind însă un alt punct de vedere.

## 2.9. Modelarea procesului de acumulare a deteriorării componentelor solicitate la oboseală [5, 9, 14]

O componentă importantă a calculului *fiabilității previzionale* a unui sistem mecanic este *modelarea procesului de acumulare a deteriorării*, în care se face legătura între *modelul încărcării reale* și cel al *rezistenței la solicitări variabile* a materialului. Principiul determinării fiabilității previzionale este schematizat, în figura 2.12.



**Fig.2.12.** Principiul determinării fiabilității previzionale a unui sistem mecanic

O primă rezolvare a problemei modelării procesului de acumulare a deteriorării a fost propusă de Palmgren (în 1920) pentru calculul durabilității rulmenților supuși unor sarcini variabile. Până în prezent au fost realizate numeroase teorii de acumulare a deteriorării (datorată proceselor de oboseală), însă nu s-a reușit încă obținerea unei precizii suficiente, din cauza complexității și cunoașterii în mică măsură a fenomenelor care o produc.

### 2.9.1. Colective de încărcare

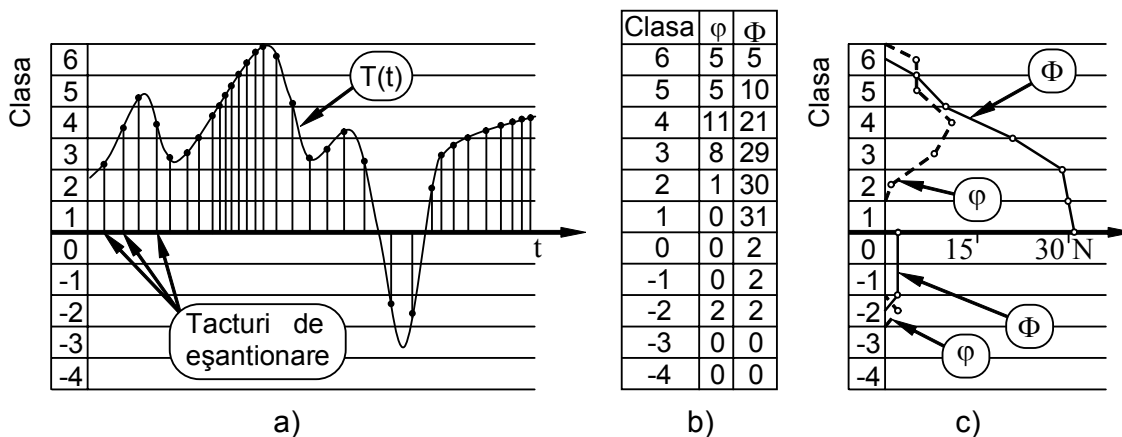
Ca structură, *încărcarea reală* este formată din forțele și momentele utile (de lucru), peste care se suprapun sarcinile suplimentare, datorate frecărilor din cuple, accelerațiilor și vibrațiilor sistemului din care face parte sistemul mecanic considerat, de exemplu o transmisie cu roți dințate.

*Colectivul de încărcare* se definește ca fiind totalitatea forțelor sau momentelor care acționează asupra unui sistem într-un anumit interval de timp, ordonate după mărime și frecvența cumulată. Baza determinării colectivului este funcția de timp a încărcării, obținută prin măsurare directă pe un sistem, aflat în funcțiune sau prin calcul de simulare a

## 2. Defecțiunile sistemelor mecanice

funcționării acestuia (considerat ca un sistem vibrator). Oscilațiile încărcării cu mărimi și forme aleatoare sunt transformate în cicluri sinusoidale, idealizate, care sunt prelucrate statistic cu ajutorul unei metode de *numărare-clasare uniparametrică*. Pentru o aceeași funcție de timp a încărcării, numerele și mărimile ciclurilor sintetizate diferă de la o metodă la alta.

În cazul elementelor constructive cu încărcare modulată funcțional (de exemplu roți dințate, arbori, rulmenți care suferă câte o un ciclu de solicitare la fiecare rotație) numerele de cicluri sunt determinate univoc și se consideră că metoda de numărare - clasare cea mai adecvată este cea a duratei rămânerii în clase. Conform acesteia, funcția de timp a încărcării se eșantionează cu un tact, sincronizat cu rotația arborelui utilizând un senzor (dacă sistemul mecanic include și roți dințate, senzorul sesizează trecerea dinților prin dreptul său). Rezultă un șir de valori discrete, proporționale cu solicitarea modulată a a componentei de exemplu, în cazul unei roți dințate, a "dintelui reprezentativ", ca în figura 2.13.a. Domeniul de valori posibile ale semnalului se împarte, în general, în 64 de clase egale în care se numără aparițiile valorilor discretizate. Astfel, se obțin frecvențele relative  $\varphi$ , prin a căror însumare rezultă frecvențele cumulate,  $\Phi$  (fig.2.13.b și c). Distribuția încărcării exprimată în raport cu frecvența cumulată reprezintă colectivul de încărcare, denumit și spectrul de frecvență al încărcării.



**Fig.2.13.** Metoda de numărare a rămânerilor în clase:

a) principiul eșantionării semnalului, corespunzător momentului de torsiune al arborelui unei transmisii cu roți dințate; b) tabelul de rezultate; c) reprezentarea grafică a rezultatului clasării; t-timpul;  $T(t)$ -funcția de timp a momentului de torsiune;  $\varphi$ -frecvența relativă;  $\Phi$ -frecvența cumulată

Problematika domeniului colectivelor de încărcare este ilustrată în fig.2.14.

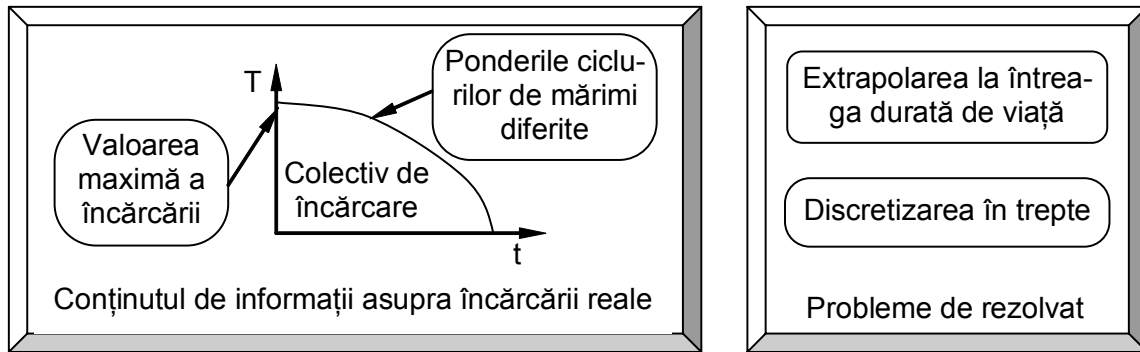
Diversitatea colectivelor de încărcare, obținute experimental, este aproape nelimitată. Totuși se evidențiază - mai mult sau mai puțin idealizat - câteva forme tipice care pot fi descrise cu una dintre legile de repartiție utilizate în statistică.

O funcție care se remarcă prin simplitate și versatilitate este relația lui Hanke:

$$\Phi(\bar{T}) = \Phi_0 \cdot \exp(-A \cdot \bar{T}^B), \quad (2.1)$$

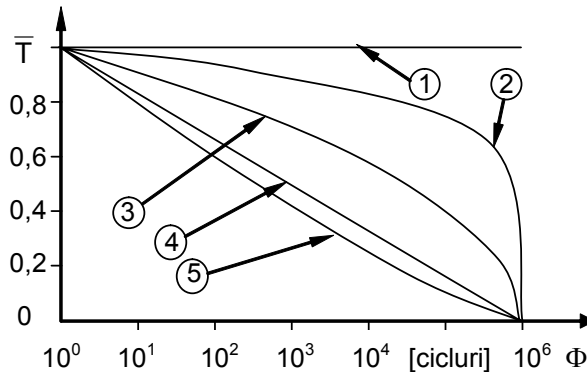
unde încărcarea este exprimată prin momentul de torsiune relativ  $\bar{T}$  iar  $A$ ,  $B$  și  $\Phi_0$  sunt parametri ajustabili.





**Fig.2.14.** Problematika domeniului colectivelor de încărcare

În fig. 2.15 sunt prezentate colectivele trasate cu relația (2.1) pentru valorile descrescătoare ale exponentului B.



**Fig.2.15.** Colective de încărcare unitare trasate cu legea de distribuție propusă de Hanke: numerotarea curbelor este în corelație cu valori descrescătoare ale lui B (1 pentru  $B \rightarrow \infty$  și 5 pentru  $B \approx 0,8$ )

### 2.9.2. Ipoteze de acumulare a deteriorării

În *ipoteza Palmgren-Miner*, cea mai veche ipoteză de acumulare a deteriorării, se consideră că defectarea se produce când suma deteriorărilor parțiale  $D_i$ , îndeplinește condiția

$$\sum_{i=1}^z D_i = t \cdot \sum_{i=1}^k D_i = 1, \quad (2.2)$$

unde  $z$  este numărul total de cicluri aplicate până la defectare;  $t$  - numărul de repetări ale colectivului de tensiuni, discretizat în  $k$  trepte, ca în fig. 2.16.

Deteriorarea parțială  $D_i$  produsă prin aplicarea a  $n_i$  cicluri de solicitare cu amplitudinea  $\sigma_i$  este

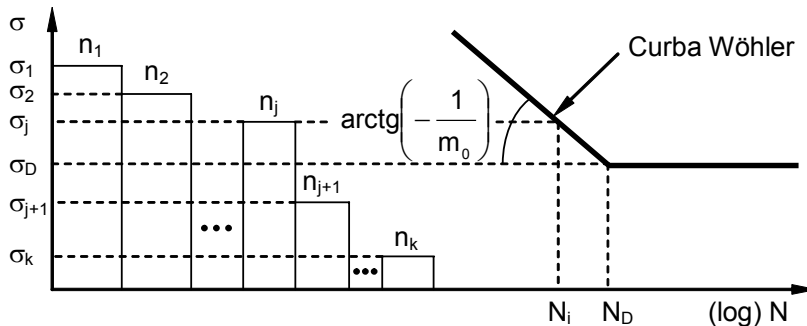
$$D_i = \frac{n_i}{N_i}, \quad (2.3)$$

unde  $N_i$  reprezintă numărul limită de cicluri care pot fi aplicate la nivelul de solicitare  $\sigma_i$ .

Utilizând modelul Basquin pentru curba Wöhler, numărul limită de cicluri este:

$$N_i = N_D \cdot \left( \frac{\sigma_D}{\sigma_i} \right)^{m_0}, \quad (2.4)$$

în care  $N_D$  este numărul de cicluri corespunzător punctului de inflexiune al curbei Wöhler iar  $\sigma_D$  este rezistența la oboseală a materialului.



**Fig.2.16.** Precizarea elementelor care intră în calculul durabilității cu ajutorul ipotezei Palmgren-Miner

Din (2.2) ... (2.4) se obține expresia numărului de reluări ale aplicării colectivului de încărcare până la producerea defecțiunii (care poate fi ruperea):

$$t = \frac{1}{\sum_{i=1}^k D_i} = \frac{1}{\sum_{i=1}^j \frac{n_i}{N_i}}. \quad (2.5)$$

Întrucât treptele de tensiune mai mică decât rezistența la oboseală ( $\sigma_i < \sigma_D$ ) nu sunt deteriorante, atunci însumarea se efectuează doar pentru cele  $j$  trepte situate deasupra lui  $\sigma_D$ .

Știind că lungimea colectivului este  $\sum_{i=1}^k n_i$  se obține expresia durabilității (duratei de viață) prognozate:

$$L = t \cdot \sum_{i=1}^k n_i = \frac{\sum_{i=1}^k n_i}{\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}} = \frac{N_D \cdot \sigma_D^{m_0} \cdot \sum_{i=1}^k n_i}{\sum_{i=1}^j n_i \cdot \sigma_i^{m_0}}, \quad \text{pentru } \sigma_j \geq \sigma_D > \sigma_{j+1}. \quad (2.6)$$

Se face precizarea că durabilitatea calculată  $L$  este atinsă și depășită doar de o parte din componentele considerate, corespunzător probabilității cu care a fost determinată curba Wöhler.

Critica adusă acestei ipoteze este că, prin neglijarea tensiunilor mai mici decât rezistența la oboseală  $\sigma_D$ , se prognozează durabilități mai mari decât cele experimentale.

În scopul remedierii acestei deficiențe au fost formulate ipoteze care utilizează o curbă Wöhler modificată, în zona palierului rezistenței la oboseală  $\sigma_D$ .

*Ipoteza Haibach* calculează durabilități apropiate de cele obținute experimental. Pentru a lua în considerare scăderea rezistenței la oboseală, în locul palierului liniei

## 2. Defecțiunile sistemelor mecanice

Wöhler s-a introdus o linie secundară, fictivă, cu exponentul  $2 \cdot m_0 - 1$ . Pe această porțiune a curbei Wöhler numerele de cicluri limita se obțin cu expresia:

$$N_i = N_D \cdot \left( \frac{\sigma_D}{\sigma_i} \right)^{2 \cdot m_0 - 1}, \text{ pentru } (\sigma_i > \sigma_D). \quad (2.7)$$

Această ipoteză este stabilită teoretico-experimental, pe baza ipotezei unei amestecări aproape uniforme a ciclurilor de solicitare cu amplitudini diferite. Acceptând în rest formalismul prezentat la ipoteza Palmgren-Miner, dacă  $\sigma_i \geq \sigma_D$ , se obține durabilitatea:

$$L = N_1 \cdot \frac{\sum_{i=1}^k n_i}{\sum_{i=1}^j n_i \cdot \left( \frac{\sigma_i}{\sigma_1} \right)^{m_0} + \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_D} \right)^{m_0 - 1} \cdot \sum_{i=j+1}^k \left( \frac{\sigma_i}{\sigma_1} \right)^{2 \cdot m_0 - 1} \cdot n_i}, \quad (2.8)$$

unde  $\sigma_j \geq \sigma_D > \sigma_{j+1}$ .

În Germania este, în prezent, cea mai utilizată ipoteză de acumulare a deteriorării. S-a constatat că pentru colective de solicitare (tensiuni calculate din colectivele cu treapta maximă situată puțin deasupra rezistenței la oboseală, aceasta prognozează durabilități mult mai mici decât cele experimentale, iar pentru colective cu treapta maximă situată sub această valoare prognozează durabilități infinite. Pentru programe de încărcare cu cicluri succedate aleator, această variantă conduce la durabilități prognozate de aproximativ trei ori mai mari decât cele experimentale.

Observație: Calculând valori ale durabilității  $L$  cu curbe Wöhler de diferite probabilități de supraviețuire, se obține o relație numerică discretă (prin puncte) între fiabilitate (probabilitatea de supraviețuire) și durabilitate, adică repartiția fiabilității previzionale.