

Capitolul 6. *FENOMENUL DE DEGRADARE MECANICĂ*

6.1. Noțiuni introductive

Fenomenul de degradare mecanică reprezintă discontinuități de suprafață sub formă de microfisuri sau discontinuități volumice sub formă de cavități care apar în timp la o piesă sau structură solicitată sau nu. Noțiunea de degradare este asociată cu modificările fizice, detectabile la nivel macroscopic sau microscopic, care alterează comportarea programată a unei piese. Apariția degradării este precedată de anumite procese inițiale: mișcarea și acumularea dislocațiilor în metale, modificarea legăturilor intermoleculare în materialele organice, microdecoeziuni în minerale. Degradarea este marcată de o pronunțată ireversibilitate, tratamentele termomecanice tradiționale pot reface numai parțial defectele cauzate de aceasta.

Mai întâi ar trebui stabilit care este mijlocul prin care începe și se termină procesul de degradare. Este evident faptul că, materialul nu prezintă nici o degradare dacă este lipsit de fisuri și cavități la scară microscopică sau dacă deformarea lui se păstrează în limitele pentru care a fost proiectat. Din punct de vedere structural și al tensiunilor remanente existente, se poate stabili care este starea lui inițială de la care trebuie pornit în a măsura și determina eventuala lui degradare, supus sau nu unui sistem de sarcini exterioare. De asemenea și solicitarea exterioară este cunoscută ca și eventualele schimbări în ceea ce o privește.

Așadar, teoria degradării descrie evoluția între starea inițială, nedistrusă a materialului și inițierea primei fisuri macroscopice sau apariția în structură a unor modificări de natură să împiedice funcționarea în siguranță a piesei respective. Această evoluție, care nu este de cele mai multe ori ușor detectabilă pe baza fenomenului de deformare care în mod obișnuit o acompaniază, se datorește uneia sau mai multor din următoarele mecanisme posibile:

- degradare plastică ductilă care acompaniază o deformare plastică majoră a metalelor la temperatură obișnuită și la temperaturi medii;
- degradare vâscoplastică fragilă, în funcție de timp, pentru metale la temperaturi medii și înalte corespunzătoare decoeziunii intergranulare acompaniată de deformări vâscoplastice;
- degradare prin oboseală cauzată de solicitarea ciclică și identificată în funcție de numărul de cicluri de solicitare;
- degradare macrofragilă produsă prin încărcare statică, fără deformări ireversibile apreciabile.

Pot fi considerate și alte forme de degradare: procese de oxidare, coroziune, **modificări structurale**, etc.

Este evident faptul că, modelele, în ceea ce privește degradarea, evoluează astfel încât putem avea o reprezentare diferită a fenomenelor care pot produce acumulări ale degradării. De obicei, dacă se cunoaște modul de încărcare și deformare pentru un element de volum dat al structurii, legea deteriorării este dată în funcție de timp până în momentul în care, în respectivul element de volum apare o macrofisură critică ce se poate propaga instabil. Ca urmare, se poate determina timpul sau numărul de cicluri de solicitare până în momentul în care apare o astfel de macrofisură, de obicei în punctul cel mai solicitat al structurii. Această abordare permite analiza rezistenței structurilor, a proiectării, verificării și controlului condițiilor de serviciu ale acestora. Pe baza unei astfel de analize se furnizează mijloacele de optimizare a proceselor de elaborare a materialelor pentru eliminarea sau reducerea defectelor de fabricație. În orice caz, este important de știut ce modificări ale proprietăților mecanice se produc și care va fi evoluția acestora în anumite condiții de solicitare pentru un material dat.

Însăși definirea noțiunii de degradare mecanică prezintă unele probleme. De obicei, la nivel macroscopic nu se poate observa vreo diferență semnificativă între starea inițială și cea finală a materialului. Ca urmare, trebuie să ne imaginăm anumite variabile care apar la scară microscopică și care sunt reprezentative pentru **starea de degradare** a materialului. Sunt câteva posibilități de a măsura gradul de degradare:

- determinarea densității microfisurilor sau cavităților conduce la modele microscopice care pot fi extrapolate la nivel macroscopic pe baza utilizării funcțiilor matematice de omogenizare. Se obțin astfel proprietățile elementului de volum degradat, fiind totuși dificil de a defini variabila de degradare macroscopică și evoluția în timp a acesteia, lucru care poate fi ușor făcut în cazul mediilor continue;

- măsurători fizice globale (densitate, rezistivitate, procente ale constituenților structurali, etc) necesită **definirea unui model global** pentru a-l converti în proprietăți care caracterizează rezistența mecanică;

- un alt tip de evaluare a degradării este legarea acesteia de durata de viață rămasă dar acest concept nu conduce în mod direct la legea constitutivă a degradării;

- măsurarea mecanică globală (modificarea proprietăților elastice, plastice sau vâscoplastice) care este ușor de interpretat în termenii variabilei degradare utilizând conceptul de tensiune efectivă introdus de Robotnov.

- dacă se ia drept criteriu fisura pentru a defini degradarea, unei fisuri detectate i se poate asocia un parametru cantitativ, de exemplu lungimea; raportul dintre lungimea fisurii inițiale și lungimea ei critică poate fi considerat drept măsură a degradării. În acest caz se admite că o solicitare care nu produce propagarea fisurii nu deteriorează piesa. Acest criteriu poate fi acceptat în cadrul durabilităților mici, în care stadiul inițierii fisurii este mic în raport cu cel al propagării acesteia. În cadrul durabilităților mari ($N > 10^5$ cicluri) mai mult de 90% din durata de viață este destinată inițierii și transformării microfisurilor într-o fisură detectabilă.

→ în cadrul **durabilităților mari**, noțiunii de degradare i se poate acorda un conținut convențional care se bazează pe ipoteza că fiecare din cicluri contribuie în mod egal la degradarea care progresează până în momentul cedării.

6.2. Oboseala metalelor în cadrul durabilităților mari

În proiectarea a numeroase piese și structuri, estimarea comportării la solicitări variabile are în vedere criterii de durabilitate bazate pe date obținute prin încercarea la oboseală a unor epruvete netede. Astfel de criterii nu urmăresc explicit prevenirea inițierii sau a propagării necontrolate a fisurilor de oboseală ci asigurarea față de o stare limită definită prin amplitudinea deformației specifice sau a tensiunii corespunzătoare unei durabilități preconizate. Solicitățile variabile avute în vedere în cadrul încercărilor epruvetelor sunt de tip periodic cu variație continuă. Răspunsul epruvetei la solicitarea variabilă respectivă se consideră a fi o caracteristică a materialului. În funcție de răspunsul materialului la solicitarea variabilă periodică se deosebesc:

Oboseala la durabilități mari, considerată că intervine la peste 10^5 cicluri de solicitare, se dezvoltă în condițiile unor solicitări variabile la care atât tensiunea maximă cât și amplitudinea tensiunii au valori mici în comparație cu caracteristicile statice de rezistență ale materialului. Deoarece deformația materialelor în cazul utilizării în exploatare este în domeniul elastic, procesul este controlat la fel de bine pe baza deformației specifice cât și pe baza tensiunilor.

Oboseala la durabilități mici rezultă în condițiile unor solicitări variabile cu vârfuri și amplitudini de tensiune de valori mari care determină deformații locale elasto-plastice. În acest caz tensiunea nu mai poate defini cu suficientă precizie starea de solicitare. Ca urmare, variația solicitării este apreciată prin amplitudinea deformației specifice totale sau ținând seama de ordinul de mărime al amplitudinii componente plastice a acesteia în zonele cele mai solicitate.

6.3. Curba de durabilitate la oboseală

Principala metodă de analiză a comportării la oboseală a metalelor, care s-a impus de la primele începuturi ale cercetării sistematice a fenomenului de oboseală, o constituie încercarea pe epruvete netede la solicitări ciclice cu amplitudine constantă. De regulă solicitarea este alternant simetrică ($\sigma_m=0$, $\sigma_a=\Delta\sigma/2=\sigma_{max}$). Amplitudinea solicitării diferă de la un set de încercări la altul începându-se cu tensiunea maximă de aproximativ $0,85\sigma_r$ în care σ_r este rezistența la rupere prin tracțiune statică a respectivului material. Perechea de valori, valoarea amplitudinii-numărul de cicluri la care epruveta a cedat constituie, într-un sistem de referință $\sigma_{max}-N$, coordonatele unui punct, *figura 6.1a*. Pentru un anumit metal, punctele obținute prin încercarea mai multor epruvete se dispun pe o curbă aproximativă denumită

curbă de durabilitate sau curbă Wöhler. Limita inferioară a respectivei curbe ce apare pentru epruvete care nu s-au rupt după un număr suficient de mare de cicluri poartă numele de limită de oboseală. Pentru ciclul alternant simetric limita de oboseală se notează cu σ_{-1} . Dacă se reprezintă curba de durabilitate la scară dublu logaritmică, *figura 6.1b*, rezultatele, mai ales pentru durabilități mai mari de 10^3 cicluri nu se depărtează mult de o dreaptă a cărei ecuație poate fi scrisă sub forma:

$$\sigma_a = \alpha N^\beta \quad (6.1)$$

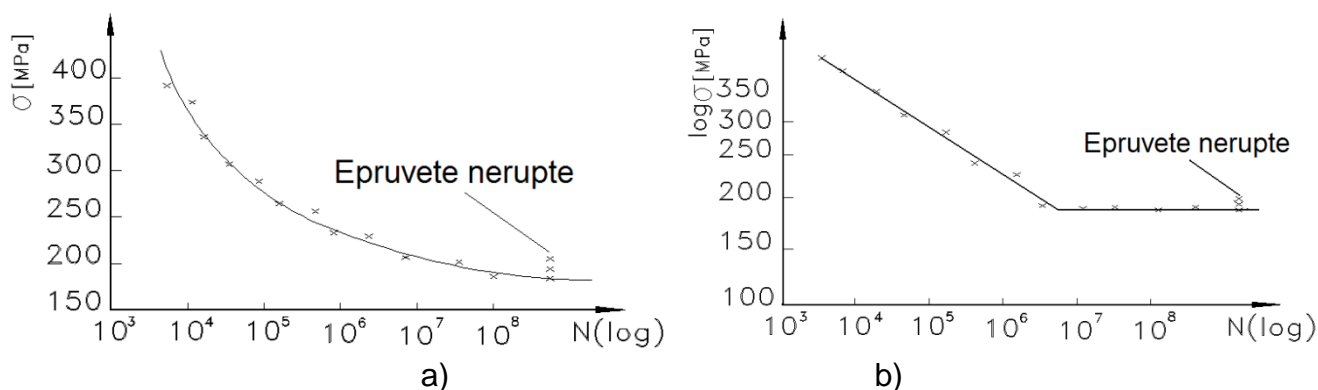


Fig. 6.1. Curba de durabilitate

La oțelurile care prezintă o limită la oboseală evidentă această dreaptă se continuă cu o dreaptă orizontală care definește chiar limita la oboseală.

Pentru un material dat, curba de durabilitate obținută prin solicitări ciclice cu amplitudine constantă depinde de condițiile de solicitare (întindere, încovoiere, torsiune), principalii factori de influență fiind concentrarea tensiunilor, dimensiunea epruvetei, calitatea suprafeței, tensiunea medie, tensiunile remanente, frecvența solicitării.

6.4. Oboseala metalelor în domeniul durabilităților mici (oboseala oligociclică)

6.4.1. Diagrama caracteristică (σ - ε) la solicitări statice

Principalul experiment pentru determinarea proprietăților mecanice ale metalelor este încercarea la tracțiune. Pe baza ei se obține diagrama caracteristică convențională a materialului. În diagrama convențională sunt reprezentate puncte definite de valorile:

$$\sigma = \frac{N}{A_0} \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

în care A_0 și l_0 sunt aria, respectiv lungimea inițială a epruvetei iar N și Δl sunt forța de tracțiune respectiv lungirea sub sarcină.

Odată cu lungirea barei se produce contracția transversală $\varepsilon' = -\nu\varepsilon$. Aria secțiunii A se micșorează față de aria inițială A_0 tensiunea reală având valoarea N/A . În domeniul elastic tensiunea reală diferă foarte puțin de cea convențională. În domeniul plastic însă, lungirile și ca urmare, reducerea ariei, devin semnificative în special pentru oțelurile ce posedă o pronunțată capacitate de deformare plastică. Având în vedere faptul că deformările plastice se produc în condițiile conservării volumului, se poate scrie relația $A_0 l_0 = A l$, în care mărimile neafectate de indici se referă la un stadiu oarecare al încărcării. Ținând seama că $l = l_0(1+\varepsilon)$ rezultă:

$$A_0 l_0 = A l_0(1+\varepsilon) \rightarrow A_0 = A(1+\varepsilon)$$

și atunci tensiunea reală devine:

$$\bar{\sigma} = \frac{N}{A} = \frac{N}{A_0} \frac{A_0}{A} = \sigma(1+\varepsilon)$$

Lungirea specifică reală, la o anumită valoare a încărcării, controlată prin lungimea corespondentă l a barei este:

$$\bar{\varepsilon} = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln(1+\varepsilon) \quad (6.2)$$

Valoarea ei la rupere, notată ε_f (indicele provine de la termenul englez failure=cedare) și denumită ductilitate la rupere are valoarea:

$$\varepsilon_f = \ln(1+\varepsilon) = \ln \frac{A_0}{A_r} = \ln \frac{1}{A_r / A_0} = \ln\left(\frac{1}{1-Z}\right) \quad (6.3)$$

în care cu A_r a fost notată aria secțiunii gătuite iar cu Z s-a notat gătuirea la rupere.

Determinarea precisă a tensiunii reale la rupere este îngreuiată din cauza formării găturii, care transformă starea uniaxială într-o stare triaxială de tensiune. Intensitatea componentei tensiunii după direcția axei barei variază după o anumită lege, *figura 6.2*.

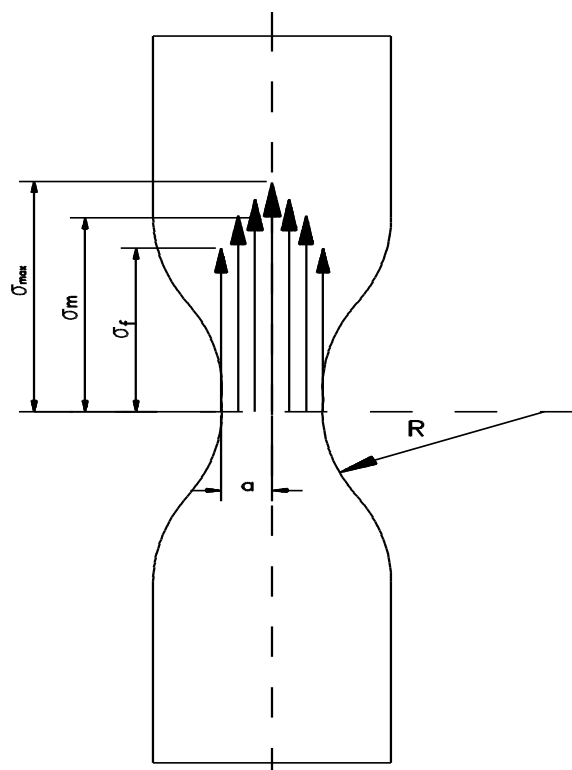


Fig. 6.2. Variația tensiunii în zona deformată

La marginea secțiunii apare numai tensiunea principală σ_f care este dată de relația:

$$\sigma_f = \frac{\sigma_m}{\left(1 + \frac{a}{4R}\right)} \quad (6.4)$$

în care:

- σ_m semnifică tensiunea medie în secțiunea gâtuită;
- a - raza minimă a secțiunii gătuite;
- R reprezintă raza de curbură a profilului gâtuirii.

Tensiunea maximă are valoarea:

$$\sigma_{\max} = \sigma_m \frac{R + 0,5a}{R + 0,25a}$$

și acționează pe direcția axei barei. Practic, din această zonă începe procesul de rupere când și forța de tracțiune ajunge la valoarea de rupere.

Diagrama caracteristică reală are, la materialele ductile, alura din *figura 6.3b* (linia întreruptă) care se referă la un oțel moale. În prima zonă de curbură accentuată, diagrama poate fi, cu destulă precizie, descrisă de o funcție de putere de forma:

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_e + \bar{\varepsilon}_p = \frac{\bar{\sigma}}{E} + \left(\frac{\bar{\sigma}}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (6.5)$$

în care $\bar{\varepsilon}_e$ și $\bar{\varepsilon}_p$ sunt cele două componente (elastică, respectiv plastică) ale deformației; K și n sunt constante de material; K depinde de modul de ecruisare iar n este exponentul de ecruisare ($n < 1$).

6.4.2. Diagrama caracteristică (σ - ε) la solicitări ciclice

Diagrama caracteristică tensiune-deformație la solicitări ciclice poate să difere substanțial de cea obținută prin încercarea la tracțiune sau compresiune. Unui ciclu complet de întindere-compresiune îi corespunde o buclă de histerezis, *figura 6.3a*. În cazul repetării aceluiaș ciclu de întindere-compresiune, buclele de histerezis care se obțin în continuare nu se suprapun peste primele, *figura 6.3b*.

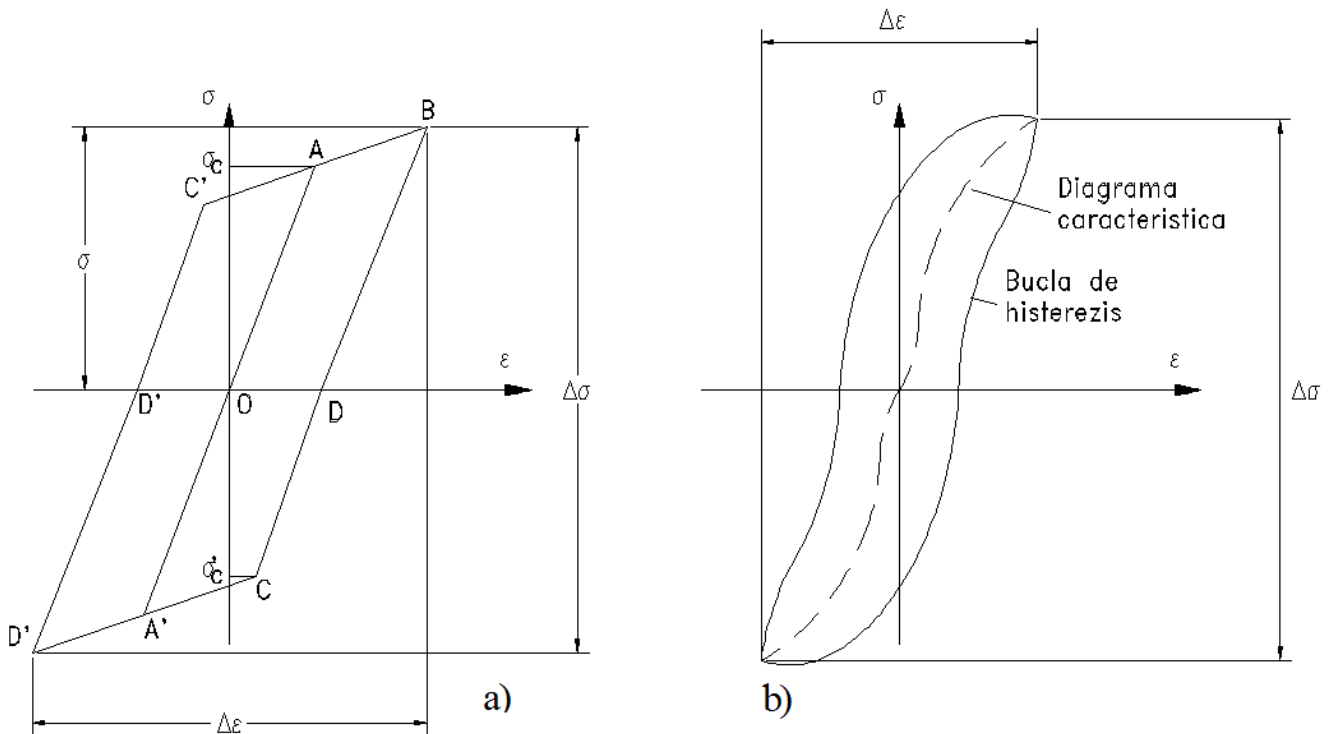


Fig. 6.3. Ciclu de întindere compresiune cu histerezis

Dacă solicitarea constă în impunerea unei deformații specifice alternante între limitele $\pm \varepsilon$, punctele de întoarcere, corespunzând schimbării de semn a solicitării, se deplasează de la un ciclu la altul, fie mărindu-și ordonata - tensiunea σ , fie micșorând-o. Materialele din prima categorie se numesc materiale cu ecruisare ciclică iar celelalte, materiale cu înmuiere

ciclică. După un anumit număr de cicluri apare un fenomen de saturare, variațiile de tensiune la fiecare nou ciclu de solicitare devin nesemnificative iar bucla de histerezis se stabilizează.

Diagrama caracteristică σ - ε ciclică este curba care se obține unind punctele de întoarcere ale buclelor de histerezis stabilizate. Acestea sunt obținute prin încercarea unui număr de epruvete identice la cicluri alternant-simetrice de amplitudine a deformației specifice constantă pentru o epruvetă dar diferită de la o epruvetă la alta, *figura 6.4*. La fiecare încercare efectuată sub amplitudine constantă se înregistrează bucla stabilizată după un număr de cicluri aproximativ egal cu jumătate din numărul de cicluri apreciat că ar produce cedarea.

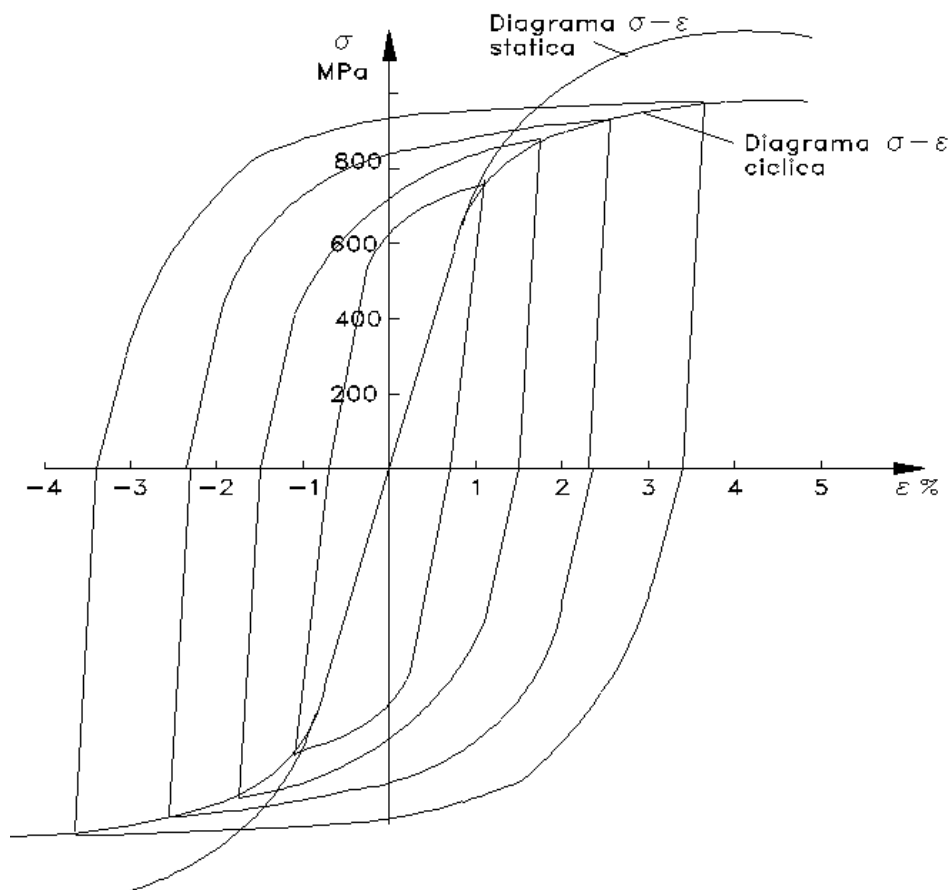


Fig.6.4. Bucle de histerezis

6.4.3. Diagrama ε -N sau diagrama la durabilitate mică

În domeniul durabilităților de până la 10^3 cicluri, de regulă, încercările la oboseală se execută pe epruvete netede supuse la solicitări axiale cu control prin deformație specifică. Diagramele care se obțin și modelează relația dintre deformația specifică și durabilitate poartă numele de diagrame la durabilitate mică sau diagrame de oboseală oligociclică.

Diagrama ε -N este redată schematic în *figura 6.6.*

Reprezentarea este la scară dublu-logaritmică și are în abscisă numărul $2N$ al inversiunilor deformației specifice, N fiind numărul de cicluri până la cedare. Cedarea poate fi considerată atunci când: apare o fisură detectabilă prin mijloace optice, scade într-o anumită măsură forța de solicitare sau apare chiar ruperea.

Deformația specifică poate fi descompusă în cele două componente: deformație elastică și deformație plastică pe baza buclei de histerezis descrise de solicitarea unei epruvete martor, supusă la aceleași cicluri de solicitare. Variația fiecărei componente la scară dublu-logaritmică poate fi reprezentată printr-o dreaptă.

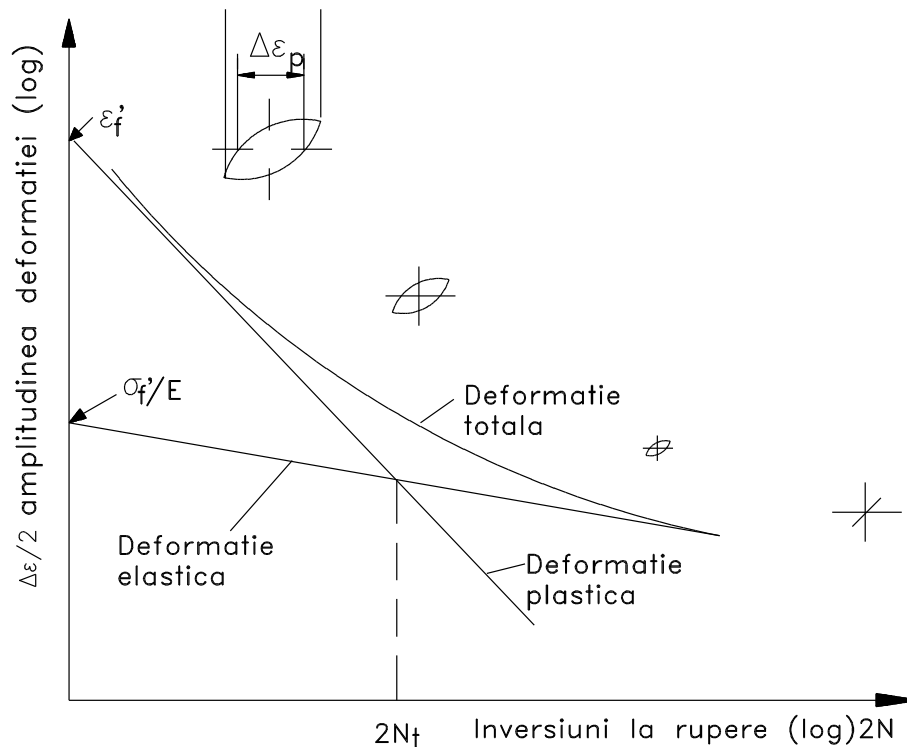


Fig.6.6. Diagrama ε - N la durabilitate mică

Având ca parametru numărul inversiunilor, este natural ca lor să li se asocieze variațiile $\Delta\varepsilon$ ale deformațiilor specifice. Pentru ciclul alternant-simetric relația deformație specifică-durabilitate se scrie astfel:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^{-b} + \varepsilon'_f (2N)^c \quad (6.6)$$

în care: $\frac{\Delta\varepsilon}{2}$, $\frac{\Delta\varepsilon_e}{2}$ și $\frac{\Delta\varepsilon_p}{2}$ sunt amplitudinile deformațiilor specifice: totale, elastice și plastice
: σ'_f este factorul de rezistență la oboseală ce reprezintă rezistența reală la rupere prin oboseală pentru $2N=1$; ε'_f este factorul de ductilitate la oboseală, care este deformația specifică reală la rupere pentru $2N=1$; b este exponentul de rezistență la oboseală; c este exponentul de ductilitate la oboseală; E - modulul de elasticitate longitudinal al materialului.

Atât σ'_f cât și ε'_f se obțin prin determinarea intersecției celor două drepte, elastică și plastică, cu axa $\Delta\varepsilon$. Sub această formă relația este cunoscută sub numele de ecuația Coffin-Manson.

Diagrama este asemănătoare diagramei de tip Wöhler, cu deosebirea că parametrul controlat în acest caz este deformația specifică și nu tensiunea. Diagrama ε -N nu reprezintă pentru nici un material punctul de frângere care apare pentru unele materiale în diagrama Wöhler. În figura 5 se ilustrează faptul că, cedarea la un număr redus de cicluri se datorește deformațiilor plastice, dar este asociată deformației elastice la un număr mare de cicluri. Tranziția se face după un număr de cicluri $2N_t$ care se stabilește egalând valorile celor două componente ale deformației specifice:

$$\Delta\varepsilon_e = \Delta\varepsilon_p \rightarrow 2N_t = \left(\frac{\varepsilon'_f E}{\sigma'_f} \right)^{\frac{1}{b-c}} \quad (6.7)$$

După cum se poate observa, diagrama ε -N depășește domeniul durabilităților mici. Ea își păstrează valabilitatea și în domeniul durabilităților mari, unde se deosebește de curba Wöhler prin mărimea de control. Este evident faptul că, diagramele de durabilitate ε -N și σ -N nu sunt independente una în raport cu cealaltă. Rolul de funcție de transfer de la una la cealaltă îl joacă ecuația curbei caracteristice σ - ε ciclice.

Sub forma (6) ecuația curbei de durabilitate este completă. În domeniul durabilităților foarte mari sau foarte mici unul dintre termeni devine neglijabil. Pentru a exemplifica ne referim la oțelul 4340 (S.U.A), *figura 6.6a*, care are următoarea ecuație de durabilitate:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = 0,0062(2N)^{-0,09} + 0,58(2N)^{-0,57} \quad (6.8)$$

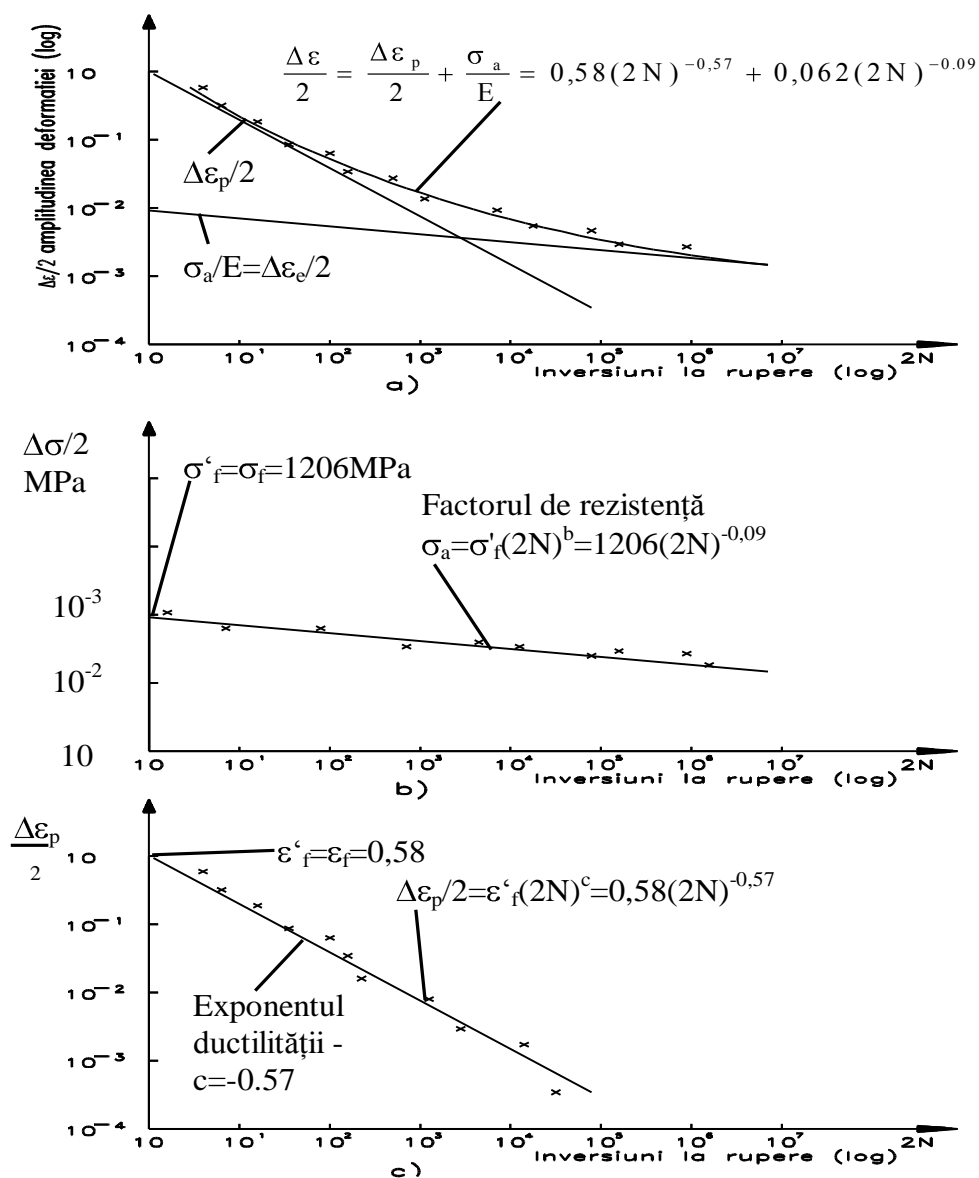


Fig. 6.6. Diagrama de durabilitate pentru oțelul 4340

Tranziția se face la $2N = 1,4 \cdot 10^4$ cicluri pentru $N > 10^6$ cicluri. Ca urmare pentru $2N > 2 \cdot 10^6$ cicluri, deformația plastică poate fi neglijată în raport cu cea clasică. La $2N = 2 \cdot 10^6$ cicluri raportul dintre ele este mai mic de 0,1 ($0,148 \cdot 10^{-3} : 1,68 \cdot 10^{-3}$) și din ecuație este reținut numai termenul care se referă la deformația elastică și care poate fi adus sub forma, (figura 6.6b):

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N)^b = 1206(2N)^{-0,09} \quad (6.9)$$

În mod asemănător, pentru durabilități de ordinul $N = 10^2$ sau mai mici se poate neglija deformația elastică (figura 6.6c) și păstra numai termenul:

$$\frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \epsilon'_f (2N)^c = 0,58(2N)^{-0,57} \quad (6.10)$$

Explicitând în funcție de parametru $2N$ cele două componente, elastică și plastică și identificându-le cu expresiile lor din ecuația diagramei σ - ε ciclică în care valoarea K' este cea dată de relația (6.5) rezultă că între exponenții b și c există relația:

$$\frac{1}{n'} c = \frac{1}{b} \text{ sau } n' = \frac{b}{c}$$

Mărimile σ'_f , ε'_f , b , c și E sunt constante de material și sunt determinate prin încercări la oboseală. Factorul de ductilitate la oboseală ε'_f este, de cele mai multe ori raportat la ductilitatea la rupere statică ε_f . În cele mai multe cazuri valoarea lui este cuprinsă în domeniul $\varepsilon'_f = (0,36 \dots 1,0) \varepsilon_f$.

În cazul în care nu sunt la îndemână rezultate experimentale, pentru oțeluri pot fi utilizate următoarele relații aproximative, derivate din încercări experimentale:

- $\sigma'_f = \sigma_f$ = rezistența reală la rupere sau
- $\sigma'_f = (\sigma_r + 350)$ MPa ($\sigma_r = R_m$ = rezistența convențională la rupere);
- $b = -(1/6) \log(2\sigma_f/\sigma_r)$ sau
- $b = \begin{cases} -0,1 & \text{la oțeluri moi} \\ -0,05 & \text{la oțeluri dure} \end{cases}$
- $\varepsilon'_f = \varepsilon_f \ln(A_0/A_r)$ unde A_0 - aria inițială; A_r - aria la rupere;
- $c = -0,6 \dots -0,7$ (oțeluri moi...oțeluri dure).

Este evident faptul că, aceste valori aproximative pot fi folosite în etapa alegerii oțelului pentru elementul proiectat. După alegere, concludente devin încercările la oboseală propriu-zise.

Domeniul relativ restrâns în care variază exponenții b și c a condus pe Manson să propună ca ei să fie considerați constanți, cu aceeași valoare pentru toate metalele. În acest caz, celelalte constante rămase ar controla procesul de oboseală. Ecuația pantelor universale pe care a avansat-o sub forma:

$$\Delta \varepsilon = 3,5 \left(\frac{\sigma_r}{E} \right) N^{0,12} + \varepsilon_f^{0,6} N^{0,6} \quad (6.11)$$

presupune că procesul de oboseală este controlat de E , σ_r și ε_f , mărimi determinate la solicitările statice. Încercările efectuate au dovedit că ecuația pantelor universale poate fi considerată o primă aproximare pentru determinarea durabilității la ciclul alternant simetric pentru piesele netede de mici dimensiuni.

Numeroasele experimente făcute asupra a variate metale au permis avansarea unor reguli de comportare a epruvetelor la încercări controlate de deformația specifică. Numeroase metale au aceeași durabilitate și anume $N \approx 10^3$ la o amplitudine a deformației specifice de 1%. La deformații mai mari, materialele cu mai mare ductilitate prezintă o durabilitate mai

mare, în timp ce la deformății specifice sub 1% materialele mai dure se comportă mai bine, figura 6.7.

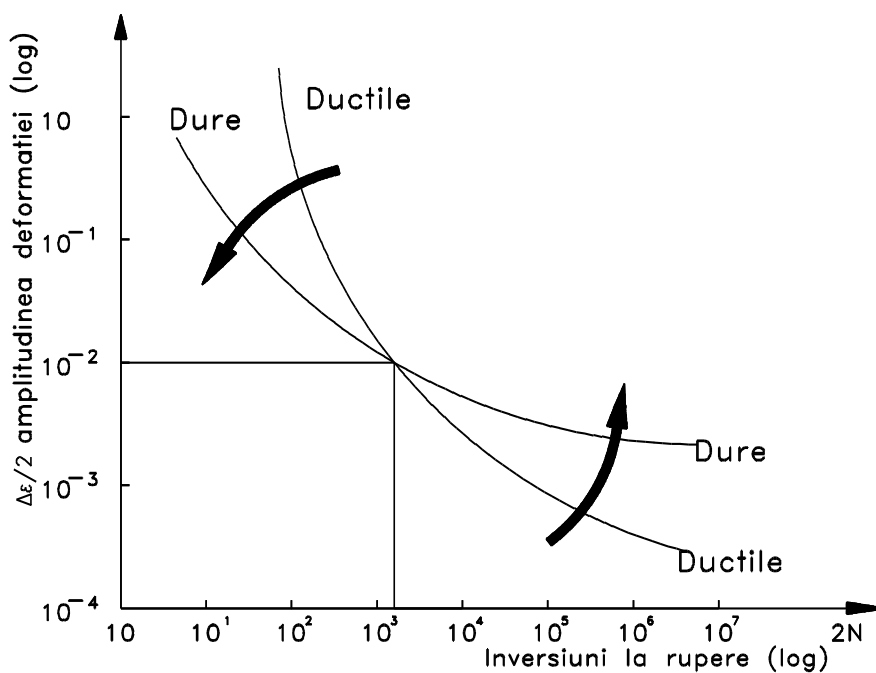


Fig. 6.7. Curbe de durabilitate pentru materiale moi și dure

Proprietățile materialelor descrise aici se referă la epruvetele netede încercate în condiții standard și nu țin seama de influența unor condiții particulare de solicitare care trebuie luate în considerare în proiectarea la oboseală a pieselor sau structurilor.

6.5. Modele neliniare privind cumulara degradărilor

6.5.1. Modelul Corten-Dolan

Modelul de reprezentare a unei solicitări prin cicluri este destinat pentru estimarea, prin calcul, a duratei de viață. Operația presupune adoptarea unui criteriu pentru cumulara degradărilor și trasarea eventuală a diagramei solicitare-deteriorare (S-D).

Procedeul Corten-Dolan face parte din clasa procedeelor bazate pe relațiile neliniare între degradare și nivelul tensiunilor aplicate. El se exprimă astfel:

$$D_i = \left(\frac{n_i}{N_i} \right)^\alpha$$

în care:

- n_i reprezintă numărul de cicluri la un anumit nivel σ_i al tensiunii de solicitare;
- N_i reprezintă numărul de cicluri luat de pe curba de durabilitate pentru același nivel σ_i al tensiunii de solicitare;

- $\alpha > 1$ poate fi o mărime constantă sau o funcție de mărimea tensiunii aplicate.

Această relație implică presupunerea că degradarea se accelerează pe măsura creșterii numărului de cicluri de solicitare.

Criteriul propus de Corten-Dolan pornește de la exprimarea degradării printr-o funcție exponențială a ciclurilor de solicitare la un anumit nivel al acestei solicitări:

$$D = r \cdot n^\alpha$$

în care r este funcție de tensiunea aplicată, $r = f(\sigma)$ iar α o constantă de material. Este evident faptul că, atunci când $n = N$ vom avea $N = 1$ (degradare totală).

Se presupune un bloc de solicitare format din două niveluri: $S_1 > S_2$, cu n_1 respectiv n_2 numărul de cicluri pentru care $N_2 > N_1$. În aceste condiții degradările sunt:

$$D_1 = r \cdot n_1^\alpha \quad \text{și} \quad D_2 = r \cdot n_2^\alpha$$

Duratele de solicitare, exprimate în cicluri la diferite niveluri pot fi exprimate în funcție de un singur nivel S_1 ; astfel, durata n_2 la nivelul de solicitare S_2 este exprimată prin n_{12} la nivelul S_1 :

$$r_1 \cdot n_{12}^\alpha = r_2 \cdot n_2^\alpha \Rightarrow n_{12} = \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^{1/\alpha} \cdot n_2$$

Un bloc de solicitare de forma $n_1(S_1) + n_2(S_2)$ este echivalent cu unul exprimat numai la nivelul S_1 :

$$\bar{n}_1 = \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^{1/\alpha} \cdot n_2 + n_1$$

Degradare produsă de un bloc poate fi exprimată în funcție de nivelul maxim de solicitare în felul următor:

$$D = \frac{\bar{n}_1}{N_1}$$

Numărul blocurilor care produc cedarea este:

$$n_B = \frac{N_1}{n_1}$$

Notând $n_{1f} = n_B \cdot n_1$ și $n_{2f} = n_B \cdot n_2$, se obține:

$$\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^{1/\alpha} \cdot \left(\frac{n_{2f}}{N_1}\right) + \frac{n_{1f}}{N_1} = 1$$

$$\text{și } N_f = \left[\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^{1/\alpha} \cdot \left(\frac{a_2}{N_1}\right) + \frac{a_1}{N_1} \right]^{-1}$$

$$\text{sau } N_f = \frac{N_1}{\left[a_1 + a_2 \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^{1/\alpha} \right]}$$

unde cu a_i ($i = 1, 2$) a fost notat raportul $\frac{n_{if}}{N_f}$.

Experimental, Corten și Dolan au verificat că:

$$\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^{1/\alpha} = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^d$$

Această relație corespunde unei diagrame solicitare – numărul de cicluri (S-N) în care, în reprezentarea dublu-logaritmică d ar fi inversul pantei în zona centrală; din comparația cu panta diagramei S-N a materialului, scrisă sub forma $S = C \cdot N^{1/b}$, sau sub forma echivalentă:

$$\left(\frac{N_1}{N_2}\right) = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^b$$

a reieșit că $(1/d) > (1/b)$, figura 8.

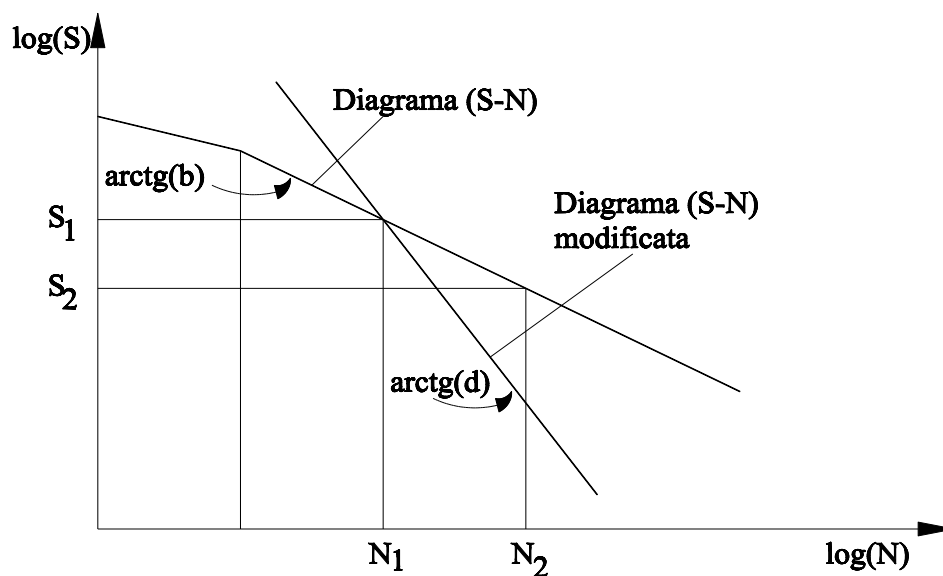


Fig. 8.

Aplicarea unor solicitări severe repetate asupra unei piese sau structuri la începutul solicitării afectează răspunsul la ciclurile următoare; durata de viață se scurtează; modificarea răspunsului, în sensul reducerii duratei de viață, se reflectă prin frângerea drepte în diagrama S-N la nivelul S_1 și accentuarea pantei care devine $(1/d) > (1/b)$; diagrama astfel obținută poartă numele de diagramă S-N modificată. Nu poate fi trecută cu vederea posibilitatea micșorării pantei diagramei S-N în situația în care solicitarea se produce cu tensiuni de întindere în număr redus, care produc în zonele cele mai solicitate tensiuni remanente de compresiune ce conduc la mărirea duratei de viață a piesei.

Pentru aplicarea procedurii Corten-Dolan nu mai sunt suficiente încercările cu amplitudine constantă ci sunt necesare încercări la două niveluri de solicitare, - S_1 nivelul de vârf și S_2 nivelul inferior - pentru a se putea determina valoarea pantei modificate. În general, se caută ca până la rupere să fie aplicate cel puțin zece blocuri de solicitare. La oțeluri valoarea obținută pentru d variază în limitele 4...8; deși intervalul este relativ restrâns, faptul că d intervine la exponent afectează sensibil rezultatul.

Pentru un bloc de solicitare format din n trepte, criteriul Corten-Dolan se exprimă prin relația:

$$N_f = \frac{N_1}{a_1 + a_2 \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^d + a_3 \left(\frac{S_3}{S_1} \right)^d + \dots + a_n \left(\frac{S_n}{S_1} \right)^d}$$

în care :

- N_f este durabilitatea piesei la solicitarea dată, exprimată în număr de cicluri;
- N_i reprezintă durabilitatea piesei la solicitarea S_i ;
- S_1 este solicitarea maximă care apare în blocul respectiv;
- a_1, a_2, \dots, a_n sunt rapoartele $a_i = \frac{N_i}{N_j}$, ($j = 1 \dots n$);
- d este inversul pantei diagramei S-N modificate.

6.6. Modelul uniaxial

În cazul solicitării de oboseală se utilizează în mod obișnuit conceptul de încărcare ciclică pentru a evalua degradarea și a determina durata de viață prin oboseală. Ecuațiile ce se determină depind de încărcare prin intermediul amplitudinii ciclului, a valorii maxime sau medii, toate acestea determinate pentru un ciclu de solicitare.

Asadar, ecuația degradării prin oboseală ciclică poate fi de forma:

$$\delta D = f(v_i) \delta N$$

În care variabilele v_i din cadrul funcției f depind de:

- starea mărimilor ce caracterizează integritatea structurii (deteriorarea, temperatura, duritatea, etc.);
- valorile maxime și medii pe ciclu ale parametrilor care definesc încărcarea (tensiune, deformare plastică sau elastică).

O problemă particulară apare în cazul reprezentării influenței temperaturii atunci când aceasta variază în cursul aceluiaș ciclu de solicitare.

Pentru anumite materiale și anumite condiții de solicitare, ecuațiile pentru degradarea prin oboseală ciclică care iau în calcul numai acumularea liniară a acestora nu mai sunt potrivite. În aceste condiții trebuie luată în calcul o acumulare a degradărilor bazată pe un model neliniar.

Modelul uniaxial este derivat din definiția macroscopică a degradării cu referire la două tipuri de evaluare;

- (1)- evaluarea degradării în termenii duratei de viață rămasă;
- (2)- evaluarea degradării prin utilizarea conceptului de tensiune efectivă.

Vom examina mai întâi construcția modelului bazat pe durata de viață rămasă. Încercarea la oboseală la două niveluri ale tensiunii ($\Delta\sigma_1$ pe parcursul a N_1 cicluri de solicitare urmat de o solicitare de mărime $\Delta\sigma_2$ pe parcursul a N_2 cicluri de solicitare, cu $N_1+N_2=N_F$, N_F fiind numărul de cicluri de solicitare care duc la fisurarea totală pentru care $D=1$) demonstrează neliniaritatea acumulării degradării și furnizează informații importante în legătură cu starea curentă a degradării în vederea determinării duratei de viață rămasă, $\frac{N_2}{N_F}$.

Acești parametri sunt suficienți pentru a demonstra o evoluție a curbelor care descriu degradarea în funcție de raportul N/N_F . Din figura 9 se constată faptul că, durata de viață rămasă la nivelul al doilea de solicitare este diferită de valoarea $(1-N_1/N_{F1})$, valoare care ar reieși dacă s-ar aplica teoria liniară a acumulării deteriorărilor.

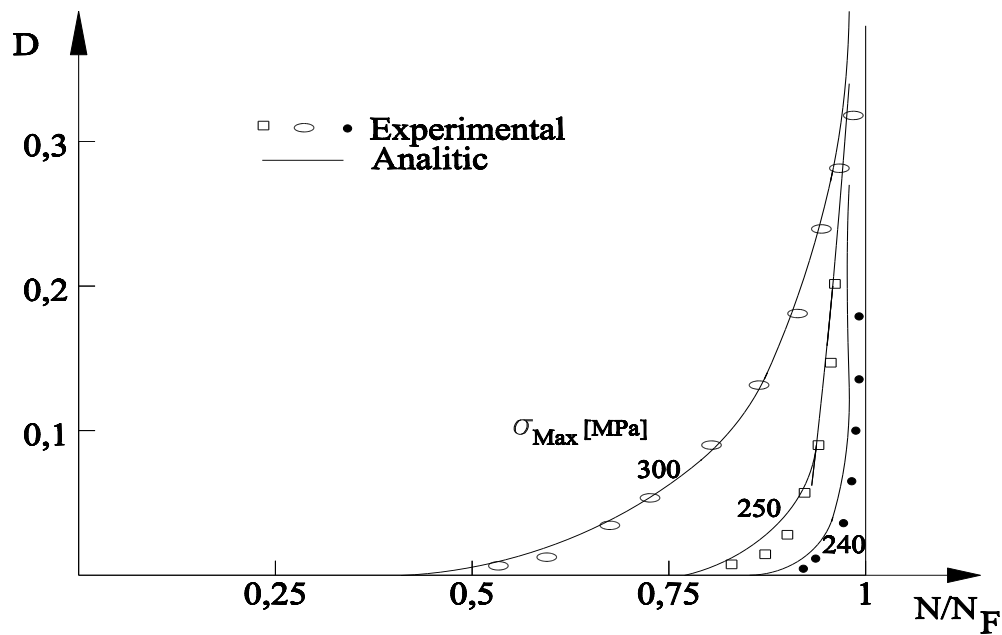


Fig. 9

Un procedeu simplu de a introduce efectele descrise într-o relație care să poată reprezenta degradarea, constă în a pune în interdependență variabile ce reprezintă degradarea și încărcarea. De exemplu, se poate scrie o relație cu forma generală:

$$\delta D = D^{\alpha(\sigma_{\text{Max}}, \bar{\sigma})} \cdot \left(\frac{\sigma_{\text{Max}} - \bar{\sigma}}{C(\bar{\sigma})} \right) \cdot \delta N$$

Exponentul α depinde de încărcare (σ_{Max} , $\bar{\sigma}$) de aici rezultând legătura enunțată anterior. Se face observația că, o relație similară cu aceasta, utilizată pentru propagarea fisurilor (măsură de altfel a degradării), nu este potrivită din cauza efectului cumulativ invers: la oboseală, durata de viață la nivelul 2 de solicitare, atunci când prima solicitare are loc la un nivel ridicat, este mai scurtă decât cea prezisă de modelul liniar. Integrând relația anterioară între limitele $D=0$ și $D=1$, se obține următoarea relație care dă numărul de cicluri până la degradarea totală ($D=1$):

$$N_F = \frac{1}{1 - \alpha(\sigma_{\text{Max}}, \bar{\sigma})} \left(\frac{\sigma_{\text{Max}} - \bar{\sigma}}{C(\bar{\sigma})} \right)^{-\beta}$$

Degradarea D evoluează în funcție de raportul N/N_F iar durata de viață de la nivelul 2 de solicitare este dată de raportul:

$$\frac{N_2}{N_{F2}} = 1 - \left(\frac{N_1}{N_{F1}} \right)^\eta \quad \text{în care} \quad \eta = \frac{1 - \alpha_2}{1 - \alpha_1} = \frac{1 - \alpha(\sigma_{\text{Max}2}, \bar{\sigma}_2)}{1 - \alpha(\sigma_{\text{Max}1}, \bar{\sigma}_1)}$$

Această formulare permite o descriere calitativă a celor mai multe rezultate ale încercărilor efectuate la diferite niveluri de solicitare pentru un număr mare de materiale. Evaluarea degradării D în termenii duratei de viață rămase este, uneori, insuficientă pentru a determina valoarea degradării în orice moment. Dacă avem în vedere figura 10, se constată că durata de viață poate avea aceeași valoare la solicitări diferite, nu același lucru putându-se spune despre degradare. Ca urmare, utilizarea conceptului duratei de viață rămase permite doar o evaluare relativă a degradării.

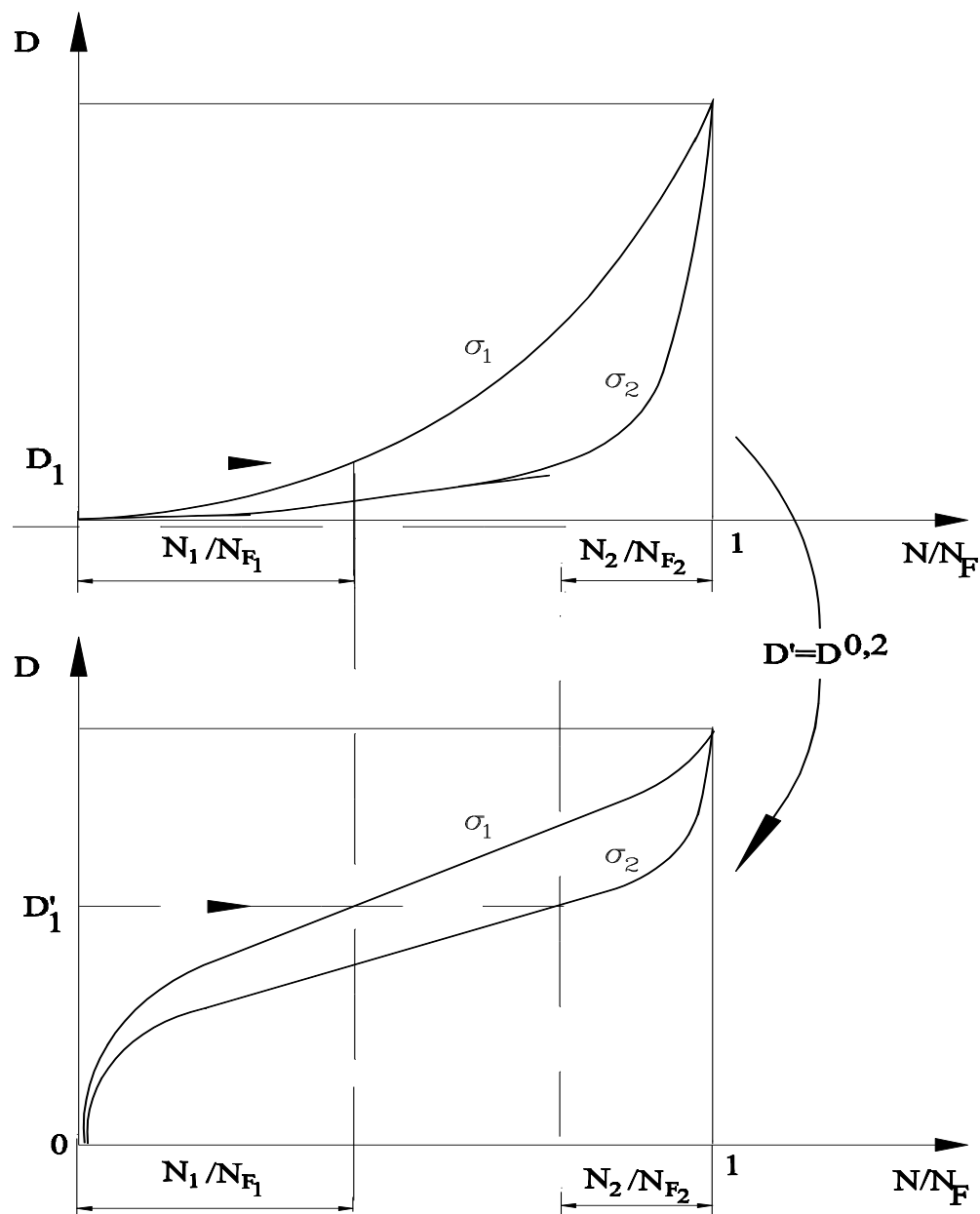


Fig. 10

În aceste condiții, se poate utiliza un alt concept în vederea evaluării degradării. Utilizând conceptul care utilizează tensiunea efectiv aplicată pentru a produce oboseala, se poate măsura degradarea în mod real numai în ultima parte a duratei de viață, atunci când inițierea defectelor microscopice s-a produs deja. Pentru a combina această evaluare cu una corespunzătoare duratei de viață rămase, este suficient de a face o schimbare de variabilă, înlocuind D în ecuația anterioară cu expresia: $1 - (-D)^{\beta+1}$. În aceste condiții, relația diferențială care poate fi scrisă este de forma:

$$\delta D = \left[-(-D)^{\beta+1} \right]^{\alpha} \left[\frac{\sigma_{\text{Max}} - \bar{\sigma}}{M(\bar{\sigma})(1-D)} \right]^{\beta} \delta N$$

Această formă a relației care conduce la determinarea degradării este mai complexă dar proprietățile ei sunt identice cu cele ale ecuației anterioare, exceptând valoarea curentă a

degradării. Numărul de cicluri până la rupere se obține prin integrarea relației anterioare. Astfel, vom avea:

$$N_F \frac{1}{(\beta + 1) \left[1 - \alpha(\sigma_{Max}, \bar{\sigma}) \right]} \left(\frac{\sigma_{Max} - \bar{\sigma}}{M(\bar{\sigma})} \right)^{-\beta}$$

în care $M(\bar{\sigma}) = C(\bar{\sigma}) \left(\frac{1}{\beta + 1} \right)^{\frac{1}{\beta}}$. Degradarea exprimată în funcție de raportul N/N_F este:

$$D = 1 - \left[1 - \left(\frac{N}{N_F} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \right]^{\frac{1}{\beta+1}}$$

Curbele din figura 13 arată că această expresie conduce la valori apropiate de cele experimentale. Funcțiile α și m se vor alege astfel încât să reprezinte, în același timp, limita la oboseală în cazul fisurării statice (în cadrul unui ciclu de solicitare) și efectele acumulării neliniare:

- $\alpha(\sigma_{Max}, \bar{\sigma}) = 1 - a \left\langle \frac{\sigma_{Max} - \sigma_1(\bar{\sigma})}{\sigma_u - \sigma_{Max}} \right\rangle$
- $\sigma_1(\bar{\sigma}) = \sigma_{10} + (1 - b\sigma_{10})\bar{\sigma}$
- $M(\bar{\sigma}) = M_0(1 - b\bar{\sigma})$

în care σ_{10} reprezintă limita la oboseală în cazul solicitării alternant – simetrice iar σ_u (tensiunea ultimă) este rezistența la tracțiune (solicitare statică).

Pentru a exprima influența tensiunii medii $\bar{\sigma}$, se poate alege o relație liniară, justificată fiind această opțiune și de rezultatele experimentale asupra limitei la oboseală.

Coeficientul a poate fi determinat numai din măsurătorile degradării (figura 13), alegerea mărimii pentru a fi importantă doar atunci când distrugerea prin oboseală este combinată cu un alt tip de degradare (prin propagarea și ramificarea fisurilor, de exemplu). La solicitarea de oboseală pură, toate încărcările pot fi descrise de constanta arbitrară a .

6.7. INFLUENȚA TENSIUNILOR REMANENTE ASUPRA COMPORTARII LA OBOSEALA

Pentru îmbunătățirea rezistenței la oboseală trebuie ca la suprafața corpului solicitat să avem tensiuni remanente de compresiune. Tensiunile remanente mai sunt numite și tensiuni de auto-echilibru pentru că, într-o anumită zonă a materialului, acestea se află în echilibru, fără influența vreunei sarcini exterioare. Tensiunile remanente rămân în material și după ultima operațiune ce se efectuează în vederea obținerii unei anumite componente sau structuri.

În figura 11 se prezintă diagrama solicitare-numărul de cicluri (S-N) pentru un oțel aliat cu Ni-Cr supus încovoierei rotative în trei condiții diferite: fără concentrator de tensiune, cu concentrator și cu ecruisare în zona concentratorului. Coeficientul de concentrare al tensiunilor a fost $k=1,76$. Se constată faptul că, prin ecruisare în zona concentratorului se obține aproximativ aceeași rezistență la oboseală ca și în cazul epruvetei netede.

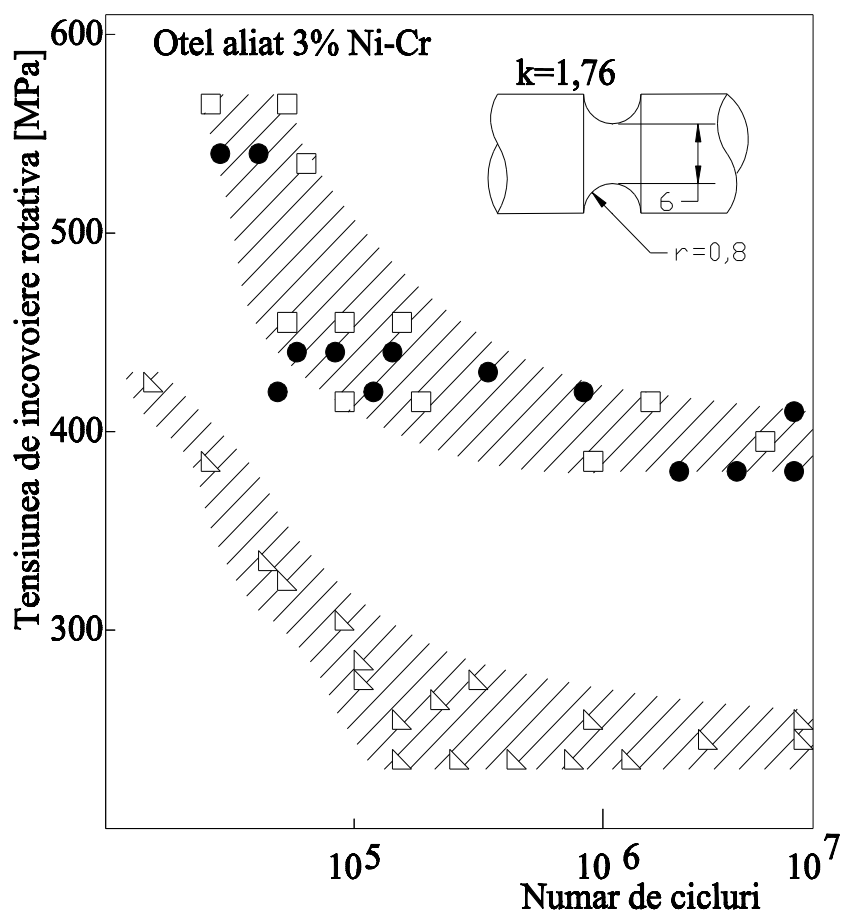


Fig. 11.

Astfel, concentratorul devine inofensiv, în ceea ce privește rezistența la fisurare, datorită tensiunilor remanente de compresiune create în zona concentratorului prin ecrisare.

În tabelul 1 se prezintă efectul tensiunilor remanente, introduse prin depășirea limitei elastice la tracțiune, asupra rezistenței la oboseală, în oțelul 4340. Datele din acest tabel sunt pentru rezistența la oboseală după o solicitare de încovoiere rotativă a probelor rotunde cu concentrator în V.

Tab. 1.

Rezistența la tracțiune, [MPa]	900			1700		
k_t	1	2,15	3,2	1	2,15	3,2
Rezistența la oboseală, fără pretensionare,[MPa]	400	205	160	630	240	190
k_f	1	1,95	2,5	1	2,6	3,3
Rezistența la oboseală, cu pretensionare,[MPa]	390	390	370	635	620	610
k_f	1,03	1,03	1,08	0,99	1,02	1,03

Pentru probele netede ($k=1$) rezistența la oboseală a fost de 400 MPa pentru oțelul cu tensiunea de rupere de 900 MPa și de 630 MPa pentru oțelul cu tensiunea de rupere de 1700 MPa. Se constată faptul că, atunci când se introduc tensiuni remanente de compresie printr-o pretensionare în domeniul plastic, rezistența la oboseală crește. Se observă faptul că, se obține o creștere semnificativă tocmai pentru epruvetele care conțin un concentrator de tensiune mai sever. Ca urmare, tensiunile remanente, favorabil introduse, ajută în special acele componente care prezintă concentratori de tensiune severi. Tensiunile remanente elimină aproape complet efectul concentratorului. Este interesant de remarcat faptul că, probele cu concentrator sever și cu tensiuni remanente obținute prin pretensionare plastică rezistă mai bine la oboseală decât probele cu un concentrator rotunjit dar care nu au beneficiat de aportul tensiunilor remanente. Dacă tensiunile remanente de compresie au un efect atât de benefic asupra rezistenței la oboseală, ne putem imagina ce efect nefavorabil vor avea tensiunile remanente de tracțiune. Evident că, tensiunile remanente de tracțiune nu pot fi întotdeauna evitate. Importantă este cunoașterea mărimii acestora și a efectului pe care îl au asupra rezistenței la oboseală.

Pentru introducerea de tensiuni remanente favorabile rezistenței la oboseală se pot folosi de exemplu, metode mecanice. În figura 12 se prezintă un astfel de exemplu.

Bara este încărcată până în domeniul plastic, figura 12a, cu un moment M_0 care induce tensiuni remanente. Mărimea acestora depinde de mărimea momentului de solicitare, de geometria probei și rezistența intrinsecă a acesteia. În figura 12a fibrele superioare sunt supuse la compresie iar cele inferioare la tracțiune. La inversarea solicitării se obține distribuția tensiunilor în domeniul elastic din figura 12b. Sumarea distribuțiilor obținute prin solicitarea în domeniul plastic (fig. 12a) și a celor obținute prin inversarea solicitării în domeniul elastic (fig. 12b) conduce la tensiunile remanente din figura 16c care se stabilesc după încetarea solicitării.

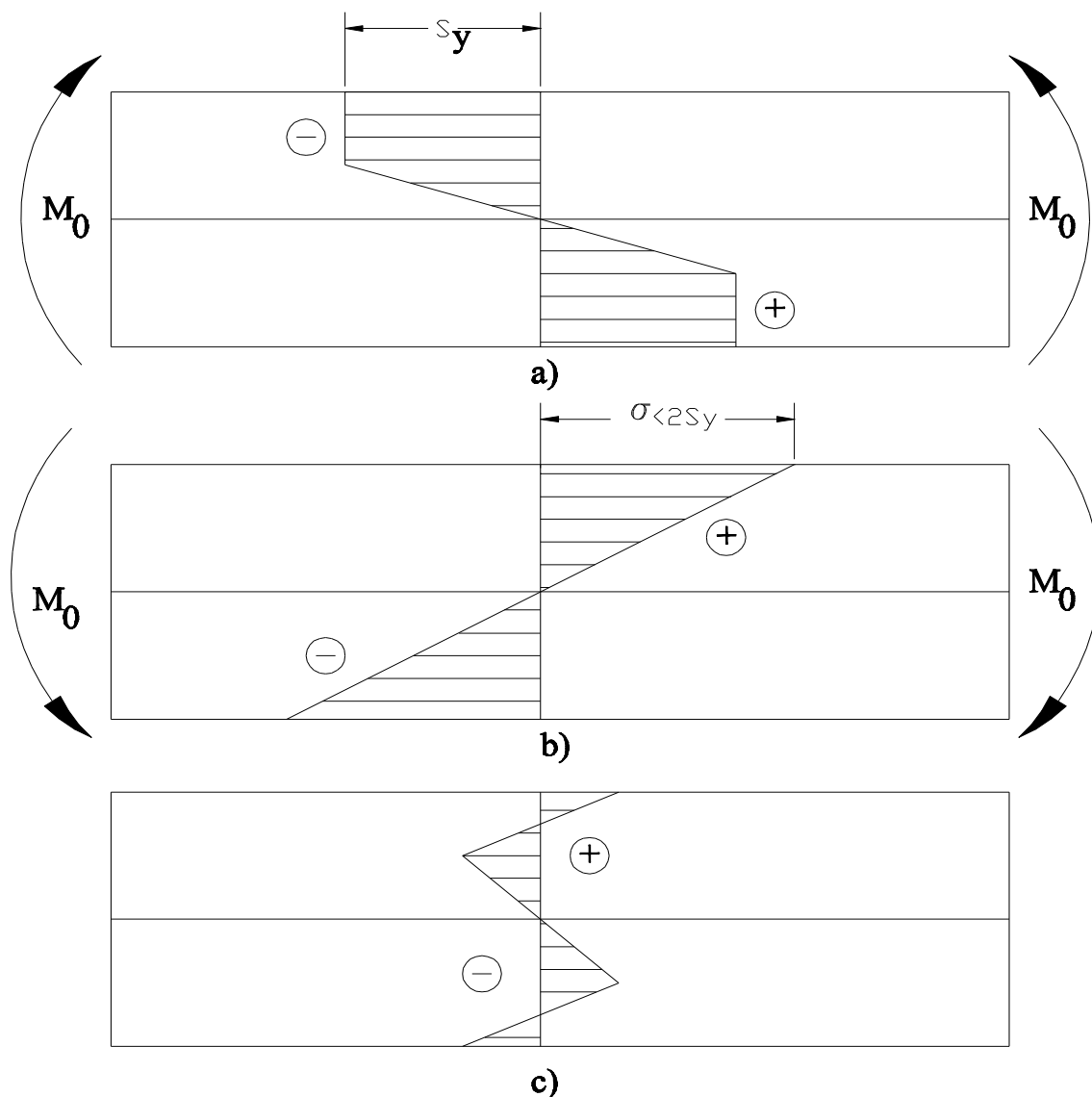


Fig. 12

Procesele de fabricare utilizate în formarea produselor induc o mare varietate de microstructuri, finisări ale suprafețelor, tensiuni remanente, etc. Multe din aceste procedee de fabricare implică procese termice și termomecanice cum ar fi: turnarea, forjarea, extrudarea, etc. Tensiunile remanente rezultate ca urmare a acestor procese pot fi benefice sau nu în cazul când produsele rezultate vor lucra la oboseală. În figura 13 se prezintă variația limitei la oboseală în raport cu tensiunile remanente, pentru câteva oțeluri cu concentrator sever de tensiune, în formă de V cu unghiul de 60° și raza la vârf de 0,64 mm. Valoarea concentratorului de tensiune este $k_t=3,6$. Dreapta din figura 13 arată egalitatea dintre limita la oboseală și tensiunile remanente introduse. Curba din figura 13 este trasată experimental. Se constată că limita la oboseală se apropie ca valoare de tensiunile remanente. Această observație arată importanța tensiunilor remanente de compresiune, mai ales la piesele cu concentrator, atunci când aceste tensiuni au o orientare favorabilă.

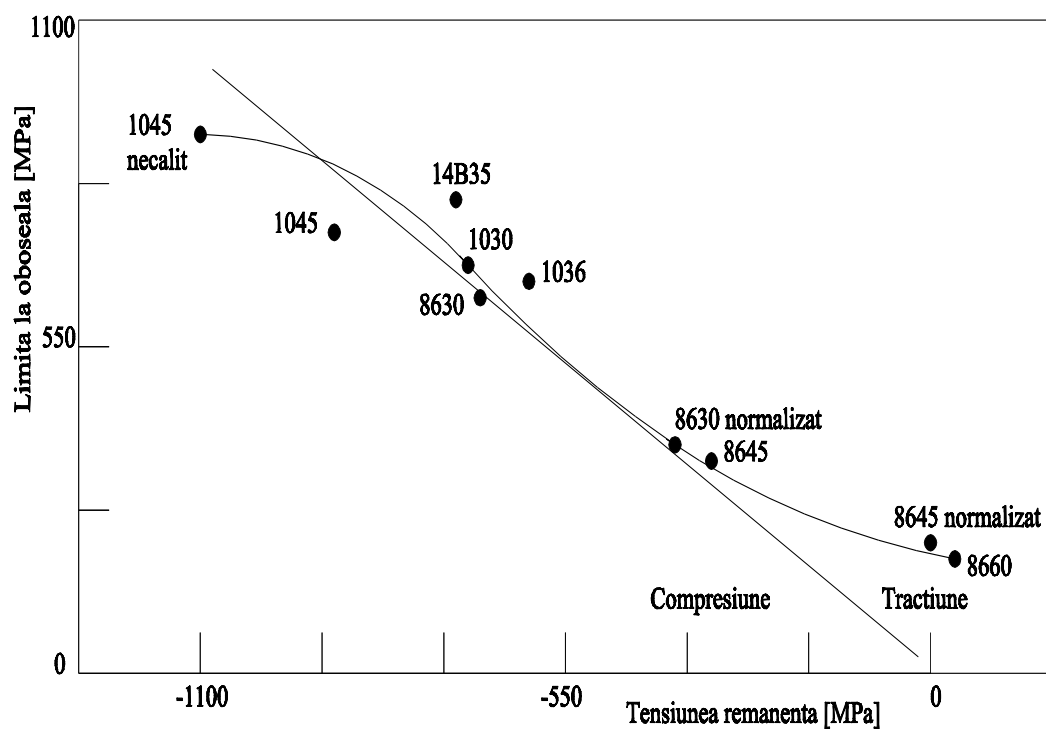


Fig. 13

S-a constatat experimental că tensiunile remanente au o mai mare influență asupra componentelor care prezintă durabilitate ridicată la oboseală. La piesele care prezintă o rezistență scăzută la oboseală ciclică poate apărea relaxarea tensiunilor remanente.