

CAPITOLUL 10

RUPEREA LA SOLICITARI VARIABLE

10.1. Introducere

10.2. Oboseala materialelor în cadrul durabilităților mari

10.3. Factori care influențează rezistența la oboseală

10.4. Fenomenul de degradare mecanică

10.5. Oboseala materialelor în domeniul durabilităților mici (oboseala oligociclică)

10.1 Introducere

Componentele și echipamentele specifice ingineriei mecanice, supuse la solicitări variabile, se pot rupe chiar dacă tensiunea maximă aplicată este inferioară limitei de elasticitate a materialului. Solicitarea ciclică ce produce deformări plastice materialului poate cauza schimbări continue în material atunci când se atinge o anumită stabilitate ciclică. Unele materiale pot fi mai mult sau mai puțin rezistente la solicitare ciclică producându-se o întărire sau o înmuiere a acestora. Pe parcursul solicitării ciclice se pot acumula deteriorări microscopice locale ce vor conduce la *dezvoltarea unor fisuri* sau a altor defecte macroscopice. Acest proces de acumulare a deteriorărilor, care va conduce în final la rupere ca efect al solicitărilor date de sarcinile ciclice, *poartă numele de oboseală* [86].

Unele materiale pot fi stabile la oboseală, în timp ce la alte materiale se produce o degradare continuă. Pentru a înțelege răspunsul unui material la solicitarea de oboseală trebuie să avem în vedere deformările plastice, dislocațiile și posibilitatea mișcării acestora în timpul solicitării. Oboseala este un fenomen puternic localizat, ce depinde de tensiunile și deformările din regiunile critice ale componentelor din structură. Actualmente se cunoaște faptul că, fenomenul de oboseală se datorează deformărilor plastice ciclice, care produc modificări ireversibile în substructura dislocațiilor de material. Procesul de rupere prin oboseală poate fi împărțit în mai multe etape:

1. Întărirea și înmuierea ciclică a materialului, în funcție de condițiile inițiale și de amplitudinea tensiunilor și deformărilor specifice. Aceasta poate afecta întregul volum al materialului;
2. Nucleația microfisurilor în straturile de sub-suprafața piesei, datorită concentrărilor de tensiune precum și microintruziunilor și microextruziunilor;
3. Propagarea microfisurilor ce au aceleași dimensiuni cu cele ale grăunților materialului;
4. Propagarea macrofisurilor cu dimensiuni mai mari decât ale grăunților conducând în cele din urmă la rupere.

În prezent, studiul fenomenului de oboseală se face sub trei aspecte.

Primul aspect este cel dezvoltat de Wöhler și are la bază studiul tensiunilor. Această cale are în vedere analiza tensiunilor nominale care se produc în secțiunea componentei studiate ce trebuie să reziste solicitărilor ciclice. Aceste tensiuni se determină pe baza unei analize clasice corectându-se apoi pe baze empirice care iau în considerație efectele date de concentratorii de tensiuni.

Un alt aspect sub care se face studiul fenomenului de oboseală pornește de la analiza deformațiilor care poate pune mai bine în evidență curgerile locale ce se produc în zonele cu concentratori de tensiuni.

Cel de-al *treilea aspect* sub care se studiază fenomenul de oboseală are în vedere **propagarea fisurilor**, problemă ce poate fi rezolvată pe baza *conceptelor Mecanicii ruperii*.

10.2. Oboseala materialelor 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.

Oboseala la durabilități mari se consideră că intervine la peste 10^5 cicluri de solicitare iar fisura 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 atât pe baza deformației specifice cât și pe baza tensiunilor.

Curba de durabilitate la oboseală

Principală 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 începând 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 σ_{\max} -N, coordonatele unui punct, *figura 10.1a*. Pentru un anumit material, 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 se stabilește 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 10.1b*, 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:

$$\sigma_a = \alpha N^\beta \quad (10.1)$$

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.

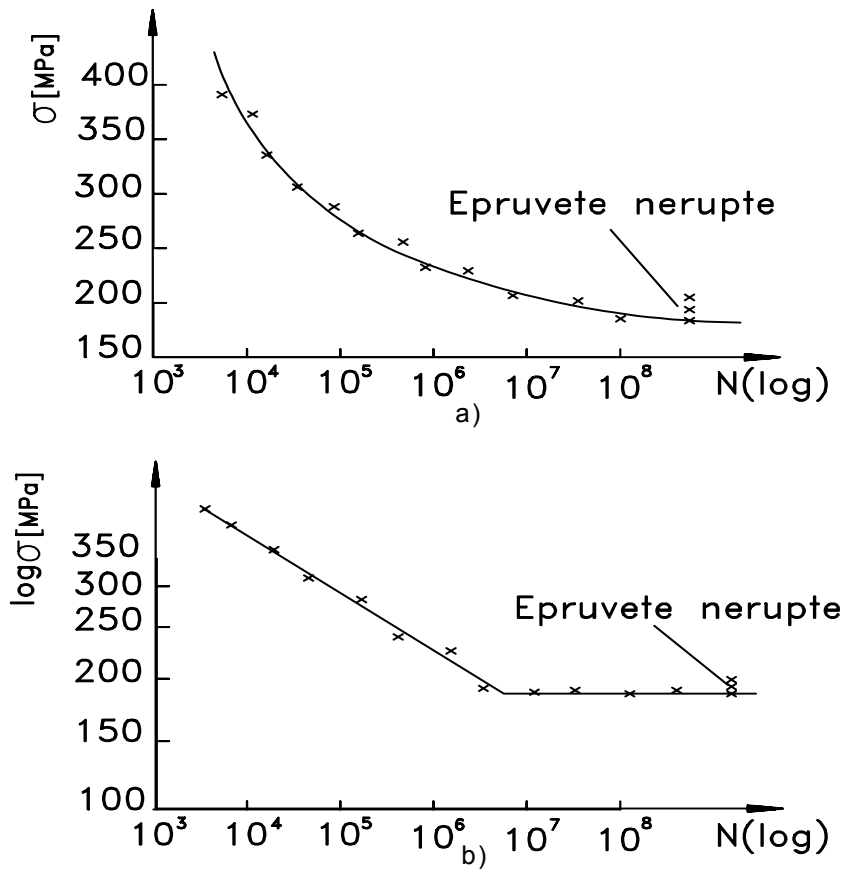


Fig.10.1. Curba de durabilitate

Fenomenul de oboseală este deosebit de complex și ca urmare el nu poate fi explicat numai pe baza rezultatelor obținute în urma încercărilor statice și dinamice de tip clasic. De exemplu, rezultate interesante se obțin din studiul ciclului tensiune-deformație, care pune în evidență fenomenul de histerezis și care permite separarea celor două componente, elastică și plastică, ale deformației totale, *figura 10.2*.

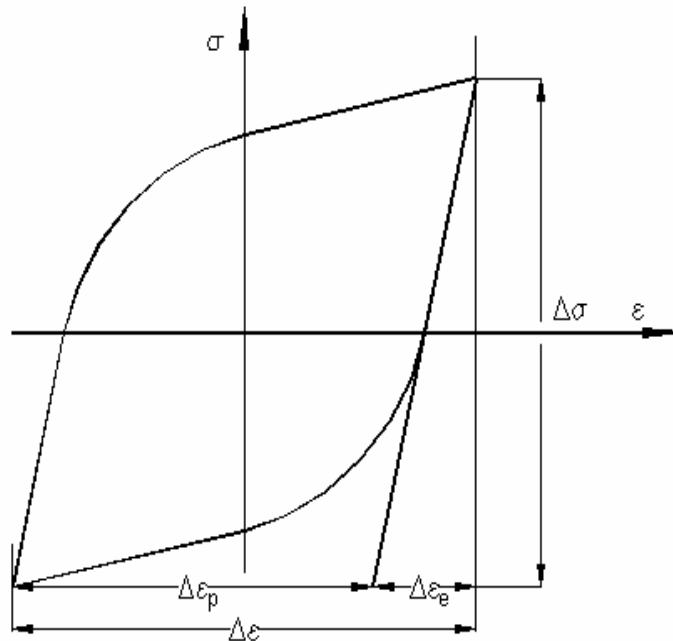


Fig. 10.2. Ciclul tensiune-deformație

Pe această bază, în *figura 10.3* sunt prezentate curbele de durabilitate în coordonate ε - $2N_f$, atât pentru amplitudinea deformațiilor totale cât și pentru cele două componente – elastică și plastică – ale acesteia. Se observă că, pentru deformația elastică și pentru cea plastică, curbele de durabilitate se intersectează la o durată de viață N_t , numită durată de viață de tranziție. La această valoare a lui N componenta elastică a deformației totale este egală cu cea plastică.

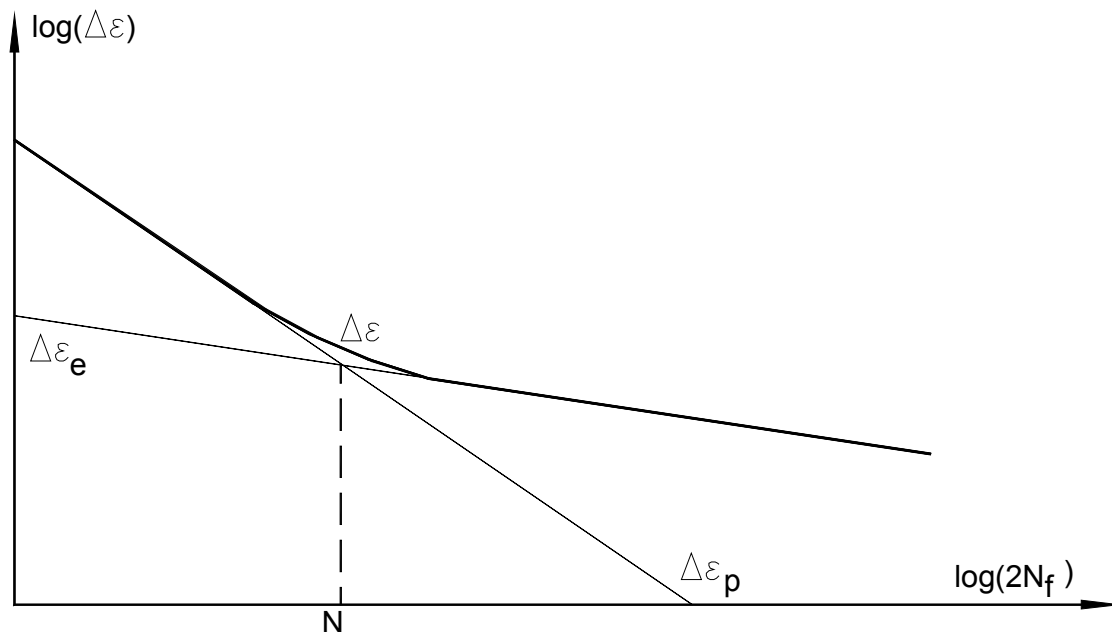


Fig. 10.3. Curbele de durabilitate în coordonate ε - $2N_f$

Această observație a sugerat ideea împărțirii curbei durabilității în două domenii cu ajutorul duratei de viață de tranziție N_t . Domeniul corespunzător valorilor pentru care $N > N_t$ reprezintă domeniul durabilităților mari, iar domeniul pentru care $N < N_t$ poartă denumirea de domeniul durabilităților mici. Durata de viață de tranziție N_t este funcție de natura materialului. Ea are valori cuprinse între 10^3 și 10^5 cicluri pentru materialele de înaltă rezistență și de 10^6 cicluri pentru materialele cu rezistență redusă. Domeniul durabilităților mari presupune existența unor tensiuni de valori mici, astfel încât efectele curgerilor locale să fie neînsemnate. În acest caz fenomenul de oboseală poate fi studiat numai pe baza tensiunilor. În domeniul durabilităților mici tensiunile aplicate sunt mari, astfel încât efectul curgerilor locale poate fi neglijat. În acest caz studiul fenomenului de oboseală se face pe baza analizei deformațiilor.

10.3. Factori care influențează rezistența la oboseală

Estimarea duratei de viață a structurilor trebuie legată de abilitatea acestora de a-și menține funcțiunile pentru care au fost proiectate, pe baza criteriilor stabilite pe epruvetele încercate în laborator. Astfel, se poate afirma că performanțele la oboseală ale unor structuri depind de:

- proprietățile materialului care îi asigură o bună comportare la solicitările statice și ciclice;
- particularitățile constructive ale componentelor structurii (existența și severitatea concentratorilor de tensiune);
- factori de solicitare cum ar fi: valoarea tensiunii medii, existența tensiunilor remanente, existența suprasolicitării de scurtă durată;

- condiții de exploatare (agresivitatea mediului de lucru, temperatura acestuia, frecvența ciclului de solicitare);
- tehnologia de fabricație a componentelor structurii (modul de obținere a semifabricatelor, calitatea suprafeței și tratamentele de suprafață utilizate).

10.3.1. Studiul influenței neomogenităților de material a texturii și microfisurilor asupra acumulării oboselii

10.3.1.1. Etapele și locația fisurării de oboseală

Cele mai multe metale au o *structură policristalină* cu cristale și grăunți așezați ordonat. Fiecare grăunte are proprietăți mecanice particulare, o anumită direcție de aranjare atomică și proprietăți direcționale. Anumiți grăunți sunt astfel orientați încât este favorizată o mișcare a dislocațiilor pe direcția tensiunii tangențiale maxime. Gradul de alunecare sau deformare ciclică este relativă la structura cristalografică a metalului și este dat, în special, de ductilitatea acestuia. În metalele care au o comportare preponderent fragilă, dislocațiile sunt practic imobile iar alunecarea este limitată.

Procesului de degradare la solicitări variabile îi sunt caracteristice, în general, trei etape distincte, *figura 10.4*, în care se manifestă mecanisme diferite.

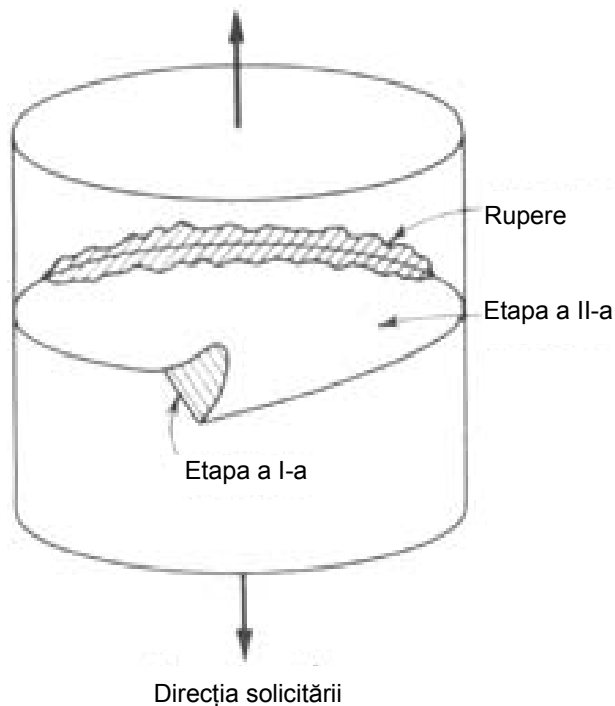


Fig. 10.4. Etapele și locația fisurării de oboseală sub acțiunea solicitării axiale

Aceste etape sunt:

1. *Inițierea fisurii*, care se referă la incipiența acesteia în jurul unor defecte de material sau pe baza unor mecanisme care au loc la nivelul rețelei cristaline până când microfisura capătă dimensiuni care permit detectarea prin procedeele de *control nedistructiv*. Ca urmare, acestei etape îi este caracteristică inițierea microfisurilor și extinderea acestora până la nivelul de macrofisuri. O serie de cercetări experimentale au evidențiat faptul că această etapă este extrem de importantă, extinderea ei reprezentând până la 90% din durata de viață a unei piese;

2. *Propagarea fisurilor* de oboseală. În cursul acestei etape macrofisura se extinde cu o viteză mai mare sau mai mică în funcție de material și de intensitatea sarcinii aplicate. Apariția unor metode moderne de măsurare-detectare cum ar fi: microscopia electronică, tehnica curenților turbionari, măsurătorile pe baza diferenței de potențial, emisiile acustice, etc., au permis elaborarea unor studii aproape complete asupra acestei etape.

3. *Ruperea finală* se produce atunci când lungimea fisurii atinge o valoare la care apare instabilitatea în propagarea acesteia.

Examinând suprafața ruptă se poate determina dacă materialul a cedat sau nu prin oboseală. Ruperea prin oboseală prezintă două regiuni distincte: una este netedă sau lustruită ca urmare a frecării flancurilor fisurii și este caracteristică etapelor I și II, iar cealaltă este de tip granular datorită cedării rapide a materialului și este caracteristică celei de-a treia etape. Aceste regiuni ale unei suprafețe care a cedat prin oboseală se pot vedea în *figura 10.5*.

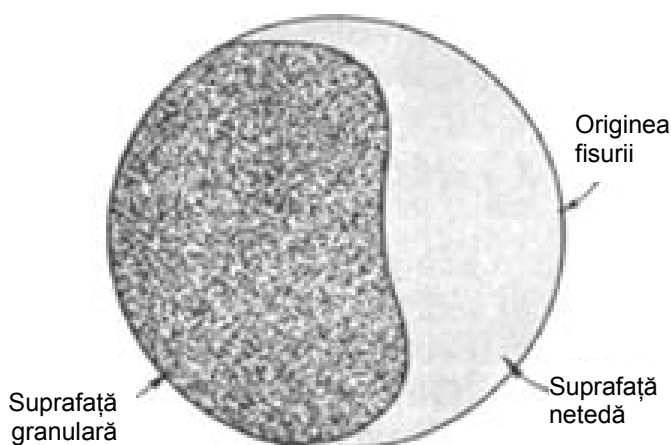


Fig. 10.5. Suprafață rezultată în urma cedării prin oboseală
Suprafața granulară indică ruperea fragilă iar suprafața netedă indică propagarea fisurii

Anumite suprafețe care au cedat prin oboseală prezintă așa-numitele striții, *figura 10.6a*. Acestea apar la materialele în care alternează perioadele de solicitare cu cele de repaus și în care variază intensitatea solicitării. Distanța dintre striții depinde atât de perioada de timp în serviciu cât și de amplitudinea solicitării.

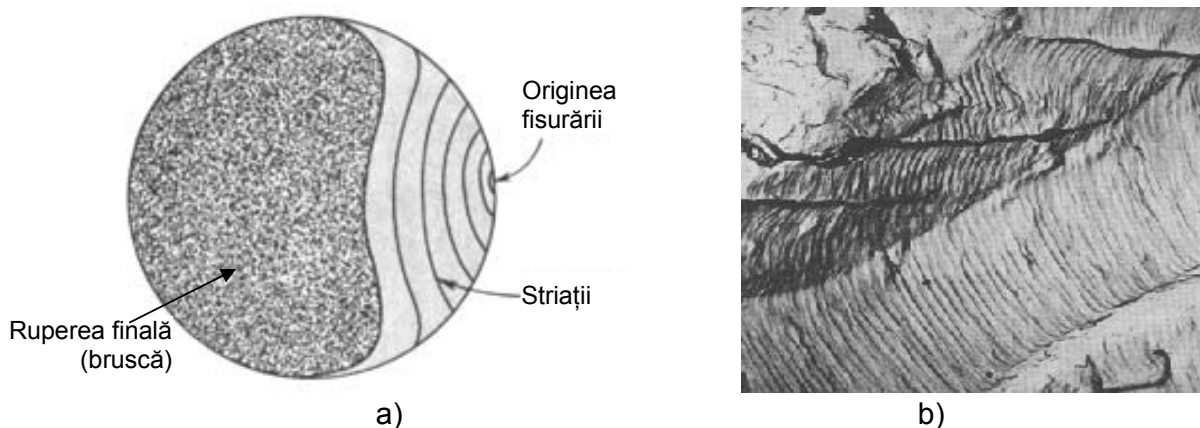


Fig.10.6

- a) Striții pe regiunea de propagare asociate cu variația în amplitudine și timp a solicitării
b) Exemplu de striții găsite pe suprafața fisurată

10.3.1.2. Inițierea fisurii de oboseală

Chiar dacă tensiunile nominale sunt mult mai mici decât limita de elasticitate a materialului, local, datorită efectului de concentrare a tensiunilor din jurul unor defecte, tensiunile pot depăși limita de curgere. În asemenea zone apar deformații plastice în volume limitate de material unde se inițiază fisurile de oboseală. În *figura 10.7* sunt ilustrate diferite moduri de inițiere a fisurii și etapele de propagare după inițiere. Aceste fisuri vor conduce în ultimă instanță la cedarea materialului, dacă nu sunt detectate din timp și eventual reparate, și se poate ajunge la rupere sau la scoaterea din funcțiune a piesei. Fisurile pot fi inițiate ca urmare a multiplelor cauze, trei dintre acestea, care se pot observa în *figura 10.7*, fiind: *nucleerea (inițierea)* datorită planelor de alunecare pe direcții preferențiale, *crestături la suprafață* sau *defecte interioare*.

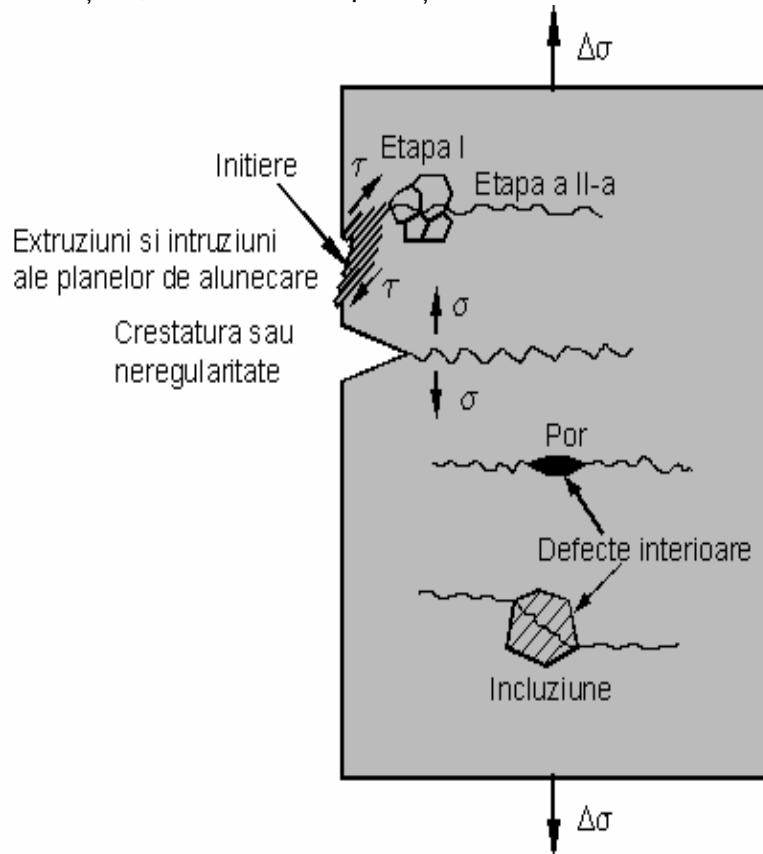


Fig.10.7. Posibilități de nucleere și propagare a fisurilor

10.3.1.3. Microstructura și propagarea fisurilor de oboseală

Fisurile de oboseală care se inițiază la nivelul benzilor de alunecare locale tind să se dezvolte pe direcția tensiunii tangențiale maxime. Această propagare este destul de mică, în mod obișnuit de ordinul câtorva grăunți. Propagarea microfisurilor este puternic influențată de caracteristicile de alunecare ale materialului, de mărimea grăunților materialului și de mărimea zonei deformate plastic din apropierea vârfului fisurii. Când mărimea fisurii sau zona deformată plastic de la vârful fisurii sunt de ordinul a 10 diametre de grăunți, propagarea fisurii de oboseală are loc predominant prin forfecare. Această comportare la fisurare se referă în mod obișnuit la propagarea fisurilor. Ca urmare, lungimea fizică cu care se propagă fisura datorită tensiunii

tangențiale poate diferi de la un material la altul depinzând de mărimea grăunților. În *figura 10.8a* se prezintă o microfisură formată în lungul planului de alunecare și care se propagă în interiorul a câtorva grăunți adiacenți. Se constată faptul că microfisura nu se propagă într-un anumit plan ci își schimbă direcția atunci când trece în grăunții vecini. Totuși, din punct de vedere macroscopic, se poate considera că fisura se propagă pe direcția tensiunii tangențiale maxime. În *figura 10.8b* se prezintă aceeași fisură după mai multe cicluri de solicitare la oboseală. În vecinătatea vârfului microfisurii primare se pot vedea linii de alunecare suplimentare (în regiunea din cerc). Aceste linii nu există în *figura 10.8a*.

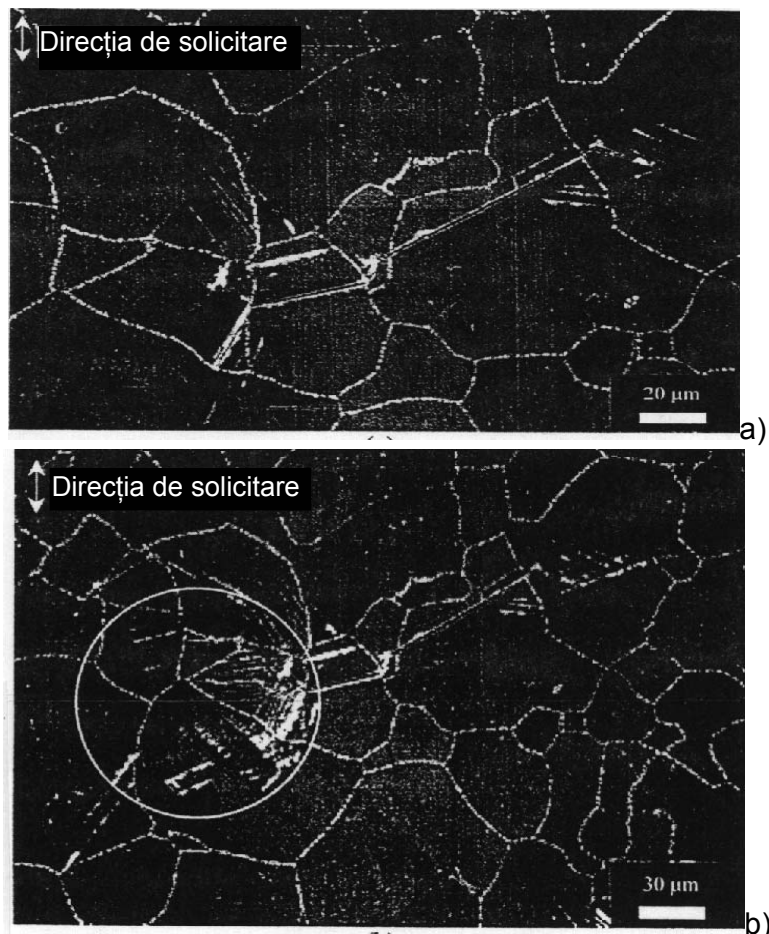


Fig.10.8. Microfisură formată în lungul planelor de alunecare

Nu toate fisurile se inițiază în lungul benzilor de alunecare deși, în cele mai multe cazuri, benzile de alunecare sunt cel puțin indirect responsabile pentru microfisurile formate în metale. În condițiile solicitării la oboseală, fisurile se pot iniția în apropierea *discontinuităților de material* sau uneori în imediata vecinătate a *suprafeței materialului*. Discontinuități înseamnă: **incluziuni, particule de fază secundară și benzi de alunecare**. Deși fisurile se pot iniția de la nivelul acestor discontinuități, altele decât benzile de alunecare, acestea din urmă sunt influențate de granițele discontinuităților conducând la o localizare puternică a deformațiilor plastice care se transformă în cele din urmă în microfisuri. Microfisurile în metalele înalt rezistente sau cu comportare fragilă, sunt adesea formate direct din *incluziuni sau goluri* care se dezvoltă perpendicular pe planul tensiunii normale maxime. În *figura 10.9* sunt prezentate câteva mecanisme de fisurare. Fisurile se inițiază adesea la *limitele grăunților*, fie la temperaturi ridicate fie atunci când avem amplitudini mari ale deformațiilor. În *figura*

10.9a se prezintă o fisură inițiată la limitele dintre grăunți. Această fisură s-a inițiat atunci când s-a menținut proba o anumită perioadă de timp la tensiunea maximă de solicitare. La temperaturi moderate, *precipitatele* „întăresc” limitele dintre grăunți. La temperaturi ridicate aceste precipitate pot slăbi rezistența *limitelor între grăunți* iar atunci când se introduce o perioadă de menținere la solicitare constantă poate apărea *fenomenul de fluaj*, în timp ce limitele fisurează (cavitează sau alunecă) producându-se propagarea fisurii intergranulare. Impuritățile aflate la limitele dintre grăunți pot crea o anumită fragilizare în metale conducând la inițierea fisurii și propagarea acesteia la nivelul limitelor dintre grăunți.

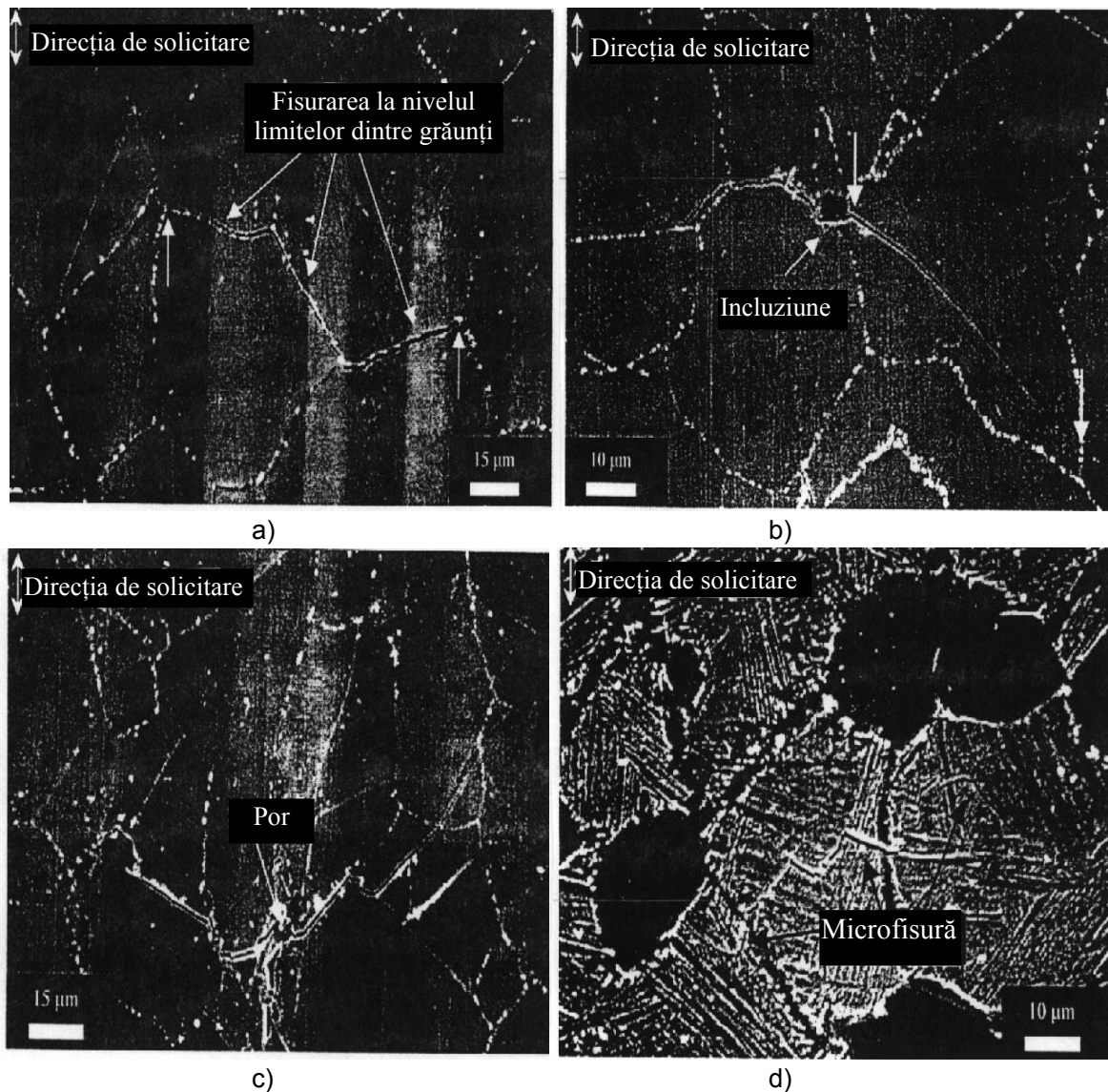


Fig. 10.9. Mecanisme de fisurare

Fisurile pot fi inițiate de asemenea, de la nivelul *incluziunilor, porilor sau altor neregularități microstructurale*. În *figura 10.9b* se prezintă o fisură inițiată la nivelul unei *incluziuni de suprafață*. Fisura din partea dreaptă a fost influențată de deformarea plastică localizată la nivelul grăuntelui și propagată pe direcția tensiunii tangențiale maxime. Fisura trece și prin incluziune, aceasta și cu fisura din partea stângă fiind orientate perpendicular pe direcția tensiunii normale maxime. Fisurarea incluziunii se produce la un nivel energetic scăzut. În *figura 10.9c* se prezintă o fisură inițiată de la un

por aflat la suprafața probei. Fisura se propagă simetric de la nivelul porului. Pe ambele direcții fisura se dezvoltă după tensiunea tangențială maximă. În *figura 10.10* se prezintă o microfisură inițiată între două faze ale unui aliaj. Aici apare o delaminare sau fisurare interfacială între fazele α și β .

Microfisurile pot fi prezente în metale înainte de solicitarea ciclică. Odată cu solicitarea la oboseală microfisurile tind să se dezvolte (coalescență) și se propagă perpendicular pe planul tensiunii normale maxime. Cele două etape de propagare a fisurii sunt în modul „forfecare” – etapa I și în modul „tracțiune” – etapa a II-a. Propagarea fisurii de oboseală este prezentată schematic în *figura 10.10*.

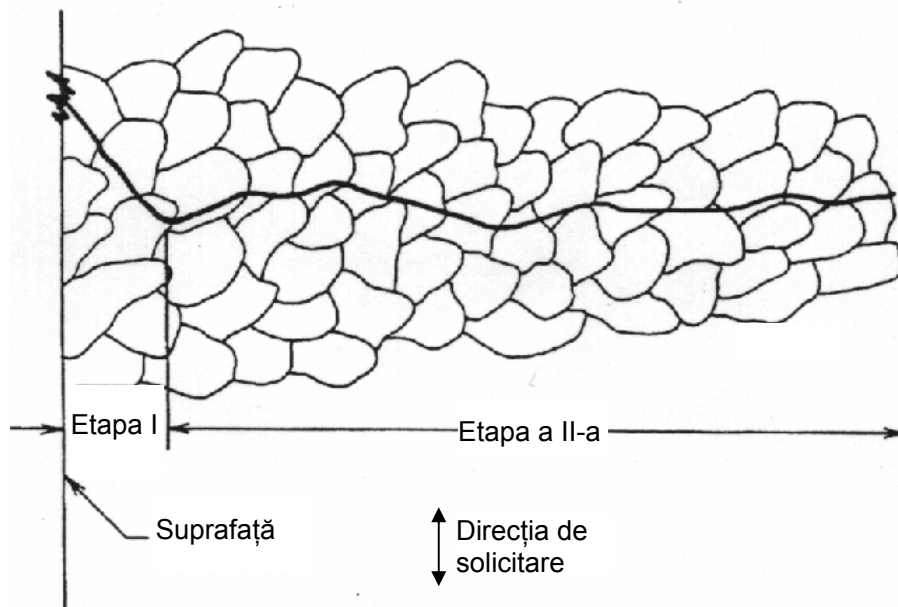


Fig. 10.10. Etapele propagării fisurii de oboseală

Se constată faptul că, fisura de oboseală se inițiază la suprafață și se dezvoltă transversal pe grăunți. Inițial fisura se dezvoltă în planul tensiunii tangențiale maxime, ca urmare a deplasării benzilor de alunecare. Dezvoltarea în continuare a fisurii are loc perpendicular pe direcția solicitării. Cele mai multe fisuri traversează limitele grăunților, *figura 10.11* – fisuri transcristaline.

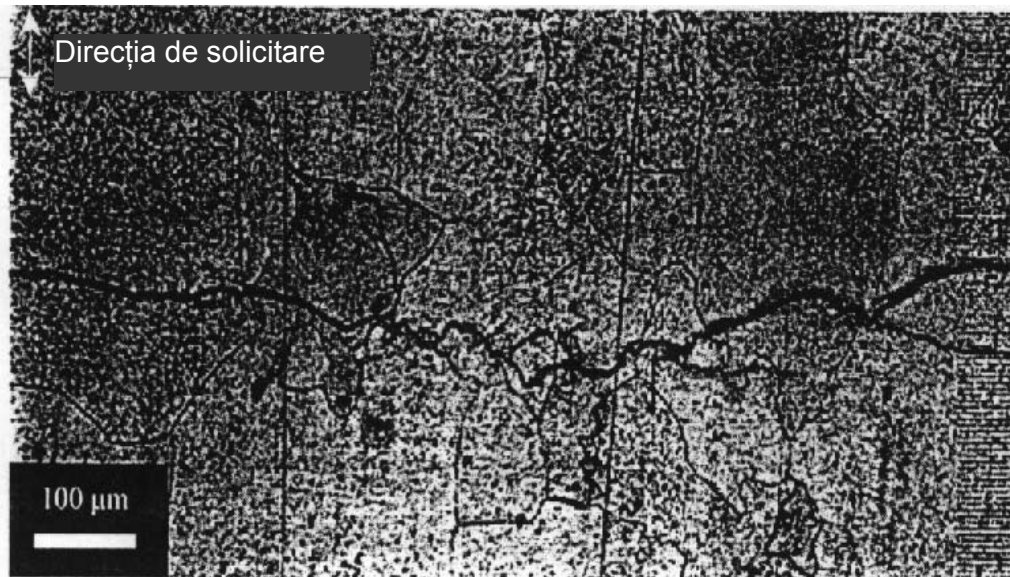


Fig. 10.11. Fisură transcristalină

Dezvoltarea microfisurilor prin limitele grăunților (intercristalină) depinde de material, încărcare, condițiile de mediu, etc. În *figura 10.12* sunt prezentate trei din cele mai cunoscute moduri de fisurare la oboseală: a) formarea striatiilor, b) coalescența microgolurilor și c) microclivajul. Materialele care prezintă o comportare ductilă afișează adesea *striatiile* apreciabile și de asemenea o *coalescență a microgolurilor*. Undele din *figura 10.9a* sunt denumite striatii de oboseală. Aceste striatii nu se pot observa macroscopic din cauza frecării suprafețelor în timpul solicitării. Striațiile nu apar de obicei în materialele înalt rezistente. Unele studii presupun că fiecare striatie se datorește unui singur ciclu de solicitare și că acestea reprezintă o rotunjire a vârfului fisurii în timpul perioadei de încărcare-descărcare pentru un ciclu de oboseală.

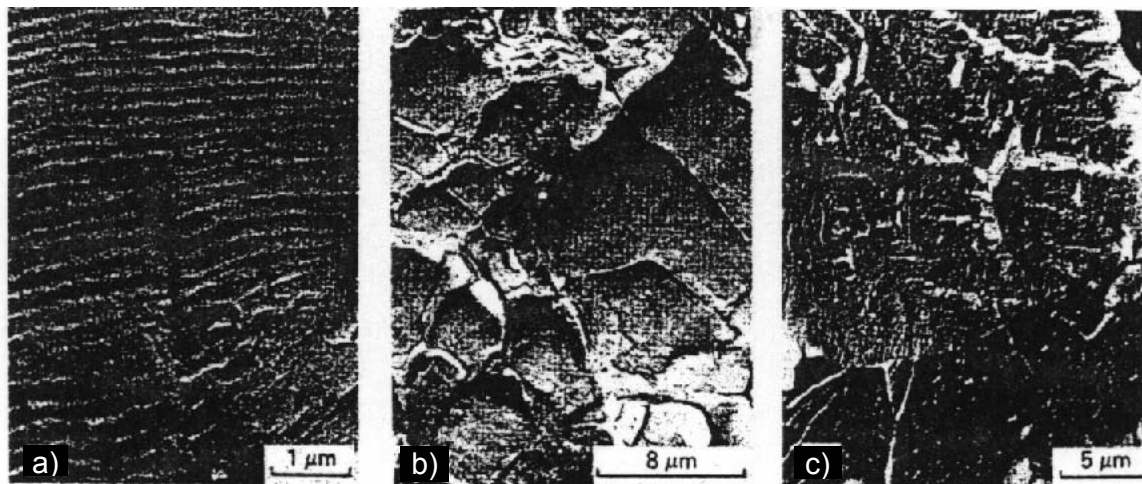


Fig. 10.12. Moduri de fisurare la oboseală

Coalescența microgolurilor are loc prin nucleerea acestora în timpul deformării plastice zonale. Coalescența microgolurilor este prezentată în *figura 10.12b*. Formarea acestor goluri, care evoluează în „cratere” de dimensiuni mai mari, produc fisurarea interfacială. Astfel, mărimea și densitatea populației de „cratere” este relativă la distribuția incluziunilor sau a precipitatelor inerente din metale. Procesul coalescenței microgolurilor este considerat, în general, ca fiind unul cu consum energetic mare iar oboseala conduce în acest caz la viteze mari de propagare a fisurii. Suprafața fisurată ca urmare a coalescenței microgolurilor este în mod obișnuit neregulată și rugoasă punându-se în evidență fibrele materialului. Propagarea fisurii prin microclivaj este considerată un proces cu consum redus de energie. Probabil că acesta este mecanismul de fisurare pentru incluziunile fragile din *figura 10.12b*. *Clivajul sau microclivajul* implică fisurarea în lungul planelor cristalografice precise și este transcristalină. Suprafețele rupte prin clivaj sunt în general drepte, *figura 10.12c*. Fisurarea prin clivaj apare mai degrabă în metalele cu structură cubică cu volum centrat sau hexagonală decât în cele cu structură cubică cu fețe centrate. Suprafața fisurată în urma clivajului este strălucitoare datorită reflectivității fețelor clivate. Clivajul are loc, în special, în materiale cu comportament preponderent fragil. Curgerea plastică împiedică formarea planelor de clivaj. Coalescența microgolurilor și clivajul sunt mecanisme de fisurare care pot apărea și la solicitarea statică și la cea de oboseală. Striațiile nu apar în condițiile solicitării exclusiv statice. Etapele specifice procesului de rupere prin oboseală sunt prezentate în *figura 10.13* [311]. În general, alunecarea apare prima, urmată de apariția fisurilor fine care pot fi observate numai cu ajutorul microscopiei electronice. Fisurile continuă să se dezvolte sub acțiunea solicitării ciclice și pot deveni

vizibile cu ochiul liber. Fisurile tind să se combine până când se reduc la câteva macrofisuri majore. Aceste fisuri (sau fisură) ating mărimea critică iar ruperea se poate produce brusc. Dacă tensiunile au mărime mare se poate grăbi apariția tuturor acestor procese. Fisurile pot fi stopate dacă întâlnesc un câmp de tensiuni remanente de compresiune. De asemeni, fisurile se pot dezvolta spre defectele cu severitate mare întâlnite în drumul lor. În general, oboseala constă în inițierea fisurilor, propagarea acestora și în final cedarea materialului. La nivele mari ale tensiunilor, o bună perioadă din durata de viață totală este asociată cu microfisurarea și propagarea macrofisurilor. La nivele mici ale tensiunilor o mare parte din durata de viață totală este consumată cu inițierea și propagarea microfisurilor.

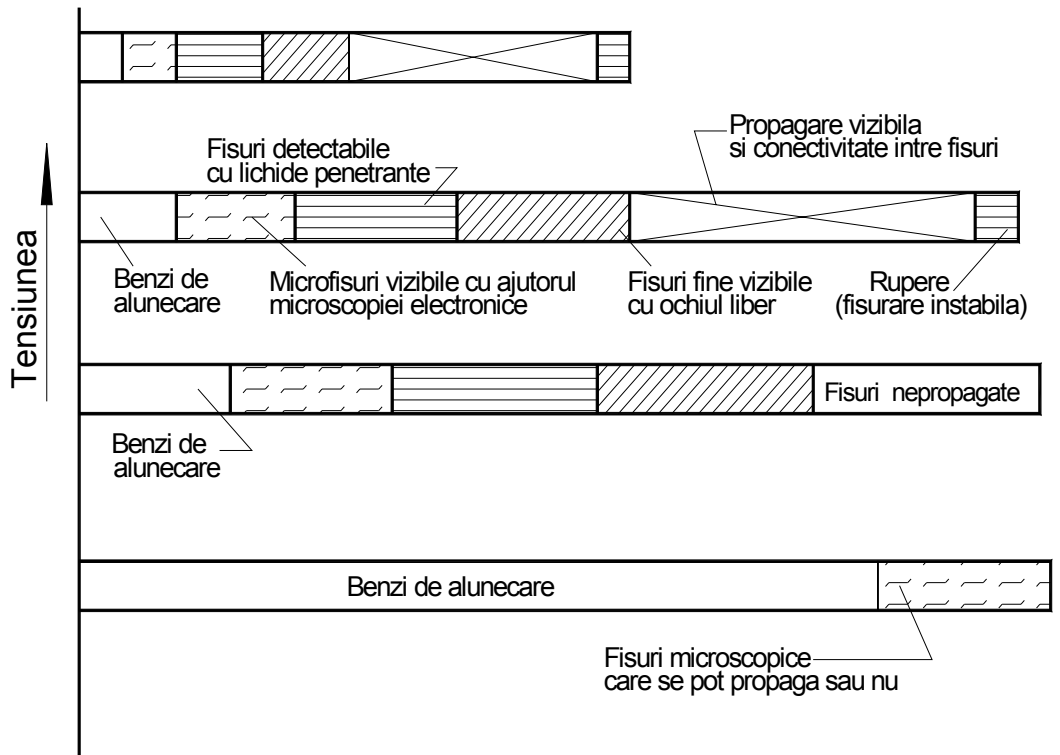


Fig. 10.13. Reprezentarea schematică a procesului de oboseală

Fizicienii sunt interesați de nivelul atomic al problemei, ca urmare de formarea și propagarea fisurii. Metalurgiștii presupun că fisura deja există în material ca urmare a proceselor tehnologice de fabricare. Inginerul proiectant ia în considerare fisura doar atunci când aceasta poate fi detectată cu anumite metode. Astfel, sfârșitul etapei de inițiere se consideră de diferitele discipline în mod arbitrar. Pentru a elimina această dificultate, inginerii trebuie să gândească în termenii inițierii fisurii urmată de propagarea acesteia spre nivelul de macrofisură și transformarea într-o rupere instabilă. Singura etapă care poate fi absentă în ruperea la oboseală este cea a inițierii – nucleației fisurii. Astfel, cedarea la oboseală poate fi prevenită prin inhibarea inițierii și propagării fisurilor. Din perspectiva proiectării, condițiile care favorizează o bună rezistență la inițierea și propagarea fisurilor de oboseală pot conduce la o rezistență scăzută la propagarea macrofisurilor și invers. De exemplu, grăunții fini tind să ofere o bună rezistență la inițierea și propagarea microfisurilor. Limitele dintre grăunți tind să stopeze sau să deflece fisura reducând astfel viteza de propagare a acesteia. Materialele cu grăunți grosolani tind să producă o fisură prin clivaj cu aspect neregulat.

10.3.2. Efectele factorilor de solicitare

10.3.2.1. Influența tensiunii medii

Majoritatea rezultatelor experimentale existente în literatura de specialitate au fost determinate pentru cicluri simetrice ($R=-1$). Pentru o tensiune medie σ_m diferită de zero se produce o translație a curbei de durabilitate pe direcția axei de solicitare.

De cele mai multe ori, efectul tensiunii medii produs asupra comportării la oboseală se pune în evidență trasând diagrame de tip Wöhler în coordonate S_a-N , (S_a fiind amplitudinea solicitării) pentru diferite valori ale solicitării medii S_m , luate ca parametru. Din studiul acestor diagrame rezultă faptul că, tensiunile medii pozitive micșorează durata de viață a probelor în timp ce tensiunile medii negative o prelungesc.

În mod frecvent, în activitatea de proiectare se utilizează diagrame de tip Haigh, care stabilesc corelația dintre parametrii S_a și S_m ai solicitării pentru care se obține o durată de viață constantă. Acest tip de diagrame se pot obține pe baza diagramelor de durabilitate S_a-N_f , determinate experimental pentru diferite valori S_m luate ca parametru.

Un alt procedeu utilizat pentru punerea în evidență a efectului tensiunilor medii este descris în cele ce urmează. Se aleg diferite valori ale coeficientului de asimetrie R . Pentru fiecare dintre acestea se determină rezistența la oboseală la diferite valori date ale duratei de viață. Pe baza rezultatelor astfel obținute se trasează o familie de curbe în coordonate S_a-S_m sau $S_{max}-S_{min}$ considerând durata de viață ca parametru. Din examinarea acestor curbe se poate concluziona că, R are același efect asupra curbelor $S-N$ ca și cel dat de tensiunea medie. Ca urmare, la o valoare constantă pentru coeficientul de asimetrie R al ciclului, curbele $S-N$ furnizează aceleași informații ca și cele obținute pentru $S_m=\text{constant}$. Diagramele trasate pentru o durată de viață constantă pot fi prezentate fie în coordonate S_a-S_m fie în coordonate $S_{max}-S_{min}$. Cele două tipuri de diagrame sunt identice, dacă se rotesc cu 45° , obținându-se diagrama din figura 10.14.

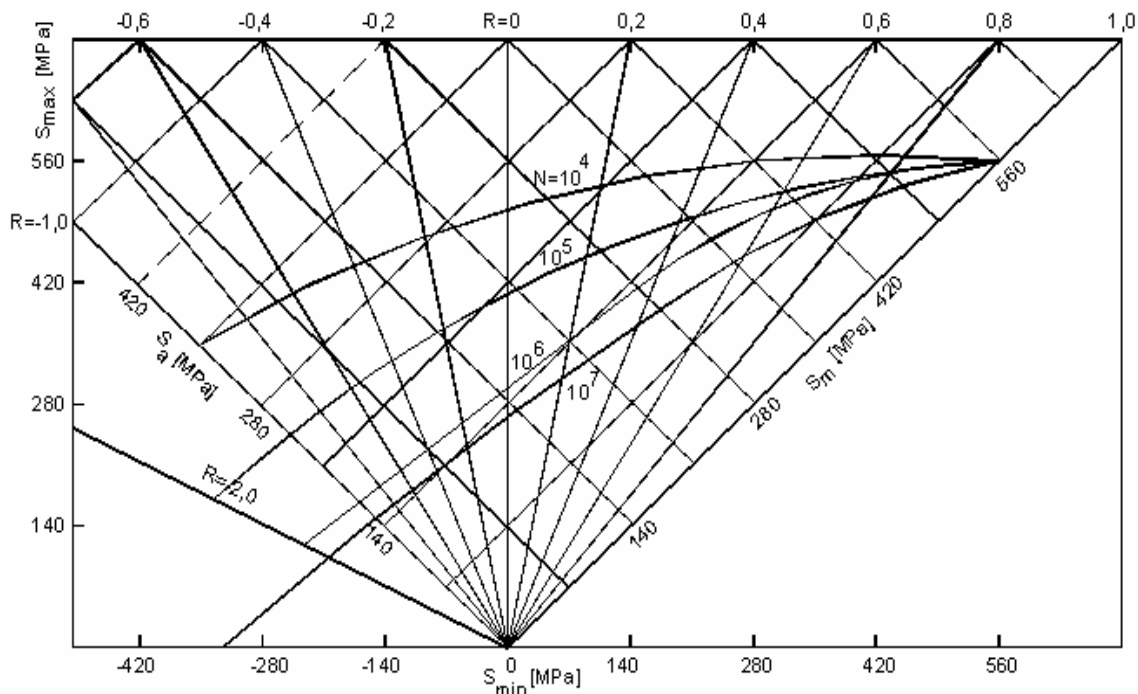


Fig. 10.14. Diagramele în coordonate S_a-S_m și $S_{max}-S_{min}$

Din aceste diagrame se poate obține prin interpolare durata de viață pornind fie de la perechea de valori (S_a, S_m) fie de la perechea de valori (S_{\max}, S_{\min}) . Se observă că, în cele două sisteme de coordonate condiția $R=\text{const.}$ reprezintă o dreaptă ce trece prin origine. Această dreaptă reprezintă locul geometric al ciclurilor asemenea dar având durată de viață diferită.

O diagramă reprezentativă pentru epruvetele fără concentrator este diagrama de tip Haigh din *figura 10.15*. Ea se obține comparând două cicluri de oboseală ce conduc la aceeași durată de viață, unul având un coeficient de asimetrie R , celălalt fiind simetric ($R=-1$). Amplitudinile tensiunilor pentru cele două cicluri au fost notate cu S_a respectiv S_{as} , iar solicitarea medie (tensiunea medie) a ciclului nesimetric cu S_m .

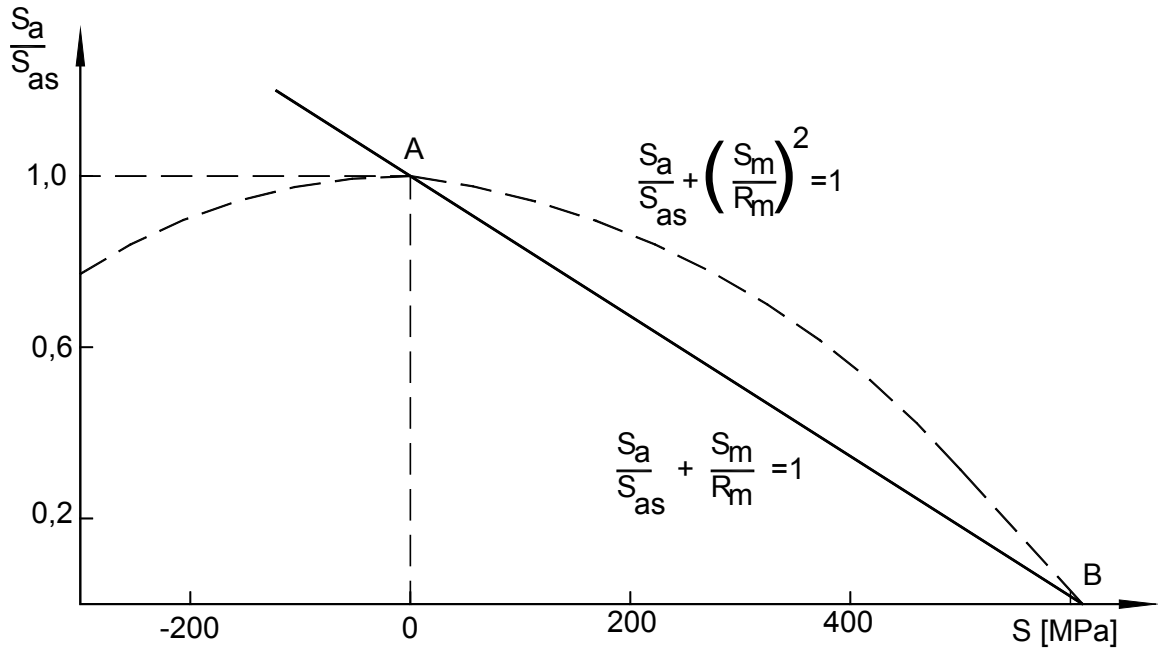


Fig. 10.15. Diagrama Haigh

Indiferent de forma funcției $S_a/S_{as}=f(S_m)$, graficul acesteia trece prin două puncte: $A(S_m=0, S_a/S_{as}=1)$ ce corespunde ciclului simetric și $B(S_m=R_m, S_a/S_{as}=0)$ ce corespunde ruperii statice. Graficul funcției amintite poate fi schematizat prin linia dreaptă AB de ecuație:

$$\frac{S_a}{S_{as}} + \frac{S_m}{R_m} = 1 \quad (10.2)$$

Această schematizare pare justificată pentru materiale ductile dar conduce la estimări eronate ale duratei de viață datorită gradului de supra-securitate pe care îl introduce. Pentru ciclurile ce au tensiunea medie negativă, linia AB poate fi continuată dar, de cele mai multe ori, se consideră că tensiunile medii negative nu aduc beneficii în calculul la oboseală și, ca atare, linia AB se continuă de regulă cu o orizontală de ordonată 1.

Au fost propuse și ecuații mai complicate decât dependențele liniare date de *ecuația (10.2)*. Una dintre acestea este ecuația parabolică de tipul:

$$\frac{S_a}{S_{as}} + \left(\frac{S_m}{R_m} \right)^2 = 1, \quad S_m \geq 0 \quad (10.3)$$

Reprezentarea liniară a diagramei ciclurilor limită a fost propusă de Goodman iar cea parabolică de Gerber.

Ecuțiile cu ajutorul cărora sunt descrise diagramele de forma $S_a=f(S_m)$ sunt folosite pentru estimarea nivelului valorilor S_a pentru toate curbele de durabilitate S-N deci și pentru cele care corespund unor valori ale tensiunii medii pentru care nu există date experimentale. De exemplu, dacă pentru o componentă a unei structuri este necesară determinarea duratei de viață ținând seama de tensiunea medie, și nu se cunoaște decât curba de durabilitate S-N determinată pentru ciclul simetric, atunci se rezolvă *ecuația (10.2)* în raport cu S_{as} și apoi se determină durata de viață din diagrama existentă. În acest fel, orice pereche de valori (S_a, S_m) conduce la aceeași durată de viață ca și S_{as} corespunzătoare acestora, determinată de ecuația respectivă.

10.3.2.2. Efectul suprasolicitărilor de scurtă durată

Uneori, în timpul funcționării, în piese apar solicitări variabile de scurtă durată având amplitudinea tensiunii mai mare decât limita la oboseală a materialului. Efectul suprasolicitării asupra rezistenței la oboseală a fost studiat experimental astfel: pentru o perioadă scurtă s-a încărcat o epruvetă cu o tensiune mai mare decât limita la oboseală. După descărcare epruveta a fost supusă la o solicitare ciclică având amplitudinea tensiunii egală cu limita la oboseală și s-a determinat numărul de cicluri N_0' la care aceasta s-a rupt.

Suprasolicitările pentru care rezultă $N_0' \geq N_0$ în care N_0 este durabilitatea neconvențională se numesc nepericuloase; acestea sunt prezentate grafic prin dreapta DB din *figura 10.16* în care linia frântă ABC reprezintă schematizarea curbei de durabilitate. Suprasolicitările pentru care rezultă $N_0' < N_0$ se numesc periculoase și sunt reprezentate prin punctele cuprinse între dreptele DB și AB. Punctele situate între dreptele DB și EB corespund unor suprasolicitări favorabile, deoarece, aplicate pieselor conduc la creșterea limitei la oboseală.

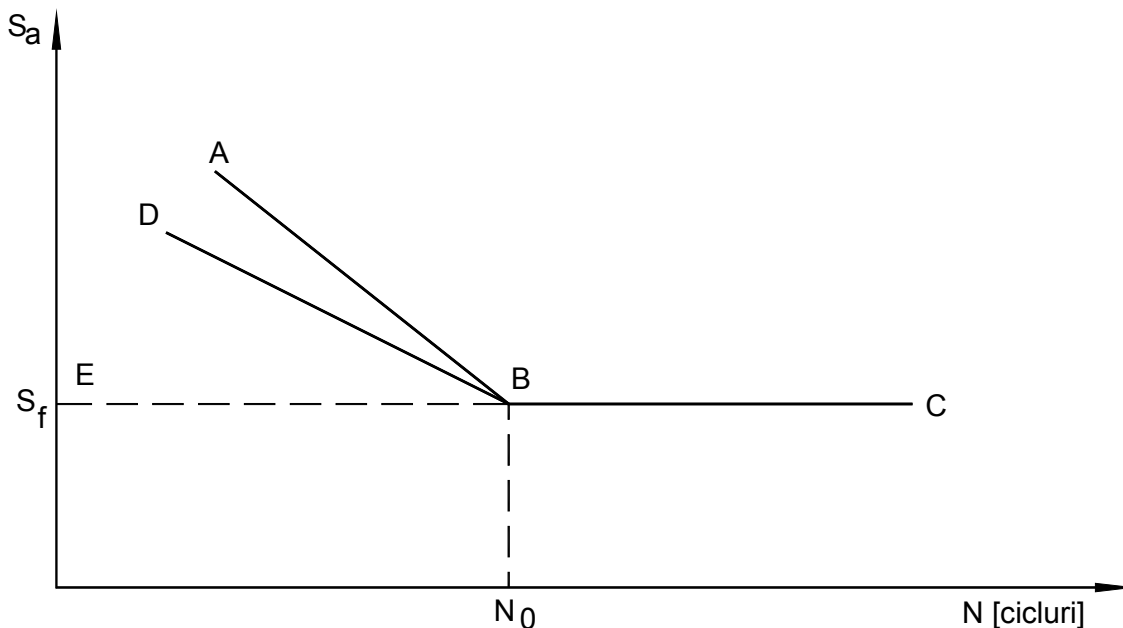


Fig. 10.16. Efectul suprasolicitării asupra rezistenței la oboseală

Un efect similar este produs de fenomenul de antrenare. S-a observat că, creșterea progresivă în trepte infime a amplitudinii solicitării de la valori inferioare limitei de oboseală la valori mult superioare acesteia poate conduce la creșterea

durabilității. Această operație necesită parcurgerea unui număr mare de cicluri de solicitare controlate cu precizie, de aceea metoda este greu de aplicat în mod practic. Ea servește însă ca bază teoretică pentru procedeele tehnologice de detensionare prin vibrație a structurilor realizate prin sudare.

10.3.2.3. Influența concentrării tensiunilor

Prezența concentratorilor de tensiune reduce rezistența structurilor, atât în regim static cât și în regim dinamic de solicitare. Pentru solicitarea statică, efectul de concentrare a tensiunilor elastice este luat în calcul cu ajutorul coeficientului de concentrare K_t definit de relația $K_t = \sigma_{\max} / \sigma_n$ ca fiind raportul dintre valoarea maximă a tensiunii și tensiunea nominală din secțiunea respectivă, obținute cu relațiile de calcul obișnuite din rezistența materialelor. Acest coeficient depinde de geometria concentratorului, de modul de solicitare și de felul în care a fost definită tensiunea nominală; el nu depinde de material și nici de valorile sarcinilor aplicate. Utilizarea coeficientului de concentrare statică nu este permisă dacă în zonă apar deformații plastice locale. O metodă utilizată pentru punerea în evidență a efectului concentrării tensiunilor asupra rezistenței la oboseală este următoarea: se trasează curba de durabilitate S_a -N pentru o epruvetă fără concentrator [148]. Se împart ordonatele curbei la coeficientul de concentrare K_t obținând astfel o curbă teoretică de durabilitate S_{ak} -N pentru epruveta cu concentrator, solicitată în aceleași condiții ca și epruveta netedă. Repetând operațiunea pentru mai multe valori ale lui K_t se constată că, pe măsură ce valoarea coeficientului K_t crește, curba teoretică de durabilitate coboară. Dacă pentru o valoare dată a coeficientului K_t se determină pe cale experimentală curba de durabilitate S_{ak} -N, se constată că aceasta este situată între curba teoretică și curba obținută pentru epruveta netedă. Rezultă că, un concentrator de tensiune reduce rezistența la oboseală într-o măsură mai mică decât estimarea făcută pe baza utilizării coeficientului teoretic de concentrare statică, K_t . Ca urmare, utilizarea acestui parametru în calculul de oboseală conduce la erori inacceptabile.

În domeniul durabilităților mari, diminuarea rezistenței la oboseală datorată efectului de concentrare a tensiunilor poate fi evaluată cu ajutorul factorului de reducere a rezistenței la oboseală K_f ; pentru acest parametru se mai utilizează în literatura de specialitate și denumirea de *factor de oboseală al concentratorului* sau *coeficient efectiv de concentrare la oboseală*. Pentru o durabilitate dată acest factor se definește ca fiind:

$$K_f = \frac{\sigma_a}{S_a} \quad (10.4)$$

în care σ_a corespunde epruvetei cu concentrator iar S_a – celei netede. De regulă, factorul K_f se definește și se determină pentru ciclul simetric. Se observă că structura relațiilor cu care au fost definiți coeficienții de concentrare K_f și K_t este aceeași din punct de vedere simbolic. Diferența constă în faptul că, coeficientul K_t este definit ca raportul a două tensiuni în timp ce factorul K_f reprezintă raportul a două rezistențe la oboseală determinate pentru aceeași durată de viață.

Dacă raza de racordare de la vârful concentratorului este mare, valorile factorului K_f se apropie mult de cele ale coeficientului K_t . La valori mici ale razei de racordare avem $K_f < K_t$. O cauză posibilă a acestui comportament poate fi curgerea inversă ce se produce la rădăcina concentratorului în timpul fiecărei încărcări ciclice; deformațiile plastice care apar astfel conduc la o valoare reală a amplitudinii tensiunii locale maxime mai mică decât $K_t \cdot S_a$, valoare dedusă presupunând o comportare elastică a

materialului. Aceste efecte apar la majoritatea metalelor de uz ingineresc, dacă tensiunile aplicate au valori ridicate adică în cazul duratelor de viață scurte. La metalele foarte ductile aceste efecte pot apărea și la durate mici de viață. Totuși, la majoritatea materialelor curgerile sunt mici sau lipsesc chiar și la durabilități de 10^6 sau 10^7 cicluri. O altă cauză ar putea fi aceea că materialul este mai puțin sensibil la vârfurile de tensiune decât la tensiunile care acționează în zone cu dimensiuni mici dar finite. De aici rezultă necesitatea ca studiul procesului de deteriorare produs prin oboseală să se facă luând în considerare un volum finit de material. Ca urmare, tensiunea ce determină inițierea deteriorării prin oboseală este tensiunea cea mai mare; ea are o valoare mai coborâtă și se produce la o anumită distanță de punctul cel mai solicitat.

Pentru a caracteriza intensitatea efectului de concentrare produs de un concentrator de tensiuni, se folosește uneori coeficientul de sensibilitate la oboseală al concentratorului, definit cu relația:

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (10.5)$$

Dacă $K_f = K_t$, coeficientul de sensibilitate la oboseală al concentratorului are valoarea $q=1$ iar concentratorul are efectul maxim posibil. Valoarea coeficientului q scade atunci când $K_f < K_t$. Pentru $K_f = 1$, se obține valoarea minimă $q=0$, caz în care concentratorul nu are efect. S-a stabilit că valoarea coeficientului de sensibilitate q depinde de material și că, pentru un material dat, acesta crește odată cu raza de racordare a concentratorului. La unele materiale, cum sunt oțelurile, q crește de asemenea cu rezistența statică R_m . Experimental se constată că pentru materialele fragile solicate la oboseală, efectul de concentrare a tensiunilor este mult mai sever decât la materialele ductile de mică rezistență. Valoarea coeficientului de sensibilitate la oboseală poate fi estimată cu relația:

$$q = \frac{1}{1 + \alpha \rho} \quad (10.6)$$

în care α este o constantă de material având dimensiunea unei lungimi iar ρ este raza de racordare a concentratorului. Pentru oțeluri având rezistența la rupere statică $R_m > 550$ MPa, constanta α poate fi determinată cu relația:

$$\alpha = 6 \left(\frac{100}{R_m} \right)^{1,8} \quad (10.7)$$

O altă relație empirică utilizată pentru calculul coeficientului de sensibilitate la oboseală este:

$$q = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\beta}{\rho}}} \quad (10.8)$$

Această relație reprezintă o formă simplificată a relației lui Neuber. Pentru oțelurile cu $R_m \leq 1500$ Mpa, constanta de material β se poate calcula cu relația:

$$\beta = \frac{1,7}{\frac{R_m}{10^{586}}} \quad (10.9)$$

Relațiile (10.7) și (10.9) sunt aproximative, iar relația (10.4) reflectă tendința observată la datele experimentale obținute pentru piesele solicate la oboseală prin cicluri simetrice. Factorul de concentrare la oboseală K_f este un parametru empiric; el depinde de material, de forma și dimensiunile concentratorului precum și de modul de solicitare.

Intrucât coeficientul K_f se determină experimental pentru ciclurile simetrice, utilizarea lui la ciclurile având tensiunea medie nenulă presupune introducerea unor condiții. Dacă se presupune că tensiunea maximă locală, produsă în zona concentratorului la vârf de sarcină, este mai mică decât limita de curgere a materialului, atunci amplitudinea tensiunii și tensiunea medie din punctul cel mai sollicitat al concentratorului se pot scrie sub forma:

$$\begin{aligned}\sigma_a &= K_t \cdot S_a \\ \sigma_m &= K_f \cdot S_m\end{aligned}\quad (10.10)$$

Efectul tensiunii medii poate fi estimat utilizând o relație de forma ecuației (10.2), exprimată în funcție de tensiuni, respectiv:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{as}} + \frac{\sigma_m}{R_m} = 1 \quad (10.11)$$

în care σ_a și σ_m corespund ciclului cu coeficient de asimetrie R . Înlocuind relațiile (10.10) în relația (10.11) se obține amplitudinea tensiunii locale maxime, echivalentă ciclului simetric:

$$\sigma_{as} = \frac{K_t S_a}{1 - \frac{K_f S_m}{R_m}} \quad (10.12)$$

Luând în considerație efectul de sensibilitate al concentratorului, se poate înlocui K_t prin K_f , astfel încât se obține:

$$\sigma_{as} = \frac{S_a}{\frac{1}{K_f} - \frac{S_m}{R_m}} \quad (10.13)$$

Această relație este prezentată grafic în *figura 10.17*, atât pentru cazul particular $K_f=1$ (concentrator inexistent sau ineficient) cât și pentru cazul general, ținând seama că $S_{as}=\sigma_{as}/K_f$.

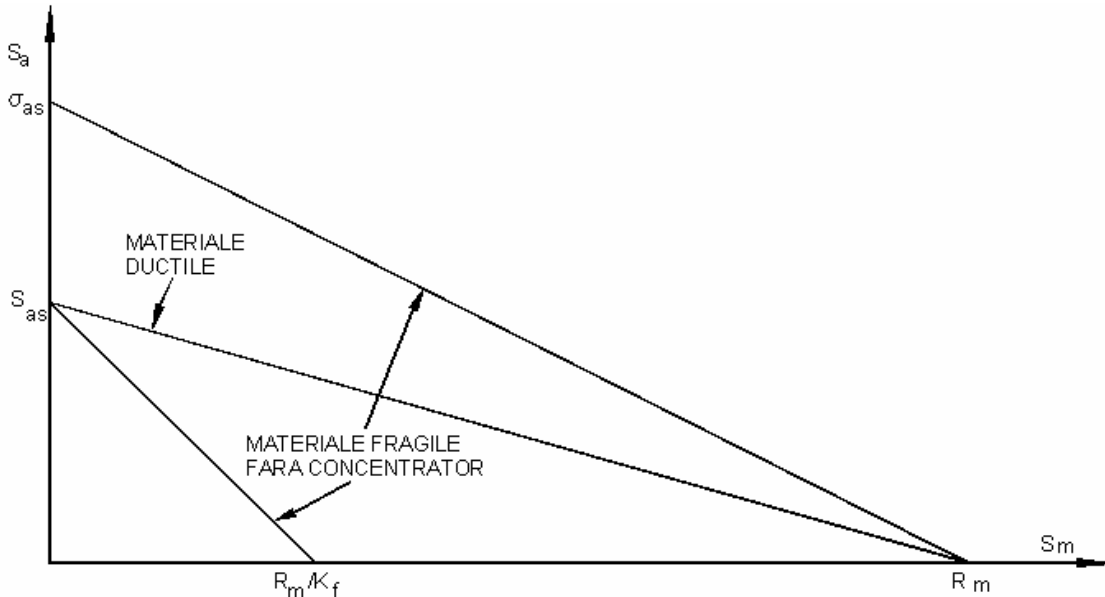


Fig. 10.17. Reprezentarea grafică a relației

Diagramele obținute pot fi folosite la calculul pieselor confecționate din materiale fragile. Pentru materialele ductile, prezența factorului K_f la numitorul relației (10.12) nu este justificată întrucât, din cauza deformațiilor plastice mari care se produc înainte de

rupere, atât la epruvetele cu concentrator cât și la cele fără concentrator se obține aceeași valoare a rezistenței de rupere statică R_m . Ca urmare, la aceste materiale diagrama funcției $S_{as}=f(S_a, S_m)$ este cea prezentată în figura 10.17.

La durate de viață scurte sau intermediare, în materialele ductile se produc curgeri importante, astfel că, amplitudinea tensiunii locale σ_a este mai mică decât $K_f S_a$. În consecință, raportul dintre rezistența la oboseală a epruvetei cu concentrator și cea a epruvetei netede devine mai mic decât K_f , astfel încât este necesară definirea unui factor de concentrare K'_f variabil cu numărul de cicluri parcurs până la rupere:

$$K'_f = \frac{\sigma_{as}}{S_{as}} \quad (10.14)$$

La materialele ductile K'_f descrește de la valoarea K_f corespunzătoare durabilităților mari la valori apropiate de unitate, pentru durate scurte de viață.

10.3.3. Influența tensiunilor remanente asupra acumulării oboselii

Tensiunile remanente joacă un rol esențial asupra rezistenței la oboseală mecanică și/sau termică a materialelor [20]. Ele pot fi considerate ca o tensiune medie sau statică peste care se suprapune tensiunea ciclică. Prin urmare, o creștere importantă a rezistenței la oboseală poate fi obținută optimizând distribuția tensiunilor remanente din piesă, figura 10.18.

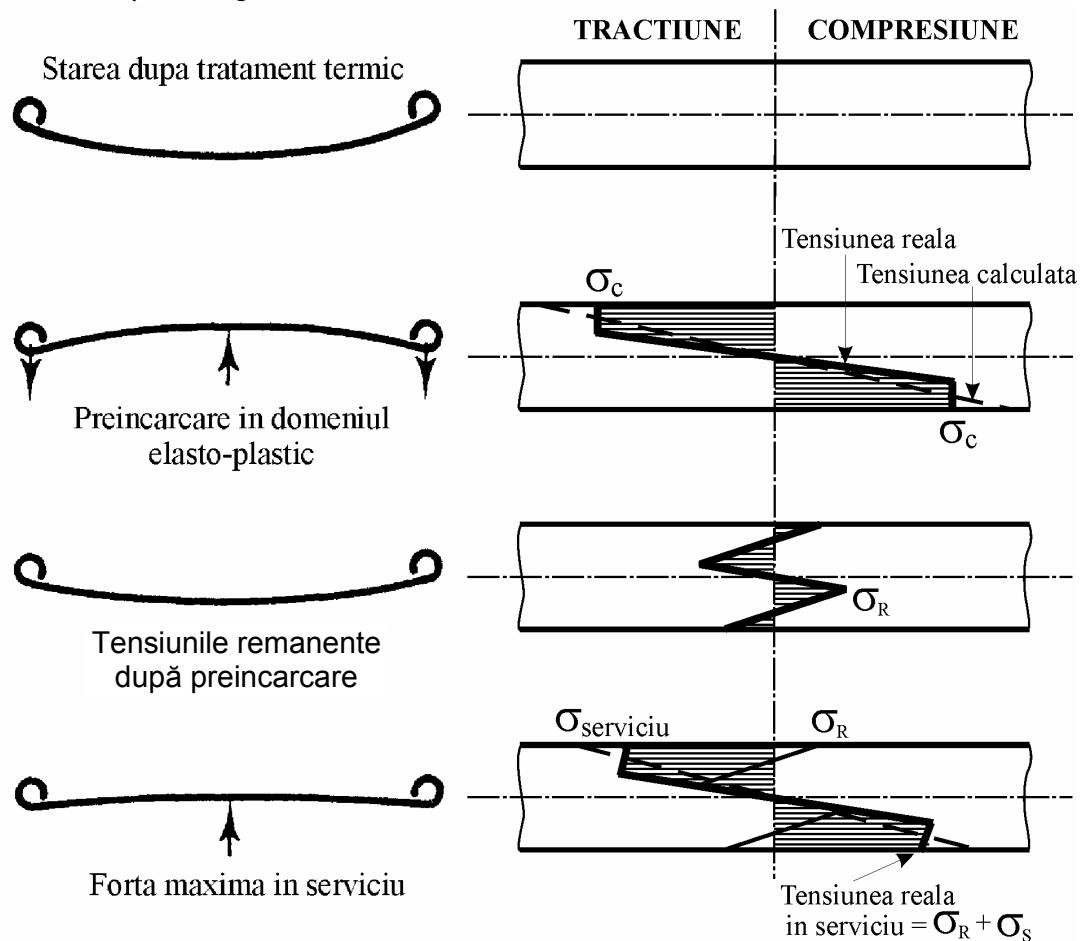


Fig. 10.18. Generarea tensiunilor remanente de compresiune într-un arc lamelar și efectul acestora asupra capacității portante în exploatare

Tensiunile remanente de compresiune permit o deplasare favorabilă a unui punct din diagramele Haigh sau Goodman, dinspre zona periculoasă în zona de siguranță, *figura 10.19*. Această stare de tensiune se poate obține în straturile superficiale ale pieselor prin tratamente mecanice, tratamente termice superficiale sau tratamente termochimice. Din cercetările experimentale efectuate pentru diferite procedee de prelucrare și diferite tratamente aplicate rezultă că, cu cât tensiunile remanente de compresiune sunt mai importante cu atât rezistența la oboseală crește.

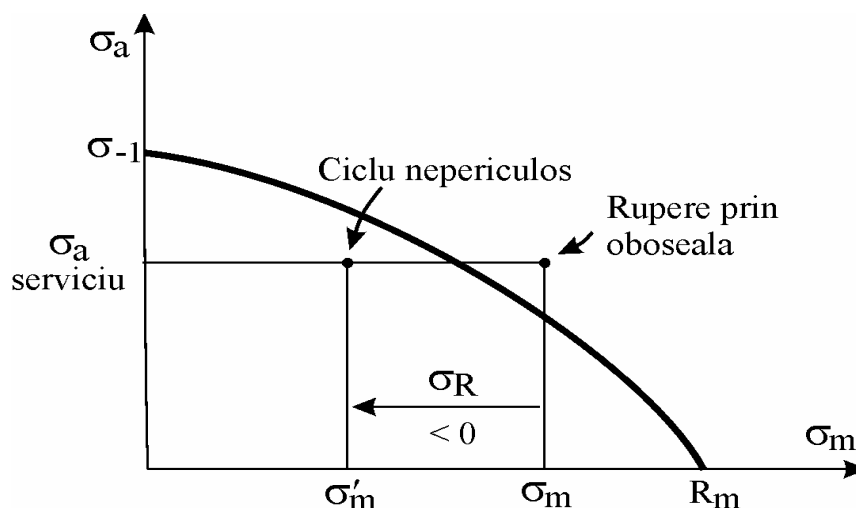


Fig. 10.19. Diagrama Haigh pentru oboseală în prezența tensiunilor remanente, (σ_a – amplitudinea tensiunii, σ_m – tensiunea medie a solicitării, σ_R – tensiunea remanentă)

Atunci când se obțin în straturile superficiale tensiuni remanente de întindere, se constată o deteriorare a proprietăților de rezistență la oboseală care conduc la ruperi premature ale pieselor. În *figurile 10.20* și *10.21* se prezintă distribuțiile tensiunilor remanente obținute pentru câteva procedee de prelucrare sau tratament și efectele lor asupra rezistenței la oboseală. Cercetările referitoare la efectele tensiunilor remanente asupra rezistenței la oboseală mecanică și/sau termică, inclusiv asupra oboselii de contact, cu probleme specifice de la un material la altul și de la un procedeu de prelucrare la altul, au o amploare deosebită. În paralel cu studiile experimentale se fac eforturi susținute și pentru a putea estima prin calcule durata de viață a pieselor solicate la oboseală, ținând cont de prezența tensiunilor remanente. După cum se știe de mult timp, tensiunile remanente nu au un nivel stabil atunci când materialul piesei este supus unor solicitări variabile, producându-se o *relaxare* a acestora. Prin urmare, pentru a putea face o astfel de estimare este necesar să se dispună de informații cât mai precise asupra valorilor stabilizate ale tensiunilor remanente, adică asupra valorilor tensiunilor care există în mod real în piesă pe o durată ce reprezintă cea mai mare parte din durata sa de viață. Dificultăți și mai mari apar în cazul altor tipuri de solicitări mult mai complexe, în care intervin pe lângă aspectele mecanice și fenomene fizico - chimice. Dacă starea de tensiune dintr-o piesă determinată de aplicarea sarcinilor poate fi uniaxială, starea de tensiuni remanente este tot timpul multiaxială. Prin urmare, luarea în considerare a tensiunilor remanente într-un calcul de prevedere a rezistenței la oboseală, pune problema calculului pieselor supuse la stări de tensiuni multiaxiale, fiind necesar să se facă apel la un criteriu de oboseală multiaxială (ex. criteriile Kiocecioglu, Sines, Crossland, Findley - Mataka, Dang Van). Pentru a valida aceste criterii sunt necesare încercări complexe de oboseală, pentru diverse categorii de materiale și stări de tensiuni remanente.

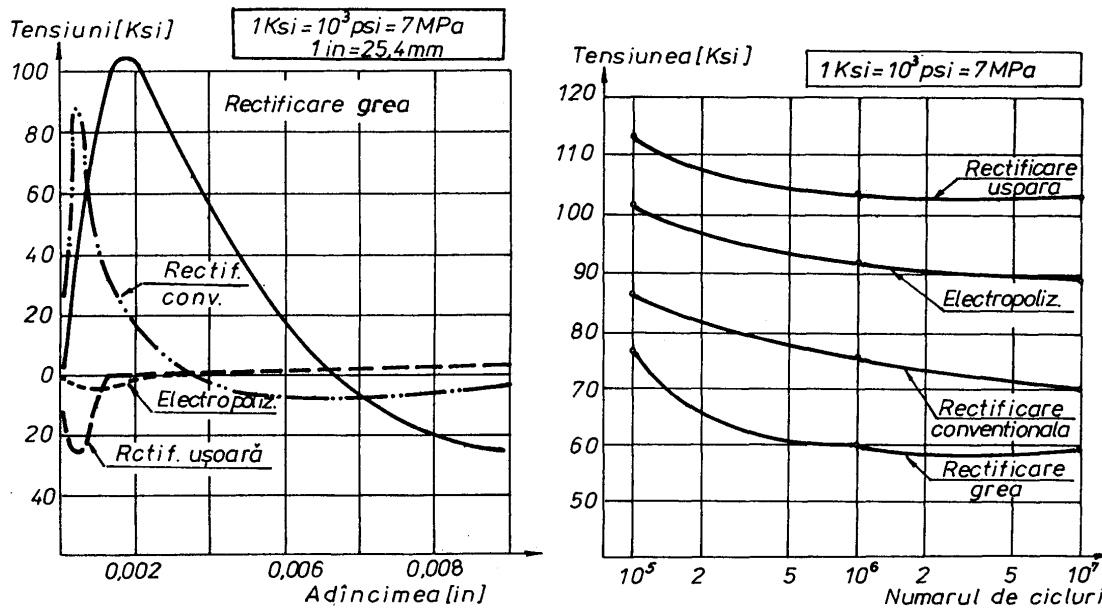


Fig. 10.20. Tensiuni remanente obținute în diverse condiții de rectificare și curbele Wöhler la încovoiere alternantă, oțel SAE 4340, 50HRC

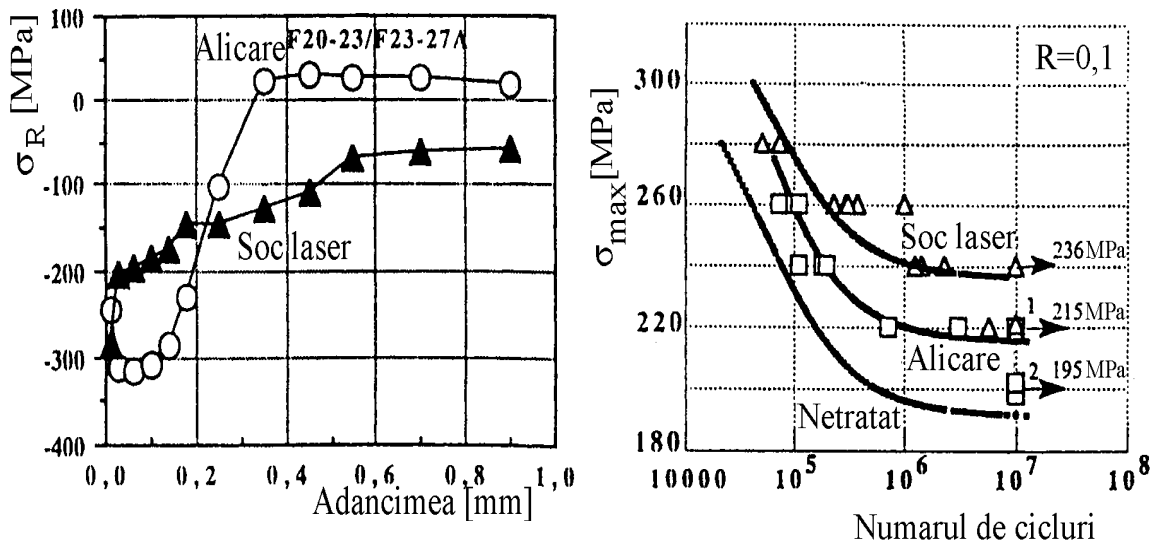


Fig. 10.21. Tensiuni remanente generate prin alicare și prin șoc laser și curbele Wöhler pentru încercările de încovoiere plană în trei puncte ($R=0,1$), aliaj 7075-T735

Distribuția tensiunilor remanente are o influență determinantă asupra vitezei de propagare a fisurilor și asupra ruperilor fragile prin oboseală. În general, ruperea bruscă a unei piese puțin solicitată poate avea la origine:

- o anumită stare de fragilitate a materialului;
- existența unui nivel al tensiunilor remanente foarte ridicat;
- o stare triaxială a acestor tensiuni (valorile tensiunilor principale σ_1 , σ_2 și σ_3 apropiate).

În cazul pieselor supuse doar la sarcini statice, o bună ductilitate a materialului este în general suficientă pentru ca tensiunile remanente să nu aibă nici o influență asupra comportării lor din acest punct de vedere. Dacă materialul nu este suficient de ductil sau fragil, tensiunile remanente pot deveni periculoase în măsura în care contribuie la accentuarea triaxialității tensiunilor rezultante.

Atunci când tensiunea locală dintr-un grăunte atinge o valoare critică σ_f^* , se produce un clivaj, care se propagă în general fără dificultate în grăunții adiacenți, producând o rupere fragilă. Tensiunile remanente de întindere σ_R se adaugă tensiunii aplicate σ amorsând acest tip de rupere pentru sarcini mici:

$$\sigma_f^* = \sigma + \sigma_R$$

Odată amorsarea realizată, doar tensiunea aplicată poate fi suficientă pentru ca propagarea fisurii să se producă cu o viteză mare. Rezultă că tensiunile remanente care contribuie la amorsarea ruperilor fragile prin clivaj sunt foarte periculoase, în mod deosebit pentru oțelurile sollicitate la temperaturi joase. Din acest motiv este necesar să se realizeze o detensionare a îmbinărilor sudate și a pieselor în care este posibil să se producă ruperi fragile. Prezența tensiunilor remanente într-o piesă sau un element de structură poate avea, de asemenea, efecte pozitive sau negative asupra *coroziunii sub tensiune*, ce reprezintă, după cum este cunoscut, un fenomen mecano-chimic de fisurare ce poate determina ruperea sub efectul combinat al tensiunilor de întindere și al unui mediu coroziv. Fisurarea este în general transcristalină și poate să apară la toate categoriile de materiale (oțeluri, aliaje de aluminiu, cupru, titan, magneziu ș.a.). Introducerea tensiunilor remanente de compresiune, prin aplicarea unor tratamente corespunzătoare utilizând tehnologii specifice de inginerie a suprafețelor, permite o creștere semnificativă a duratei de viață a pieselor supuse la coroziune sub tensiune (de sute sau mii de ori față de situația în care piesa nu a fost tratată).

10.4. Fenomenul de degradare mecanică

10.4.1. Introducere

Fenomenul de *degradare mecanică* [311] reprezintă discontinuități de suprafață sub formă de microfisuri sau discontinuități volumice sub formă de cavități care apar în timp la o piesă sau structură sollicitată 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 sollicitarea 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 deformație, care în mod obișnuit o acompaniază, se datorește unuia sau mai multora din următoarele mecanisme posibile:

- degradare plastică ductilă care însoțește 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 însoțită 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.

10.4.2. Modele neliniare privind cumulara degradărilor

10.4.2.1. Modelul Corten-Dolan

Modelul de reprezentare a unei solicitări prin cicluri este destinat pentru estimare, prin calcul, a duratei de viață. Operația presupune adoptarea unui criteriu pentru cumulara degradărilor și trasarea, eventuală, a diagramei *solicitare-deteriorare* (**S-D**). Procedul Corten-Dolan face parte din clasa procedeelor bazate pe relațiile neliniare între degradare și nivelul tensiunilor aplicate [61, 69]. El se exprimă astfel:

$$D_i = \left(\frac{n_i}{N_i} \right)^\alpha \quad (10.15)$$

unde: - 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 $D = 1$ (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 :

$$r_1 \cdot n_{12}^\alpha = r_2 \cdot n_2^\alpha \Rightarrow n_{12} = \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^{1/\alpha} \cdot n_2 \quad (10.16)$$

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

$$\bar{n}_1 = \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^{1/\alpha} \cdot n_2 + n_1 \quad (10.17)$$

Degradarea 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:

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

$$\text{și } N_f = \left[\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^{1/\alpha} \cdot \left(\frac{a_2}{N_1}\right) + \frac{a_1}{N_1} \right]^{-1} \text{ sau } N_f = \frac{N_1}{\left[a_1 + a_2 \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^{1/\alpha} \right]} \quad (10.18)$$

unde cu a_i ($i = 1, 2$) a fost notat raportul $\frac{n_{if}}{N_f}$. Experimental, Corten și Dolan au verificat că:

$$\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^{1/\alpha} = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^d \quad (10.19)$$

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:

$$\left(\frac{N_1}{N_2}\right) = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^b \quad (10.20)$$

a reieșit că $(1/d) > (1/b)$, figura 10.22.

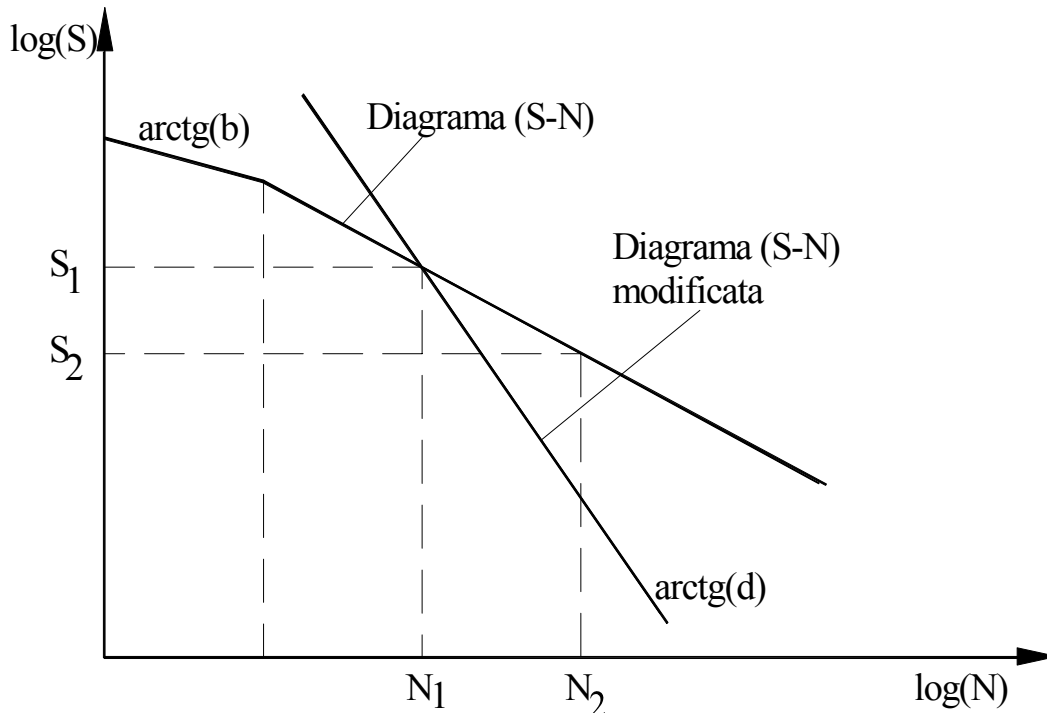


Fig. 10.22. Diagrame solicitare – numărul de cicluri (S-N)

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 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:

$$N_f = \frac{N_1}{a_1 + a_2 \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^d + a_3 \left(\frac{S_3}{S_1} \right)^d + \dots + a_n \left(\frac{S_n}{S_1} \right)^d} \quad (10.21)$$

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 $a_i = \frac{N_i}{N_f}$, ($j = 1 \dots n$);
- d este inversul pantei diagramei S-N modificate.

10.4.2.2. 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 reprezentative pentru degradare depind de încărcare prin intermediul amplitudinii ciclului, a valorii maxime sau medii, toate acestea determinate pentru un ciclu de solicitare.

Așadar, ecuația degradării prin oboselă ciclică poate fi de forma:

$$\delta D = f(v_i) \delta N \quad (10.22)$$

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 rămase;
- (2)- evaluarea degradării prin utilizarea conceptului de tensiune efectivă.

Vom examina mai întâi construcția modelului bazat pe *durata de viață rămasă*. Incercarea 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 rămase, $\frac{N_2}{N_F}$. Acești parametri sunt suficienți pentru a demonstra evoluția curbelor

care descriu degradarea în funcție de raportul N/N_F . Din *figura 10.23* se constată faptul că, durata de viață rămasă la nivelul al doilea de solicitare este diferită de valoarea $(1-N_1/N_F)$, valoare care ar reieși dacă s-ar aplica teoria liniară a acumulării deteriorărilor.

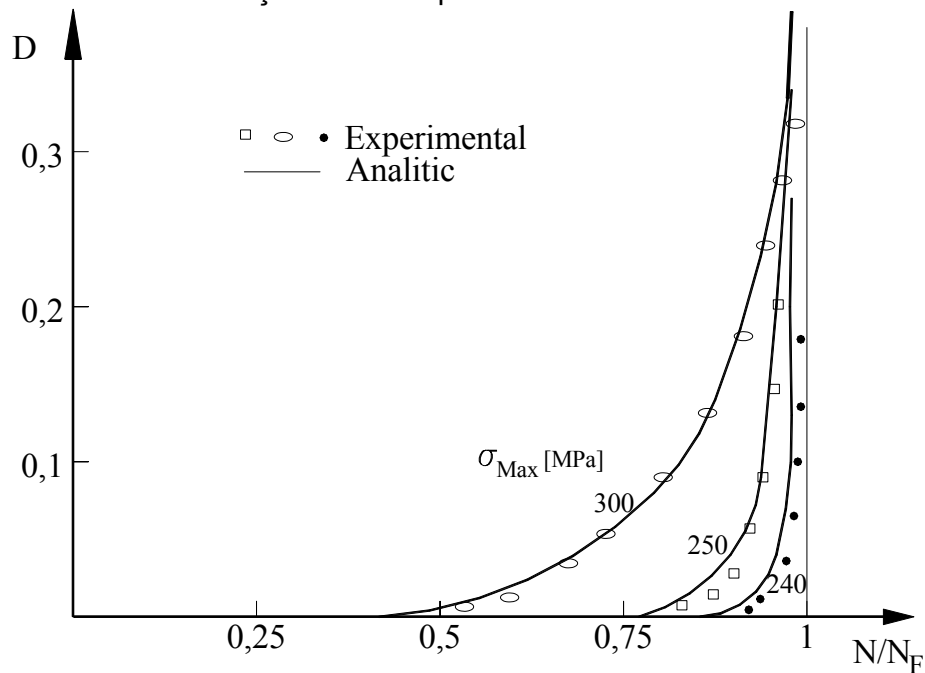


Fig. 10.23. Degradarea în funcție de raportul N/N_F

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:

$$\delta D = D^{\alpha(\sigma_{Max}, \bar{\sigma})} \cdot \left(\frac{\sigma_{Max} - \bar{\sigma}}{C(\sigma)} \right) \cdot \delta N \quad (10.23)$$

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 ($D=1$):

$$N_F = \frac{1}{1 - \alpha(\sigma_{Max}, \bar{\sigma})} \left(\frac{\sigma_{Max} - \bar{\sigma}}{C(\bar{\sigma})} \right)^{-\beta} \quad (10.24)$$

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

$$\frac{N_2}{N_{F2}} = 1 - \left(\frac{N_1}{N_{F1}} \right)^\eta \quad (10.25)$$

$$\text{în care } \eta = \frac{1 - \alpha_2}{1 - \alpha_1} = \frac{1 - \alpha(\sigma_{Max2}, \bar{\sigma}_2)}{1 - \alpha(\sigma_{Max1}, \bar{\sigma}_1)}.$$

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 10.24*, se constată că durata de viață poate avea aceeași valoare la solicitări diferite, nu același lucru rezultând și pentru degradare.

Ca urmare, utilizarea conceptului duratei de viață rămase permite doar, o evaluare relativă a degradării. În aceste condiții, se poate utiliza un alt concept în vederea evaluării degradării. Folosind 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: $1 - (1 - D)^{\beta+1}$. În aceste condiții, relația diferențială care poate fi scrisă este de forma:

$$\delta D = \left[1 - (1 - D)^{\beta+1} \right]^{\alpha(\sigma_{Max}, \bar{\sigma})} \left[\frac{\sigma_{Max} - \bar{\sigma}}{M(\bar{\sigma})(1 - D)} \right]^\beta \delta N \quad (10.26)$$

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:

$$N_F = \frac{1}{(\beta + 1) \left[1 - \alpha(\sigma_{Max}, \bar{\sigma}) \right]} \left(\frac{\sigma_{Max} - \bar{\sigma}}{M(\bar{\sigma})} \right)^{-\beta} \quad (10.27)$$

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

$$D = 1 - \left[1 - \left(\frac{N}{N_F} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \right]^{\frac{1}{\beta+1}} \quad (10.28)$$

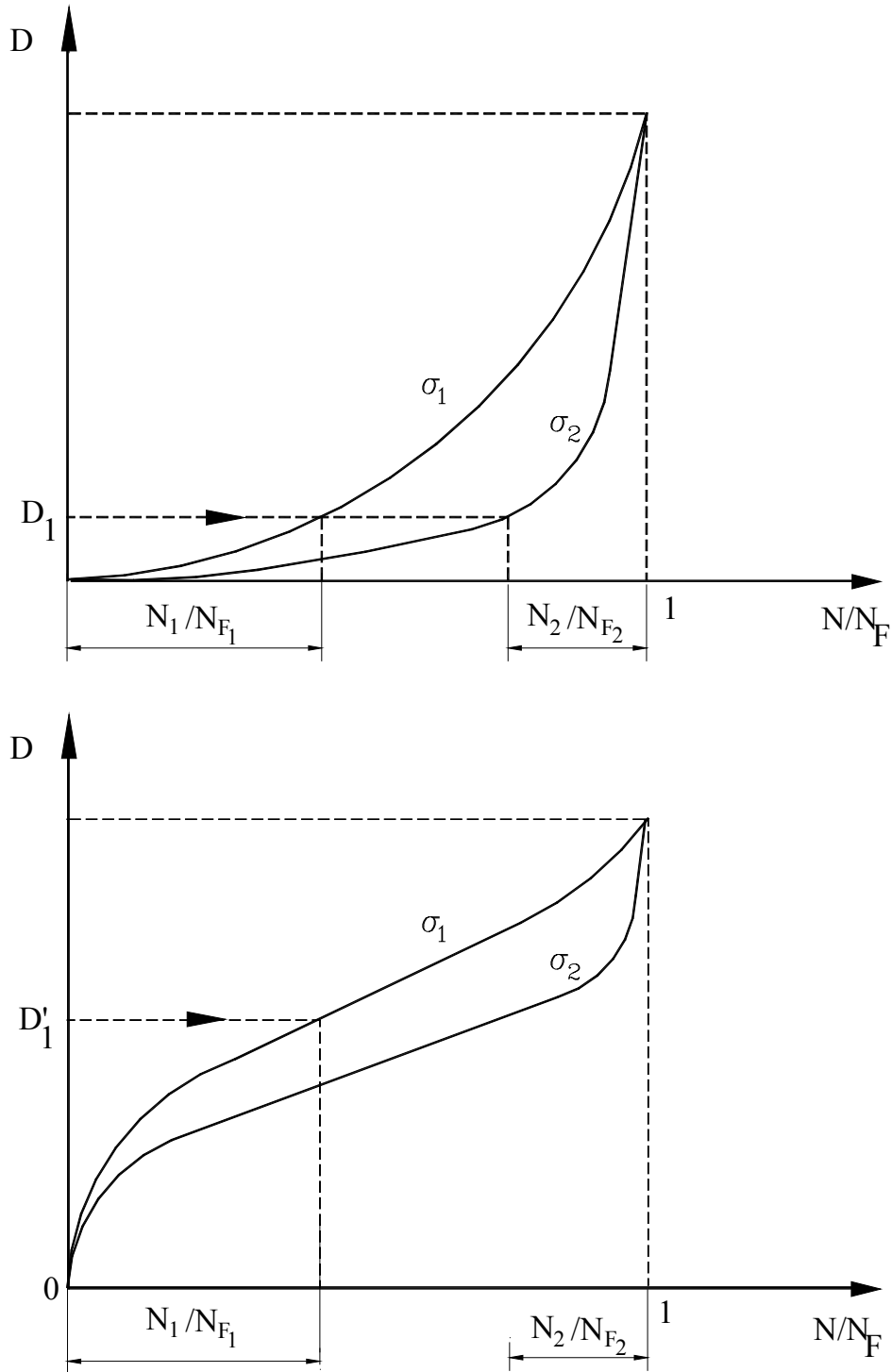


Fig. 10.24. Degradarea în funcție de raportul N/N_F și de solicitare

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 b poate fi determinat numai din măsurătorile degradării, alegerea mărimii pentru b fiind 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 b .

10.5. Oboseala materialelor în domeniul durabilităților mici (oboseala oligociclică)

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.

10.5.1. 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 deformațiile plastice se produc în condițiile conservării volumului, se poate scrie relația $A_0 \cdot l_0 = A \cdot l$, 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:

$$\bar{\varepsilon} = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon) \quad (10.29)$$

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

$$\varepsilon_f = \ln(1 + \varepsilon) = \ln \frac{A_0}{A_r} = \ln \frac{1}{A_r / A_0} = \ln\left(\frac{1}{1 - Z}\right) \quad (10.30)$$

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 10.25*.

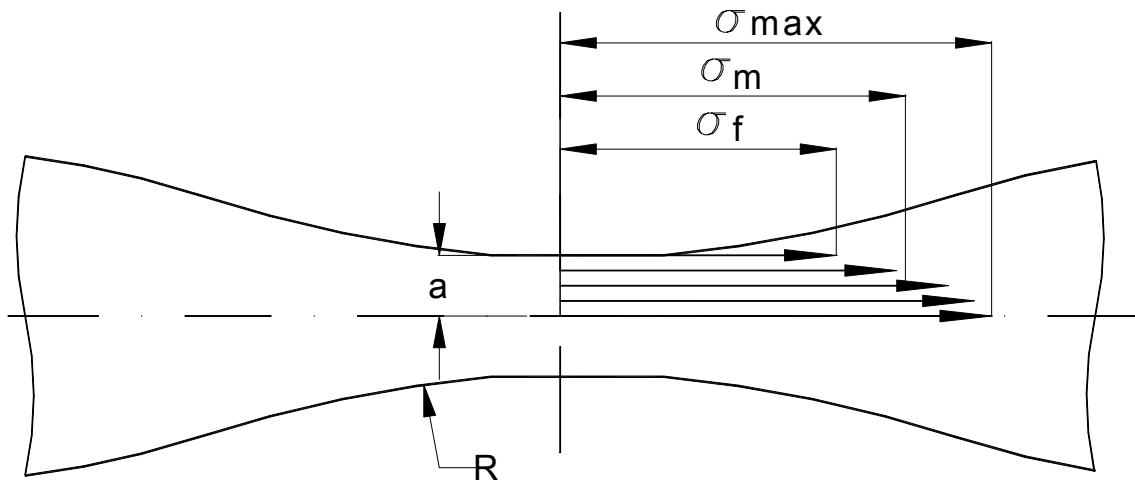


Fig. 10.25. Variația tensiunii în zona deformată

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

$$\sigma_f = \frac{\sigma_m}{\left(1 + \frac{a}{4R}\right)} \quad (10.31)$$

în care:

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

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 forța de tracțiune ajunge la valoarea de rupere.

Diagrama caracteristică reală are, la materialele ductile, alura din *figura 10.26* (linia întreruptă) care se referă la un oțel moale. În prima zonă de curbă accentuată, diagrama poate fi, cu destulă precizie, descrisă de o funcție de putere de forma:

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_e + \bar{\varepsilon}_p = \frac{\bar{\sigma}}{E} + \left(\frac{\bar{\sigma}}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (10.32)$$

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 ($n < 1$).

10.5.2. 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 10.26*. În cazul repetării aceluiaș ciclu de întindere-compresiune, buclele de histerezis care se obțin în continuare nu se suprapun peste primele, *figura 10.26*.

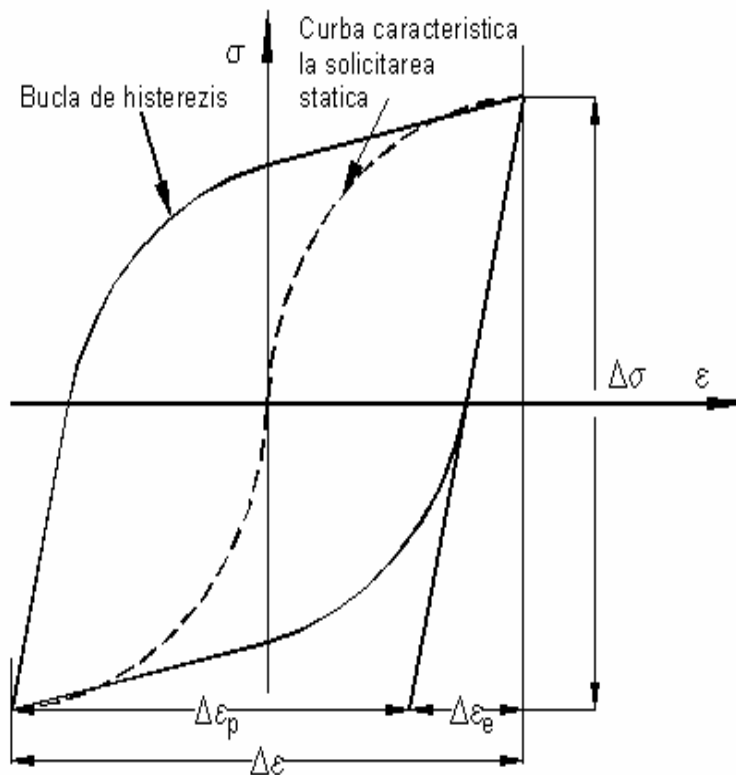


Fig. 10.26. Ciclu de întindere compresiune cu histerezis

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 mărimu-și ordonata - tensiunea σ , fie micșorând-o. Materialele din prima categorie se numesc materiale cu ecrisare 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 buclor de histerezis stabilizate. Acestea sunt obținute prin încercarea unui număr de epruvete identice la cicluri alternant-simetrice cu amplitudinea deformației specifice constantă pentru o epruvetă, dar diferită de la o epruvetă la alta, *figura 10.27*. 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.

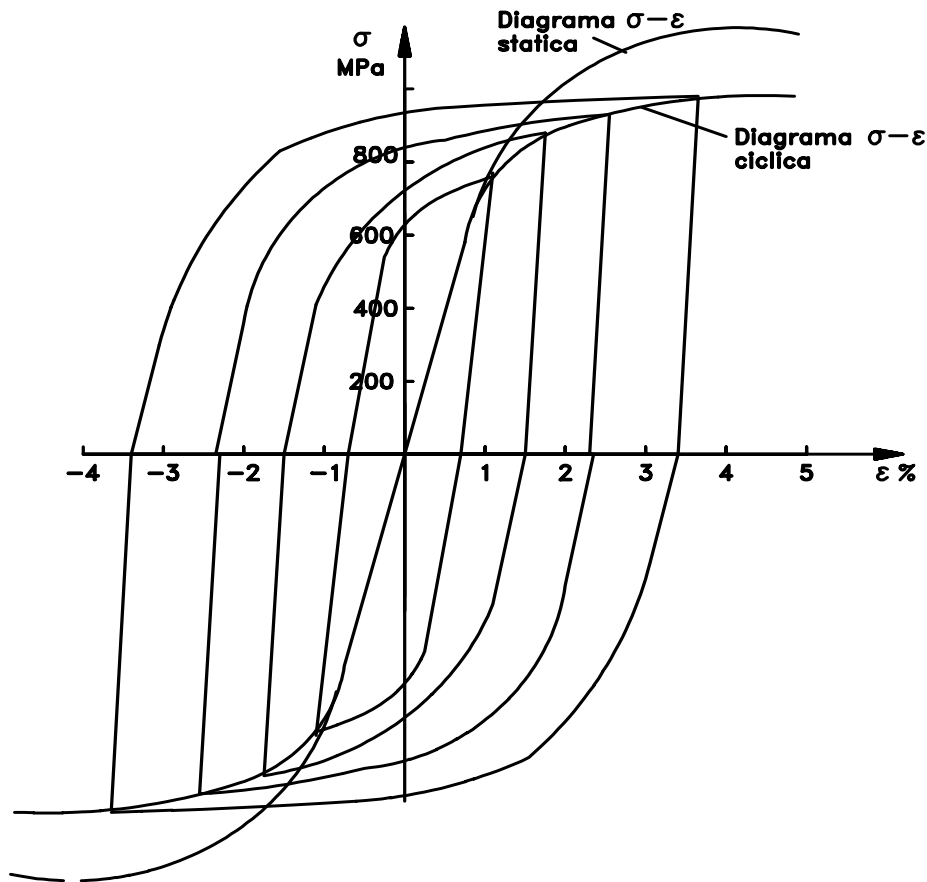


Fig. 10.27. Bucle de histerezis

10.5.3. 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 10.28*.

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*.

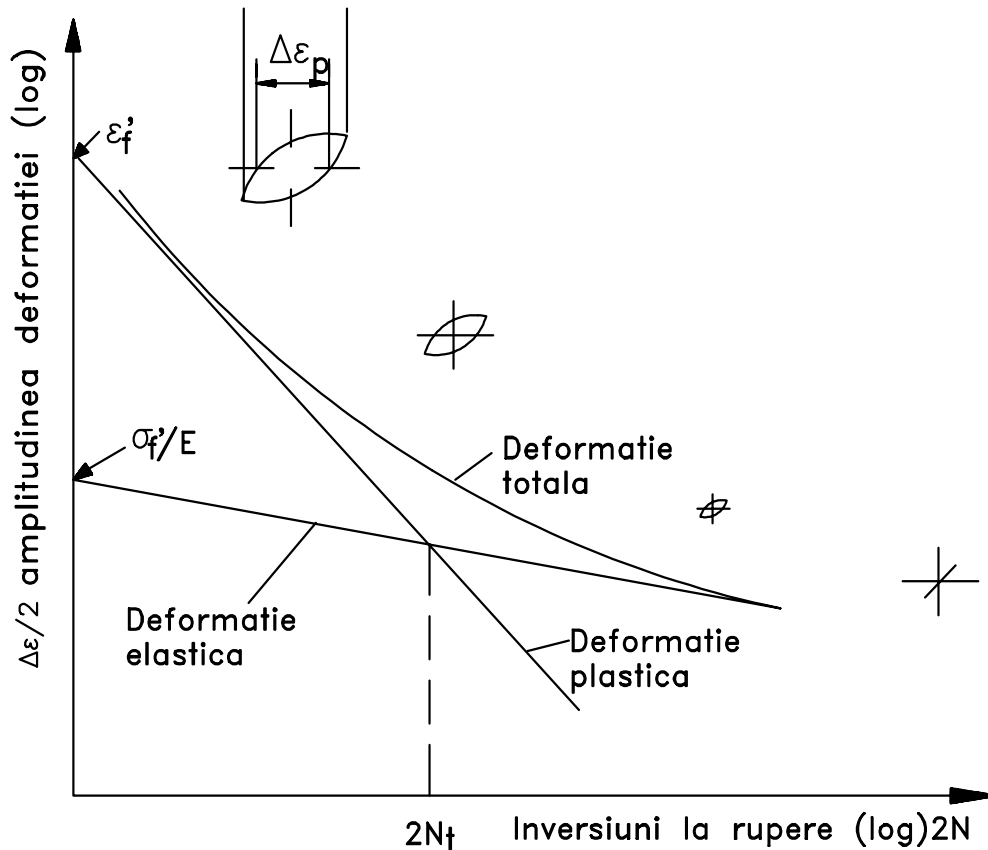


Fig.10.28. Diagrama ε -N la durabilitate mică

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.

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:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E}(2N)^b + \varepsilon'_f(2N)^c \quad (10.33)$$

în care:

- $\frac{\Delta\varepsilon}{2}$, $\frac{\Delta\varepsilon_e}{2}$ și $\frac{\Delta\varepsilon_p}{2}$ sunt deformațiile 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 longitudinală a 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 10.28* 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:

$$\Delta\varepsilon_e = \Delta\varepsilon_p \rightarrow 2N_t = \left(\frac{\varepsilon'_f E}{\sigma'_f} \right)^{\frac{1}{b-c}} \quad (10.34)$$

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 (10.33) 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 10.29*, care are următoarea ecuație de durabilitate:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = 0,0062(2N)^{-0,09} + 0,58(2N)^{-0,57} \quad (10.35)$$

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 10.29b*):

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N)^b = 1206(2N)^{-0,09} \quad (10.36)$$

În mod asemănător, pentru durabilități de ordinul $N=10^2$ sau mai mici se poate neglija deformația elastică (*figura 10.29c*) și păstra numai termenul:

$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f (2N)^c = 0,58(2N)^{-0,57} \quad (10.37)$$

Explicitând în funcție de parametru $2N$ cele două componente, elastică și plastică și identificându-le cu expresiile lor din ecuația diagramei σ - ε ciclică, 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 $\varepsilon'_f = (0,35 \dots 1,0) \varepsilon_f$.

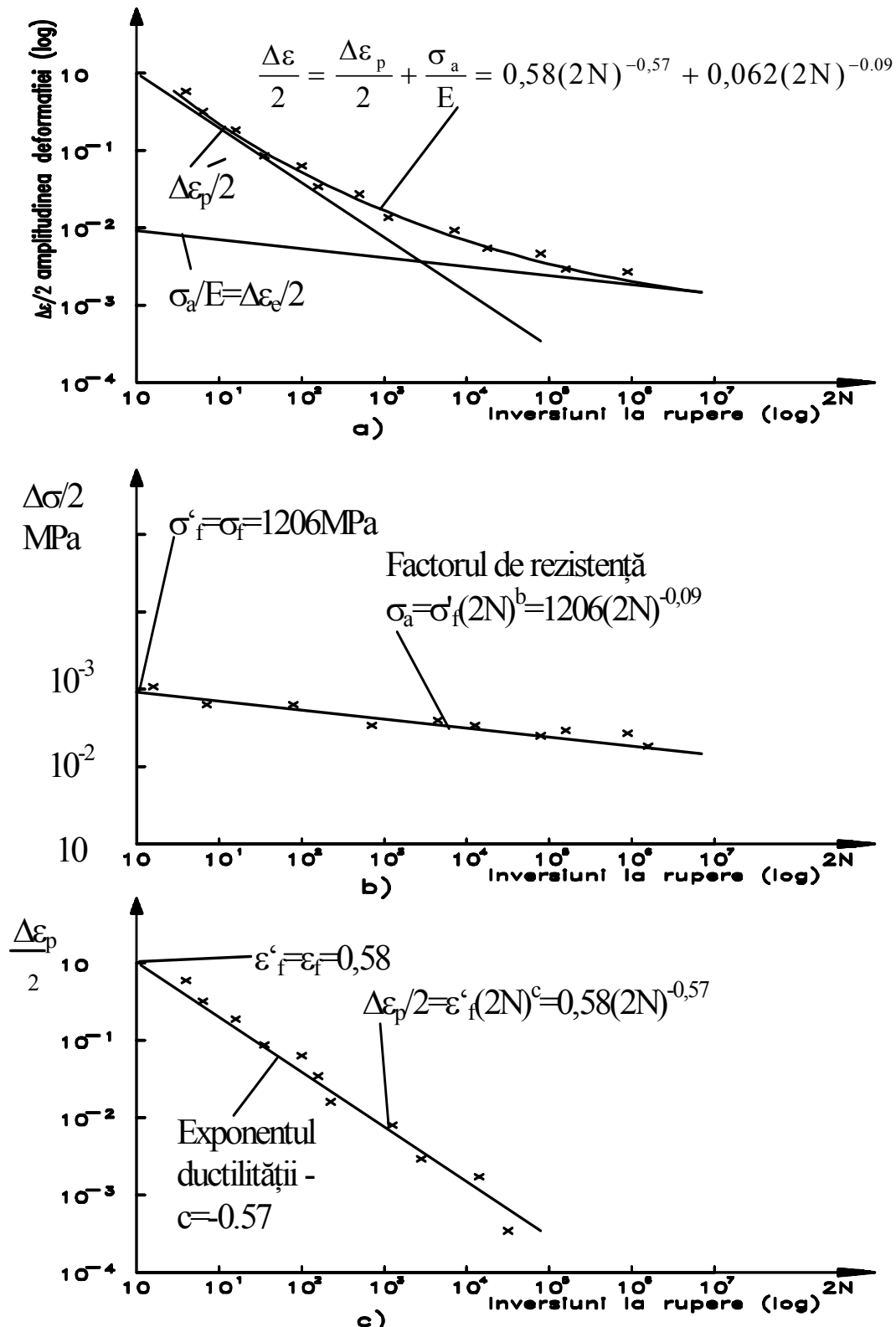


Fig. 10.29. Diagrama de durabilitate pentru oțelul 4340

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:
 - $b = 0,1$ pentru oțelurile moi;
 - $b = 0,05$ pentru oțelurile dure;
- $\varepsilon'_f = \varepsilon_f = \ln(A_0/A_r)$ unde A_0 - aria inițială; A_r - aria la rupere;
- $c = -0,5 \dots -0,7$ (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 propriu-zise la oboseală.

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

$$\Delta\varepsilon = 3,5 \left(\frac{\sigma_r}{E} \right) (N)^{-0,12} + \varepsilon_f^{0,6} (N)^{-0,6} \quad (10.38)$$

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.

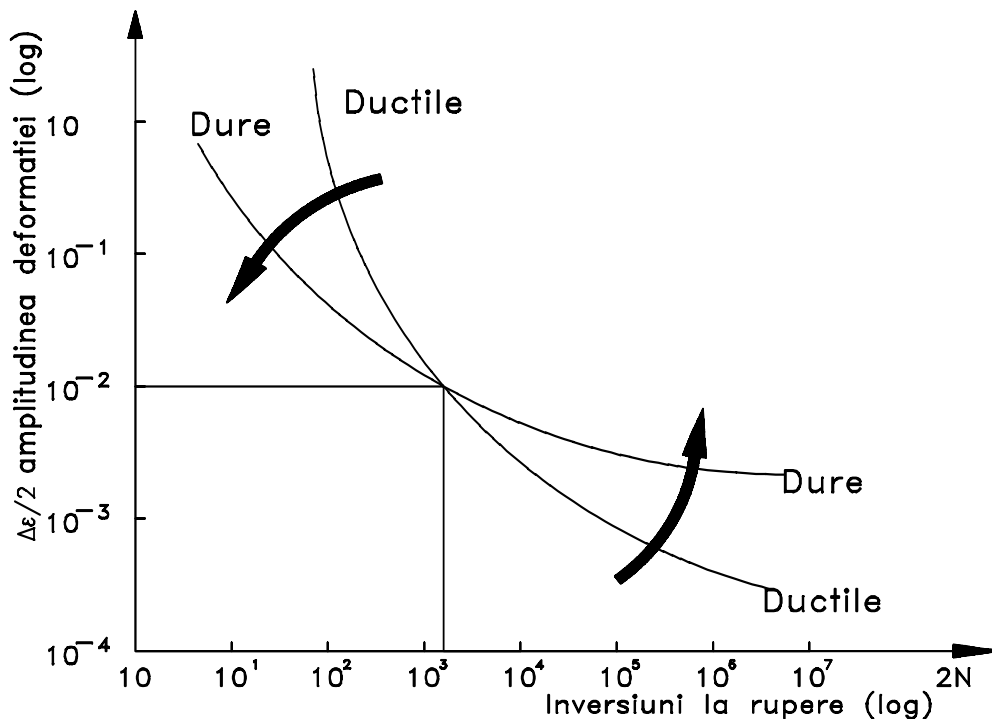


Fig. 10.30. Curbe de durabilitate pentru materiale moi și dure

Numeroasele experimente făcute asupra diferitelor metale au permis avansarea unor reguli de comportare a epruvetelor la încercări controlate de deformația specifică. Foarte multe 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 deformații specifice sub 1% materialele mai dure se comportă mai bine, *figura 10.30*.

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.