

Capitolul 2. ETAPELE ȘI LOCAȚIA FISURĂRII DE OBOSEALĂ

2.1 . Aspectul ruperii prin oboseală

Deformațiile elastice reprezintă deplasări reversibile ale atomilor în rețeaua cristalină și, ca valoare, sunt legate de distanța interatomică. Deformațiile plastice sunt rezultatul deplasării ireversibile a rețelei cristaline și se produc ca urmare a deplasării planelor suplimentare de atomi după anumite direcții preferențiale.

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 deformații plastice metalului 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. Unele materiale pot fi stabile la oboseală în timp ce la alte materiale se produce o degradare continuă. Pentru a înțelege răspunsul unui metal la solicitarea de oboseală trebuie să avem în vedere deformațiile plastice, dislocațiile și posibilitatea mișcării acestora în timpul solicitării.

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 deformarea 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 2.1*, în care se manifestă mecanisme diferite. 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 extensia acesteia.

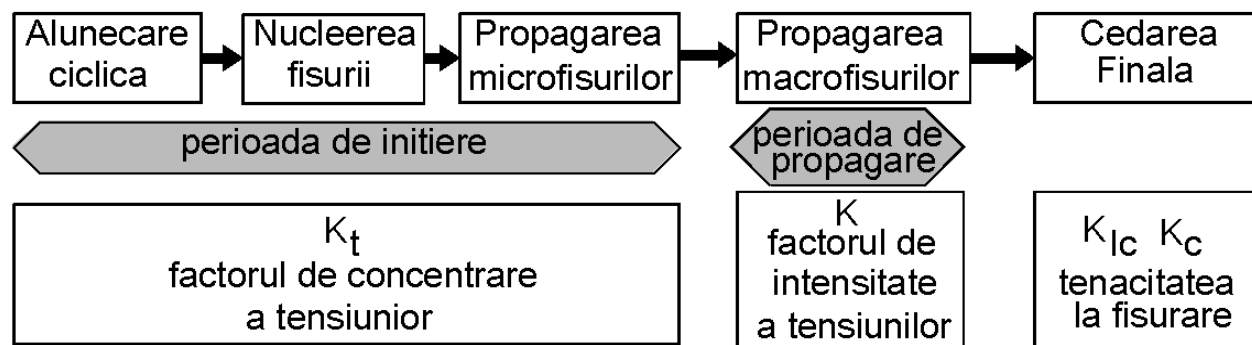


Fig. 2.1. Diferite stadii ale fenomenului de oboseală și mărimi caracteristice

2.3 Inițierea fisurii

Inițierea și propagarea fisurilor de oboseală sunt o consecință a deplasării benzilor de alunecare. Aceasta implică deformări plastice ciclice, ca urmare a mișcării dislocațiilor. Oboseala apare la amplitudini ale tensiunilor aflate sub limita de curgere. La un astfel de nivel redus al tensiunilor, deformare plastică este limitată la un număr mic al grăunților de material. Această micro-plasticitate poate apărea mai ușor în grăunții aflați la suprafața materialului, deoarece o parte din legături lipsesc. Pe de altă parte, tot la suprafață acționează factorii de mediu, de obicei un mediu gazos sau lichid. Ca o consecință, deformarea plastică în grăunții de la suprafață este mai mică decât în grăunții din interior așa că la suprafață tensiunile introduse prin deformare plastică pot fi mai mici.

Alunecare ciclică presupune o tensiune de forfecare ciclică. La nivel microscopic tensiunea de forfecare nu este distribuită uniform în material. Tensiunea de forfecare la nivelul benzilor de alunecare cristalografice diferă de la grăunte la grăunte, în funcție de dimensiunea și forma acestora, în funcție de orientarea lor cristalografică și în funcție de anizotropia elastică a materialului. În unii grăunți de la suprafața materialului, aceste condiții sunt mai favorabile pentru alunecarea ciclică decât în grăunții de la suprafață. Dacă alunecare apare într-un grăunte de suprafață, un prim pas de alunecare se va produce la suprafața materialului, a se vedea *Figura 2.2a*. Un pas alunecare implică faptul că o zonă de nou material este expus la mediul înconjurător. Acest nou material de la suprafață va fi imediat acoperit cu un strat de oxid, aproape indiferent de mediul înconjurător, cel puțin pentru majoritatea materialelor structurale. Astfel de straturi foarte subțiri aderă puternic la suprafața materialului și nu sunt îndepărtate cu ușurință.

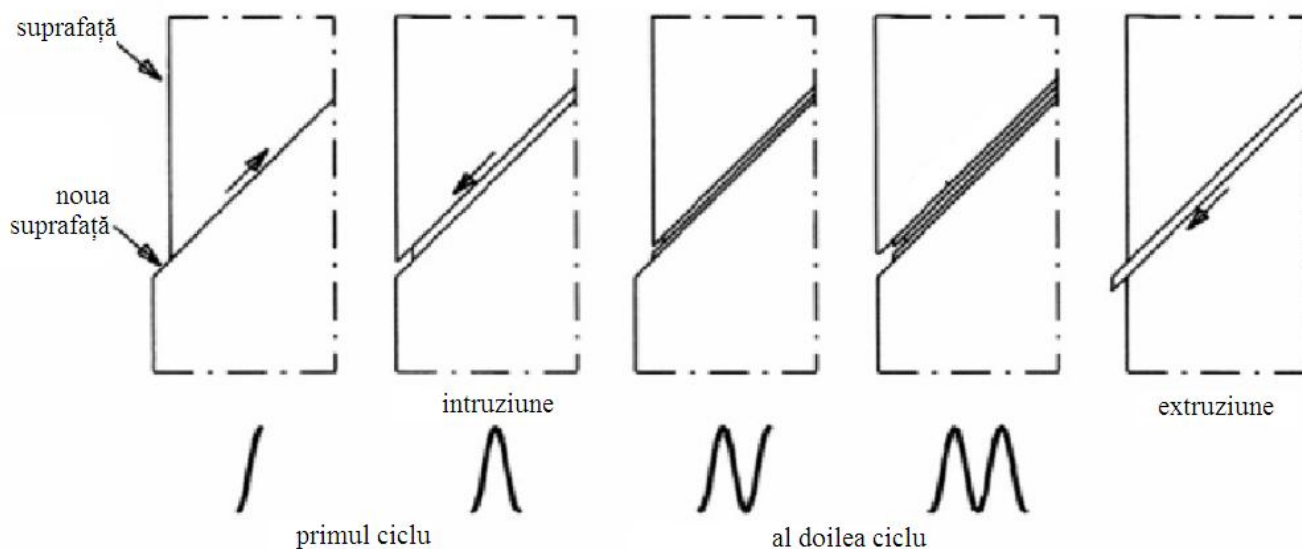


Fig. 2.2. Alunecarea ciclică conduce la nucleerea fisurii

Un alt aspect semnificativ îl reprezintă faptul că, în timpul solicitării și producerii alunecării, în benzile de alunecare apar zone de „întărire”. În consecință, la descărcare (Figura 2.2b), pe aceeași bandă de alunecare va fi prezentă o tensiune de forfecare mai mare, acum în direcție inversă. Alunecare inversă se va produce de preferință în aceeași bandă de alunecare. Dacă alunecarea ciclică ar fi un proces complet reversibil, fenomenul de oboseală descris pe baza alunecărilor nu ar fi avut loc. În aceste condiții se pot menționa două motive care fac ca acest proces să nu fie reversibil. În primul rând, stratul subțire de oxid nu poate fi pur și simplu eliminat din etapa de alunecare. În al doilea rând, apariția zonei de „întărire” din banda de alunecare nu este un proces reversibil. Ca urmare, alunecarea inversă, deși apare în aceeași bandă de alunecare, va avea loc pe planuri adiacente paralele. Acest lucru este indicat schematic în figura 2.2b. O aceeași secvență de evenimente pot apărea în al doilea ciclu, a se vedea figura 2.2c și figura 2.2d.

Figura 2.2 oferă o imagine simplificată de unde, totuși, se pot desprinde câteva observații importante:

- (V) un singur ciclu de solicitare este suficient pentru a crea o intruziune microscopică în material, care de fapt reprezintă o microfisură;
- (II) mecanismul care apare în primul ciclu poate fi repetat în al doilea ciclu și în ciclurile următoare și poate provoca extinderea fisurii în fiecare ciclu;
- (III) inițierea primei microfisuri este de așteptat să apară de-a lungul unei benzi alunecare. Acest lucru a fost confirmat de mai multe investigații microscopice, a se vedea figura 2.3. Banda de alunecare din figura 2.3a este de fapt o microfisură așa cum se confirmă în figura 2.3b, după ce banda de alunecare este inițiată prin aplicarea unei deformății plastice de 5%. Ca urmare, o parte a acestei benzi de alunecare este deja vizibilă după o solicitare la oboseală cu o durată mai mică de 0,5%;

(IV) în *figura 2.2* schimbarea planelor de alunecare în timpul încărcării și descărcării conduce la apariția unei intruziuni, *figura 2.2d*. În cazul în care alunecarea inversă va avea loc la partea inferioară a benzii de alunecare, se obține o extrudare, a se vedea *figura 2.2e*. extrudate. Din punct de vedere al potențialului energetic aplicat alunecării, intruziunea este o consecință mai probabilă a alunecării ciclice într-o bandă alunecare;

(V) mecanismul de intruziune prezentat în *figura 2.2*, chiar dacă ar fi diferit sau mai complicat, presupune întreruperi ale legăturilor între atomi, ca urmare apare decoeziunea, fie prin tracțiune, fie prin forfecare, sau ambele. Decoeziunea apare în cazul în care, o bandă de alunecare pătrunde printr-o suprafață liberă. Ea poate apărea, de asemenea, la vârful unei fisuri nucleată prin oboseală. Întreruperea legăturilor la vârful fisurii ar putea fi, de asemenea, cauzată de generarea unei dislocații în această zonă. Este de așteptat ca decoeziunea să fie accelerată de un mediu agresiv. Datorită legăturilor mai puține din zona suprafeței libere, alunecarea se poate produce cu ușurință aici, aceasta fiind o condiție favorabilă și pentru inițierea fisurii la suprafața materialului. Deoarece distribuția tensiunilor este neomogenă, valoarea maximă a acesteia se înregistrează chiar la suprafață. În plus, rugozitatea suprafeței conduce, de asemenea, la inițierea fisurii în această zonă. Alte deteriorări ale suprafeței, cu un efect similar, sunt reprezentate de ciupiturile produse de coroziune. Ca urmare, cea mai importantă concluzie ce se poate desprinde este: la solicitarea de oboseală perioada de inițiere a fisurii este un fenomen care apare la suprafața materialului.

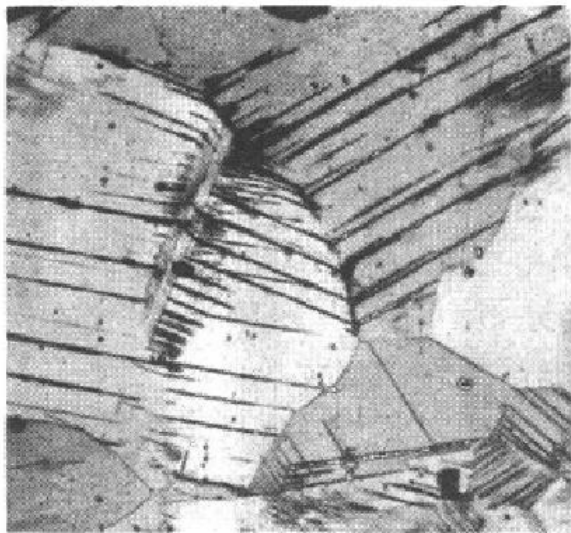


Fig. 2.3a. Benzi de alunecare

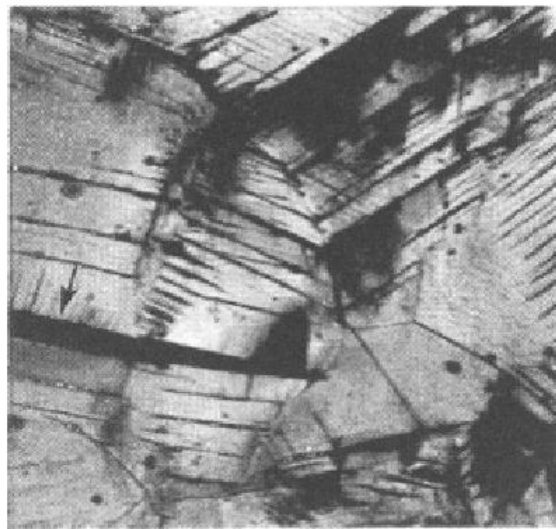


Fig. 2.3.b. Apariția microfisurii
(deformare plastică cu 5%)

Fig. 2.3. Dezvoltarea benzilor de alunecare ciclice și a microfisurii într-o probă din cupru
[Jaap]
($\sigma_m=0$, $\sigma_a=77,5$ MPa, $N=2 \cdot 10^6$ cicluri)

2.4 Propagarea fisurii

Atâta timp cât mărimea microfisurii este de ordinul unui singur grăunte cristalin, microfisura este, evident, prezentă într-un material elastic anizotrop, cu o structură cristalină și un număr de sisteme de alunecare diferite. Microfisura contribuie la o distribuție neomogenă a tensiunilor la nivel microstructural, cu o concentrație a tensiunilor vârful microfisurii. În aceste condiții pot fi activate mai multe sisteme de alunecare. Mai mult decât atât, în cazul în care fisura se propagă în anumiți grăunți, în grăunții învecinați apare o tendință de împotrivire la propagare ceea ce face ca benzile de alunecare să fie mai active. În aceste condiții, va fi tot mai dificil pentru benzile de alunecare să se orienteze după un singur plan de alunecare, paralel cu planele cristalografice. Ca urmare, ar trebui să apară plane de alunecare în direcții diferite. Direcția de propagare a microfisurii se va abate de la orientare inițială a benzii de alunecare. În general, fisura are tendința să se propage în continuare pe o direcție perpendiculară pe direcția de sollicitare, figura 2.4.

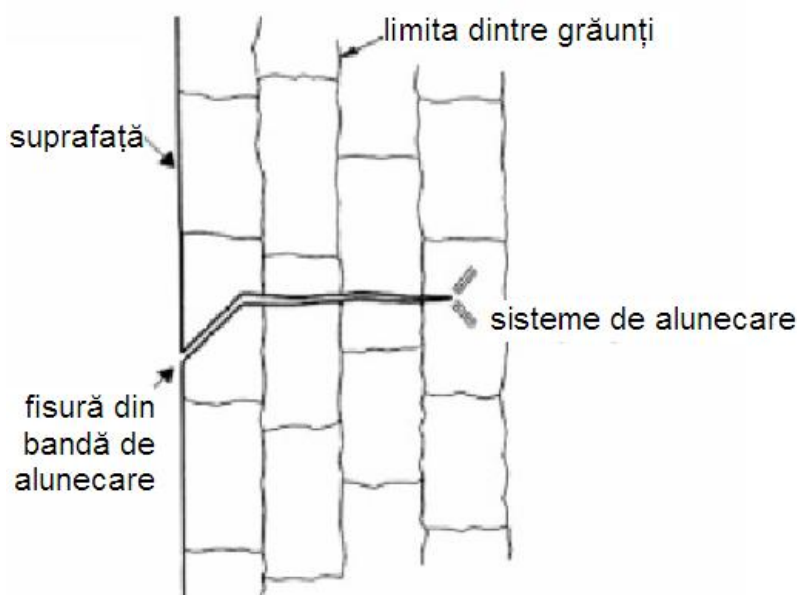


Fig. 2.4. Inițierea și propagarea microfisurii

Deoarece propagarea microfisurii depinde de ciclicitatea deformației plastice, barierele în calea benzilor de alunecare pot conduce la împiedicarea propagării fisurii. Acest lucru este ilustrat în figura 2.5. Viteza de creștere a fisurii măsurată ca lungime raportată la un ciclu de sollicitare descrește atunci când vârful fisurii ajunge la limita dintre grăunți. După trecerea prin această limită viteza de propagare a fisurii crește la trecerea prin următorul grăunte, dar scade din nou atunci când se apropie următoarea limită. După trecerea și a acestei limite, microfisura continuă să se propage cu o viteză aproximativ constantă.

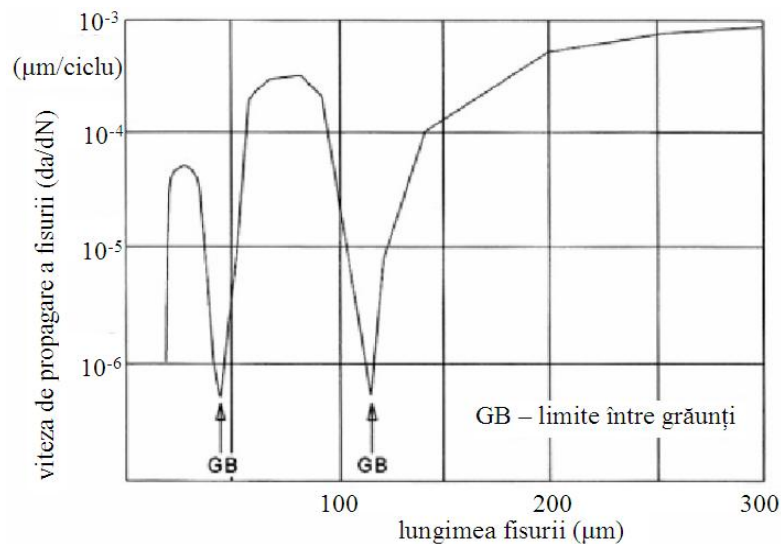


Fig.2.5. Efectul limitelor dintre grăunți asupra propagării fisurii într-un aliaj din aluminiu {Jaap}

În literatura de specialitate se regăsesc mai multe observații cu privire la propagare inițial neomogenă a fisurii care se propagă cu o viteză relativ mare la început care scade sau chiar devine zero din cauza barierelor structurale ale materialului. Cu toate acestea, lucrurile se schimbă în condițiile în care fisura se propagă printr-un număr suficient de grăunți, așa cum este indicat schematic în *figura 2.6*.

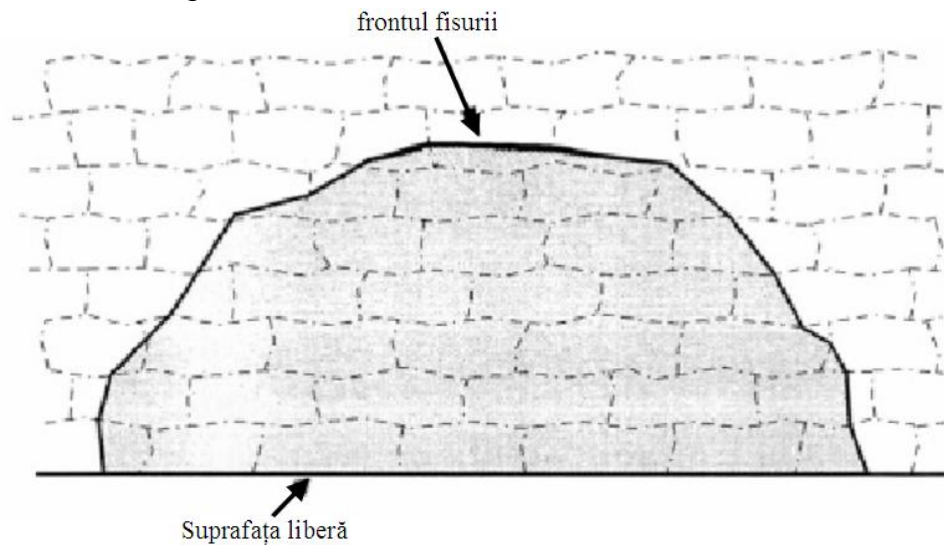


Fig. 2.6. Frontul fisurii trecând prin mai mulți grăunți

Deoarece frontul de propagare a fisurii trebuie să fie unul coerent, fisura nu se poate propaga pe direcții arbitrare prin grăunți, viteza de propagare a fisurii fiind dependentă de propagarea prin grăunții adiacenți. Această continuitate previne apariția unor gradienti în ceea ce privește viteza de propagare a fisurii de-a lungul frontului acesteia. De îndată ce numărul grăunților în lungul frontului fisurii devine suficient de mare, propagare fisurii apare, mai mult sau mai puțin

ca un proces continuu de-a lungul frontului fisurii. Frontul fisurii poate fi aproximat cu o linie continuă de formă semi-elică. Care va fi viteza de propagare a fisurii va depinde doar de rezistența sau tenacitatea materialului. În acest moment, cele două aspecte enumerate mai sus și care țineau de caracteristicile suprafeței nu mai sunt relevante pentru propagarea fisurii în interiorul materialului. Acest lucru conduce la o a doua concluzie importantă: tenacitatea la propagarea fisurii, atunci când aceasta pătrunde în material depinde doar de proprietățile intrinseci ale materialului, nemaifiind un fenomen care să depindă de caracteristicile suprafeței.

2.5 Mecanismul propagării fisurii de oboseală

În secțiunea precedentă, au fost discutate perioadele de inițiere și propagare a fisurii. Tranziția de la perioada de inițiere la perioada de propagare nu a fost încă definită. Definiția nu poate fi dată în termeni cantitativi, dar într-un mod calitativ poate fi utilizată următoarea definiție: perioada de inițiere se presupune a fi încheiată când dezvoltarea în continuare a fisurii nu mai depinde de condițiile determinate de suprafața liberă.

Acest lucru implică faptul că, propagarea fisurii începe atunci când, viteza și direcția propagării fisurii este controlată doar de rezistența intrinsecă a materialului la propagarea fisurii. Mărima atinsă de microfisură la tranziția de la perioada de inițiere la perioada de propagare va fi semnificativ diferită pentru diferite tipuri de materiale. Tranziția depinde de barierele micro-structurale care urmează să fie depășite de către un microfisura în propagare, iar aceste bariere nu sunt aceleași în toate materialele.

Deoarece, în perioada de inițiere a fisurii viteza de propagare a acesteia este încă scăzută, această perioadă poate acoperi o parte semnificativă din întreaga durată de viață a materialului solicitat la oboseală. Acest lucru este ilustrat de figura 2.7 în care se arată o imagine generalizată a stadiilor de inițiere și propagare ale fisurii, care arată schematic procesul de dezvoltare a fisurii în funcție de durata de viață procentuală, n/N , cu n ca numărul de cicluri de oboseală și N numărul de cicluri până la cedare. La cedare completă avem $n/N = 1 = 100\%$.

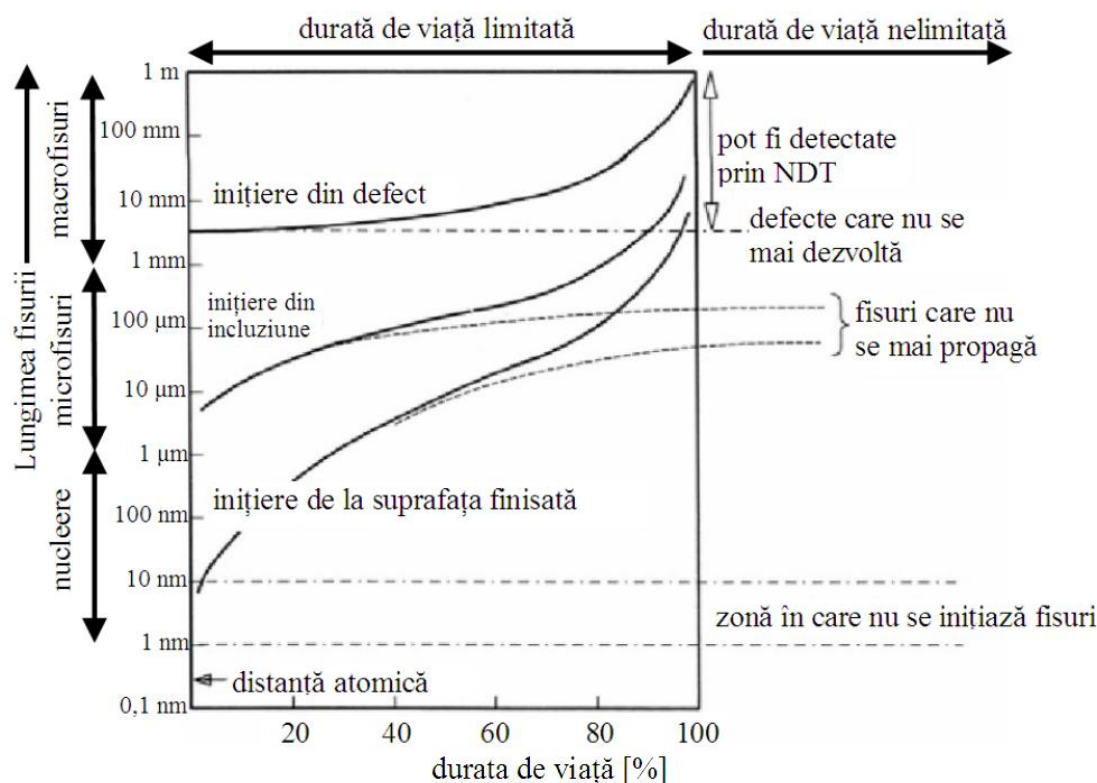


Fig. 2.7. Diferite scenarii de inițiere și propagare a fisurii

Există trei curbe În figura 2.7 sunt prezentate trei curbe, toate în acord cu inițierea fisurii prin oboseală dar cu valori diferite a lungimii fisurii inițiale. Curba inferioară corespunde inițierii microfisurii de la suprafața materialului. În acest caz se poate aplica mecanismul de inițiere prezentat în figura 2.2. Curba de mijloc prezintă o fisură dezvoltată de la nivelul unei incluziuni existente în material. Curba de sus este asociată cu o fisură pornind de la un defect major de material, care, în mod obișnuit nu ar trebui să fie prezent în material, cum ar fi defecte într-o asamblare sudată. Figura 2.7 ilustrează câteva aspecte interesante:

- (I) ordonata ce reprezintă lungimea fisurii este trasată la scală logaritmă, variind de la 0,1 nanometri (nm) până la 1 metru. (1 nanometru = 10^{-9}). Microfisurile pornind de la suprafața liberă pot avea o lungime de sub un micron ($1 < 1 \mu\text{m}$). Microfisurile ce se propagă de la nivelul incluziunilor au dimensiune similară cu cea a incluziunilor. Această dimensiune poate fi încă în gama de sub-milimetru. Numai pornind de la defecte macroscopice fisurile pot avea o lungime care să ne permită detectarea nedistructivă (NDT – Non Destructive Testing);
- (II) cele două curbe inferioare ilustrează faptul că cea mai mare parte a vieții de oboseală este cheltuită cu o dimensiune a fisurii mai mică de 1 mm, adică cu o dimensiune a fisurii practic invizibilă;
- (III) prin liniile punctate din figura 2.7 se indică posibilitatea ca fisuri nu cresc întotdeauna până la cedare. Aceasta implică faptul că trebuie să fi existat bariere în materialul care a oprit propagarea fisurii.

Figura 2.7 prezintă scenarii generalizate legate de eventuale evoluții ale fisurii. Pentru a înțelege mai multe despre fenomenul de oboseală, în diferite condiții practice, trebuie avute în vedere câteva aspecte ale acestui mecanism, și anume:

- (1) natura cristalografică a materialului;
- (2) inițierea fisurii din incluziuni;
- (3) fisuri mici, bariere la propagarea fisurii, praguri la propagarea fisurii;
- (4) numărul de fisuri inițiate
- (5) efectele condițiilor de suprafață;
- (6) propagarea macrofisurilor și existența striatiilor;
- (7) efectele mediului înconjurător;
- (8) Solicitări de tracțiune și torsiune ciclică.

2.5.1 Aspecte cristalografice

Așa cum sa arătat înainte, creșterea inițială a unui microfisuri arată tendința acesteia de a se dezvolta de-a lungul unei benzi alunecare. Prin urmare, este de așteptat ca aspectul cristalografic al unui material să aibă o anumită influență asupra comportamentului mecanic în timpul perioadei de inițiere. Proprietățile cristalografice variază de la un material la altul. Ca o consecință, inițierea microfisurii depinde caracteristicile materialului. Aspecte care urmează a fi menționate aici sunt:

- tipul de rețea cristalină, anizotropie elastică, alotropie;
- sisteme de alunecare, alunecarea secțiunilor transversale;
- dimensiunea și forma grăunților;
- variația de orientare a cristalelor în raport cu grăunții rețelei cristaline.

Cele trei rețele cristaline bine cunoscute sunt: cubică cu fețe centrate (FCC) pentru Al, Cu, Ni și Fe- γ , cubică cu volum centrat (CVC) pentru Fe- α și Ti- β , și hexagonală pentru Ti- α și Mg. Comportamentul elastic și plastic al unui material depinde de structura sa cristalină dar chiar și pentru aceeași rețea cristalină pot apărea diferențe mari. Anizotropia elastică poate varia în mod considerabil, așa cum este ilustrat de modulul lui Young E din tabelul de mai jos [Jaap].

Material	$E_{\max}[111]$ [MPa]	$E_{\min}[111]$ [MPa]	E_{\max}/E_{\min}
Fe- α	284500	132400	2,15
Al	75500	62800	1,2
u	190300	66700	2,85

Anizotropia este mai mare pentru cupru, mai mică pentru Al, cu o Fe- α (ferită) aflându-se într-o poziție intermediară. Oboseala apare, în general, la un nivel de tensiune redus, fără deformare macroplastică inițială. Ca rezultat anizotropie elastică, distribuția tensiunii de la grăunte la grăunte este neomogenă, cu reprezentare schematică prezentată în *figura 2.8* pentru care distribuția omogenă a tensiunii la nivelul unui grăunte este o aproximare. Neomogenitatea în distribuția tensiunii la nivelul grăunților este mai mică pentru aluminiu și aliajele sale, dar mult mai mare pentru oțel și cupru. Cei mai mulți grăunți în aliajele din aluminiu prezintă o distribuție similară a tensiunilor, în timp ce pentru oțel și alte materiale anizotrope, nivelul tensiunilor variază în mod semnificativ de la un grăunte la altul.

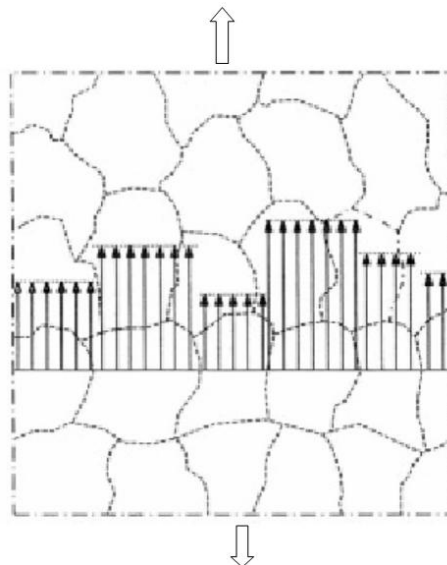


Fig. 2.8. Reprezentarea stării neomogene de tensiuni de la nivelul grăunților cristalini

Sistemele de alunecare sunt caracterizate de plane cristalografice pe care alunecare apare pe direcții cristalografice alunecare. Sistemele de alunecare au fost studiate și sunt bine documentate în cărțile din domeniul științei materialelor. Posibilitatea de alunecare a unei suprafețe este importantă pentru mișcările dislocației în scopul de a ocoli obstacolele și de a continua să alunece pe planuri adiacente paralele. Alunecare planelor este mai ușoară în cazul în care energia stocată în material este mare. Aluminiul reprezintă un exemplu de alunecare facilă iar nichelul un exemplu de alunecare dificilă. Ca urmare, liniile de alunecare din Al sunt ondulate și ciclice și pot conduce la benzi de alunecare cu o grosime măsurabilă. În aliaje de Ni și Cu, liniile de alunecare sunt definite mult mai puternic ca fiind linii drepte. Mai mult decât atât, în cazul în care numărul sistemelor de alunecare activat este limitat, microfisurile pot persista mai mult timp în creștere de-a lungul direcțiilor cristalografice. Acest comportament poate continua până la o lungime a fisurii de ordinul a 1 mm, în timp ce pentru fisuri produse în aliaje de Al pot fi mai mici de 0,1 mm caz în care se dezvoltă mai mult sau mai puțin pe direcție perpendiculară pe direcția de solicitare. Aceste observații arată că microcomportamentul în dezvoltarea și propagarea fisurii poate fi esențial diferit pentru diferite tipuri de materiale.

Aspecte macroscopice și microscopic ale ruperii prin oboseală

Examinând suprafața ruptă a unei piese se poate determina dacă materialul a cedat 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 rupte prin oboseală se pot vedea în *figura 2.2*.

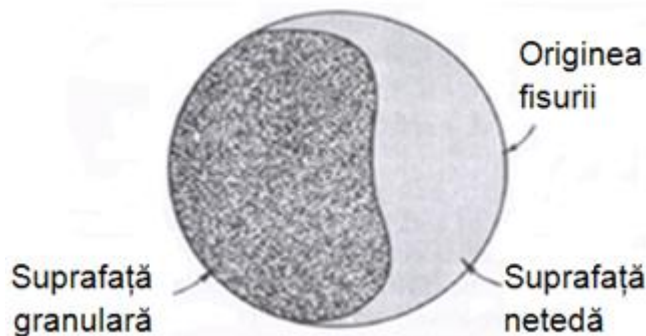


Fig. 2.2. Suprafață ruptă prin oboseală

Suprafața rugoasă indică ruperea fragilă iar suprafața netedă indică propagarea fisurii

Anumite suprafețe care au cedat prin oboseală prezintă așa-numitele striții, *figura 2.3a*. Acestea apar la materialele în care alternează perioadele de solicitare cu cele de repaus și în care variază intensitatea solicitării. Distanța dintre striții depinde de atât de perioada de timp de utilizare cât și de amplitudinea solicitării.

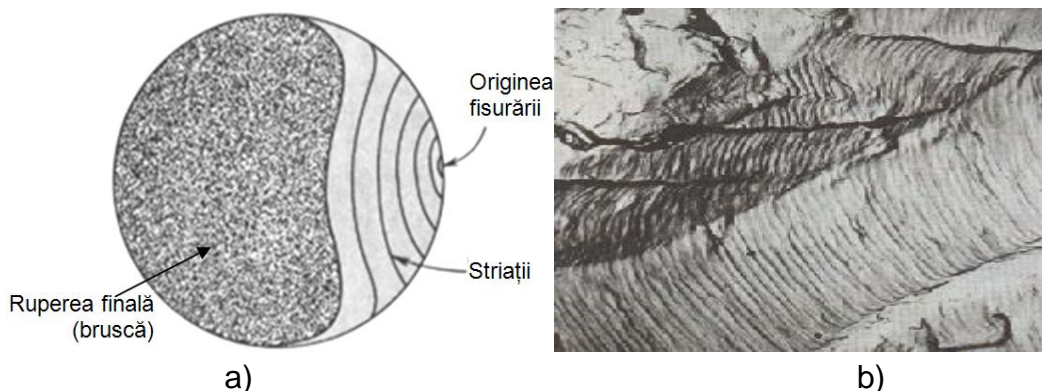


Fig. 2.3. a): Striții pe regiunea de propagare asociate cu variația în amplitudine și timp a solicitării; b): Exemplu de striții găsite pe suprafața fisurată

2.2 Inițierea fisurii de oboseală

Abordarea la nivel microscopic a mecanismelor specifice acestei etape constituie obiectul multor cercetări de actualitate. 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 deformări plastice în volume limitate de material unde se inițiază fisurile de oboseală. În *figura 2.4* se ilustrează 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, sau scoaterea din funcțiune a piesei. Fisurile pot fi inițiate ca urmare a multiplelor cauze, trei dintre acestea care se pot observa în *figura 4* fiind: *nucleerea (inițierea)* datorită planelor de alunecare pe direcții preferențiale, *crestături* la suprafață sau *defecte interioare*.

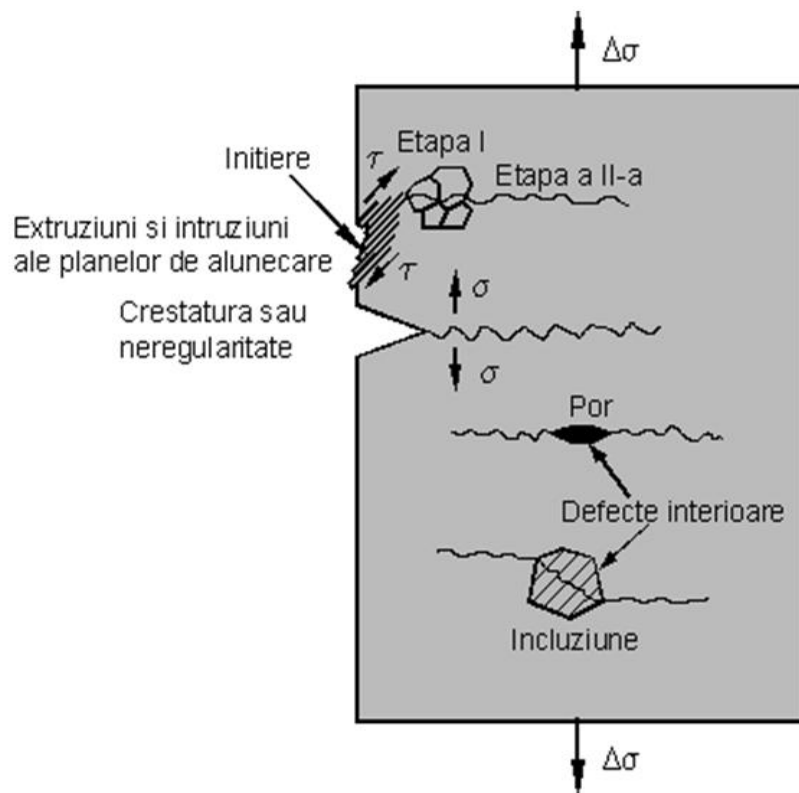


Fig. 2.4. Posibilități de nucleere și propagare a fisurilor

2.3 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 2.5 a* 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 2.5 b* 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 2.5 a*.

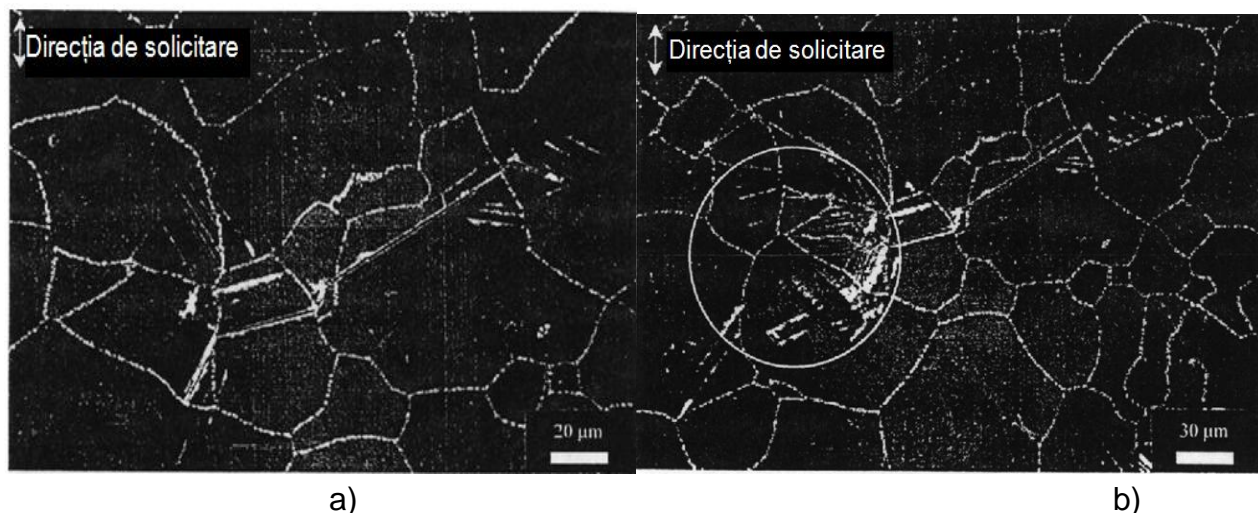


Fig. 2.5. Microfisură formată în lungul planelor de alunecare

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 2.6* 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 2.6a* 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.

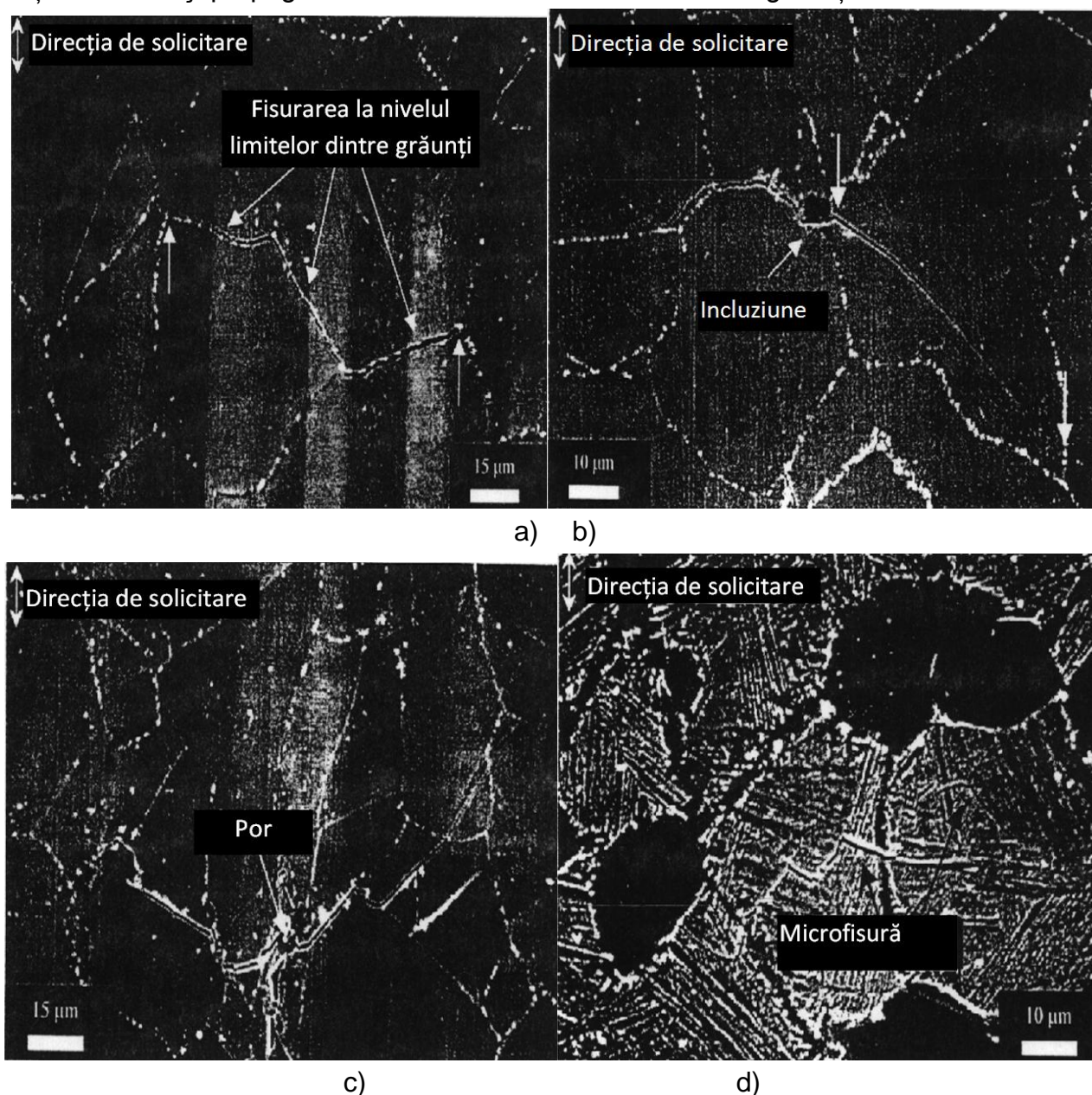


Fig. 2.6. Mecanisme de fisurare

Fisurile pot fi inițiate de asemenea, de la nivelul *incluziunilor, porilor sau altor neregularități microstructurale*. În *figura 2.6b* 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 2.6c* 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 2.7* 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 2.7*.

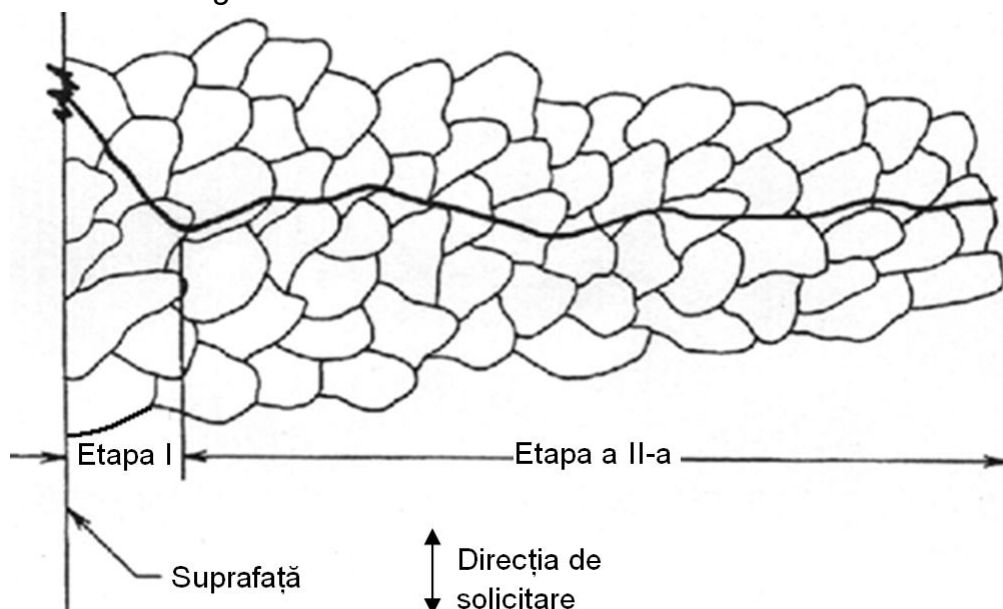


Fig. 2.7. Etapele propagării fisurii de oboseală

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 2.8* – fisuri transcristaline.



Fig. 2.8. Fisură transcristalină

Dezvoltarea microfisurilor prin limitele grăunților (intercristalină) depinde de material, încărcare, condițiile de mediu, etc. În *figura 2.9* 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 *striatii* apreciabile și de asemenea o *coalescență a microgolurilor*. Undele din *figura 2.6a* 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.

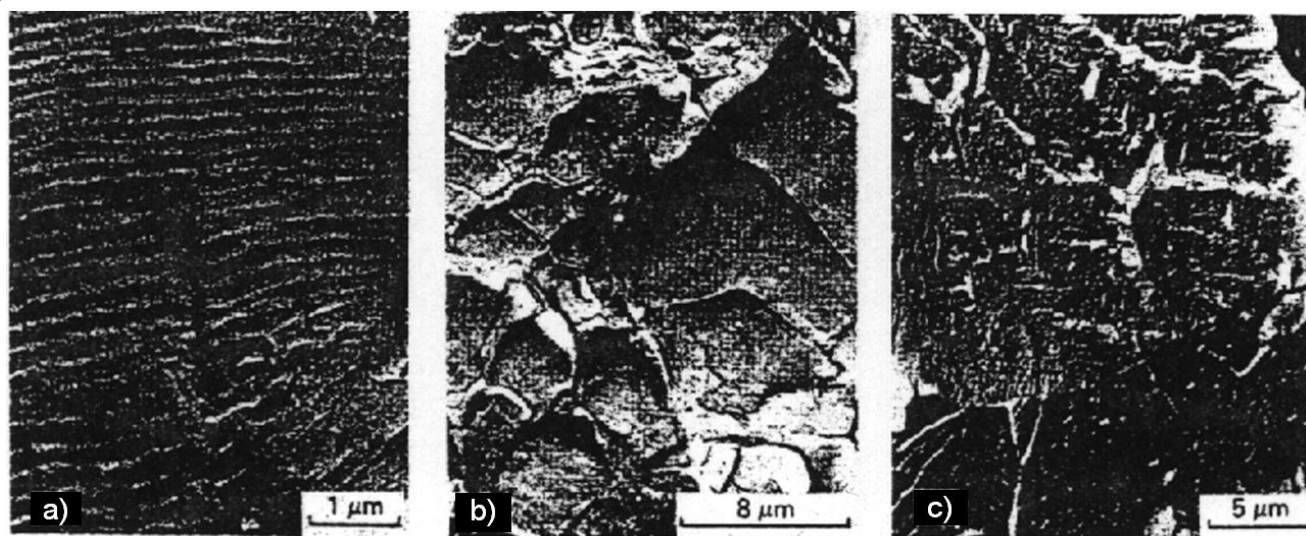


Fig. 2.9. Moduri de fisurare la oboseală

Coalescența microgolurilor are loc prin nucleerea acestora în timpul deformării plastice zonale. Coalescența microgolurilor este prezentată în *figura 2.9b*. 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 2.9b*. *Clivajul sau microclivajul* implică fisurarea în lungul planelor cristalografice precise și este transcristalină. Suprafețele rupte prin clivaj sunt în general drepte, *figura 2.9c*. 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 2.10* [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.

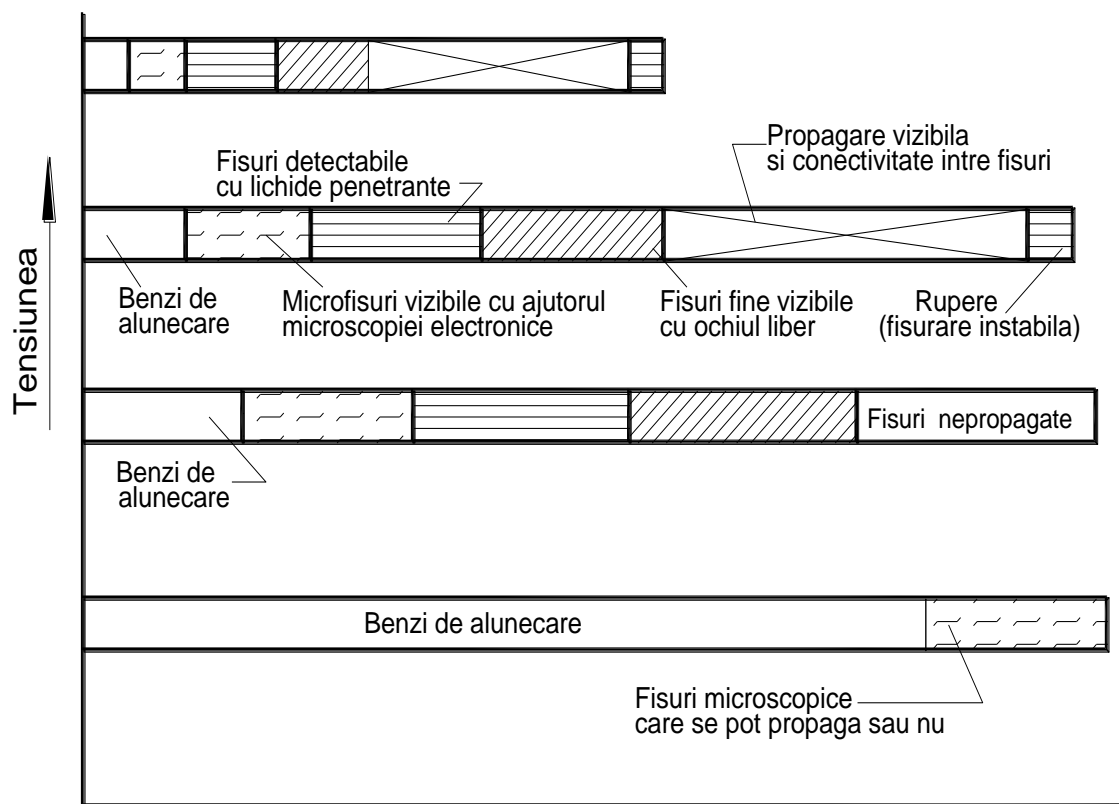


Fig. 2.10. Reprezentarea schematică a procesului de oboseală

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.

2.5.6 Aspectul fisurii în perioada de propagare

Așa cum sa discutat înainte, în perioada de propagare fisura nu mai este afectată de condițiile impuse de suprafața materialului ci doar de caracteristicile intrinsece ale materialului în volumul său. De obicei, în această perioadă, fisura se propagă pe direcție perpendiculară cu tensiunea normală. În condițiile de încărcare uniaxială în probe simetrice, va rezulta că direcția de propagare macroscopică a fisurii va fi perpendiculară pe direcția de încărcare. După ce fisura s-a depărtat de suprafața liberă, vor apare deformații prin alunecare prezente în mai multe plane. *Figura 2.24* prezintă o vizualizare schematică a unui mecanism posibil pentru extinderea fisurii pe perioada unui ciclu de solicitare.

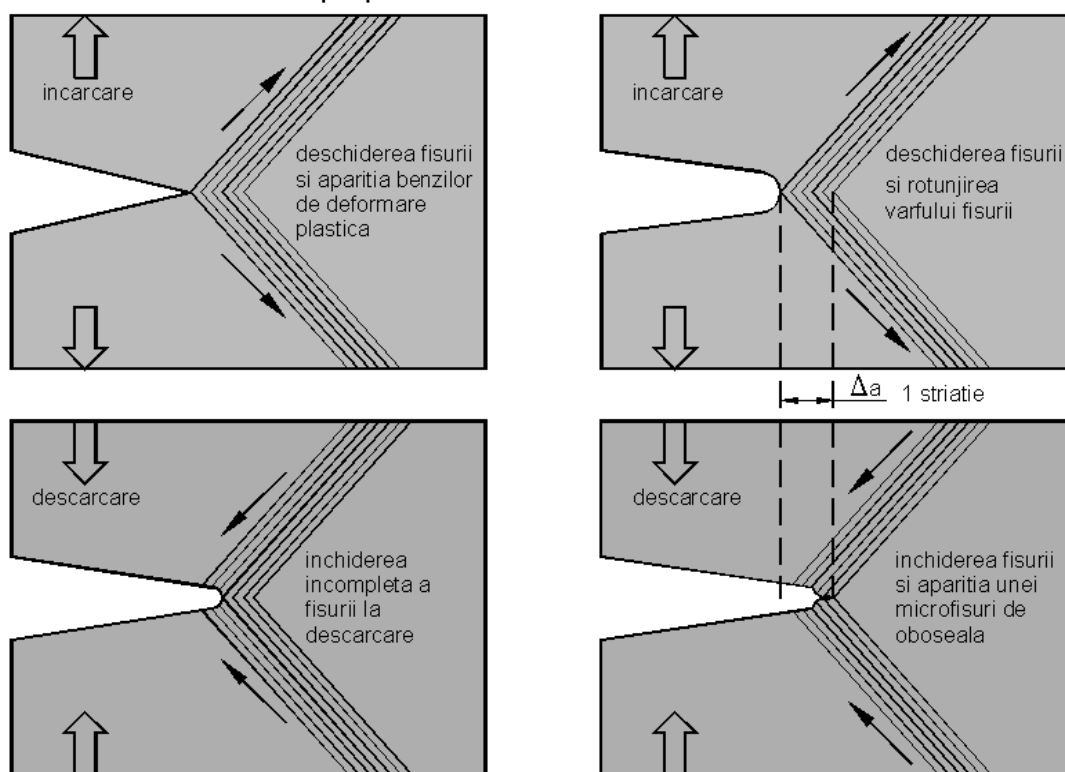


Fig. 2.24. Propagarea fisurii în cadrul unui singur ciclu de solicitare

În timpul încărcării fisura va fi deschisă de deformările plastice care apar la vârful fisurii, care, în *Figura 2.24* ar trebui să apară pe două sau mai multe sisteme de alunecare simetrice. Analiza tensiunii într-un solid cu o fisură propagată indică faptul că zonele de alunecare din *Figura 2.24* sunt într-adevăr zone cu tensiune de forfecare maximă, atât în timpul încărcării cât și în cel al descărcării. În timpul încărcării, deformarea prin alunecare va cauza propagarea fisurii. De asemenea, pentru macrofisuri, extinderea acestora implică decoeziunea rețelei cristaline, care trebuie asociată cu dislocațiile ce apar la vârful fisurii. De asemenea, pare plauzibil faptul că extinderea fisurii are loc în fiecare ciclu de încărcare, așa cum este prezentată în *Figura 2.24*.

Deformările prin alunecare nu sunt complet reversibile datorită zonelor de „întărire” ce apar, în special la vârful fisurii, dar și datorită altor mecanisme posibile. Ca urmare, după un ciclu de solicitare fisura nu va fi complet închisă. Așa cum este ilustrat în *figura 2.24*, o „creastă” de micro-deformare plastică apare în zonele superioară și inferioară apropiate de vârful fisurii fiind creată de un ciclu de solicitare. Aceste creste sunt numite "striații", care poate fi observate pe suprafața de rupere la oboseală cu ajutorul microscopului electronic. Deși aceste imagini au fost deja observate cu mult timp în urmă [17, 18] cu ajutorul microscopului optic, imagini mult mai bune au fost obținute la microscopul electronic, inițial la microscop electronic cu transmisie (TEM) și mai târziu la Scanning Electron Microscope (SEM). O imagine ilustrativă în acest sens este prezentată în *Figura 2.25*.

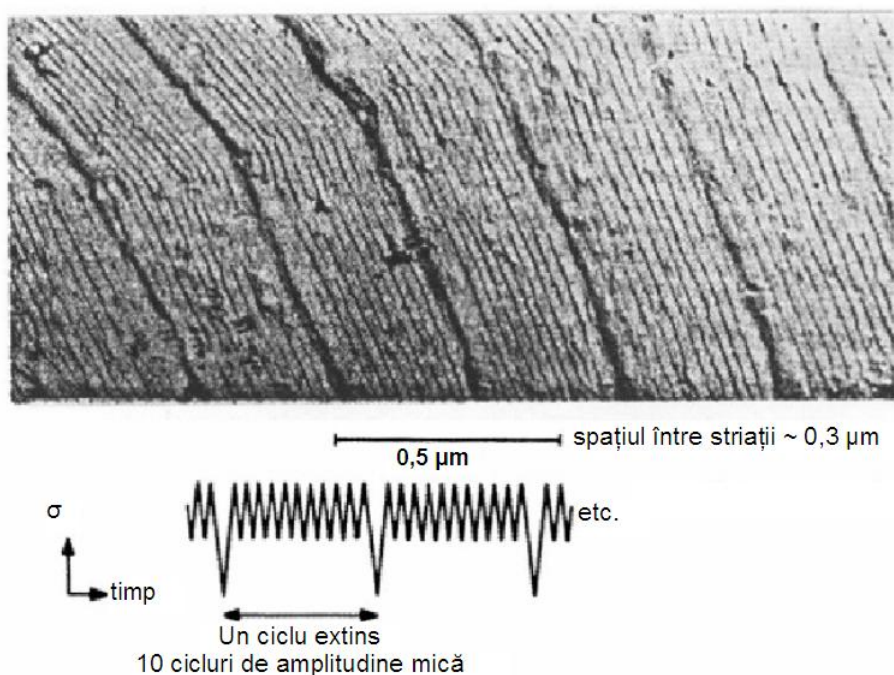


Fig. 2.25. Corespondență între striatii și ciclurile de solicitare în timpul propagării fisurii într-o placă din aluminiu (NLR, Amsterdam)

O probă plată din aluminiu a fost încărcată la 10 cicluri de solicitare cu amplitudine mică și un ciclu de solicitare cu amplitudine mai mare. Din *figura 2.25* se constată că există o strictă corespondență între solicitare și amprenta striatiilor rămase în zona fisurii propagate. Este evident faptul că cele 10 cicluri de solicitare cu amplitudine mai mică sunt responsabile pentru striatiile mici în timp ce ciclul de solicitare cu amplitudine mare a condus la apariția adânciturii mai mari, marcată prin zona întunecată din *figura 2.25*. Aceste imagini dovedesc faptul că extinderea fisurii a avut loc în fiecare ciclu al solicitării. O asemenea vizualizare permite determinarea vitezei de propagare a fisurii, dată de mărimea da/dN , (extinderea fisurii pe ciclu de solicitare). Spațiul dintre 10 striatii este de aproximativ $0,3\ \mu\text{m}$ ceea ce ar conduce la o viteză de propagare a fisurii de $0,03\ \mu\text{m}/\text{ciclu}$.

Apariția striatiilor pot oferi informații importante pentru analiza cedărilor care apar în funcționare. Se poate concluziona că, dacă în imaginea fractografică apar striatii este de presupus că ruperea s-a produs datorită sarcinii ciclice. Mai mult decât atât, striatiile pot oferi informații cu privire la direcția și viteza de propagare a fisurii. Din păcate, striatiile nu sunt la fel de vizibile pentru toate materialele. Cele mai multe asemenea striatii se pot observa pe aliajele din aluminiu. Cu toate acestea, s-au observat striatii și pe diverse tipuri de oțeluri, aliaje de titan și alte aliaje, deși mai puțin abundente și cu striuri nu foarte bine definite. În cazul în care striurile nu pot fi observate nu trebuie să se ajungă imediat la concluzia că oboseala nu a avut loc.

Geometria vârful fisurii rotunjite din *figura 2.24* este una destul de simplă. În realitate ar putea fi mult mai complexă. Mecanismul de propagare a fisurii de oboseală la vârful fisurii a fost un subiect de ample analize în literatura de specialitate. În *Figura 2.26* sunt prezentate două modele bine-cunoscute. Ambele modele conduc la crearea unei striatii în fiecare ciclu, numai că geometria vârfului fisurii ca și forma striatiilor rămase după descărcare sunt diferite. Primul model dat McMillan și Pelloux [19] este similar cu cel prezentat în *figura 2.24*. Aceasta presupune faptul că în timpul descărcării vârful fisurii se închide. În modelul prezentat de Laird [20], în spatele vârful fisurii se creează un fel de urechi marcând sfârșitul extinderii fisurii într-un ciclu. Deoarece formarea striatiilor este rezultatul deformației plastice ciclice, este foarte posibil ca geometria striatiilor să depindă de tipul de material. Modelul propus de McMillan / Pelloux a fost dezvoltat pentru aliaje din aluminiu în timp ce modelul lui Laird se poate aplica pentru metale nealiat.

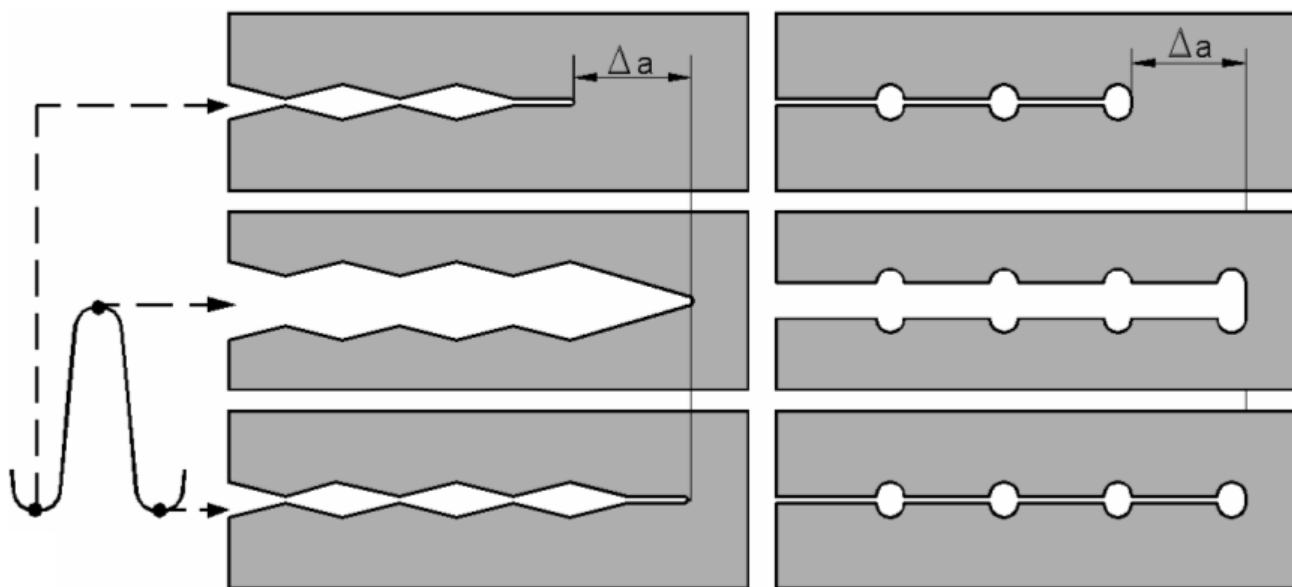


Fig.2.26. Două modele de striații formate în timpul propagării fisurilor prin oboseală

Studii privind mecanismul de propagare a fisurii sub încărcări ciclice au fost făcute prin analiza fractografică. Cu toate acestea au fost și mai sunt încă anumite dificultăți de interpretare a imaginilor obținute. Observațiile privind propagarea fisurii de oboseală la suprafața materialului nu relevă același tip de comportament ca la interiorul materialului unde fisura posedă un front propriu de propagare. La suprafața liberă, constrângerile la deformare sunt diferite de cele de la interiorul materialului. La interiorul materialului, observații cu privire aspectul striatiilor se pot face numai după deschiderea fisurii de oboseală. Fractografia ne oferă topografia finală nu și situația în timpul procesului dinamic de extindere și închidere a vârfului fisurii. În plus, dimensiunile privind detaliile striurilor sunt în zone submicronice, caz în care observațiile sunt dificile.

O excepție de la propagarea fisurii după o direcție perpendiculară pe direcția de solicitare se poate observa la unele materiale cu ar fi aliajele din aluminiu sau unele oțeluri. Propagarea fisurii începând de la suprafață are loc după plane de alunecare dispuse după o direcție de 45° în raport cu zona centrală a frontului fisurii, figura 2.38. Lățimea acestor plane de forfecare crește pe măsură ce fisura avansează până când acoperă întreaga lățime a probei. Inițierea acestui tip de fisurare are loc la suprafața materialului și, ca urmare, este influențată de fenomenele specifice ce apar la suprafață. Posibilitățile de deformare plastică la vârful fisurii în cazul în care frontul fisurii întâlnește suprafața liberă sunt mai puțin restrictive decât la mijlocul materialului. Acest lucru permite apariția deformărilor plastice de forfecare, care conduc la apariția marginilor din figura 2.38.

Aceste margini ce se formează datorită forfecării prezintă anumite similitudini cu cele apărute la ruperea prin încercare statică, la fel, în apropierea suprafeței materialului. Predicția direcției de propagare în continuare a unei astfel de fisuri este greu de realizat.

Marginile de forfecare apărute implică faptul că, observațiile microscopice din materialul suprafeței exterioare nu sunt neapărat caracteristice pentru mecanismul de oboseală de la subsuprafața materialului.

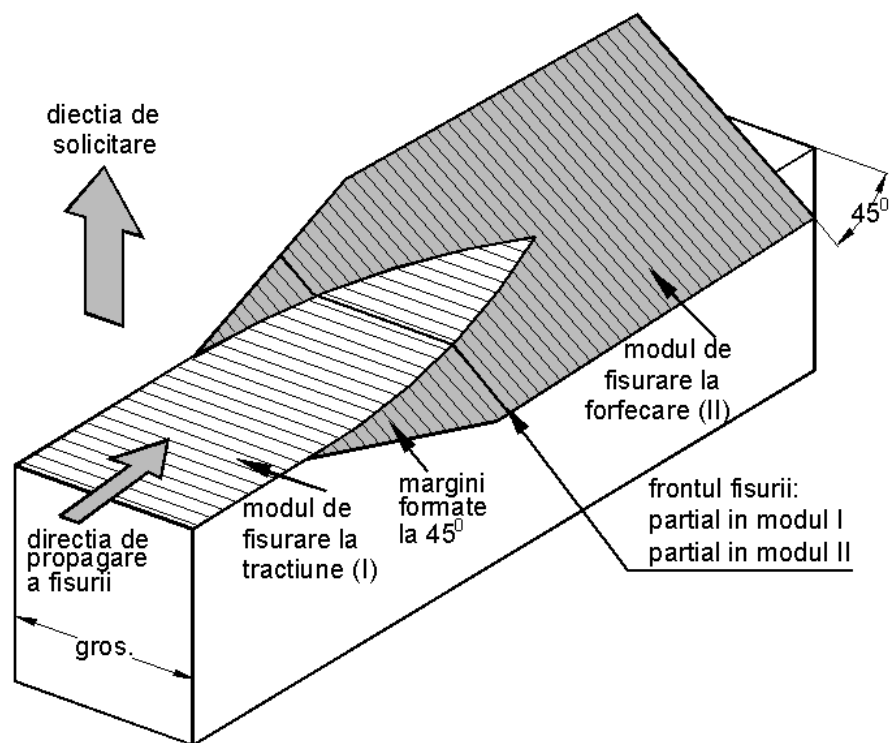


Fig. 2.38. Tranziția propagării fisurii de la modul I la modul II

2.5.8 Solicitare ciclică de tracțiune și torsiune

Așa cum s-a arătat anterior, alunecarea ciclică reprezintă fenomenul preponderent pentru explicarea nucleației și propagării inițiale a microfisurilor. Se va considera nucleația fisurii într-o probă netedă, fără concentratori de tensiune, pentru două cazuri de încărcare: tracțiune ciclică și torsiune ciclică, figura 2.31.

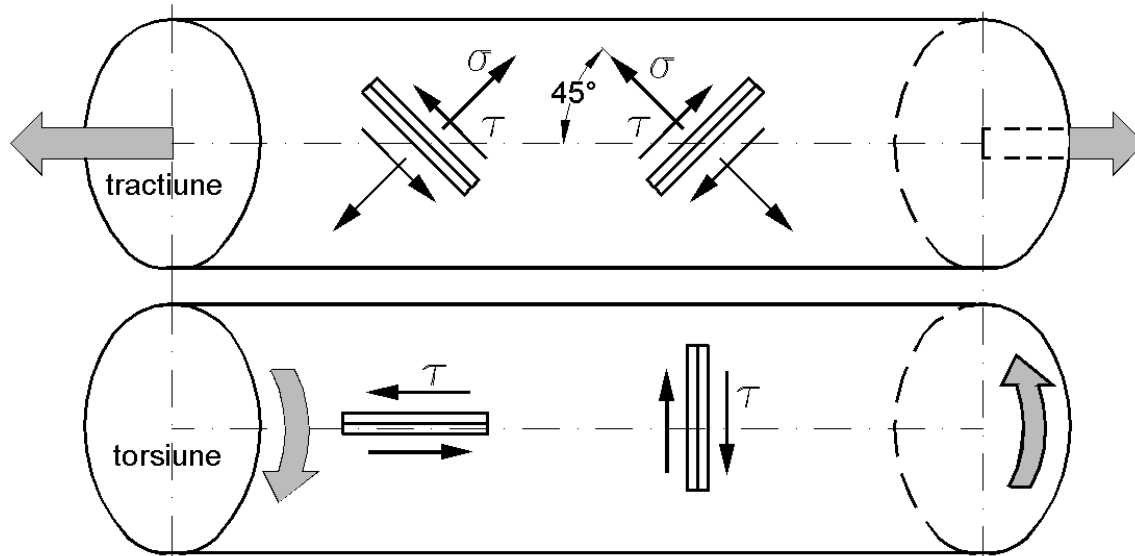
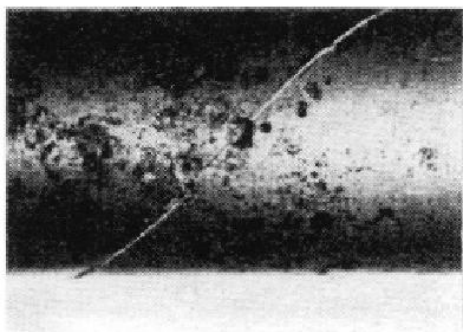


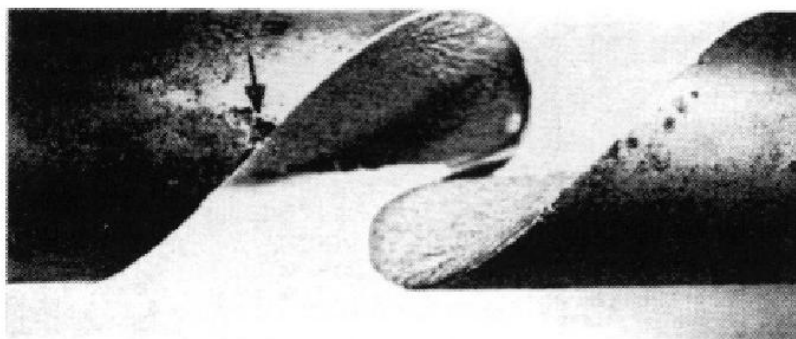
Fig.2.31. Planele de alunecare pe direcția tensiunii tangențiale

Sub solicitarea de tracțiune ciclică tensiunea de forfecare maximă apare după o direcție orientată sub un unghi de 45° față de axa longitudinală. Sub solicitarea de torsiune ciclică, planele cu tensiune de forfecare maximă sunt perpendiculare și paralele cu axa longitudinală. O diferență importantă între cele două sisteme de încărcare o reprezintă faptul că în planul tensiunii de forfecare maximă în cazul tracțiunii, se află și componenta normală a tensiunii ($\sigma = \tau$). În cazul torsiunii ciclice, componentă tensiunii normale este egală cu zero. Atâta timp cât inițierea fisurii se datorează în principal apariției fenomenului de alunecare în grăunții rețelei cristaline, cele două cazuri sunt diferite în esență. În cazul solicitării ciclice de tracțiune tensiunea normală tinde să deschidă microfisura și, în aceste condiții, va crește eficiența tranziției de la alunecare ciclică la propagarea microfisurii de-a lungul benzii alunecare. În cazul torsiunii ciclice, acest mecanism de deschidere a fisurii este absent. Investigațiile microscopice au arătat că nuleerea fisurii într-o bandă de alunecare aflată sub torsiune ciclică, este problematică în cazul în care amplitudinea sarcinii este relativ scăzută, fiind aproape de limita la oboseală. Pentru amplitudini mai mari ale sarcinii, peste limita de oboseală, sub torsiune ciclică sunt generate microfisuri care se dezvoltă ulterior într-o direcție perpendiculară la tensiunea normală principală.

În bara de formă cilindrică din figura 2.31 această direcție apare sub un unghi de 45° cu axa barei. În consecință, fisurile se dezvoltă sub formă de spirală în jurul axei barei. Un exemplu este prezentat în figura 2.32, unde se prezintă arborele de acționare a unui scuter, rupt prin oboseală de torsiune. Cedarea prin oboseală a început la un defect aflat la suprafața arborelui.



a) Ruperea spiralată datorată torsiunii ciclice
Nu se constată deformații plastice



b). Săgeata indica defectul de suprafață

Fig. 2.31. Cedarea prin oboseală a unui arbore pornind de la suprafață