

OBOSEALA SI ELEMENTE DE MECANICA RUPERII

CAPITOLUL 1. NOTIUNI INTRODUCTIVE

1.1. Introducere

Se cunoaște faptul că, atunci când solicitarea este statică, o piesă sau structură poate prelua sarcinile din funcționare dacă acestea nu depășesc o anumită valoare considerată maximă. Din practică s-a constatat faptul că, dacă solicitarea este variabilă, ruperea poate interveni la valori mult mai mici ale sarcinii aplicate decât cea utilizată pentru solicitarea statică. Cele mai multe echipamente și componente structurale sunt supuse la sarcini repetate, fluctuante, variabile, a căror mărime este cu mult sub sarcina de rupere determinată prin încercare statică. Exemple de echipamente și structuri supuse la încărcare prin oboseală includ: pompe, vehicule, utilaje, instalații de foraj, avioane, poduri, nave, etc. Fenomenul de distrugere prin oboseală a pieselor și structurilor este binecunoscut. Distrugerii prin oboseală au fost observate încă din secolul al 19-lea când s-au efectuat și primele investigații. O cercetare demnă de reamintit în acest domeniu a fost cea efectuată de August Wöhler. El a observat că o încercare unică, la o valoare a sarcinii mai mică decât sarcina de preluare statică a unei structuri, nu produce deteriorări ale acesteia. Dacă aceeași sarcină a fost repetată de mai multe ori, solicitarea de acest tip poate conduce la deteriorare completă. În acel moment, ruperea prin oboseală era considerat un fenomen misterios datorită faptului că nu se putea vedea și pentru că distrugerea apărea fără a da un avertisment anterior. În secolul 20, am învățat că repetarea sarcinilor de încărcare poate conduce la startul unui mecanism de oboseală în material care va conduce la nuclearea unei microfisuri, dezvoltarea acesteia, și care, în cele din urmă se va finaliza cu distrugerea piesei sau structurii. Istoria structurilor de până acum a fost marcată de numeroase cedări la oboseală a organelor de mașini, a vehiculelor în mișcare, a structurilor sudate, a avioanelor, etc. De-a lungul timpului astfel de cedări au cauzat accidente catastrofale, cum ar fi explozii sau colapsul complet al unui pod sau a altor structuri mai mari.

1.2. Noțiuni de proiectare a structurilor solicate prin oboseală

O structură ar trebui să fie concepută și produsă în așa fel încât, pe durata funcționării acesteia să nu apară cedări. O proiectare judicioasă ținând cont de fenomenul de oboseală va trebui să asigure proprietăți satisfăcătoare cu privire la durata de viață, și siguranța în exploatare. Acestea presupun o mai mare atenție la detalii, alegerea unor materiale mai puțin sensibile la oboseală, îmbunătățirea suprafeței materialului prin tratamente termice, alegerea unor tipuri alternative de concentratori, niveluri mai scăzute ale tensiunilor de solitare la sarcini dinamice. Alte tipuri de abordări în ceea ce privește proiectarea pieselor ce lucrează la oboseală sunt reprezentate de calculul duratei de funcționare (cu siguranță intrinsecă), proiectare în vederea prevenirii distrugerilor catastrofale sau în timp (protecție la coroziune), reducerea sarcinilor dinamice în serviciu, etc. Spectrul de posibilități este larg și este datorat numărului mare de variabile care

afectează comportamentul la oboseală al unei structuri. Scenarii de proiectare „împotriva” oboselii sunt influențate de întrebările generate de beneficiar: de exemplu, îmbunătățirile legate de proiectare sunt rentabile pe termen lung, îmbunătățirile sunt previzibile?, etc.

În cadrul proiectării se preferă, în general, proceduri standardizate de calcul pentru previziuni ale rezistenței la oboseală, durata de viață, propagarea fisurii și rezistența reziduală. Procedurile standardizate pot fi utile, dar trebuie să se accepte faptul că ar putea implica un risc considerabil de rezultate nesatisfăcătoare. Principalul motiv îl reprezintă faptul că astfel de proceduri de calcul pornesc de la unele condiții generalizate, care, de obicei, nu sunt similare cu condițiile problemei. Peste aceste proceduri se intervine cu înțelegerea, experiența și judecata inginerilor pentru a evalua semnificația rezultatelor acestora. Trebuie să se țină seama de faptul că astfel de predicții au o precizie și fiabilitate limitate. În cazurile în care apar unele îndoeli cu privire la rezultate, este util a se efectua teste la oboseală care să vină în sprijinul calculelor anterioare. Afirmații de genul "Experimentele nu mint niciodată" sunt bine cunoscute. De obicei un experiment este superior oricăror calcule teoretice.

Din păcate, un experiment dă rezultate aplicabile la condițiile aceluși experiment. Întrebarea care se pune este dacă respectivele condiții de testare sunt o reprezentare realistă a condițiilor în serviciu? Ca urmare, dacă proiectarea „împotriva” oboselii se face prin analize, calcule sau experimente, acest lucru necesită o cunoaștere profundă a fenomenului de oboseală în structuri și materiale și o mare varietate de condiții care pot afecta funcționarea la oboseală.

Un diagramă bloc, ce cuprinde aspectele legate de procedurile de proiectare la oboseală este prezentată în *figura 1.1*.

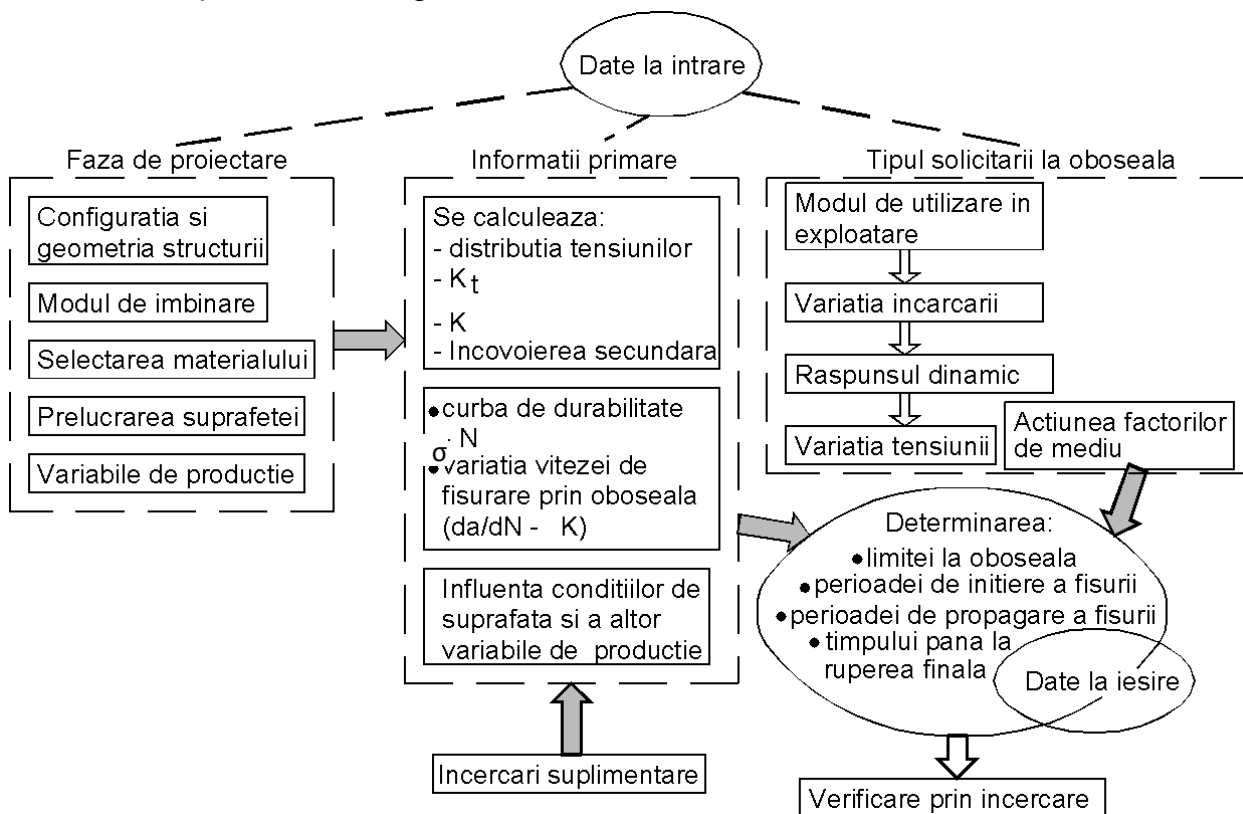


Fig. 1.1. Diagrama proiectării la oboseală a structurilor [Jaap Schijve, *Fatigue of structures and materials* -2010, pg. 5].

Prima coloană conține teme majore de proiectare, în timp ce în coloana a doua sunt enumerate diverse aspecte ce conțin informații de bază. Informațiile din ultimul câmp al acestei coloane pot fi utilizate pentru selecția materialelor, tratamente de suprafață aplicate, variabile de producție, și, de asemenea, pentru probleme de proiectare în detaliu. Pentru a se ajunge la o evaluare a calității la oboseală a unei structuri, trebuiesc făcute anumite predicții. O altă condiție este aceea de a avea informații relevante cu privire la sarcinile de oboseală. Acest lucru presupune efectuarea unui număr de pași, începând cu considerații privind utilizarea structurii în serviciu, care sunt urmate de determinarea tensiunilor pentru zonele cele mai solicitate la oboseală. O problemă specială o reprezintă modul de contabilizare a efectelor mediului. Datele experimentale utilizate în previziuni sunt, în general, obținute în condiții de laborator în care frecvența solicitării este destul de mare.

1.3. Proiectarea pentru prevenirea ruperii prin oboseală [***, Automotive steel design manual – August 2005, cap.3]

Au fost făcuți pași foarte importanți în ultimele patru decenii în privința înțelegerii și proiectării unor modalități de prevenire a ruperii prin oboseală ce apare la componente și structuri. Siguranța și fiabilitatea au devenit cuvinte complementare într-un moment în care partea economică a dictat folosirea metodelor celor mai sofisticate de proiectare, astfel încât să fie optimizată folosirea materialelor fără a crește posibilitatea apariției defectării componentelor. Grijă inginerului proiectant se îndreaptă atât asupra structurii ca întreg, cât și asupra componentelor care sunt expuse condițiilor de service ceea ce înseamnă numeroase variații ale solicitării, tensiunii și deformației, ceea ce ar putea avea ca rezultat deteriorarea prin oboseală. Având în vedere nevoia de a produce un model economic prin reducerea masei, multe dintre vechile metode de proiectare au fost înlocuite cu altele mai noi și mai adaptate. Înainte se luau în considerare doar factorii de siguranță ai componentelor datorită lipsei de cunoaștere și înțelegere a efectelor interactive. Acești factori de siguranță nu mai sunt necesari odată cu dezvoltarea de programe soft computerizate. Aceste programe pot calcula nu numai variațiile solicitării din componente, ci și tensiunile și concentrările de tensiune, fiind capabile să cuprindă volume mari de date ce cuprind istoricul solicitării în timp real. Aceste programe pot să combine respectivele date pentru a evalua evoluția oboselii întregului corp.

Obiectivul principal al acestei capitole este de a oferi o prezentare generală a diferitelor metode de proiectare la oboseală și de a indica momentul în care se poate aplica fiecare. Ca regulă generală, sunt prezentate suficiente informații pentru a putea fi efectuate calcule, ținându-se cont de proprietățile materialului și de evoluția anticipată a oboselii. Deși sunt prezentate proceduri de anticipare a evoluției oboselii, proiectantul trebuie să stabilească evoluția oboselii pentru componenta proiectată.

1.4. Pași în proiectarea la oboseală

Metodele actuale de proiectare la oboseală pentru structuri și componente au evoluat din experiența bazată pe aplicarea graduală a noilor metode urmată de corelarea cu

rezultatele bune la determinările experimentale. O privire de ansamblu a diferitelor trăsături ale procesului este arătată în *figura 1.2*, dar principiile ce au stat la baza tuturor elementelor pot fi rezumate prin următoarele trei etape de analiză, necesare pentru găsirea de soluții la probleme ce apar la solicitarea variabilă:

1. Structura sau componența istoricului solicitării: forțele și momentele exterioare aplicate asupra unei structuri sau componente se regăsesc în material și cauzează solicitarea ciclică a locațiilor critice de oboseală. Este necesară cunoașterea numărului de cicluri, a direcțiilor și mărimilor tuturor solicitărilor exterioare semnificative. Decizia privind care solicitări acționează sau ce mărimi au acestea poate fi un proces iterativ.
2. Geometria: trebuie făcută o analiză în legătură cu forma în care solicitările exterioare măsurate se translează în tensiuni sau deformații în puncte critice. Transformarea poate fi calculată prin reprezentarea tabelară a factorilor de concentrare a tensiunii, prin experimente fotoelastice, sau din rezultatele analizei elementelor finite.

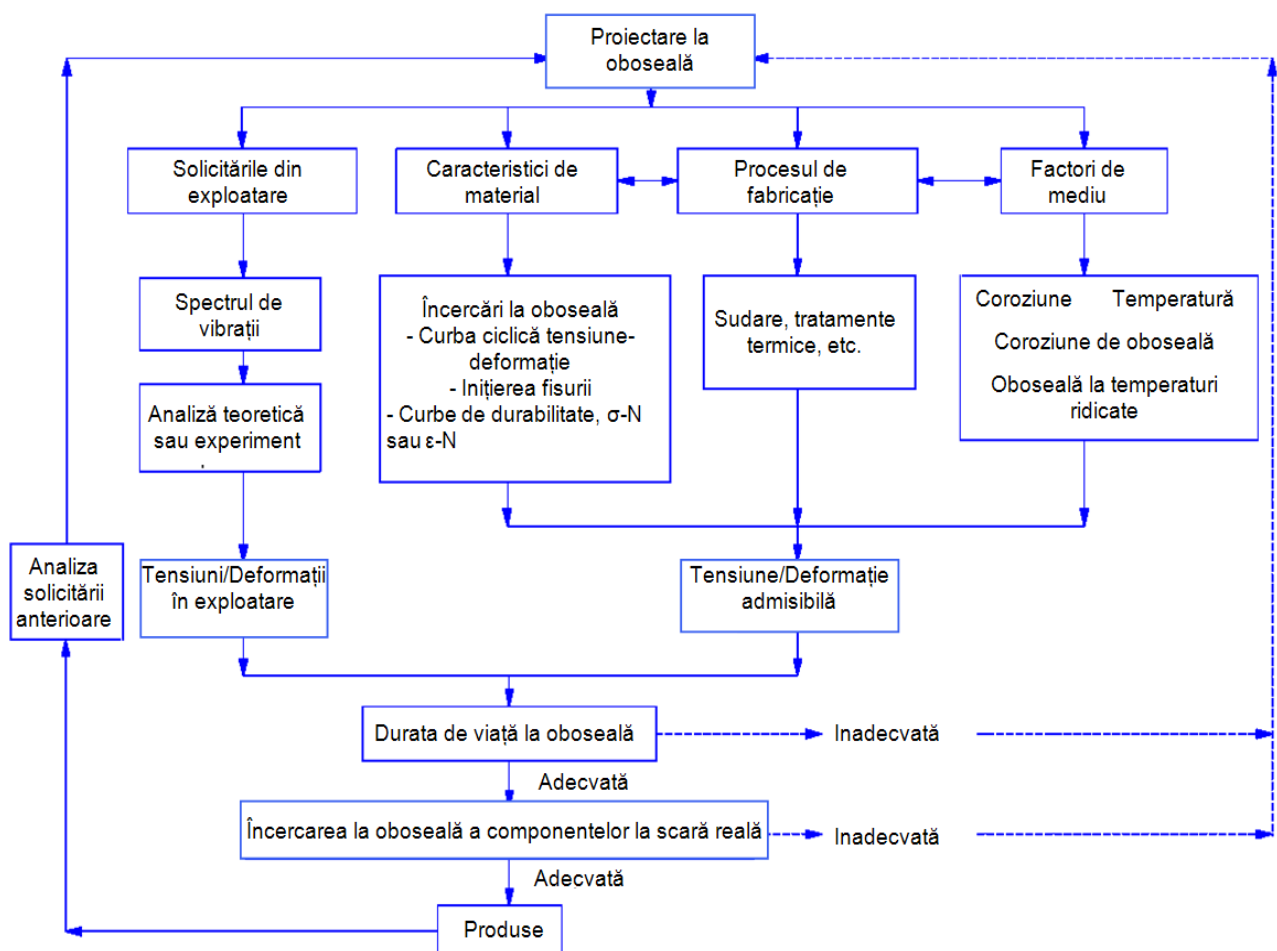


Fig.1.2. Diagrama proiectării la oboseală

3. Materialul: pentru materialele componente ale structurii trebuie să dispunem de influența solicitării de oboseală și de deformare ciclică. Informațiile despre deformarea ciclică sunt utilizate la modelarea materialelor, inclusiv la modele mai noi, multiaxiale, care urmăresc comportamentul tensiune-deformație în punctele critice. *Figura 1.2* arată că un număr de factori influențează cele trei elemente de

bază ale proiectării arătate mai sus. Exploatarea anterioară sau experiența în utilizare pot influența alegerea materialului sau pot sugera ajustarea nivelului de solicitare proiectat. Deformarea materialului poate fi influențată de modalitatea de prelucrare, cum ar fi: la rece, prin sudare, detensionarea suprafeței cu alicie metalice sau de mediile de lucru non-standard, cum ar fi coroziunea, uzura sau utilizarea la temperaturi mari. Efectele acestor variabile se exprimă prin schimbări ale curbei de tensiune-deformație. De exemplu, așa cum se observă la temperaturi mari, intervine o coborâre a curbei caracteristice.

1.5. Mecanisme de distrugere prin oboseală

Oboseala înseamnă defectarea în urma unei solicitări repetate. Există trei stadii în defectarea de oboseală:

- inițierea fisurii;
- propagarea fisurii;
- ruperea finală

În oboseala de scurtă durată a probelor încărcare axial (aproximativ $N_f < 100000$ cicluri), faza de inițiere cuprinde o perioadă foarte mică și în cea mai mare parte a perioadei se propagă o fisură de lungime mică. În oboseala pe termen lung, aproape de limita oboselii, cea mai mare parte a duratei de viață este folosită pentru a dezvolta fisuri microstructurale, în timp ce faza de propagare până la ruperea finală are o durată foarte mică. Primele două stadii nu sunt ușor de determinat cantitativ. Totuși, în proiectarea la oboseală se consideră că defectiunea a intervenit imediat ce a fost inițiată o fisură sau aceasta a devenit vizibilă. În cele mai multe cazuri, durata propagării fisurii este ignorată, asigurând în schimb un factor de siguranță împotriva unei defectiuni catastrofale. În cazul în care solicitările exterioare nu pot fi transferate către alte componente în timpul propagării fisurii, este posibil totuși ca regiuni locale supuse deformărilor plastice reversibile să nu prezinte vreo urmă vizibilă de defectiune înainte de survenirea ruperii finale în componenta respectivă. Astfel, detectarea unei fisuri nu poate fi folosită ca metodă de prevenire a defectiunii în proiectarea la oboseală. Totuși, în industriile în care componentele au un cost foarte ridicat (spre exemplu pentru presele de ștanțare), la care siguranța nu are importanță vitală, se poate utiliza tehnica analizei propagării fisurii pentru a estima durata de viață rămasă până la înlocuire.

Figura 1.3 prezintă tehnica cea mai utilizată în industria autovehiculelor. Se utilizează estimarea comportării locale la tensiuni și deformații fie pentru a calcula deteriorarea dată de parametrul $\sigma_{max} \frac{\Delta \varepsilon}{2}$ fie pentru calculul propagării fisurii.

Ambele metode presupun că proiectantul analist poate să măsoare sau să simuleze comportamentul la tensiune-deformație în punctele critice de oboseală.

După ce curbele de histerezis individual au fost trasate și numărate, deteriorarea /defecțiunea este măsurată prin aplicarea parametrului Smith/Watson/Topper, care este dat de produsul dintre tensiunea maximă și amplitudinea deformării (ramificația stângă). În metoda propagării fisurii, deteriorarea poate fi dată prin măsurarea lungimii fisurii

propagate, lungime determinată și creată de fiecare curbă, respectiv curba de variație a da/dN , în raport cu ΔK , curba din dreapta, unde K reprezintă intensitatea factorului de tensiune la vârful fisurii. Ambele metode conduc la deducerea duratei de viață la oboseală. În viitorul apropiat se așteaptă ca metodele descrise în ramura stângă să domine analiza durabilității componentelor în mișcare, dar este foarte probabil că filozofia ramurii drepte, sau o variantă a acesteia, va continua să câștige teren.

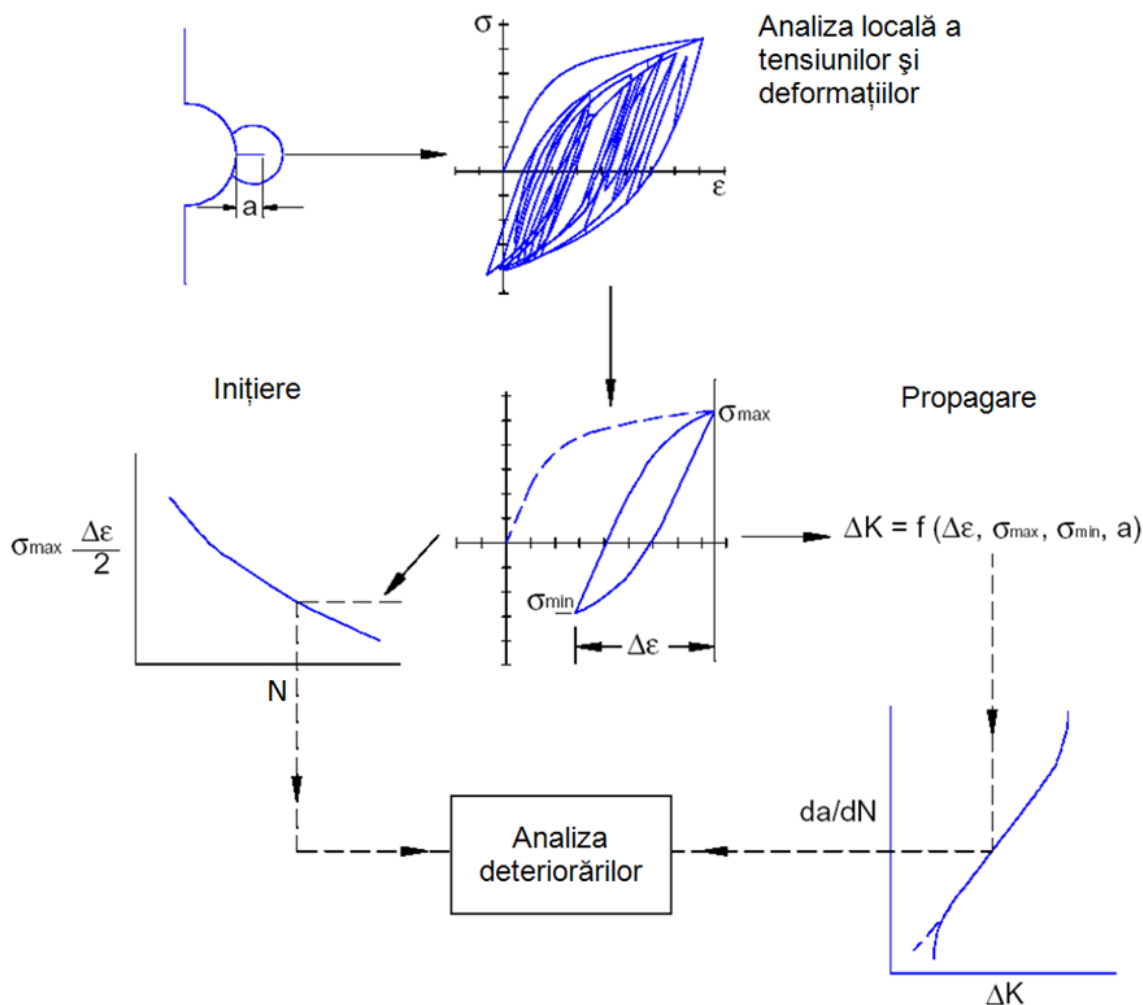


Fig. 1.3. Analiza locală a tensiunilor și deformațiilor

1.6. Reguli de bază privind proiectarea la oboseală

Se folosesc trei metode pentru a efectua proiectarea inițială la oboseală sau pentru a analiza componente deja existente:

- **Proiectarea bazată pe tensiune:** utilizează curba de durabilitate σ - N , respectiv tensiune în raport cu numărul cicluri de solicitare până la deteriorarea/avaria/cedarea/defecțiunea probelor încercate în condiții de tensiune constantă și controlată. În aceste condiții, se poate caracteriza materialul și se determină valoarea tensiunii în apropierea locului cedării pentru a evalua durata de viață proiectată în cazul solicitării la oboseală. Istoricul solicitării exterioare, pentru determinarea numărului de cicluri și a deteriorării, trebuie evaluat în

termenii concentratorilor de tensiuni. Metoda nu se poate ocupa de evenimente care cauzează plasticitate locală și ca urmare este limitată la a proiecta curba de oboseală a materialului în zona durabilităților ridicate. Componentele pentru care nu se așteaptă să aibă o plasticitate ridicată, pot fi proiectate folosind această metodă. Pentru majoritatea componentelor cu comportare preponderent fragilă s-a folosit metoda descrisă mai jos.

- **Metodă propagării fisurii:** este folosită pe scară largă în industria avioanelor pentru a măsura rezistența și durata de viață rămase a componentelor la care se produc fisuri neașteptate. De obicei, proiectarea inițială se bazează pe măsurarea tensiunii sau a oboselii locale dată de curba caracteristică tensiune-deformație și apoi se face verificarea rezistenței la propagarea fisurilor în eventualitatea că o fisură de oboseală scapă inspecției periodice obligatorii. O astfel de inspecție ar fi dificil de aplicat vehiculelor terestre, astfel încât, pentru acestea se aplică o proiectare mai conservatoare, care să permită deducerea lungimii sau a severității fisurii, pentru a preveni fisurile critice de oboseală.

- **Metoda analizei tensiunii/deformației locale:** mai sunt numite uneori tehnici „bazate pe deformare”, dar de fapt utilizarea lor presupune măsurarea atât a tensiunii locale, cât și a locației critice. Metoda este folosită predominant pentru componentele și structurile din materiale fragile. Principalul element privind comportarea la oboseală îl reprezintă baza de date pentru materialele utilizate în mod obișnuit în construcția de mașini. Datele despre oboseala datorată deformării permite estimarea duratei de viață a unei componente prin analiza comportării la tensiune/deformare, [ex: Smith/Topper' sau Topper/Wetzel/Morrow]. Metoda presupune că în timp ce o componentă poate fi supusă tensiunii elastice nominale în întregime sa, în punctele de concentrare a tensiunii va apare o deformare locală plastică de la nivelul căreia se vor iniția fisuri locale care se vor propaga, conducând în cele din urmă la cedarea totală a componentei. Deși este posibil să fie proiectate componente care să se mențină sub nivelul tensiunii de curgere, constrângerile legate de greutate cer o durată de viață finită, care la rândul ei conduce la necesitatea unei metodologii de prezicere a duratei de viață în funcționarea la solicitare variabilă.

Metodologia prezentată în *figura 1.4* necesită definirea a două proprietăți sau relații: o relație între tensiune și deformație și o relație între deformație și durata de viață. Adesea se introduc alți termeni pentru a ajuta la înțelegerea deformării materialului și a comportamentului la oboseală, a deformării elastice și deformării plastice, reveniri ale defectelor, dar variabilele fundamentale care sunt observate în cadrul încercării materialelor sunt tensiunea, deformația și numărul de cicluri de solicitare. Toți ceilalți termeni sunt derivați din cele trei mărimi menționate.

Deoarece sunt doar trei variabile, trebuiesc definite doar două relații și nu are importanță prea mare care dintre ele. Ar putea fi, spre exemplu, relația σ -N sau ϵ -N dar de obicei sunt definite σ - ϵ și ϵ -N. În utilizarea actuală, unele dintre variabilele derivate sunt folosite pentru a exprima alte concepte, iar seturile redundante de ecuații/egalități potrivite în diferite moduri, pot cauza dificultăți de previzionare.

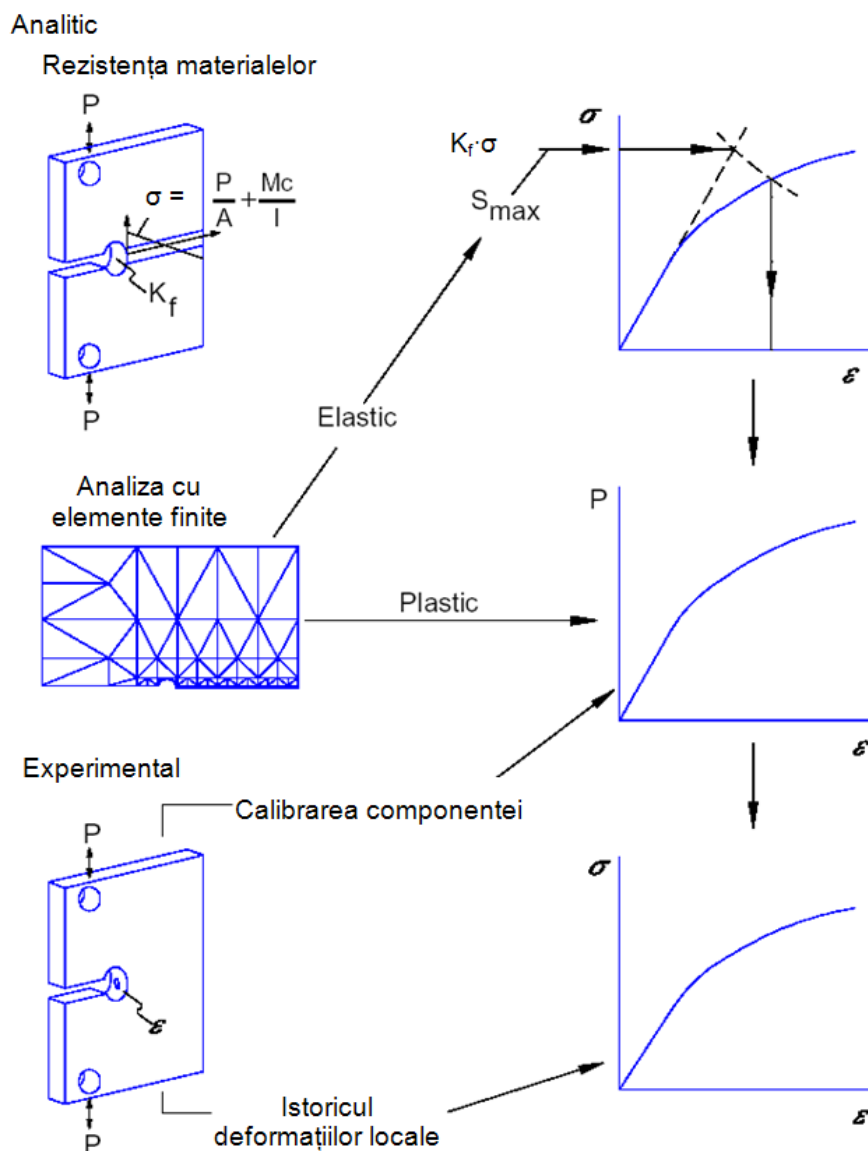


Fig. 1.4. Tehnici de evaluare a tensiunii locale, mărimea deformațiilor și localizarea zonelor critice

1.7. Estimarea duratei de viață

Există o serie de metode disponibile care utilizează datele legate de deformații pe baza cărora se încearcă să se estimeze durata de viață a componentelor. În funcție de gradul de complexitate acestea sunt:

2. Încercarea componentelor la oboseală: atunci când estimarea tensiunii locale sau a locației defectului critic sunt dificil de făcut (de exemplu: structuri complexe, sudate sau lipite), această încercare poate fi oportună, în cazul în care structura în sine nu este foarte scumpă pentru a testa un număr suficient de probe cu amplitudine constantă a solicitării. Sarcinile sunt de obicei alese astfel încât să reproducă sarcinilor de serviciu așteptate. Metoda devine dificilă atunci când condițiile reale de la frontieră nu se pot reproduce în mod fidel, și este foarte greu de utilizat atunci când probele sunt scumpe. Avantajul îl reprezintă faptul că piesele prezintă particularități de geometrie, având și concentratori de tensiune. Trecerea de la o încărcare cu amplitudine constantă la încărcări reale se poate face cu ajutorul criteriului Palmgren-Miner.

3. Componente cu geometrie simplă: într-o probă cu concentrator supusă la o solicitare specificată, loc se poate determina pe baza analizei cu elemente finite sau pe baza determinării experimentale cu ajutorul tensometriei electrice rezistive. Deteriorarea cauzată de diferite cicluri este apoi însumată pentru fiecare eveniment. Modele efectuate cu ajutorul computerului privind comportamentul local plastic sunt utilizate pentru a delimita buclele de histerezis individual și pentru a calcula deteriorarea produsă de fiecare dintre acestea și mai apoi deteriorarea totală.
4. Structuri complexe: structurile complexe au mai multe zone în care se aplică solicitările variabile și mai multe zone potențial critice la oboseală. În ultimul deceniu, metodele folosite pe componente mai simple, descrise pe scurt mai sus, au fost extinse pentru a gestiona sarcini multicanal și aplicate la toate componentele din cadrul unei structuri complexe. Cheia a fost reprezentată de o combinație între modelarea cu elemente finite și suprapunerea de efecte în vederea calculării istoricului solicitărilor pentru fiecare element al structurii. Având acest istoric, se poate calcula deteriorarea prin oboseală pentru fiecare element al structurii.
5. Cazuri de deformare multiaxială: deși au fost făcute progrese semnificative privind estimarea comportării la oboseală sub încărcare multiaxială, este încă foarte problematic calculul exact al unei mărimi ce intervine la solicitarea de oboseală: tensiune, deformare, concentrator de tensiune, etc. Selectarea unui "eveniment" de oboseală, cum ar fi o bucla de histerezis închis, este o altă problemă, apărând dificultatea de evaluare finală a deteriorării, a curbei tensiune-deformare și a deformării componentelor. Deși sunt disponibile unele soluții, punerea lor în aplicare ar trebui să fie utilizate cu mare prudență și cu coeficienți de siguranță mari. Determinarea duratei de viață presupune criteriul liniar de cumulare a deteriorărilor (Palmgren-Miner), ce reprezintă o metodă de numărare a numărului de cicluri din cadrul solicitării reale și transformarea acestora în cicluri de solicitare de amplitudine constantă precum și o determinare a deteriorării cumulative care implică cunoașterea proprietăților la oboseală a materialului ce urmează a fi utilizat.