

**UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” DIN TIMIȘOARA
FACULTATEA DE MECANICĂ**

Rezumatul tezei de doctorat

MODELĂRI ȘI SIMULĂRI ÎN OBOSEALA MULTIAXIALĂ

elaborată de

Ing. Loránd KUN

Conducător științific: Prof.dr.ing. Ion DUMITRU

Ziua susținerii tezei: 17.12.2012

Cercetările în domeniul oboselii materialelor folosite în construcția de mașini au început deja în secolul XIX. Cu toate că timpul scurs din acea perioadă până în zilele noastre este lung, la ora actuală fenomenul de oboseală nu este încă stăpânit în totalitate.

În majoritatea ramurilor industriale, calculul la oboseală reprezintă o etapă de bază în procesul de proiectare a echipamentelor. În multe cazuri însă, pe parcursul calculului componentelor supuse la solicitări complexe, problema este redusă la o solicitare monoaxială echivalentă, fără a evalua dacă criteriile de simplificare sunt valide pentru piesa sau starea de solicitare considerate. În contextul în care solicitările multiaxiale pot provoca rotirea în timp a direcțiilor principale, acestea din urmă nu se mai cunosc apriori, drept urmare reducerea stării de tensiune la o stare monoaxială nu este acceptabilă. Cerințele tot mai exacte ale industriei constructoare de mașini și nu numai în ceea ce privește proiectarea echipamentelor pentru durate de viață bine determinate alimentează cercetări ample în domeniul oboselii multiaxiale.

Lucrarea de față se încadrează în acest domeniu în plină dezvoltare prin faptul că aduce o contribuție materializată printr-o propunere proprie asupra unui model de calcul la oboseală multiaxială. Mai mult decât atât, datorită faptului că oferă o sistematizare al stadiului actual al cercetării în oboseala multiaxială cu numere mari de cicluri la nivel mondial, teza de

doctorat aduce un plus real de valoare în țara noastră, unde fenomenul de oboseală multiaxială este foarte puțin abordată.

Teza de doctorat este concepută pe șase capitole de bază la care se adaugă un capitol de detalieri a contribuțiilor personale ale autorului la rezolvarea temei propuse și bibliografia.

După analiza oportunității lucrării și a obiectivelor urmărite, se prezintă în **Capitolul 2** stadiul actual al cercetării în domeniul oboselii multiaxiale la numere mari de cicluri. După expunerea unor generalități asupra oboselii în general și a metodologiilor de calcul la oboseală, se trece la o analiză amănunțită a stărilor triaxiale în tensiuni și deformații. Cu această ocazie sunt definite o serie de mărimi care intervin la studiul oboselii multiaxiale și care sunt utilizate în capitolele următoare. Folosind cele mai noi cercetări bibliografice, se prezintă apoi principalele metode de calcul la oboseală multiaxială.

Sunt clasificate metodele de calcul în șase categorii și anume: metode bazate pe tensiunile echivalente, metodele planelor critice, metodele integralelor, metodele energetice, metodele bazate pe invariabilității stării de tensiune și metoda mesoscopică. În cadrul primei categorii sunt analizate modelele: Gough, Lee, Langer, Von Mises, fiecare cu avantajele și dezavantajele lor. Se face o prezentare în detaliu a modelelor bazate pe planele critice. Sunt analizate principalele modele, respectiv: Sines, Findley, McDiarmid și Van Dang. În ce privește modelele integralelor, se analizează cel mai sugestiv, respectiv modelul Papadopoulos. Modelele energetice au fost grupate în trei categorii, respectiv modele bazate pe energia elastică, plastică și modele care iau în considerare atât energia elastică cât și plastică. În acest sens au fost analizate modelele Chu-Conle-Bonnen, Glinka-Wang-Plumtree. O atenție deosebită s-a acordat modelelor bazate pe invariabilității stărilor de tensiune cu referire la modelele Sines, Crossland, Papadopoulos, Bin Li, Mamiya-Araujo. În final se prezintă și modelele mesoscopice cu referire la modelul Van Dang, care abordează fenomenul de oboseală multiaxială la scară mesoscopică.

Paragraful 2.5 prezintă o sinteză critică a parametrilor de degradare utilizați de diverse teorii cu avantajele și dezavantajele lor.

Capitolul 3 intitulat „Particularități ale calculului analitic al parametrilor de oboseală folosind modele multiaxiale” conține o serie de contribuții originale privind modelarea și simularea unora dintre cele mai reprezentative metode care abordează oboseala multiaxială.

Acest capitol a avut ca scop determinarea poziției planelor critice pentru o solicitare compusă formal din tensiuni normale și tangențiale defazate cu $\pi/2$ sau alte unghuri pentru care s-au determinat planele critice în care parametrii critici respectiv: tensiunea normală, tensiunea tangențială, amplitudinea tensiunii tangențiale, tensiunea echivalentă

Findley, tensiunea echivalentă von Mises și alte tensiuni echivalente respectiv tensiunea octaedrică, ating valorile maxime. Concluziile trase de autor după acest studiu sunt deosebit de utile în ce privește abordarea unui calcul la oboseală multiaxială.

Calcululele prezentate au fost realizate în mediul de programare MathCad 14 și ele au fost astfel concepute încât prin modificarea datelor de intrare să se poată analiza poziția planului critic în funcție de amplitudinile tensiunilor, unghiul de defazare, frecvența, etc. fără a mai fi necesare calcule suplimentare.

Tot în același capitol se poate aminti elaborarea unui program pentru studiul tensiunii echivalente cu luarea în considerare a semnelor acestora. În acest sens s-a întocmit un program de calcul pentru implementarea teoriei lui Bishop care a fost comparat cu modelul Yokobori. Simularea modelului Yokobori s-a realizat pe baza unui hodograf al tensiunilor, fapt ce permite găsirea planului critic în coordonate polare.

Capitolul 3 mai conține și un studiu al influenței unghiului de defazare și a frecvenței asupra poziției planului critic pe baza modelului Findley. Aici s-au luat în discuție 13 cazuri de încărcare și de asemenea a fost întocmit un program de calcul care a permis tragerea unei serii de concluzii deosebit de utile în privința influenței fiecărui mod de încărcare asupra parametrului Findley la diferite rapoarte ale frecvențelor.

Ultimul paragraf al Capitolului 3 conține un studiu comparativ între modelele Yokobori, Mataka și McDiarmid pentru 17 regimuri de încărcare. Pentru definirea planului critic pentru cele trei modele analizate, a fost create o serie de funcții în MathCad cu care s-au determinat tensiunea normală, tensiunea tangențială și amplitudinea tensiunii tangențiale în orice plan înclinat cu un unghi θ . Suprafețele de variație ale acestor mărimi au fost reprezentate într-un sistem de coordonate tridimensional.

Finalul acestui capitol conține o serie de concluzii asupra modelelor studiate și cu o serie de particularități privind aplicarea lor într-un calcul concret de proiectare.

În **Capitolul 4** se propune un model original pentru calculul la oboseală multiaxială în domeniul durabilității nelimitate. Modelul propus calculează un parametru de degradare pe baza radicalului de ordinul doi a amplitudinii celui de-al doilea invariant al tensorului deviator și presiunea hidrostatică maximă. Parametrii de material utilizați sunt: limita de oboseală la tracțiune ciclică și limita de oboseală la răsucire ciclică. Pentru aplicarea criteriului a fost elaborat un program de calcul a amplitudinii celui de-al doilea invariant al tensorului deviator. Corecția modelului a impus introducerea unei funcții de pondere pentru compensarea efectului neproportionalității.

Criteriul a fost verificat atât pe baza unor date din literatura de specialitate cât și pe rezultatelor experimentale obținute de autor.

Verificarea modelului a fost confirmată prin histograma erorilor relative a cărei distribuție Gaussiană pune în evidență posibilitatea aplicării pe scară largă a criteriului propus.

Capitolul 5 este destinat studiului experimental privind influența neproportionalității asupra durabilității oțelului 41Cr4.

Programul experimental a avut ca scop într-o primă etapă determinarea caracteristicilor mecanice de bază ale oțelului 41Cr4. A doua etapă a cuprins trasarea curbelor de durabilitate ale oțelului 41Cr4 la tracțiune și răsucire după cicluri simetrice.

Etapă a treia și care este cea mai complexă a avut ca scop evaluarea efectului neproportionalității încărcărilor asupra durabilității la solicitări ciclice de tracțiune cu răsucire. Acest studiu a fost efectuat în cadrul Laboratorului de Încercări de Materiale din cadrul Institutului de Cercetare BAY-LOGI, Miskolc, Ungaria.

Regimurile de încărcare, studiate atât teoretic cât și experimental în condițiile solicitării compuse de tracțiune cu răsucire s-au bazat pe mai multe rapoarte ale amplitudinilor celor două solicitări corespunzător a două defazări ($\Phi = 0$ și $\Phi = \pi/2$). Pentru fiecare regim de încărcare s-a studiat variația tensiunilor normale și tangențiale în punctul în care traseul de încărcare se află la distanța maximă față de origine.

Folosind reprezentări sub forma unor hodografe s-au determinat pozițiile planelor critice corespunzător cu diverse teorii și care au fost confruntate cu datele experimentale. În cursul încercărilor s-au analizat buclele de histereză la începutul încercărilor și la ultimele cicluri de solicitare.

Modelul propus a fost validat pe baza încercărilor efectuate iar erorile au fost calculate și comparate cu cele prezise de alte modele luate în studiu. Cercetările efectuate au evidențiat că modelul propus aduce o îmbunătățire în ce privește acuratețea calculului tensiunilor atât pentru încărcări proporționale cât și neproporționale.

Unul dintre capitolele care conține mai multe contribuții originale este **Capitolul 6**, în care se face o analiză în detaliu asupra calculului duratei de viață a unui arbore supus unei solicitări variabile de încovoiere cu răsucire.

Analiza a fost efectuată pe baza ciclului real de solicitare a arborelui, a cărui durată este de 500 ms după care acesta se repetă integral. Arborele este prevăzut cu un concentrator de tensiune de tipul unei racordări, dovedit a fi deosebit de periculos, conducând la ruperea prematură a arborelui.

Pe baza unui model de analiză cu elemente finite realizat în programul ABAQUS 6.9-3 s-a efectuat un studiu riguros al celor șase componente ale tensorului tensiune în zona concentratorului, unde aceste componente ating valori extreme pentru trei raze de racordare.

Spectrul de solicitare a fost prelucrat cu metoda Matsuishi și Endo pe baza unui program conceput special pentru acest scop, fapt ce a permis o analiză a 42 cicluri de solicitare pentru care s-au calculat tensiunile maxime și minime, amplitudinile, valorile medii și amplitudinea unui ciclu echivalent simetric.

Calculul durabilității arborelui s-a făcut prin trei metode și anume:

- Metoda reducerii solicitării multiaxiale la o solicitare uniaxială echivalentă pe baza unei corecții Morrow, pentru care a fost conceput un program special;
- Metoda Feng și Titus care se bazează pe codurile de proiectare ASME, ITER, FIRE și codurile germane. Această metodă se bazează pe o tensiune echivalentă Tresca, iar amplitudinea și valoarea medie a ciclului echivalent determinat sunt corelate pe baza cosinuşilor directori corespunzători fiecărei tensiuni;
- Metoda propusă de autor pentru aplicarea căruia s-a conceput un alt program pentru transformarea ciclului aleator într-un ciclu cu amplitudine constantă folosind criteriul Morrow.

În finalul capitolului se face o analiză comparativă a duratelor de viață calculate pentru zona periculoasă a concentratorului de tensiune la trei raze de racordare, respectiv: 2 mm, 2,5 mm și 3,2 mm.

Metoda propusă în cadrul acestui capitol s-a încadrat suficient de bine comparativ cu celelalte metode, fiind recomandată și prin faptul că dă rezultate mai acoperitoare față de modelul Feng-Titus.

Capitolul 7 al lucrării cuprinde concluziile generale ce se desprind din lucrare respectiv enumerarea contribuțiilor originale ale autorului. Astfel, principalele concluzii sunt următoarele:

- Se face distincția între studiul oboselii în domeniul elasto-plastic, cu numere mici de cicluri (LCF – Low Cycle Fatigue) și oboseală în domeniul exclusiv elastic, cu numere mari și foarte mari de cicluri (HCF – High Cycle Fatigue, VHCF – Very High Cycle Fatigue, GCF – Giga-Cycle Fatigue).
- S-a constatat că atât modelul von Mises cât și modelul „von Mises cu semn” prezic planul critic ca cel fiind planul octaedric, în schimb modelul Findley definește un plan critic dat de o combinație a tensiunilor. Nici celelalte trei modele, Yokobori, Mataka și McDiarmid nu coincid în predicția planului critic de rupere, acesta fiind fie planul unde tensiunea tangențială atinge o valoare critică (Yokobori), fie planul în care amplitudinea tensiunii tangențiale atinge o valoare critică (Mataka, McDiarmid). În ceea ce privește tensiunea echivalentă calculată, s-a constatat că modelul „von Mises cu semn” este cel mai acoperitor, dând o tensiune echivalentă calculată mai mare decât modelul Yokobori.
- Pe baza rezultatelor încercărilor de oboseală multiaxială efectuate în cadrul stagiului de cercetare, la Miskolc, Ungaria, s-a evidențiat influența neproportionalității asupra durabilității materialului.

Epruvetele supuse la încărcări ciclice neproportionale (torsiunea defazată cu 90° față de tracțiune) atingând numere de cicluri mai mici decât cele supuse la încărcări proporționale, cu aceleași amplitudini.

- A fost propus un nou model de degradare la oboseală multiaxială cu numere mari de cicluri, bazat pe invarianții tensiunilor. Modelul a fost validat pe baza datelor experimentale din literatura de specialitate, pe baza datelor experimentale proprii, pe baza comparației efectuate cu alte modele de degradare, respectiv pe baza aplicării asupra unui caz complex de încărcare multiaxială a unui arbore.
- În urma validării modelului pe baza datelor experimentale din literatura de specialitate, s-a constatat că distribuția erorilor relative o respectă pe cea gaussiană, peste 80% din erori încadrându-se în limitele $\pm 10\%$, respectiv erorile relative generate de modelul propus sunt mai reduse decât în cazul unor modele consacrate, cum ar fi modelul Crossland.
- Modelul de degradare propus a fost aplicat asupra unui arbore, simulat în programul de analiză cu elemente finite ABAQUS 6.9-3, supus unor încărcări multiaxiale cu amplitudine variabilă. În urma efectuării analizei durabilității arborelui pe baza a trei abordări diferite (cu teoria tensiunilor echivalente von Mises și Tresca, cu metoda propusă de Feng și Titus, respectiv prin aplicarea modelului propus), s-a constatat că rezultatele obținute cu modelul propus sunt în concordanță cu celelalte modele aplicate. Se validează astfel modelul propus și în cazul unei aplicații complexe.

Contribuțiile originale ale autorului sunt următoarele:

- Realizarea unui studiu bibliografic cu sistematizarea și clasificarea celor mai importante modele de oboseală multiaxială cu numere mari de cicluri;
- Realizarea unui număr de peste 10 de programe de calcul în mediul de programare MathCad 14 cu scopul efectuării unor studii de caz pe cicluri de încărcare multiaxiale simulate. În urma acestor studii de caz s-au evidențiat particularitățile aplicării a peste 15 modele de degradare la oboseală multiaxială și au fost comparate modelele pe baza rezultatelor obținute. S-a studiat influența amplitudinilor, tensiunilor medii, frecvenței și a defazării asupra tensiunii echivalente, respectiv asupra poziției planului critic de rupere.
- Dezvoltarea unui nou model de degradare la oboseală multiaxială, bazat pe cel de-al doilea invariant al tensorului deviator de tensiune și tensiunea hidrostatică.
- Dezvoltarea metodei grafice pentru determinarea amplitudinii celui de-al doilea invariant al tensorului deviator de tensiune, printr-o transformare într-un sistem de coordonate Euclidian cu 5 dimensiuni.
- Definirea unei funcții de pondere pentru corectarea efectului neproportionalității asupra tensiunii echivalente calculate cu ajutorul modelului propus. Funcția de pondere are formă polinomială și este definită pe baza unghiului de defazare.

- Elaborarea unui program experimental complex, pentru caracterizarea materialului 41Cr4 din punct de vedere static (întindere și torsiune) și la oboseală (întindere și torsiune cu cicluri simetrice), respectiv pentru studiul influenței neproportionalității în cazul unor încărcări ciclice multiaxiale de întindere cu răsucire, pe baza căruia s-a validat modelul propus de autor.
- Validarea modelului de degradare propus prin aplicarea acestuia pe cazurile de încărcare alese în cadrul programului experimental multiaxial, respectiv în cadrul programului de calcul. Compararea erorilor relative obținute cu modelul propus respectiv celor generate de cele 11 modele implementate în programul de calcul. Analizarea corelației între pozițiile planelor de rupere determinate experimental, respectiv valorile determinate analitic cu programul de calcul.
- Elaborarea unui program de calcul pentru prelucrarea spectrului de solicitare cu amplitudine variabilă la care este supus un arbore, aplicând metoda picăturii propusă de Endo pentru numărarea ciclurilor, respectiv teoria de acumulare a degradării Palmgren-Miner.
- Determinarea durabilității arborelui prin aplicarea paralelă a următoarelor metode: teoria tensiunilor echivalente (modelele von Mises și Tresca), metoda propusă de Feng și Titus, respectiv prin aplicarea modelului propus.