



REZUMAT

asupra tezei de doctorat cu titlul:

“INVESTIGAREA RUPERII FRAGILE ÎN MODUL MIXT PE MATERIALE POLIURETANICE”

elaborată de Ing. Hannelore-Elfride RUS

Conducător științific: Prof.univ. dr.ing.Eur.Ing.H.E. Tiberiu Dimitrie BABEU

Domeniul Științe Inginerești, Specializarea Inginerie Mecanică

Teza este dedicată studiului ruperii fragile în modul mixt I+II pe materialele poliuretane Necuron 1020 și Necuron 651, în prezența concentratorilor de tensiune singolari (fisură) și nesingolari (creastătură U). Lucrarea este structurată în șase capitole, urmate de o cuprinzătoare listă a bibliografiei consultate.

Primul capitolul (pag. 4-18), intitulat “*STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR PRIVIND EVALUAREA CONDIȚIILOR CRITICE ALE RUPERII FRAGILE*”, include patru subcapitole, prezentate în continuare.

“*Importanța cedărilor prin rupere fragilă în inginerie*” începe cu o scurtă prezentare a locului pe care ruperea fragilă îl ocupă între modurile de cedare specifice ingineriei mecanice. În continuare este expusă pe scurt o cronologie a contribuțiilor majore aduse în domeniul mecanicii ruperii și este justificată actualitatea temei prin numărul foarte mare al articolelor indexate în bazele de date ScienceDirect-Elsevier (peste 78700 de titluri) sau SpringerLink (peste 35400 de titluri), prin conferințele internaționale cu tematici din domeniul mecanicii ruperii organizate periodic (International Conference on Fracture ICF, European Conference on Fracture ECF, Fracture and Damage Mechanics FDM, Crack Paths).

În subcapitolul al doilea “*Noțiuni introductive de mecanica ruperii liniar elastice*” sunt prezentate soluțiile pentru câmpul tensiunilor elastice în vecinătatea vârfului fisurilor (Westergaard [1939], Williams [1957]), precum și soluția de mare generalitate a lui Filippi [2002] pentru cazul concentratorilor de tensiune de tipul creștăturilor V ascuțite sau rotunjite la vârf.

Subcapitolul intitulat “*Metode și criterii de evaluare a condițiilor critice ale ruperii fragile*” reprezintă o sinteză a studiului bibliografic realizat. Sunt expuse pe scurt principalele criterii utilizate de comunitatea științifică pentru evaluarea condițiilor critice ale ruperii fragile: criteriul factorului critic de intensitate a tensiunii K_{IC} , criteriul tensiunii circumferențiale maxime și modificările aduse acestuia, metoda distanțelor critice, criteriul energiei specifice de deformare minimă, criteriul valorii medii a energiei specifice de deformare, criteriul fisurii virtuale critice, metoda volumetrică, modelul zonei coezive. De asemenea, sunt enumerate tipurile de epruvete și materialele utilizate în studiile de mecanica ruperii liniar elastică.



În ultimul subcapitol, intitulat "**Obiectivele temei de cercetare**", sunt prezentate principalele obiective ale temei de cercetare și este justificată propunerea de a investiga ruperea fragilă pe materialele poliuretane Necuron 1020 și Necuron 651 prin larga lor utilizare în aplicațiile industriale - matrițe de ștanțare a tablelor, modele de turnare, modele de testare aerodinamică și hidrodinamică, conectori în industria automotive- însă fără o investigare consistentă sub aspectul comportamentului la ruperea în modul mixt, în prezența concentratorilor de tensiune.

Capitolul al doilea (pag. 19-36), intitulat "**DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A CARACTERISTICILOR MECANICE, ELASTICE ȘI DE MECANICA RUPERII**", prezintă programul experimental și rezultatele încercărilor efectuate în Laboratorul de Rezistența Materialelor al Universității "Politehnica" din Timișoara.

Subcapitolul "**Încercări pentru determinarea proprietăților mecanice ale materialelor poliuretane Necuron 1020 și Necuron 651**" prezintă rezultatele primului set de încercări experimentale care au vizat determinarea caracteristicilor mecanice, elastice și de mecanica ruperii. Încercările mecanice de tracțiune uniaxială au fost efectuate pe epruvete plate și în condițiile recomandate de standardul ASTM D638-03. Au fost ridicate curbele tensiune-deformație specifică $\sigma - \varepsilon$, pe baza cărora caracteristicile - rezistența de rupere σ_r și modulul de elasticitate longitudinală E - au fost determinate: $\sigma_r = 49.75 [MPa]$ și $E = 3340 [MPa]$ pentru Necuron 1020, respectiv $\sigma_r = 17.40 [MPa]$ și $E = 1250 [MPa]$ pentru Necuron 651. Comparația dintre curbele caracteristice obținute la temperatura ambiantă pentru Necuron 1020 și Necuron 651, pe de o parte, și curbele caracteristice obținute pentru PMMA de Gómez [2005] la temperatura ambiantă și la $-40^\circ C$, pe de altă parte, justifică alegerea acestor materiale poliuretane pentru studiul ruperii în ipoteza liniarității elastice. O metodă modernă, și anume tehnica excitației prin impuls prevăzută de standardul ASTM E1876-01, este folosită pentru determinarea coeficientului de contracție transversală ν : $\nu = 0.34$ pentru Necuron 1020 și $\nu = 0.28$ pentru Necuron 651. Determinările experimentale realizate prin această tehnică validează și rezultatele obținute anterior pentru modulul de elasticitate longitudinală E . Tenacitatea la rupere este determinată pe epruvete SENB de încovoiere în trei puncte, după recomandările standardului ASTM D5045-99, următoarele valori fiind obținute: $K_{Ic} = 2.3 [MPa\sqrt{m}]$ pentru Necuron 1020 și $K_{Ic} = 1.0 [MPa\sqrt{m}]$ pentru Necuron 651.

Încercările de mecanica ruperii se constituie într-un al doilea set de încercări experimentale, rezultatele fiind prezentate în cel de-al doilea subcapitol "**Încercări de mecanica ruperii în modul mixt**". Testele au fost efectuate pe două tipuri de epruvete, după cum urmează:

- epruvete semidisc cu fisură laterală dreaptă, solícitate la încovoiere în trei puncte (epruvete ASCB), realizate într-o singură configurație geometrică (raza semidiscului R și adâncimea fisurii a fiind păstrate neschimbate) pentru fiecare dintre cele două materiale. Câte trei epruvete au fost testate, pentru fiecare dintre cele șase valori analizate ale parametrului M^e care caracterizează modul mixt de solícitare, prin combinația dintre modul I și modul II.
- epruvete cu creștătură U laterală (epruvete SENB) solícitate la încovoiere în trei puncte, realizate în două configurații geometrice, și anume, cu creștătură verticală și creștătură



înclinată, cu scopul de a asigura întreaga plajă a combinațiilor dintre modul I și II. Pentru a studia influența acuității creștăturii asupra comportamentului la ruperea fragilă în modul mixt, au fost realizate epruvete cu patru valori diferite ale razei ρ la vârful creștăturii – 0.5, 0.75, 1 și 2 [mm], câte două epruvete fiind testate la fiecare dintre cele șase valori analizate ale parametrului M^e .

Rezultatele pentru forța critică F_{cr} de rupere sunt prezentate tabelar și ilustrate grafic în cadrul tezei. Curbele forță-deplasare înregistrate demonstrează caracterul fragil al rupei celor două materiale poliuretanică în prezența concentratorilor de tensiune, liniaritatea curbelor păstrându-se până la ruperea finală. De asemenea, sunt ilustrate grafic și traiectoriile fisurilor pentru fiecare tip de epruvetă, material și valoare a parametrului M^e .

Capitolul al treilea (pag. 37-82), intitulat “**EVALUAREA RUPERII FRAGILE PE BAZA CALCULULUI TENSIUNILOR**”, tratează problema determinării condițiilor critice ale rupei fragile în ipotezele formulate de Erdogan [1963] – criteriul tensiunii circumferențiale maxime (criteriul MTS), Smith [2001] – criteriul generalizat al tensiunii circumferențiale maxime (criteriul GMTS) și Ayatollahi [2009a] – criteriul tensiunii circumferențiale maxime aplicat la creștăturile U (criteriul UMTS).

În primul subcapitol, intitulat “**Criteriul tensiunii circumferențiale maxime (maximum tangential stress MTS)**”, sunt prezentate formulările matematice ale criteriului MTS și ale celor două criterii derivate GMTS și UMTS. În plus, pentru criteriul GMTS, influența tensiunilor nesingulare T asupra condițiilor critice ale rupei fragile este analizată și discutată.

În “**Evaluarea rupei fragile pe semidiscul cu fisură laterală verticală solicitat la încovoiere asimetrică (epruveta ASCB)**”, într-un prim pas pentru aplicarea criteriilor MTS și GMTS la estimarea condițiilor critice ale rupei fragile pe epruvetele ASCB, s-au stabilit, pentru configurația geometrică considerată, variațiile coeficienților adimensionali Y_I și Y_{II} ai factorilor de intensitate a tensiunii, precum și variația coeficientului adimensional T^* al tensiunii nesingulare T , în plaja de combinații posibile dintre modul I și II de solicitare. În acest scop, analizele stării de tensiune cu metoda elementului finit s-au realizat cu pachetele software Cosmos/M 2.9 și Abaqus 6.5.

Evaluarea rupei fragile a epruvetelor ASCB realizate din Necuron 1020 și Necuron 651 s-a concretizat într-o serie de rezultate, după cum urmează:

- diagramele de rupere $K_{II}/K_{Ic} - K_I/K_{Ic}$ estimate după criteriul MTS și criteriul GMTS, cu determinarea tenacității la rupere K_{IIc} pentru modul II;
- diagramele de variație ale unghiului critic θ_0 de inițiere la propagarea fisurii în funcție de parametrul M^e ;
- predicția forței critice de rupere F_{cr} pentru epruvetele ASCB realizate din cele două materiale.

Comparația cu rezultatele experimentale relevă acuratețea estimărilor efectuate pe baza celor două criterii, MTS și GMTS: includerea tensiunilor nesingulare T în expresia tensiunii circumferențiale σ_θ conduce la îmbunătățirea predicțiilor, cu erorile relative



cuprinse între limitele $-22.6...+15.3[\%]$ pentru forța critică, limite rezonabile pentru aplicațiile ingineresti.

În continuare, în subcapitolul “*Evaluarea ruperii fragile pe epruvete de încovoiere în trei puncte (SENB) cu creștătură laterală în formă de U*”, este tratată ruperea fragilă a epruvetelor SENB cu creștătură U, realizate din Necuron 1020 și solicitate la încovoiere în trei puncte, pe baza criteriului UMTS, în fapt o modificare a criteriului MTS pe baza soluției lui Filippi [2002]. O serie de rezultate sunt obținute, după cum urmează:

- diagramele de rupere $K_{II}^U / K_{Ic}^U - K_I^U / K_{Ic}^U$ estimate după criteriul UMTS;
- diagramele de variație ale unghiului critic θ_0 de inițiere la propagarea fisurii în funcție de parametrul M^e ;
- predicția forței critice de rupere F_{cr} pentru epruvetele SENB.

Comparația cu rezultatele experimentale constituie baza evaluării acurateței estimărilor efectuate pe baza criteriului UMTS:

- erorile relative de estimare a forței critice sunt cuprinse între limitele $-10.7...+8.2[\%]$, la solicitarea în modul I și modul mixt cu predominanța modului I (M^e între $1.0...0.6$);
- pentru modul mixt, la predominanța modului II, erorile relative de estimare a forței critice sunt însă cuprinse între limitele $+9.2...+55.6[\%]$, fiind sensibil mai mari pentru creștătura cu raza ρ de $2[mm]$. Explicația este dată de reducerea acurateței soluției lui Filippi la descreșterea raportului dintre adâncimea creștăturii și raza acesteia a/ρ , pe de o parte, și de creșterea unghiului de inițiere θ , pe de altă parte.

Capitolul al patrulea 4 (pag. 83-109), intitulat “**EVALUAREA RUPERII FRAGILE PE BAZA ENERGIEI DE DEFORMAȚIE**”, tratează problema determinării condițiilor critice ale ruperii fragile în ipotezele formulate de Sih [1973] – criteriul energiei specifice de deformare minimă (criteriul SED), Lazzarin [2001], [2005] și Gómez [2007] – criteriul valorii medii a energiei specifice de deformare (criteriul SED medie).

Primul subcapitol, intitulat “*Criteriul energiei specifice de deformare minimă*”, începe cu prezentarea formulării matematice a criteriului SED și continuă cu evaluarea ruperii fragile pe epruvetele ASCB realizate din Necuron 1020 și Necuron 651, concretizată într-o serie de rezultate, după cum urmează:

- diagramele de rupere $K_{II} / K_{Ic} - K_I / K_{Ic}$ și diagramele de variație ale unghiului critic θ_0 de inițiere la propagarea fisurii în funcție de parametrul adimensional M^e , estimate pe baza criteriului SED;
- predicția forței critice de rupere F_{cr} pentru epruvetele ASCB realizate din cele două materiale, pe baza criteriului SED.

Comparația cu rezultatele experimentale constituie baza evaluării acurateței estimărilor efectuate pe baza criteriului SED: erorile relative de estimare a forței critice după criteriul SED sunt cuprinse între limitele $-14.4...+5.3[\%]$, la ruperea în modul mixt.



Subcapitolul următor, “**Criteriul valorii medii a energiei specifice de deformare**”, începe cu prezentarea formulărilor matematice ale criteriului SED medie pentru cazul concentratorilor singulari de tensiune de tipul creștătură V - Lazzarin [2001], cazul concentratorilor nesingulari de tensiune de tipul creștătură V rotunjită pentru modul I de solicitare - Lazzarin [2005] și cazul concentratorilor nesingulari de tensiune de tipul creștătură U pentru modul mixt de solicitare - Gómez [2007]. Criteriul SED medie subestimează forța critică de rupere a epruvetelor SENB cu până la -19.62% pentru întreaga plajă a combinațiilor analizate (inclusiv la predominanța modului II de solicitare). În plus, criteriul SED medie este relativ simplu de aplicat (analiză liniar elastică cu elemente finite) și se pretează oricărui tip de concentrator de tensiune.

Capitolul al cincilea (pag. 110-126), intitulat “**EVALUAREA NUMERICĂ A DIRECȚIEI DE PROPAGARE A FISURILOR ÎN MODUL MIXT**”, tratează problema predicției traiectoriei de propagare a fisurilor la ruperea fragilă în modul mixt I+II.

Abordările propuse în literatura științifică sunt prezentate sintetic în primul subcapitol, “**Abordări în simularea propagării fisurilor**”, după o renumită lucrare a lui Ingrassia [2004]. Astfel, se disting două mari categorii de tehnici, după geometria fisurii: tehnici care condiționează forma fisurii și tehnici care admit o formă arbitrară a acesteia.

Metoda elementului finit este utilizată în subcapitolul “**Influența modului mixt de solicitare asupra traiectoriei fisurilor la ruperea epruvetelor ASCB**” pentru simularea numerică a propagării fisurilor la ruperea în modul mixt a epruvetelor ASCB. În acest scop, sunt folosite două tehnici: propagarea cvasiautomată a fisurilor cu pachetul software FRANC2D/L și propagarea interactivă a fisurilor cu pachetul software Abaqus 6.5, în ambele cazuri extensia fisurii realizându-se incremental. O serie de rezultate sunt prezentate în continuare în cadrul tezei:

- traiectoriile fisurilor pe epruvetele ASCB realizate din Necuron 1020, după criteriile MTS și SED, simularea numerică a propagării fiind realizată cu pachetul software FRANC2D/L pentru toate combinațiile dintre modul I și II analizate;
- traiectoria fisurii pe epruveta ASCB după criteriul GMTS pentru $M^e = 0.199$, propagarea interactivă realizându-se cu pachetul software Abaqus 6.5.

Comparația cu traiectoriile experimentale digitizate conduc la câteva concluzii importante: unghiul de inițiere θ_0 la extensia fisurii determinat numeric este în concordanță cu soluțiile analitice (după criteriile MTS, SED și GMTS) pentru fiecare caz analizat; după extensia inițială a fisurii, aceasta tinde să se propage în modul I, eliminând modul II și confirmând principiul simetriei locale; la nivel global traiectoriile estimate după cele trei criterii de rupere sunt similare; ultima porțiune din traseul fisurii (reprezentând aprox. 20% din lungimea totală) se abate de la traiectoria experimentală, ca urmare a modificării condițiilor de rezemare din experiment și a apariției fenomenelor elasto-plastice la reducerea considerabilă a ligamentului.

Capitolul al șaselea (pag. 127-132), intitulat “**CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE**”, prezintă o sinteză a rezultatelor obținute și a principalelor contribuții personale.



În subcapitolul "**Rezultate și concluzii**" sunt sintetizate câteva dintre rezultatele obținute în cadrul tezei:

- rezistența de rupere σ_r și modulul de elasticitate longitudinală E determinate pe baza curbelor $\sigma - \varepsilon$, coeficientul lui Poisson ν și modulul E determinați prin tehnica excitației prin impuls, valorile critice ale factorilor de intensitate a tensiunii K_{Ic} și K_{IIc} determinate pe epruvete standardizate, epruvete ASCB și epruvete SENB (prin extrapolarea rezultatelor la cazul $\rho = 0$);
- comparația estimărilor pentru forța critică de rupere F_{cr} a epruvetelor ASCB, pe baza criteriilor MTS, GMTS și SED, realizate din materialele poliuretane Necuron 1020 și Necuron 651;
- comparația estimărilor pentru forța critică de rupere F_{cr} a epruvetelor SENB cu creștătură U, pe baza criteriilor UMTS și SED medie, realizate din Necuron 1020;
- recomandări privind acuratețea și utilitatea criteriilor analizate în predicția ruperii fragile a celor două materiale poliuretane.

Ultimul paragraf "**Contribuții personale**" prezintă lista principalelor contribuții ale tezei, dintre care sunt amintite:

- prezentarea, rezultatul unui vast studiu bibliografic, criteriilor de rupere folosite frecvent în investigarea ruperii fragile, a principalelor tipuri de epruvete și materiale utilizate în studiile de mecanica ruperii liniar elastice.
- determinarea experimentală a caracteristicilor mecanice (rezistența la rupere σ_r), elastice (modulul de elasticitate E și coeficientul lui Poisson ν) și de mecanica ruperii (valorile critice ale factorilor de intensitate a tensiunii K_{Ic} și K_{IIc}) pentru materialele poliuretane Necuron 1020 și Necuron 651. Modulul de elasticitate E este determinat din curbele tensiune-deformație specifică ridicate pentru încercările la tracțiune monoaxială și cu tehnica excitației prin impuls. Factorul critic de intensitate a tensiunii K_{Ic} în modul I este determinat pe epruvete standardizate SENB, pe epruvete ASCB cu fisură și pe epruvete SENB cu creștătură U (prin extrapolarea rezultatelor pentru raza ρ la vârf egală cu zero). De asemenea, factorul critic de intensitate a tensiunii K_{IIc} în modul II este determinat pe epruvete ASCB cu fisură și pe epruvete SENB cu creștătură U (prin extrapolarea rezultatelor pentru raza ρ la vârf egală cu zero, pentru Necuron 1020). Erorile relative pentru aceste determinări experimentale încrucișate sunt în marja practicii ingineresti.
- prezentarea formulărilor analitice pentru toate criteriile de rupere utilizate în demersul științific: pe de o parte, criteriile MTS, GMTS și UMTS, iar pe de altă parte, criteriile SED și SED medie.
- stabilirea variației coeficienților adimensionali Y_I și Y_{II} ai factorilor de intensitate a tensiunii, precum și variația coeficientului adimensional T^* al tensiunii nesingulare T , în plaja de combinații posibile dintre modul I și II de solicitare, pentru geometria considerată a epruvetei ASCB, din analizele stării de tensiune cu metoda elementului finit realizate cu pachetele software Cosmos/M 2.9 și Abaqus 6.5.



- determinarea analitică a diagramelor de rupere $K_{II}/K_{Ic} - K_I/K_{Ic}$ și a diagramelor de variație ale unghiului critic θ_0 de inițiere la propagarea fisurii în funcție de parametrul M^e , pe baza criteriilor MTS, GMTS și SED, pentru epruvetele ASCB cu fisură verticală, confecționate din materialele poliuretanică Necuron 1020 și Necuron 651. Diagramele au fost ridicate pe baza soluțiilor obținute cu codurile scrise în MathCad 14.
- determinarea analitică a diagramelor de rupere $K_{II}^U/K_{Ic}^U - K_I^U/K_{Ic}^U$ și a diagramelor de variație ale unghiului critic θ_0 de inițiere, în funcție de parametrul M^e , pe baza criteriului UMTS, pentru epruvetele SENB cu creștătură U verticală și înclinată, confecționate din poliuretanul Necuron 1020. Diagramele au fost ridicate pentru toate cele patru valori ale razei ρ la vârful creștăturii, cu soluțiile obținute cu codurile scrise în MathCad 14.
- predicția forței critice de rupere F_{cr} pentru epruvetele ASCB cu fisură verticală, realizate din cele două materiale poliuretanică, pe baza criteriilor MTS, GMTS și SED. Astfel, se concluzionează că introducerea tensiunilor nesingulare T conduce la îmbunătățirea predicțiilor după criteriul GMTS în comparație cu rezultatele criteriului MTS.
- predicția forței critice de rupere F_{cr} pentru epruvetele SENB cu creștătură U, la patru valori diferite ale razei ρ la vârful creștăturii, realizate din poliuretanul Necuron 1020, pe baza criteriilor UMTS și SED medie. În baza comparației cu rezultatele experimentale, se dovedește acuratețea estimărilor după criteriul UMTS, pentru solicitarea în modul mixt, la predominanța modului I. Criteriul SED medie îmbunătățește predicțiile pentru situațiile de predominanță a modului II, chiar și la cea mai mare valoare a razei la vârful creștăturii.
- predicția traiectoriilor fisurilor pe epruvetele ASCB după criteriile MTS și SED prin simulare numerică cvasiautomată cu metoda elementului finit, implementată de pachetul software FRANC2D/L. Trajectoriile au fost comparate cu cele experimentale digitizate, pentru toate combinațiile analizate dintre modul I și II.
- predicția traiectoriei de propagare a fisurii pe epruveta ASCB după criteriile GMTS, prin simulare numerică interactivă cu metoda elementului finit, utilizând pachetul software Abaqus 6.5., pentru valoarea parametrului adimensional $M^e = 0.1999$.

Timișoara, 26 noiembrie 2012

Ing.Hannelore-Elfride RUS