

Predgovor

Metalni materijali imaju u manjoj ili većoj meri osobinu plastičnog tečenja. Mehanizam nastanka žilavog loma obuhvata pojavu šupljina, njihov rast i spajanje, uz postojanje plastične deformacije osnove metala ili legure na mestu oštećenja. Nedostatak standardnih postupaka elasto-plastične mehanike loma (EPML) je nedovoljno uzimanje u obzir mikrostrukturnih pojava u procesu nastanka i razvoja oštećenja u materijalu. Lokalni pristup čini skup metoda čiji je cilj upravo sveobuhvatna analiza različitih mehanizama nastanka loma, uključujući i mikromehanički aspekt.

U monografiji su prikazani rezultati istraživačkog rada autora u oblasti primene i razvoja lokalnog pristupa žilavom lomu u poslednjih petnaest godina. Dat je niz primera gde je potencirana neophodnost povezivanja parametara EPML, mikrostrukturnih istraživanja i konstitutivnih izraza mehanike kontinuuma, u cilju sprečavanja pojave ovog oblika loma kod metalnih materijala i njihovih spojeva.

Monografija je namenjena inženjerima i istraživačima iz oblasti inženjerstva metalnih materijala, kao i studentima poslediplomskih studija koji izučavaju mehaniku oštećenja i loma uz primenu metode konačnih elemenata.

Značajan deo prikazanih rezultata autor je ostvario kroz učešće i rukovođenje u istraživačkim projektima, uključujući i međunarodnu saradnju. Poseban značaj za nastanak ove monografije ima rad u okviru projekta osnovnih istraživanja "*Specijalne teme mehanike loma materijala*", bilateralnog projekta između Srbije i Slovenije "*Failure prevention of inhomogeneous materials and structures*" (finansiranih od državnih ministarstava za nauku i tehnološki razvoj) i *round robin* projekata Evropskog društva za integritet konstrukcija iz oblasti žilavog loma. Autor se zahvaljuje svim kolegama učesnicima pomenutih projekata, a posebno prof. dr Nenadu Gubeljaku (Fakulteta za Strojništvo, Maribor) i mr Bojanu Međi (Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd).

Prof. dr Aleksandru Sedmaku, prof. dr Zorici Cvijović i dr Vencislavu Grabulovu, recenzentima ove monografije, autor se zahvaljuje na korisnim sugestijama koje su doprinele kvalitetu rukopisa.

Beograd, avgust 2009.

Autor

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Osnove elasto-plastične mehanike loma materijala.....	3
2.1 Naponsko stanje oko vrha prsline u linearno-elastičnom materijalu	3
2.2 Formulacija elasto-plastične mehanike loma (EPML)	4
2.3 Oblik plastične zone ispred vrha prsline	6
2.3.1 Primer određivanja veličine i oblika plastične zone za dve visokočvrste legure aluminijuma	7
2.4 Uticaj troosnosti na polje napona ispred vrha prsline.....	9
2.5 Parametri koji opisuju promenu geometrije prsline u EPML	11
2.6 Energetski aspekt loma.....	14
2.7 J integral	18
2.7.1 Primena J integrala u analizi početka i stabilnog rasta prsline mehanizmom žilavog loma	19
3. Lokalni pristup u modeliranju žilavog loma	23
3.1 Mehanizam žilavog loma metalnih materijala.....	23
3.1.1 Nastanak i rast šupljina	24
3.1.2 Spajanje šupljina	26
3.2 Modeli lokalnog pristupa žilavom lomu	28
3.2.1 Modeli nespregnutog pristupa žilavom lomu	29
3.2.1.1 Rast izolovane šupljine	29
3.2.1.2 Kritični rast šupljine.....	33
3.2.2 Modeli spregnutog pristupa žilavom lomu.....	36
3.2.2.1 Modeliranje nastanka i dinamike rasta šupljina	36
3.2.2.2 Gursonov model	39
3.2.2.3 Gurson-Tvergaard-Needleman model (GTN).....	41
Modeliranje spajanja šupljina i kriterijumi otkaza.....	42
3.2.2.4 Kompletni Gursonov model (CGM)	45
3.2.2.5 Modifikacija Gursonovog modela za plastično anizotropne materijale	47
3.2.3 Modeliranje rasta prsline mehanizmom žilavog loma	47
3.2.3.1 Uvod	47
3.2.3.2 Postupci modeliranja rasta prsline.....	48
Modifikacija GTN modela uvođenjem promenljive vrednosti parametra q_2	51

4. Eksperimentalne metode za određivanje mikrostrukturnih osobina metalnih materijala i oštećenja usled pojave žilavog loma	55
4.1 Pregled metoda	55
4.2 Primena u analizi lokalnog pristupa žilavom lomu	56
4.2.1 Indirektne metode.....	56
4.2.1.1 Određivanje mikrostrukturnih parametara na osnovu hemijskog sastava materijala	56
4.2.1.2 Određivanje oštećenja materijala na osnovu gustine	57
4.2.1.3 Ostali načini određivanja oštećenja materijala.....	57
4.2.2 Direktne metode	58
4.2.2.1 Kvantitativna mikrostrukturna analiza	58
4.2.2.2 Primena površinske mikroskopije u prepoznavanju oštećenja nastalih mehanizmom žilavog loma	62
4.2.2.3 Primena mikrostrukturne analize u oceni razvoja oštećenja.....	63
4.2.2.4 Određivanje konačne širine zone razvlačenja	65
4.2.2.5 Određivanje mikrostrukturnih osobina i praćenje oštećenja primenom tomografije X-zracima	67
4.2.2.6 Analiza mehanizma žilavog loma simuliranjem šupljina otvorima	69
5. Metoda konačnih elemenata u analizi žilavog loma i lokalnom pristupu.....	71
5.1 Pregled primene metode konačnih elemenata (MKE) u inženjerstvu materijala i mehanici loma	71
5.2 Formulacija MKE	72
5.2.1 Interpolacione funkcije.....	73
5.2.2 Konačni elementi.....	73
5.2.3 Numerička integracija	74
5.2.4 Pojednostavljeno modeliranje problema u prostoru	74
5.2.5 MKE u mehanici elasto-plastičnih materijala	75
5.2.5.1 Definisane mehaničkih osobina materijala u proračunima MKE.....	76
5.2.5.2 Nelinearnost geometrije i graničnih uslova.....	78
5.2.5.3 Rešavanje nelinearnih problema.....	79
5.3 Primena metode konačnih elemenata u EPML i lokalnom pristupu žilavom lomu	79
5.3.1 Modeliranje oštećenja materijala	80
5.3.2 Kriterijumi nastanka žilavog loma.....	80
5.3.3 Formiranje mreže konačnih elemenata.....	81
5.3.3.1 Definisane spoljnog opterećenja.....	82
5.3.3.2 Modeliranje geometrije prslina.....	83
5.3.4 Izračunavanje parametara koji opisuju promenu geometrije prslina	84
5.3.5 Izračunavanje J integrala	85
5.3.5.1 Metoda integrala po domenu - virtuelni rast prslina	85
Primer: bimaterijalni spoj	86
5.3.5.2 Izračunavanje J integrala preko numerički određene krive sila - pomeranje napadne tačke sile	88
Primer: CT epruveta.....	89
5.3.6 Putanja rasta prslina	89

5.3.7 Veličina konačnog elementa kao parametar materijala u lokalnom pristupu žilavom lomu.....	90
5.3.8 Primena kombinovanog eksperimentalno-numeričkog postupka lokalnog pristupa žilavom lomu.....	92
Prilog 5.1: Osnosimetrično modeliranje i modeliranje u ravni	94
Prilog 5.2: Singularni konačni elementi.....	96
Prilog 5.3: Program za postprocesorski proračun parametra oštećenja R/R_0 po modelu Rice-Tracey	98
6. Lokalni pristup žilavom lomu u analizi nastanka prsline	99
6.1 Primena modela nespregnutog pristupa u analizi nastanka žilavog loma na cilindričnim epruvetama sa žlebom i zarezom	99
6.1.1 Geometrija, granični uslovi i mreže konačnih elemenata	100
6.1.2 Podaci o materijalu.....	101
6.1.3 Rezultati i diskusija	102
6.2 Primena modela nespregnutog i sprengnutog pristupa u analizi nastanka žilavog loma na cilindričnoj glatkoj epruveti	106
6.2.1 Geometrija, granični uslovi i mreža konačnih elemenata	106
6.2.2 Podaci o materijalu.....	107
6.2.3 Modeliranje nastanka vrata na epruveti.....	109
6.2.4 Rezultati i diskusija	110
6.2.4.1 Model Rice-Tracey	110
6.2.4.2 GTN model.....	113
7. Lokalni pristup žilavom lomu u analizi početka rasta prsline i njenog stabilnog rasta	119
7.1 Primena modela lokalnog pristupa u analizi početka rasta prsline i njenog stabilnog rasta na CT epruveti.....	119
7.1.1 Eksperimentalno formiranje krive otpornosti prema rastu prsline i određivanje vrednosti J_i	119
7.1.2 Početak rasta prsline.....	120
7.1.2.1 Geometrija, granični uslovi i mreža konačnih elemenata.....	120
7.1.2.2 Definisane kriterijuma početka rasta prsline.....	122
7.1.2.3 Rezultati i diskusija.....	122
Uticao veličine konačnog elementa ispred vrha prsline i numeričke integracije.....	125
7.1.3 Stabilan rast prsline.....	127
7.2 Primena modela lokalnog pristupa u analizi početka rasta prsline na SENB epruvetama.....	129
7.2.1 Geometrija, granični uslovi i mreže konačnih elemenata	130
7.2.2 Podaci o materijalima.....	131
7.2.3 Rezultati i diskusija.....	131
7.3 Nastanak složenog mehanizma loma visokočvrste legure aluminijuma na CT i SENB epruvetama	135

8. Lokalni pristup žilavom lomu zavarenih spojeva.....	143
8.1 Primena GTN modela u analizi početka rasta prsline i njenog stabilnog rasta u OM i UM spojevima.....	144
8.1.1 Početak rasta prsline.....	145
8.1.1.1 Geometrija, granični uslovi i mreže konačnih elemenata.....	145
8.1.1.2 Podaci o materijalima	146
8.1.1.3 Određivanje kritičnih vrednosti parametra oštećenja ispitivanjem cilindričnih glatkih epruveta	147
8.1.1.4 Rezultati i diskusija	149
8.1.2 Stabilan rast prsline	151
8.2 Primena CGM u analizi početka rasta prsline u spojevima sa dva različita metala šava.....	153
8.2.1 Geometrija, granični uslovi i mreže konačnih elemenata	153
8.2.2 Podaci o materijalima.....	155
8.2.3 Rezultati i diskusija	156
Literatura.....	159