

## **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

<b>1. Uvod.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Osnove elasto-plastične mehanike loma materijala.....</b>	<b>3</b>
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
<b>3. Lokalni pristup u modeliranju žilavog loma .....</b>	<b>23</b>
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

<b>4. Eksperimentalne metode za određivanje mikrostrukturnih osobina metalnih materijala i oštećenja usled pojave žilavog loma .....</b>	<b>55</b>
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
<b>5. Metoda konačnih elemenata u analizi žilavog loma i lokalnom pristupu.....</b>	<b>71</b>
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 prsline .....	84
5.3.5 Izračunavanje $J$ integrala .....	85
5.3.5.1 Metoda integrala po domenu - virtuelni rast prsline .....	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 prsline .....	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
<b>6. Lokalni pristup žilavom lomu u analizi nastanka prsline .....</b>	<b>99</b>
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 spregnutog 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
<b>7. Lokalni pristup žilavom lomu u analizi početka rasta prsline i njenog stabilnog rasta .....</b>	<b>119</b>
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

<b>8. Lokalni pristup žilavom lomu zavarenih spojeva.....</b>	<b>143</b>
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
<b>Literatura.....</b>	<b>159</b>