

UNIVERZITET U BEOGRADU
MAŠINSKI FAKULTET

Danijela D. Živojinovi

**PRIMENA MEHANIKE LOMA NA
PROCENU INTEGRITETA ZAVARENIH
KONSTRUKCIJA OD LEGURA
ALUMINIJUMA**

doktorska disertacija

Beograd, 2013.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Danijela D. Živojinovi

**FRACTURE MECHANICS APPLICATION
ON INTEGRITY ASSESMENT OF
WELDED CONSTRUCTION MADE FROM
ALUMINUM ALLOYS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2013.

Članovi komisije za pregled i odbranu doktorske disertacije:

Mentor: dr Aleksandar Sedmak, redovni profesor
Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu

Članovi komisije: dr Boško Rašuo, redovni profesor
Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu

dr Aleksandar Grbović, docent
Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu

dr Vera Šijački-Žeravčić, redovni profesor
Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu

dr Ljubica Milović, docent
Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u
Beogradu

Datum odbrane:

Mojim najmilijim:
roditeljima,
ćerkama i suprugu

PRIMENA MEHANIKE LOMA NA PROCENU INTEGRITETA ZAVARENIH KONSTRUKCIJA OD LEGURA ALUMINIJUMA

Apstrakt (rezime):

U radu je prikazana praktična primena mehanike loma na nastanak i rast zamornih prslina u konstrukcijama zavarenim primenom frikcionog zavarivanja mešanjem (*FSW*). Poseban naglasak je dat na tankozidne strukture od legura aluminijuma. Razmatran je rast prsline u neojačanim i ojačanim konstrukcijama. Pri tome je korišćena numerička metoda bazirana na konačnim elementima - tzv. Proširena Metoda Konačnih Elemenata (PMKE). Analiziran je rast prsline u *FSW* spoju, kroz zone spoja. Pri tome je korišćen software *Abaqus*, kao i *Morfeo* za prikaz dobijenih podataka. Primenjeno je zatezno zamorno opterećenje, pri koeficijentu asimetrije cikusa opterećenja $R = 0$.

Svi modeli su sačinjeni od legure aluminijuma 2024-T351. Karakteristike materijala u zonama spoja, kao i geometrijske mere samog *FSW* spoja su usvojene iz već postojećih eksperimenata. Razmatrano je više modela:

Primer br.:1. najjednostavniji primer ploče, linearno-elastična i elasto-plastična analiza.

Primer br.:2. dvokomponentna ploča, linearno-elastična i elasto-plastična analiza.

Primer br.:3. *FSW* spoj-2D izložen dejstvu većeg, odnosno manjeg zateznog opterećenja.

Primer br.:4. ploča sastavljena od dva *FSW* spoja izložena dejstvu većeg, odnosno manjeg zateznog opterećenja.

Primer br.:5. ploča ojačana sa dva *FSW* T-spoja izložena dejstvu većeg, odnosno manjeg zateznog opterećenja.

Kao rezultati proračuna dobijeni su sledeći podaci:

- naponsko-deformaciono stanje u konstrukciji, pri čemu je naročita pažnja posvećena zoni u okolini vrha prsline,
- koordinate tačkaka fronta prsline za svaki korak rasta (x, y, z) ,
- raspodela faktora intenziteta napona- K_I , K_{II} , K_{III} i K_{ekv} duž fronta prsline za svaki korak rasta,

- vek konstrukcije u formi promene broja primenjenog ciklusa opterećenja- N za svaki korak rasta prsline.

Na bazi dobijenih podataka analizirana je stabilnost širenja prsline kroz strukturu. Takođe, posmatrano je ponašanje linearno-elastičnog i elasto-plastičnog materijala. Razmatran je rast prsline iz jedne zone u drugu. Data je uporedna analiza rasta prsline kod neojačanih i ojačanih ploča.

Ključne reči: zamorni rast prsline, proširena metoda konačnih elemenata, žilavost loma, frikciono zavarivanje mešanjem, softver, konstrukcija, linearno elastična mehanika loma, elasto-plastična mehanika loma, faktor intenziteta napona - K , J -integral

Naučna oblast: Mašinstvo

Uža naučna oblast: Integritet konstrukcija

UDK: 669.17:621.791]:539.42(043.3)
620.17:519.96(043.3)

FRACTURE MECHANICS APPLICATION ON INTEGRITY ASSESSMENT OF WELDED CONSTRUCTION MADE FROM ALUMINUM ALLOYS

Abstract:

In this work application of fracture mechanics principles on initiation and growth of fatigue crack in friction stir welded (FSW) structures is presented. Special attention is dedicated to thin-walled structures made from aluminum alloys. Crack growth in unstiffened and stiffened construction is considered by using the numerical method based on finite elements - eXtended Finite Element Method (XFEM). Crack growth in FSW joint is analyzed through all its zones. Thereby is used software *Abaqus*, as well as *Morfeo* for results display. Tension fatigue load is applied, with stress intensity ratio $R = 0$.

All analyzed models are made from aluminum alloy 2024-T351. Material properties in joints zones, and geometry measures of FSW joint are adopted from available experiments. Following examples are analyzed:

Example No.:1. simple plate, analysis in the area of linear-elastic and elasto-plastics.

Example No.:2. plate with two regions, analysis in the area of linear-elastic and elasto-plastics.

Example No.:3. FSW joint-2D, exposed to effect of higher, apropos lower tension load.

Example No.:4. plate made of two FSW joints, exposed to effect of higher, apropos lower tension load.

Example No.:5. plate stiffened with two FSW T-joints, exposed to effect of higher, apropos lower tension load.

Following results are obtain in numerical computations:

- stress-displacement state in construction, where special attention is dedicated to crack tip zone,
- points coordinates of crack front (x, y, z) for every progression step,
- distributions of stress intensity factors- K_I , K_{II} , K_{III} i K_{ekv} along crack front for each progressions step,

- construction life in form of change of applied load number- N for each step of propagation.

On the basis of obtained data, analysis of crack growth stability is made. Also, linear-elastic and elasto-plastic behavior of material is observed. Crack growth from one to another zone is considered. Finally, comparative analysis of crack growth in unstiffened and stiffened plates is made.

Key words: fatigue crack growth, eXtended Finite Element Method (*XFEM*), fracture toughness, Friction Stir Welding (*FSW*), software, welded construction, *LEFM* - linear-elastic fracture mechanics, *EPML* - elasto-plastic fracture mechanics, stress intensity factor- K , J-integral

Scientific discipline: Mechanical engineering

Scientific subdiscipline: Structure integrity

UDK: 669.17:621.791]:539.42(043.3)
620.17:519.96(043.3)

NOMENKLATURA

- \mathbf{a} -vektor pomeranja dodatih stepeni slobode
- a, c -dužina prsline
- a_0 -dužina inicijalne prsline
- a_0, a_m, a_n -konstante u *Power* zakonu
- a_C -kritična dužina prsline
- a_{doz} -dozvoljena dužina prsline
- a_{ef} -efektivna dužina prsline
- a_f -konačna dužina prsline
- a_i -dužina prsline u i -tom ciklusu opterećenja
- \mathbf{a}_i -vektor čvornog pomeranja poboljšan *Heaviside*-ovom funkcijom (poglavlje 4.3.)
- a_i^Γ -dodatni stepeni slobode koji odgovaraju Γ -toj funkciji poboljšanja u i -tom čvoru
- a_N -dužina prsline pri datom broju ciklusa opterećenja- N
- $a_{N+\Delta N}$ -dužina prsline pri datom broju ciklusa opterećenja- $N + \Delta N$
- a'' -značajna veličina prsline (konstanta)
- Δa -prirast dužine prsline
- Δa_{max} -maksimalni prirast dužine prsline
- Δa_{N_j} -promena dužine prsline (prirast prsline)=čvorno rastojanje u konačno-elementnoj mreži
- A_0, A_0, A_0, A_0 -konstante (u *Newman*-ovoj funkciji otvaranja prsline)
- A_k, B_k -konstante materijala
- A, B, C, D -empirijske konstante (u hiperboličko-sinusnom modelu rasta prsline)
- b -širina elementa na frontu prsline
- \mathbf{b}_i^a -vektor čvornog pomeranja poboljšan *NT* funkcijom
- \mathbf{B}_a -matrica izvoda poboljšanih funkcija oblika
- \mathbf{B}_u -matrica izvoda klasičnih funkcija oblika
- c_1, c_2, c_3, c_4 -konstante materijala (poglavlje 4.6.5.1.)
- C -konstanta (u *Paris*-ovoj jednačini)

C	-konstitutivna matrica izotropnog linearnog elastičnog materijala
C_1, C_2	-konstante (u <i>Forman, Newman</i> i <i>de Koning</i> -ovoj jednačini)
C_p	-redukциони faktor rasta prsline
$CTOA$	-(<i>Crack Tip Opening Angle</i>) ugao otvaranja vrha prsline
$\frac{da}{dN}$	-brzina rasta zamorne prsline
d	-dužina elementa na frontu prsline
D	-poluprečnik "K-dominantne oblasti" (poglavlje 2.4.2.)
D	-ukupan radni vek (poglavlje 2.8.)
E	- <i>Young</i> -ov moduo elastičnosti
E'	-korigovani <i>Young</i> -ov moduo elastičnosti (za ravno stanje napona, odnosno ravno stanje deformacije)
f	-kriterijum loma
f	-matrica primenjenih sila u čvorovima
f_a	-vektor primenjenih sila poboljšanih komponenti aproksimacije pomeranja
f_{tol}	-tolerancija kriterijuma loma
f_u	-vektor primenjenih sila klasičnih komponenti aproksimacije pomeranja
F	-sila
$F_{v,2,5}$	-vertikalna sila između čvorova 2 i 5
G	-sila rasta prsline (brzina oslobađanja energije)
G_I	-sila rasta prsline za mod I (brzina oslobađanja energije)
G_{II}	-sila rasta prsline za oblik II (brzina oslobađanja energije)
G_{IC}	-kritična brzina oslobađanja energije za mod I
G_{IIC}	-kritična brzina oslobađanja energije za mod II
G_{IIIC}	-kritična brzina oslobađanja energije za mod III
G_C	-kritična sila rasta prsline
G_{ekv}	-ekvivalentna brzina oslobađanja energije u čvoru
G_{ekvC}	-ekvivalentna kritična brzina oslobađanja energije
G_{max}	-maksimalna brzina oslobađanja energije
G_{pl}	-vrednost sile rasta prsline iznad koje dolazi do naglog rasta prsline
G_{TH}	-prag sile rasta prsline
ΔG	-relativna brzina oslobađanja energije

$H(x)$	-Heaviside-ova funkcija
I_n	-integraciona konstanta zavisna od n (konstanta deformacionog ojačavanja)
J	- J -integral (parametar mehanike loma)
J_{IC}	-kritična vrednost J -integrala
J_R	- J -integral koji odgovara sili rasta prsline ($\sqrt{J_R}$)
\mathbf{K}	-matrica krutosti
K_I	-faktor intenziteta napona za oblik I
K_{II}	-faktor intenziteta napona za oblik II
K_{III}	-faktor intenziteta napona za oblik III
K_a	-amplituda faktora intenziteta napona
\mathbf{K}_{aa}	-matrica krutosti „poboljšanih“ konačnih elemenata
K_C	-kritični faktor intenziteta napona (žilavost loma)
\mathbf{K}_e	-elementarna matrica krutosti
K_{eac}	-ambijentalna žilavost loma
K_{ekv}	-ekvivalentni faktor intenziteta napona
K_{IC}	-kritični faktor intenziteta napona (žilavost loma) za oblik I
K_{Ief}	-efektivni faktor intenziteta napona
K_m	-srednji faktor intenziteta napona
K_{max}	-maksimalni faktor intenziteta napona
$K_{max,ef}$	-efektivna vrednost maksimalnog faktor intenziteta napona
$K_{max,i-1}$	-maksimalni faktor intenziteta napona pri preopterećenju
$K_{max,T}$	-maksimalni početni faktor intenziteta napona
K_{min}	-minimalni faktor intenziteta napona
$K_{min,ef}$	-efektivna vrednost minimalnog faktor intenziteta napona
K_R^W	-Willenborg-ov zaostali faktor intenziteta napona
K_{th}	-prag faktora intenziteta napona
\mathbf{K}_{uu}	-klasična matrica krutosti konačnih elemenata
\mathbf{K}_{ua}	-matrica sprege između klasičnih i „poboljšanih“ komponenti krutosti
K_{zato}	-faktora intenziteta napona, koji zatvara prslinu
ΔK	-opseg faktora intenziteta napona

ΔK_0	-opseg faktora intenziteta napona pri $R = 0$
ΔK_{th}	-opseg praga faktora intenziteta napona
l	-dužina prsline u datom trenutku
l_1	-dužina prave linije koja spaja čvor 1 i referentnu tačku
l_3	-dužina prave linije koja spaja čvor 3 i referentnu tačku
Δl_{12}	-rastojanje između čvorova 1 i 2
Δl_{23}	-rastojanje između čvorova 2 i 3
L	-dužina uzorka
m	-koeficijent ($m \in [1, 2.6]$) zavisano od toga da li je zastupljeno ravno stanje napona ili ravno stanje deformacije)
m	-eksperimentalno dobijena konstanta ($m \in [0.5, 2.25]$)
m	-broj funkcija poboljšanja (poglavlje 4.3.)
M	-mismečing
n	-eksponent u <i>Paris</i> -ovoj funkciji
n	-eksponent deformacionog ojačavanja (poglavlje 2.5.4.)
n	-spoljašnja jedinična normala (poglavlje 4.2.1.)
n	-broj konačnih elemenata (poglavlje 4.3.)
$n_1, \dots, n_i, \dots, n_m$	-broj ciklusa opterećenja pri i -tom stepenu
n_j	-jedinična normala
N	-broj ciklusa opterećenja (radni vek)
$N_1, \dots, N_i, \dots, N_m$	-broj ciklusa opterećenja do loma pri i -tom stepenu
$N_i(x)$	-interpolacione funkcije i -tog konačnog elementa ($i \in [1, n]$)
$\Delta N, \Delta N_i, \Delta N_j$	-inkrementalni broj ciklusa opterećenja
p, q	-konstante (u <i>NASGRO</i> jednačini rasta prsline)
P	-pritisna sila
q	-pomeranje napadne tačke sile (poglavlje 2.5.5.)
q	-matrica stepeni slobode u čvorovima
Q	-parametar obika prsline
Q_{ef}	-efektivni parametar oblika prsline
r	-radijus obrtanja
r_p	-dimenzija (veličina) plastične oblasti
r_{pi}	-prečnik plastične zone u i -tom ciklusu opterećenja

R	-koeficijent asimetrije ciklusa opterećenja
R_{ef}	-efektivni koeficijent asimetrije ciklusa opterećenja
R_{SO}	-koeficijent zatvaranja prsline
S	-koeficijent sigurnosti
S_u	-skup svih čvorova na konačnim elementima
S_a	-skup čvorova na konačnim elementima presečenim prslinom
S_b	-skup svih čvorova na konačnim elementima koji sadrže vrh prsline
t	-debljina uzorka
t_0	-karakteristična debljina uzorka (konstanta materijala)
T	-temperatura
T_g	-temperatura prelaza
T_i	-sila zatezanja na konturi
\mathbf{u}	-vektor pomeranja klasičnih stepeni slobode
u_i	-pomeranje na konturi
\mathbf{u}_i	-vektor pomeranja konačnog elementa
u_x	-pomeranje u pravcu x -ose
u_y	-pomeranje u pravcu y -ose
$u^h(x)$	-vektorska funkcija pomeranja
$v_{1,6}$	-vertikalno pomeranje između čvorova 1 i 6
$v_g = V$	-otvaranje noževa (merena veličina)
x	-referentna tačka (poglavlje 4.2.1.)
x^*	-presečna tačka prsline sa mrežom konačnih elemenata (poglavlje 4.2.1.)
z	-debljina noževa
W	-širina uzorka (poglavlje 2.5.5.)
W	-gustina deformacijske energije
W_s	-rad
r	-ugao savijanja
r	-konstanta deformacionog ojačavanja (poglavlje 2.5.4.)
S	-parametar (zvisan od tipa uzorka i prsline)
S_0, S_1, S_2	-parametri (zvisni od tipa uzorka i prsline)
χ_s	-jedinična površinska energija
Γ	-putanja integracije

u	-merena vrednost otvaranja prsline
u_c	-kritična vrednost otvaranja vrha prsline (definisana od strane korisnika)
u_m	= <i>CMOD</i> (<i>Crack Mouth Opening Displacement</i>) -otvaranje usta prsline
u_t	= <i>CTOD</i> (<i>Crack Tip Opening Displacement</i>) -otvaranje vrha prsline
v	-relativna deformacija
ϵ	-vektor relativne deformacije
v_0	-referentna relativna deformacija (deformacija popuštanja)
v_{ij}	-raspodela relativne deformacije u okolini vrha prsline
\tilde{v}_{ij}	-bezdimenziona funkcija zavisna od n i α
y	-konstanta u <i>BK</i> zakonu
α	-ugao u polarno-cilindričnom koordinatnom sistemu (slika 2.6)
β	-koeficijent (konstanta materijala)
β_s	-faktor korekcije površine
\sim	-moduo klizanja
ν	- <i>Poisson</i> -ov koeficijent
$\dot{\epsilon}$	-brzina dejstva (učestanost) opterećenja (poglavlje 2.4.4.)
Π	-potencijalna energija
Π_0	-potencijalna energija ploče bez prsline
\dagger	-nominalni normalni napon
σ	-vektor napona
\dagger_0	-referentni napon tečenja (napon popuštanja)
\dagger_{cr}	-kritični napon
\dagger_f	normalni napon loma
\dagger_{ij}	-raspodela napona u okolini vrha prsline
$\tilde{\dagger}_{ij}$	-bezdimenziona funkcija zavisna od n i α
\dagger_m	-zatezna čvrstoća
\dagger_{max}	-maksimalno primenjeni normalni napon
\dagger_{min}	-minimalno primenjeni normalni napon
\dagger_t	-napon na granici tečenja
\dagger_{tOM}	-napon tečenja osnovnog materijala
\dagger_{tV}	-napon tečenja vara

- \dagger_x -normalni napon u smeru x -ose
 \dagger_y -normalni napon u smeru y -ose
 \dagger_z -normalni napon u smeru z -ose
 $\tilde{\Gamma}_{ij}$ -bezdimenziona funkcija zavisna od n i „
 \dagger -tangencijalni (smicajni) napon
 \dagger_1 -tangencijalna komponente napona
 \dagger_2 -tangencijalna komponente napona
 \dagger_f -tangencijalni napon loma
 \dagger_{xy} -tangencijalni (smicajni) napon u ravni xy
 \dagger_{xz} -tangencijalni (smicajni) napon u ravni xz
 \dagger_{yz} -tangencijalni (smicajni) napon u ravni yz
 Φ -faktor u *Willenborg*-ovoj jednačini
 $\mathbb{E}(r, \mu)$ -funkcija poboljšanja
 $\mathbb{E}_1, \mathbb{E}_2, \mathbb{E}_3, \mathbb{E}_4, \mathbb{E}_5, \mathbb{E}_6$ -funkcije poboljšanja
 $\Psi_r(x)$ - r -ta funkcija poboljšanja u i -tom čvoru ($r \in [1, m]$)

SADRŽAJ

1. INTEGRITET KONSTRUKCIJE	1
1.1. Uvod	1
1.2. Nastanak i rast prsline	2
1.2.1. Uzročnici lome i metode ojačanja i povećanja veka konstrukcije	2
1.2.2. Određivanje veličine inicijalne prsline i njenog daljeg rasta.....	6
1.3. Osnovni koncepti projektovanja	7
1.4. Tipovi konstrukcionih elemenata	11
1.5. Strukturna analiza (projektovanje)	17
1.6. Nastanak i rast prsline u tankozidnim konstrukcijama.....	18
1.7. Ispitivanje na zamor	20
1.8. Procena kritičnih mesta	21
2. MEHANIKA LOMA	24
2.1. Uvod	24
2.2. Podela mehanike loma.....	26
2.3. Osnovni oblici stvaranja površina loma.....	28
2.4. Linearno-elastična mehanika loma	29
2.4.1. Faktor intenziteta napona- K_I	29
2.4.2. Raspodela napona u okolini vrha prsline	31
2.4.3. Princip superpozicije.....	34
2.4.4. Kritična vrednost faktora intenziteta napona (žilavost loma)- K_{IC}	35
2.4.5. Određivanje faktora intenziteta napona- K_I	42
2.4.6. Određivanje žilavosti loma- K_{IC}	45
2.5. Elasto-plastična mehanika loma.....	48
2.5.1. Problem krtog loma- <i>Griffith</i> -ovo rešenje.....	48
2.5.2. Plastičnost vrha prsline.....	51
2.5.2.1. <i>Irwin</i> -ova metoda.....	53
2.5.2.2. Model deformacije trake.....	54
2.5.2.3. Metoda pomeranja otvora prsline (<i>COD</i> metoda).....	57
2.5.3. <i>J</i> -integral.....	58
2.5.4. <i>HRR</i> polje.....	60
2.5.4.1. Primena <i>J</i> -integrala na početak rasta prsline	62

2.5.4.2. Primena J -integrala na analizu rasta prsline	64
2.5.4.3. R -kriva (kriva otpora rasta prsline)	66
2.5.5. Laboratorijska merenja parametara mehanike loma	69
2.5.6. Ugao otvaranja vrha prsline- $CTOA$ (<i>Crack Tip Opening Angle</i>).....	72
2.6. Jednačina rasta zamorne prsline	74
2.6.1. <i>Paris</i> -ov model.....	75
2.6.2. <i>Forman</i> , <i>Newman</i> i <i>de Koning</i> -ov model	76
2.6.3. Hiperboličko-sinusni model	77
2.6.4. <i>NASGRO</i> model.....	77
2.6.5. Primeri dijagrama $\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R)$	78
2.7. Numerički model jednačina rasta zamorne prsline	79
2.8. Procena veka vazduhoplovnih konstrukcija	81
2.9. Interakcija opterećenja	82
3. FRIKCIONO ZAVARIVANJE MEŠANJEM	87
3.1. Primena legura aluminijuma u vazduhoplovstvu	87
3.2. Osnovni principi frikcionog zavarivanja mešanjem	89
3.3. Struktura zavarenog spoja dobijenog <i>FSW</i> postupkom	95
3.4. Svojstva zavarenog spoja aluminijumskih legura	97
3.4.1. Tvrdća zavarenog spoja.....	98
3.4.2. Mehaničke karakteristike zavarenog spoja.....	99
3.5. Vrste tankozidnih struktura dobijenih <i>FSW</i> postupkom	101
3.5.1. T-spojevi.....	102
3.6. Svojstva legure 2024-T351	104
3.7. Svojstva zavarenog spoja legure 2024-T351 dobijenog <i>FSW</i> postupkom ...	105
3.7.1. Mismečing	106
3.7.2. Mehanička svojstva <i>FSW</i> spoja.....	107
3.8. Modeliranje <i>FSW</i> spoja	111
4. PROŠIRENA METODA KONAČNIH ELEMENATA (PMKE).....	113
4.1. Uvod	113
4.2. Osnove proširene metode konačnih elemenata	114
4.3. Funkcije poboljšanja	116
4.3.1. Generalizovana <i>Heaviside</i> -ova funkcija- $H(x)$	116

4.4. Definisanje polja pomeranja u XFEM-u	118
4.5. Opšti oblik proširene metode konačnih elemenata	119
4.6. Primena XFEM-a u Abaqus-u	121
4.7. Kriterijumi loma.....	121
4.7.1. Kriterijum kritičnog napona- σ_{cr}	122
4.7.2. Kriterijum kritičnog otvaranja prsline-COD	123
4.7.3. Kriterijum dužine prsline u zavisnosti od vremena- $a = f(t)$	125
4.7.4. Kriterijum-tehnika virtuelnog otvaranja prsline.....	126
4.7.4.1. BK zakon	128
4.7.4.2. Power zakon	129
4.7.4.3. Reeder-ov zakon.....	129
4.7.5. Kriterijum nisko-cikličnog zamora	129
4.7.5.1. Početak razdvajanja površina	130
4.7.5.2. Zamorni rast prsline korišćenjem Paris-ovog zakona	131
4.8. Nedostaci PMKE.....	132
5. FSW MODEL.....	133
5.1. Algoritam proračuna.....	133
5.2. Proračunski modeli	136
5.2.1. Primer br.1: NEOJAČANA TANKOZIDNA PLOČA	136
5.2.1.1. Teorija.....	136
5.2.1.2. Proračun u Abaqus/Morfeo-u	137
5.2.1.2.1. Proračun za linearno-elastičnu oblast	142
5.2.1.2.2. Proračun za elasto-plastičnu oblast	144
5.2.2. Primer br.2: NEOJAČANA TANKOZIDNA PLOČA sa dva regiona (DVOKOMPONENTNA PLOČA)	152
5.2.2.1. Primer tankozidne ploče (oblast linearne elastičnosti)	156
5.2.2.2. Primer tankozidne ploče (oblast elasto-plastičnosti).....	161
5.2.3. Primer br.3: FSW spoj.....	165
5.2.3.1. FSW spoj izložen dejstvu većeg zateznog opterećenja.....	168
5.2.3.2. FSW spoj izložen dejstvu manjeg zateznog opterećenja.....	171
5.2.4. Primer br.4: ploča sa dva FSW spoja (neojačana struktura)	180
5.2.4.1. Ploča sa dva FSW spoja (neojačana struktura) izložena dejstvu većeg zateznog opterećenja	181

5.2.4.2. Ploča sa dva <i>FSW</i> spoja (neojačana struktura) izložena dejstvu manjeg zateznog opterećenja	184
5.2.5. Primer br.5: ploča sa dva <i>FSW</i> T-spoja (ojačana struktura).....	191
5.2.5.1. ploča sa dva <i>FSW</i> T-spoja (ojačana struktura) izložena dejstvu većeg zateznog opterećenja	192
5.2.5.2. ploča sa dva <i>FSW</i> T-spoja (ojačana struktura) izložena dejstvu manjeg zateznog opterećenja	195
6. ZAKLJUČAK.....	204
LITERATURA	209

1. INTEGRITET KONSTRUKCIJE

1.1. Uvod [1]

Relativno nova naučna disciplina, koja je našla široku primenu u rešavanju inženjerskih problema naziva se integritet konstrukcije ([2]). Pod pojmom procena integriteta konstrukcija podrazumeva se sledeće:

1. analiza postojećeg stanja konstrukcije, koja obuhvata dijagnostiku ponašanja i popuštanja, uz procenu preostale čvrstoće i radnog veka.
2. revitalizacija konstrukcije, uz primenu mera u cilju očuvanja operativne gotovosti.

U ove svrhe koriste se adekvatni *software*-ski paketi, kao što su: *ANSYS*, *Abaqus*, *FRANC3D*, *NASGRO*, *NASTRAN*. Programi su koncipirani na metodi konačnih elemenata. Konstrukcija se modelira u adekvatnom *software*-u, a potom se vrši proračun strukture (naponi i deformacije). Na osnovu dobijenih rezultata, moguće je odrediti stvarno ponašanje konstrukcije pri eksploataciji, proceniti eksploatacioni vek, ali i uzročnike lošeg ponašanja ili čak popuštanja konstrukcije. Na bazi ovih saznanja, dobijaju se parametri izbora i odluka, čijom realizacijom se konstrukcija poboljšava, a time i povećava radni vek. Dakle, primenom korektivnih mera vrši se revitalizacija konstrukcije.

Problemi koji se javljaju u strukturi u toku eksploatacionog perioda, prvenstveno su posledica nedovoljno dobro projektovane geometrije. Međutim, uzrok može biti i nedovoljna otpornost materijala na nastanak i rast prsline, a naročito kod zavarenih spojeva, što upravo predstavlja predmet proučavanja ove doktorske teze.

Primena numeričkih metoda u inženjerskoj analizi nosećih konstrukcija je našla opravdanje iz ekonomskih razloga, tj. postiže se visok nivo rezultata uz relativno male troškove. Dakle, primena programa za dobijanje naponsko-deformacione analize stanja, kao i proračun nastanka i širenja prsline u strukturi, predstavlja komforman način za dobijanje relativno tačnih rezultata u odnosu na eksperimentalno dobijene rezultate. Naročito kada je reč o skupim uzorcima, broju ponavljanja eksperimenata, skupoj opremi za ispitivanje.

Problem koji se javlja u toku eksploatacionog perioda konstrukcije predstavlja pojava i dalji rast prsline. U rešavanju ovog problema primenjuje se klasična mehanika loma i to uporednom analizom **sile rasta prsline** (sa jedne

strane) i **otpornosti materijala** (sa druge). Na osnovu dobijenih rezultata moguće je izvršiti procenu daljeg ponašanja konstrukcije. Međutim, ovaj linearizovan (konzervativan) pristup, ne daje precizne podatke. Dakle, realnija slika ponašanja konstrukcije sa inicijalnom prslinom u strukturi dobija se određivanjem parametara elasto-plastične mehanike loma: J -integrala i otvaranja prsline (*COD -Crack Opening Displacement*).

Analizom ovih veličina, moguće je znatno preciznije odrediti mesta u strukturi gde je moguća pojava inicijalne prsline, odnosno proceniti dalju progresiju prsline ukoliko ista već postoji u konstrukciji. Time se postiže procena veka konstrukcije, čime se ne narušava njena dalja nosivost u značajnoj meri. Dakle, dijagnostifikuju se mesta (pozicija), položaj (pravac pružanja), oblik i veličina inicijalne prsline.

Metodologija koja se koristi pri istraživanju (analiziranju) rasta prsline, sastoji se iz sledećih koraka (faza):

- Dizajniranje 3D modela
- Naponsko-deformaciona analiza stanja modela bez prsline
- Uvođenje prsline u stukturu (oblik, dimenzije, položaj)-inicijalna prslina
- Naponsko-deformaciona analiza strukture sa inicijalnom prslinom
- Propagacija (širenje, rast) prsline
- Naponsko-deformaciona analiza strukture sa prslinom
- Proračun parametara loma (K ili J -integral)
- Analiza dobijenih numeričkih rezultata

Pri simulaciji širenja prsline korišćeni su sledeći *software*-i: *ABAQUS* i *MORFEO* (*Manufacturing Oriented Finite Element tOol*). Pri modeliranju i naponsko-deformacionoj analizi stanja u strukturi bez prsline korišćen je *ABAQUS*.

1.2. Nastanak i rast prsline [3]

1.2.1. Uzočnici loma i metode ojačanja i povećanja veka konstrukcije

Glavni uzročnici loma konstrukcije su:

- nepreciznost pri projektovanju i konstruisanju;
- defekti u materijalu;

- nedostaci pri izradi (u toku proizvodnje);
- oštećenja nastali neadekvatnom montažom i transportom;
- neadekvatno i nepotpuno održavanje;
- operativno preopterećivanje;
- u okviru operativnih zahteva (taktičko-tehnološki uslovi) nije uzet u obzir uticaj sekundarnih opterećenja;
- zamorni lom;
- uticaj okruženja (temperatura, vlaga, korozija, dekarbonizacija).

U toku projektne faze nemoguće je uzeti u obzir sve faktore. Takođe, veoma je teško tačno odrediti realan spektar opterećenja: intenzitet i funkcionalnu zavisnost od eksploatacionog vremena (učestanost). Njihovo određivanje se svodi na domen statistike i verovatnoće, tj. na predviđanje događaja.

Prilikom projektovanja konstrukcije, potrebno je sagledati sve aspekte u kojima će se ista koristiti (eksploatisati). A potom, u cilju ostvarivanja što je moguće dužeg veka, težiti ka sledećem:

- projektovati konstrukciju tako da radni napon bude znatno manji u odnosu na napon tečenja;
- ukoliko je moguće, definisanjem adekvatne geometrije i izborom adekvatnog materijala, postići što ravnomerniju raspodelu deformacije, napona i energije;
- definisati geometriju konstrukcije tako da se izbegnu mesta koja uzrokuju koncentraciju napona u strukturi: nagle promene poprečnog preseka, oštre ivice (izrađivati što je moguće veći radijus zaobljenja na unutrašnjim ivicama, oboriti sve oštre ivice);
- izbegavati ispuste (na spoju) kod elemenata, kao što su uzdužnici;
- izbegavati spajanje pomoćnih elemenata i osnovnih delova strukture na mestima visokog napona;
- obezbediti najveći mogući radijus svakog ugla na mestima oplata ili zida ramenjače na kojima je neophodan izrez;
- obezbediti što veću otpornost na nastanak i rast prslina u strukturi, izborom adekvatnog materijala;
- koristiti materijal sa što većom duktilnošću i žilavošću.

Proces dobijanja pripremaka je od izuzetnog značaja na svojstva materijala: rezanje ili plastično deformisanje. Rezanjem se prekidaju vlakna, što uzrokuje smanjenje čvrstoće i dinamičkih osobina. Neadekvatna izrada pripremaka livenjem može dovesti do pojave defekata na površini ali i u materijalu, nehomogenosti, anizotropnosti, kao i do pojave lokalnog pregrevanja.

Tokom faze mašinske obrade (izrade) dela dolazi do nastanka površinskih ogrebotina. Ove nepravilnosti na površini materijala (povećana površinska hrapavost, ogrebotine, pore, rupe, oštre ivice, navoji i sl.) utiču negativno na vek konstrukcije. Ove neželjene pojave mogu biti izbegnute pažljivom izradom priprema, odnosno njegovom daljom preciznom obradom.

U toku eksploatacione faze letelica se održava sistematično na bazi propisanih pregleda, sistema održavanja i postupaka revizije.

Faktori okruženja koji negativno utiču na radni vek mašinskog dela su:

- Jedan od primera negativnog uticaja povišene temperature jeste njeno dejstvo na oplatu svemirskom brodu ("*space shuttle*") prilikom ponovnog ulaska letelice u atmosferu. Spoljašnji deo letelice je izrađen od silikon-tetra-borida (SiB_4), koji ima različit koeficijent termalne ekspanzije od karbon-karbon kompozita. Dakle, prilikom ulaska letelice u atmosferu, ove termičke različitosti izazivaju slabljenje zaštitne oplate, pri ponovljenim ciklusima termičkog naprezanja.
- Drugi ambijentalni faktor jeste korozija, odnosno hemijsko dejstvo na materijal. Na površini materijala se pri tome javljaju male rupice, te pri povećanju efektivne površine uticaj korozije biva sve dominantniji slabeći strukturu konstrukcije. Ovaj efekat nastaje na nezaštićenim površinama. Dejstvo korozije se povećava u slučaju povećane ambijentalne vlažnosti. Primer korozije predstavlja dejstvo soli na automobil pri vožnji u zimskim uslovima.
- Specifičan vid korozije jeste frikciona korozija. Ova pojave predstavlja habanje kontaktnih površina usled njihovog relativnog pomeranja, pri čemu dolazi do otkidanja čestica u površinskom sloju. Ovaj negativan

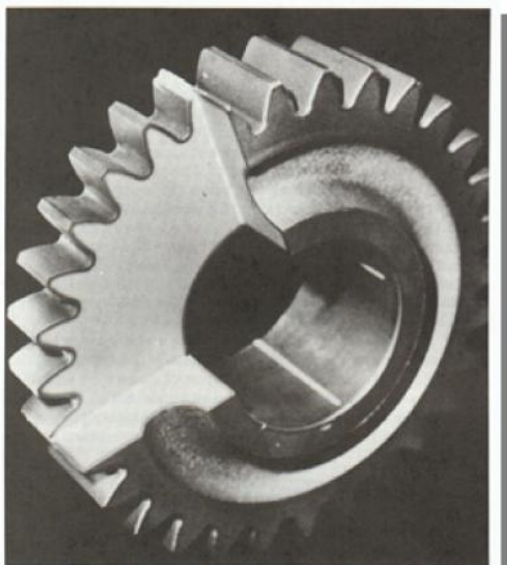
efekat se može smanjiti odvajanjem, podmazivanjem, poliranjem ili obezbeđenjem razlike u tvrdoći frikcionih površina.

- Treći faktor je dekarbonizacija, tj. gubitak ugljenika u površinskom sloju usled savijanja i/ili uvijanja.

U slučaju opterećenja konstrukcije zamornim opterećenjem, uobičajeno je da se prsline javljaju na površini. U cilju prevencije pojave zamornog loma primenjuju se metode površinskog ojačanja.

Jedna od efikasnih metoda povećanja veka konstrukcije jeste unošenje prednapona u strukturu (pritezanje) i to u površinski sloj, tako da se ista rasterećuje pod dejstvom zateznog opterećenja. Ova metoda poznata je pod imenom "bombardovanje". Dakle, struktura se pri velikim brzinama bombarduje malim parčićima (česticama) velike čvrstoće, prečnika od 0.1 do 1.0 mm. Kao rezultat dolazi do pojave pritisknog napona u površinskom sloju dubine od 0.25-0.5 prečnika čestice. Time se postiže ojačanje površinskog sloja.

Druga metoda koja se primenjuje za površinsko ojačanje legura čelika se naziva karbonizacija, odnosno nitrogenizacija. Ovim tehnikama se postiže povećanje veka konstrukcije. Metode su zasnovane na izlaganju mašinskog dela dejstvu atmosfere, koja je bogata ugljenikom, odnosno azotom, pri povišenoj temperaturi. Procesom difuzije ugljenik, tj. azot, obogaćuje površinski sloj materijala do dubine od 1mm (slika 1.1).



Slika 1.1 Karbonizacija čeličnog zupčanika

Takođe, neke od sledećih metoda obezbeđuju poboljšanje svojstava materijala u površinskom sloju: poliranje i elektropoliranje, nanošenje zaštitnih premaza, anodni način zaštite, čišćenje. Materijali koji se koriste za izradu oplate zaštićeni su tankom presvlakom i anodnim načinom zaštite da bi se smanjio uticaj korozije.

Procesima termičke obrade, kao što su kaljenje i otpuštanje, mogu se poboljšati osobine legura aluminijuma (T73 i T76) na pojavu korozije na račun smanjenja statičke otpornosti. Legura aluminijuma 2024-T3 ima dobre dinamičke osobine, te je dala zadovoljavajuće rezultate pri eksploataciji. Legure aluminijuma čije su mehaničke osobine poboljšane procesima starenja imaju iste ili nešto lošije dinamičke osobine u odnosu na legure podvrgnute otpuštanju (T6).

Stoga je u ovoj disertaciji kao ispitivani materijal izabrana legura aluminijuma 2024-T351.

1.2.2. Određivanje veličine inicijalne prsline i njenog daljeg rasta

Veličina inicijalne prsline- a_0 (prsline koja postoji u strukturi pre njenog uvođenja u eksploataciju) se određuje na više načina:

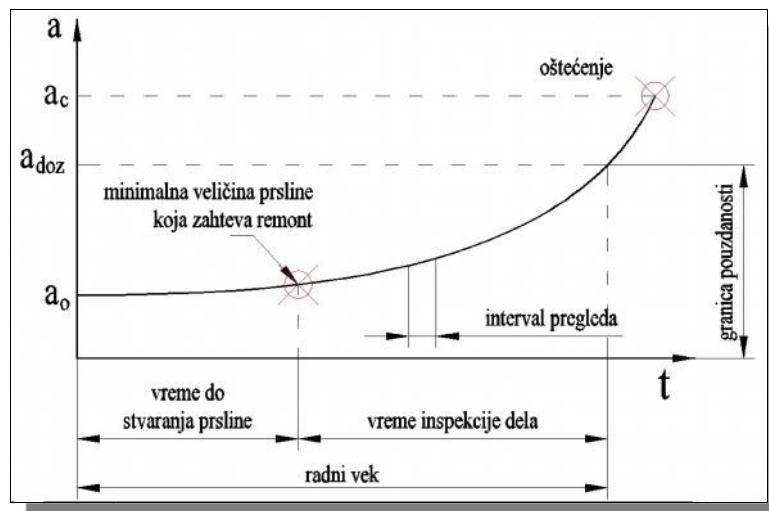
- NDE-nedestruktivna metoda;
- jednosmernom strujom;
- penetracijom;
- magnetnom metodom;
- radiografski;
- ultrazvučno.

Kritična veličina prsline- a_c se određuje na osnovu primenjenog napona- σ i žilavosti loma- K_{IC} na osnovu jednačine (2.38). Dozvoljena veličina prsline se određuje deljenjem kritične veličine prsline- a_c koeficijentom sigurnosti. Radni vek letelice bi se potom proračunao na osnovu vremena koje je potrebno da inicijalna prsline- a_0 poraste do dozvoljene vrednosti- a_{doz} , pri primenjenom spektru opterećenja (slika 1.2).

Brzina rasta prsline zavisi od:

- periodičnosti i intenziteta opterećenja;

- osobina materijala;
- uticaja okoline: temperatura, vlaga, korozija. Porast vlage i korozija izazivaju brži rast prsline. Ovaj uticaj je dat posredno - preko materijala (NASGRO/NASMAT baza-[4]).
- strukturnog rasporeda: da li u strukturi postoje ojačanja, koja usporavaju rast prsline.



Slika 1.2 Određivanje radnog veka letelice

U projektnoj fazi brzina rasta prsline u strukturi se određuje eksperimentalno na realnim delovima, pri čemu se meri dužina prsline u toku vremena, do loma. Međutim, ispitivanja iziskuju imponantne ekonomske troškove, tako da se pribegava razvoju analitičkih i/ili numeričkih metoda koje bi dale rezultate što približnije realno dobijenim.

U eksploatacionoj fazi, u cilju pravovremenog otkrivanja prsline nastalih usled zamora ili korozije, utvđuju se intervali pregleda na osnovu postojećeg radnog iskustva ili podataka dobijenih u toku projektne faze (analiza i ispitivanje). Inspekcija dela počinje sa nastankom prsline u strukturi koja iziskuje njen prvi remont (popravka ili zamena).

1.3. Osnovni koncepti projektovanja

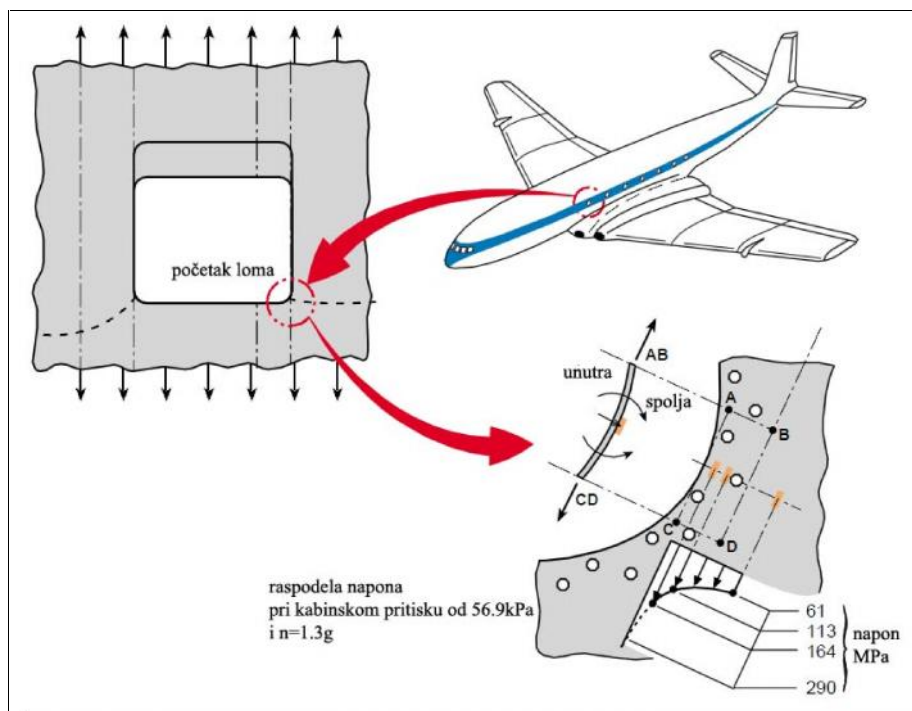
Lomovi konstrukcije mogu nastati u toku proizvodnje, montaže, transporta i/ili eksploatacije. Pojava loma može biti uzrokovana njenim predopterećenjem-statički lom. Ipak, nastanak prsline u vazduhoplovnim

konstrukcijama prvenstveno je uzrokovan dejstvom dinamičkog opterećenja, poznatog pod nazivom zamorno opterećenje. Takođe, na pojavu prsline bitno utiču i drugi parametri (temperatura, vlaga, korozija) koji u sadejstvu sa dinamičkim opterećenjem mogu dovesti do loma.

U projektnoj fazi, letelica se projektuje kako bi zadovoljila četiri glavna oblika oštećenja:

1. maksimalna statička izdržljivost;
2. izdržljivost usled zamora materijala;
3. izdržljivost oštećene konstrukcije usled zamora materijala (interval pregleda);
4. unutrašnja statička ozdržljivost oštećene konstrukcije.

Ovi uslovi obezbeđuju postizanje statičke i dinamičke izdržljivosti letelice. Pri proračunu statičke izdržljivosti konstrukcije u obzir se uzimaju normalni i tangencijalni (smicajni) naponi, dok se pri proračunu dinamičke izdržljivosti definiše otpornost konstrukcije na stvaranje prsline i dalje širenje pod dejstvom dinamičkog (zamornog) opterećenja.



Slika 1.3 Verovatni uzrok pada putničkog aviona „Comet I“ 1954.god.
(ilustracija preuzeta iz [5] i modifikovana)

Posebnu pažnju pobudio je pad putničkog aviona "Comet I" 1954.godine sa ukupno 3680 časova leta, odnosno 1286 letova. Naknadnim ispitivanjima utvrđeno je da je pad aviona uzrokovan pojavom zamorne prsline na prozoru kabine, nastale kao rezultat višekratne presurizacije kabinskog prostora (slika 1.3).

1955.godine su definisana dva osnovna koncepta pri projektovanju u odnosu na zamor materijala:

I koncept: Koncept bezbedne konstrukcije ("*safe life*") podrazumeva projektovanje komponenti sa aspekta sigurnosti (bezbednosti) tokom celokupnog eksploatacionog perioda, bez popravki ili zamena istih. Dakle, ako jedan element nije funkcionalan, cela konstrukcija se izbacuje iz upotrebe. Pri tome, ukupan vek letelice se unapred određuje, dok se kao proračunsko (radno) opterećenje usvaja opterećenje jednoznačno definisano propisima. Kada proračunski definisan radni vek istekne letelica se povlači iz upotrebe. Konstrukcija je tako isprojektovana da ima visoku otpornost na dejstvo svih vidova opterećenja. U toku projektne faze neophodno je što preciznije definisati intenzitet i učestanost, kao i prirodu opterećenja koje deluje na letelicu u toku njenog eksploatacionog perioda. Takođe, od velike je važnosti i raspolagati sa tačnim podacima o karakteristikama materijala, koje se dobijaju u laboratorijama. U cilju ostvarenja bezbedne (sigurne) letelice, neophodno je: povećati broj elemenata konstrukcije sa mogućnošću preraspodele opterećenja; izabrati materijal sa visokim karakteristikama na nastanak i rast prsline (visoka žilavost loma, adekvatna termička zaštita, primena nekih od metoda površinske zaštite, visok kvalitet površinske hrapavosti, mala osetljivost na koroziju). Nedostatak ovog koncepta je manji radni vek, a visoki ekonomski troškovi.

II koncept: Koncept pouzdane konstrukcije ("*fail safe*") predstavlja pristup koji podrazumeva upotrebu bilo koje komponente između dve rigorozne kontrole, pri čemu ista mora da zadovolji sa aspekta pouzdanosti. Dakle, prsline ne bi smele da se prošire do kritičnih dimenzija između dve uzastopne kontrole. U slučaju otkaza pojedinačnih komponenti, konstrukcija i dalje mora biti funkcionalna, odnosno mora posedovati određen stepen sigurnosti i posle određenog stepena oštećenja.

Oštećena konstrukcija zadržava dovoljnu krutost u cilju izbegavanja negativnih pojava kao što su: flater, divergencija, revers komandi pri brzinama u blizini granične brzine pri poniranju, intenzivne vibracije i/ili neki drugi nepredviđeni efekti. Takođe, struktura poseduje sposobnost da lokalizuje oštećenja (prslina) nastale dejstvom dinamičkog opterećenja. Od izuzetne važnosti su kontrolni pregledi (intervali pregleda-slika 1.2), koji se sprovode u cilju inspekcije prsline i primene mera sprečavanja njenog daljeg širenja na pojedinačnim komponentama.

Zamorni vek materijala, od prvog ciklusa do potpunog razaranja, se može predstaviti iz tri faze:

I faza: Do potpunog razaranja može doći samo ako je radno opterećenje veće od žilavosti loma- K_{IC} . Početni interval veka trajanja se izjednačuje sa vremenom potrebnim da se postojeće prsline do te mere razvije da dovodi do loma. Ovaj vremenski interval se naziva period izdržljivosti pri zamoru ili interval bezbedne upotrebe ("*safe life*"-interval).

II faza: U toku ove faze može doći do pojave loma konstrukcije čak i kada radno opterećenje ne dostiže kritičnu vrednost. Ta smanjena otpornost materijala je posledica smanjena površine usled stvaranja i daljeg širenja male prsline.

III faza: Predstavlja završni interval veka trajanja u kome je konstrukcija prilično oslabljena usled širenja prsline (smanjenje površine), tako da pojava potpunog loma može nastati i pri opterećenjima koja su drastično ispod žilavosti loma- K_{IC} .

Faze II i III zajedno predstavljaju vremenski interval koji se naziva interval pouzdanosti, tj. "*fail safe*" interval. To je vremenski interval između dva uzastopna pregleda. Dužina ovog intervala je funkcija: brzine smanjenja statičke izdržljivosti, brzine širenja prsline i uslova čvrstoće definisanih konceptom pouzdanosti, koji ograničavaju unutrašnje naprezanje na propisano granično. Nakon "*fail safe*" intervala dužina prsline se neće povećati do vrednosti kritične prsline, a naponi neće prevazići vrednosti kritičnog napona.

Početno vreme do pregleda konstrukcije može biti procenjeno na bazi proračunatog vremena do otkrivanja prve prsline. Međutim, postoji mogućnost da početno vreme do stvaranja prve prsline bude manje od očekivanog, te bi

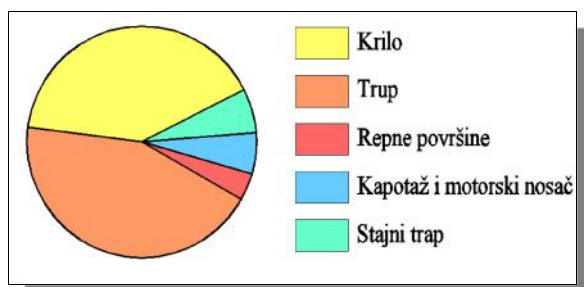
pregledi trebalo da počnu ranije. Da bi se smanjina verovatnoća promašaja otkrivanja kritične prsline, koristi se koeficijent sigurnosti: $S = 2$.

1.4. Tipovi konstrukcionih elemenata

Praktično iskustvo, ispitivanja i analize strukture letelice moraju pokazati da konstrukcija ima zadovoljavajuću čvrstoću na zamor, bez obzira što je projektovana da zadržava radnu sposobnost i kod otkazivanja drugih elemenata.

Nastanak i rast zamorne prsline je nemoguće sprečiti ili zaustaviti, ali se njihov uticaj može uzeti u obzir u toku projektne faze, faze izrade i u toku eksploatacionog perioda, a sve u cilju dobijanja maksimalno pouzdane konstrukcije za ceo radni vek letelice. Dakle, postojanje inicijalnih prsline u strukturi se prihvata, ali se njihov rast kontinuirano kontroliše.

Iskustvo je pokazalo da svi sklopovi, podsklopovi i elementi konstrukcije letelice nisu podjednako ugroženi sa aspekta pojave zamornog loma (slika 1.4). Iz tog razloga obavlja se lokalna analiza pojedinih elemenata: oplata, ramenjača, uzdužnici, rebra i okviri trupa, komponente komandnih površina, okovi, motorski nosač.



Ukupan broj uzoraka: 31429
problema snimljenih na 12 tipova vojnih aviona:

- bombarderi: B-52, B-58
- lovci: F-4, F-100, F-101, F-5
- trenažeri: T-37, T38
- transportni: C-130, C-133, KC-135, C-141

Slika 1.4 Primer distribucije lomova na konstrukcionim podsklopovima letelice (ilustracija preuzeta iz [6] i modifikovana)

Na bazi pomenutih koncepata nastala su dva tipa elemenata konstrukcije: bezbedni ("safe life") elementi i pouzdani ("fail safe") elementi.

Pod pojmom dobrog konstruisanja sa aspekta zamora materijala, podrazumeva se koncept bezbedne ("safe life") konstrukcije, pri čemu u toku

radnog veka letelice dolazi do nastanka prve prsline u strukturi, ali ne i do njenog potpunog loma.

Bezbedni (*“safe life”*) elementi predstavljaju one elemente čiji bi otkaz izazvao katastrofalne efekte, odnosno gubitak letelice. Dakle, kod ovog tipa elemenata ne sme doći do stvaranja prsline u toku eksploatacionog perioda. Elementi konstrukcije kod kojih lokalna ojačanja strukture nisu izvodljiva, nazivaju se bezbedni (*“safe life”*) elementi.

Ukoliko se pri projektovanju letelice zahteva bezbednost, tada je sa aspekta čvrstoće konstrukcije najadekvatnije rešenje statički neodređena konstrukcija, odnosno konstrukcija sa većim brojem elemenata. Pri tome, opterećenje se preraspodeljuje na taj način da krući delovi nose veća, a manje kruti delovi manja opterećenja. Prilikom otkaza jednog od elemenata uspostavlja se ponovna raspodela opterećenja, tako da ulogu nosećeg elementa preuzimaju neoštećeni delovi strukture. Svaka letelica bi trebalo da se bezbedno prizemi pri otkazu bilo kojeg od elemenata konstrukcije. Međutim, ova koncepcija projektovanja se ne primenjuje na sve komponente iz razloga povećanja mase letelice, a i iz razloga neopravdano povećanih troškova. Iz pomenutog razloga ojačavaju se samo neki delovi letelice i to oni koji su podložni slučajnom lomu, kao što su:

- Konstrukcija motorskog nosača: višegodišnje iskustvo u projektovanju letelica pokazalo je da je lom motorskog nosača česta pojava. Ukoliko je letelica sa dva simetrično postavljena motora, pri otkazu jednog motora, kompenzacija se postiže krmilom širine. Međutim, otkaz motora kod jednomotornih letelica dovodi do gubitka iste. Iz tog razloga motorski nosač je projektuje kao bezbedna (*“safe life”*) struktura. Ipak, prilikom projektovanja treba voditi računa o tome da lom motorskog nosača ili bilo koje komponente motora (npr. turbina) neće dovesti do razaranja preostalih delova osnovne konstrukcije – krila, trupa i/ili komandnih površina.
- Razaranje stajnog trapa može u znatnoj meri otežati i ugroziti prizemljenje letelice. Zbog toga stajni trap se projektuje na osnovu koncepta bezbednosti. Savremene letelice zahtevaju mogućnost prinudnog sletanja u slučaju kada stajni trap nije izvučen.

U drugu grupu elemenata, tzv. pouzdane (*“fail safe”*) elemente, ubrajaju se delovi konstrukcije koji sadrže lokalna ojačanja, kao što su: oplata krila sa ramenjačama i uzdužnicima, oplata trupa sa okvirima i uzdužnicima, podsklopovi horizontalnih i vertikalnih površina.

Optimalno projektovanje u odnosu na zamor materijala obezbeđuje visoku verovatnoću rada bez kvarova u cilju postizanja operativne gotovosti i ekonomske opravdanosti – koncept pouzdane (*“fail safe”*) konstrukcije. Pri tome, interval pouzdanosti je razumno dug, čime se postiže ekonomičnost pri održavanju (smanjen broj pregleda i intervencija).

Projektovanje avionskih konstrukcija pouzdanih na zamor obezbeđuje i velike materijalne uštede ne samo usled produženja eksploatacionog perioda, već i iz razloga smanjenja troškova održavanja, reparacije i zamene delova. Samim tim, smanjen je i broj udesa, što je značajno sa aspekta bezbednosti leta.

Koncept pouzdanosti (*“fail safe”*) je zasnovan na osnovnoj ideji da otkaz pojedinačnog dela konstrukcije neće dovesti do gubitka letelice. Dakle, otkaz komponente se predviđa na bazi prethodnog iskustva i onemogućava zahvaljujućim stalnim inspekcijama u određenim vremenskim intervalima, a potom i pravovremenim poravkama i/ili zamenama.

Negativni pojave koje mogu dovesti do gubitka letelice, ali se preventivno mogu sprečiti, su:

- Potpuno razaranje elemenata strukture izazvano dejstvom statičkog i/ili dinamičkog opterećenja tokom vremena.
- Nastanak elastičnih deformacija koje uzrokuju promenu aerodinamičkih osobina letelice:
 - veliki ugibi krila;
 - deformacija napadne ivice krila;
 - nesimetričnost elerona (zakrilca);
 - deformacija komandnih površina (krmilo širine i visine), ali i vertikalnog i horizontalnog stabilizatora;
 - flater aerodinamičkih površina.

U ojačane tankozidne konstrukcije se ubrajaju (slika 1.5):

1. podsklopovi aerodinamičkih površina (krilo, vertikalni i horizontalni rep), koji se sastoje od: oplata (tanki paneli), uzdužnika, ramenjača i rebara. Delovi podsklopa formiraju noseću strukturu. Oplata je projektovana da nosi deo opterećenja. Dakle, uloga oplata je dvojaka:

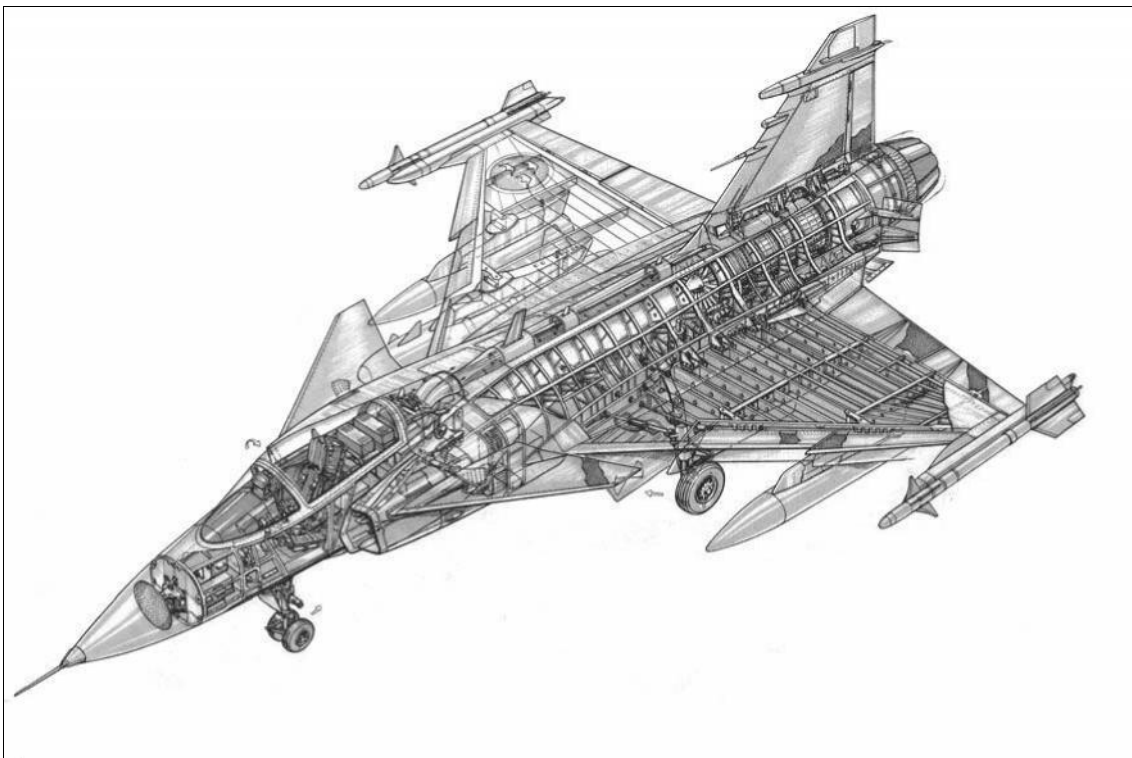
formira aerodinamičku konturu površine i nosi deo opterećenja. Deo oplata koji se nalazi u području kabinskog prostora je izložen dejstvu nadpritiska (presurizacija kabinskog prostora).

2. podsklop trupa se sastoji od: oplata, uzdužnika i okvira, koji predstavljaju komponente noseće strukture.

Za ojačanje tankozidnih struktura koriste se različiti tipovi ojačanja, ali i sistema za pričvršćivanje.

Ukoliko dođe do otkaza pojedinačne komponente strukture, preostali deo nosi opterećenje. Međutim, u slučaju trupa sa kabinom pod pritiskom, kod kog se oplata sastoji od velikih listova lima, projektovanje elemenata (panela) zahteva koncept bezbedne ("safe life") strukture u cilju zaštite ljudstva.

Na svakom od elemenata strukture letelice mogu se javiti različita oštećenja, koja su posledica preopterećenosti i/ili uticaja zamora.



Slika 1.5 Konstrukcija letelice (borbeni avion)

Oprema i funkcionalni sistemi se ubrajaju u posebno koncipirane konstrukcione sisteme.

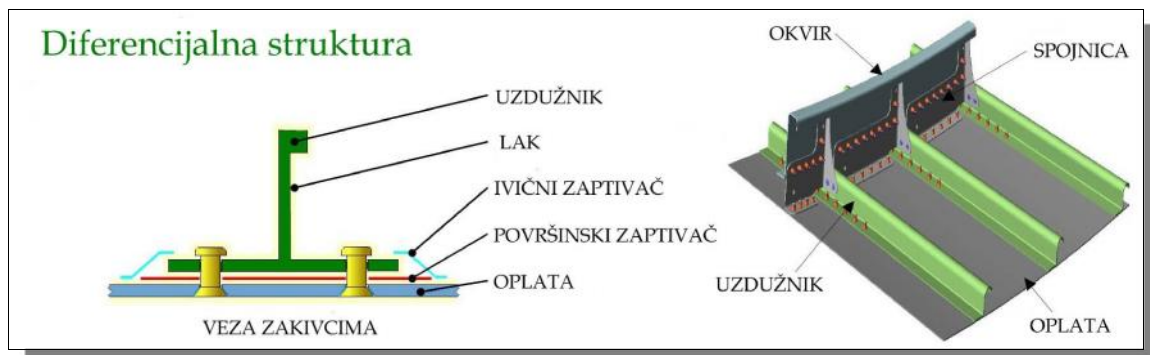
Oprema koja je smešten u kabinskom prostoru letelice, kao i sedišta, su projektovani na bazi tehničkih normativa koji omogućavaju bezbednost ljudstva u slučaju udesa.

U funkcionalni sistemi se ubrajaju sledeći sistemi:

- hidraulični - za pokretanje zakrilaca, elerona, kao i krmila širine i visine;
- pneumatski - za presurizacija i ventilacija kabinskog prostora;
- gorivni - snabdevanje gorivom;
- električni.

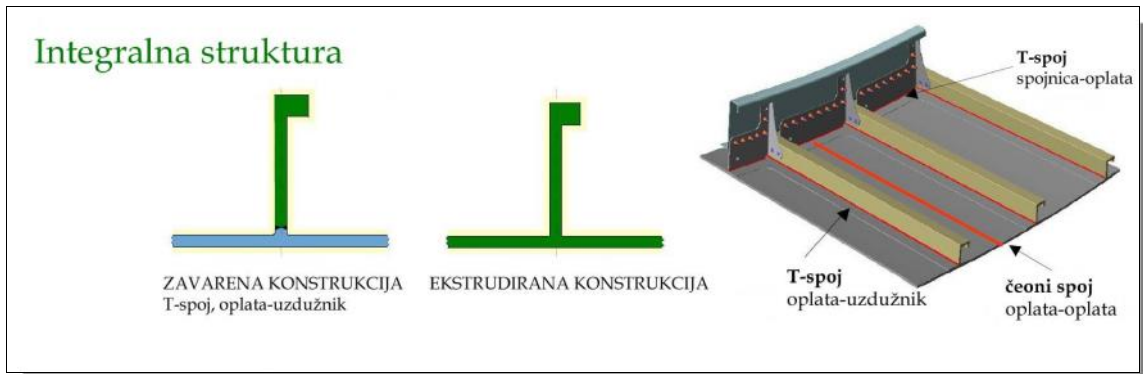
Pomenuti sistemi su udvojeni, fizički odvojeni i nezavisni. Što znači da pri otkazu jednog sistema drugi preuzima njegovu funkciju.

U vazduhoplovnoj industriji, kao komponente strukture se koriste tzv. tankozidne strukture ojačane uzdužnicima, okvirima i ramenja;ama. Na taj način se povećava krutost strukture, a time i njena nosivost, dok se sa druge strane obezbedjuje smanjenje mase. Veza između limova i uzdužika (okvira) se postiže pomoću zakivaka, vijaka ili nekom drugom tehnikom spajanja. Ovaj tip konstrukcije se naziva **diferencijalna struktura** (slika 1.6).



Slika 1.6 Primer diferencijalne strukture
(ilustracija preuzeta iz [7] i modifikovana)

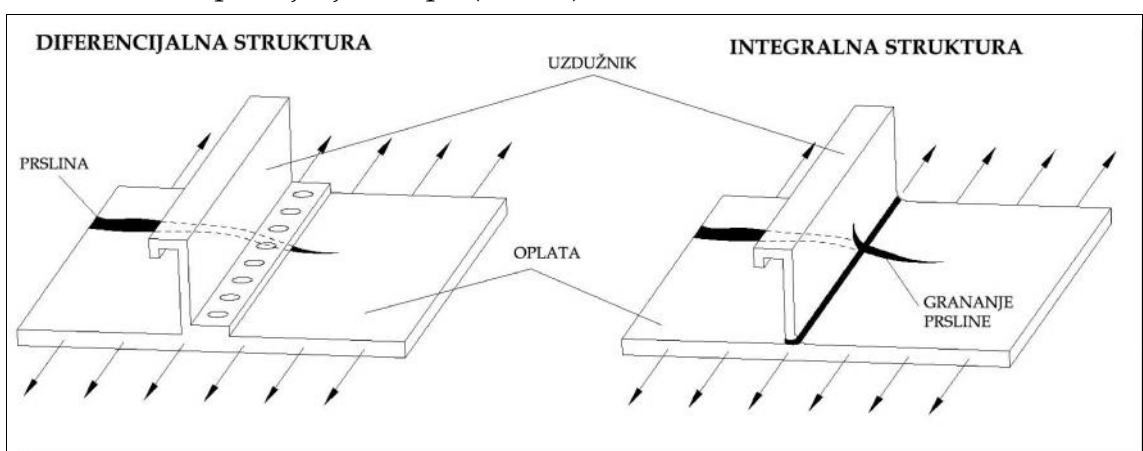
Međutim, zahvaljujući razvoju i primeni novih tehnoloških dostignuća u oblasti spajanja komponenti sklopa, primat preuzimaju tzv. **integralne strukture** (slika 1.7).



Slika 1.7 Primer integralne strukture
(ilustracija preuzeta iz [7] i modifikovana)

Prednosti integralne strukture se ogledaju u sledećem ([6]):

- ekonomičnost (smanjenje cene koštanja) do 15%:
 - postizanjem visokog nivoa automatizacije,
 - smanjenjem mase konstrukcije, koja se postiže eliminacijom veznih elemenata (zakivci, vijci), kao i zaptivača,
 - smanjenjem broja proizvodnih postupaka (koraka)
- smanjenje težine konstrukcije do 10%:
 - smanjenjem mase zaptivnih elemenata,
 - obezbeđivanjem većeg stepena slobode tokom procesa projektovanja konstrukcije,
 - korišćenjem legura aluminijuma sa manjom gustinom,
- povećanje otpornosti na koroziju:
 - eliminacijom zareza i prsline
 - nepostojanjem rupa (otvora).



Slika 1.8 Širenje prsline kod diferencijalne, odnosno integralne konstrukcije
(ilustracija preuzeta iz [8] i modifikovana)

1.5. Strukturna analiza (projektovanje)

Realizacija letelice podrazumeva sledeće faze:

- projektna faza;
- faza razrade konstrukcije (konstruisanje);
- faza izrade elemenata, podsklopova i sklopova;
- laboratorijsko ispitivanje;
- verifikacija.

U okviru **projektne faze** vrši se strukturna analiza, koja podrazumeva sledeće aspekte:

- određivanje spektra opterećenja (napona) za predviđeni radni vek letelice;
- određivanje žilavosti loma- K_{IC} za unapred poznat materijal konstrukcije;
- određivanje faktora intenziteta napona- K_I za unapred definisanu konstrukciju i poznatu geometriju prsline;
- određivanje položaja i inteziteta rasta prsline za unapred zadatu veličinu inicijalne prsline.

Faza razrade konstrukcije (konstruisanje) podrazumeva izradu celokupne tehničke dokumentacije, koja podrazumeva prateće radioničke i sklopne crteze, kao i prpratnu dokumentaciju. Pri tome se posebna pažnja poklanja izboru adekvatnih tehnološko-proizvodnih postupaka (način izrade i primena postupaka poboljšanja i zaštite).

Potom sledi **faza izrade elemenata**, podsklopova i sklopova.

Laboratorijska faza se primenjuje u cilju eksperimentalne provere proračunski dobijenih rezultata. Na bazi novodobijenih podataka, vrši se njihova eventualna korekcija. Ciklus se iterativno ponavlja sve dok se svi uticaji ne uzmu u obzir. Međutim ovakva ispitivanja iziskuju prilična materijalna sredstva. Takođe, karakteristike materijala se određuju na osnovu laboratorijskih analiza i ispitivanja.

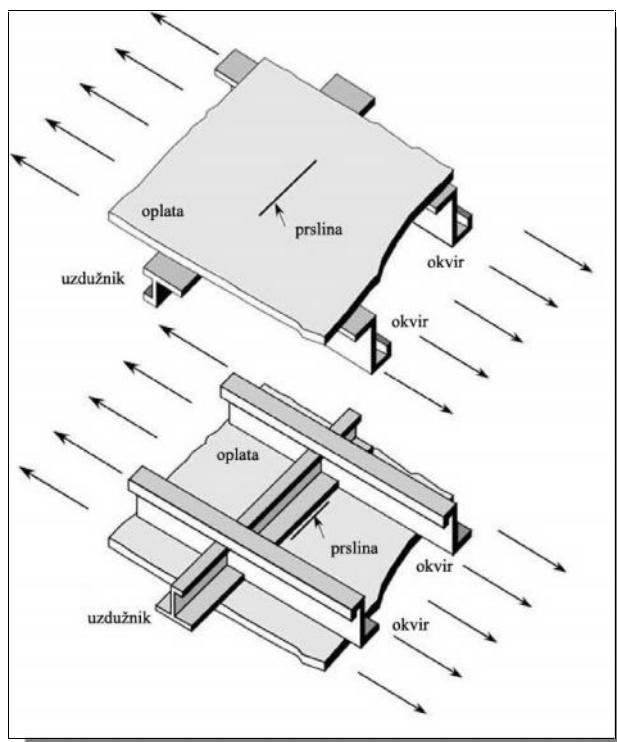
Po završetku zahtevanih testova, vrši se **verifikacija**, nakon čega je letelica spremna za eksploataciju.

1.6. Nastanak i rast prslina u tankozidnim konstrukcijama

Na svakom od elemenata strukture letelice mogu se javiti različita oštećenja, koja su posledica preopterećenosti i/ili uticaja zamora.

Na konstrukciji letelice mogu se javiti više tipova prslina. U okviru ovog rada biće ilustrovane neke od njih, kao što su:

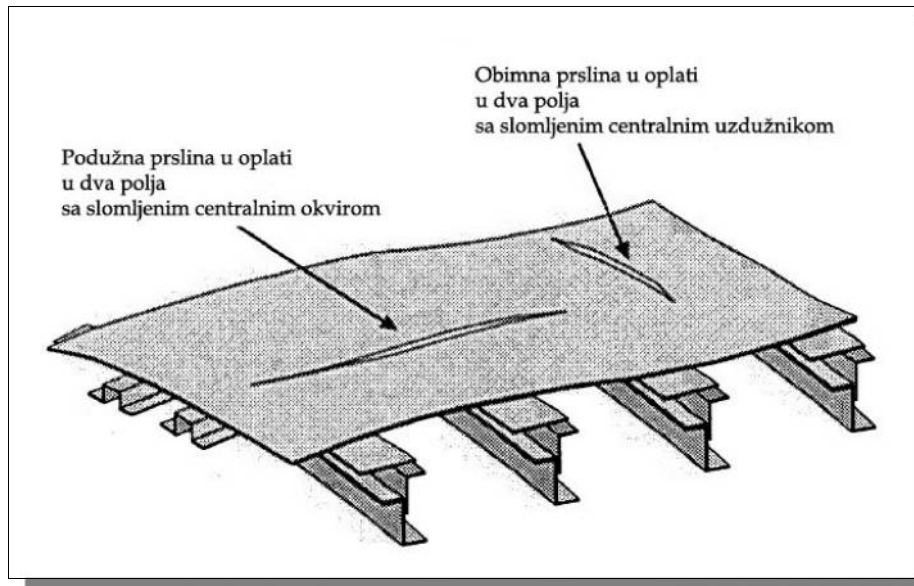
- prslina u jednom polju (slika 1.9);
- prslina u dva polja (slika 1.10).



Slika 1.9 Tipičan deo konstrukcije trupa (kod aviona) sa prslinom pored uzdužnika (ilustracija preuzeta iz [9] i modifikovana)

Tako, naprimer, usled zamora na mestu spoja oplata i ojačanja (uzdužnik ili okvir), može se formirati uzdužna prslina u jednom polju (slika 1.9). Uzdužna prslina može nastati i na mestu samog okvira, tako da se pri dejstvu opterećenja, širi u oba susedna dela oplata. Ovaj tip prsline nazivamo uzdužnom prslinom u dva polja (slika 1.10).

U okviru ovog poglavlja biće obuhvaćena i analiza naponskog stanja vrha prslina, kako za neojačane, tako i za ojačane ploče. Odnosno, biće razmatran uticaj ojačanja na koeficijent intenziteta napona.



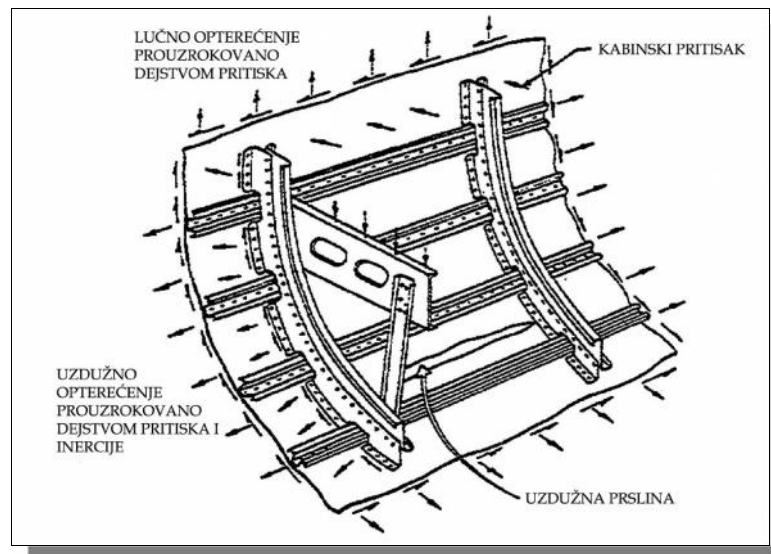
Slika 1.10 Prsline u dva polja
(ilustracija preuzeta iz [10] i modifikovana)

Strukturu trupa treba projektovati tako da izdrži oštećenje za traženo granično opterećenje. U slučaju trajnog oštećenja širenja prsline, poželjno je projektovati ojačavajuće elemente tako da spreče ova oštećenja. Pored toga, postoji mogućnost oštećenja usled spoljnjih objekata kao što su delovi raspadnutog motora. Deo lopatice turbine, naprimer, može probiti okvir trupa, što će rezultirati trajnim oštećenjem na oplati. Šteta pretrpljena od ovog odvojenog izvora takođe može izazvati i popuštanje delova okvira. Avion treba konstruisati samo za ona opterećenja na koja će verovatno naići dok se bude vraćao na aerodrom. Za velike mlazne avione ovo opterećenje je vezano sa za $n = 1.5g$, pri čemu se vrednost opterećenja uvećava kabinskim pritiskom. Prema tome, konstrukcija bi trebalo da obezbedi zadržavanja oba dela oplata sa polomljenim centralnim okvirom, pri upravo pomenutim opterećenjima.

U slučaju trupa, uzdužnici obezbeđuju stabilnost trupa usled dejstva lučnog opterećenja. Okviri prenose korisnu nosivost na oplatu, na koju deluju smičući naponi i opterećenje na pritisak (slika 1.11). Ovi ojačavajući elementi obezbeđuju potrebnu statičku čvrstoću, ali mogu da prouzrokuju i zaustavljanje širenja prsline u strukturi. Dakle, ojačanja imaju uticaj na promenu faktora intenziteta napona na vrhu prsline.

U slučaju krila, površinski sloj je projektovan sa aspekta čvrstoće konstrukcije na opterećenje smicanja i savijanja. Razmah uzdužnika obezbeđuje

stabilnost pod dejstvom pritiska, odnosno vazdušnih opterećenja nastalih usled zakrivljenosti konture krila.



Slika 1.11 Složena konstrukcijska struktura trupa
(ilustracija preuzeta iz [6] i modifikovana)

1.7. Ispitivanje na zamor

Pri ispitivanju letelice na zamor potrebno je primeniti stvaran spektar opterećenja (isti intenzitet i učestanost dejstva opterećenja), koji deluje na letelicu u realnom vremenu (u toku eksploatacionog perioda). Dakle, ispitivanje mora biti sprovedeno u onom vremenskom intervalu koji odgovara stvarnom životnom veku letelice.

U cilju što analitičnijeg i sistematičnijeg određivanja opterećenja koji deluje na konstrukciju, spektar opterećenja je podeljen na sledeće segmente:

- opterećenja na zemlji (rulanje pri poletanju i sletanju);
- opterećenje u letu pri manevru;
- opterećenja indukovana udarom vetra.

Takođe, u proračun se uključuje i ciklus kabinskog pritiska.

Na bazi ovih podataka, proračunava se svako potencijalno kritično mesto sa aspekta zamora materijala. Podaci dobijeni pri ispitivanju se koriste pri proceni veka letelice u vidu časova leta ili broja letova. Radni vek letelice određuje naručilac ugovorom, tako da je od izuzetnog značaja utvrditi tačnost procenjenog veka konstrukcije ispitivanjem.

Kod borbenih aviona spektar opterećenja se određuje na osnovu prethodnog ponašanja sličnih letelica pri eksploataciji.

Procedura zamornog ispitivanja se sastoji iz sledećih faza:

I faza: Sakupljanje relevantnih podataka.

II faza: Određivanje faktora koji utiču na vek letelice, kao što su: materijal, tehnološki postupci (proizvodnje i zaštite), uticaj okruženja.

III faza: Utvrđivanje dozvoljenih napona definisanih izborom materijala. Pri tome treba uzeti u obzir uticaj obrade.

IV faza: Određivanje kritičnih mesta, odnosno elemenata konstrukcije kod kojih se javlja potencijalna opasnost od loma. Eventualno izvršiti njihovo ponovno dimenzionisanje ili način njihove izrade.

V faza: Upoređivanje proračunski dobijenih podataka sa eksperimentalno dobijenim podacima. Na bazi poređenja utvrditi relevantnost proračuna i izvršiti verifikaciju.

VI faza: Propisivanje postupaka održavanja letelice: način, sredstva i intervale pregled.

1.8. Procena kritičnih mesta

Elementi strukture čiji otkaz može dovesti čak i do gubitka letelice se nazivaju kritičnim elementima. Dakle, prilikom inspekcije konstrukcije, bitno je izvršiti detaljan pregled svih elemenata koji su bitni sa aspekta funkcionalnosti letelice. U tzv. kritične elemente, odnosno podsklopove konstrukcije, ubrajaju se sistemi koji su značajni: pri letu (krmilo visine i širine, eleroni); pri poletanju, odnosno sletanju (stajni trap, zakrilca); elementi koji trpe presurizaciju (oplata kabinskog prostora).

Ispitivanje kritičnih elemenata se sprovode u sledećim fazama:

I: Statička analiza-podrazumeva ispitivanje statičke otpornosti delova koji su izloženi dejstvu zateznog ili smicajnog opterećenja.

II: Određivanje kritičnih mesta sa aspekta koncentracije napona. Takođe, bitno je izvršiti pregled zaklonjenih ivica, koje se nalaze na preklopu dveju površina. Područja sa koncentracijom napona se najčešće javljaju kod otkivaka. Iz tog razloga neophodno je izvršiti inspekciju izrađenog dela pre njegove ugradnje.

III: Naročito je potrebno obratiti pažnju na delove koji trpe veća opterećenja, već i one koji su izloženi većem broju ciklusa opterećenja. Primer takvog elementa predstavlja nosač zakrilaca, koji je izložen dejstvu aerodinamičkih sila oko 1000 puta po letu. Ova opterećenja su manjeg intenzitete, ali velikog odnosa napona- R i mogu ubrzano dovesti do loma strukture odmah po nastanku prsline.

IV: Kada dođe do pojave loma nosećih elemenata strukture, dejstvo opterećenja se prenosi na sekundarne elementi, koji su sada intenzivnije opterećeni. Dakle, dolazi do pojave preraspodele opterećenja. Iz tog razloga, potrebno je izvršiti pregled i ovih elemenata, nakon gubitka primarnih.

V: Posebna pažnja se poklanja inspekciji delova konstrukcije koji su izrađeni od materijala lošijih karakteristika, sa aspekta zamora: veliki gradijent promene dužine prsline u funkciji od broja ciklusa opterećenja- $\frac{da}{dN}$, kao i niska vrednost žilavosti loma- K_{IC} .

VI: Definisane potencijalnih mesta loma konstrukcije. Rezultati ove faze se ne mogu iskoristiti u toku preliminarne projektne faze, ali mogu poslužiti kao dobra osnova u programu održavanja.

Prilikom inspekcije delimično oštećenog dela, razmatraju se sledeći uticaji:

I: Prethodno iskustvo u održavanju sličnih konstrukcija letelica - sličnih režima rada i namene.

II: Otkrivanje teško vidljive prsline korišćenjem specijalizovanih metoda pregleda (npr. X-zracima). Nepristupačan deo konstrukcije mora biti isprojektovan tako da se prsline uvek javlja na spoljašnjem delu, u cilju njenog lakšeg detektovanja.

Utvrđivanje brzine rasta prsline za svaki element konstrukcije. Kritična dužina prsline pri projektovanju mora biti tako definisana da je brzina rasta još uvek mala veličina, tako da po isteku sledećeg intervala ne dođe do pojave loma komponente.

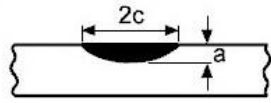
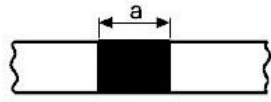
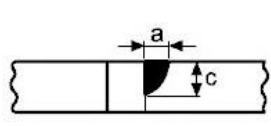
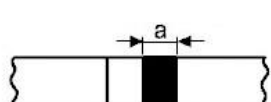
Pri eksploataciji letelice javljaju se mnogi negativni efekti, čiji uticaj nije unapred uzet u obzir pri proračunu. Iz tog razloga, prilikom projektovanja

konstrukcije potrebno je izvršiti korekciju proračuna korišćenjem adekvatnog stepena sigurnosti.

Tabela 1.1 predstavlja vojni standard (*USAF MIL-A-83444*) koji definiše geometriju inicijalnih prslina u vazduhoplovnim konstrukcijama.

Tabela 1.1 *USAF MIL-A-83444*

(Ilustracija preuzeta iz [5] i modifikovana)

tipovi prslina		odnos a/c	pretpostavljena veličina inicijalne prslina [mm] (odmah nakon pregleda)		
opis	geometrija		pre eksploatacije- pregled sa visoko- standardizovanom NDM		u toku eksploatacije- pregled sa specijalnom NDM
			"fail-safe"	spori rast prslina	
površinska prslina		1.0 0.2	1.27	3.18	6.35
prolazna prslina			2.54	6.35	12.7
prslina na obodu rupe/otvora		1.0 0.2	0.51	1.27	6.35 mm preko glave vijka ili navrtke
prolazna prslina na rupi/ovoru			0.51	1.27	6.35 mm preko glave vijka ili navrtke

2. MEHANIKA LOMA

2.1. Uvod [1]

Mehanika loma je naučna disciplina koja se bavi problematikom pojave prslina u strukturi, kao i njihovim daljim širenjem pod dejstvom opterećenja. Takođe, razmatra se ponašanje konstrukcije sačinjene od adekvatnog materijala u prisustvu prslina.

Razvoj mehanike loma, kao naučne discipline, počeo je početkom XX veka, i to zahvaljujući radovima *Inglis*-a o koncentraciji napona, odnosno radovima *Griffith*-a o brzini oslobađanja energije. Sredinom XX veka svoj doprinos razvoju ove naučne discipline, dao je i *Irwin*. On je postavio temelje linearno-elastične mehanike loma. Dakle, *Irwin* uvodi faktor intenziteta napona, kao i njegove kritične vrednosti. Teorijske osnove su našle svoju primenu u praksi dajući značajne rezultate objašnjavajući uzroke loma broda "*Liberty*" i aviona "*Comet I*".

Uskoro ova naučna disciplina daje objašnjenje za elasto-plastičnu oblast ispred vrha vrslina i to uvođenjem adekvatnih parametara: otvaranja vrha prslina i J-integrala.

Mehanika loma nalazi svoju primenu kod konstrukcija koje su izložene radnim uslovima tipičnim za nastanak prslina, kao što su zamor, puzanje i korozija.

Mehanike loma se zasniva na dvostranom tumačenju parametara: opterećenje i geometrija konstrukcije (sa jedne strane) uključujući geometriju prslina, odnosno svojstvo materijala (kao meru otpornosti na rast prslina). Time se formira tzv. trougao mehanike loma (slika 2.1), koji ukazuje na međusobnu interakciju parametara mehanike loma.

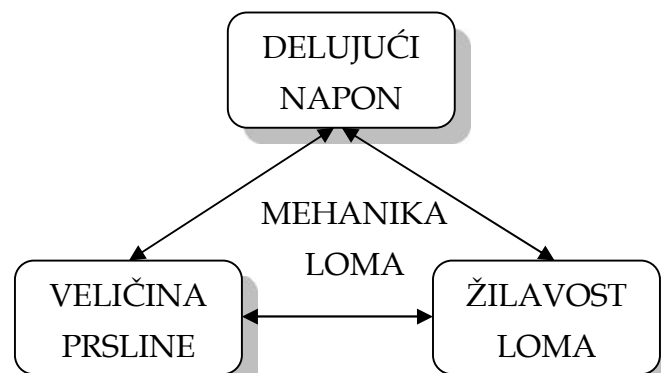
Integritet konstrukcija je relativno nova naučna i inženjerska disciplina, utemeljena na principima mehanike loma. Dakle, integritet konstrukcija u širem smislu obuhvata analizu stanja i dijagnostiku ponašanja i popuštanja, procenu veka i revitalizaciju konstrukcija ([1]). Dakle, ova disciplina se bavi:

1. analizom naponsko-deformacionog stanja u strukturi bez prslina, primenom metode konačnih elemenata-MKE (*FEM-Finite Element Method*), čime se dobija precizna i detaljna raspodela napona, pomeranja i

deformacija u strukturi. Na taj način moguće je utvrditi „slaba“ mesta i preduprediti pojavu prslina, kao i njihov dalji rast.

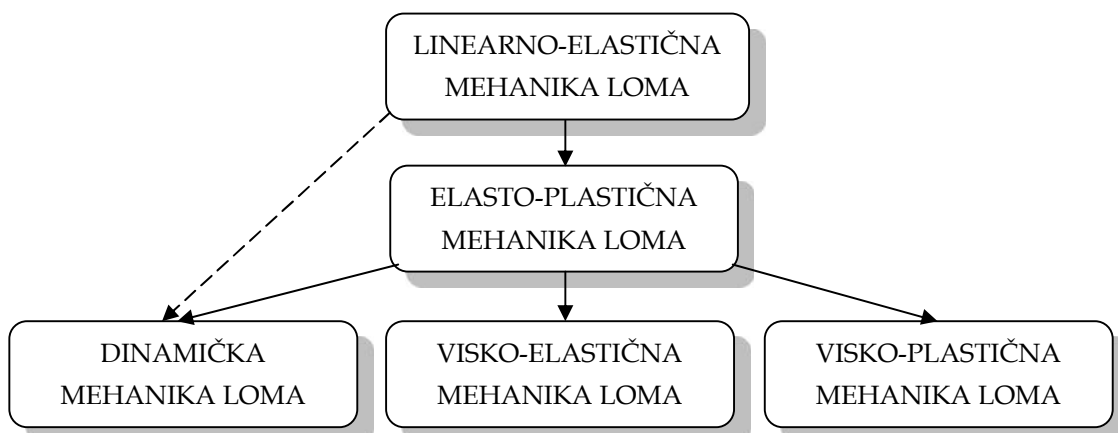
2. Analizom širenja već postojeće prslina/a u strukturi, kao i dalje ponašanje konstrukcije pod dejstvom delujućeg opterećenja. Utvrđivanje stabilnosti rasta u strukturi, ako i primena mera u cilju sprečavanja pojave loma.

Dakle, ovaj rad koristi principe mehanike loma i primenjuje ih u proceni integriteta konstrukcija zavarenih frikcionim zavarivanjem mešanjem. U pitanju su konstrukcije sačinjene od lakih legura koje se prvenstveno koriste u vazduhoplovstvu (legura aluminijuma: 2024-T351 Al).



Slika 2.1 Trougao mehanike loma
(ilustracija preuzeta iz [1])

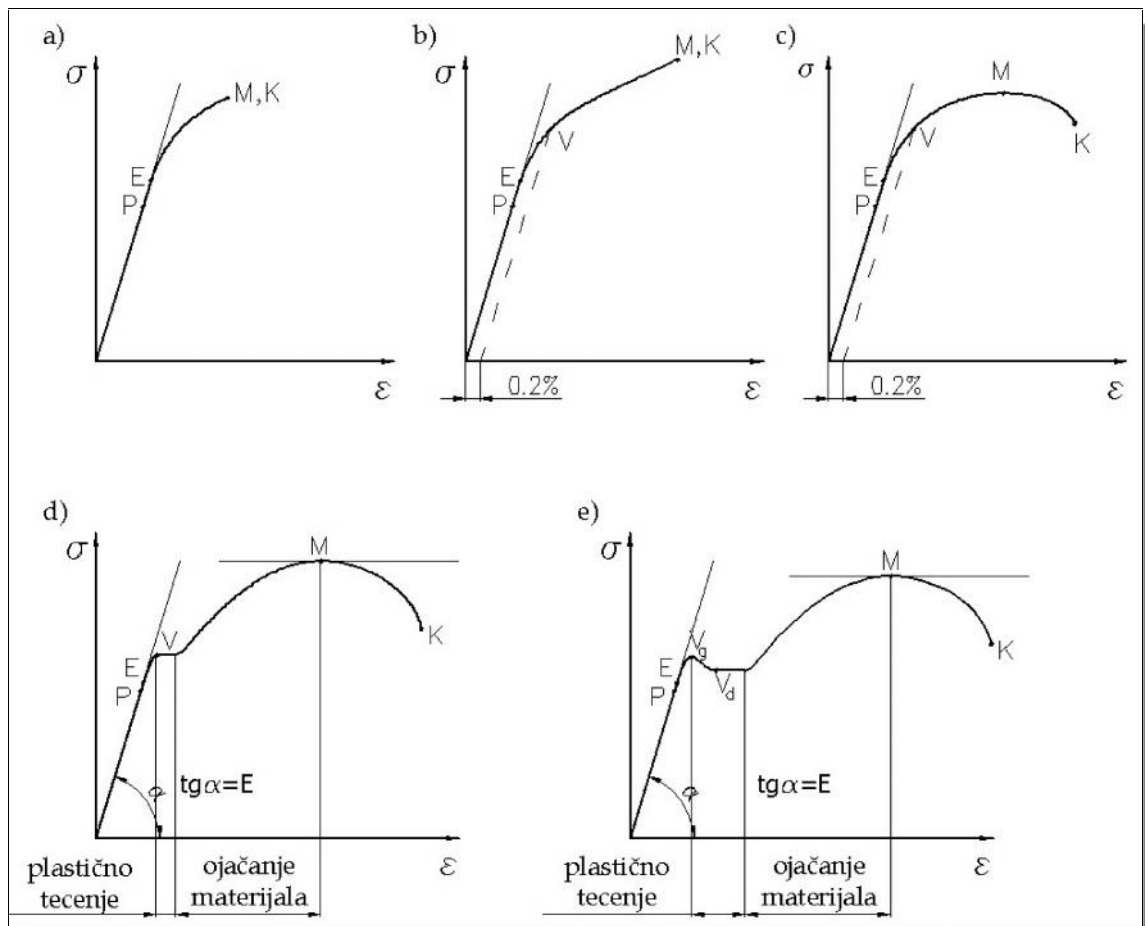
U daljem radu biće prezentovane teorijske osnove mehanike loma, odnosno osnovni koncepti linearno-elastične i elasto-plastične mehanike loma. Biće definisani odgovarajući parametri i objašnjena njihova primena na izvesnom broju važnih praktičnih primera.



Slika 2.2 Pojednostavljeni prikaz strukture mehanike loma
(ilustracija preuzeta iz [11] i modifikovana)

2.2. Podela mehanike loma

Predmet proučavanja mehanike loma je ponašanje materijala pod dejstvom opterećenja. Veza između napona- \uparrow i deformacije- v definisana je Hooke-ovim zakonom (slika 2.3).



Slika 2.3 Hooke-ovi dijagrami

Tipični oblici " σ - ϵ " dijagrama za slučaj ispitivanja zatezanjem

(*E*-granica elastičnosti, *P*-granica proporcionalnosti, *V*-granica velikih deformacija odnosno granica velikih izduženja (razvlačenja), *Vg*-gornja granica velikih izduženja, *Vd*-donja granica velikih izduženja, *M*-čvrstoća materijala, *K*-granica kidanja)

Na ovom dijagramu, tačka *P* predstavlja granicu proporcionalnosti, odnosno tačku do koje je veza između napona- \uparrow i deformacije- v linearna, što se može prikazati sledećom zavisnošću:

$$\uparrow = E \cdot v \quad (2.1)$$

gde je: *E* -Young-ov moduo elastičnosti (karakteristika materijala)

Granica elastičnosti je predstavljena tačkom E-tačka elastičnosti, što znači da se struktura po prestanku dejstva opterećenja vraća u prvobitno stanje, dok veza između napona i deformacije nije više linearna. Nakon granice elastičnosti je područje plastičnosti, što znači da se struktura ne vraća u prvobitno stanje nakon rasterećenja, tj. dolazi do njenog plastičnog deformisanja. Dakle, nastala deformacija je trajne prirode.

Na osnovu ovih karakterističnih tačaka *Hooke*-ovog dijagrama, imamo podelu mehanike loma na sledeće podoblasti:

- Mehanika linearno-elastičnog loma (MLEL) bavi se proučavanjima strukture u području linearne elastičnosti materijala (do tačke P). U okviru elastičnog ponašanja materijala široko su razvijene posebne naučne discipline, kao što su: visko-elastičnost i termo-elastičnost (do tačke P).
- Od 1960.godine razvijene su različite teorije mehanike loma o fenomenu plastičnog ponašanja materijala, kao što su: teorija plastičnosti, visko-plastičnost i termo-plastičnosti (od tačke P).

U tabeli 2.1 dat je prikaz tipova loma kod nekih materijala na temperaturi okoline.

Tabela 2.1 Tipovi loma kod nekih materijala

MATERIJAL	TIP LOMA na temperaturi okoline
Čelik velike čvrstoće	Linearno-elastičan
Čelik niske i srednje čvrstoće	Elastično-plastičan/ potpuno
Austenitni nerđajući čelik	Potpuno elastičan
Aluminijum otvrdnut taloženjem	Linearno-elastičan
Metali pri visokim temperaturama	Visko-plastičan
Metali pri velikim brzinama	Dinamičko-visko-plastičan
Polimeri (ispod T_g)*	Linearno-elastičan/visko-elastičan
Polimeri (iznad T_g)*	Visko-elastičan
Monolitna keramika	Linearno-elastičan
Keramički kompozit	Linearno-elastičan
Keramika pri visokim temperaturama	Visko-plastičan
* T_g – temperatura prelaza (za staklo)	

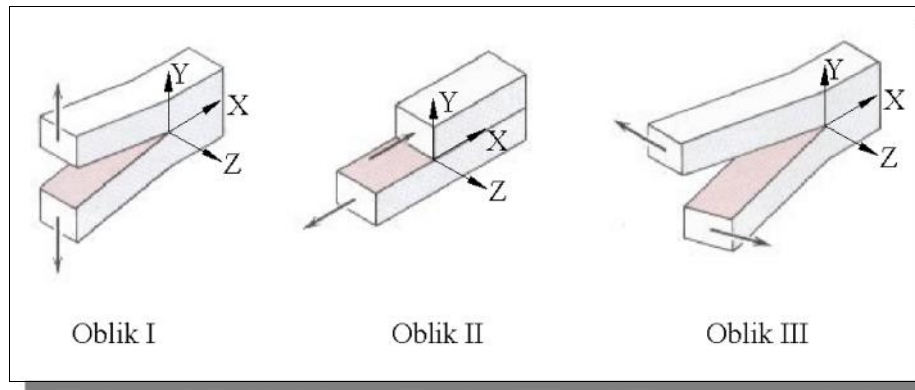
U slučaju postojanja prslina i/ili zareza u strukturi, dolazi do preraspodele napona u blizini njihovog vrha, tj. do pojave koncentracije napona. Pod dejstvom povišene vrednosti napona, u toj zoni nastaje plastična deformacija. Samim tim, postoje dve oblasti: linearno-elastična oblast (udaljena od vrha prslina) i plastična oblast (oko vrha prslina). Plastično područje je relativno malu u odnosu na dimenzije mašinskog dela. Bazirajući se na ovoj pretpostavci, dalja analiza nastanka i rasta prslina je obrađena na bazi teorijskih principa mehanike linearno-elastičnog loma. Za oblast u blizini vrha prslina vrše se korekcije zasnovane na bazi teorije plastičnosti.

2.3. Osnovni oblici stvaranja površina loma

Rast prslina zavisi od naponsko-deformacionog stanja u okolini njenog vrha. Raspodela napona u pomenutoj oblasti zavisi od oblika obrazovanih površina loma. Površina loma predstavlja neopterećenu granicu napregnutog tela.

Kod izotropnih materijala razlikuju se tri osnovna oblika pomeranja površina prslina (*Orowan*) (slika 2.4):

- **Oblik I ("istezanje"):** prslina nastaje cepanjem, tj. razdvajanjem površina loma duž y -ose, simetrično u odnosu na prvobitnu ravan prslina (ravan xz). Pri tome, površine loma se odvajaju jedna od druge.
- **Oblik II ("smicanje u ravni"):** razvoj prslina klizanjem predstavlja pomeranje jedne površine loma prema drugoj u istoj ravni (ravan xz). Kod ovog oblika, površine klizu jedna po drugoj i to u pravcu x -ose, ali u suprotnim smerovima.
- **Oblik III ("smicanje van ravni"):** prslina se obrazuje bočnim smicanjem i to pomeranjem jedne površine loma po drugoj duž čela prslina (z -osa). Pri tome, tačke koje su pre nastanka prslina bile u istoj vertikalnoj xy -ravni, nakon obrazovanja prslina se raspoređuju u različitim vertikalnim ravnima. Kod ovog oblika dolazi do međusobnog klizanja površina u pravcu z -ose.



Slika 2.4 Oblici (modovi) obrazovanja površine loma

Najzastupljeniji oblik stvaranja površine loma prilikom projektovanja i eksploatacije konstrukcije jeste **oblik I**. Pri opterećenju mašinskog dela na zatezanje dolazi do obrazovanja prsline cepanjem materijala, a zatim i do njenog nekontrolisanog rasta, što će u daljem uzrokovati pojavu loma konstrukcije.

Međutim, realno se javljaju kombinacije sva tri slučaja obrazovanja površina loma.

2.4. Linearno-elastična mehanika loma

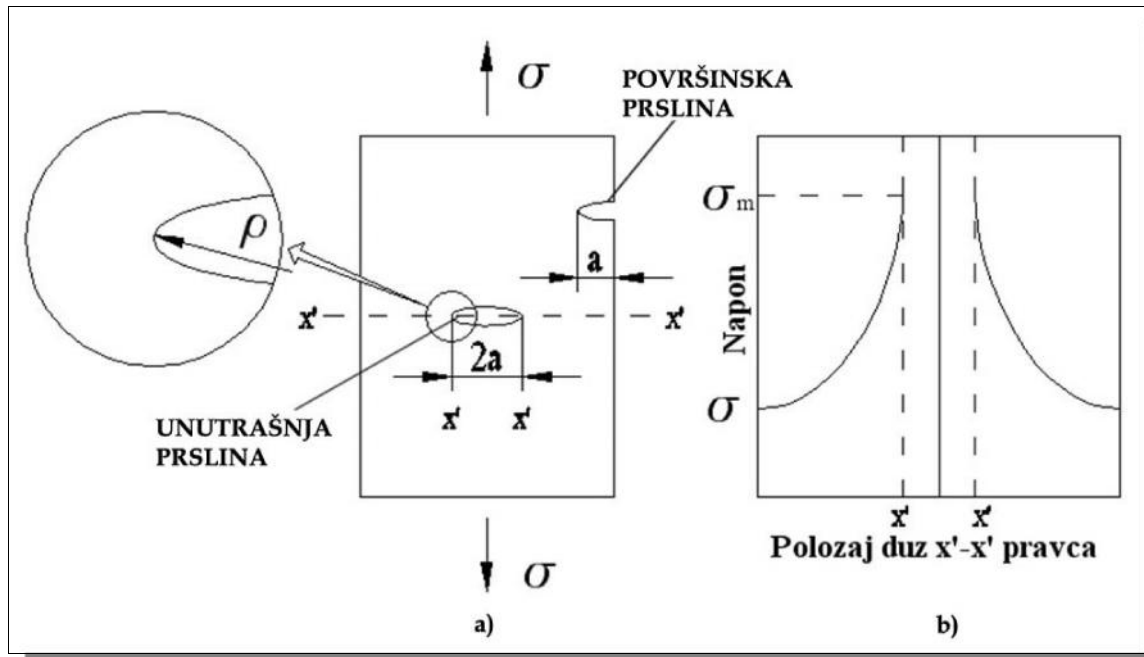
2.4.1. Faktor intenziteta napona- K_I

Faktor (koeficijent) intenziteta napona- K je osnovni faktor u oblasti mehanike loma, kojim se opisuje naponsko-deformaciono stanje u okolini vrha prsline, uzrokovano dejstvom udaljenog opterećenja ili postojanjem zaostalih napona u strukturi. Kada vrednost napona postane kritična, male prsline rastu što dovodi do loma.

Vrednost faktora intenziteta napona- K je funkcija primenjenog napona, oblika površine loma, veličine i položaja prsline, kao i geometrije mašinskog dela na kom je prslina detektovana.

Za ravnu ploču načinjenu od materijala idealno elastičnih svojstava, jedinične debljine, sa centralnom prslinom dužine $2a$ (slika 2.5), dobija se sledeća zavisnost (jednačina *Griffith-a*):

$$K = \dagger \cdot \sqrt{f \cdot a} \quad (2.2)$$



Slika 2.5 a) Geometrija površinske i unutrašnje prsline;
b) Šematski prikaz raspodele napona duž preseka X'-X'

Dakle, faktor intenziteta napona- K proporcionalan je naponu i kvadratnom korenu dužine prsline.

Ukoliko je u pitanju oblik I obrazovanja površina loma, imamo sledeće:

$$K_I = \dagger \cdot \sqrt{f \cdot a} \quad (2.3)$$

Odnosno, za oblik II i III (jednačine Irwin-a):

$$K_{II} = \ddagger \cdot \sqrt{f \cdot a} \quad (2.4)$$

$$K_{III} = \ddagger \cdot \sqrt{f \cdot a} \quad (2.5)$$

gde su:

- \dagger -normalni napon;
- \ddagger -tangencijalni (smicajni) napon.

Treba napomenuti to da su ove jednačine određene za linearno-elastično područje, kao i za krte materijale.

Najčešći slučaj obrazovanja površina loma je oblik I, te se **faktor (koeficijent) intenziteta napona** označava sa K_I . Većina materijala je podložnija lomu usled normalnog nego usled tangencijalnog (smicajnog) napona. Stoga, oblik I obrazovanja površine loma predstavlja najopasniji oblik

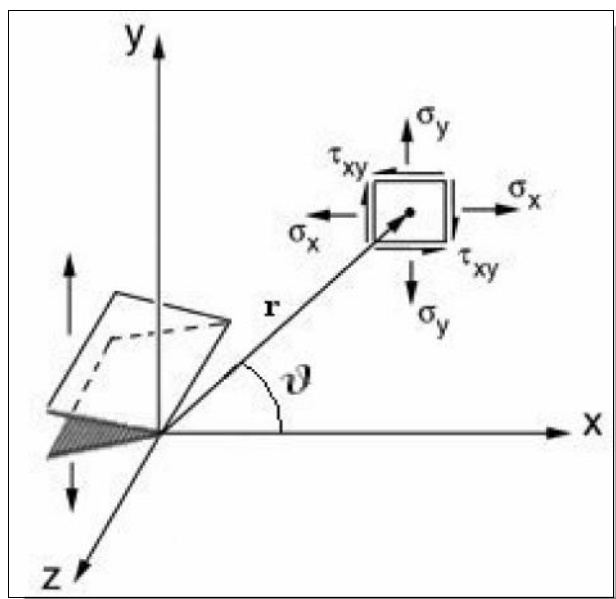
loma, te je najbolje teorijski i eksperimentalno obrađen. Opterećenja tipa II i III, obično ne dovode do loma, tj.:

$$K_{II}, K_{III} < K_I \quad (2.6)$$

Faktora intenziteta napona- K_I opisuje distribuciju napona u okolini prsline.

2.4.2. Raspodela napona u okolini vrha prsline

Na vrednost napona i deformacija utiču: spoljašnje opterećenje (definisano naponom \dagger), dužina prsline a , kao i dimenzije uzorka. Ovi uticaji mogu biti objedinjeni preko faktora intenziteta napona- K_I . Faktor intenziteta napona je dominantan u okolini vrha prsline, tj. u tzv. "K-dominantnoj oblasti". U okviru ove oblasti ne važi teorija linearno-elastičnog loma. Neposredno uz sam vrh se nalazi plastična oblast u okviru koje dolazi do pojave žilavog loma.



Slika 2.6 Raspodela napona u okolini vrha prsline

Na slici 2.6 dat je prikaz jednog elementa u blizini vrha prsline, kao i vrednosti normalnog napona u pravcu x i y-ose (\dagger_x, \dagger_y) i napona smicanja u xy-ravni (\dagger_{xy}), kao i vrednosti odgovarajućih pomeranja u pravcu x i z-osa. Vrednosti su date u funkciji faktora intenziteta napona K_I za oblik I (*Irwin i Klintok*):

$$\tau_x = \frac{K_I}{\sqrt{2 \cdot f \cdot r}} \cos \frac{\alpha}{2} \left(1 - \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \sin \frac{3\alpha}{2} \right) \quad (2.7)$$

$$\tau_y = \frac{K_I}{\sqrt{2 \cdot f \cdot r}} \cos \frac{\alpha}{2} \left(1 + \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \sin \frac{3\alpha}{2} \right) \quad (2.8)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2 \cdot f \cdot r}} \left(\sin \frac{\alpha}{2} \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \cdot \cos \frac{3\alpha}{2} \right) \quad (2.9)$$

$$u_x = \frac{K_I}{2\tilde{\nu}} \sqrt{\frac{r}{2f}} \cos \frac{\alpha}{2} \left[\left| -1 + 2 \cdot \sin^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right| \right] \quad (2.10)$$

$$u_y = \frac{K_I}{2\tilde{\nu}} \sqrt{\frac{r}{2f}} \sin \frac{\alpha}{2} \left[\left| +1 - 2 \cdot \cos^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right| \right] \quad (2.11)$$

gde su:

$$\bullet \quad \tilde{\nu} = \frac{E}{2(1+\epsilon)} \quad \text{-moduo klizanja;} \quad (2.12)$$

• E - Young-ov moduo elastičnosti;

• ϵ - Poisson-ov koeficijent;

$$\bullet \quad \left| \right| = \frac{3-\epsilon}{1+\epsilon} \quad \text{- za ravno stanje napona;} \quad (2.13-a)$$

$$\left| \right| = 3 - 4 \cdot \epsilon \quad \text{- za ravno stanje deformacije.} \quad (2.13-b)$$

Svaka od komponenti napona zavisi od konstante K_I . Što znači da, ukoliko znamo vrednost faktora intenziteta napona- K_I poznata nam je raspodela napona u okolini vrha prsline.

Iz jednačine (2.8) za $\alpha = 0$ sledi:

$$\tau_y = \frac{K_I}{\sqrt{2 \cdot f \cdot r_p}} = \frac{K_I}{\sqrt{2 \cdot f \cdot (a-x)}} \quad (2.14)$$

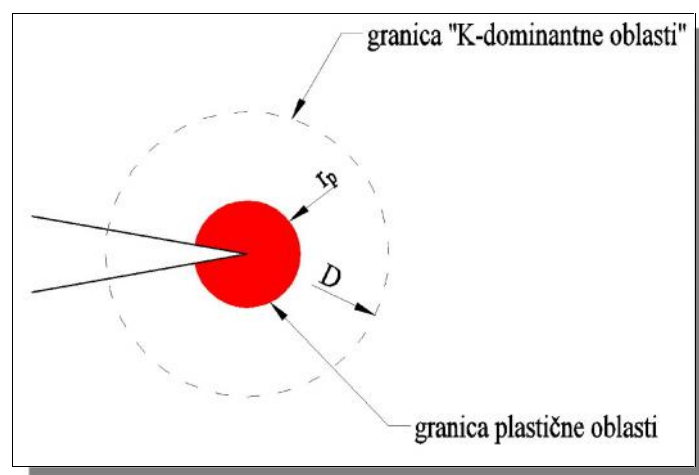
Dimenzija plastične oblasti $r = r_p$, dobija se kada se napon τ_y (pri $\alpha = 0$) izjednači sa naponom na granici tečenja τ_t (za slučaj ravnog stanja napona) [12]:

$$r_p = \frac{1}{2f} \left(\frac{K_I}{\tau_t} \right)^2 \quad (2.15)$$

Za slučaj stanja ravne deformacije, napon se izjednačava sa $\sqrt{3}\tau_t$, odakle sledi:

$$r_p = \frac{1}{6f} \left(\frac{K_I}{\tau_t} \right)^2 \quad (2.16)$$

Ukoliko se oblast plastičnog deformisanja nalazi unutar "K-dominantne oblasti": $r_p \ll D$, tada se ovaj slučaj naziva slučajem sa srazmerno malim tečenjem (slika 2.7).



Slika 2.7 Raspodela napona u okolini vrha prsline

Na osnovu dalje analize utvrđeno je da unutar "K-dominantne oblasti" naponi i deformacije ne zavise od opterećenja i geometrije dela. Parametar koji definiše naponsko-deformaciono stanje u blizini vrha prsline je faktor intenziteta napona- K . Samim tim, on je odgovoran za dalje širenje prsline. Ukoliko u nekom mašinskom delu dođe do pojave rapidnog rasta prsline, pri vrednosti kritičnog faktora intenziteta napona- K_C , to znači da se u drugom mašinskom delu može očekivati pojava naglog rasta prsline kada faktor intenziteta napona- K dostigne kritičnu vrednost K_C .

2.4.3. Princip superpozicije

Ukoliko je mašinski deo izložen dejstvu kombinovanog opterećenja, tako da se javlja više normalnih napona u x-pravcu, ukupan napon se dobija sabiranjem individualnih napona:

$$\tau_x = \tau_{x1} + \tau_{x2} + \dots + \tau_{xnN} \quad (2.17)$$

Takođe, isto važi i za normalne napone u druga dva ortogonalna pravca (y i z-pravac):

$$\tau_y = \tau_{y1} + \tau_{y2} + \dots + \tau_{ymM} \quad (2.18)$$

$$\tau_z = \tau_{z1} + \tau_{z2} + \dots + \tau_{znP} \quad (2.19)$$

gde je: N , M i P - ukupan broj komponentnih normalnih napona u x , y i z -pravcu.

Ukoliko se u delu javljaju tangencijalni (smicajni) naponi: τ_{xy} , τ_{xz} i τ_{yz} , zbirni napon u odgovarajućem smeru se dobija sumiranjem komponentnih napona u adekvatnom pravcu:

$$\tau_{xy} = \tau_{xy1} + \tau_{xy2} + \dots + \tau_{xyQ} \quad (2.20)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{xz1} + \tau_{xz2} + \dots + \tau_{xzR} \quad (2.21)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{yz1} + \tau_{yz2} + \dots + \tau_{yzS} \quad (2.22)$$

gde je: Q , R i S - ukupan broj komponentnih tangencijalnih napona u adekvatnom pravcu.

Samim tim, faktor intenziteta napona- K_I se može dobiti sabiranjem pojedinačnih faktora intenziteta napona za odgovarajući oblik obrazovanja loma:

$$K_I = K_{I1} + K_{I2} + \dots + K_{Ii} \quad (2.23)$$

$$K_{II} = K_{II1} + K_{II2} + \dots + K_{IIj} \quad (2.24)$$

$$K_{III} = K_{III1} + K_{III2} + \dots + K_{IIIk} \quad (2.25)$$

gde su: i , j i k - ukupan broj srodnih tipova opterećenja, koji uzrokuju nastanak površina loma oblika I, II i III.

Međutim, ako imamo složeno naponsko stanje, kada se pored normalnih napona javljaju i tangencijalni naponi, ekvivalentni napon se ne može dobiti sabiranjem, već korišćenjem jedne od poznatih hipoteza (npr.: *von Mises*). Što znači da:

$$K \neq K_I + K_{II} + K_{III} \quad (2.26)$$

2.4.4. Kritična vrednost faktora intenziteta napona (žilavost loma)- K_{IC}

Faktor intenziteta napona predstavlja silu rasta prsline, odnosno uzima u obzir opterećenje kao i geometriju konstrukcije, uključujući prslinu.

Do loma strukture dolazi kada vrednost napona na vrhu prsline dostigne kritičnu vrednost napona. U trenutku kada se javi nekontrolisan rast prsline, faktor K_I dostiže kritičnu vrednost K_{IC} . **Kritična vrednost faktora intenziteta napona- K_{IC}** , odnosno **žilavost loma** podrazumeva onu vrednost faktora intenziteta napona- K_I koja odgovara kritičnoj vrednosti napona, odnosno kritičnoj dužini prsline:

$$K_{IC} = s \cdot \dagger \cdot \sqrt{f \cdot a} \quad (2.27)$$

gde su:

- s - bezdimenzioni parametar koji zavisi od dimenzija uzorka i prsline;
- \dagger - primenjeni normalni napon;
- a - dužina prsline.

U slučaju prsline eliptičkog oblika (slika 2.8), faktor s se može predstaviti preko proizvoda tri različita parametra:

$$s = s_0 \cdot s_1 \cdot s_2 \quad (2.28)$$

te se dobija:

$$K = s_0 \cdot s_1 \cdot s_2 \cdot \dagger \cdot \sqrt{a} \quad (2.29)$$

gde su:

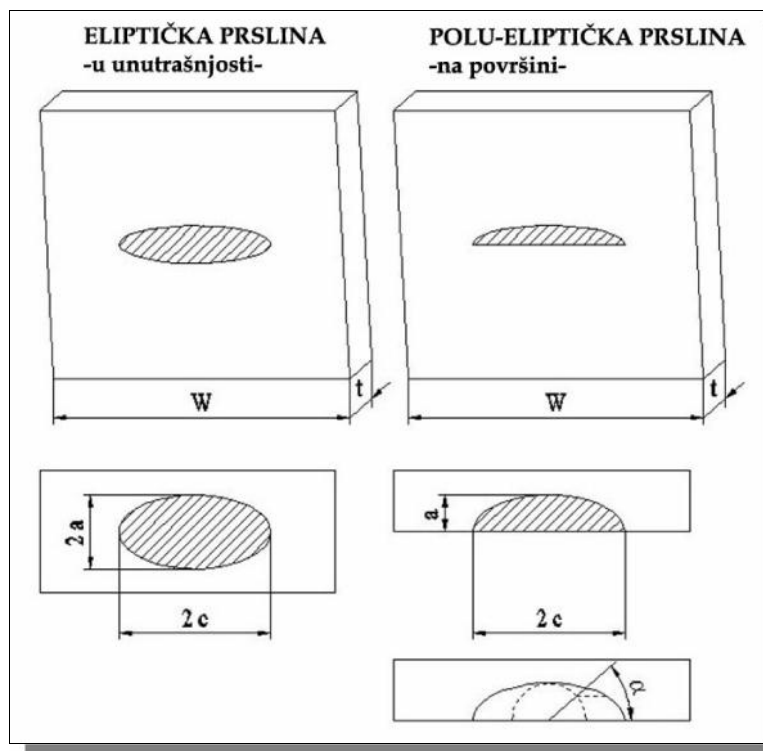
- $s_0 = 1$ - za eliptičku prslinu; (2.30-a)

$$s_0 = }_s = \left[1.13 - 0.09 \left(\frac{a}{c} \right) \right] \cdot [1 + (1 - \sin r)]^2 \text{ - za polu-eliptičku prslinu (2.30-b)}$$

- $s_1 = \sqrt{\frac{1}{Q}}$ (2.31)

$$\text{pri čemu je: } Q = 1 + 1.464 \cdot \left(\frac{a}{c} \right)^{1.65} \quad (2.32)$$

- $s_2 = \left(\sin^2 r + \frac{a^2}{c^2} \cdot \cos^2 r \right)^{\frac{1}{4}}$ (2.33)



Slika 2.8 Eliptička prslina u unutrašnjosti i polu-eliptička prslina na površini uzorka

Dimenzije prsline su male u odnosu na dimenzije uzorka. Ukoliko se dimenzije prsline povećavaju, odnosno i/ili dimenzije uzorka smanjuju, spoljašnje granice vrše uticaj na raspodelu napona u blizini vrha prsline. Ovaj efekat se uzima u obzir preko faktora s , koji se može smatrati kao korekcionni faktor između faktora intenziteta napona za ravnu ploču beskonačnih dimenzija i faktora intenziteta napona za ravnu ploču realnih dimenzija, pod dejstvom istog opterećenja- τ .

Faktor s ima vrednost 1.0 za ploču beskonačne širine, odnosno vrednost 1.1 za polu-beskonačnu ploču. Kada je debljina uzorka mnogo veća u odnosu na dužinu prsline, faktor intenziteta napona za oblik I- K_I se naziva faktor intenziteta napona pri ravnoj deformaciji, tj. žilavost loma prsline pri ravnoj deformaciji.

Bezdimenzioni parametar- s zavisi od: materijala, geometrije uzorka, geometrije i položaja prsline, odnosa dužine prsline i širine uzorka- $\frac{a}{W}$, tipa opterećenja (zatezanje ili savijanje) i intenziteta primenjenog opterećenja- τ .

U slučaju ravne deformacije žilavost loma- K_{IC} se može prikazati u sledećem obliku:

$$K_{IC} = S \cdot \frac{F}{W \cdot t} \quad (2.34)$$

pri čemu mora biti zadovoljen zahtev u vezi veličine uzorka, da bi se dobio validan rezultat za K_{IC} (ASTM standard-American Society for Testing and Materials):

$$(a, t, W - a) \geq 2.5 \cdot \left(\frac{K_{IC}}{\dagger_t} \right)^2 \quad (2.35)$$

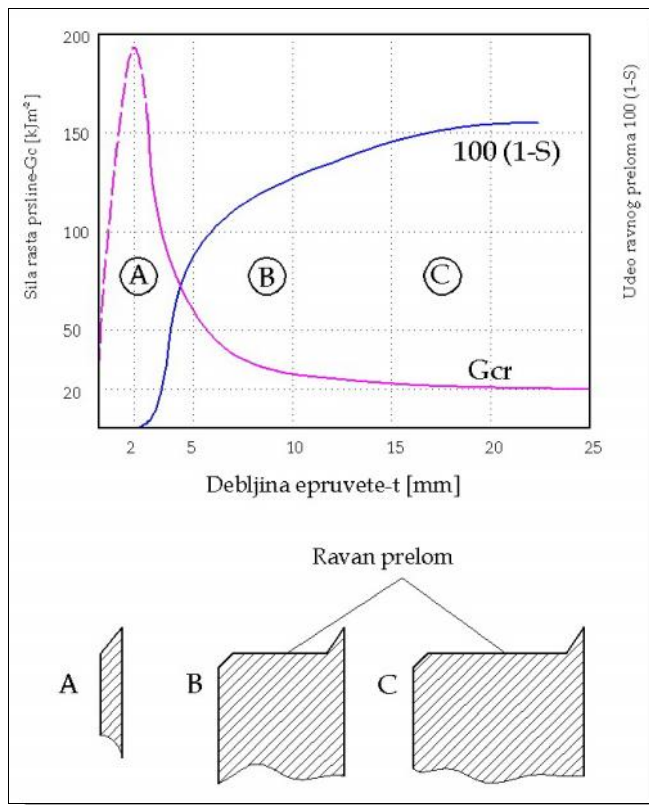
gde su:

- F - opterećenje na zatezanje;
- a - dimenzija prsline (slika 2.8);
- W - širina ploče;
- t - debljina ploče;
- \dagger_t - napon na granici tečenja.

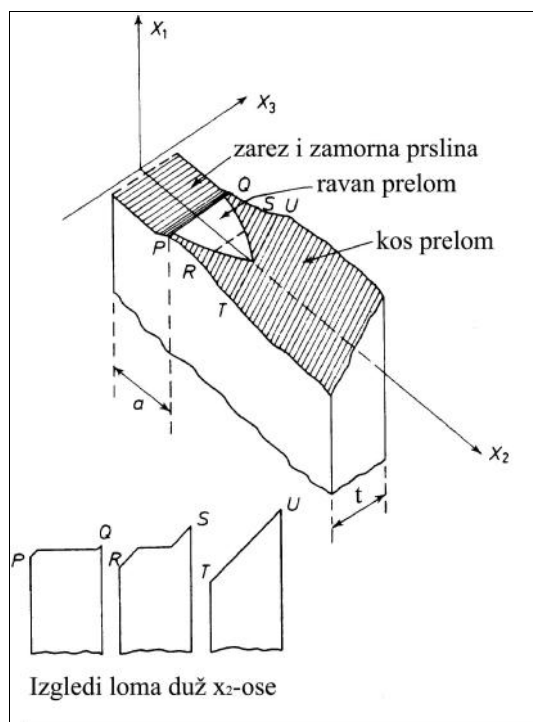
Ovaj uslov je zasnovan na eksperimentalnim zapažanjima kod čelika i aluminijuma. Zahtev debljine obezbeđuje uslov ravnog stanja deformacije, dok zahtev po pitanju dimenzija obezbeđuje linearno-elastično ponašanje.

Da bi se postigli uslovi ravnog stanja deformacije plastična zona mora da bude mala u poređenju sa debljinom uzorka. U protivnom, kada plastična zona dostigne značajni deo debljine uzorka (što je slučaj kod tankozidnih struktura), stanje na ivici plastične zone predstavlja ravno stanje napona. U tom slučaju materijal pokazuje veću otpornost na rast prsline.

Parametar koji određuje prelaz sa ravnog stanja deformacije na ravno stanje napona jeste debljina uzorka- t (slika 2.9).



Slika 2.9 Prikaz uticaja debljine uzorka- t na žilavost loma (ilustracija preuzeta iz [1])



Slika 2.10 Izgled površine loma pri prelaznom obliku loma (ilustracija preuzeta iz [1])

Na dijagramu (slika 2.9) postoje tri karakteristične oblasti, označene slovima A, B i C:

- Oblast A (male debljine uzorka): žilavost loma raste sa povećanjem debljine- t (do neke karakteristične vrednosti), lom je kos, javlja se ravno stanje napona;
- Oblast B (srednje debljine uzorka): žilavost loma asimptotski opada sa povećanjem debljine uzorka- t , lom je delimično ravan-na sredini uzorka, dok je na bočnim stranama kos, na sredini uzorka je ravno stanje deformacije koje na krajevima (kosim površinama) prelazi u ravno stanje napona;
- Oblast C (velike debljine uzorka): žilavost loma dobija svoju konačnu veličinu, površina loma je uglavnom ravna, što ukazuje na ravno stanje deformacija.

Dakle, sa smanjenjem debljine uzorka, povećava se žilavost loma, što znači da su tankozidne strukture rezistentnije na lom. Dakle, kod istih javlja se ravno stanje napona.

Zavisnost žilavosti loma- K_I od debljine uzorka- t može se prikazati analitički (*Vroman*):

$$K_C = K_{IC} \left(1 + B_K e^{-\left(A_K \frac{t}{t_0} \right)^2} \right) \quad (2.36)$$

gde su:

- A_K i B_K - konstante zavisne od materijala;
- $t_0 = 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\dot{\epsilon}_t} \right)^2$ (2.37)

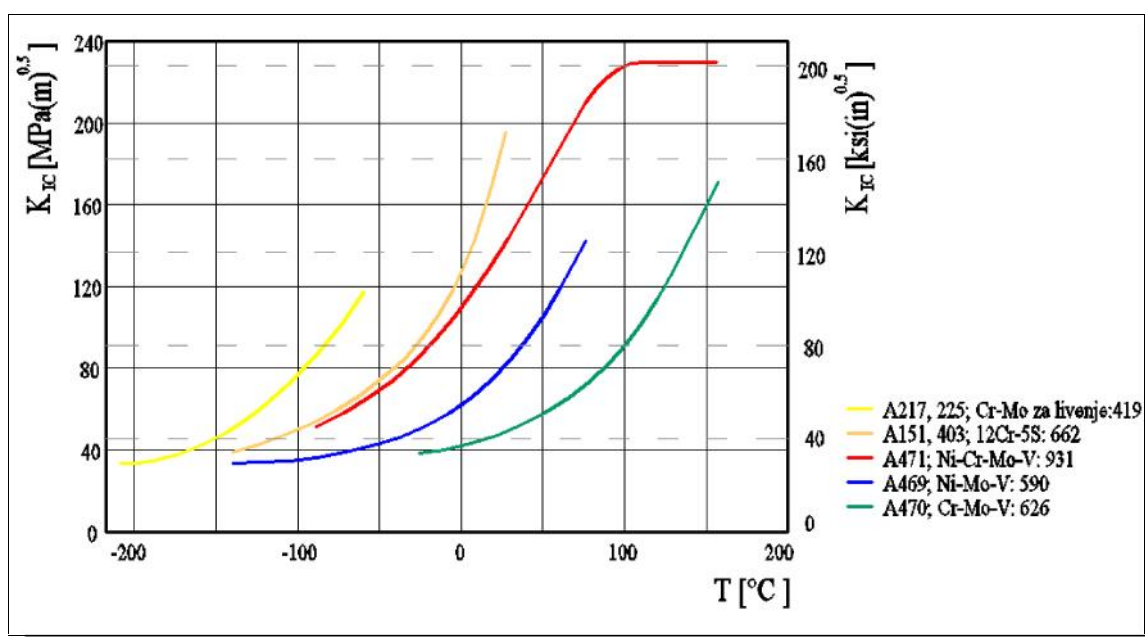
Data jednačine važi samo za neke tipove geometrije prslina (*NASGRO* baza-[4]), kao što su:

- prolazna prslina-TC;
- neki primeri površinske prslina-SS;
- jednodimenzione površinske prslina-SC, kao što su: SC06, SC09 i SC10.

Na kritični faktor intenziteta napona (žilavost loma)- K_{IC} prvenstveno utiču: vrsta materijala, mikrostruktura, temperatura i intenzitet napona, odnosno brzina dejstva (učestanost) opterećenja.

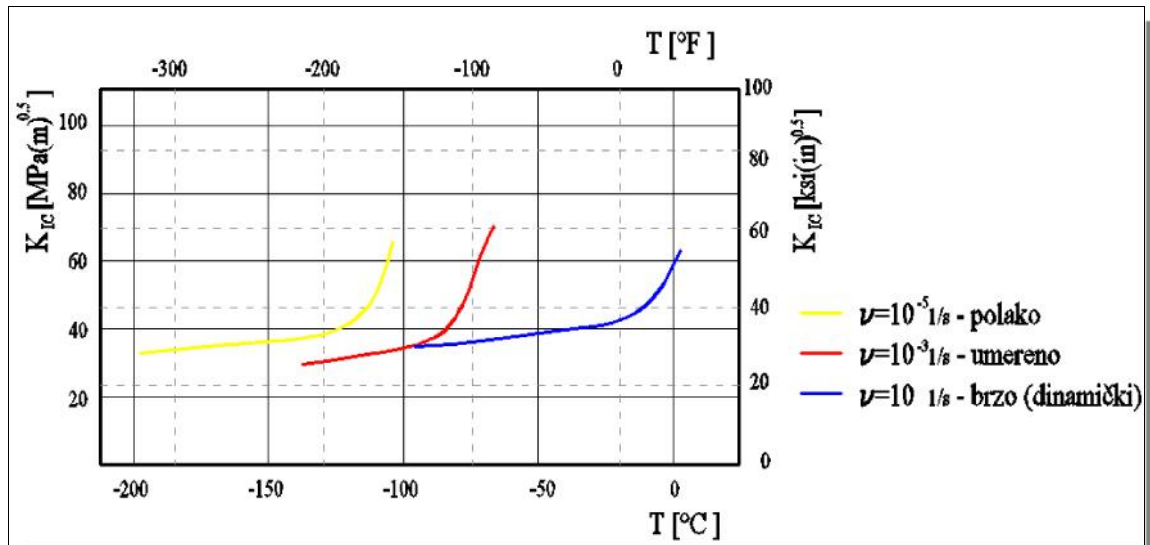
Vrednost K_{IC} se povećava sa smanjenjem veličine granula u mikrostrukturi materijala, pri čemu se podrazumeva da ostale karakteristike mikrostrukture ostaju konstantne.

Sa povećanjem temperature povećava se vrednost žilavosti loma. Na slici 2.11 dat je dijagram zavisnosti žilavosti loma- K_{IC} u funkciji od temperature- T za neke vrste čelika korišćenih za izradu lopatica turbinskog rotora.



Slika 2.11 Žilavost loma- K_{IC} u funkciji od temperature- T za različite materijale

Na slici 2.12 je prikazana zavisnost žilavosti loma- K_{IC} u funkciji od temperature- T pri različitim brzinama dejstva opterećenja (učestanosti) za čelik sa oznakom ASTM A752.



Slika 2.12 Žilavost loma- K_{IC} u funkciji od temperature- T i brzine dejstva (učestanosti) opterećenja- ϵ , za čelik ASTM A752

Tehnološki postupci ojačanja materijala, kojima se povećava vrednost napona na granici tečenja- \dagger , u principu smanjuju žilavost loma.

Kod većine konstrukcionih materijala K_{IC} ne zavisi od geometrije dela (oblik i dimenzije).

Ukoliko je vrednost žilavosti loma- K_{IC} niža u materijalu se javlja krt lom, odnosno ukoliko materijal ima višu vrednost K_{IC} javiće se plastičan lom. Dakle, žilavost loma- K_{IC} je kvalitativna mera otpornosti materijala na pojavu krtog loma.

Dakle, K_{IC} je karakteristika materijala od izuzetnog značaja pri projektovanju mašinskih delova. Samim tim, potrebno je obratiti posebnu pažnju pri izboru materijala.

Bitne promenljive prilikom projektovanja konstrukcije predstavljaju: žilavost loma- K_{IC} , napon- \dagger , parametar- s , kao i maksimalno dozvoljena veličina prsline:

$$a_c = \frac{1}{f} \cdot \left(\frac{K_{IC}}{\dagger \cdot s} \right)^2 \quad (2.38)$$

Ova veličina se naziva **kritična vrednost prsline** i predstavlja dužinu površinske prsline, tj. polu-dužinu unutrašnje prsline.

Ako je poznata veličina prsline u strukturi- a , kao i žilavost loma- K_{IC} za dati materijal, moguće je odrediti **kritičnu vrednost napona** koja će dovesti do loma (na osnovu gore navedenog uslova (2.35)):

$$\dagger_c \leq \frac{K_{IC}}{S\sqrt{f \cdot a}} \quad (2.39)$$

Kritična vrednost prsline- a_c , odnosno kritična vrednost napona- \dagger_c pomažu konstruktorima da definišu konstrukciju sa određenim faktorom sigurnosti.

Naprimera, kod vazduhoplovnih komponenti postoji niz manjih i većih prsline u materijalu. Tokom eksploatacionog perioda, dolazi do pojave rasta istih, ali se njihova veličina kontinuirano prati i poredi sa maksimalno dozvoljenim vrednostima. Samim tim, preventivno se sprečava pojava loma komponente. Dobar način za zaustavljanje progresije prsline jeste bušenje rupa na njihovim vrhovima. Time se snižava vrednost S , a takođe i koncentracija napona. Druga preventivna mera jeste čišćenje površine u cilju sprečavanja daljeg oštećenja. Ova mera ne snižava uvek vrednost S , ali štiti površinu od pojave neželjenih hemijskih reakcija.

2.4.5. Određivanje faktora intenziteta napona- K_I

Lokalna strukturna analiza nastanka i rasta prsline u vazduhoplovnim konstrukcijama svodi se na upoređivanje karakteristika naponsko-deformacionog stanja u okolini vrha prsline (faktor intenziteta napona- K_I) sa karakteristikom materijala (žilavost loma- K_{IC}). Postoje dva smera analize:

1. Određivanje vrednosti kritičnog opterećenja- \dagger_c koje će izazvati rast inicijalne prsline dužine- a .
2. Određivanje kritične dužine prsline- a_c za unapred zadato opterećenje- \dagger .

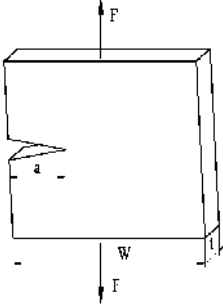
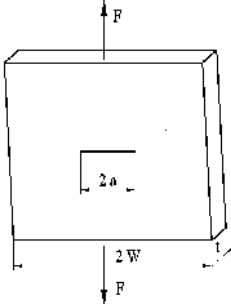
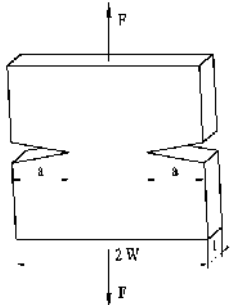
Faktor intenziteta napona- K_I i žilavost loma- K_{IC} su od izuzetnog značaja u oblasti mehanike loma i utiču na vek i pouzdanost konstrukcije.

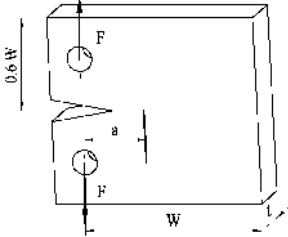
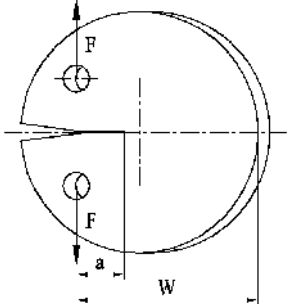
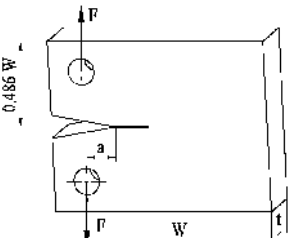
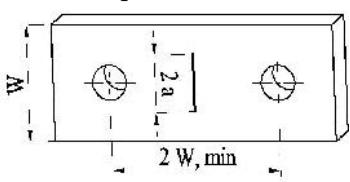
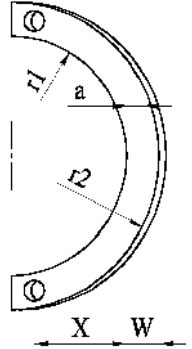
Faktor intenziteta napona- K_I može se predstaviti u sledećem obliku:

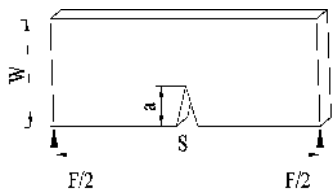
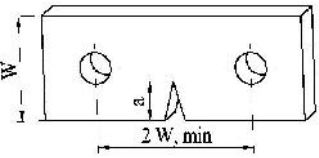
$$K_I = \frac{F}{t\sqrt{W}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (2.40)$$

U tabeli 2.2 su dati primeri uzoraka, kao i zavisnosti faktora intenziteta napona- K_I od specifičnih dimenzija, odnosno u funkciji od faktora- $f\left(\frac{a}{W}\right)$.

Tabela 2.2 Zavisnost faktora intenziteta napona K_I od specifičnih dimenzija uzorka

Tip	Faktor intenziteta napona - K_I
<p>1. Zatezanje sa žlebom na jednoj ivici</p> 	$K_I = \frac{F}{t \cdot W^{1/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$ $f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\sqrt{2 \cdot \tan\left(\frac{f a}{2W}\right)}}{\cos\left(\frac{f a}{2W}\right)} \cdot \left[0.752 + 2.02 \cdot \frac{a}{W} + 0.37 \cdot \left(1 - \sin\left(\frac{f a}{2W}\right)\right)^3\right]$
<p>2. Zatezanje sa centralnom prslinom</p> 	$K_I = \frac{F}{t \cdot W^{1/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$ $f\left(\frac{a}{W}\right) = \sqrt{\frac{f a}{4W}} \cdot \sec\left(\frac{f a}{2W}\right) \cdot \left[1 - 0.025 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 0.06 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^4\right]$
<p>3. Zatezanje sa žlebom na obe ivice</p> 	$K_I = \frac{F}{t \cdot W^{1/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$ $f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\sqrt{\frac{f a}{2W}}}{\sqrt{1 - \frac{a}{W}}} \cdot \left[1.122 - 0.561 \cdot \left(\frac{a}{W}\right) - 0.205 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 0.471 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 0.190 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^4\right]$

<p>4. Kompaktan uzorak</p> 	$K_I = \frac{F}{t \cdot W^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$ $f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a}{W}\right)}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \cdot \left(0.886 + 4.64 \cdot \frac{a}{W} - 13.32 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^4\right)$
<p>5. Kompaktan uzorak u obliku diska</p> 	$K_I = \frac{F}{t \cdot W^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$ $f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a}{W}\right)}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \cdot \left(0.76 + 4.8 \cdot \frac{a}{W} - 11.58 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 11.43 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 4.08 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^4\right)$
<p>6. Klinasto otvoren uzorak</p> 	$K_I = \frac{F}{t \cdot W^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$ $f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a}{W}\right)}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \cdot \left(0.8072 + 8.858 \cdot \frac{a}{W} - 30.23 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 41.088 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 24.15 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^4 + 4.951 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^5\right)$
<p>7. Uzorak sa centralnom prslinom</p> 	$K_I = \frac{F \cdot \sqrt{fa}}{t \cdot W} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$ $f\left(\frac{a}{W}\right) = \sqrt{\sec\left(\frac{fa}{W}\right)}$
<p>8. Uzorak u obliku luka</p> 	$K_I = \frac{F}{t \cdot W^{3/2}} \cdot \left(3 \frac{X}{W} + 1.9 + 1.1 \frac{a}{W}\right) \cdot \left[1 + 0.25 \cdot \left(1 - \frac{a}{W}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{r_1}{r_2}\right)\right] \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$ $f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2}}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{1/2}} \cdot \left(3.74 + 6.3 \cdot \frac{a}{W} + 6.32 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 2.43 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^3\right)$

<p>9. Uzorak pod dejstvom savojnog opterećenja</p> 	$K_I = \frac{F \cdot S}{t \cdot W^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$ $f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^{1/2}}{2 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{a}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \cdot \left[1.99 - \left(\frac{a}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{a}{W}\right) \cdot \left(2.15 - 3.93 \frac{a}{W} + 2.7 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2 \right) \right]$
<p>10. Uzorak sa žljebom</p> 	$K_I = \sqrt{a} \cdot \left(1.99 - 0.41 \cdot \left(\frac{a}{W}\right) + 18.7 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 38.48 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 53.85 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right)$

Na osnovu jednačina (2.34) i (2.40) dobija se:

$$s = f\left(\frac{a}{W}\right) \cdot \sqrt{\frac{W}{f \cdot a}} \quad (2.41)$$

2.4.6. Određivanje žilavosti loma- K_{IC}

Žilavost loma predstavlja karakteristiku materijala. Potrebni podaci se dobijaju na bazi serija ispitivanja za dati materijal (NASGRO/NASMAT baza- [4]).

U tabeli 2.3 date su vrednosti žilavosti loma- K_{IC} za neke materijale.

Tabela 2.3 Žilavost loma- K_{IC} kod nekih materijala

MATERIJAL	K_{IC}	
	$MPa\sqrt{m}$	$psi\sqrt{in}$
Legura čelika (4340, temperovan na 260°C)	50	45800
Legura aluminijuma (2024-T351)	36	33000
Legura titanijuma (Ti-6Al-4V)	44-66	40000-60000
Aluminijum-oksidi	3-5.3	2700-4800

Soda-vezivo-staklo	0.7-0.8	640-730
Beton	0.2-1.4	180-1270
Poli-metil meta-krilat	1	900
Sintetička guma	0.8-1.1	730-1000

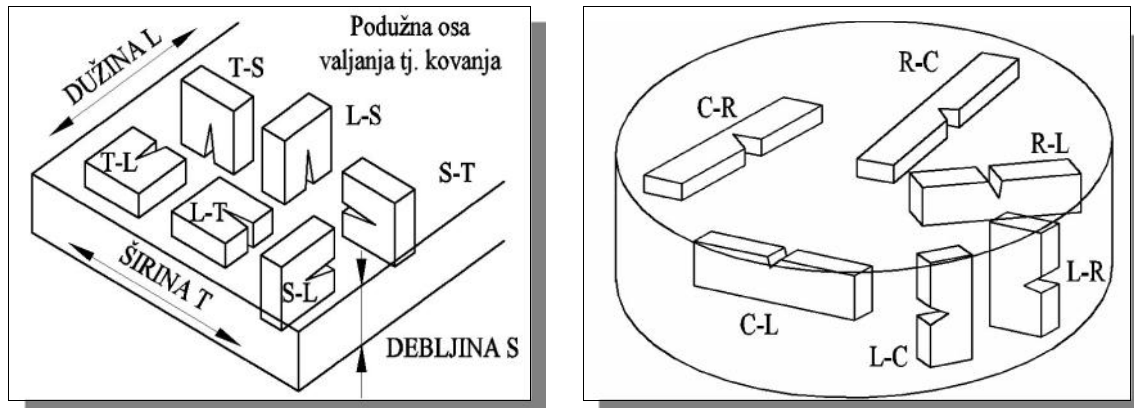
Međutim, na karakteristike materijala utiču sledeći faktori:

- Uticaj spoljašnje sredine: ovaj uticaj na žilavost loma, se može uzeti u obzir preko faktora: K_{eac} . Svrha ovog koeficijenta jeste da se u proračunu uzme uticaj faktora ambijenta na karakteristike materijala, odnosno na rast prsline u strukturi. Primer predstavlja presurizovan rezervoar ili bilo koja druga metalna komponenta izložena dejstvu tečnosti, gasova ili vazduha povišene temperature. U tabeli 2.4 dati su podaci za ambijentalnu žilavost loma- K_{eac} , za neke materijale. Podaci su dobijeni na bazi eksperimentalnog programa razvijenog od strane *Apollo and Space Shuttle vehicles* organizacije, koji se mogu iskoristiti u proračunima pri datim ambijentalnim uslovima: adekvatna sredina i temperatura.
- Uticaj orijentacije materijala: parametri koji se koriste u jednačinama rasta prsline, ne zavise samo od vrste materijala konstrukcionog elementa, već i od načina dobijanja polufabrikata: livenje, valjanje, kovanje. Takođe, od značaja je relativan položaj pravca vlakana materijala i pravca opterećenja, odnosno pravca pružanja prsline. Na slici 2.13 dat je prikaz pravougaonog i šipkastog polufabrikata. Kod šipkaste forme slovo R- definiše radijalan pravac, oznaka C-tangencijalan pravac, dok slovo L predstavlja podužni (longitudinalni) pravac. Kod pravougaonog uzorka prvo slovo u oznaci prestavlja pravac dejstva opterećenja, dok drugo slovo označava pravac širenja prsline.

Karakteristike materijala u kombinaciji sa: dejstvom okruženja, uticajem orijentacije materijala i tehnološki postupci izrade i zaštite, date su u datoteci materijala (*NASMFC* i *NASMFM*) u okviru već pomenutog *software*-a *NASGRO* ([4]). Ova datoteka je dobijena na bazi ispitivanja materijala od strane *NASA*-e. U proračunima zamora materijala u okviru *software*-a *Abaqus*, svi neophodni podaci su korišćeni iz pomenute baze podataka.

Tabela 2.4 K_{eac} za neke metale

Legura	Okruženje	Temperatura		K_{eac}	
		°F	(°C)	ksi-in ^{1/2}	(MPa-mm ^{1/2})
Ti-6Al-4V (Tretiran u rastvoru i star, otkivak) (osnova metal, zavareno, zona uticaja toplote)	Nitrogen tetraoksid (n204)	75	(24)	40	(1390)
		100	(37)	36	(1251)
	N204	125	(52)	31	(1077)
		150	(66)	25	(869)
	N204	75	(24)	40	(1390)
		100	(37)	38	(1320)
	Monometil hidrazin (MMH)	125	(52)	34	(1181)
		150	(66)	30	(1042)
	MMH	75	(24)	40	(1390)
		100	(37)	38	(1320)
	Aerozin-50 (A50)	75	(24)	42	(1459)
		100	(37)	37	(1286)
	Destilovana voda (DW) DW	75	(24)	40	(1390)
Izopropil alkohol					
Ti-6Al-4V (Tretiran u rastvoru i star, otkivak) (osnova metal)	Trihlortrifluoretan "	75	(24)	30	(1042)
		100	(37)	27	(938)
Ti-6Al-4V (Tretiran u rastvoru i star, otkivak) (var)	Trihlortrifluoretan "	75	(24)	22	(764)
		100	(37)	19	(660)
Inkonel 718 (STA) (osnova metal i var)	Vazduh	850	(454)	50	(1737)
		1000	(538)	13	(452)
	Vazduh 500-5000 psi (3.45-34.5 MPa)	1250	(677)	10	(348)
		-100	(-73)	24	(834)
	Gasoviti Hidrogen (GH2) "	75	(24)	20	(695)
A286 čelik (Tretiran u rastvoru i star)	Vazduh	75	(24)	85	(2954)
		1000	(538)	25	(869)
Inkonel 706 (Tretiran u rastvoru i star)	Vazduh	1200	(649)	10	(348)



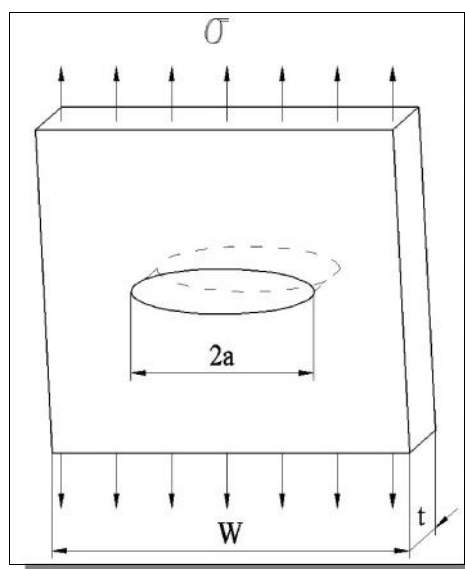
Slika 2.13 Orientacija materijala kod pravougaonih i šipkastih formi polufabrikata

2.5. Elasto-plastična mehanika loma

Ukoliko se zona plastičnosti u okolini vrha prsline proširi u značajnoj meri, naponsko stanje u okolini vrha prsline nije moguće adekvatno opisati faktorom intenziteta napona- K . Iz tog razloga se uvode novi parametri koji nisu ograničeni linearno-elastičnim ponašanjem materijala, a to su: otvaranje vrha prsline- $u = CTOD$ i J -integral.

2.5.1. Problem krugog loma-Griffith-ovo rešenje

Osnova razvoja mehanike loma predstavlja uspostavljanje tzv. energetskog kriterijuma nestabilnog rasta prsline, koji je postavio Griffith [1].



Slika 2.14 Prolazna eliptička prslina u unutrašnjosti uzorka

Posmatra se ploča širine W , sa centralnom prslinom dužine $2a$, debljine t (pri čemu je vrednost t dovoljno mala da osigura ravno stanje napona)-slika 2.14. Pri porastu dužine prsline za malu veličinu- da , prslina će nestabilno rasti ako je oslobođena potencijalna energija ($-d\Pi$) jednaka radu potrebnom za nastanak novih površina prsline (dW_s):

$$-\frac{d\Pi}{da} = \frac{dW_s}{da} \quad (2.42)$$

Pri tome je rad dW_s jednak proizvodu jedinične površinske energije χ_s i adekvatne površine dA :

$$dW_s = \chi_s \cdot dA = \chi_s \cdot 4 \cdot t \cdot da \quad (2.43)$$

pri čemu su:

χ_s - jedinična površinska energija

$$dA = 4 \cdot t \cdot da - \text{porast površine loma} \quad (2.44)$$

Potencijalna energija ploče, prikazane na slici 2.14, je:

$$\Pi = \Pi_0 - \frac{f \dagger^2 a^2 t}{E} \quad (2.45)$$

pri čemu je:

Π_0 - potencijalna energija ploče bez prsline

Diferenciranjem obe strane jednačine (2.45), dobija se sledeća jednakost:

$$\frac{d\Pi}{da} = -\frac{f \dagger^2 a 2t}{E} \quad (2.46)$$

Iz jednačine (2.43) se dobija da je jedinična površinska energija:

$$2\chi_s = \frac{1}{2t} \frac{dW_s}{da} \quad (2.47)$$

Izjednačavanjem potencijalne energije sa radom, dobijamo:

$$2\chi_s = \frac{f \dagger^2 a}{E} = G \quad (2.48)$$

Leva strana jednakosti predstavlja **otpornost materijala na (nestabilan) rast prsline**, dok desna strana prezentuje **brzinu oslobađanja energije ili silu rasta prsline-G**. Sila rasta prsline je određena opterećenjem (\dagger) i geometrijom tela (W, t) uključujući geometriju prsline (a). **Otpornost materijala na rast**

prslina je kritična vrednost sile rasta prslina- G_c , koja je isključivo svojstvo materijala. Iz prethodne jednačine se dobija vrednost napona koji je potreban za nestabilan rast prslina (krta lom ploče):

$$\dagger_c = \left(\frac{2E\chi_s}{f a} \right)^{1/2} \quad (2.49)$$

Ukoliko uporedimo jednačinu (2.2) za faktor intenziteta napona- K sa jednačinom (2.48) za silu rasta prslina- G , uočavamo sledeću vezu:

$$G = \frac{K^2}{E'} \quad (2.50)$$

Odnosno:

$$G_I = \frac{K_I^2}{E'} \quad (2.51)$$

$$G_{II} = \frac{K_{II}^2}{E'} \quad (2.52)$$

pri čemu je:

$$E' = E \text{ - za ravno stanje napona (slika 2.15)} \quad (2.53\text{-a})$$

$$E' = \frac{E}{1-\epsilon^2} \text{ - za ravno stanje deformacije (slika 2.15)} \quad (2.53\text{-b})$$

U slučaju mešovitog opterećenja, često se koristi sledeća jednačina:

$$G = G_I + G_{II} = \frac{K_I^2}{E'} + \frac{K_{II}^2}{E'} \quad (2.54)$$

dok se za trodimenzionalne probleme upotrebljava jednačina:

$$J = G = \frac{1}{E'} (K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1}{2\sim} K_{III}^2 \quad (2.55)$$

pri čemu se moduo klizanja- \sim računa po formuli (2.12).

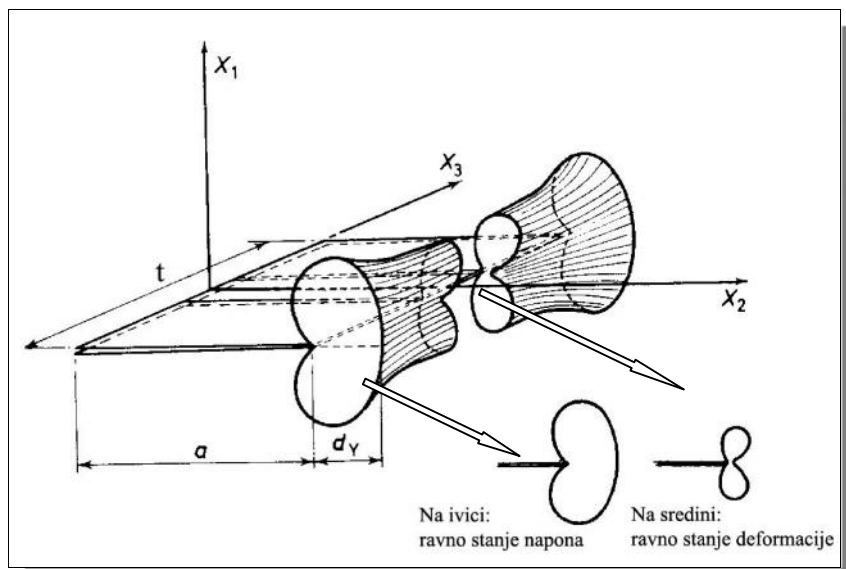
U tom slučaju, potrebno je uvesti ekvivalentni faktor intenziteta napona, uključujući istovremeno sva tri oblika (moda): I, II i III:

$$K_{ekv} = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2 + (1+\epsilon)K_{III}^2} \quad (2.56)$$

U slučaju kada je $K_{II} = K_{III} = 0$, kritična vrednost faktora intenziteta napona - K_I (žilavost loma) se može povezati sa G_{IC} (**kritičnom brzinom oslobađanja energije**):

$$K_{IC} = G_{IC} \quad (2.57)$$

2.5.2. Plastičnost vrha prsline



Slika 2.15 Plastične zone ispred vrha prsline
(ilustracija preuzeta iz [1])

Samo u uslovima ravnog stanja deformacije može se zanemariti uticaj plastične deformacije, što je bitno sa aspekta primene linearno-elastične mehanike loma.

Međutim, pošto je tema ove doktorske disertacije ponašanje tankozidnih struktura, kod kojih se javlja ravno stanje napona, mora se uzeti u obzir i pojava plastičnih deformacija u strukturi.

Dakle, u slučaju nastanka šire zone plastičnosti oko vrha prsline, parametri linearno-elastične mehanike loma nisu dovoljno da bi opisani polje napona i deformacija. Stoga je neophodno uvođenje parametara, ako što su: otvaranje prsline (*COD* - *Crack Opening Displacement*) i *J*-integrala.

Za definisanje otvora prsline (*COD*) koriste se dve pozicije:

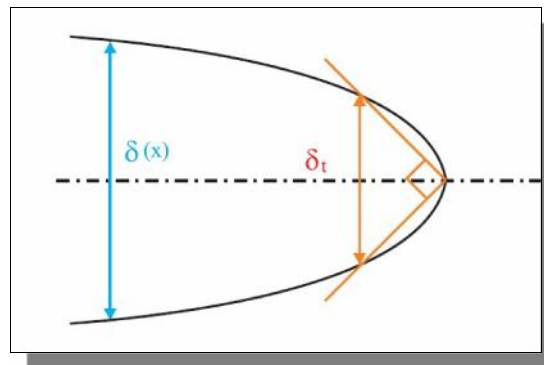
- *CTOD* (*Crack Tip Opening Displacement*)- otvaranje vrha prsline, parametar koji se meri na određenom rastojanju sa samog vrha prsline i
- *CMOD* (*Crack Mouth Opening Displacement*) - otvaranje usta prsline-parametar koji se meri na slobodnoj površini prsline (na mestu maksimalnog otvaranja).

U svojim eksperimentima *Wells* je ustanovio da je otvaranje vrha prsline proporcionalno žilavosti materijala. *CTOD* je našao široku primenu, upravo iz

praktičnih razloga, jer može da se jednostavno odredi, čak i u komplikovanim problemima.

Veličina plastične zone se može odrediti određivanjem mere otvaranja vrha prsline (*CTOD - Crack Tip Opening Displacement*).

Za određivanje u -*CTOD* se koristi više definicija (tumačenja)-slika 2.16.

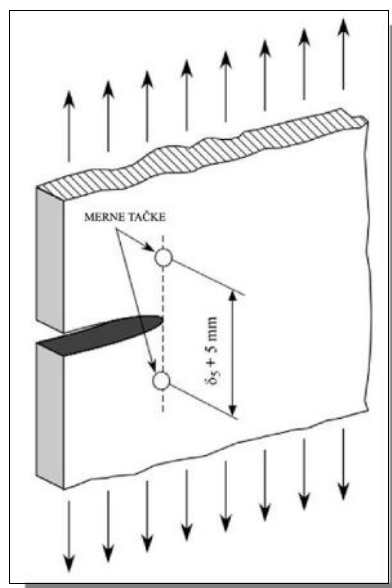


Slika 2.16 Definicije CTOD:

- $u(x)$ - rastojanje lica prsline na mestu vrha prsline
- u_t - presek sa otvorom 90°

(ilustracija preuzeta iz [9])

Po tzv. Švabelovoj definiciji (*CTOD* definicija na osnovu standarda *SINTAP/FITNET* za tankozidne strukture) otvaranje vrha prsline $u_5 = CTOD$ se određuje na sledeći način (slika 2.17):



Slika 2.17 Određivanje otvaranja vrha prsline- $u = CTOD$

(ilustracija preuzeta iz [9] i modifikovana)

Položaj mernih traka se ne menja sa pomeranjem vrha prsline, već je stacionaran.

2.5.2.1. Irwin-ova metoda

Tumačenje dato postojanjem tzv. “K-dominantne oblasti” u okolini vrha prsline, kao i aproksimacije naponsko-deformacionog stanja koje daje mehanika linearno-elastičnog loma, mogu se primenjivati isključivo u slučaju relativno manje oblasti plastične deformacije materijala. Međutim, kod materijala kod kojih oblast plastičnog tečenja prati rast prsline, pa samim tim nije zanemarljiva u odnosu na ostale dimenzije dela, mora se primeniti teorija nelinearnosti i plastičnosti.

Na osnovu analiza utvrđeno je da je struktura sa većom plastičnom oblasti “ojačana”, odnosno da će nositi veći deo opterećenja. Kako bi se postojeća činjenica iskoristila, uvodi se pretpostavka da naponsko-deformaciono stanje u okolini vrha tako plastično ojačane strukture je adekvatno naponsko-deformacionom stanju koje daje teorija linearnosti i plastičnosti, ako se dužina postojeće prsline uveća za **meru veličine plastične zone**- r_p :

$$a_{ef} = a + r_p \quad (2.58)$$

Novodobijena vrednost se naziva efektivna (stvarna) dužina prsline.

Za efektivnu (stvarnu) vrednost faktora intenziteta napona dobija se:

$$K_{I_{ef}} = \dagger \sqrt{f \cdot a_{ef}} = \dagger \sqrt{f \cdot (a + r_p)} \quad (2.59)$$

Proces određivanja efektivnih vrednosti dužine prsline- a_{ef} i faktora intenziteta napona- $K_{I_{ef}}$ je iterativan proces. Dakle, na osnovu jednačine (2.2) je određen faktor intenziteta napona- K_I , bez uticaja plastičnosti vrha prsline. Potom je na osnovu jednakosti (2.15) dobijena vrednost veličine plastične zone- r_p . Korišćenjem obrasca (2.58) izračunata je efektivna vrednost dužine prsline- a_{ef} , a pomoću jednačine (2.59) i efektivna vrednost faktora intenziteta napona- $K_{I_{ef}}$ u prvoj iteraciji. Iterativni postupak određivanja ovih veličina se ponavlja sve do trenutka kada njihove vrednosti u dve uzastopne iteracije ne iskonvergiraju, sa dozvoljenom tačnošću.

Za slučaj ravnog stanja napona, korišćenjem jednakosti (2.15), dobija se eksplicitno:

$$K_{Ief} = \frac{\dagger \sqrt{f \cdot a}}{\sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\dagger}{\dagger_t} \right)^2}} \quad (2.60)$$

U slučaju eliptičke prsline u unutrašnjosti beskonačne ploče (slika 2.9) za efektivni faktor intenziteta napona dobija se eksplicitno:

$$K_{Ief} = \dagger \sqrt{\frac{f \cdot a}{Q_{ef}}} \left[\sin^2 r + \left(\frac{a}{c} \right)^2 \cos^2 r \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.61)$$

gde su:

- $Q_{ef} = Q - 0.212 \cdot \left(\frac{\dagger}{\dagger_t} \right)^2$ - efektivni parametar oblika prsline; (2.62)

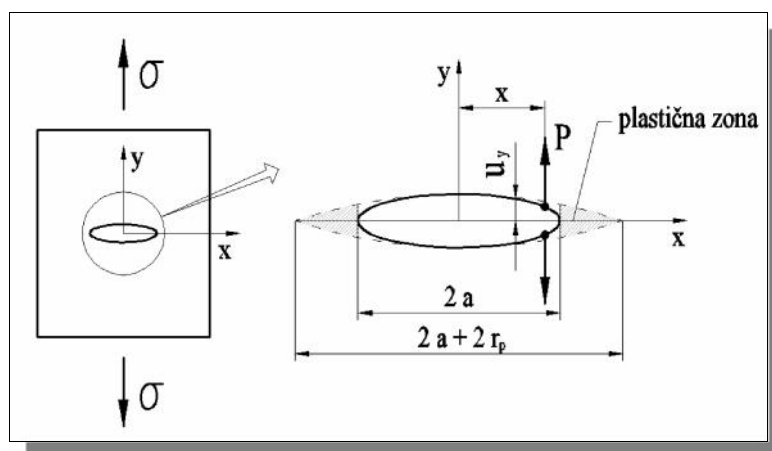
- $Q = 1 + 1.464 \cdot \left(\frac{a}{c} \right)^{1.65}$ (2.63)

Za polu-eliptičku prslinu mora se izvršiti korekcija jednačine (2.61) množenjem faktorom korekcije površine:

$$\} _s = s_0 = \left[1.13 - 0.09 \left(\frac{a}{c} \right) \right] [1 + (1 - \sin r)^2] \quad (2.64)$$

2.5.2.2. Model deformacije trake

Dugdale i Barenblatt su prvi predložili tzv. model deformacije trake (slika 2.18). Dakle, oni su zamislili dugu plastičnu zonu na vrhu prsline kod beskonačne ploče opterećene na zatezanje upravno na pravac pružanja prsline.



Slika 2.18 Model deformacije trake

Ukupna efektivna dužina prsline iznosi:

$$2a_{ef} = 2a + 2r_p \quad (2.65)$$

Konceptija modela polazi od pretpostavke da na vrhu prsline deluje negativno (pritisno) opterećenje, koje zatvara prslinu. Ovakvim tumačenjem nameću se dva tipa opterećenja: udaljeno pozitivno (zatezno) opterećenje- \dagger i negativno (pritisno) opterećenje- \dagger_t indukovano dejstvom pritiskne sile- P u okolini vrha prsline.

Faktori intenziteta napona na oba vrha prsline, za ploču jedinične debljine, mogu se prikazati u sledećem obliku:

$$K_I(+a_{ef}) = \frac{P}{\sqrt{f \cdot a_{ef}}} \sqrt{\frac{a_{ef} + x}{a_{ef} - x}} \quad (2.66)$$

$$K_I(-a_{ef}) = \frac{P}{\sqrt{f \cdot a_{ef}}} \sqrt{\frac{a_{ef} - x}{a_{ef} + x}} \quad (2.67)$$

pri čemu je:

- $P = -\dagger_t \cdot dx$ - pritiska sila na razdaljini x od ravni simetrije prsline (slika 2.18),

tako da su:

$$K_I(+a_{ef}) = \frac{-\dagger_t}{\sqrt{f \cdot a_{ef}}} \sqrt{\frac{a_{ef} + x}{a_{ef} - x}} dx \quad (2.69)$$

$$K_I(-a_{ef}) = \frac{-\dagger_t}{\sqrt{f \cdot a_{ef}}} \sqrt{\frac{a_{ef} - x}{a_{ef} + x}} dx \quad (2.70)$$

Faktor intenziteta totalnog napona, koji zatvara oba vrha prsline, dobija se superponiranjem pojedinačnih faktora intenziteta napon, pri $a_{ef} = a + r_p$:

$$K_{zato} = \int_a^{a_{ef}} [K_I(+a_{ef}) + K_I(-a_{ef})] \quad (2.71)$$

Daljim rešavanjem jednačine imamo:

$$K_{zato} = \int_a^{a+r_p} \left[\frac{-\dagger_t}{\sqrt{f \cdot (a+r_p)}} \sqrt{\frac{a+r_p+x}{a+r_p-x}} + \frac{-\dagger_t}{\sqrt{f \cdot (a+r_p)}} \sqrt{\frac{a+r_p-x}{a+r_p+x}} \right] dx \quad (2.72)$$

$$K_{zato} = \left(\frac{-\dagger_t}{\sqrt{f \cdot (a+r_p)}} \right) \int_a^{a+r_p} \left[\sqrt{\frac{a+r_p+x}{a+r_p-x}} + \sqrt{\frac{a+r_p-x}{a+r_p+x}} \right] dx \quad (2.73)$$

$$K_{zatv} = \left(-2 \cdot \dagger_t \cdot \sqrt{\frac{a+r_p}{f}} \right) \int_a^{a+r_p} \frac{1}{\sqrt{(a+r_p)^2 - x^2}} dx \quad (2.74)$$

$$K_{zatv} = 2 \cdot \dagger_t \cdot \sqrt{\frac{a+r_p}{f}} \arccos \left(\frac{a}{a+r_p} \right) \quad (2.75)$$

Faktor intenziteta totalnog napona- K_{zatv} , koji zatvara vrhove prsline, mora biti jednak sa faktorom intenziteta napona- $K_{Ief} = \dagger \sqrt{f \cdot (a+r_p)}$ (jednačina (2.59)) od udaljenog zateznog opterećenja. Izjednačavanjem desnih strana jednakosti (2.59) i (2.75) dobija se:

$$\cos \left(\frac{f \cdot \dagger}{2 \cdot \dagger_t} \right) = \frac{a}{a+r_p} \quad (2.76)$$

Razvijanjem cosinusne funkcije u *Taylor*-ov red, imamo:

$$\frac{a}{a+r_p} = 1 - \frac{1}{2!} \left(\frac{f \cdot \dagger}{2 \cdot \dagger_t} \right)^2 + \frac{1}{4!} \left(\frac{f \cdot \dagger}{2 \cdot \dagger_t} \right)^4 - \dots \quad (2.77)$$

Pošto je $\dagger \ll \dagger_t$, zanemarivanjem članova višeg reda, sledi:

$$r_p = \frac{a}{8} \cdot \left(\frac{f \cdot \dagger}{\dagger_t} \right)^2 \quad (2.78)$$

Ukoliko se izraz (2.76) uvrsti u jednakost (2.59), za vrednost efektivnog faktora intenziteta napona- K_{Ief} se dobija:

$$K_{Ief} = \dagger \sqrt{f \cdot a} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{f \cdot \dagger}{2 \cdot \dagger_t} \right)^2} \quad (2.79)$$

Aproksimacija potkorene veličine se može izvršiti na dva načina, tako da imamo dva oblika rešenja:

$$K_{Ief} = \dagger \sqrt{f \cdot a} \cdot \sqrt{\sec \left(\frac{f \cdot \dagger}{2 \cdot \dagger_t} \right)} \quad (2.80)$$

odnosno:

$$K_{Ief} = \dagger \sqrt{f \cdot a} \cdot \left\{ \frac{8}{f^2} \cdot \ln \left[\sec \left(\frac{f \cdot \dagger}{2 \cdot \dagger_t} \right) \right] \right\}^{0.5} \quad (2.81)$$

2.5.2.3. Metoda pomeranja otvora prsline (COD metoda)

Drugi pristup određivanja veličine plastične zone je složeniji i naziva se metoda pomeranja otvora prsline (*COD-Crack Opening Displacement*).

Za oblik I razdvajanja površina loma pomeranje u pravcu y-ose se računa na osnovu jednačina (2.11) i (2.12):

$$u_y = \frac{(1+\epsilon)}{E} K_I \sqrt{\frac{r}{2 \cdot f}} \sin \frac{\alpha}{2} \left[| + 1 - 2 \cos^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right] \quad (2.82)$$

Kada je $\alpha = f$ i $a > x$ za funkciju pomeranja imamo sledeće:

$$u_y = \frac{(1+\epsilon)(1+|\alpha|)}{E} K_I \sqrt{\frac{a-x}{2 \cdot f}} \quad (2.83)$$

Korišćenjem jednačina (2.14) i (2.80) dobija se:

$$u_y = \frac{2 \cdot \dagger}{E} \sqrt{a^2 - x^2} \quad (2.84)$$

Ukupno otvaranje prsline se označava kao:

$$COD = 2 \cdot u_y \quad (2.85)$$

tj.:

$$COD = \frac{2 \cdot \dagger}{E} \sqrt{a^2 - x^2} \quad (2.86)$$

Za $x=0$ imamo:

$$COD_{\max} = \frac{2 \cdot \dagger \cdot a}{E} \quad (2.87)$$

Međutim, u slučaju kada je $x=a$ ne može se primeniti formula (2.86), jer bi u tom slučaju značilo da je $COD=0$ što nije slučaj. Za izračunavanje ove vrednosti koristi se korigovana jednačina:

$$CTOD = \frac{4 \cdot \dagger}{E} \sqrt{(a+r_p)^2 - x^2} \quad (2.88)$$

Zanemarivanjem članova višeg reda, jer je $r_p \ll a$, sledi:

$$u = CTOD = \frac{4 \cdot \dagger}{E} \sqrt{2 \cdot a \cdot r_p} \quad (2.89)$$

Na osnovu jednačine (2.2) dobija se veličina prsline:

$$a = \frac{1}{f} \left(\frac{K_I}{\dagger} \right)^2 \quad (2.90)$$

Ako se iskoristi prethodna jednačina i jednačina (2.15)-za ravno stanje napona, odnosno jednačina (2.16)-za ravno stanje deformacije, dobija se:

$$u = r \frac{K_I^2}{E \cdot t} \quad (2.91)$$

pri čemu je:

$$\bullet \quad r = \frac{4}{f} \quad - \text{ za ravno stanje napona} \quad (2.92\text{-a})$$

$$\bullet \quad r = \frac{4}{\sqrt{3} \cdot f} \quad - \text{ za ravno stanje deformacije} \quad (2.92\text{-b})$$

Na bazi modela koji su postavili *Dugdale* i *Barenblatt*, *Burdekin* i *Stone* su došli do izraza:

$$u = \frac{K_I^2}{E \cdot t} \left(1 + \frac{f^2 t}{24 \cdot t^2} + \dots \right) \quad (2.93)$$

Posle izvesnih transformacija se dobija:

$$u = \frac{K_I^2}{\} \cdot E \cdot t} (1 - \epsilon^2) \quad (2.94)$$

Koeficijent $\}$ zavisi od materijala i kreće se u granicama od 1 do 2.6. Za ravno stanje napona (tankozidne strukture) $\} = 1$, dok kod ravnog stanja deformacije i materijala koji ojačava uzima vrednosti između 1 i 2.6. Kod krutih materijala vrednost žilavosti loma- K_{IC} se može odrediti iz prethodnog izraza merenjem veličine u , dok se za vrednost $\}$ usvaja vrednost 1.

2.5.3. J-integral [13]

Teorijske osnove J -integrala je postavio *Rice* 1968. godine, po kome je i nazvan Rajsov konturni integral.

J -integral je našao široku primenu u proceni zamornog veka i integriteta konstrukcija.

Bitne karakteristike J -integrala su:

1. mogućnost primene kako u linearno-elastičnoj, tako i u plastičnoj oblasti,
2. moguće ga je odrediti i analitički, numerički i eksperimentalno,
3. po svojoj fizikalnosti predstavlja energetski parametar. Njegova prednost je u nezavisnosti putanje integracije.

Dakle, J -integral je konturni integral (slika 2.19):

$$J = \oint_{\Gamma} \left(W dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right) \quad (2.95)$$

gde su:

$$W = \int \dagger_{ij} dv_{ij} - \text{gustina deformacijske energije} \quad (2.96)$$

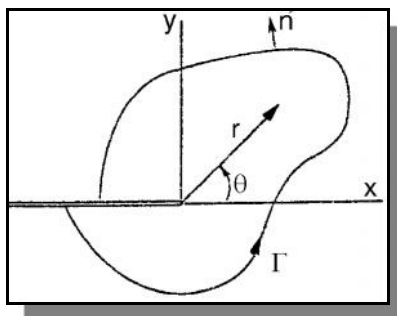
Γ - putanja integracije

ds - element dužine

$T_i = \dagger_{ij} n_j$ - sila zatezanja na konturi

u_i - pomeranje na konturi

n_j - jedinična normala



Slika 2.19 Putanja integracije za J -integral
(ilustracija preuzeta iz [13])

Rice je dokazao da je J -integral nezavisan od putanje integracije za ravanske dvodimenzionalne probleme, pod uslovom da nema zapreminskih i inercijalnih sila, za nelinearno-elastične homogene materijale (homogenost može biti ograničena samo na materijal u pravcu prsline).

Takođe, J -integral se može interpretirati kao energija po jedinici površine- $t \cdot da$ energije), koja se oslobađa na vrhu prsline, odnosno kao brzina oslobađanja energije u nelinearno elastičnom telu:

$$J \cdot t \cdot da = t \oint_{\Gamma} W dy da - t \oint_{\Gamma} T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds da \quad (2.97)$$

gde su:

- t - debljina uzorka;

- član $t \oint_{\Gamma} W dy da$ - označava deformacionu energiju dobijenu duž konture za porast prsline- da u oblasti nelinearne elastičnosti;
- član $t \oint_{\Gamma} T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds da$ - predstavlja rad spoljnih sila na otvaranju vrha prsline za prirast dužine- da .
- $J \cdot t \cdot da$ - je totalna energija na vrhu prsline dostupna za širenje iste i jednaka je vrednosti G :

$$J = G = \frac{K^2}{E'} \quad (2.98)$$

gde se E' računa po formuli (2.53-a), odnosno (2.53-b), zavisno od toga da li je reč o ravnom stanju napona (kod tankozidnih struktura) ili o ravnom stanju deformacije.

U plastičnom regionu, W nije gustina deformacijske energije, koja se oslobađa unutar samog materijala, tako da J -integral nije energija prsline potrebna za njen rast.

U cilju obezbeđenja J singularnog polja u okolini vrha prsline, potrebno je ispuniti neke uslove. Dakle, u okolini vrha prsline se nalazi region poznat pod nazivom "procesna zona loma", u kome je materijal deformisan u značajnoj meri, sa šupljinama i drugim oblicima (izvan mehanike kontinuuma). Veličina plastične zone može biti mala u odnosu na dimenzije uzorka, što je slučaj kod ravnog stanja deformacije, pri čemu je potrebno da važi sledeće:

$$t, b, a < 25 \frac{J}{\dagger_0} \quad (2.99)$$

gde je: $b = W - a$ ligament uzorka.

2.5.4. HRR polje

Ukoliko razmatramo polje u okolini vrha prsline (slika 2.20), tzv. *HRR*-polje (*Hutchinson, Rice, Rosenberg*) može de definistai elasto-plastično ponašanje materijala sledećom zavisnošću ([11]) (*Ramberg-Osgood*-ova relacija):

$$\frac{v}{v_0} = \frac{\dagger}{\dagger_0} + r \left(\frac{\dagger}{\dagger_0} \right)^n \quad (2.100)$$

pri čemu su:

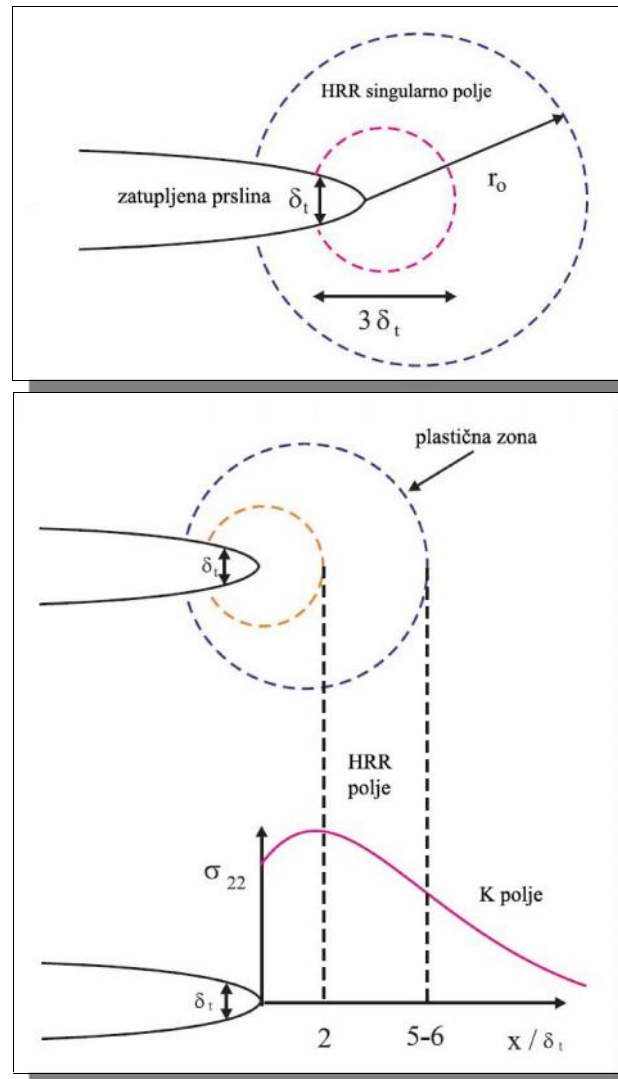
r - konstanta deformacionog ojačavanja (konstanta materijala);

n - eksponent deformacionog ojačavanja (konstanta materijala)

τ_0 - referentni napon tečenja

$$v_0 = \frac{\tau_0}{E} - \text{referentno naprezanje}; \quad (2.101)$$

Za linearno-elastične materijale $n=1$, dok je kod idealno plastičnih materijala $n=\infty$.



Slika 2.20 HRR polje u okolini vrha prsline (ilustracija preuzeta i modifikovana iz [14])

Raspodele napona i naprezanja u okolini vrha prsline su predstavljene sledećim jednačinama ([8]):

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_0 \left(\frac{EJ}{r \dot{\epsilon}_0^2 I_n r} \right)^{\frac{1}{1+n}} \tilde{f}_{ij}(n, \epsilon) \quad (2.102)$$

$$v_{ij} = \frac{r \dot{\epsilon}_0}{E} \left(\frac{EJ}{r \dot{\epsilon}_0^2 I_n r} \right)^{\frac{n}{1+n}} \tilde{v}_{ij}(n, \epsilon) \quad (2.103)$$

gde su:

I_n - integraciona konstanta zavisna od n

\tilde{f}_{ij} i \tilde{v}_{ij} - bezdimenzione funkcije zavisne od n i ϵ

Svi gore navedeni parametri zavise od naponskog stanja, tj. da li je zastupljeno ravno stanje napona ili ravno stanje deformacije.

2.5.4.1. Primena J -integrala na početak rasta prsline

Ponašanje elasto-plastičnog materijala tokom stabilnog širenja prsline može se opisati zavisnošću parametara mehanike elasto-plastičnog loma (K , COD , J -integral) u funkciji od prirasta dužine prsline- Δa u strukturi (slika 2.21).

Kod krutih materijala na lom se ne troši energija, što je prikazano horizontalnom ravnom linijom, koja preseca ordinatu na visini J_{IC} -kritična energija potrebna za iniciranje prsline (slika 2.22). Ova veličina se smatra svojstvom materijala.

Kod duktilnih materijala (elasto-plastičnih), ako u strukturi već postoji inicijalna prslina, onda se njen dalji rast odvija u tri faze:

I faza: početno zatupljivanje oštrog vrha i prividni porast dužine prsline - u početnom stadijumu kada opterećenje raste, a energija se oslobađa, deformacija se manifestuje porastom otvaranja prsline, ali ne i njenim rastom. To se manifestuje kosom linijom na dijagramu $J-a$, prikazujući zatupljivanje oštrog vrha prsline.

II faza: stabilan rast prsline - u kritičnom trenutku nagib linije se menja, jer je sledeći stadijum otvaranja prsline povezan sa njenim daljim širenjem i samim tim i povećanjem njene dužine. To zahteva rastuće opterećenje. Tačka loma krive (tačka B) je označena sa J_{IC} i predstavlja žilavost loma. Korišćenjem te vrednosti moguće je izračunati kritičan faktor intenziteta napona (žilavost loma za ravno stanje deformacije)- K_{IC} :

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{J_{IC}}{E'}} \quad (2.104)$$

Otvaranje vrha prsline-CTOD može poslužiti za opisivanje ponašanja materijala u okolini vrha prsline. Pri tome, u tački B se ovaj parametar mehanike loma-CTOD_{cr} može odrediti na osnovu sledećeg izraza:

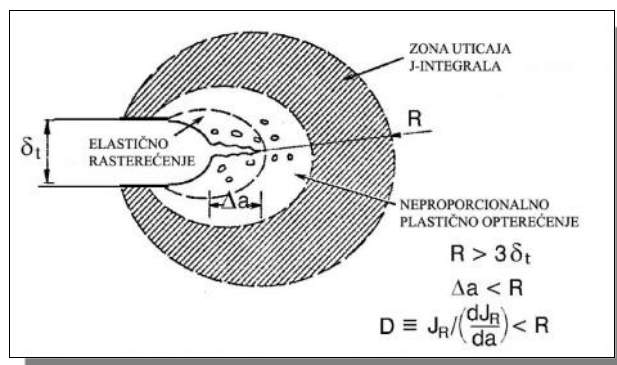
$$CTOD = u = \frac{J}{m \dagger_t} \quad (2.105)$$

gde su:

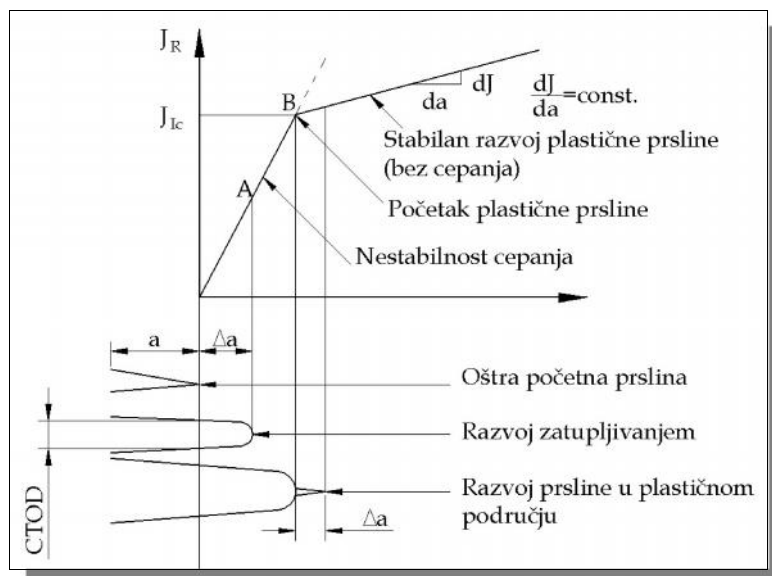
- m - koeficijent, $m \in [1, 2.6]$, pri čemu se manje vrednosti odnose na ravno stanje napona i idealnu plastičnost, dok veće vrednosti važe za ravno stanje deformacije.

- \dagger_t - napon na granici tečenja.

III faza: U određenom momentu se dostiže opterećenje i dužina prsline pri kome stabilan rast prelazi u **brzi nestabilan rast-lom**.



Slika 2.21 Uticaj J-integrala na procesnu zonu loma
(ilustracija preuzeta iz [1])



Slika 2.22 Zatupljivanje i stabilan rast prsline
(ilustracija preuzeta iz [13])

2.5.4.2. Primena J -integrala na analizu rasta prsline

Primenom J -integrala moguće je ustanoviti kriterijum za predviđanje loma u uslovima ravnog stanja napona (tankozidne strukture, pojava elasto-plastičnosti) i to primenom krive otpora rasta prsline. Za te svrhe, potrebno je uspostaviti korelaciju između otpornosti materijala na rast prsline i sile rasta prsline, sa druge strane. Pri tome se umesto veličine J koristi \sqrt{J} , koja ima svrsishodniju primenu.

Procedura za definisanje $J-R$ krive se sastoji iz sledećih koraka:

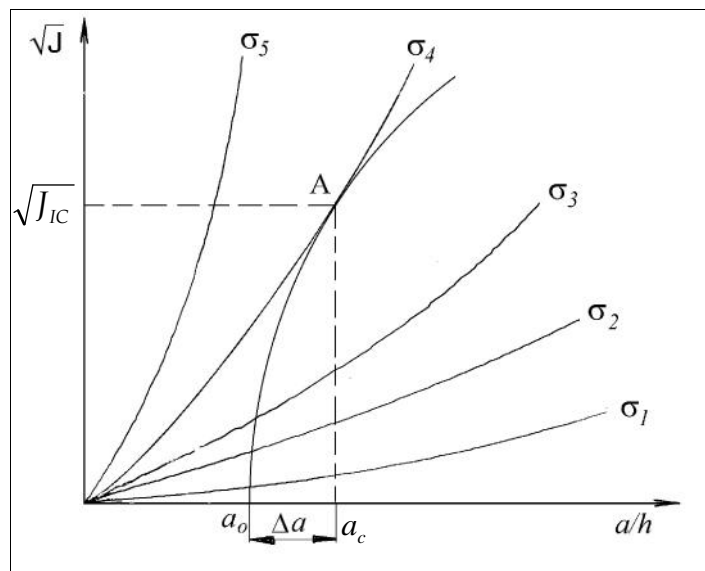
1. određivanje $(J-R)^{1/2}$ -tzv. **kriva otpora materijala**, odnosno krive za materijal. Kriva se dobija eksperimentalno koristeći adekvatan uzorak (za savijanje-SEN(B), za zatezanje-T(S) ili C(T)).

2. Određivanje $(J_R)^{1/2}$ tj. **sile rasta prsline** za različite veličine prsline, kao i za različite vrednosti primenjenog napona korišćenjem adekvatnog numeričkog modela (slika 2.23, krive označene sa: $\dagger_1, \dagger_2, \dagger_3, \dagger_4, \dagger_5$). Ove krive se mogu odrediti:

- a) teorijsko-analitički,
- b) numerički.

3. Određivanje tačke nestabilnosti rasta prsline, kao zajednička tangenta tačka krive otpora materijala i krive sile rasta prsline (tačka A), napon loma- \dagger_4 i

stabilan porast prsline Δa . U tački A imamo kritične vrednosti J_{IC} i a_c (slika 2.23).



Slika 2.23 Uporedni prikaz krivih rasta prsline i krive $J-R$
(ilustracija preuzeta iz [1])

Matematička formulacija uslova stabilnog rasta prsline je:

$$J(\dagger, a) = J_{IC} \quad (2.106)$$

gde su:

$J(\dagger, a)$ - sila rasta prsline, koja zavisi od udaljenog napona (napon se menja od \dagger_1 do \dagger_5) i dužine prsline- a . Ova kriva (krive) određuju se teorijsko-analitički ili numerički.

J_{IC} - otpornost materijala na početak (stabilnog) rasta prsline, tzv. $J-R$ kriva se dobija eksperimentalno. Oblik je isti, dok položaj duž apscise se menja u zavisnosti od dužine inicijalne prsline- a_0 .

Matematički kriterijum za početak nestabilnog rasta prsline, glasi:

$$\frac{\partial J(\dagger, a)}{\partial a} \geq \frac{\partial J}{\partial a} \text{ -tačka A (slika 2.23)} \quad (2.107)$$

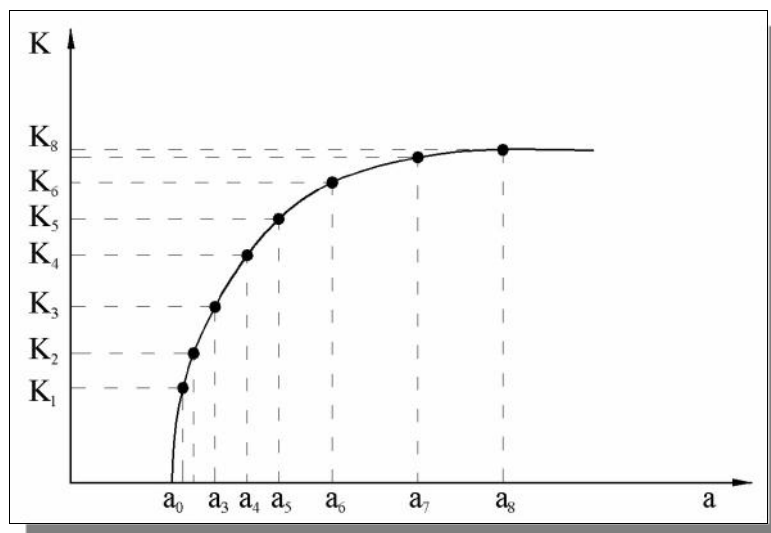
što znači da sila rasta prsline mora biti veća od otpornosti materijala rastu prsline. Kada sila rasta prsline- $J(\dagger, a)$ dostigne vrednost J_{IC} **počinje stabilan**

rast prsline, koji se nastavlja do trenutka kada $\frac{\partial J(\dagger, a)}{\partial a}$ postane veće od $\frac{\partial J}{\partial a}$, nakon čega sledi **nestabilan rast prsline**.

2.5.4.3. R-kriva (kriva otpora rasta prsline)

Dijagram širenja prsline- a u funkciji od faktora intenziteta napona- K predstavlja tzv. R-krivu i dobija se eksperimentalnim putem. U vazduhoplovstvu se koristi *ASTM E561* [8] standard za određivanje R-krive.

R-kriva karakteriše otpor materijala pojavi loma u strukturi za vreme stabilnog rasta prsline. Dakle, ako u strukturi postoji inicijalna prslina, a samim tim i izvesna oblast plastičnosti u okolini njenog vrha, pod dejstvom postupnog opterećenja doći će po njenog daljeg rasta a potom i do zaustavljanja. Ova pojava se opisana kao sporo stabilno širenje prsline. Dakle, pri konstantnom naponu- \dagger kojem je struktura izložena, za svaku vrednost dužine prsline dobija se faktor intenziteta napona- K , pri čemu se dobija funkcionalna zavisnost $K = f(a)$ (slika 2.24) [15].



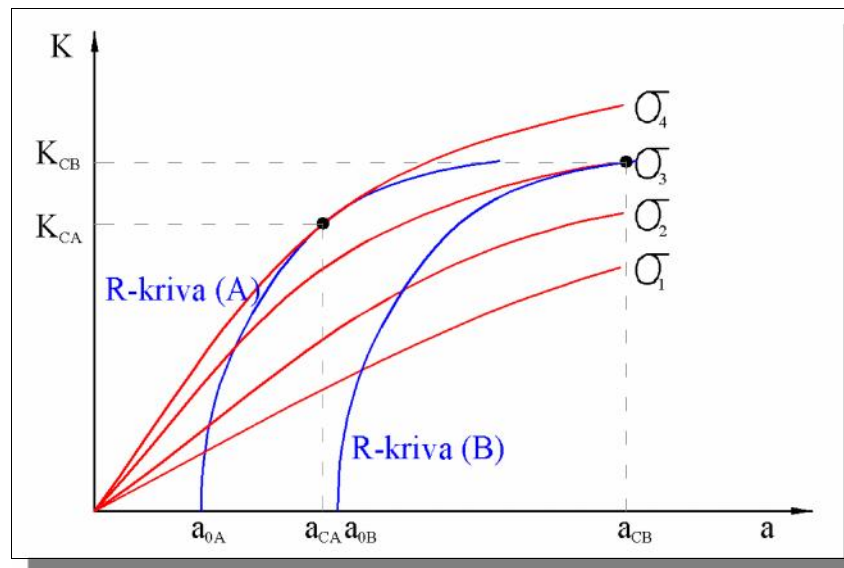
Slika 2.24 Tipična R-kriva

(Ilustracija preuzeta iz [15])

Na slici 2.25 prikazane su krive faktora intenziteta napona za različite vrednosti napona od \dagger_1 do \dagger_4 . Kriva faktora intenziteta napona koja je tangentna na R-krivu određuje kritične uslove: kritičnu dužinu prsline- a_c pri kojoj nastaje nestabilan rast prsline, kao i kritičnu vrednost faktora intenziteta

napona- K_c pri tom (žilavost loma). Dakle, tačka dodira zavisi od dužine inicijalne prsline u strukturi- a_0 .

R-kriva zavisi od dimenzija uzorka (geometrije), temperature i stepena izduženja. Njen oblik ne zavisi od dužine inicijalne prsline- a_0 (R-kriva A i R-kriva B imaju isti oblik, samo su translirane jedna u odnosu na drugu, u zavisnosti od veličine inicijalne prsline).

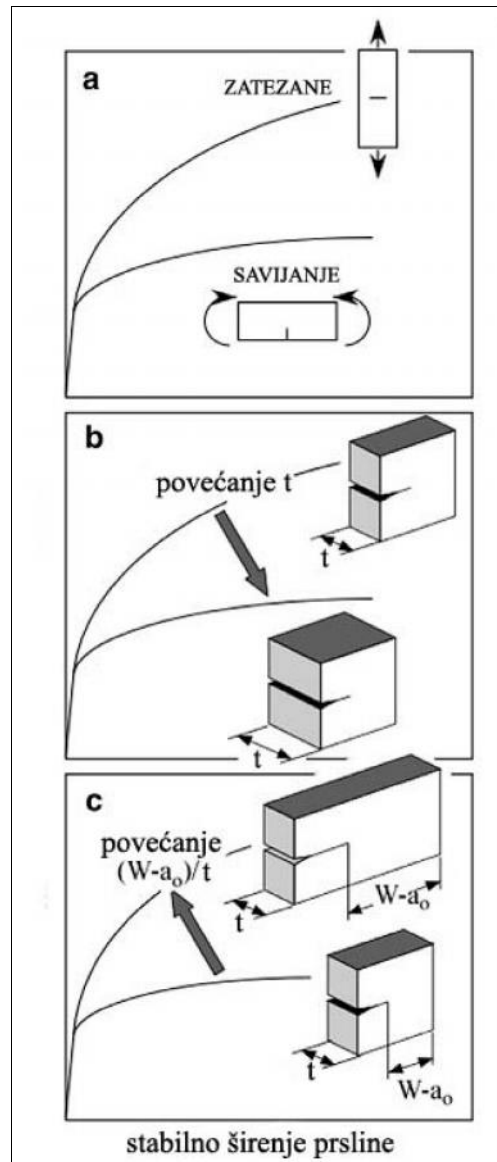


sl.2.25 Primena R-krive

(Ilustracija preuzeta iz [15])

Nagib R-krive zavisi od sledećih parametara: debljine uzorka- t , vitkosti ligamenta- $\frac{W-a_0}{t}$ i tipa opterećenja (zatezanje ili savijanje) (slika 2.26). Efekat ovih parametara na otpor rastu prsline je u principu veoma sličan. Dakle, testiranjem uzoraka od aluminijuma ustanovljeno je da R-kriva zavisi od debljine uzorka, ali ne zavisi kod onih uzoraka kod kojih je ligament $W-a_0$ veći 3-4 puta od debljine uzorka- t . Ova zavisnost se primenjuje samo u slučaju tankozidnih struktura, kod kojih su debljina uzorka i realne komponente identične.

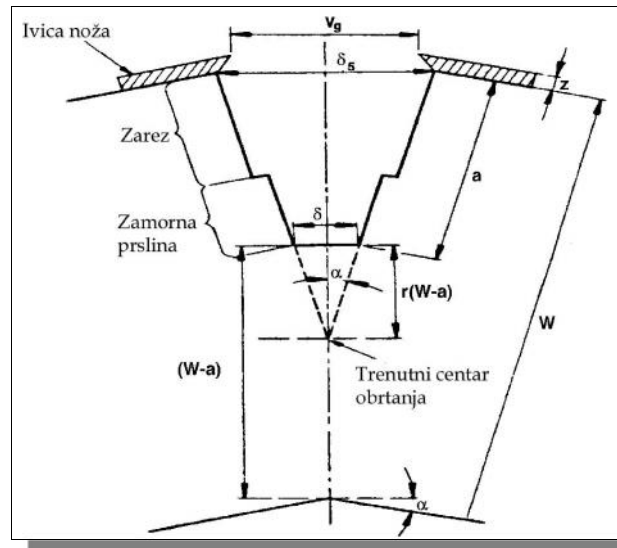
Generalizaciju je nemoguće primeniti ukoliko je reč o drugom materijalu, što znači da se ispitivanja moraju ponoviti.



Slika 2.26 Faktori koji utiču na elasto-plastičnu R-krivu
(ilustracija preuzeta iz [9] i modifikovana)

2.5.5. Laboratorijska merenja parametara mehanike loma

Na slici 2.27 dat je prikaz svih karakterističnih geometrijskih veličina pri standardnom merenju *CTOD*, koji se određuje na osnovu relacije sa izmerenom veličinom v_g .



Slika 2.27 Geometrijske zavisnosti za određivanje *CTOD* pri ispitivanju epruvete na savijanje
(ilustracija preuzeta iz [1])

W - širina epruvete

a - dužina prsline

γ - ugao savijanja

z - debljina noževa

r - radijus obrtanja

v_g - otvaranje noževa (merena veličina)

$u_m = \text{CMOD}$ (*Crack Mouth Opening Displacement*) - otvaranje usta prsline

$$u_t = \frac{K^2(1-\epsilon^2)}{2\uparrow_t E} + \frac{r(W-a_0)v_g}{[r(W-a_0)+a_0+z]} \quad (2.108)$$

za debljine epruvete do 50 mm.

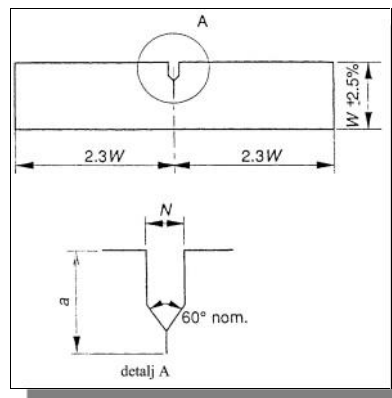
Pri merenju se koristi standardna epruveta SE(B) za savijanje (slika 2.28), koja se postavlja na mernu mašinu. Posredstvom hidraulike merne mašine

uvodi se sila, koja uzrokuje savijanje epruvete. Merač otvaranja usta prsline-V (u formi noževa) se postavlja na epruvetu (slika 2.30).

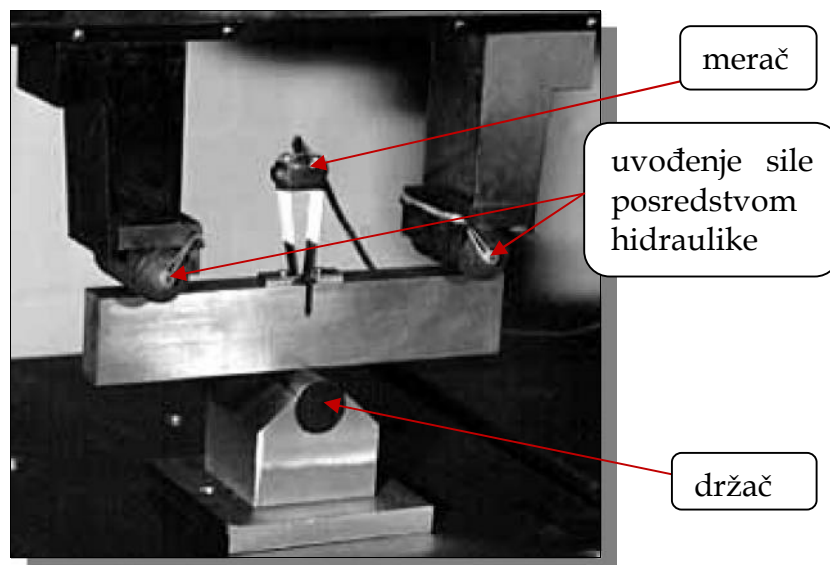
Tokom testa vrši se permanentno merenje vrednosti primenjene sile- F u funkciji od pomeranja napadne tačke sile- q .

Za određivanje parametara mehanike loma (K , $CTOD$ i J -integral) potrebni su sledeći podaci:

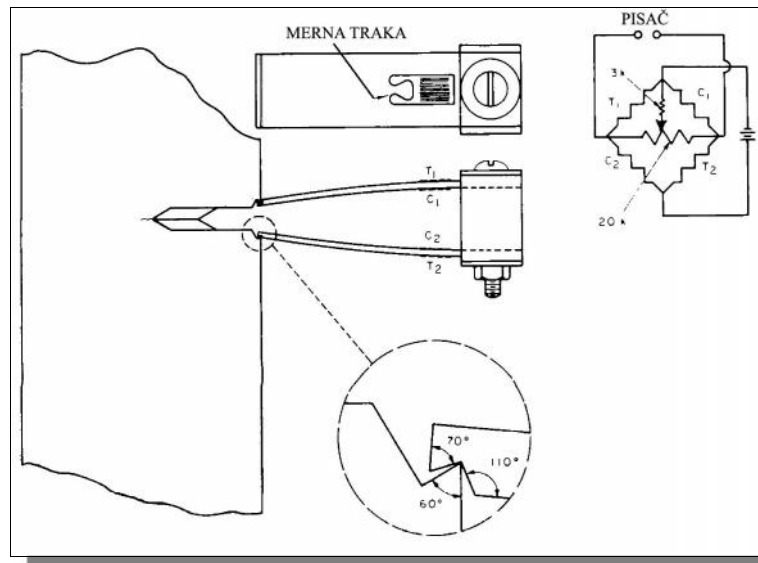
- dimenzije epruvete (W , t)
- dužina inicijalne prsline (a_0),
- napon na granici tečenja- σ_t ,
- obrađeni podaci sa dijagrama sila-pomeranje - $F = F(q)$.
- veličina zone razvlačenja i rasta prsline, koje se mogu odrediti nakon završenog ispitivanja i konačnog razdvajanja epruvete.



Slika 2.28 Epruveta za savijanje u tri tačke, SE(B)
(ilustracija preuzeta iz [1])



Slika 2.29 Pozicioniranje SE(B) uzorka na mašini
(ilustracija preuzeta iz [1])

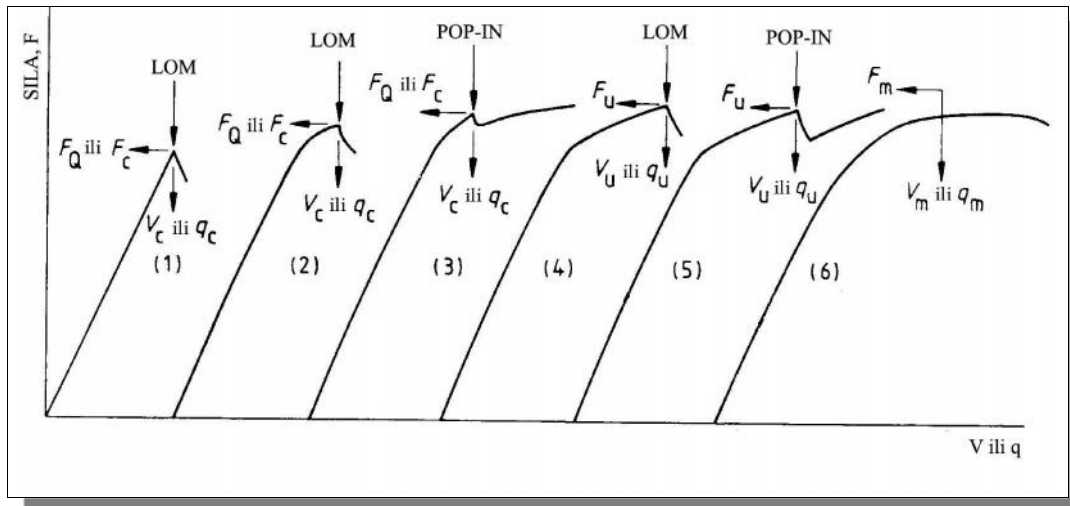


Slika 2.30 Preporučena konstrukcija merača otvaranja usta prsline
(ilustracija preuzeta iz [1])

Parametri mehanike loma se na osnovu izmerenih veličina određuju na sledeći način:

- Faktor intenziteta napona- K se dobija sa dijagrama $F-V$ ili $F-q$. Zavisi od primenjene sile i geometrije (veličine prsline i odgovarajuće geometrijske funkcije, date za geometriju standardnog uzorka).
- otvaranje vrha prsline- $u = CTOD$ može se podeliti na elastičnu i plastičnu komponentu. Elastični deo $CTOD$ -a se dobija posredstvom faktora intenziteta napona- K , dok se plastična komponenta $CTOD$ -a dobija pomoću vrednosti otvaranja usta prsline- $u_m = CMOD$ (merena veličina).
- J -integral se takođe može razdvojiti na dve komponente. Kao i prethodni parametar, elastičan deo J -integrala se dobija pomoću K . Plastična komponenta se dobija kao površina ispod krive na dijagramu sila-pomeranje (slika 2.31).

Treba napomenuti da se sva tri parametra mogu međusobno povezati. Zavisnost nije univerzalana i zavisi od zateznih karakteristika materijala i geometrije uzorka.

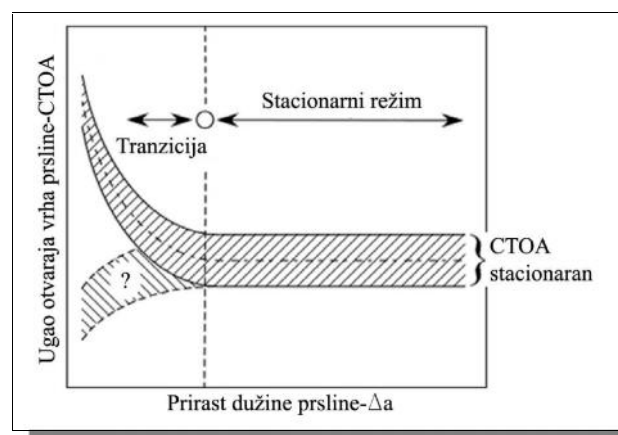


Slika 2.31 Karakteristični dijagrami ispitivanja žilavosti loma prema BS 7448 (ilustracija preuzeta iz [1])

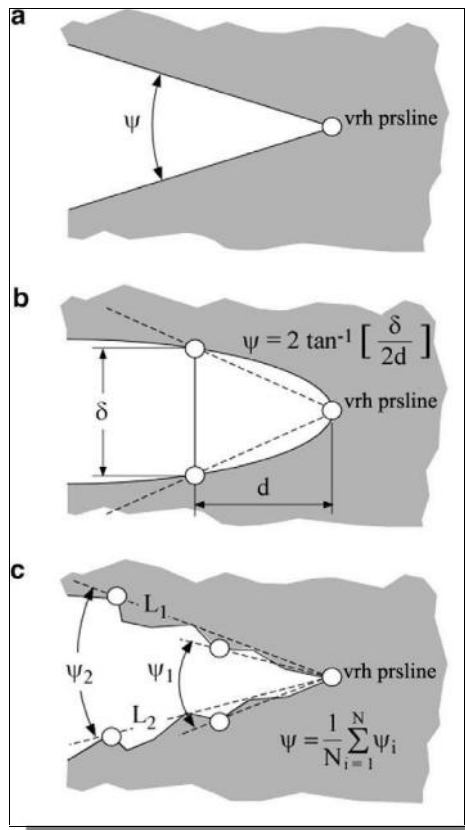
2.5.6. Ugao otvaranja vrha prsline-CTOA (*Crack Tip Opening Angle*)

Drugi parametar definisan od strane ASTM standarda za mehaniku loma je ugao otvaranja vrha prsline-CTOA (*Crack Tip Opening Angle*) i predstavlja ugao između površina loma (prsline). Dobijen na osnovu niza laboratorijskih ispitivanja od strane Andersson-a i de Koning-a.

Nešto kasnije, Demofonti i Rizzi isražujući širenje prsline u duktilnim materijalima (gasni cevovod), kao i Newman u oblasti vazduhoplovstva, došli su do zaključka da je CTOA, odmah nakon inicijalnog kratkotrajnog režima (tranzicija), konstantan za sve vreme stabilnog rasta prsline u strukturi (stacionaran režim) (slika 2.32). Dakle, ovaj parametar je merilo stabilnog rasta prsline [9].



Slika 2.32 Promena CTOA u funkciji od prirasta dužine prsline (ilustracija preuzeta iz [9] i modifikovana)



Slika 2.33 Određivanje ugla otvaranja vrha prsline (CTOA - Crack Tip Opening Angle) (ilustracija preuzeta iz [9] i modifikovana)

U praksi, ovaj ugao je prilično komplikovano odrediti i to iz sledećih razloga:

(a) Ova definicija podrazumeva ravne površine prsline, što u realnosti nije slučaj. Dakle, ove površine su zakrivljene, što zavisi od tipa ispitivanog uzorka i tipa opterećenja. Površina je konveksna za M(T) uzorak, dok je konkavna kod uzoraka namenjenih ispitivanju na savijanje. *Kanninen* je odredio alternativnu definiciju ugla otvaranja prsline-CTOA kao odnos otvaranja vrha prsline-CTOD i fiksirane distance- d od vrha prsline, na kojoj se CTOD meri (slika 2.33-b). Ponekad se otvaranje vrha prsline-CTOD meri na različite načine (videti poglavlje 2.5.2.). Samim tim, definisanje CTOA imaće različite vrednosti u zavisnosti od rastojanja d na kome se meri. U cilju izbegavanja proizvoljnosti pri određivanju ugla otvaranja vrha prsline, koristi naziv otvaranje ugla prsline-COA (Crack Opening Angle). Značajan CTOA bi trebalo da se meri na rastojanju $d = 1 \text{ mm}$ CTOA.

(b) Drugi problem je tzv. cik-cak površina loma, koja je zastupljenija od "glatke" forme (slika 2.33-c). Mnogo je prikladnije odrediti ovaj ugao na više

različitih komplementarnih pozicija na gornjoj i donjoj površini, potom izračunati aritmetičku sredinu tih veličina.

Tačke u kojima se mere $CTOA$ vrednosti, trebalo bi da bude u rangu od 0.5 do 1,5 mm iza vrha prsline.

2.6. Jednačina rasta zamorne prsline

Veza između dinamičkog (cikličnog) opterećenja i faktora intenziteta napona- K se ostvaruje posredstvom jednačina:

- $K_{\max} = \dagger_{\max} \sqrt{f \cdot a}$ - maksimalni faktor intenziteta napona; (2.109)

- $K_{\min} = \dagger_{\min} \sqrt{f \cdot a}$ - minimalni faktor intenziteta napona; (2.110)

- $K_m = \frac{K_{\max} + K_{\min}}{2} = \dagger_m \sqrt{f \cdot a}$ - srednji faktor intenziteta napona; (2.111)

- $K_a = \frac{K_{\max} - K_{\min}}{2} = \dagger_a \sqrt{f \cdot a}$ - amplituda faktora intenziteta napona; (2.112)

- $\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = \Delta \dagger \sqrt{f \cdot a}$ - opseg faktora intenziteta napona, odnosno promena faktora intenziteta napona; (2.113)

- $R = \frac{K_{\min}}{K_{\max}}$ - koeficijent asimetrije ciklusa opterećenja (2.114)

Najvažniji faktori za određivanje parametara prsline predstavljaju veličine: ΔK i R . Treba napomenuti to da se prilikom rasta prsline menja i faktor intenziteta napona- K_I , odnosno opseg intenziteta napona- ΔK , dok odnos R ostaje konstantan za dato opterećenje.

Promena dužine prsline- da u odnosu na promenu broja ciklusa opterećenja- dN je u zavisnosti od pomenutih veličina (ako se zanemare uticaji temperature, vlage i korozije).

Analitičko rešenje ove zavisnosti je prilično složeno. Analitička rešenja se dobijaju aproksimacijom eksperimentalno dobijenih rešenja matematičkim funkcijama (takozvano fitovanje krivih).

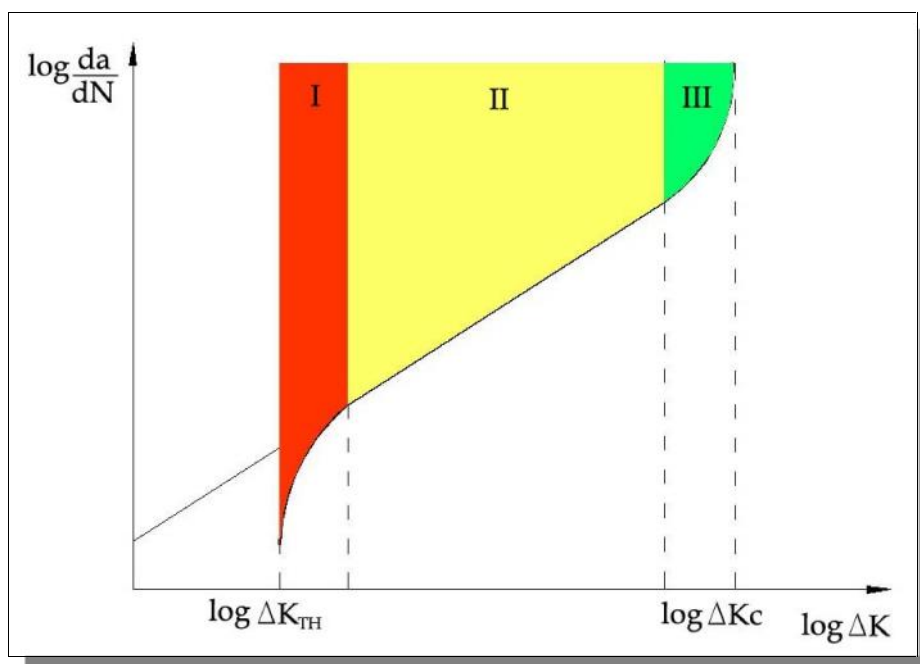
2.6.1. Paris-ov model

Najjednostavnije analitičko rešenje je dao *Paris*, za slučaj opterećenja $R = 0$:

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^n \quad (2.115)$$

gde su:

- $\frac{da}{dN}$ - brzina rasta zamorne prsline;
- a - dužina prsline;
- N - broj ciklusa opterećenja;
- C i n - konstante materijala, koje zavise od uslova sredine i određuju se eksperimentalno.



Slika 2.34 Funkcionalna zavisnost $\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R)$

Na slici 2.34 dat je prikaz zavisnosti rasta prsline- $\frac{da}{dN}$ u funkciji od promene faktora intenziteta napona- ΔK (u logaritamskom obliku). Na dijagramu se javljaju dve asimptote:

- leva asimptota- u tački ΔK_{TH} koja predstavlja prag faktora intenziteta napona. Vrednosti manje od ΔK_{TH} neće izazvati širenje (rast) prsline.

- desna asimptota u tački ΔK_C -tačka maksimalne (kritične) vrednosti faktora intenziteta napona. Ukoliko se dostignu ove vrednosti, doći će do loma konstrukcije.

Dakle, na dijagramu se jasno uočavaju tri oblasti, omeđene dvema asimptotama:

- I oblast-oblast vrednosti ΔK nižih od granične vrednosti ΔK_{TH} -nema širenja prsline;
- II oblast-tzv. *Paris*-ova oblast, definisana jednačinom (2.115) i
- III oblast-oblast brzog širenja prsline.

Međutim, nedostatak *Paris*-ove jednačine je to što ona ne uzima u obzir uticaj faktora asimetrije ciklusa- R . Iz tog razloga se koristi *Forman*-ova jednačina (2.116).

2.6.2. *Forman, Newman i de Koning*-ov model

Drugi oblik rešenja su dali *Forman, Newman i de Koning* u sledećem obliku:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C\Delta K^n}{(1-R)K_{IC} - \Delta K} = \frac{C\Delta K^n}{(1-R)(K_{IC} - K_{\max})} \quad (2.116)$$

Međutim, leva asimptota- ΔK_{TH} se ne pojavljuje u gore navedenoj jednačini.

Preciznije rešenje bi glasilo:

$$\log_{10} \frac{da}{dN} = C_1 + C_2 \operatorname{arctg} \frac{\left\{ \frac{K_C K_{TH}}{[K_{\max}(1-R)^n]^2} \right\}}{\log_{10} \left(\frac{K_C}{K_{TH}} \right)} \quad (2.117)$$

gde je:

- K_{TH} početna vrednost faktora intenziteta napona za inicijalnu prslinu, pre upotrebe konstrukcije (prag faktora intenziteta napona).

K_{TH} predstavlja levu opadajuću, dok K_C predstavlja desnu rastuću asimptotu date funkcije (slika 2.34).

2.6.3. Hiperboličko-sinusni model

Postoji i hiperboličko-sinusni model rešenja funkcije:

$$\log_{10}\left(\frac{da}{dN}\right) = A \cdot \sinh\{B[\log_{10}(\Delta K) + C] + D\} \quad (2.118)$$

pri čemu su:

- A, B, C i D - empirijske konstante.

2.6.4. NASGRO model

Još jedan oblik analitičkog rešenja (NASGRO [4]), predstavlja najpribližniju aproksimaciju eksperimentalno dobijenih vrednosti matematičkom funkcijom i glasi:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(1-f)^n \Delta K^n \left(1 - \frac{\Delta K_{TH}}{\Delta K}\right)^p}{(1-R)^n \left(1 - \frac{\Delta K}{(1-R)K_C}\right)^q} \quad (2.119)$$

pri čemu su:

- C, n, p i q - empirijski dobijene konstante materijala;

- $\Delta K_{TH} = \Delta K_0 \frac{\left(\frac{a}{a+a''}\right)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{1-f}{(1-A_0) \cdot (1-R)}\right)^{1+C_{TH}R}}$ - prag opsega faktora intenziteta

napona; (2.120)

- $\Delta K_0 = \Delta K_{TH}(R=0)$ - prag opsega faktora intenziteta napona pri $R=0$

(konstanta materijala);

- a'' - značajna veličina prsline (u proračunima se koristi vrednost: $a'' = 0.015 \text{ in} = 0.0381 \text{ mm}$);

- $f = \begin{cases} \max(R, A_0 + A_1R + A_2R^2 + A_3R^3) & R \geq 0 \\ A_0 + A_1R & -2 \leq R < 0 \end{cases} \quad (2.121)$

- funkcija otvaranja prsline (Newman-ova funkcija);

- $A_0 = (0.825 - 0.34r + 0.05r^2) \left[\cos\left(\frac{f}{2} \frac{\dagger_{\max}}{\dagger_t}\right) \right]^{\frac{1}{r}}$ (2.122)

$$- A_1 = (0.415 - 0.07r) \frac{\dagger_{\max}}{\dagger_t} \quad (2.123)$$

$$- A_2 = 1 - A_0 - A_1 - A_3 \quad (2.124)$$

$$- A_3 = 2A_0 + A_1 - 1 \quad (2.125)$$

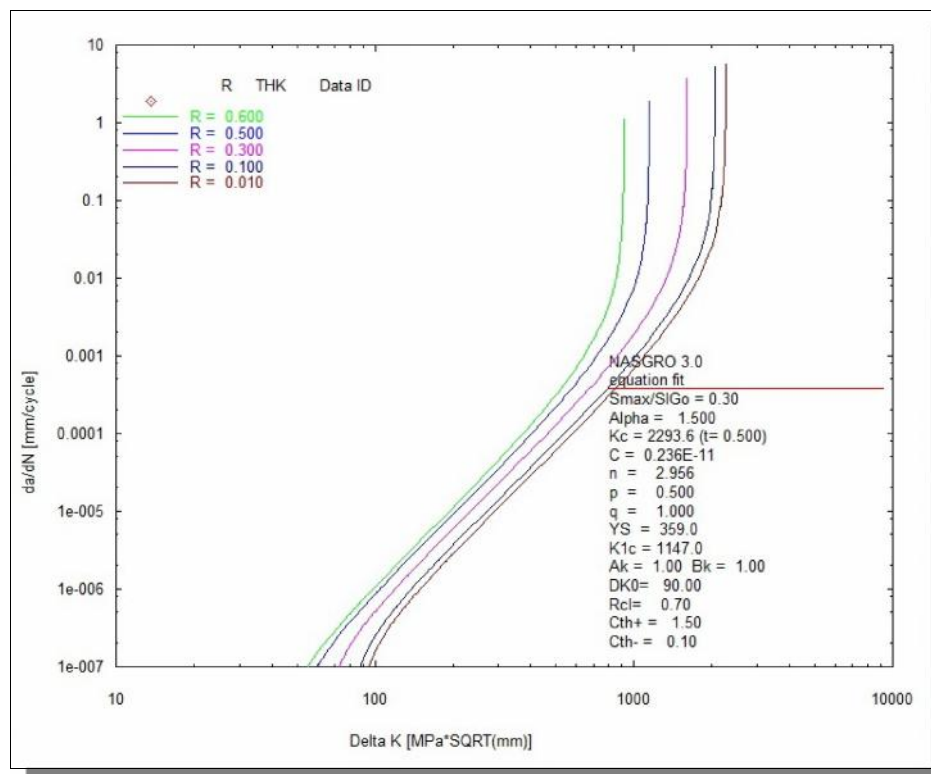
- \dagger_{\max} - maksimalno primenjeni napon;

- $r \in [1,3]$ - koeficijent koji uzima u obzir naponsko-deformaciono stanje. Vrednost $r = 1$ opisuje ravno stanje napona, dok vrednost $r = 3$ ukazuje na ravno stanje deformacije.

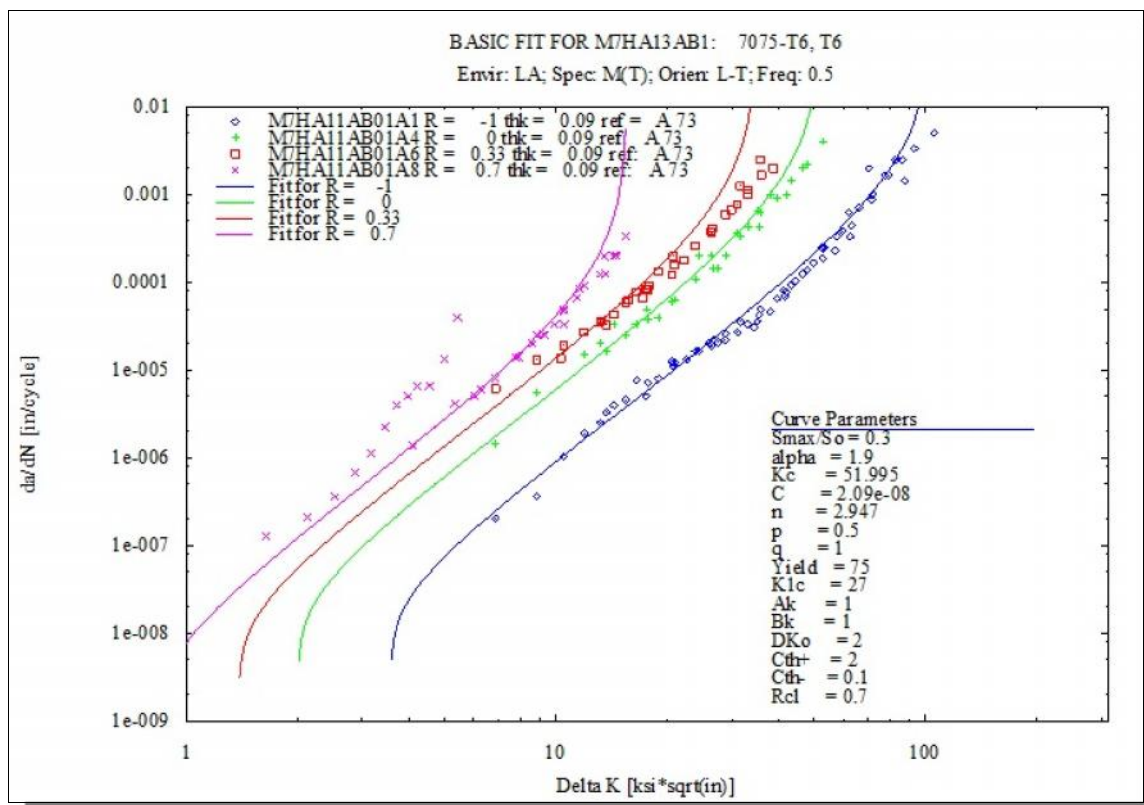
Svi neophodni koeficijenti se dobijaju iz baze materijala koja je inkorporirana u softver NASGRO (NASMAT-[4]).

2.6.5. Primeri dijagrama $\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R)$

Na sledećim slikama 2.35 i 2.36 dati su dijagrami $\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R)$ za legure aluminijuma: 2024-T351 i 7075-T6.



Slika 2.35 Zavisnost $\frac{da}{dN}$ od ΔK za leguru aluminijuma: 2024-T351



Slika 2.36 Zavisnost $\frac{da}{dN}$ od ΔK za leguru aluminijuma: 7075-T6 Al

2.7. Numerički model jednačina rasta zamorne prsline

Prilikom predviđanja rasta zamorne prsline, korišćenjem *software-a* zasnovanih na XFEM-u, dostupna su dva oblika podataka:

- i. podaci o rastu prsline u formi da/dN , koji predstavlja otpornost materijala na rast prsline;
- ii. faktor intenziteta napona (ili J -integral) u funkciji dužine prsline- a u strukturi.

Da bi pri tekućoj dužini prsline a_i došlo do njenog povećanja za vrednost Δa_i , potrebno je izvršiti inkrementalan broj ciklusa opterećenje- ΔN_i , što je definisano sledećom jednačinom ([16]):

$$\Delta N_i = \frac{\Delta a_i}{\left(\frac{da}{dN}\right)_{a=a_i}} \quad (2.126)$$

pri čemu se brzina progresije prsline dobija iz:

$$\frac{da}{dN} = f_R(\Delta K) \quad (2.127)$$

Ukupan broj ciklusa koji je potreban za progresiju prsline od njene inicijalne vrednosti- a_0 do konačne dužine- a_f dobija se integraljenjem jednačine (2.127):

$$N_{a_0 \rightarrow a_f} = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{f_R(\Delta K)} \quad (2.128)$$

Primenom jednačine koju je definisao *Paris* (jednačina (2.115)) u jednačini (2.2), dobija se:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n = C(s\Delta\ddagger \sqrt{fa})^n \quad (2.129)$$

Zamenom ove jednačine u (2.128) dobija se zamorni vek prsline:

$$N = \frac{1}{C(\Delta\ddagger)^n} \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{(s\sqrt{fa})^n} \quad (2.130)$$

Izračunavanje integrala se ostvaruje primenom numeričke metode, jer je i sam faktor- s zavisan od dužine prsline.

Iz jednačine (2.130) se direktno vidi da je životni vek konstrukcije obrnuto proporcionalan $(\Delta\ddagger)^n$.

Kvalitetnija rešenja se dobijaju primenom drugih jednačina rasta prsline, kao što su *Forman*-ova jednačina-(2.116) ili *NASGRO* jednačina-(2.119).

2.8. Procena veka vazduhoplovnih konstrukcija

Intenzitet i učestanost opterećenja su bitni elementi pri postupku procene veka vazduhoplovnih konstrukcija.

Najpoznatija teorija o kumulativnom oštećenju usled zamora materijala je *Palmgren-Miner* hipoteza. Hipoteza glasi: radni vek usled zamornog opterećenja jednak je količniku primenjenog broja ciklusa pri zadanom stepenu opterećenja- n i dozvoljenog broja ciklusa pri istom stepenu opterećenja- N . Pod pojmom dozvoljenog broja ciklusa podrazumeva se broj ciklusa potrebnih za stvaranje oštećenja pri istom stepenu opterećenja. Ako na deo deluje veći broj različitih ciklusa opterećenja, tada je ukupan radni vek jednak sumi odnosa $\frac{n}{N}$, za svaki stepen opterećenja:

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_m}{N_m} = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \quad (2.131)$$

gde su:

- n_i - broj ciklusa opterećenja pri i -tom stepenu;
- N_i - broj ciklusa opterećenja do loma pri i -tom stepenu, dobijen na osnovu *Wheeler*-ovog dijagrama.

Kada suma odnosa ciklusa teži jedinici: $D = 1$, znači da je "potrošen" sav potencijalni vek trajanja.

Postoje tri parametra koji utiču na veličinu D :

I: Uticaj redosleda delovanja opterećenja. Naprimer: ako na deo deluju dva opterećenja τ_1 pri broju ciklusa opterećenja n_1 , a potom i opterećenje τ_2 pri broju ciklusa opterećenja n_2 i pri tome je $\tau_1 > \tau_2$, tada će radni vek biti kraći nego da je prvo delovalo opterećenje manjeg pa potom većeg intenziteta.

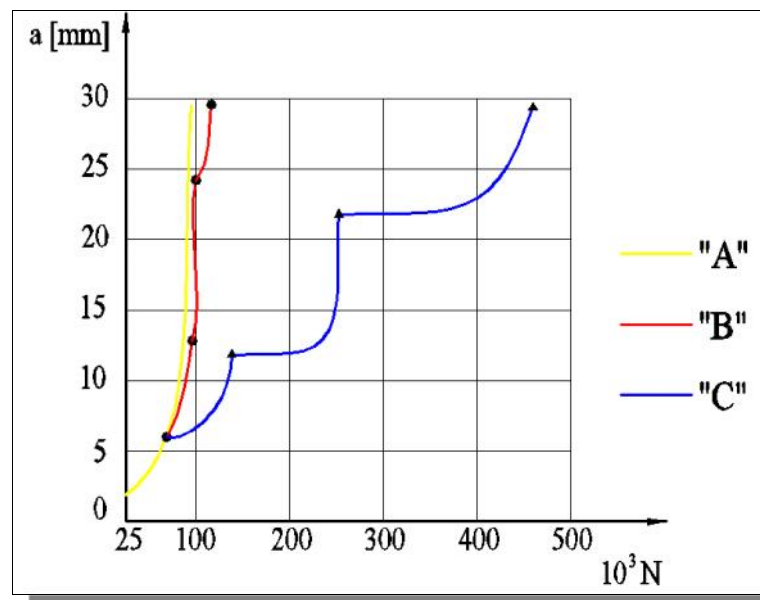
II: Takođe na sumu odnosa ciklusa utiče i veličina oštećenja usled stalnog opterećenja, pri istom stepenu. Za najveći broj letelica opterećenja su slučajnog karaktera, a stepen opterećenja se stalno menja. Pri tome je bitno da je broj ciklusa- n_i pri svakom stepenu opterećenja mali, da bi sumiranje odnosa ciklusa bilo tačno.

III: Treći parametar se odnosi na tip veze dela koji je opterećen sa preostalim delom konstrukcije. Ako je deo užlebljen ima sumu veću od

jedan, za razliku od neužlebljenog dela. Pošto je najzastupljeniji oblik veze kod vazduhoplovnih konstrukcija upravo veza žlebom, tada se može smatrati da vrednost $D = 1.5$ ukazuje na stvarni radni vek konstrukcije.

2.9. Interakcija opterećenja [17]

Veliki uticaj na rast prsline ima međusobni uticaj ciklusa sa višim i nižim vrednostima intenziteta pozitivnog opterećenja (zatezanje). Ako se deo prvo izloži dejstvu opterećenja manjeg intenziteta (manja amplituda napona), a potom na njega dejstvuje opterećenje većeg intenziteta, dolazi do pojave redukcije rasta prsline. Ovaj fenomen se naziva usporavanje.



Slika 2.37 Uticaj redosleda i intenziteta opterećenja na radni vek

Na slici 2.37 dati su rezultati ispitivanja legure aluminijuma 2024-T3 na uzorku sa centralnom prslinom. Kriva "A" predstavlja rezultat vešekratnog opterećivanja uzorka pozitivnim opterećenjem konstantne amplitude. Kod krive "B" povremeno su ubacivani pojedinačni ciklusi visoke amplitude. Posle svakog od ovih predopterećenja rast prsline se usporava, ali samo za određeni broj narednih ciklusa, nakon čega se ponovo uspostavlja uobičajeni gradijent rasta.

Usporavanje rasta prsline je rezultat zaostalih pritiskujućih (negativnih) napona koji nastaju u okolini vrha prsline. Pri zatezanju u blizini vrha prsline

stvara se lokalna plastična zona sa trajnim deformacijama. Prilikom rasterećenja (opterećenje manjih amplituda), preostali materijal se vraća u nedeformisano stanje. Samim tim vrši pritisak na plastično deformisanu zonu i na taj način indukuje pojavu zaostalih pritisnih (negativnih) napona. Pri daljem dejstvu zateznog (pozitivnog) opterećenja niže amplitude, ciklični naponi se superponiraju sa zaostalim pritisnim (negativnim) naponima, te dolazi do pojave usporavanja ili čak zaustavljanja širenja prsline. Sa povećanjem broja ciklusa zateznog opterećenja, rast prsline biva sve intenzivniji, sve dok se gradijent rasta ne izjednači sa standardnim gradijentom pri tom stepenu opterećenja.

U slučaju kombinovanja pozitivnog i negativnog opterećenja, ovo usporenje rasta je manje intenzivno. Uzrok ovoj pojavi je nastanak tzv. uzvratnih plastičnih deformacija u okolini vrha prsline. Ako se deo optereti prvo zateznim, a potom pritisnim opterećenjem, u okolini vrha prsline prvo nastaju trajne plastične deformacije sa pojavom zaostalih pritisnih napona. Njihovim superponiranjem sa pritisnim naponom postiže se negativan efekat, tako da se ubrzava rast prsline (kriva "C").

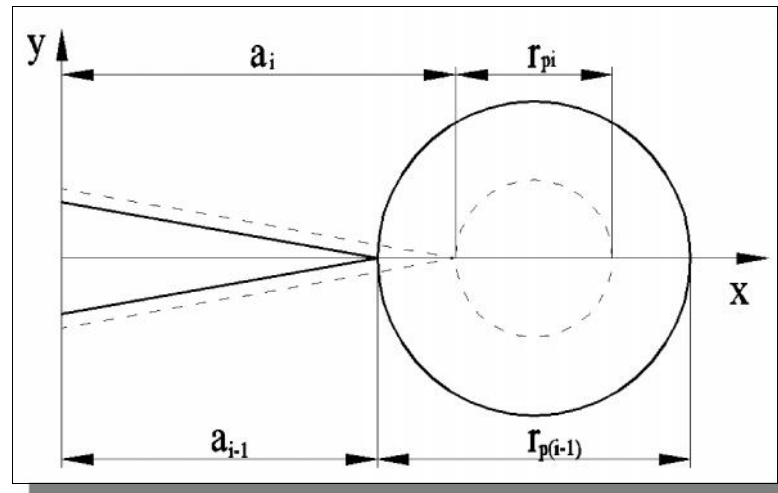
U slučaju spektra opterećenja letelica, koji je slučajnog karaktera, maksimalni pozitivni (zatezni) naponi pri nižim vrednostima amplitude, utiču na usporavanje rasta prsline. Dakle, negativni (pritisni) naponi pospešuju rast prsline.

Matematički model koji daje objašnjenje ove pojave, definisao je *Wheeler* uvođenjem tzv. redukcionog faktora rasta prsline- C_p :

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_r = C_p \cdot f(\Delta K) \quad (2.132)$$

pri čemu su:

- $\left(\frac{da}{dN}\right)_r$ - veličina usporavanja rasta prsline;
- $f(\Delta K)$ - standardna funkcija rasta prsline.



Slika 2.38 Usporavanje rasta prsline

Faktor rasta prsline, odnosno faktor usporavanja, se dobija iz sledeće jednačine (slika 2.38):

$$C_p = \left(\frac{r_{pi}}{a_{i-1} + r_{p(i-1)} - a_i} \right)^m \quad (2.133)$$

gde su:

- r_{pi} - prečnik plastične zone u i -tom ciklusu opterećenja;
- $r_{p(i-1)}$ - prečnik plastične zone u $(i-1)$ -vom ciklusu opterećenja;
- a_i - dužina prsline u i -tom ciklusu opterećenja;
- a_{i-1} - dužina prsline u $(i-1)$ -vom ciklusu opterećenja;
- m - eksperimentalno dobijena konstanta ($m \in [0.5, 2.25]$).

Metoda je unapređena od strane Willenborg-a, koji je uveo pojam efektivnog maksimalnog- $K_{\max,ef}$ i efektivnog minimalnog faktora intenziteta napona- $K_{\min,ef}$:

$$K_{\max,ef} = K_{\max,i} - W \cdot K_R^W \quad (2.134)$$

$$K_{\min,ef} = K_{\min,i} - W \cdot K_R^W \quad (2.135)$$

pri čemu su:

- K_R^W - Willenborg-ov zaostali faktor intenziteta napona i određen je formulom:

$$K_R^W = \left[K_{\max, i-1} \sqrt{1 - \left(\frac{a_i - a_{i-1}}{r_p^{(i-1)}} \right)^2} - K_{\max, i} \right] \quad (2.136)$$

• Faktor:

$$W = \frac{K_{\max, i} - K_{\max, T}}{K_{\max, i-1} - K_{\max, i}} \quad (\text{Gallager i Hughes}); \quad (2.137)$$

gde su:

$K_{\max, i-1}$ - maksimalni faktor intenziteta napona pri preopterećenju;

$K_{\max, T}$ - maksimalni početni faktor intenziteta napona.

Faktor w se može prikazati i u sledećem obliku:

$$W = \frac{1 - \frac{\Delta K_{TH}}{\Delta K}}{R_{SO} - 1} \quad (2.138)$$

gde je:

$$R_{SO} = \frac{K_{\max, i-1}}{K_{\max, i}} \quad (2.139)$$

tzv. koeficijent zatvaranja prsline. Kod legura čelika i nikla ima vrednost 3.5, dok je kod legura aluminijuma i titana $R_{SO} = 2.3$.

Efektivni koeficijent asimetrije cikusa- R_{ef} prikazan je odnosom efektivnih vrednosti minimalnog i maksimalnog faktora intenziteta napona:

$$R_{ef} = \frac{K_{\min, ef}}{K_{\max, ef}} \quad (2.140)$$

koji predstavlja meru usporavanja širenja prsline kroz plastičnu zonu u trenutku preopterećenja.

Do usporavanja, pa čak i do zaustavljanja širenja prsline doći će samo ukoliko je:

$$K_R^W > 0 \quad (2.141)$$

Usporavanje dolazi pri zateznim opterećenjima, odnosno kada je $K_{\min, i} > 0$. Kada je $K_{\min, i} < 0$ nema usporavanja. Dakle, usporavanje će prestati kada vrh prsline izađe iz plastično deformisane zone nastale preopterećenjem, odnosno kada razlika dužine prsline u i -tom ciklusu- a_i i njene dužine u

trenutku njenog poslednjeg pozitivnog opterećenja- a_{i-1} bude jednaka prečniku plastično deformisane zone- $r_{p(i-1)}$ nastale preopterećenjem: $a_i - a_{i-1} = r_{p(i-1)}$.

Zaustavljanje prsline nastaje kada je: $a_i = a_{i-1}$, pa na osnovu jednačina (2.134) i (2.135) imamo:

$$K_{\max, ef} = K_{\max, T} = \frac{\Delta K_{TH}}{1 - R} \quad (2.142)$$

pri čemu je:

$$\bullet \quad R = \frac{K_{\min, i}}{K_{\max, i}} \quad (2.143)$$

3. FRIKCIONO ZAVARIVANJE MEŠANJEM

FSW (Friction Stir Welding)

3.1. Primena legura aluminijuma u vazduhoplovstvu

Legure aluminijuma su našle široku primenu u oblasti vazduhoplovne industrije, naročito u proizvodnji putničkih i transportnih aviona.

U cilju poboljšanja karakteristika aluminijuma koriste se legure aluminijuma, koji se dobijaju legiranjem čistog aluminijuma sa sledećim elementima: bakrom-Cu, cinkom-Zn, magnezijumom-Mg, silicijumom-Si, manganom-Mn i litijumom-Li (tabela 3.1).

Najčešće korišćene legure su iz serije: 2014 (Al-Cu-Mg) -tzv. durali (od 1920.godine) i 7000 (od 40-ih godina XX veka). Prednost legura iz serije 7000 se ogleda u povišenoj zateznoj čvrstoći, dok je nedostatak sklonost ka lomu usled zamorne korozije, kao i niska otpornost na zamor.

Problem naponske korozije je rešen primenom tehnološkog procesa T73 (dvostruko starenje). Međutim, kao negativan propratni efekat javlja se smanjenje zatezne čvrstoće za oko 10%. Početkom 70-ih godina prošlog veka, problem je prevaziđen pojavom legura 7050 i 7010.

50-ih godina posebna pažnja se poklanja uticaju zamora na vek konstrukcije. Kao rezultat istaživanja, u cilju da se postignu što bolje karakteristike nastaje legura 2024-T3, koja i danas predstavlja materijal sa dobrim zamornim karakteristikama.

Sa pojavom novog pristupa u procesu projektovanja (tzv. "*fail safe*"), kao i sa razvojem elemenata koji su korišćeni za zaustavljanje rasta prsline u strukturi, i legure iz serije 7000 su pronašle svoju primenu.

Novi korak u razvoju legura predstavljaju legure Al-Li, koje su za oko 10% lakše i oko 10% veće zatezne čvrstoće. Primenom novih konstrukcionih rešenja, moguće je ostvariti uštedu na masi konstrukcije čak i do 15%. Nedostatak legure je sa ekonomskog aspekta, jer je njena cena oko 3 puta veća u odnosu na konvencionalne legure aluminijuma.

U grupu relativno skoro razvijenih legura spadaju tzv. *powder metallurgy* legure: 7090 i 7091, koje karakteriše veoma brzo očvršćavanje.

Pri projektovanju vazduhoplovnih konstrukcija sa aspekta "*fail safe*", izbor materijala se vrši ne samo na osnovu zatezne čvrstoće, već i na osnovu svojstva

(sposobnosti) materijala da se odupre manjim oštećenjima koja mogu ugroziti sigurnost letelice. Najznačajniji kriterijum pri izboru materijala je preostala zatezna čvrstoća.

Presurizovane kabine i donjake krila su strukturni elementi posebno osetljivi na zamor, te se iz tog razloga izrađuju od legure 2024-T3. Za gornjaku krila se koristi legura 7075-T6 (Al-Zn-Cr), koja je naročito našla primenu pri izradi vojnih aviona [15].

Tabela 3.1 Označavanje legura aluminijuma

(Ilustracija preuzeta iz [15])

OZNAČAVANJE LEGURA ALUMINIJUMA	
aluminijum (min 99%)	1 X X X
aluminijum-bakar (Al-Cu)	2 X X X
aluminijum-mangan (Al-Mn)	3 X X X
aluminijum-silicijum (Al-Si)	4 X X X
aluminijum-magnezijum (Al-Mg)	5 X X X
aluminijum-magnezijum-silicijum (Al-Mg-Si)	6 X X X
aluminijum-cink (Al-Zn)	7 X X X
aluminijum-drugi elementi	8 X X X
nepoznato	9 X X X

Tabela 3.2 Označavanje termičke obrade

(Ilustracija preuzeta iz [15] i [18])

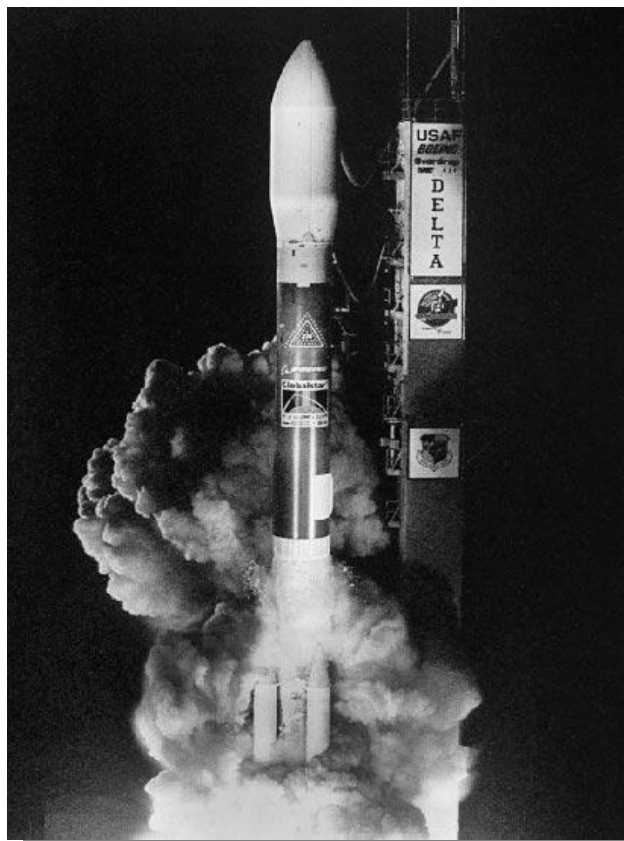
TERMIČKA OBRADA	
F	Kovani delovi, naknadno termički obrađeni, uključujući odlivke. Ne postoji garancija karakteristika.
O	Otpuštanje
H	Očvršćavanje deformacijom, npr. hladna obrada
W	Rastvor toplotno tretiran, nestabilno stanje nastaje nakon kaljenja.

T	Termičko starenje:
	T1-prirodno starenje
	T2-hladno obrađen i prirodno starenje
	T3-Rastvor toplotno tretiran (na 540°C), hladno obrađen, prirodno starenje (kod ploča).
	T4-Rastvor toplotno tretiran (od 450-550°C), prirodno starenje.
	T5-hlađenje, veštačko starenje.
	T6- Rastvor toplotno tretiran, veštačko starenje.
	T7-Rastvor toplotno tretiran, dvostruko starenje.
	T8-Rastvor toplotno tretiran, hladno obrađen, veštačko starenje.
	T9- Rastvor toplotno tretiran, veštačko starenje, hladno obrađen.
	T10-hladno obrađen, veštačko starenje.

3.2. Osnovni principi frikcionog zavarivanja mešanjem

Frikciono zavarivanje mešanjem (*Friction Stir Welding - FSW*) ili *FSW* postupak je razvijeno i patentirano u decembru 1991.godine od strane *W.Thomas*-a iz Instituta za zavarivanje (*TWI- The Welding Institute, Cambridge, UK*).

Iako *FSW* predstavlja relativno nov način zavarivanja, ubrzo nalazi svoju primenu pri zavarivanju rezervoara goriva na raketi *Boeing Delta II* (slika 3.1). Ubrzo počinje da se koristi i u avio saobraćaju, kao prilično efikasan način spajanja komponenti od legura aluminijuma. Veliki uspeh postiže i u drugim industrijskim granama, kao što su železnica i automobilska industrija.



*Slika 3.1 Lansiranje rakete Boeing Delta II Rocket u avgustu 1999.godine
(ilustracija preuzeta iz [19])*

Ovaj proces se obavlja u čvrstom stanju, te je stoga pogodan za zavarivanje kako istorodnih, tako i različitih tipova materijala. Pri tome se dobijaju odlične mehaničke karakteristike zavarenog spoja.

FSW je nastao kao rezultat istraživanja vršenih u cilju iznalaženja novih rešenja pri zavarivanju aluminijumskih legura, kako bi se izbegli problemi koji se javljaju pri konvencionalnim procesima zavarivanja (lokalno zagrevanje materijala do i preko tačke topljenja, pri čemu se u značajnoj meri smanjuju mehanička svojstva materijala). To je proces spajanja materijala u čvrstoj fazi, kombinovanim delovanjem toplote i mehaničkog rada. U toku ovog preseca temperature koje se javljaju u zoni spoja ne prelaze tačku topljenja materijala, već se kreću u intervalu od 400-500°C. Pri tome, ne nastaju uobičajene greške koje su karakteristične za proces topljenja.

Ovim, relativno novim postupkom zavarivanja, moguće je zavariti većinu aluminijumskih legura, pa čak i one koje su nepogodne za zavarivanje konvencionalnim postupcima.

FSW je posebno pogodno za spajanje aluminijumskih legura sa velikim rasponom debljina ploča. Moguće je zavariti aluminijumske limove debljine od 0.5 do 50mm u jednom prolazu, odnosno do 100mm debljine formiranjem dvostranog vara ([7]). Takođe, ovim postupkom zavarivanja moguće je uspešno zavariti i sledeće materijale: bakar i njegove legure, olovo, titanijum i njegove legure, legure magnezijuma, legure olova, cink, legure nikla, konstrukcioni čelik, mikrolegirani čelici, meki čelik, nerđajući čelik, austenitni i dupleks čelik, polimeri ([20]).

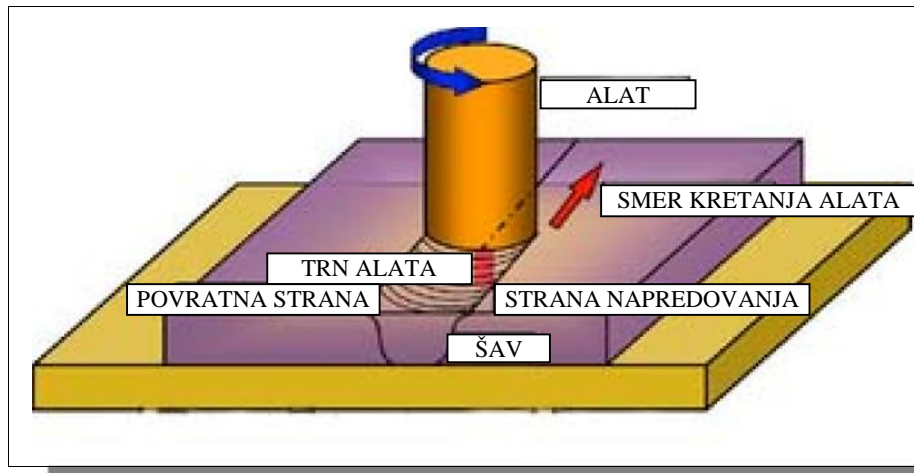
Postupak frikcionog zavarivanja mešanjem (pomoću alata), kao veoma savremen postupak, našao je svoje mesto u proizvodnji procesne opreme, proizvodnji šinskih vozila, brodogradnji, automobilske industriji, avioindustriji, proizvodnji kosmičkih letelica, itd. Ovim postupkom mogu se zavariti ploče, limovi, cilindrični delovi, sklopni delovi i to u svim mogućim međusobnim položajima ([21]).

Danas zavarivanje predstavlja najzastupljeniji način (tehnologiju) spajanja metalnih struktura, naročito konstrukcija sa visoko-gabaritnim merama, kao što su: mostovi, brodovi, avioni.

Strukturna analiza zavarenih konstrukcija ne razlikuje se u značajnom meri od strukturne analize za druge vidove konstrukcija. Mnogi uzročnici loma se uspešno izbegavaju adekvatnim dizajnom, izborom materijala, primenom odgovarajućih tehnoloških postupaka (videti poglavlje 1.2.1.). Takođe, pri proračunu neophodno je uzeti u razmatranje tip dejstvujućeg opterećenja, kao i radne uslove (vlaga, salinitet, hemijski agresivne sredine, temperatura). Svi pomenuti uticaji su uzeti u obzir u mnogobrojnih eksperimentalnih istraživanja i dati u već ponuđenim bazama sa karakteristikama materijala (*NASGRO/NASMAT*-[4]).

Do nedavno korišćena tehnika spajanja tankozidnih struktura izrađenih od legura aluminijuma posredstvom zakivaka, u poslednje vreme se sve više zamenjuje novom tehnologijom spajanja-frikcionim zavarivanjem mešanjem.




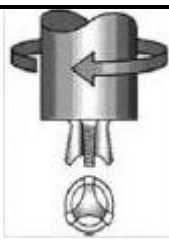


Postupak *FSW* se otvaruje po principu prikazanom na slici 3.2. Limovi sučeono postavljeni, pritisnu se jedan uz drugi i čvrsto fiksiraju za podložnu ploču.

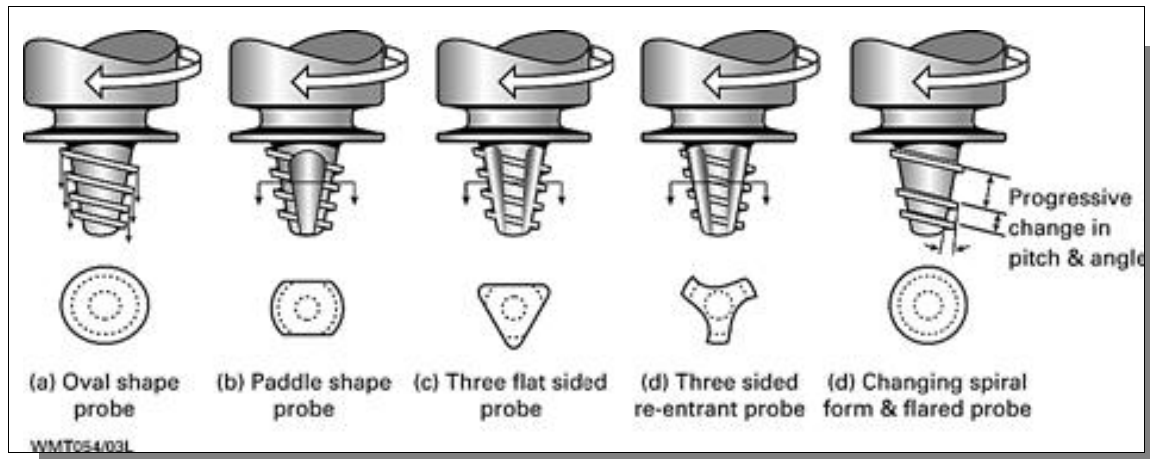


Slika 3.2 FSW postupak
(Ilustracija preuzeta iz [22] i modifikovana)

Pri tome se koristi specijalno oblikovan alat (tabela 3.1). Alat je cilindričnog oblika i sastoji se od valjka i rukavca (trn alata). Prečnici ova dva dela su različiti, dok je prelaz između ova dela ravan (ili reljefan) i naziva se čelo valjka. Oblik trna može biti različit i služi za generisanje toplote u spoju (slika 3.2).

Tabela 3.1 Alati konstruisani u TWI
(tabela preuzeta iz [23] i modifikovana)

<i>Cylindrical</i>	<i>Whorl™</i>	<i>MX triflaute™</i>	<i>Flared triflaute™</i>	<i>A-skew™</i>	<i>RE-stir™</i>
cilindrični	spiralni	MX- trožlebni	šireći trožlebni	A-zakošeni	Re-mešajući
					



Slika 3.1 Oblici trna alata
(slika preuzeta iz [24])

U početnom trenutku, alat se pozicionira iznad limova, pri čemu je njegova osa normalna na dodirnu liniju limova. Proces započinje rotacijom alata (oko sopstvene ose) i uranjanjem alata u materijal, po liniji spoja. Kada čelo valjka dodirne limove, generiše se toplota i pri tome se materijal limova zagreva do plastičnog stanja. Trn alata prodire u materijale duž linije spoja. Potom, alat vrši translatorsno kretanje duž linije spoja dva materijala koja se zavaruju, uz istovremenu rotaciju. Nakon formiranja zavarenog spoja, alat završava translatorsno kretanje vertikalnim izvlačenjem trna alata iz osnovnog materijala.

U zavisnosti od konstrukcije uređaja za zavarivanje moguće je ostvariti različite načine kretanja:

- a) podložna ploča je fiksirana za sto mašine i vrši horizontalno translatorsno kretanje zajedno sa limovima, dok alat vrši samo rotaciono kretanje (oko sopstvene ose),
- b) podložna ploča može biti nepokretna a da translatorsno kretanje vrši alat.

U toku zavarivanja se ne koristi dodatni materijal i ne dolazi do topljenja materijala koji se zavaruju. Dakle, alat i osnovni materijal ostaju u čvrstom stanju, dok se u zoni zavarivanja osnovni materijal nalazi u blago razmekšanom, "plastičnom" stanju. Ono je posledica generisanja toplote, koja nastaje kao rezultat trenja između alata i osnovnog materijala.

Dakle, frikciono zavarivanje mešanjem je process baziran na intenzivnom mešanju materijala oko alata, a zatim sjedinjavanju i odlaganju, tako dobijenog

materijala, iza trna alata. U zoni spoja se vrši generisanje toplote usled trenja koje nastaje između trna alata i materijala koje se zavaruje. Sam prenos toplote se pospešuje plastičnim tečenjem materijala oko trna alati i on zavisi od osobina materijala i od parametara zavarivanja. Parametri zavarivanja su: brzine rotacije alat i relativna brzina alat-materijal, pritisne sile, brzina zavarivanja, geometrije alata i vreme zavarivanja. Termo-mehanički procesi koji se odvijaju u samom varu utiču na brzinu zagrevanja i hlađenja, deformaciju i tečenje materijala, a samim tim i na rekristalizaciju i mehaničke karakteristike zavarenog spoja.

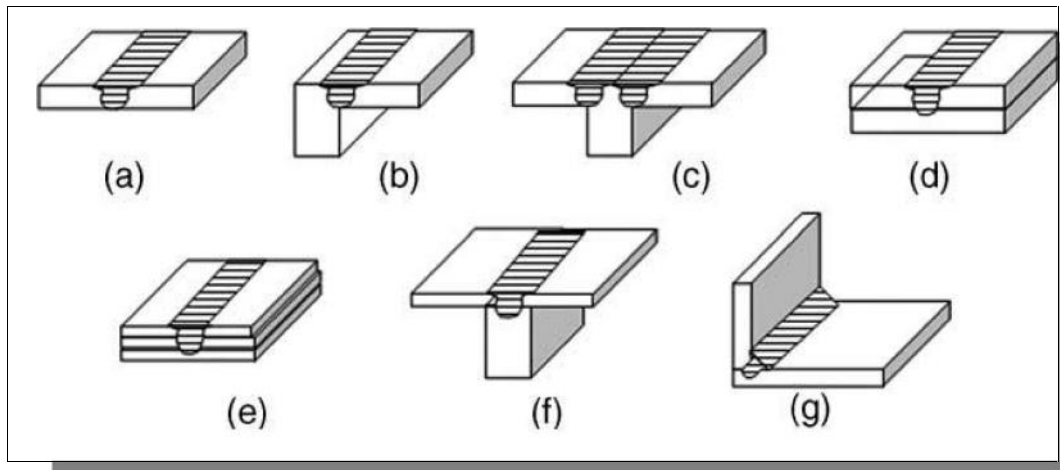
Osnovni parametri procesa zavarivanja su relativna brzina, sila i vreme zavarivanja.

U toku procesa frikcionim zavarivanja mešanjem, najintenzivnije generisanje toplote nastaje na frontalnom delu frikcionne površine trna alata, jer ona dolazi u dodir sa nezagrejanim materijalom na koji trn alata nailazi u smeru svog translatornog kretanja. Na preostalim delovima trna alata intenzitet generisanja toplote je manji, jer su već u kontaktu sa prethodno zagrejanim i plastičnim materijalom.

Mešanjem zagrejanog materijala dobija se sitnozrnastija struktura, čime se poboljšavaju mehaničke karakteristike šava. Na taj način, kod nekih slučajeva, dobija se spoj čije su mehaničke karakteristike bolje u odnosu na osnovni materijal.

Na slici 3.4 su prikazane vrste spojeva koje se mogu dobiti pomoću frikcionog zavarivanja mešanjem:

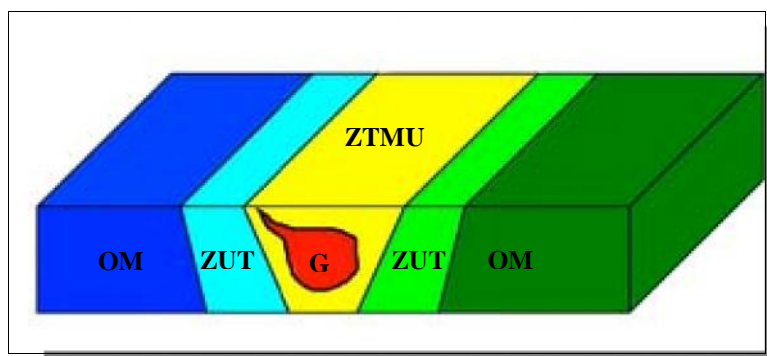
- a) sučeoni spoj,
- b) ugaoni-sučeoni spoj,
- c) T-spoj tri elementa,
- d) jednostruki preklopni spoj,
- e) višestruki preklopni spoj,
- f) T-spoj dva elementa,
- g) ugaoni spoj.



Slika 3.4 Vrste spojeva dobijenih FSW
(ilustracija preuzeta iz [25] i modificovana)

3.3. Struktura zavarenog spoja dobijenog FSW postupkom

Analizom makrostrukture uzoraka aluminijumskih legura zavarenih postupkom FSW, ustanovljeno je da postoji izvesna nesimetričnost poprečnog preseka spoja u odnosu na liniju spoja. Pri tome se uočava karakteristična struktura oblika tzv. "prstena luka" u centralnoj zoni preseka (slika 3.5).



Slika 3.5 Poprečni presek spoja dobijenog FSW postupkom

- a) osnovni materijal (OM)
 - b) zona uticaja toplote (ZUT)
 - c) zona termo-mehaničkog uticaja (ZTMU)
 - d) grumen (G)-deo ZTMU
- (ilustracija preuzeta iz [22] i modificovana)

Uzročnik asimetričnosti jeste sama priroda tečenja materijala tokom procesa zavarivanja. Dakle, na slici 3.5 jasno se uočava nesimetričnost između

strane napredovanja (desno) i povratne/prateće (levo) strane poprečnog preseka zavarenog spoja. Strana napredovanja vara je ona strana spoja kod koje se poklapaju smerovi vektora brzine rotacije i pravolinijskog kretanja alata, za razliku od povratne strane koja se definiše kao strana na kojoj su ova dva vektora suprotnog smera. Ova razlika u superponiranju vektora brzina na strani napredovanja, odnosno na povratnoj strani, uzokovala je različitosti pri prostiranju toplote i tečenja, a samim tim i u mehaničkim osobinama. Npr. kod aluminijumskih legura koje ojačavaju starenjem, tvrdoća u ZUT-u povratne strane je niža, usled čega pri zateznom opterećenju do loma dolazi baš u ovoj zoni.

Promenu osobina osnovnog materijala izazivaju sledeći faktori: maksimalno dostignuta temperature (posledica toplote indukovane trenjem tokom zavarivanja), brzina hlađenja, dejstvo pritisne sile i tečenje materijala usled mehaničkog mešanja. Upravo ove pojave, praćene promenom osobina osnovnog materijala, uzrokuju postojanje nekoliko zona u zavarenom spoju različitih po svojoj strukturi i osobinama (slika 3.5):

- **Osnovni materijal (OM)** - ova zona nije izložena dejstvu mehaničkog opterećenja i temperature, jer je na dovoljno velikoj udaljenosti od vara. Samim tako nema promena u mikrostrukturi i mehaničkim osobinama i one odgovaraju svom polaznom stanju;
- **Zona uticaja toplote (ZUT)** - je deo osnovnog metala blizu vara, koji je izložen dejstvu povišene temperature, ali ne i dejstvu mehaničkog opterećenja. Tokom procesa zavarivanja u ovoj zoni se odvija određeni temperaturni ciklus zagrevanja i hlađenja, usled čega dolazi do promena u mikrostrukturi i mehaničkim osobinama. Veličina ove zone zavisi od odnosa vremena i temperature zavarivanja, kao i od rastojanja od ose vara.
- **Zona termo-mehaničkog uticaja (ZTMU)** - je deo osnovnog materijala koji se nalazi neposredno ispod alata. Istovremeno je izložen dejstvu mehaničkog opterećenja i povišenoj temperaturi, što ima za posledicu pojavu značajnih promena u mikrostrukturi, a samim tim i u mehaničkim karakteristikama materijala.

Kod aluminijumskih legura, unutar ZTMU moguće je uočiti tri oblasti:

1. Najizraženija je rekristalizovana oblast, tzv. **grumen**, koja je usled dejstva mehaničkog opterećenja znatno deformisana. (U stručnoj javnosti još uvek nema saglasnosti da li je grumen sastavni deo ZTMU ili posebna zona.)

2. Levo i desno od grumena nalazi se oblast koja je deformisana u manjoj meri u odnosu na grumen. U ovoj oblasti može ali i ne mora doći do rekristalizacije zrna, u zavisnosti od vrste legure.

3. Treća oblast (tzv. rukavac) se nalazi iznad grumena. Nastaje tokom prolaza ivice valjka sa povratne strane preko prethodno formiranog grumena.

Kod drugih materijala, za razliku od legura aluminijuma ne postoji jasno izražena znatno rekristalizovana zona-tzv. grumen.

- **Grumen vara** - je deo osnovnog materijala, neposredno ispod alata. Pretrpeo je najveće plastične deformacije, kao rezultat direktnog uticaja dejstva trna alata. Širina grumena je obično nešto veća od prečnika trna alata. Mikrostruktura grumena se sastoji od homogeno raspoređenih sitnih rekristalisanih zona, što je posledica procesa rekristalizacije koji se u njemu odvijaju. U zavisnosti od vrste legure i uslova zavarivanja, veličina zrna se kreće od 2 do 10 μm . Nesimetričnost šava se upravo odnosi na sam grumen. Na strani napredovanja prelaz grumena ka ZUT-u je veoma nagao, dok je povratnoj strani vara znatno postepeniji.

Lice šava je gornja površina spoja koja je u kontaktu sa valjkom alata, dok je **koren šava** donja površina spoja koja je u kontaktu sa potpornom pločom [20].

Dimenzije gore navedenih zona zavise od više faktora: vrste zavarivanog materijala, oblika i dimenzija komponente koje se zavaruje, veličine alata za zavarivanje, brzine kojom rotira i kojom se pomera. Zona grumena je veća od prečnika trna alata, a manja od prečnika tela alata [26].

3.4. Svojstva zavarenog spoja aluminijumskih legura

Frikciono zavarivanje mešanjem predstavlja termo-mehanički process ([20]). Dakle, postoje mehaničke interakcije između alata za FSW i materijala,

koji se zavaruje. Svojim kombinovanim kretanjem alat predaje kinetičku energiju spoju, pri čemu se predata energija transformiše u različite vidove energije (kinetičku i toplotnu), koje prouzrokuju deformaciju mikrostrukture šava, kao i modifikaciju mehaničkih karakteristika. Dakle, u šavu nastaju metaluške transformacije, koje diktiraju osobine zavarenog spoja. Te transformacije zavise od legirajućeg elementa, kao i stanja legure. Uticaj brzine rotacije alata, brzine zavarivanja i geometrije alata ima značajan uticaj na tvrdoću materijala, ali i na različite mehaničke karakteristike zavarenog spoja. Promene kod legura koje taložno otvrdnjavaju (termički obradive-grupa 2xxx, 6xxx, 7xxx) su složenije, za razliku od promena kod legura sa rastvarajućim otvrdnjavanjem (termički neobradive-grupa 3xxx, 4xxx, 5xxx).

3.4.1. Tvrdoća zavarenog spoja

Kod termički neobradivih legura, registruje se malo povećanje tvrdoće u zoni uticaja toplote (ZUT), zoni termo-mehaničkog uticaja (ZTMU) i grumenu, u odnosu na osnovni materijal (OM). Kao posledica usitnjavanja zrna usled intenzivnog mehaničkog mešanja i povišene temperature, u samom grumenu javlja se najveća tvrdoća materijala spoja. U zoni termo-mehaničkog uticaja materijal je izložen dejstvu i mehaničkog mešanja, ali i temperature, što ima za posledicu nešto veću tvrdoću u odnosu na preostale zone. Dok je materijal u zoni uticaja toplote izložen dejstvu samo povišene temperature, tako da je struktura veoma malo izmenjena u odnosu na osnovni materijal. Na slici 3.11 data je raspodela tvrdoće u FSW spoju dve čelone spojene ploče, izrađene od legure aluminijuma 2024-T351.

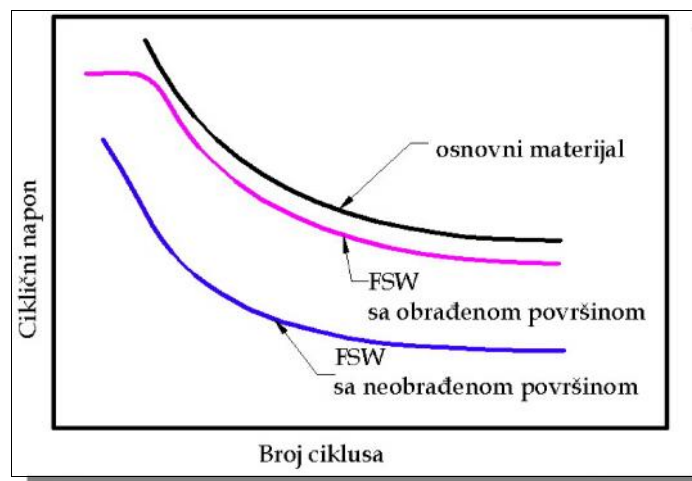
U termički obradive legure spadaju sledeće grupe: 2xxx, 6xxx i 7xxx. Ove legure taložno ojačavaju i imaju najmanju tvrdoću u delu neposredno izvan grumena. U toku zavarivanja FSW procesom dolazi do pojave kompleksnih metaluških transformacija u zavarenom spoju i ZUT-u. Kod ovih grupa aluminijumskih legura u oblasti grumena obično izostaje taložno ojačavanje. Ukoliko dođe do izdvajanja taloga u ovoj oblasti, izdvojene čestice taloga su veoma fine. U zoni neposredno uz grumen izdvaja se grub talog. Veličina izdvojenih taloga se smanjuje sa povećanjem udaljenosti od grumena, što je posledica prostiranja toplote kroz zavareni komad, kao i njenog uticaja na

mikrostrukturu materijala usled izvršene termičke obrade. Usled toga raspodela tvrdoće kroz zavareni spoj legura koje taložno ojačavaju imaju karakterističan W oblik profila (slika 3.11). Pri tom, tvrdoća grumena je na nivou između osnovnog i termički obrađenog materijala.

3.4.2. Mehaničke karakteristike zavarenog spoja

Zone grumena i ZUT-a, imaju veliku sposobnost plastične deformacije. Uglavnom, zatezna čvrstoća svih tipova aluminijumskih legura se povećava sa porastom parametara zavarivanja, pre svega brzine zavarivanja. Pri tome, postignuta efikasnost spoja veoma zavisi od tipa legure. Efikasnost spoja dobijenog *FSW* postupkom je znatno bolja u odnosu na efikasnosti spoja dobijenog klasičnim postupkom zavarivanja sa topljenjem. Kod legure grupe 5xxx efikasnost spoja može da iznosi i do 100%, dok je za legure grupe 2xxx, 6xxx i 7xxx efikasnost spoja iznosi do 90%, do 75% i preko 90%, respektivno. Prilikom ispitivanja na zatezanje zavarenih spojeva legura koje taložno ojačavaju, do loma dolazi na povratnoj strani vara. Naknadna termička obrada spojeva povećava efikasnost spoja, ali znatno smanjuje savojnu čvrstoću, što je posledica porasta zrna u ZTMU. Takođe, termička obrada utiče na mesto i karakter preloma. Iz ovih razloga se naknadna termička obrada spojeva dobijenih *FSW* postupkom ne preporučuje.

Kvalitet površine dobijene *FSW* postupkom, odnosno izgled lica šava ima veliki uticaj na otpornost spoja na zamor. Ispitivanjem na zamor uzoraka opterećenih u poprečnom i podužnom pravcu, utvrđeno je da otpornost spoja na zamor iznosi svega 50% od otpornosti osnovog materijala. Međutim, ukoliko se sa strane lica šava naknadnom mašinskom obradom skinu sloj debljine 0,1 do 0,15 mm, otpornost materijala šava na zamor je približno jednaka osnovnom materijalu (slika 3.6).



Slika 3.6 Uticaj obrade površine spoja na zamornu otpornost
(Ilustracija preuzeta iz [14])

Mala nadvišenja lica šava, kao i prisutni grebenast tragovi valjka alata na strani napredovanja, koji nastaju nakon procesa *FSW* su mesta koncentracije napona na kojima se stvaraju i razvijaju zamorne prsline. Naknadnom mašinskom obradom uklanjaju se koncentratori napona, te se zamorne prsline javljaju u oblasti najmanje tvrdoće.

Ukoliko se u procesu *FSW* primenjuje veća brzina zavarivanja nastali spoj ima veću otpornost na zamor. Otpornost spojeva na zamor, dobijenih *FSW* postupkom je ipak veća nego spojeva dobijenih *MIG* postupkom.

U zavarenim spojevima dobijenim *FSW* postupkom javljaju se zaostali naponi i deformacije, nastali kao posledica neuniformnog hlađenja i zagrevanja materijala. Ove razlike izazivaju nejednako širenje materijala i pojavu lokalnih plastičnih deformacija. Tokom hlađenja materijal se skuplja i generiše zaostale. Pri tome se javlja asimetričnost u raspodeli zaostalih napona u odnosu na osu kretanja alata (strana napredovanja tj. povratna strana). Ipak, ovi negativni propratni efekti su daleko manji od onih koji se javljaju u zavarenim spojevima dobijenim topljenjem materijala, kod klasičnih postupaka zavarivanja.

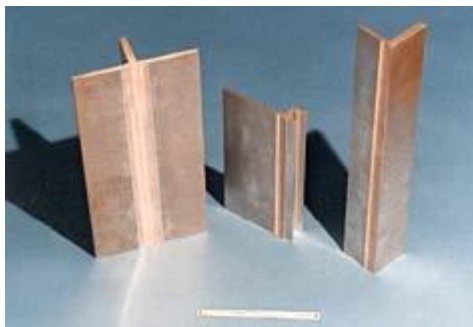
Var se odlikuje visokim mehaničkim osobinama. Lom se javlja u ZUT i ZTMU. U ovim zonama su manje vrednosti mikrotvrdoće. Povećanje tvrdoće u ovim zonama može se postići termičkom obradom nakon zavarivanja [26].

Kod termički neojačanih legura aluminijuma tvrdoća se povećava od osnovnog materijala ka zoni mešanja. Uzrok povećane tvrdoće u zoni mešanja je rafinacija zrna. Kod termički ojačanih legura aluminijuma, javlja se

karakterističan "W" oblik profila tvrdoće u poprečnom preseku zavarenog spoja. Najmanja tvrdoća je zastupljena u ZUT-u, dok je tvrdoća grumena između vrednosti tvrdoće za ZUT i osnovni material. Tvrdoća u grumenu se može povećati povećanjem brzine zavarivanja i smanjenjem broja obrtaja alata [27].

3.5. Vrste tankozidnih struktura dobijenih FSW postupkom

Na slici 3.7 dati su primeri tipičnih T i L-spojeva, dobijenih FSW postupkom. Na slici 3.8 je prikazana ekstrudirana ojačana cev, dok je slici 3.9 ekstrudirani panel (ojačana ploča Z-uzdužnicima).



Slika 3.7 Tipični aluminijumski spojevi
dobijeni FSW-om
(Ilustracija preuzeta iz [14])



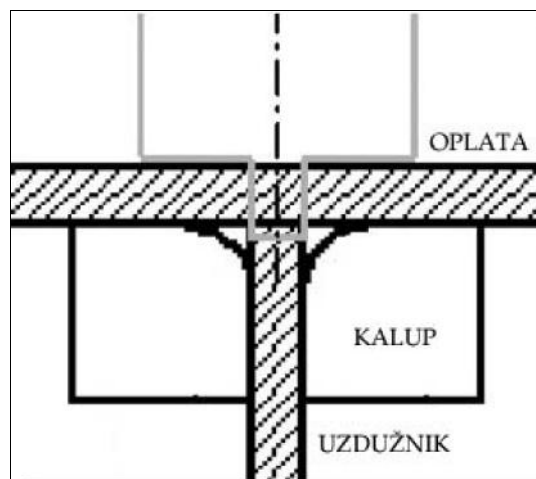
Slika 3.8 Ekstrudirana cev
(Ilustracija preuzeta iz [7])



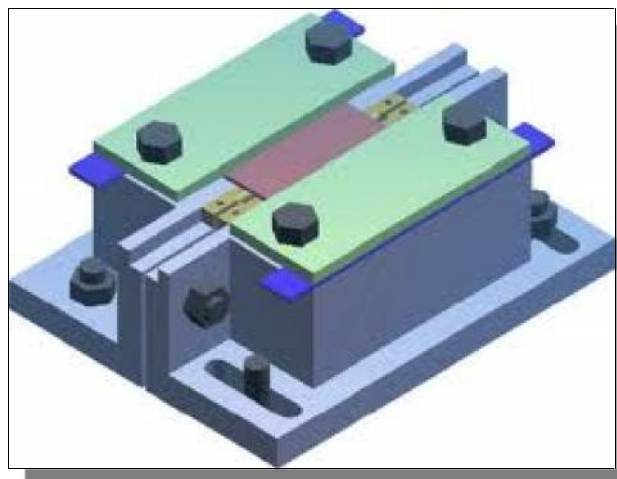
Slika 3.9 Ekstrudirani panel
(Ilustracija preuzeta iz [7])

3.5.1. T-spojevi

Na slikama 3.10 i 3.11 dati su pojednostavljeni prikazi frikcionog zavarivanja mešanjem prilikom formiranja T-spoja. Ovim postupkom ostvaruje se spoj između oplata i uzdužnika (ojačanje). Pri tome se koristi poseban alat za pozicioniranje, ali i kalupi kojima se formira zaobljenje duž linije spoja oplata i uzdužnika (slika 3.12).



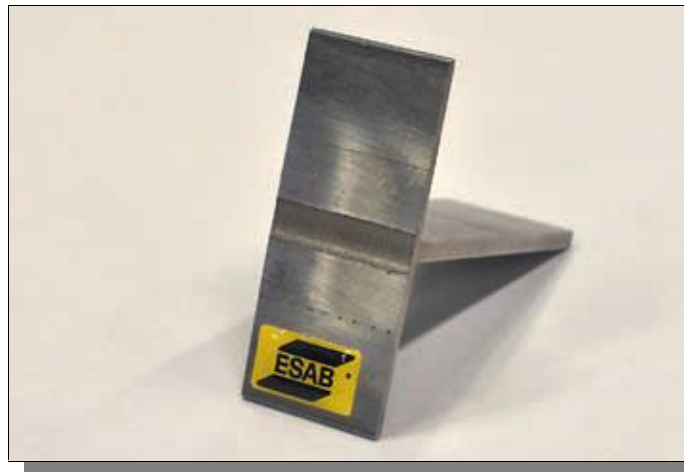
*Slika 3.10 Pojednostavljeni prikaz formiranja T-spoja FSW postupkom pozicioniranja alata i komponenti spoja (oplate i uzdužnik)
(Ilustracija preuzeta iz [28] i modifikovana)*



*Slika 3.11 3D model alata za FSW
(Ilustracija preuzeta iz [29])*

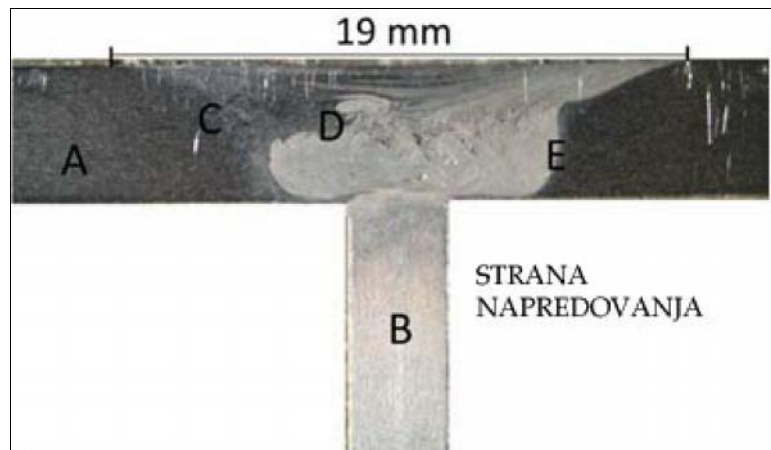


*Slika 3.12 Zaobljenje u korenu kod T-spoja dobijenog FSW postupkom
(Ilustracija preuzeta iz [24])*



*Slika 3.13 T-spoj dobijenog FSW postupkom
(Ilustracija preuzeta iz [24])*

Na slici 3.14 je prikazan mikrografski snimak T-spoja dve različite legure aluminijuma: 6056-T4 i 7075-T6. Oštru granicu između zona je nemoguće definisati, jer postoje kontinuirani prelazi. Ipak mogu se uočiti izvesne zone u spoju. Moguće je uočiti nesimetričnost spoja, strane napredovanja u odnosu na povratnu stranu.



Slika 3.14 Mikrostruktura poprečnog preseka kod T-spoja, pri spajanju legura aluminijuma: 6056-T4 i 7075-T6

(Ilustracija preuzeta iz [30] i modifikovana)

- A-osnovni materijal 1
- B- osnovni materijal 1
- C – ZTMU/ZUT na povratnoj strani spoja
- D- jezgro
- E – ZTMU/ZUT na strani napredovanja

3.6. Svojstva legure 2024-T351

Komercijalni naziv aluminijumske legure 2024-T351 je duraluminijum. Kao legirajući element korišćen je bakar, što joj daje čvrstoću. Iz tog razloga, ova legura je značajna u industrijskoj primeni i to kod konstrukcija kod kojih je efikasnost spoja na visokom nivou. U ovoj leguri su prisutne niže vrednosti zaostalih napona.

Legura spada u grupu termički obradivih legura, koje otvrdnjavaju starenjem. Toplotno se tretira u rastvoru sa prirodnim dozrevanjem, do dostizanja potrebnih mehaničkih karakteristika. Posle nekoliko dana, nakon homogenizovanog (rastvornog) žarenja, kaljenja i starenja, dostiže najveću zateznu čvrstoću- σ_m . U meko stanje može da se prevede naknadnim žarenjem, dok se ponovnim kaljenjem i starenjem dovodi u tvrdo stanje.

Koristi se za izradu: krila aviona, zupčanika i vratila, delova sata, delova personalnih računara, za kućišta hidrauličnih ventila, tela projektila, klipova, pužnih prenosnika i sl.

U tabeli 3.1 je prikazan hemijski sastav legure.

Tabela 3.1 Hemijski sastav legure aluminijuma 2024-T351

(podaci preuzeti iz [31])

legirajući element	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	ostali elementi
udeo [%]	90.7-94.7	max 0.1	3.8-4.9	max 0.5	1.2-1.8	0.3-0.9	max 0.5	max 0.15	max 0.25	max 0.15

U tabeli 3.2 su date mehaničke karakteristike legure.

Tabela 3.2 Mehaničke karakteristike legure aluminijuma 2024-T351

(podaci preuzeti iz [31])

Fizičke karakteristike	
gustina	$2780 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Mehaničke karakteristike	
tvrdća (Brinell)	120
tvrdća (Knoop)	150
tvrdća (Rockwell A)	46.8
tvrdća (Rockwell B)	75
tvrdća (Vickers)	137
zatezna čvrstoća	469 MPa
napon na granici tečenja	324 MPa
Young-ov moduo elastičnosti	73.1 GPa
Poisson-ov koeficijent	0.33
žilavost loma	$(26 - 37) \text{MPa} \sqrt{\text{m}}$

3.7. Svojstva zavarenog spoja legure 2024-T351 dobijenog FSW postupkom

Najznačajnije područje primene mehanike loma jeste upravo analiza nosivosti i sigurnosti zavarenih spojeva ([1]). U zavarenim spojevima veoma često je prisustvo grešaka-prslina, čiji dalji rast može dovesti do delimičnog ili totalnog gubitka nosivosti konstrukcije. Upravo iz tog razloga, velika se pažnja

posvećuje proceni integriteta konstrukcija, koja se bazira na detaljnoj analizi elasto-plastične mehanike loma. Ovakva analiza je prilično složena, kako zbog geometrijskih nesavršenosti, tako i zbog heterogenosti strukture i karakteristika zavarenog spoja, ali i zbog pojave i uticaja zaostalih napona. U ovom radu dat je model konstrukcije sa spojem dobijenim frikcionim zavarivanjem mešanjem. Geometrijske mere i mehaničke karakteristike spoja su korišćene iz rada [32], što je priloženo u daljem tekstu. Uticaj heterogenosti materijala u spoju prvenstveno se odražava na otpornost materijala na rast prslina (žilavost loma), dok mismečing utiče na silu rasta prslina.

Karakteristike zavarenog spoja aluminijumske legure 2024-T351 posebno su obrađene u radovima: [33]-[45].

3.7.1. Mismečing

U zavarenom spoju, dolazi do nastanka različitih zona, koje se međusobno razlikuju po mehaničkim svojstvima. Dakle, predmet mnogobrojnih ispitivanja, kako numeričkih tako i eksperimentalnih, je bilo upravo istraživanje uticaja različitih čvstoća u zavarenom spoju. Kao mera mehaničkih nehomogenosti koristi se tzv. mismečing:

$$M = \frac{\dagger_{tV}}{\dagger_{tOM}} \quad (3.1)$$

gde su:

\dagger_{tV} -napon tečenja vara

\dagger_{tOM} -napon tečenja osnovnog materijala

Ukoliko je:

$M > 1$ -overmečing (OVM)

$M < 1$ -andermečing (ANM)

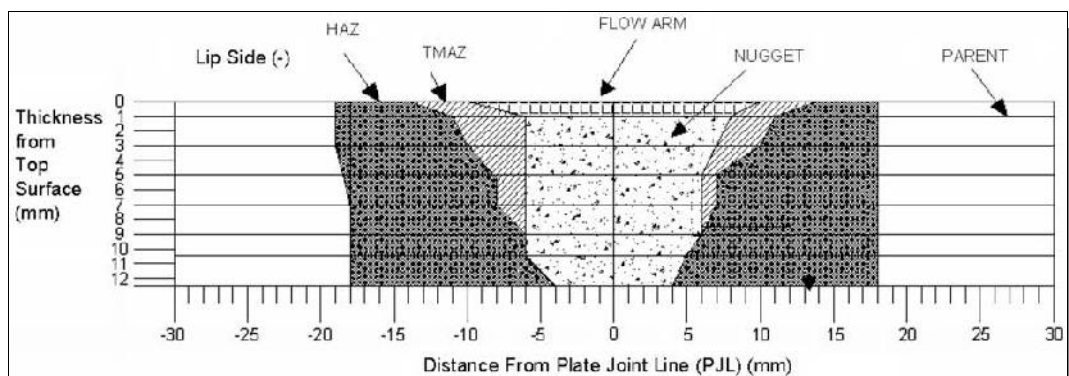
U slučaju OVM plastična zona se razvija u osnovnom materijalu (OM), što je na neki način bolja varijanta, jer osnovni material ima manje grešaka (prslina) u strukturi. Kod ANM, što je upravo slučaj kod spojeva dobijenih frikcionim zavarivanjem mešanjem, prslina se javlja u zoni vara i to u zoni termo-mehaničkog uticaja (ZTMU).

Upravo uticaj mismečinga na ponašanje zavarenog spoja je od izuzetnog značaja, kako u klasičnoj projektantskoj analizi (bez prisustva prslina), tako i u

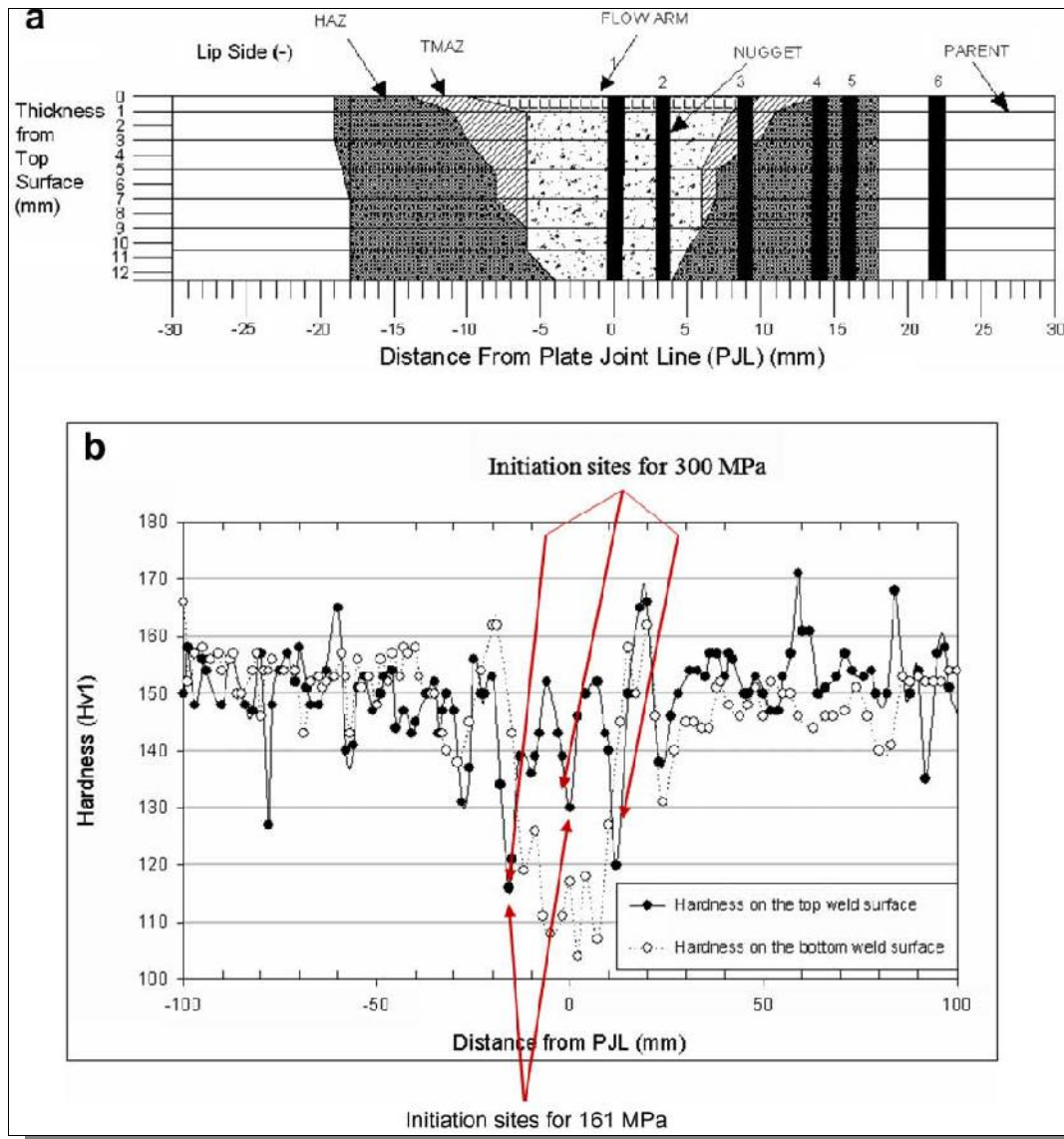
proceni integriteta konstrukcija uz prisustvo prslina pod dejstvom zamornog opterećenja. U ovom radu dat je akcenat na tankozidne strukture spojene frikcionim zavarivanjem mešanjem, prvenstveno od legure aluminijuma: 2024-T351.

3.7.2. Mehanička svojstva FSW spoja

Na slici 3.15 prikazano je definisanje zona u okviru FSW spoja. Oštru granicu između zona je teško odrediti.



Slika 3.15 Poprečni presek spoja dobijenog frikcionim zavarivanjem mešanjem (FSW) dve ploče od aluminijumske legure 2024-T351 (ilustracija preuzeta iz [47])



Slika 3.16 a) Merenje tvrdoće na 6 pozicija
 b) promena tvrdoće duž FSW zona u 2024-T351 leguri aluminijuma
 (ilustracija preuzeta iz [47])

Na slici 3.16 data je raspodela izmerene tvrdoće duž zona u zavarenom spoju. Na osnovu izmerene tvrdoće, za procenu lokalne vrednosti napona tečenje može se koristiti sledeća relacija ([1], prema standardu BS 7448, deo 2.):

$$\tau_t = 3.15HV - 168 \quad [MPa] \quad (3.2)$$

Tabela 3.3 Karakteristike materijala u FSW zonama kod Al legure 2024-T351
(tabela preuzeta iz [32] i modifikovana)

FSW zone	grumen	ZTMU	ZUT	OM
Young-ov moduo elastičnosti - E [MPa]	68 000	68 000	68 000	68 000
Poisson-ov koeficijent- ϵ	0.33	0.33	0.33	0.33
napon na granici tečenja- \dagger_t [MPa]	350	272	448	370
bezdimenziona konstanta- r (jednačina 3.3)	-	800	719	770
eksponent deformacionog ojačavanja- n (jednačina 3.3)	-	0.1266	0.05546	0.086
tvrdoća-HV	142	118	167	132
zaostali naponi - [MPa]	-41	95	-20	0

$$\dagger = k \cdot v^n \quad (3.3)$$

r -konstanta deformacionog ojačavanja

n -eksponent deformacionog ojačavanja

Na osnovu izmerenih veličina (tabela 3.3) može se uočiti da su vrednosti Young-ovog modula elastičnosti (E), kao i Poisson-ovog koeficijenta (ϵ) iste u svim zonama spoja, dok su vrednosti napona na granici tečenja (\dagger_t) različite. Najniže vrednosti su zastupljen u zoni termo-mehaničkog uticaja, što je posledica mehaničkih i termičkih promena koje su se odigrale u samom materijalu. Za očekivati je da se prslina javi u ovoj zoni, što je i ustanovljeno na osnovu eksperimenta koji je obavljen od strane A.F. Golestaneh-a, A. Ali-ja i drugih ([32]).

Tabela 3.4 Podaci napon-relativna deformacija $\uparrow -v$ u FSW zonama kod Al legure 2024-T351

(tabela preuzeta iz [32] i modificovana)

grumen		ZTMU		ZUT		OM	
\uparrow [MPa]	v [-]	\uparrow [MPa]	v [-]	\uparrow [MPa]	v [-]	\uparrow [MPa]	v [-]
30.43	0.00044	50.34	0.00070	25	0.00040	20	0.0003
51.30	0.00080	75.86	0.00123	35	0.00060	40	0.0006
69.56	0.00120	106.90	0.00160	58	0.00100	45	0.0009
91.30	0.00150	131.03	0.00200	83	0.00126	90	0.0014
130.43	0.00210	186.21	0.00310	95	0.00150	125	0.0021
186.95	0.00320	268.96	0.00450	130	0.00200	220	0.0034
286.96	0.00430	331.03	0.00570	175	0.00280	300	0.0050
331.91	0.00550			280	0.00438	320	0.0058
				330	0.00558	440	0.0084
				480	0.00898	487	0.0120
				540	0.01166		

Tabela 3.5 Konstante u Paris-ovoj jednačini određene od strane: Bussu-ja i Irvin-a (2003), Ali-ja i dr. (2008) i regresionog proračuna u FSW zonama kod Al 2024-T351

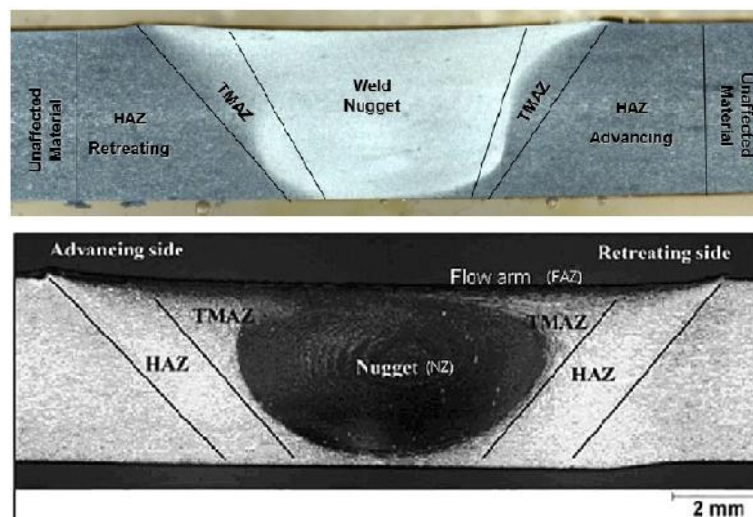
(tabela preuzeta iz [32] i modificovana)

FSW zone	Paris-ov model	Bussu-Irvin-ov eksperiment	Ali-jev eksperiment	regresioni proračun
grumen	$C [\text{broj ciklusa}]^{-1}$	$2.02345 \cdot 10^{-10}$	$2.02345 \cdot 10^{-10}$	$2.8338 \cdot 10^{-12}$
	n	3.106	2.94	3.80
ZTMU	$C [\text{broj ciklusa}]^{-1}$	$3.987 \cdot 10^{-10}$	$2.02345 \cdot 10^{-10}$	$5.5837 \cdot 10^{-12}$
	n	2.254	2.94	2.76
ZUT	$C [\text{broj ciklusa}]^{-1}$	$8.41 \cdot 10^{-11}$	$2.02345 \cdot 10^{-10}$	$1.1778 \cdot 10^{-12}$
	n	2.28	2.94	2.79
OM	$C [\text{broj ciklusa}]^{-1}$	$2.035 \cdot 10^{-10}$	$2.02345 \cdot 10^{-10}$	$1.1778 \cdot 10^{-12}$
	n	2.4	2.94	2.94

3.8. Modeliranje FSW spoja

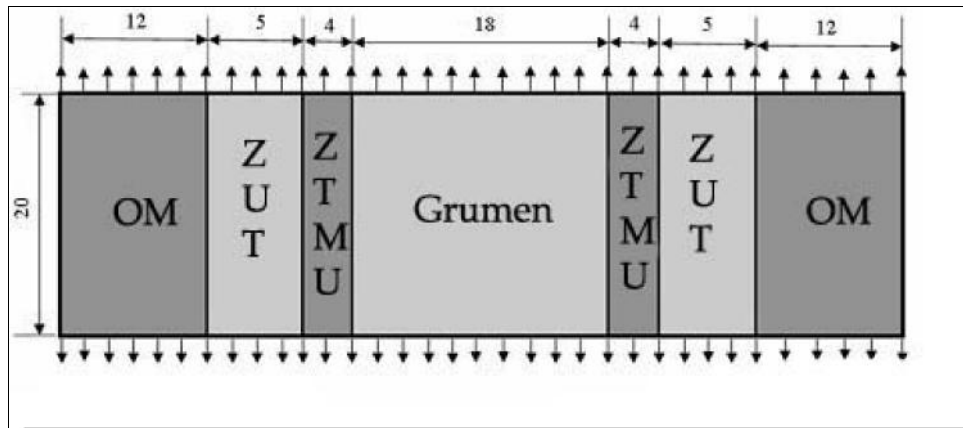
Na slici 3.17 su data dva metalografska snimka FSW spoja dve sučeono zavarene ploče. Na snimku se jasno uočavaju gore opisane zone: grumen ili jezgro (*Weld Nugget=Nuggat zone*), zona termo-mehaničkog uticaja-ZTMU (*Thermo-mechanically affected zone-TMAZ*), zona uticaja temperature-ZUT (*Heat affected zone-HAZ*) i osnovni materija-OM (*Unaffected material=base material=parent material-PM*).

U okviru ZUT-a (*HAZ*) javlja se asimetričnost (u odnosu na liniju spoja) u povratnoj strani u odnosu na stranu napredovanja. Različitost se ogleda u geometriji samih zona (mere i oblik) kao i mehaničkim svojstvima materijala.



Slika 3.17 Metalografski prikazi FSW spoja kod legure 2024-T351 Al
(ilustracije preuzete iz [14], odnosno [32])

Prilikom modeliranja FSW spoja, izvršeno je pojednostavljenja realnog spoja na 2D model. Definisane su zone: dimenziono, oblikovno, a takođe su unete karakteristike materijala za svaku zonu ponaosob. Korišćeni su rezultati ispitivanja dobijeni u radu [32] i prikazani u okviru tabela 3.2 i 3.3.



*Slika 3.18 2D model FSW spoja
(ilustracija preuzeta iz [47] i modifikovana)*

4. PROŠIRENA METODA KONAČNIH ELEMENATA (PMKE)

X-FEM (Extended Finite Element Method)

4.1. Uvod [48]

Primena metode konačnih elemenata-MKE (*FEM-Finite Element Method*) je od posebne važnosti u oblasti mehanike loma. Ova metoda je dala svoj značajan doprinos kod projektovanja nosećih elemenata složenih geometrijskih formi. Moguće je odrediti radni vek konstrukcije na osnovu unapred definisane geometrije konstrukcije, mehaničkih karakteristika primenjenog materijala (u ovom slučaju zona u varu), položaja, geometrije i dimenzije inicijalne prsline. Modeliranje prsline korišćenjem konvencionalne metode konačnih elemenata je precizno, ali prilično problematično sa aspekta modeliranja prsline koja se širi u strukturi. Svaki novi front prsline iziskuje generisanje nove mreže konačnih elemenata, što izuzetno komplikuje već prilično složenu postojeću strukturu mreže. Dakle, potrebno je ponovno generisanje mreže u okolini vrha prsline, kao i njeno usitnjavanje kako bi se dobili što precizniji rezultati. Redefinisanje mreže se vrši od strane korisnika samog *software-a*, što u značajnoj meri iziskuje visok nivo profesionalizma samog projektanta u procesu formiranja mreže.

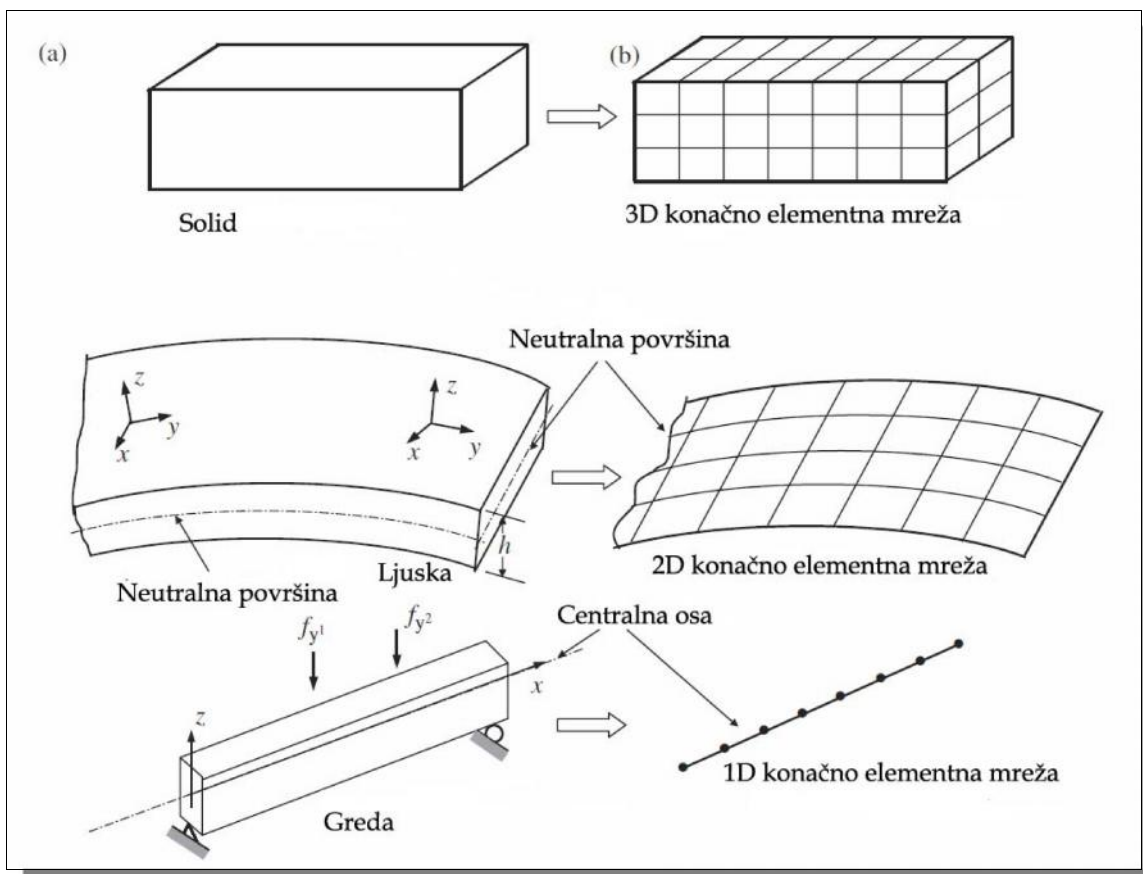
Međutim, pojava nove metode tzv. proširene metode konačnih elemenata-PMKE (*XFEM-Extended Finite Element Method*), daje revolucionarne rezultate u rešavanju ovakvih problema. Metod pojednostavljuje prikaz prsline, pojednostavljenjem mreže konačnih elemenata u okolini prsline, obezbeđujući nezavisnost mreže od ostatka geometrije. Korisnik formira mrežu na ispitivanom 3D modelu, a potom uvodi inicijalne prsline u strukturu (i definisanje svih neophodnih parametara). Pri svakom formiranju novog fronta prsline, program automatski generiše novu konačno-elementnu mrežu.

Dakle, potrebno je prvo odrediti naponsko stanje strukture pod dejstvom spoljašnjeg opterećenja (uz adekvatno definisane granične uslove), a potom definisati poziciju, oblik i geometriju prsline. Na osnovu toga moguće je odrediti parametre mehanike loma: faktore intenziteta napona- K_I , K_{II} i K_{III} , odnosno J -integrale.

Proces simulacije rasta prsline u strukturi je baziran na tzv. inkrementalnom postupku, tj. sastoji se iz niza koraka. U svakom koraku se proračunavaju tekući parametri za tekuću dužinu prsline. U narednom koraku, korišćenjem podataka iz prethodnog koraka generišu se nove vrednosti parametara mehanike loma.

Proširena metoda konačnih elemenata (*XFEM*) je inkorporirana u *software Abaqus* i omogućava analiziranje širenja 3D prsline u strukturi. Pri tome, obezbeđuje se širok dijapazon parametara, kao što su: različite tehnike izrade mreže, tip i veličina konačnog elementa (slika 4.1), pojednostavljenje modela u slučaju simetričnosti strukture, rad sa sklopovima, rad sa 2D modelima. Kao rezultat analize dobija se raspodela faktora intenziteta napona (ili J -integrala) duž fronta prsline, za svaki generisani front. Takođe, moguće je izračunavanje

radnog veka konstrukcije i prikaz rezultata u formi da/dN dijagrama, za različite vrednosti faktora asimetrije ciklusa- R .



Slika 4.1 Prikaz konačnih elemenata

4.2. Osnove proširene metode konačnih elemenata [49]

Modeliranje prslina u strukturi, primenom klasične metode konačnih elemenata, iziskuje poklapanje mreže konačnih elemenata sa geometrijom diskontinuiteta. Problem se usložnjava u slučaju modeliranja rasta prsline, koji zahteva sukcesivno generisanje mreže kako bi se pratila tekuća promena u strukturi (geometrijski diskontinuitet u prostoru).

XFEM omogućava modeliranje proizvoljnog oblika prsline. Pri simulaciji kvazistatičkog ili zamornog rasta prsline nije potrebno izvršiti promenu mreže oko same prsline, tokom njene progresije.

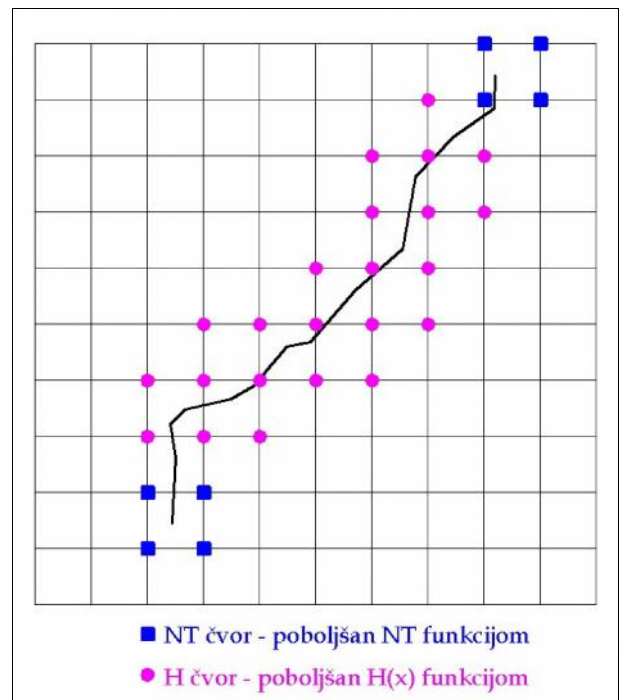
XFEM je zasnovana na:

- generisanju mreže konačnih elemenata, pri čemu diskontinuitet (prslina) nije uključen,

➤ korišćenju dodatnih funkcija za aproksimaciju diskontinuiteta, tj. pomeranja. Dodatne funkcije podrazumevaju skup funkcija poboljšanja. U analizi rasta prsline koriste se dva tipa funkcija poboljšanja:

- diskontinualna *Heaviside*-ova funkcija- $H(x)$, koja definiše polje pomeranja na stranama prsline,
- skup lineranih elastičnih asimptotskih funkcija pomeranja, koje opisuju polje pomeranja oko vrha prsline-tzv. *Near Tip* funkcije- NT .

Prslina se modelira na taj način što se onim čvorovima čiji su elementi presečeni prslinom, pridodaju novi stepeni slobode.



Slika 4.2 Čvorovi poboljšani NT i $H(x)$ funkcijama

Razlikuju se tri tipa čvora:

1. **K čvor** - ima 2 stepena slobode i koristi se kod onih konačnih elemenata koji nisu presečeni prslinom,
2. **H čvor** - čvor poboljšan *Heaviside*-ovom odskočnom funkcijom - $H(x)$. Primenjuje se na čvor samo ukoliko je bar jedan pripadajući element presečen prslinom (slika 4.2), a da se ni u jednom od njih ne nalazi vrh prsline. Ovaj tip čvora ima 4 stepena slobode.

3. NT čvor – čvor koji je poboljšán sa 4 funkcije asimptotskog polja pomeranja oko vrha prsline. NT čvorovi su čvorovi elementa u kome se nalazi vrh prsline i imaju 10 stepeni slobode.

4.3. Funkcije poboljšanja

4.3.1. Generalizovana Heaviside-ova funkcija- $H(x)$

Ukoliko se posmatra širenje prsline u 2D prostoru, položaj tačke u odnosu na prslinu se može definisati preko generalizovane odskočne Heaviside-ove funkcije (slika 4.3):

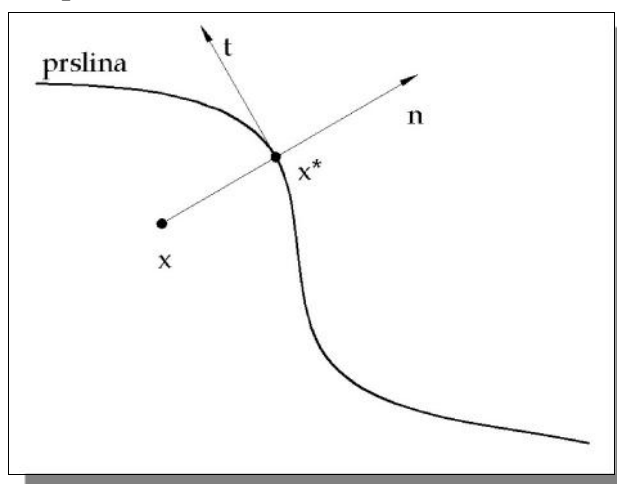
$$H(x) = \begin{cases} 1, & \text{ako je } (x - x^*) \cdot n \geq 0, \text{ tačka je iznad prsline} \\ -1, & \text{ako je } (x - x^*) \cdot n < 0, \text{ tačka je ispod prsline} \end{cases} \quad (4.1)$$

gde je:

n - spoljašnja jedinična normala

x - referentna tačka - čvor u kome se ne nalazi vrh prsline

x^* - presečna tačka prsline sa mrežom konačnih elemenata



Slika 4.3 Definisane položaja tačke u odnosu na prslinu

4.3.2. Funkcije asimptotskog polja pomeranja-NT funkcije

Prilikom modeliranja polja pomeranja u neposrednoj blizini vrha prsline koriste se funkcije poboljšanja:

➤ kod izotropnih-elastičnih materijala (*Fleming et al., 1997*), koriste se 4 funkcije poboljšanja:

$$\Psi(r, \theta) = [\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4] = \left[\sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta, \sqrt{r} \cos \theta \right] \quad (4.2)$$

➤ kod ortotropnih materijala (*Carlone et al., 2003; Ebrahimi, 2008; Mohammadi, 2008*), prisutno je 6 funkcija poboljšanja:

$$\begin{aligned} \Psi(r, \theta) &= [\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4, \Psi_5, \Psi_6] = \\ &= \left[\sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2} \sqrt{g_1(\theta)}, \sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2} \sqrt{g_1(\theta)}, \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2} \sqrt{g_2(\theta)}, \sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2} \sqrt{g_2(\theta)} \right] \end{aligned} \quad (4.3)$$

pri čemu su r i θ koordinate u lokalnom polarnom koordinatnom sistemu, sa koordinatnim početkom u vrhu prsline.

➤ kod elasto-plastične analize (*Mohammadi, 2008*) postoji takođe 6 funkcija:

$$\begin{aligned} \Psi(r, \theta) &= [\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4, \Psi_5, \Psi_6] = \\ &= r^{\frac{1}{n+1}} \left[\sin \frac{\theta}{2}, \cos \frac{\theta}{2}, \sin \frac{\theta}{2} \sin \theta, \cos \frac{\theta}{2} \sin \theta, \sin \frac{\theta}{2} \sin 2\theta, \cos \frac{\theta}{2} \sin 2\theta \right] \end{aligned} \quad (4.4)$$

ili

$$\begin{aligned} \Psi(r, \theta) &= [\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4, \Psi_5, \Psi_6] = \\ &= r^{\frac{1}{n+1}} \left[\sin \frac{\theta}{2}, \cos \frac{\theta}{2}, \sin \frac{\theta}{2} \sin \theta, \cos \frac{\theta}{2} \sin \theta, \sin \frac{\theta}{2} \sin 3\theta, \cos \frac{\theta}{2} \sin 3\theta \right] \end{aligned} \quad (4.5)$$

odnosno, kombinacijom prethodne dve varijante dobija se funkcija sa osam funkcija poboljšanja:

$$\begin{aligned} \Psi(r, \theta) &= [\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4, \Psi_5, \Psi_6, \Psi_7, \Psi_8] = \\ &= r^{\frac{1}{n+1}} \left[\begin{array}{l} \sin \frac{\theta}{2}, \cos \frac{\theta}{2}, \sin \frac{\theta}{2} \sin \theta, \cos \frac{\theta}{2} \sin \theta, \sin \frac{\theta}{2} \sin 2\theta, \cos \frac{\theta}{2} \sin 2\theta, \\ \sin \frac{\theta}{2} \sin 3\theta, \cos \frac{\theta}{2} \sin 3\theta \end{array} \right] \end{aligned} \quad (4.6)$$

4.4. Definisiranje polja pomeranja u XFEM-u

Gore navedene funkcije poboljšanja se uvode u aproksimaciju kod relativno malog broja konačnih elemenata, u odnosu na ceo domen. Dodatni stepeni slobode se primenjuju na sve konačne elemente koji sadrže diskontinuitet, ali ponekad i na susedne elemente.

Opšti oblik aproksimacije vektorske funkcije pomeranja, proširivanjem za funkcije poboljšanja, može se predstaviti sledećom jednačinom:

$$u^h(x) = \sum_{i=1}^n N_i(x) \left[\sum_{r=1}^m \Psi_r(x) a_i^r \right] \quad (4.7)$$

gde su:

$N_i(x)$ - interpolacione funkcije i -tog konačnog elementa ($i \in [1, n]$)

n - broj konačnih elemenata

$\Psi_r(x)$ - r -ta funkcija poboljšanja u i -tom čvoru ($r \in [1, m]$)

m - broj funkcija poboljšanja

a_i^r - dodatni stepeni slobode koji odgovaraju r -toj funkciji poboljšanja u i -tom čvoru

Ukoliko se vrši 2D modeliranje rasta prsline, aproksimacija pomeranja sa poboljšanjem može se prikazati u sledećoj formi (Moes et al., 1999):

$$u^h(x) = \sum_{i \in S_u} N_i(x) \left[\mathbf{u}_i + \underbrace{H(x) \mathbf{a}_i}_{i \in S_a} + \underbrace{\sum_{r=1}^4 \Psi_r(x) \mathbf{b}_i^a}_{i \in S_b} \right] \quad (4.8)$$

gde su:

\mathbf{u}_i - vektor pomeranja konačnog elementa,

\mathbf{a}_i - vektor čvornog pomeranja poboljšan *Heaviside*-ovom funkcijom

\mathbf{b}_i^a - vektor čvornog pomeranja poboljšan *NT* funkcijom

S_u - skup svih čvorova na konačnim elementima

S_a - skup čvorova na konačnim elementima presečenim prsline

S_b - skup svih čvorova na konačnim elementima koji sadrže vrh prsline

4.5. Opšti oblik proširene metode konačnih elemenata [16]

Jednačine pomeranja, dobijene u prethodnom poglavlju, mogu biti iskorišćene za vezu globalne matrice krutosti- K , matricu stepeni slobode u čvorovima- q i matricu primenjenih sila u čvorovima- f :

$$K \cdot q = f \quad (4.9)$$

Globalna matrica krutosti- K , može se prikazati na sledeći način:

$$K = \begin{bmatrix} K_{uu} & K_{ua} \\ K_{ua}^T & K_{aa} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

gde su:

K_{uu} - klasična matrica krutosti konačnih elemenata

K_{aa} - matrica krutosti „poboljšanih“ konačnih elemenata

K_{ua} - matrica sprege između klasičnih i „poboljšanih“ komponenti krutosti

Elementarna matrica- K_e za bilo koju matricu krutosti se može izračunati na osnovu jednačine:

$$K_e = \int_{\Omega^h} B_r^T C B_s d\Omega \quad r, s = u, a \quad (4.11)$$

pri čemu su:

C - konstitutivna matrica izotropnog linearnog elastičnog materijala

B_u - matrica izvoda klasičnih funkcija oblika

B_a - matrica izvoda poboljšanih funkcija oblika

Matrice B_u i B_a mogu se prikazati u opštem obliku:

$$B_u = \begin{bmatrix} N_{i,x} & 0 & 0 \\ 0 & N_{i,y} & 0 \\ 0 & 0 & N_{i,z} \\ 0 & N_{i,z} & N_{i,y} \\ N_{i,z} & 0 & N_{i,x} \\ N_{i,y} & N_{i,x} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$\mathbf{B}_a = \begin{bmatrix} (N_i \Psi_i^r)_{,x} & 0 & 0 \\ 0 & (N_i \Psi_i^r)_{,y} & 0 \\ 0 & 0 & (N_i \Psi_i^r)_{,z} \\ 0 & (N_i \Psi_i^r)_{,z} & (N_i \Psi_i^r)_{,y} \\ (N_i \Psi_i^r)_{,z} & 0 & N_{i,x} \\ (N_i \Psi_i^r)_{,y} & (N_i \Psi_i^r)_{,x} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

gde su:

$$N_{i,k} = \frac{\partial(N_i(x))}{\partial x_k} \quad (4.14)$$

$$(N_i \Psi_i^r)_{,k} = \frac{\partial(N_i(x) \Psi_i^r)}{\partial x_k} \quad (4.15)$$

$(N_i \Psi_i^r)_{,k}$ se može izraziti primenom izvoda proizvoda:

$$\frac{\partial(N_i(x) \Psi_i^r(x))}{\partial x_k} = \frac{\partial(N_i(x))}{\partial x_k} \Psi_i^r(x) + N_i(x) \frac{\partial(\Psi_i^r(x))}{\partial x_k} \quad (4.16)$$

Matrice \mathbf{q} i \mathbf{f} se mogu izraziti na sledeći način:

$$\mathbf{q}^T = \{\mathbf{u} \quad \mathbf{a}\}^T \quad (4.17)$$

$$\mathbf{f}^T = \{\mathbf{f}_u^T \quad \mathbf{f}_a^T\} \quad (4.18)$$

gde su:

\mathbf{u} i \mathbf{a} - vektori pomeranja klasičnih i dodatih stepeni slobode

\mathbf{f}_u i \mathbf{f}_a - vektori primenjenih sila klasičnih i poboljšanih komponenti aproksimacije pomeranja.

Korišćenjem funkcija poboljšanja, kao i dodatih stepeni slobode, moguće je izračunati vektore relativne deformacije i napona:

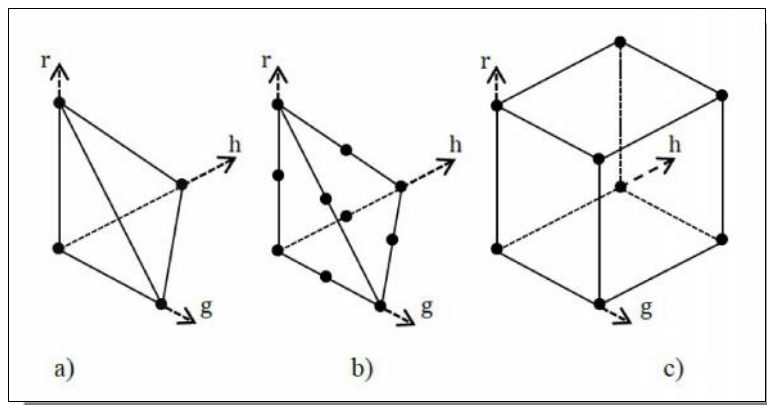
$$\boldsymbol{\varepsilon} = [\mathbf{B}_u \quad \mathbf{B}_a] \{\mathbf{u} \quad \mathbf{a}\}^T \quad (4.19)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \quad (4.20)$$

4.6. Primena XFEM-a u Abaqus-u

U Abaqus-u, kod XFEM simulacije, koriste se dva različita tipa elemenata [50]:

- tetraedarski (slika 4.4a) i 4.4b)) i
- heksaedarski (slika 4.4c))



Slika 4.4 Konačni elementi za XFEM

(ilustracija preuzeta iz [50])

Kod ova dva tipa konačnih elemenata, postoji interna podela i odnosi se na broj čvornih tačaka elementa, koji se koristi u numeričkim proračunima (aproksimacije prvog, odnosno drugog reda). Postoje dva podtipa konačnih elemenata: linearni i kvadratni.

Linearni tetraedarski elementi (C3D6) koriste samo jednu integracionu tačku, za razliku od tetraedarskih elemenata drugog reda koji za integraciju koriste 4 čvorne tačke (C3D10).

Heksaedarski elementi prvog reda (C3D8R) koriste jedan čvor, dok heksaedarski elementi drugog reda (C3D8) koriste 8 čvorova pri integraciji.

Integracija se odnosi na proračun matrice krutosti- C (jednačina 4.20).

4.7. Kriterijumi loma

U analizi rasta prslina, bitno je definisati kriterijume loma. Postoje 5 različitih kriterijuma loma:

1. kriterijum loma: kritični napon na određenom rastojanu od vrha prslina;

2. kriterijum loma: kritična vrednost otvaranja prsline-*COD* ;

3. kriterijum loma: zavisnost dužine prsline u funkciji od vremena- $a = f(t)$;

4. kriterijum loma: tehnika virtuelnog zatvaranja prsline (*VCCT-the Virtual Crack Closure Technique*) i

5. kriterijum loma: zavisnost $\frac{da}{dN}$ zasnovana na *Paris*-ovom zakonu.

U *Abaqus*-u se analizira tzv. kvazi-statički model prsline i njen dalji rast kod dvodimenzionih modela (ravanski ili osno-simetrični) za sve kriterijume loma i za trodimenzione modele (solid i ljske) ali samo po dva kriterijuma (*VCCT* i kriterijum $\frac{da}{dN}$ -nisko-ciklični zamor).

Koji kriterijum loma, od gore navedenih će se primenjivati, je objašnjeno u daljem tekstu.

Analiza propagacije prsline u strukturi je zasnovana na numeričkim metodama i njihovoj primeni na diskretizovanom kontinuumu. Dakle, sve potrebne veličine se proračunavaju u čvornim tačkama. Pri tome, od velikog je značaja precizno definisanje graničnih i početnih uslova. Dakle, do razdvajanja površina u okolini vrha prsline dolazi kada kriterijum loma- f prevazilazi vrednost 1, unutar unapred definisane tolerancije- f_{tol} :

$$1 - f_{tol} < f < 1 + f_{tol} \quad (4.21)$$

U okviru samog programa *Abaqus*, moguće je specificirati vrednost tolerancije- f_{tol} . Ukoliko je $f > 1 + f_{tol}$, ispunjen je kriterijum loma. Standardna vrednost za $f_{tol} = 0.1$ je kod prva tri kriterijuma loma, dok se vrednost $f_{tol} = 0.2$ usvaja kod preostala dva kriterijuma.

4.7.1. Kriterijum kritičnog napona- \dagger_{cr}

Ukoliko se kao kriterijum loma specificira kritični napon ispred vrha prsline, do razdvajanja površina (loma) će doći kada lokalni napon na određenom rastojanju ispred vrha prsline dostigne kritičnu vrednost.

Ovaj kriterijum se najčešće koristi kod krutih materijala.

Definiše se na sledeći načina:

$$f = \sqrt{\left(\frac{\dagger}{\dagger_f}\right)^2 + \left(\frac{\dagger_1}{\dagger_1^f}\right)^2 + \left(\frac{\dagger_2}{\dagger_2^f}\right)^2} \quad (4.22)$$

gde su:

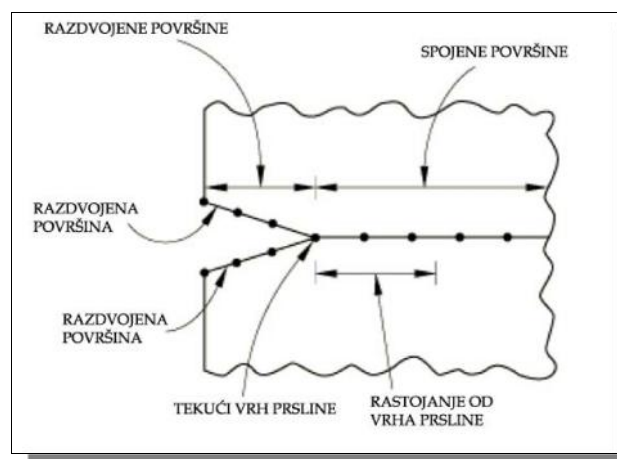
- \dagger - normalni napon
- \dagger_1 i \dagger_2 - tangencijalne komponente napona
- \dagger_f i \dagger_1^f - normalni i tangencijalni napon loma, koji se moraju unapred

specificirati (karakteristika materijala), odnosno kritične vrednosti normalnog i tangencijalnog napona

Kod dvodimenzionalne analize komponenta tangencijalnog napona- \dagger_2 nije značajna u proračunu, tako da se u tom slučaju vrednost \dagger_2^f ne mora definisati. Do razdvajanja površina dolazi kada kriterijum loma - f prevaziđe vrednost 1.

Ukoliko vrednost \dagger_1^f nije data, ili je izjednačena sa nulom, ne uzima se u obzir u proračunu, tj. nema uticaja na kriterijum loma.

Naponi na određenom rastojanju od vrha prsline se izračunavaju interpolacijom vrednosti u obližnjim čvorovima. Interpolacija zavisi od toga da li su primenjeni konačni elementi prvog ili drugog reda.



Slika 4.5 Definisavanje rastojanja od vrha prsline, kod kriterijuma kritičnog napona (ilustracija preuzeta iz [50] i modifikovana)

4.7.2. Kriterijum kritičnog otvaranja prsline-COD

Ukoliko se analiza rasta prsline zasniva na kriterijumu otvaranja vrha prsline, čvorovi u okolini vrha prsline će se razdvojiti kada vrednost otvaranja

prsline na određenom rastojanju iza vrha prsline prevaziđe kritičnu vrednost. Ovaj kriterijum se koristi kod duktilnih materijala.

Kriterijum kritičnog otvaranja prsline se definiše na sledeći način:

$$f = \frac{u}{u_c} \quad (4.23)$$

gde su:

- u -merena vrednost otvaranja prsline

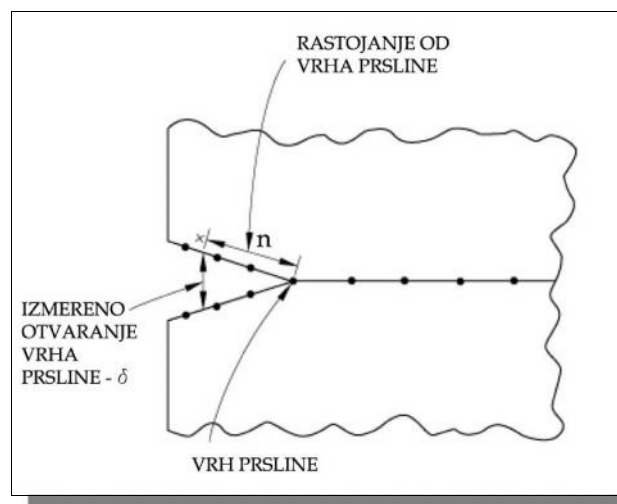
- u_c -kritična vrednost otvaranja vrha prsline (definisana od strane

korisnika)

Dakle, čvorovi u okolini vrha prsline će se razdvojiti ukoliko kriterijum loma- f pređe vrednost 1.

Ukupna dužina prsline se određuje kao rastojanje između vrha inicijalne prsline i tekućeg vrha prsline. Otvaranje prsline je rastojanje normalno na dve površine koje se razdvajaju na datom rastojanju.

Određivanjem rastojanja n iza vrha prsline, definiše se tačna pozicija na kojoj se vrši računanje kritičnog otvaranja prsline (slika 4.6).



Slika 4.6 Definisane rastojanja kod kriterijuma kritičnog otvaranja prsline (ilustracija preuzeta iz [50] i modifikovana)

Abaqus računa otvaranje vrha prsline interpolacijom vrednosti u okolnim čvorovima.

Kao i kod prethodnog kriterijuma, tačnost dobijenih rešenja zavisi od tipa elemenata (slika 4.4).

4.7.3. Kriterijum dužine prsline u zavisnosti od vremena- $a = f(t)$

Širenje prsline podrazumeva definisanje dužine prsline u funkciji od vremena od strane korisnika. Pri tome je potrebno definisati i referentnu tačku od koje će se meriti dužina prsline u deformisanoj konstrukciji.

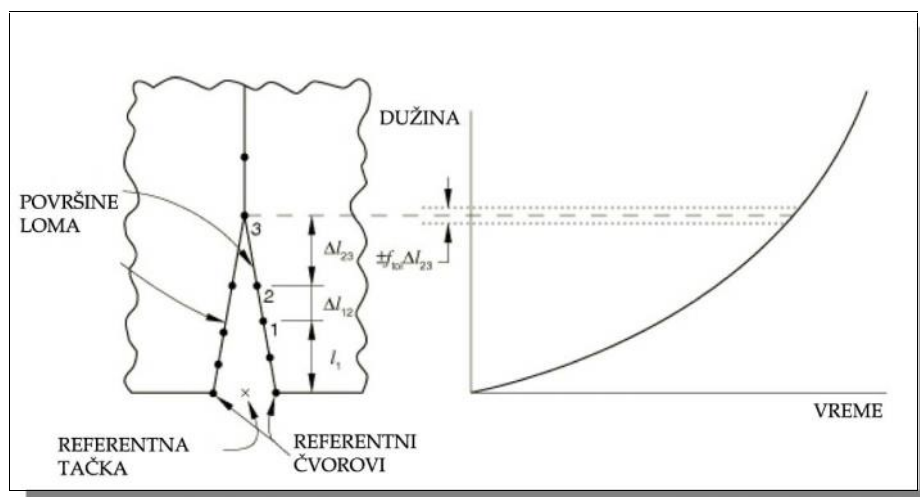
Pri definisanju kriterijuma loma- f , potrebno je odrediti dužinu tekuće prsline. Meri se od referentne tačke i predstavlja sumu pravih linija, tj. rastojanja od vrha inicijalne prsline do referentne tačke i rastojanja od vrha inicijalne prsline do vrha tekuće prsline.

Posmatrajući sliku 4.7, neka čvor 1 bude vrh inicijalne prsline, a čvor 3 vrh tekuće prsline. Rastojanje od vrha tekuće prsline je predstavljeno na sledeći način:

$$l_3 = l_1 + \Delta l_{12} + \Delta l_{23} \quad (4.24)$$

gde su:

- l_1 - dužina prave linije koja spaja čvor 1 i referentnu tačku
- Δl_{12} - rastojanje između čvorova 1 i 2
- Δl_{23} - rastojanje između čvorova 2 i 3



Slika 4.7 Rast prsline u funkciji od vremena
(ilustracija preuzeta iz [50] i modifikovana)

Kriterijum loma- f je dat:

$$f = \frac{l - (l_3 - \Delta l_{23})}{\Delta l_{23}} \quad (4.25)$$

pri čemu je:

- l - dužina prsline u datom trenutku- t (kriva definisana od strane korisnika)

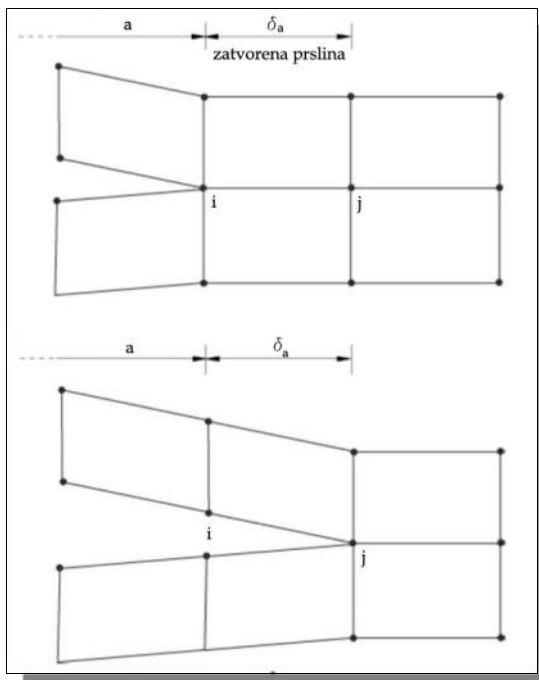
Vrh tekuće prsline-čvor 3 će se razdvojiti kada funkcija loma- f prevaziđe vrednost 1 (unutar gore navedene tolerancije- f_{tol} , definisane od strane korisnika).

Ukoliko se razmatra nelinearna mehanika loma, referentna tačka se može pomerati kako se konstrukcija deformiše, te je potrebno odrediti referentnu tačku tako da njena pomeranja neće imati uticaja na određivanje kriterijuma loma-dužine prsline u funkciji od vremena. *Abaqus* ne vrši ekstrapolaciju iza krajnjih tačaka datih podataka. Dakle, ako je prva dužina prsline veća od rastojanja od referentne tačke do prvog razdvojenog (otvorenog) čvora, prvi spojeni čvor se nikada neće razdvojiti, te neće doći do širenja prsline

4.7.4. Kriterijum-tehnika virtuelnog otvaranja prsline (VCCT-Virtual Crack Closure Technique criterion)

Kriterijum-tehnika virtuelnog zatvaranja prsline koristi principe linearno-elastične mehanike loma i koristi se kod problema kod kojih se javlja krt lom duž unapred definisane površine.

Tehnika virtuelnog zatvaranja prsline je zasnovana na pretpostavci da se energija deformacije oslobađa kada se prsline proširi za izvesnu meru i da je pri tome jednaka energiji potrebnoj za zatvaranje prsline za istu meru. Na slici 4.8 je dat primer koji ukazuje na sličnost između širenja prsline od čvora i do čvora j i zatvaranja prsline u čvoru j .



Slika 4.8 Energija koja se oslobađa pri širenju prsline jednaka je energiji potrebnoj za zatvaranje prsline
(ilustracija preuzeta iz [50] i modificovana)

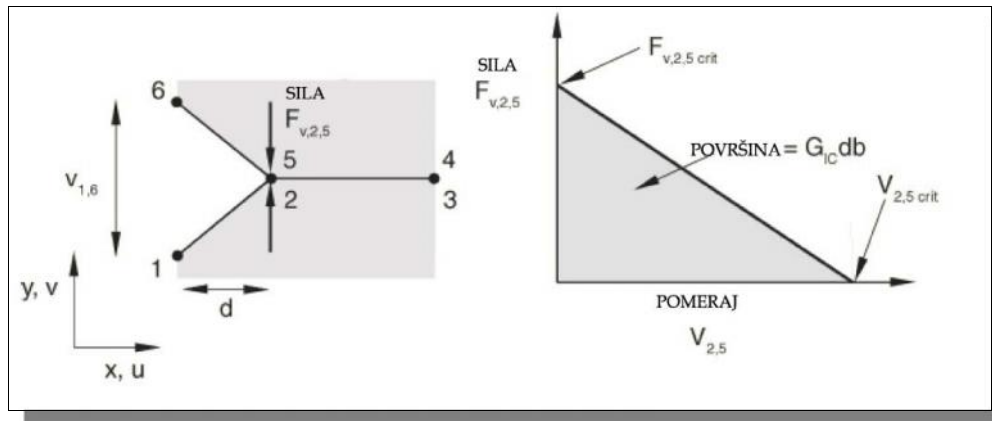
Na slici 4.9 čvorovi 2 i 5 će početi da se odvajaju kada:

$$f = \frac{G_I}{G_{IC}} = \frac{1}{2} \left(\frac{v_{1,6} F_{v,2v5}}{bd} \right) \frac{1}{G_{IC}} \geq 1 \quad (4.26)$$

pri čemu su:

- G_I - brzina oslobađanja energije (sila rasta prsline) za mod I,
- G_{IC} - kritična brzina oslobađanja energije za mod I,
- b - širina elementa na frontu prsline,
- d - dužina elementa na frontu prsline,
- $F_{v,2,5}$ - vertikalna sila između čvorova 2 i 5,
- $v_{1,6}$ - vertikalno pomeranje između čvorova 1 i 6.

Uz pretpostavku da se zatvaranje prsline odvija u linearno-elastičnoj oblasti, energija koja je potrebna da bi se prslina zatvorila (tj. energija koja se oslobađa pri rastu prsline) se računa iz prethodne jednačine. Slične jednačine se dobijaju za preostale modove (mod II i mod III).



Slika 4.9 Mod I

(ilustracija preuzeta iz [50] i modifikovana)

U opštem obliku, uključujući modove I, II i III, kriterijum loma bi glasio:

$$f = \frac{G_{ekv}}{G_{ekvC}} \geq 1 \quad (4.27)$$

gde su:

- G_{ekv} - ekvivalentna brzina oslobađanja energije u čvoru,
- G_{ekvC} - ekvivalentna kritična brzina oslobađanja energije.

Vrh prsline će se razdvojiti (rast prsline) ukoliko kriterijum loma- f pređe vrednost 1.

U *Abaqus*-u su date tri različite formule za proračun G_{ekvC} u slučaju kombinovanog moda:

- i. *BK* zakon,
- ii. *power* zakon
- iii. *Reeder-ov* zakon.

Izbor zakona od gore navedenih je zasnovan na iskustvu.

4.7.4.1. *BK* zakon

BK zakon je formulisan od strane *Benzeggagh*-a (1996) sledećom formulom:

$$G_{ekvC} = G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC}) \left(\frac{G_{II} + G_{III}}{G_I + G_{II} + G_{III}} \right)^y \quad (4.28)$$

Pri tome je potrebno obezbediti vrednosti G_{IC} , G_{IIC} i y . Ovaj model povezuje tri moda u jedan.

4.7.4.2. Power zakon

Power zakon je definisao Wu (1965) sledećom jednačinom:

$$\frac{G_{ekv}}{G_{ekvC}} = \left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^{a_m} + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^{a_n} + \left(\frac{G_{III}}{G_{IIIC}}\right)^{a_0} \quad (4.29)$$

Za definisanje ovog modela potrebno je unapred dati sledeće vrednosti: G_{IC} , G_{IIC} , G_{IIIC} , a_m , a_n i a_0 .

4.7.4.3. Reeder-ov zakon

Reeder-ov zakon je dao Reeder (2002) na sledeći način:

$$G_{ekvC} = G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC}) \left(\frac{G_{II} + G_{III}}{G_I + G_{II} + G_{III}}\right)^y + (G_{IIIC} - G_{IIC}) \left(\frac{G_{III}}{G_{II} + G_{III}}\right) \left(\frac{G_{II} + G_{III}}{G_I + G_{II} + G_{III}}\right)^y \quad (4.30)$$

Potrebno je unapred odrediti: G_{IC} , G_{IIC} , G_{IIIC} i y .

Ovaj zakon se primenjuje kada $G_{IIC} \neq G_{IIIC}$. U slučaju kada je $G_{IIC} = G_{IIIC}$, Reeder-ov zakona se redukuje na BK zakon. Dakle, Reeder-ov zakon se koristi kod trodimenzionih problema.

4.7.5. Kriterijum nisko-cikličnog zamora

Kriterijum nisko-cikličnog zamora se primenjuje isključivo kod nisko-cikličnih analiza. Početak rasta prsline je okarakterisan Paris-ovim zakonom, koji daje zavisnost sile rasta prsline- G i brzine rasta prsline- $\frac{da}{dN}$, kao što je prikazano na slici 4.10. Sile rasta prsline- G u okolini vrha prsline se računaju na bazi tehnike virtuelnog otvaranja prsline (*VCCT technique*).

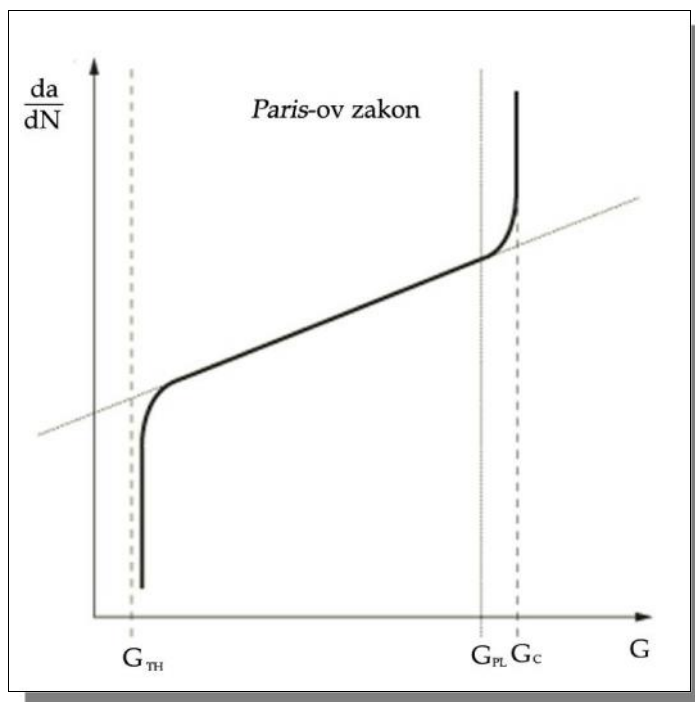
Paris-ova zakonitost je ograničena sa donje strane pragom sile rasta prsline- G_{TH} , ispod koje vrednosti nema inicijacije rasta prsline. Sa gornje strane javlja se limit G_{pl} , iznad čije vrednosti će doći do intenzivnog rasta prsline. G_C je ekvivalentna kritična sila rasta prsline za sva tri moda (ukoliko postoje).

Potrebno je definisati odnose:

$$\frac{G_{TH}}{G_C} = 0.01 \quad (4.31)$$

$$\frac{G_{pl}}{G_C} = 0.85 \quad (4.32)$$

Date vrednosti su standardne (u *Abaqus-u*).



Slika 4.10 Zamorni rast prsline definisan Paris-ovim zakonom (ilustracija preuzeta iz [50] i modifikovana)

4.7.5.1. Početak razdvajanja površina

Početak razdvajanja površina se vezuje za početak rasta prsline. Kod nisko-cikličnog zamora početak rasta prsline se povezuje sa ΔG , koji predstavlja razliku između sile rasta prsline kada je struktura maksimalno, odnosno minimalno opterećena.

Kriterijum loma, u tom slučaju se definiše na sledeći način:

$$f = \frac{N}{c_1 \Delta G^{c_2}} \geq 1 \quad (4.33)$$

pri čemu su:

- c_1 i c_2 - konstante materijala
- N - broj ciklusa opterećenja

Do razdvajanja konačnih elemenata u okolini vrha prsline neće doći sve dok se prethodna jednačina ne ispuni i ne dostigne maksimalna sila rasta prsline (oslobodi maksimalna brzina oslobađanja energije)- G_{\max} , kada je struktura opterećena maksimalnom vrednošću cikličnog opterećenja. Pri tome ta maksimalna vrednost je veća od praga- G_{TH} .

4.7.5.2. Zamorni rast prsline korišćenjem *Paris*-ovog zakona

Kada se jednom postigne kriterijum zamornog rasta prsline, brzina rasta prsline- $\frac{da}{dN}$ se može izračunati na bazi relativne brzine oslobađanja energije- ΔG . Brzina rasta prsline (promena dužine prsline po ciklusu opterećenja) je predstavljena *Paris*-ovim zakonom (pod uslovom da je ispunjeno: $G_{TH} < G_{\max} < G_{pl}$):

$$\frac{da}{dN} = c_3 \Delta G^{c_4} \quad (4.34)$$

gde su:

- c_3 i c_4 - konstante materijala
- N - broj ciklusa opterećenja

Abaqus povećava dužinu prsline- a_N , pri datom broju ciklusa opterećenja za inkrementalnan broj ciklusa- ΔN na dužinu prsline- $a_{N+\Delta N}$ odvajajući bar jedan element u okolini vrha prsline. Pošto su date konstante materijala- c_3 i c_4 , kao i čvorna rastojanja (u konačno-elementnoj mreži)- $\Delta a_{N_j} = a_{N+\Delta N} - a_N$ u okolini vrha prsline, na osnovu gore navedene jednačine, moguće je odrediti inkrementalni broj ciklusa opterećenja- ΔN_j koji može izazvati razdvajanje j -og čvora. Moguće je izračunati minimalan inkrement broja ciklusa opterećenja- $\Delta N_{\min} = \min(\Delta N_j)$, potreban za širenje prsline za dužinu jednaku dužini konačnog elementa- $\Delta a_{N_{\min}} = \min(\Delta a_{N_j})$. Nakon odvajanja konačnog elementa, dolazi do redistribucije opterećenja, te se nakon toga proračunava nova vrednost relativne brzine oslobađanja enerije- ΔG za novi element u okolini vrha prsline, za novi ciklus. Ako je $G_{\max} > G_{pl}$, elementi u okolini vrha prsline će se razdvojiti, jedan po jedan, pri povećanju broja ciklusa za vrednost- dN .

4.8. Nedostaci PMKE

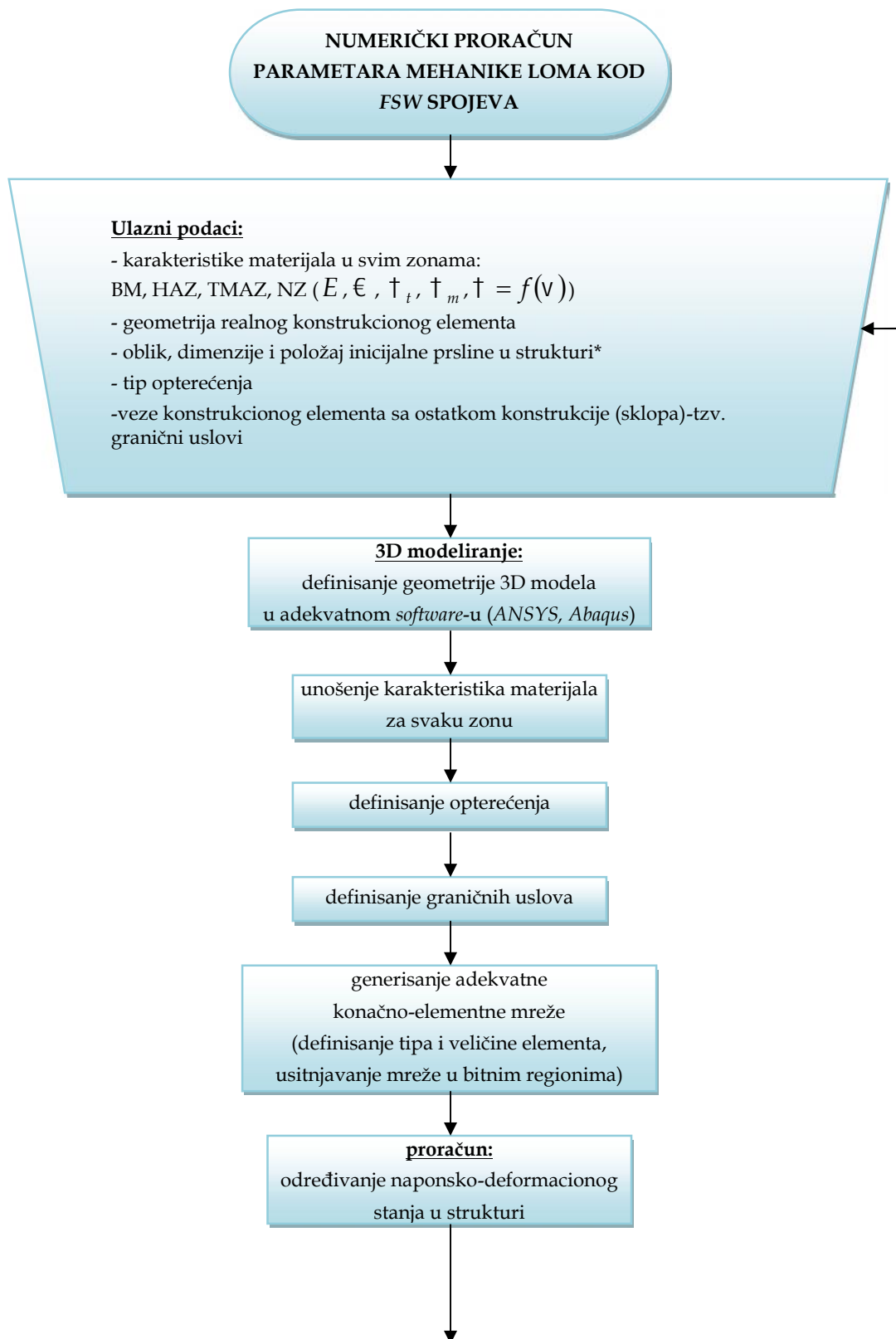
Nedostaci primenjene metode se ogledaju u sledećem:

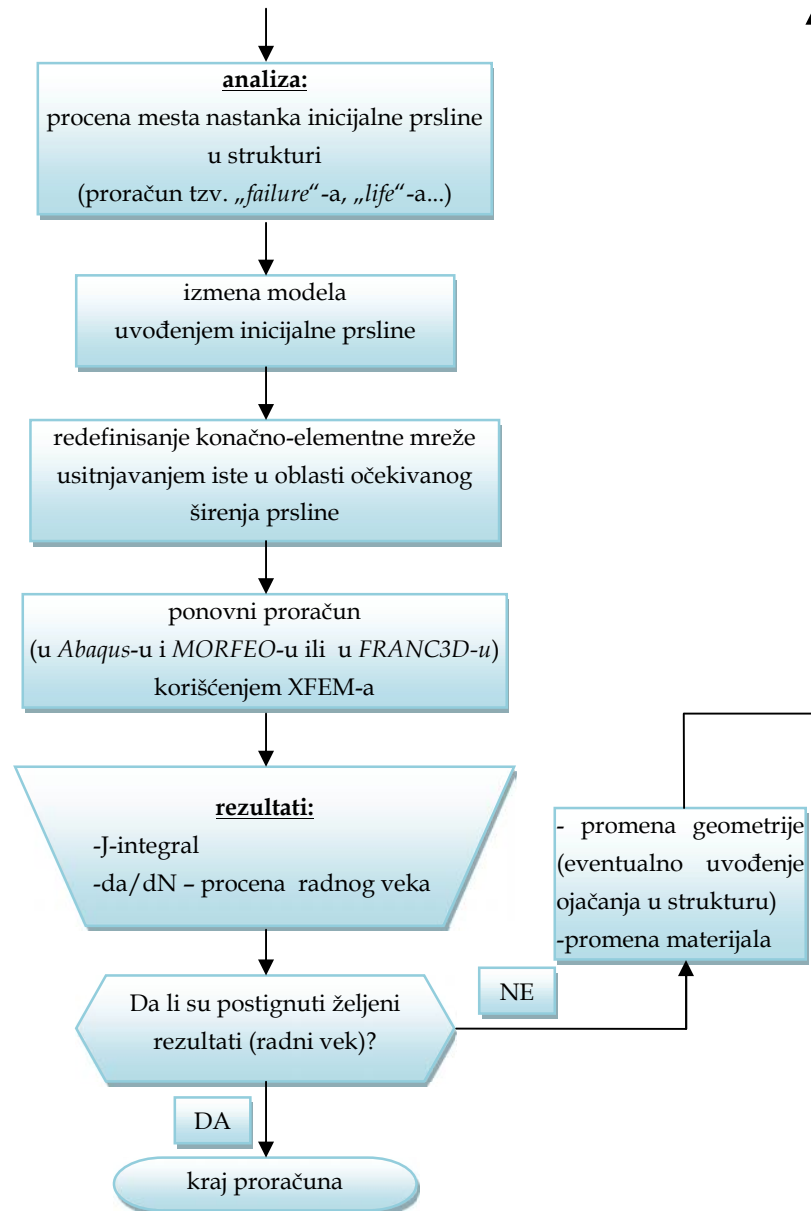
- I. tačnost rezultata je u tesnoj veza sa karakterom formirane konačno-elementne mreže. Dakle, tip elementa (tetraedarski ili heksaedarski) dimenzije konačnog elementa, kao i gustina mreže u određenim regionima konstrukcije u značajnoj meri će uticati na realizaciju proračuna. Upravo to zahteva visog nivo iskustvenog znanja iz oblasti generisanja konačno-elementne mreže.
- II. front prsline (sve čvorne tačke fronta prsline) u svakom trenutku njene progresije moraju istovremeno biti u okviru istog regiona, kako bi se omogućilo izračunavanje faktora intenziteta napona- K_I , odnosno J -integrala. Samim tim nastaje ograničenje u modeliranju konstrukcije (više regiona, tj materijala spojnih *FSW*-om) i u obliku prsline.
- III. U okviru *software*-a *Abaqus* ne postoji mogućnost dobijanja rezultata proračuna za svaki korak širenja prsline, već je za to potrebno koristiti druge *software* kao što je *Morfeo*.
- IV. Pri proračunu zamora konstante u *Paris*-ovoj jednačini se jednoznačno za celu konstrukciju, tj. iste su za svaki region. To znači da je nemoguće uneti različite koeficijente, ukoliko se proračun vrši za konstrukciju sačinjenu od različitih materijala sa različitim *Paris*-ovim koeficijentima.

NAPOMENA: Problematika primene *XFEM* u okviru *software*-a *Abaqus* posebno je obrađena u sledećim radovima: [52]-[59]. Stečena saznanja na bazi navedenih radova iskorišćena su u daljem radu (primena *XFEM*-a u *Abaqus*-u pri dobijanju relevantnih podataka proračuna analiziranih modela).

5. FSW MODELI

5.1. Algoritam proračuna





Slika 5.1 Algoritam numeričkog proračuna parametara mehanike loma kod FSW spojeva

*Inicijalna prslina može postojati u materijalu usled njegove nehomogenosti. Oblik, dimenzije i položaj prsline u konstrukcionom elementu se određuje NDM-nedestruktivnim metodama ispitivanja i detektuju se u strukturi pre uvođenja u operativnost. Međutim, prsline se u konstrukciji mogu javiti tokom eksploatacionog perioda na mestima sa povišenim naponom.

Na slici 5.1 dat je algoritam numeričkog proračuna parametara mehanike loma (faktora intenziteta napona: K_I , K_{II} , K_{III} , K_{ekv} , odnosno J -integrala), kao i

radnog veka, odnosno brzine širenja prsline- a u funkciji broja ciklusa primenjenog opterećenja- N ($a = f(N)$).

Proračun se satoji iz sledećih faza:

I faza: preliminarno definisanje geometrije konstrukcije, odnosno 3D modeliranje.

II faza: definisanje karakteristika materijala za svaku zonu: OM, ZUT, ZTMU i G. Unose se vrednosti E -Young-ovog modula elastičnosti, ϵ -Poisson-ovog koeficijenta, zavisnost napona- \dagger od relativne deformacije- v : $\dagger = f(v)$ (ova zavisnost se daje u formi tabele).

III faza: određivanje dejstvujućeg opterećenja (tip opterećenja, intenzitet i mesto dejstva)

IV faza: određivanje graničnih uslova, odnosno tipa (vrste) veze ispitivanog konstrukcionog elementa sa ostatkom sklopa (sa kojim čini funkcionalnu celinu).

V faza: preliminarni proračun (naponsko-deformaciono stanje za konstrukciju bez prsline) na bazi kojih se vrši procena kritičnih mesta za pojavu inicijalne prsline u strukturi. Na osnovu iskustva, potom se vrši definisanje veličine, položaja i oblika prsline. (Napomena: ukoliko konstruktor unapred poseduje informacije o mestu postojanja prsline pre eksploatacionog perioda (tzv. greške u materijalu) i/ili saznanje o potencijalnom mestu pojave prsline u strukturi (tzv. koncentratori napona) nije potrebno vršiti preliminarni proračun).

VI faza: novi proračun sa prslinom, pri čemu se dobijaju svi neophodni podaci potrebni za procena veka konstrukcije, odnosno određivanje stabilnosti širenja prsline.

VII faza: ukoliko dobijeni podaci ne zadovoljavaju sa aspekta sigurnosti („*fail safe*“) ili pouzdanosti („*safe life*“), konstruktor je prinuđen da primeni bar jednu od sledećih mera:

- izmena postojeće geometrije konstrukcije (ukoliko je to moguće sa aspekta sklopivosti),
- izrada konstrukcije od novog, kvalitetnijeg materijala,
- primena nove tehnologije spajanja (korišćenje nekog drugog postupka, kao što je *FSW*, kojim se postiže veći kvalitet spoja),

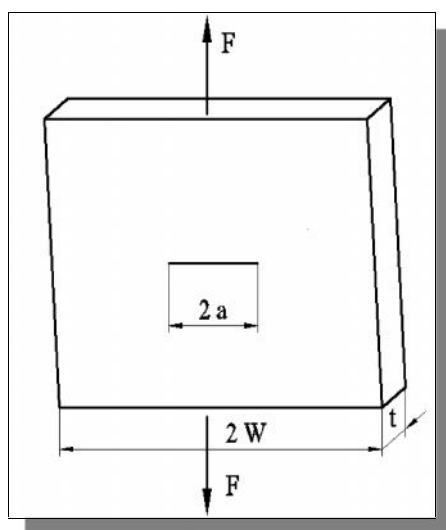
- primena adekvatnog tehnološkog postupka u cilju postizanja boljih karakteristika konstrukcionog elementa.

Dakle, celokupan algoritam se iterativno ponavlja dok god se ne dobiju željeni rezultati.

5.2. Proračunski modeli

5.2.1. Primer br.1: NEOJAČANA TANKOZIDNA PLOČA

Kao najjednostavniji primer proračuna izabran je model ploče dimezija 2x750x1120 mm (slika 5.1). U ploči je inicijalna prolazna prslina $2a_0 = 252\text{ mm}$, paralelna kraćoj strani ($2W = 750\text{ mm}$) i centrirana. Ploča je opterećena na zatezanje pri vrednosti adekvatnog zateznog napona $\dagger = -300\text{ MPa}$.



Slika 5.1 Primer prolazne prsline

geometrijske mere:

$$2a = 252\text{ mm}$$

$$2W = 750\text{ mm}$$

$$t = 2\text{ mm}$$

5.2.1.1. Teorija

Faktor intenziteta napona za mod I- K_I dobija se na osnovu sledeće jednačine (videti tabelu 2.2, tip 2):

$$K_I = \frac{F}{t \cdot W^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

pri čemu je:

$$F = \dagger \cdot 2Wt = 300 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot 2 \cdot 0.375 \text{ m} \cdot 0.002 \text{ m} = 450\,000 \text{ N} = 450 \text{ kN}$$

Parametar koji zavisi od dimenzija ploče, tipa i dimenzija inicijalne prsline, računa se na osnovu sledeće jednačine (videti tabelu 2.2, tip 2):

$$\begin{aligned} f\left(\frac{a}{W}\right) &= \sqrt{\frac{f a}{4W} \cdot \sec\left(\frac{f a}{2W}\right)} \cdot \left[1 - 0.025 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 0.06 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^4\right] = \\ &= \sqrt{\frac{f \cdot 0.126 \text{ m}}{4 \cdot 0.375 \text{ m}} \cdot \sec\left(\frac{f \cdot 0.126 \text{ m}}{2 \cdot 0.375 \text{ m}}\right)} \cdot \left[1 - 0.025 \cdot \left(\frac{0.126 \text{ m}}{0.375 \text{ m}}\right)^2 + 0.06 \cdot \left(\frac{0.126 \text{ m}}{0.375 \text{ m}}\right)^4\right] = \\ &= 0.5137 \cdot 0.9167 = 0.47096 \end{aligned}$$

Na osnovu gore izračunatih veličina, za faktor intenziteta napona- K_I , dobija se sledeća vrednost:

$$\begin{aligned} K_I &= \frac{F}{t \cdot W^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{450\,000 \text{ N}}{0.002 \text{ m} \cdot \sqrt{0.375 \text{ m}}} \cdot 0.47096 = \\ &= 172\,040\,823.616 \text{ Pa}\sqrt{\text{m}} = 172.04 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} = 5440.38 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}} \end{aligned}$$

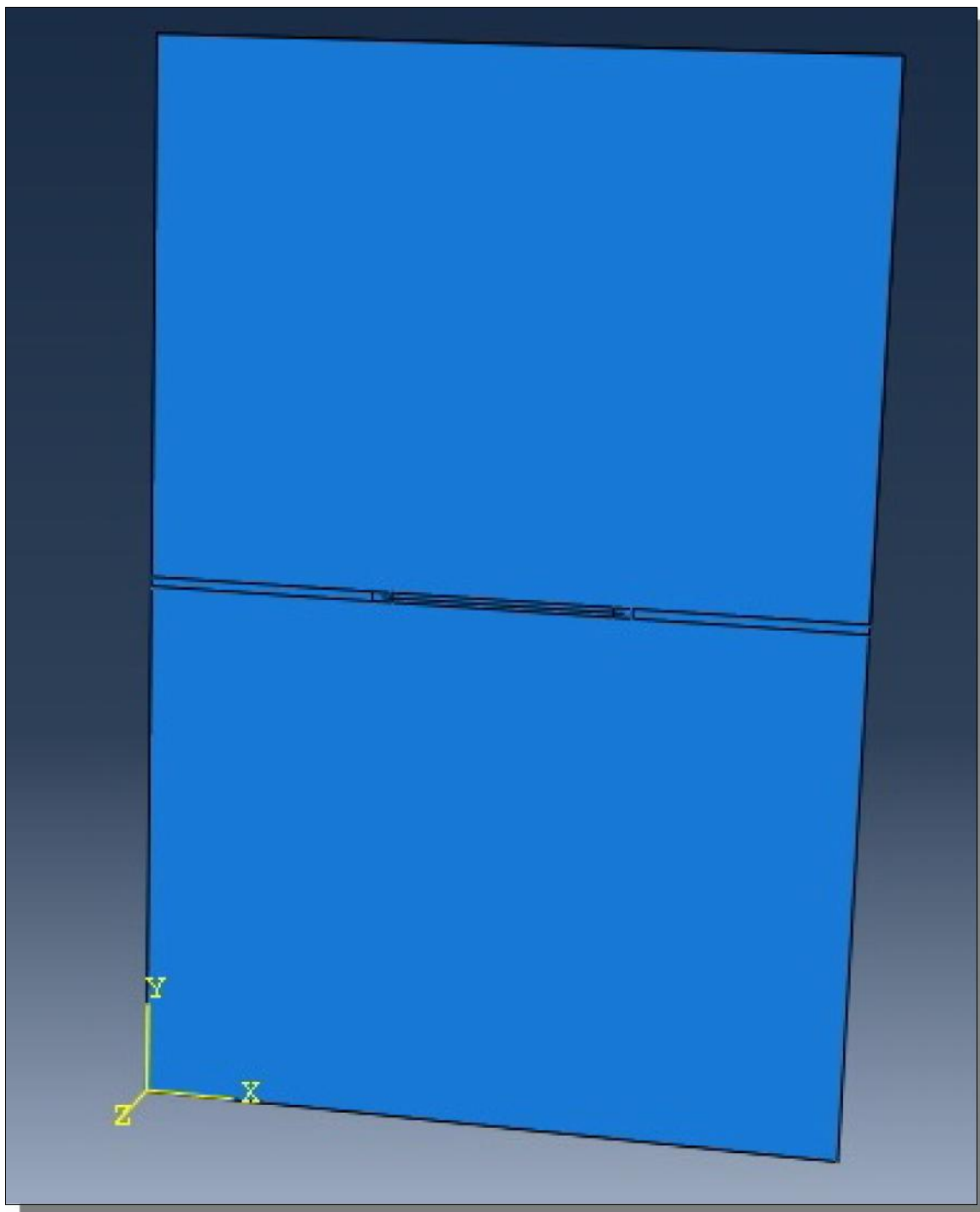
Dobijena vrednost $K_I = 5440.38 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ odgovara vrednosti faktora intenziteta napona u početnom trenutku (korak 0 – odmah nakon otvaranja prsline).

Napomena: teorijski podaci su izračunati za oblast linearno-elastične mehanike loma.

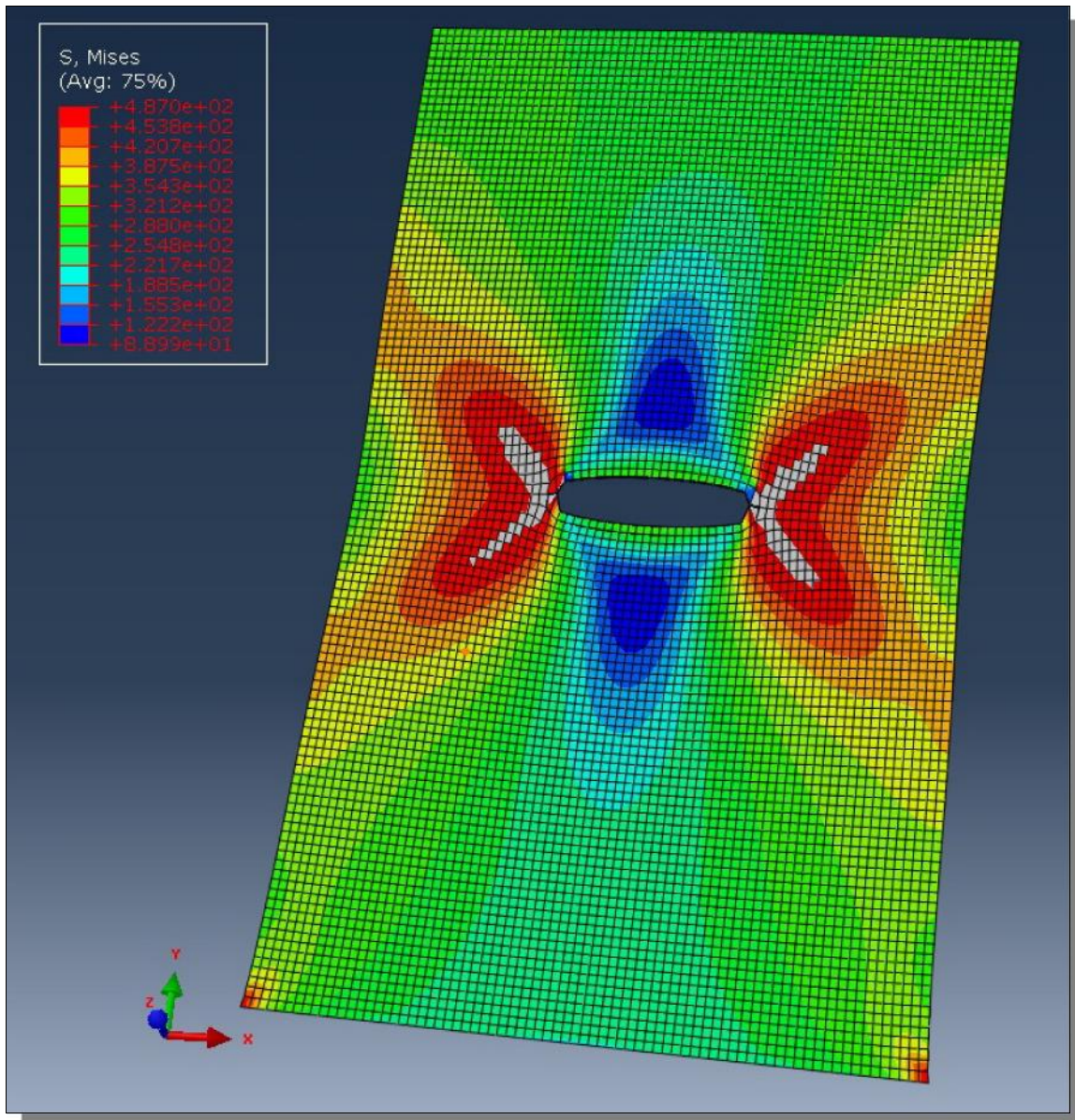
5.2.1.2. Proračun u *Abaqus/Morfeo-u*

U *Abaqus-u* je izmodelirana ploča sa prolaznom inicijalnom prslinom (slika 5.2). Uvedeno je opterećenje u strukturu duž kraće stranice. Na suprotnoj strani definisani su granični uslovi (uklještenje).

Konačna mreža je heksaedarska, ukoliko se radi naponsko-deformaciona analiza za statičku prslinu (slike 5.3 i 5.4).

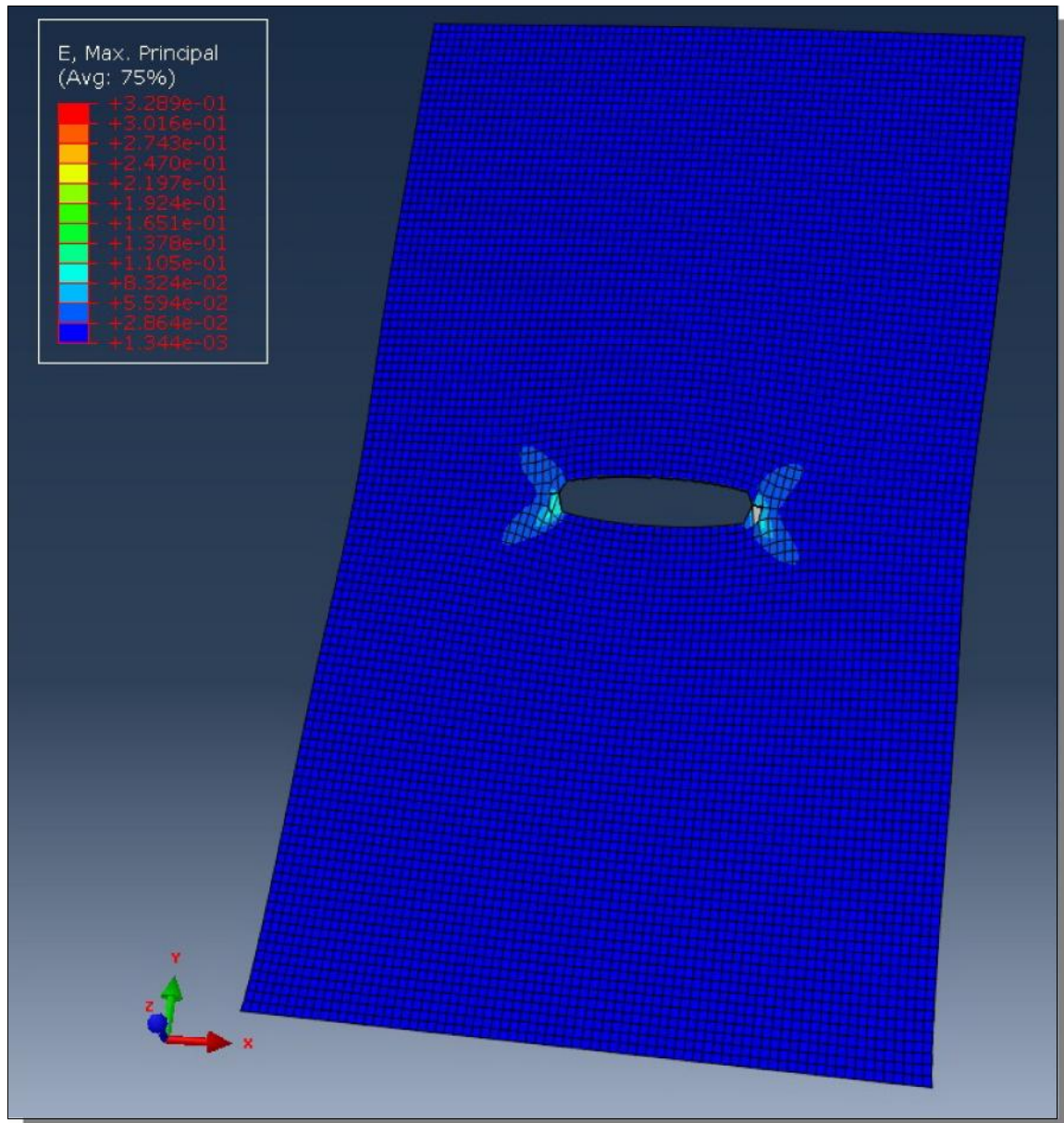


Slika 5.2 3D model neojačane tankozidne ploče



Slika 5.3 Raspodela Von Mises-ovih napona

Na slici 5.3 je prikazana raspodela *Von Mises* napona u ploči, pri čemu se maksimalne vrednosti javljaju upravo u okolini vrhova prsline. Maksimalna vrednosti napona $\tau_{\max} = 487 \text{ MPa}$ jeste maksimalna vrednost napona (napon popuštanja) definisana za dati materijal-leguru aluminijuma 2024-T351. Za elasto-plastičan materijal veza između napona- τ i relativne deformacije- v je data u formi $\tau = f(v)$ ili tabelarno (videti tabelu 3.2 za osnovni materijal-OM).

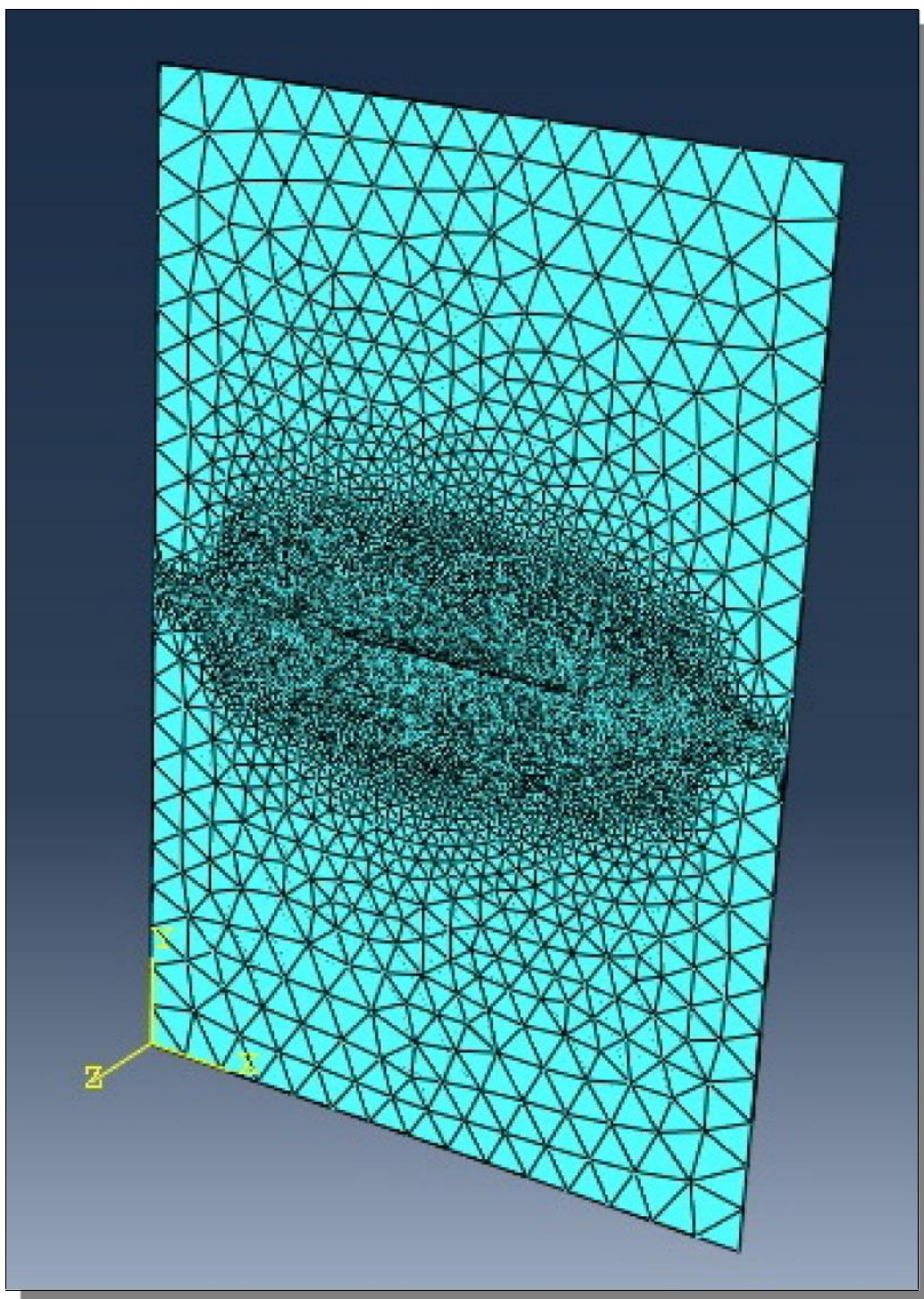


Slika 5.4 Raspodela relativnih deformacija

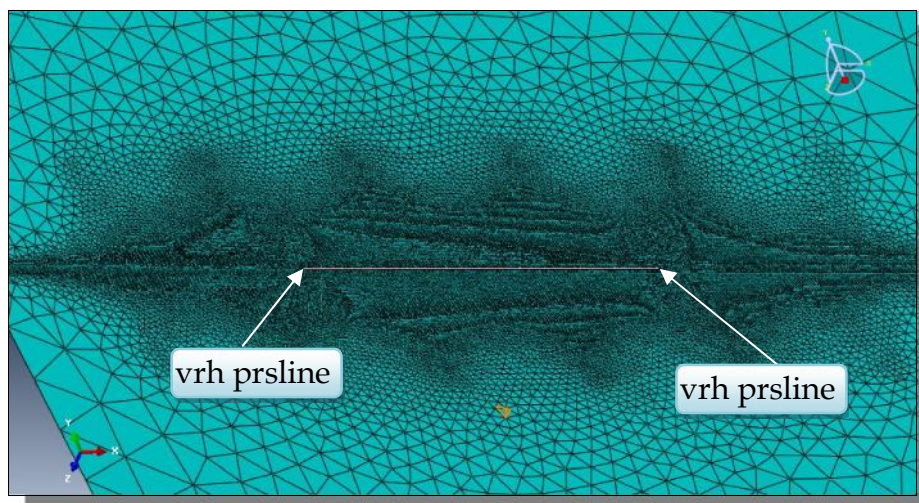
Na slici 5.4 je data raspodela relativne deformacije- v . Maksimalna deformacije konstrukcije se uočava u oblasti vrhova prsline.

Međutim, ukoliko se posmatra progresija prsline u strukturi, potrebno je generisati tetraedarsu mrežu, pri čemu se vrši dodatno usitnjavanje mreže u okolini vrha prsline (slika 5.5). Na slici 5.2 moguće je primetiti postojanje regiona u okolini vrha prsline i duž očekivanoj pravca širenja prsline. U toj oblasti vrši se dodatno usitnjavanje konačno-elementne mreže. Razlog tome je postizanje kvalitetnih rešenja (konvergencija rešenja).

Dalji proračun je izvršen primenom Proširene Metode Konačnih Elemenata-PMKE (*XFEM-eXtended Finite Element Method*), opisane u okviru poglavlja 4. Ova numerička metoda je inkorporirana u okviru *software-a Abaqus*, a primenjuje se upravo kod analize progresivne prsline. Pri tome se vrši automatsko generisanje mreže u okolini vrha prsline, pri svakom novom frontu prsline. Verifikacija PMKE-a je prezentovana u radu [16].



Slika 5.5-a Konačno-elementna mreža



Slika 5.5-b Konačno-elementna mreža-regija oko vrha prsline

Dalje su analizirana dva modela ploče:

1. u linearno-elastičnoj oblasti i
2. u elasto-plastičnoj oblasti.

Primenjeno je zamorno zatezno opterećenje, pri koeficijentu asimetrije ciklusa opterećenja $R = 0$.

5.2.1.2.1. Proračun za linearno-elastičnu oblast

Kao karakteristike materijala, koje se definišu u okviru 3D modeliranja ploče, dati su sledeći podaci: *Young-ov* moduo elastičnosti: $E = 68000\text{MPa}$ i *Poisson-ov* koeficijent: $\epsilon = 0.33$. Ovi podaci odgovaraju karakteristikama legure aluminijuma 2024-T351.

Kao rezultat proračuna date su vrednosti *Von Mises-ovih* napona ustrukturi-†, faktora intenziteta napona za sve modove- K_I , K_{II} , K_{III} i K_{ekv} za svaki korak proračuna. Pri tome je korišćen *software Morfeo*, koji omogućava prikaz numeričkih rezultata dobijenih na bazi PMKE u okviru *Abaqus-a*. Kao ulazne podatke zamornog proračuna, neophodno je definisati koeficijente u *Paris-ovoj* jednačini (2.115): eksponent- $n = 2.94$ i konstantu- $C = 2.02345 \cdot 10^6$, kao i maksimalnu promenu dužine prsline- Δa_{\max} za zadati broj koraka proračuna.

U tabeli 5.1, odnosno 5.2 su dati numerički podaci proračuna širenja prsline. Javlja se neznatna razlika u vrednostima faktora intenziteta napona za levi, odnosno desni kraj prsline. Takođe, može se uočiti relativno mali broj postignutih koraka progresije prsline (svega 4), što je posledica stagnacije prsline-nema širenja.

Tabela 5.1 Numerički podaci: promena faktora intenziteta napona sa rastom prsline (levi kraj prsline)

leva strana	x [mm]	y [mm]	K_I [MPa mm ^{0.5}]	K_{II} [MPa mm ^{0.5}]	K_{III} [MPa mm ^{0.5}]	K_{ekv} [MPa mm ^{0.5}]
korak 1	249	560	6874.769	-11.5141	-108.788	6859.724
korak 2	248.0004	560.0031	6719.107	42.18722	91.75256	6742.547
korak 3	247.0352	559.9945	6747.305	-60.882	1.369732	6755.818
korak 4	246.0984	560.0019	6769.751	-17.8018	65.26337	6791.667

Tabela 5.2 Numerički podaci: promena faktora intenziteta napona sa rastom prsline (desni kraj prsline)

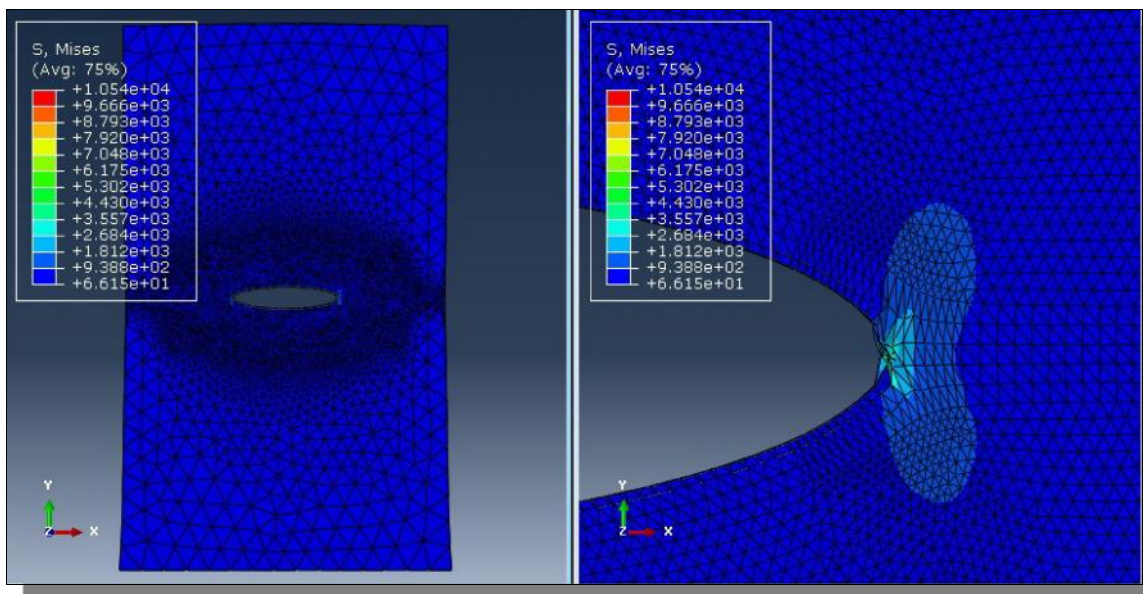
desna strana	x [mm]	y [mm]	K_I [MPa mm ^{0.5}]	K_{II} [MPa mm ^{0.5}]	K_{III} [MPa mm ^{0.5}]	K_{ekv} [MPa mm ^{0.5}]
korak 1	501	560	6361.812	52.3545	36.84463	6553.413
korak 2	501.7943	559.9863	6790.461	-42.8089	-6.28471	6741.032
korak 3	502.792	559.9836	6898.45	-50.2457	66.90817	6946.231
korak 4	503.7909	559.9944	6835.679	-38.2237	5.618949	6842.78

Ukoliko uporedimo dobijene rezultate sa teorijskom vrednošću ($K_I = 5440.38 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$), primetićemo izvesna odstupanja. Ona su posledica:

- konačnosti mera realnog modela u odnosu na teorijski model (beskonačna ploča),
- uzimanje u obzir deformabilnosti realne ploče, što će uzrokovati pojavu preostalih modova, odnosno faktora intenziteta napona: K_{II} i K_{III} , koji su značajno manji u odnosu na faktor intenziteta napona za mod I- K_I , tako da se njihov uticaj može zanemariti.

Na slici 5.6 data je raspodela *Von Mises*-ovih napona u ploči i u okolini vrha prsline kod linearno-elastičnog materijala. Uočavaju se izuzetno velike

vrednosti napona u okolini vrha prsline, što ima za uzrok beskonačnost u relaciji $\tau = E \cdot v$. Što znači da se mora definisati tačka popuštanja materijala (τ_m -zatezna čvrstoća), odnosno maksimalna vrednost napona koji dati materijal može da izdrži, a da pri tom ne dođe do loma. U samoj okolini vrha prsline zapaža se izvesna preraspodela napona.

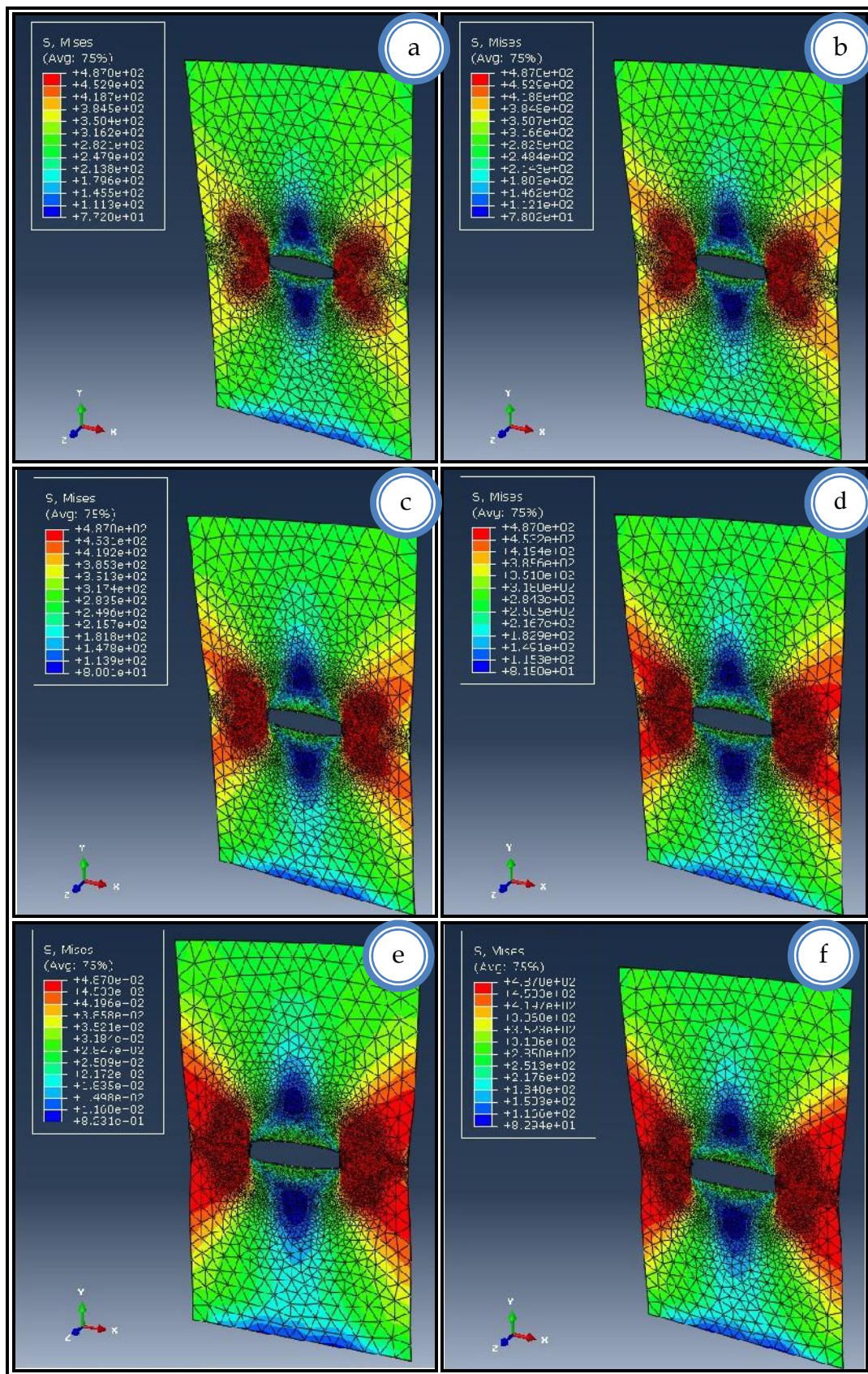


Slika 5.6 Raspodela Von Mises-ovih napona u ploči i oko vrha prsline

5.2.1.2.2. Proračun za elasto-plastičnu oblast

Dalji proračun je rađen za nelinearno ponašanje materijala (oblast elasto-plastičnosti). Veza između napona- τ i relativne deformacije- v za dati materijal (2024-T351) je data tabelarno (tabela 3.2, za OM-osnovni materijal).

Na slikama 5.7 (od 5.7a-5.7f) prikazane su raspodele *Von Mises*-ovih napona u ploči tokom progresije prsline. Na slikama se uočava sukcesivna progresija prsline u strukturi, kao i raspodela napona u ploči u datom trenutku vremena (koraku), pri datoj dužini prsline. Maksimalna vrednost napona $\tau = 487 \text{ MPa}$ se ne prevazilazi ni u jednom momentu, upravo iz razloga jer je data vrednost maksimalni napon koji dati materijal može da podnese (napon popuštanja).



Slika 5.7 Raspodele Von Mises-ovih napona u određenom trenutku (koraku) širenja prsline

- a. korak 0
- b. korak 10
- c. korak 20
- d. korak 30
- e. korak 35
- f. korak 39

Na gore prikazanim slikama, može se videti da u ploči dolazi do povećanja napona. Kada napon dostigne svoju maksimalnu vrednost na vrhu prsline (napon popuštanja za dati materijal) dolazi do njenog daljeg širenja. Veličina maksimalne promene dužine prsline- Δa_{\max} sr definiše u okviru programa *Morfeo*. Što je mera manja, to je broj koraka do loma veći, i obrnuto. Ali što je promena dužine prsline manja, to je analiza širenja prsline preciznija.

Tabela 5.3 Numerički podaci: promena faktora intenziteta napona sa rastom prsline (desni kraj prsline)

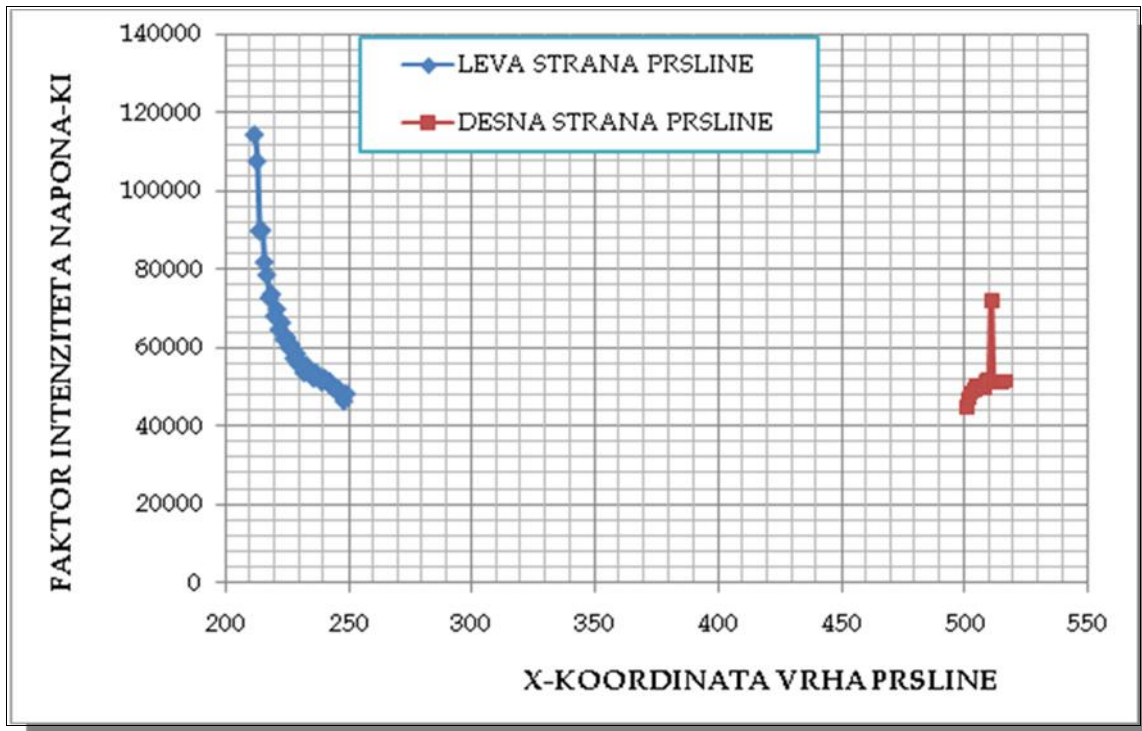
desna strana	x [mm]	y [mm]	K_I [MPa mm ^{0.5}]	K_{II} [MPa mm ^{0.5}]	K_{III} [MPa mm ^{0.5}]	K_{ekv} [MPa mm ^{0.5}]
korak 1	501	560	44914.88	41.67122	517.8012	46194
korak 2	501.798	5559.9982	47300.96	-134.292	-390.382	46950.89
korak 3	502.7953	560.0027	48733.29	-229.724	367.1379	49050.93
korak 4	503.7941	560.0159	49532.64	81.72088	277.2536	49547.54
korak 5	504.793	560.0267	50303.5	494.1496	497.9929	50323.04
korak 6	505.7924	560.0164	50505.29	786.1367	-35.4898	50904.77
korak 7	506.7918	559.9786	50382.73	-232.415	502.7078	50341.35
korak 8	507.79	559.9469	50084.69	-1636.4	422.2193	50409.09
korak 9	508.706	559.983	51747.83	1078.179	1034.4	51369.3
korak 10	509.7023	559.9703	51895.23	24.24623	2009.095	51850.54
korak 11	510.6718	559.9564	72299.72	-3535.8	2459.2	72763.32
korak 12	511.6665	560.0492	51385.03	2498.055	173.0437	50846.97
korak 13	512.641	560.034	51491.8	1739.266	1882.287	51521.49
korak 14	513.567	559.9707	51530.34	-2832.86	622.4903	51746.99
korak 15	514.4598	560.0048	51399.6	-110.005	1902.599	51017.81
korak 16	515.404	560.0389	51715.53	821.1485	1539.401	51936.05
korak 17	516.3075	560.0527	51632.13	373.8017	1581.007	51718.87
korak 18	517.1838	560.0625	52905.9	213.736	1170.44	53569.9
korak 19	518.0387	560.0399	51185.31	-262.766	2648.361	51271.89

korak 20	518.9053	560.0296	51500.81	-782.556	1922.113	52299.71
korak 21	519.6744	560.0586	53660.8	708.8811	2798.163	54089.44
korak 22	520.5634	560.0379	55629.61	-305.704	3649.846	55725.03
korak 23	521.4229	560.0536	55861.56	84.22284	3150.67	56250.38
korak 24	522.3461	560.0737	56859.09	612.6337	3118.869	57245.41
korak 25	523.1669	560.0497	60318.2	-1268.02	2753.411	60769.5
korak 26	524.167	560.0994	59886.16	679.7713	3852.663	59694.63
korak 27	525.0394	560.0967	60762.33	-948.008	2891.464	62294.03
korak 28	525.9726	560.1299	61498.33	-552.29	4020.054	61527.43
korak 29	526.7671	560.2101	62649.79	652.3714	6315.216	63023.89
korak 30	527.6885	560.213	66762.03	-802.518	5340.326	66695.84
korak 31	528.5648	560.316	64264.7	-32.202	5066.648	66534.5
korak 32	529.4098	560.3804	61782.3	4298.53	6426.19	63591.7
korak 33	530.0044	560.345	67214.2	434.233	6113.13	67914
korak 34	530.8134	560.2947	71983.09	-1731.82	6964.386	71301
korak 35	531.5994	560.287	79908.9	-839.084	8461.822	80460
korak 36	532.5398	560.2916	85304.7	-1356.13	5264.9	90108.6
korak 37	533.395	560.282	82847.03	2207.743	5291.165	82788.67
korak 38	534.1837	560.2809	94301.36	83.78176	5576.773	93901.5
korak 39	534.8552	560.256	108799.5	16385.73	5804.532	112010.5

Tabela 5.4 Numerički podaci: promena faktora intenziteta napona sa rastom prsline (levi kraj prsline)

leva strana	x [mm]	y [mm]	K_I [MPa mm ^{0.5}]	K_{II} [MPa mm ^{0.5}]	K_{III} [MPa mm ^{0.5}]	K_{ekv} [MPa mm ^{0.5}]
korak 1	249	560	48486.54	-346.742	-415.602	48308.78
korak 2	248.0005	560.0143	46574.49	290.9212	892.2544	47088.35
korak 3	247.0465	560.0158	48072.35	-730.029	922.6383	48101.63
korak 4	246.0863	560.0463	49491.2	649.6636	1444.474	49518.36
korak 5	245.0871	560.0517	49439.27	-623.628	434.4614	49118.1
korak 6	244.1376	560.0799	49844.16	984.3124	1897.163	50500.49
korak 7	243.1722	560.0697	50228.38	-280.928	800.9366	49891.96
korak 8	242.1824	560.073	51609.41	-409.007	1248.821	52057.88
korak 9	241.1833	560.0921	51779.9	497.0398	2748.388	52124.12
korak 10	240.183	560.0918	52407.63	-41.3624	1048.437	52023.68
korak 11	239.1826	560.0872	51480.76	1382.084	902.5908	54112.62
korak 12	238.8196	560.069	51845.84	-92.3886	1452.542	52854.72
korak 13	237.824	560.0185	52758.78	-2359.11	1070.863	52802.47

korak 14	236.8257	560.0613	53742.83	845.2487	51.89983	53934.6
korak 15	235.8276	560.0674	52442.54	-335.025	1256.297	52002.01
korak 16	234.8255	560.0912	53577.1	860.6837	322.6957	53807.57
korak 17	233.8279	560.0809	54039.83	-796.409	504.1879	53556.63
korak 18	232.8265	560.1012	55748.8	825.388	426.0483	55962.23
korak 19	231.8288	560.0898	53818.43	-770.417	520.3304	53200.66
korak 20	230.8278	560.1095	56382.53	882.3517	426.4557	56544.4
korak 21	229.8299	560.0957	55893.94	-990.329	998.2059	55312.63
korak 22	228.8293	560.1197	58731.67	921.0503	137.228	58815.67
korak 23	227.8311	560.1089	57525.96	-752.665	64.53199	56834.41
korak 24	226.8302	560.1283	60902.63	810.4853	309.7347	60932.53
korak 25	225.8319	560.1169	60307.18	-971.781	-493.234	59738.33
korak 26	224.837	560.1417	62876.43	748.158	1466.42	63301.6
korak 27	223.8384	560.1386	62306.6	-657.539	1058.838	61903.86
korak 28	222.838	560.1603	66624.1	724.5323	1601.427	66620.93
korak 29	221.8391	560.1574	64869.37	-716.156	1006.246	64401.27
korak 30	220.839	560.1768	70047.8	1184.477	2328.9	70258.77
korak 31	219.8414	560.1615	68265.36	-1224.82	1053.22	67840.16
korak 32	218.8405	560.1845	73892.5	1143.557	2497.65	73705.97
korak 33	217.8421	560.1773	72967.84	-1183.8	1063.657	72659.31
korak 34	216.8413	560.2003	78809.7	1364.1	2044.3	78666
korak 35	215.8436	560.1896	82079.8	-1175.84	2808.57	81714.31
korak 36	214.8418	560.208	90231.27	1214.27	2318.387	89742.23
korak 37	213.844	560.1991	90046.97	-2237.56	2485.044	89548.84
korak 38	212.8438	560.2415	107864.7	775.8053	2041.86	106976.7
korak 39	211.8444	560.2694	114636.9	-392.748	2746.2	114866.1



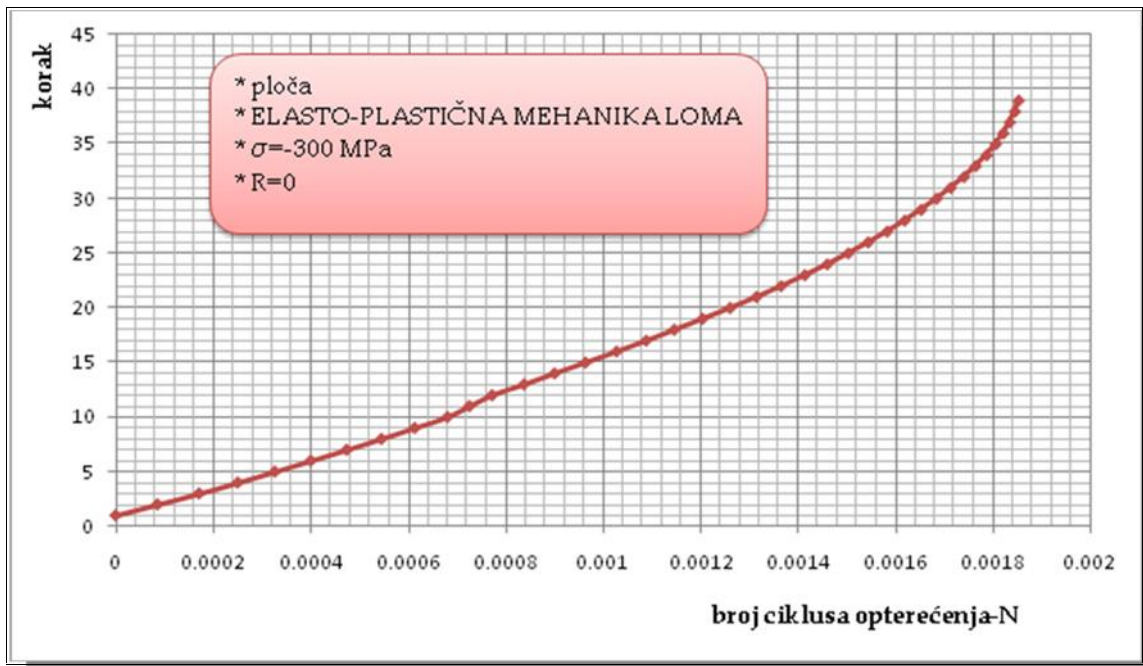
Slika 5.8 Dijagram: promena faktora intenziteta napona sa rastom prsline

Na prikazanom dijagramu (slika 5.8) može se uočiti veliki gradijent promene faktora intenziteta napona- K_I na oba kraja prsline, a nakon određenog broja koraka širenja prsline. To znači da rast prsline u ploči posle izvesnog broja koraka (dostizanje izvesne dužine prsline), nakon određenog broja primenjenih ciklusa opterećenja- N (zamor) više nije stabilan. Dakle, dolazi do nagle progresije prsline u strukturi, što dovodi do njenog loma.

Tabela 5.5 Numerički podaci: širenje prsline* u funkciji od broja ciklusa opterećenja- N

korak	delta-N	N
1	0	0
2	8.58E-05	8.5773E-05
3	8.52E-05	0.00017093
4	7.96E-05	0.00025054
5	7.60E-05	0.00032652
6	7.38E-05	0.00040034
7	7.36E-05	0.00047396
8	7.13E-05	0.00054529
9	6.83E-05	0.00061361
10	6.68E-05	0.00068039
11	4.55E-05	0.00072584
12	4.63E-05	0.00077213
13	6.57E-05	0.00083779
14	6.25E-05	0.00090033
15	6.34E-05	0.00096373
16	6.37E-05	0.00102741
17	6.09E-05	0.00108831
18	5.75E-05	0.00114581
19	5.79E-05	0.00120366
20	5.70E-05	0.00126062
21	5.37E-05	0.00131435
22	5.07E-05	0.00136508
23	4.86E-05	0.00141364
24	4.62E-05	0.00145983
25	4.28E-05	0.00150263
26	4.09E-05	0.00154352
27	3.90E-05	0.00158255
28	3.60E-05	0.00161856
29	3.38E-05	0.00165237
30	3.16E-05	0.00168393
31	2.91E-05	0.00171303
32	2.71E-05	0.0017401
33	2.44E-05	0.00176448
34	2.23E-05	0.00178681
35	1.87E-05	0.00180549
36	1.54E-05	0.00182092
37	7.38E-05	0.00204237

38	7.38E-05	0.00022145
39	7.38E-05	0.00022145



Slika 5.9 Dijagram: širenje prsline* u funkciji od broja ciklusa opterećenja-N

*Kao merilo širenja prsline koristi se korak prsline. On je definisan unapred determinisanom maksimalnom promenom dužine prsline- Δa_{\max} .

U tabelama 5.3 i 5.4 su date x i y (2D) koordinate vrha prsline, za levi, odnosno desni kraj prsline. U proračunu se dobijaju podaci i po dubini ploče (sa promenom z koordinate-duž fronta prsline), ali je dat prikaz uprosečenih vredosti po dubini ploče (iz razloga pojednostavljenog prikaza rezultata). Može se primetiti nazatna promena y -koordinate, što ukazuje na izvesno skretanje putanje širenja prsline sa pravolinijskog pravca.

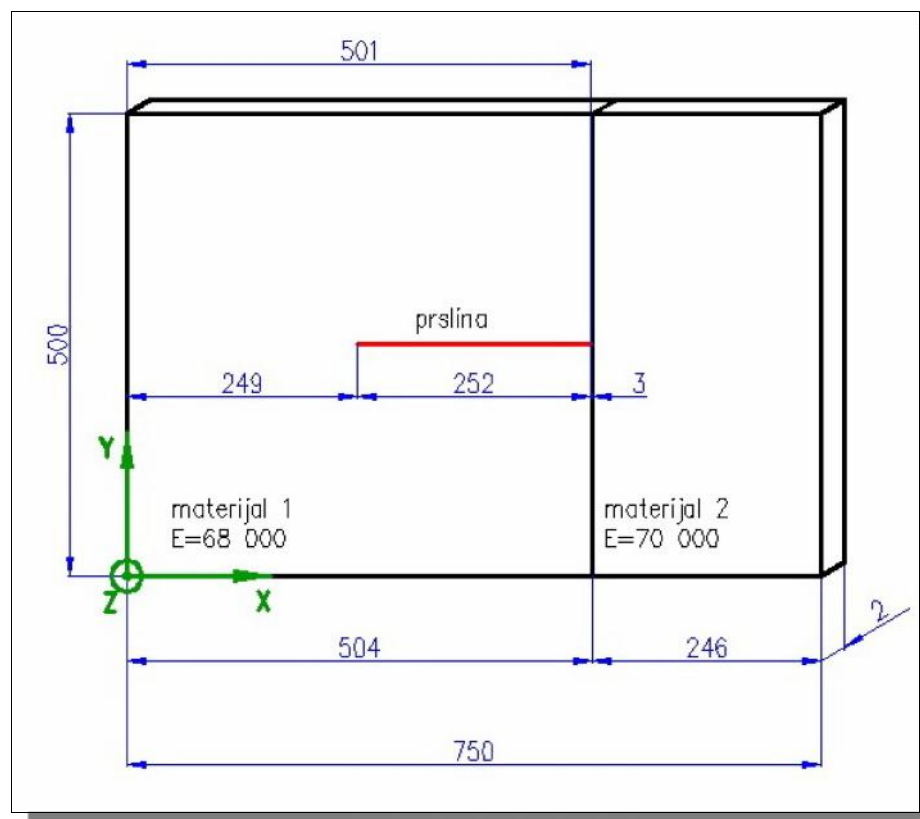
U ovom primeru primenjeni zatezni napon $\dagger = -300 \text{ MPa}$ ima izuzetno visoku vrednost, te je broj ciklusa opterećenja izuzetno mala mera. Dakle, može se govoriti o statičkom problemu, a ne o dinamičkom (zamoru).

5.2.2. Primer br.2: NEOJAČANA TANKOZIDNA PLOČA sa dva regiona (DVOKOMPONENTNA PLOČA)

U daljem tekstu je prikazana analiza širenja prsline u dvokomponentnoj ploči. Cilj analize je posmatranje širenja prsline u strukturi, kao i razmatranje vrednosti faktora intenziteta napona pri prelasku prsline iz jednog materijala (regiona) u drugi materijal (region).

Data je ploča dimezija $2 \times 500 \times 750$ mm (slika 5.10). Ploča se sastoji iz dva regiona, odnosno materijala: dve različite legure aluminijuma, sa različitim mehaničkim svojstvima (različiti E i ϵ : $E_1 = 68000 \text{ MPa}$, $E_2 = 70000 \text{ MPa}$, $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0.33$).

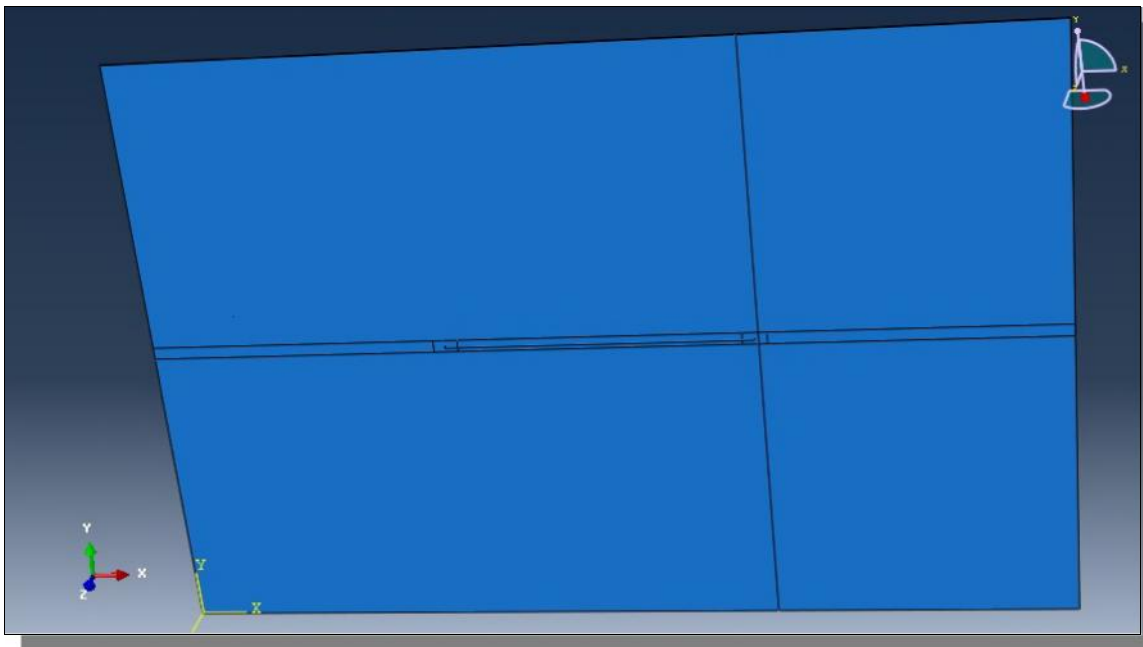
U ploči, u materijalu 1 se nalazi prolazna inicijalna prslina dužine $2a_0 = 252 \text{ mm}$. Desni kraj inicijalne prsline se nalazi na rastojanju 3mm od granice između dva materijala. Posmatra se širenje prsline iz materijala 1 u materijal 2 (desni kraj prsline), kao i širenje prsline unutar istog materijala-regiona (levi kraj prsline).



Slika 5.10 Dvokomponentna ploča

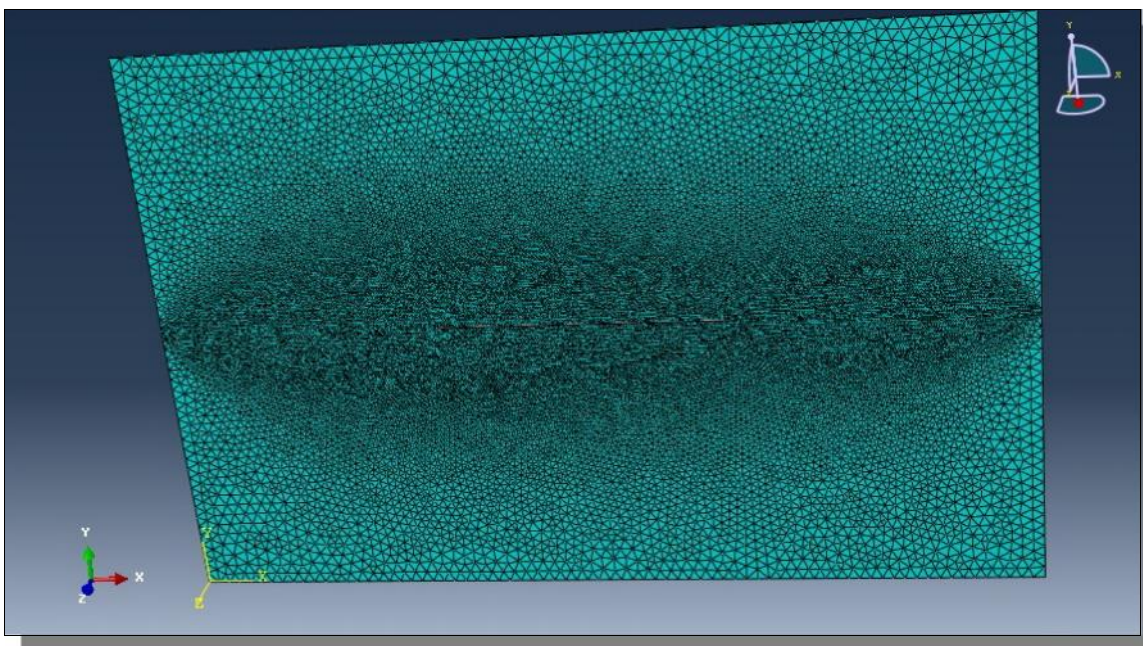
Ploča je izmodelirana u *software-u Abaqus* (slika 5.11).

Regija duž pravca pružanja prsline je posebno naznačena, u cilju preciznijeg definisanja konačno-elementne mreže.

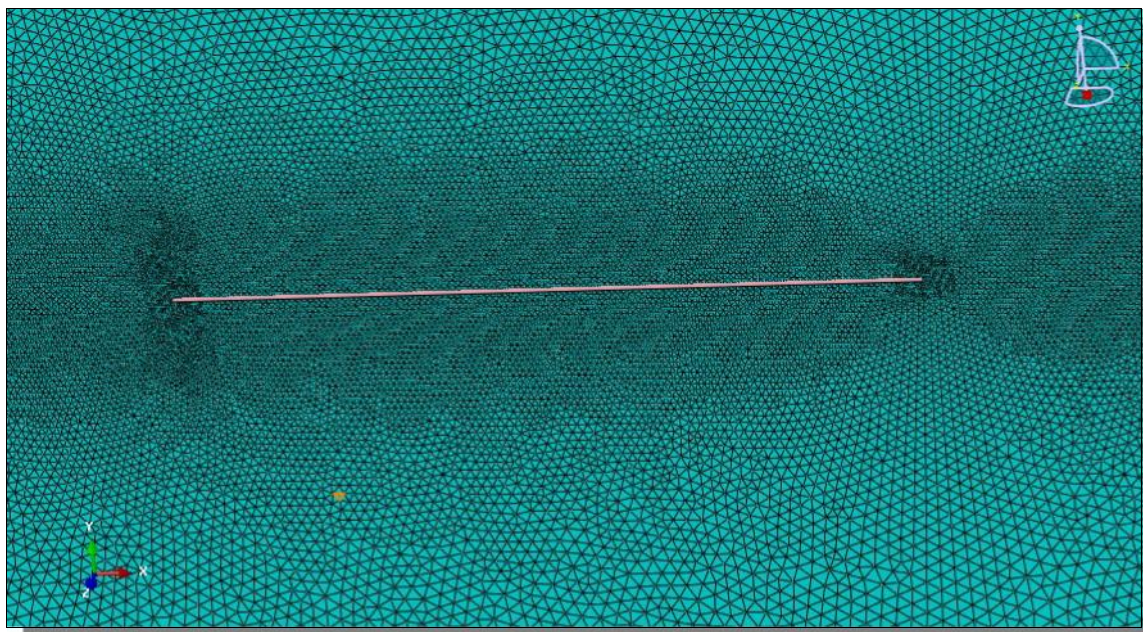


Slika 5.11 3D model dvokomponentne ploče

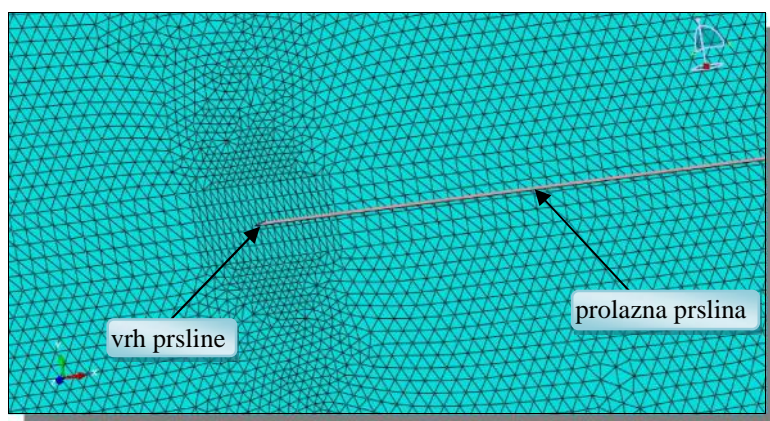
Generisana je tetraedarska mreža (slika 5.12), pri čemu je izvršeno usitnjavanje u okolini vrhova inicijalne prsline, kao i u regiji pretpostavljene dalje progresije.



Slika 5.12-a Konačno-elementna mreža u 3D modelu



Slika 5.12-b Konačno-elementna mreža u 3D modelu
(uvećan deo mreže u okolini vrhova prsline)



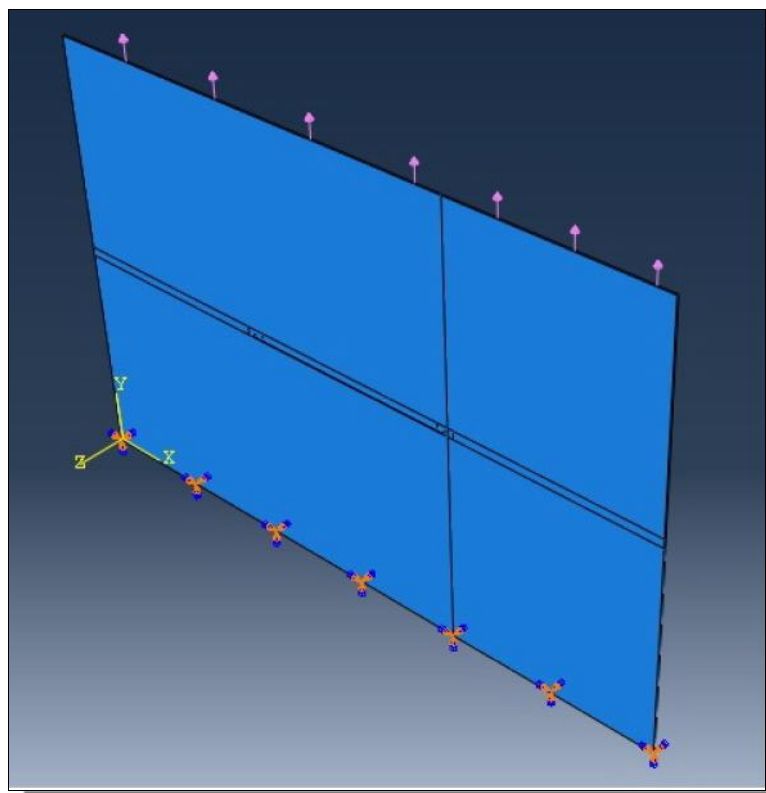
Slika 5.12-c Konačno-elementna mreža u 3D modelu
(uvećan deo mreže u okolini vrha prsline)

U cilju dobijanja što preciznijih rezultata, neophodno je iskustveno znanje iz oblasti MKE-Metod Konačnih Elemenata (*FEM-Finite Element Method*). Potrebno je definisati tip elementa (videti poglavlje 4.5) koji će se primeniti pri generisanju mreže, odnosno da li će mreža biti tetraedarska ili heksaedarska. U okviru istog modela moguće je koristiti kombinovanu mrežu. Ukoliko je reč o jednostavnijim modelima, najprihvatljivija je heksaedarska mreža. Međutim, ako u modelu ima kosih ivica, zaobljenja, kružnih otvora i/ili rupa i sl., najbolje je koristiti tetraedarsku mrežu.

Ukoliko na modelu postoje tzv. koncentratori napona, kao što su nagle promene kontinuiteta geometrije, otvori, vrhovi prsline i slično, neophodno je izvršiti usitnjavanje mreže u okolini istih. Kod progresivne prsline, mreža se usitnjava ne samo oko njenog vrha, već i u regiji njene očekivane dalje progresije.

Usitnjavanjem mreže postižu se kvalitetnija rešenja, ali se time znatno povećava vreme koje je potrebno procesoru da obavi proračun (tzv. procesorsko vreme). Celokupni proračun se bazira na diskretizaciji kontinuuma i primeni numeričkih jednačina. Povećanjem broja konačnih elemenata u modeliranoj konstrukciji, povećava se i broj nepoznatih veličina koje figuriraju u numeričkim jednačinama.

Ploča je opterećena na zatezanje $\uparrow = -10\text{MPa}$ koje je uvedeno u strukturu duž duže stranice ($2W = 750\text{mm}$). Pravac dejstva opterećenja je upravavan na pravac pružanja prsline. Na suprotnoj strani uneti su granični uslovi (uklještenje) (slika 5.13).



Slika 5.13 Definisanje opterećenja i graničnih uslova (uklještenje)

Primenjeni zatezni napon ima relativno malu vrednost ($\dagger = -10 \text{ MPa}$), a razlog tome je analiziranje ponašanja ploče pod dejstvom zamornih malih opterećenja, kao i analiza porasta dužine prsline- a sa promenom broja ciklusa opterećenja- N , odnosno dobijanje funkcionalne zavisnosti $a = f(N)$ (slike 5.15 i 5.17). Pošto se prsline širi u sva tri pravca (xyz), funkcionalna zavisnost $a = f(N)$ je data indirektno, odnosno preko koraka proračuna. Korak proračuna definiše sam korisnik kao maksimalnu meru širenja prsline (Δa_{\max}). Ova mera zavisi od vrednosti inicijalne prsline, kao i od gustine generisane mreže u oblasti vrha prsline. Kao faktor asimetrije ciklusa usvojena je sledeća vrednost: $R = 0$.

Dalje je razmatrano širenje prsline u ploči u dva slučaja:

1. Primer tankozidne ploče (oblast elastičnosti)
2. Primer tankozidne ploče (oblast elasto-plastičnosti)

5.2.2.1. Primer tankozidne ploče (oblast linearne elastičnosti)

Kod ovog primera, razmatran je apsolutno elastičan materijal (veza između napona- \dagger i relativne deformacije- v je linearna: $\dagger = E \cdot v$). Posmatrano je širenje prsline iz jednog regiona u drugi, kao i proračun faktora intenziteta napona- K_I .

Tabela 5.6 Numerički podaci: promena faktora intenziteta napona sa rastom prsline (desni kraj prsline)

desna strana	x [mm]	y [mm]	K_I [MPa mm ^{0.5}]	K_{II} [MPa mm ^{0.5}]	K_{III} [MPa mm ^{0.5}]	K_{ekv} [MPa mm ^{0.5}]
korak 1	501	250	237.0668	-11.4893	-0.20409	237.1838
korak 2	501.9266	250.0893	241.7808	-3.6683	-0.96704	243.99
korak 3	502.883	250.2117	241.7138	2.679103	1.275062	241.5242
korak 4	503.845	250.3114	258.3776	9.91662	2.114658	266.6898
korak 5	504.8447	250.3386	249.5372	-12.1955	1.84732	248.4742
korak 6	505.8345	250.4613	251.2768	2.255577	0.130574	251.5582
korak 7	506.7974	250.563	262.4407	-5.99269	3.892072	265.5691
korak 8	507.7779	250.7019	432.2001	-39.8341	-11.1887	402.6978
korak 9	508.7188	251.0304	77.93424	-4.90971	-1.37301	102.8244
korak 10	508.7442	251.0632	209.3468	90.21148	-0.44727	242.1782

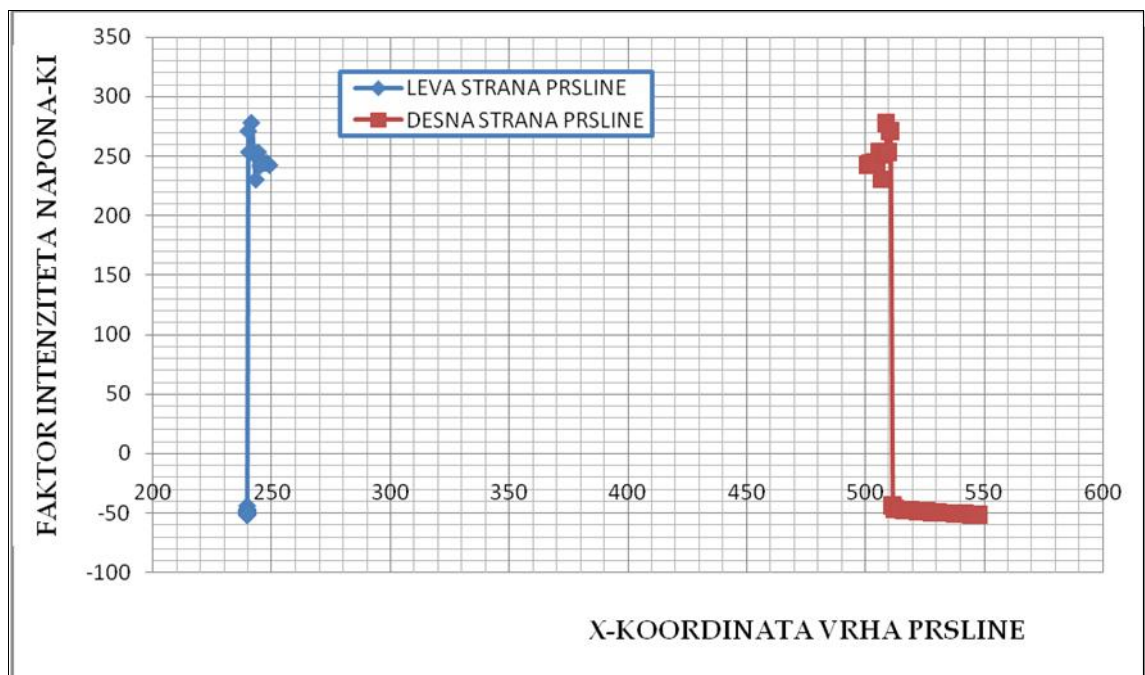
korak 11	509.493	250.8894	373.0532	-79.5081	5.284404	316.1304
korak 12	510.4916	251.087	336.1529	47.6693	1.474747	313.2163
korak 13	511.4791	250.9446	398.2086	-51.0468	43.04069	336.4601
korak 14	512.4692	251.0593	181.1833	-134.376	16.39672	258.2794
korak 15	513.0314	251.8604	208.8397	94.95533	29.22186	224.1169
korak 16	514.0271	252.0606	243.876	47.92273	34.46283	260.764
korak 17	514.9368	252.0595	279.168	-12.5362	44.31622	275.6335
korak 18	515.951	252.1592	262.5602	10.52648	38.37058	264.5343
korak 19	516.9978	252.087	154.906	-0.22926	35.72627	166.6358
korak 20	518.0016	252.0166	252.3727	-13.7861	34.85011	253.326
korak 21	518.9929	252.0593	254.1363	-10.7378	41.67071	263.2529
korak 22	519.9809	252.1916	244.6471	-5.08489	34.64796	250.0413
korak 23	520.955	252.4176	256.6905	-7.86847	38.67224	262.6568
korak 24	521.9233	252.6248	250.774	13.92703	39.03838	253.7202
korak 25	522.9079	252.8509	204.363	57.76333	-14.1995	295.3303
korak 26	523.813	252.4344	225.3729	-43.7738	34.4811	231.4479
korak 27	524.8377	252.4576	220.8957	-24.088	27.99989	231.3786
korak 28	525.8118	252.6784	259.36	1.681853	34.82563	264.7805
korak 29	526.7916	252.9813	334.6746	-1.82762	22.082	338.3556
korak 30	527.7551	253.1251	259.5848	21.55144	43.83068	263.2455
korak 31	528.7551	253.1087	267.5992	9.956362	45.27155	272.6789
korak 32	529.7511	253.1203	277.532	-12.7594	44.7951	280.961
korak 33	530.7536	253.1253	273.6938	-4.18751	43.30753	278.2049
korak 34	531.7424	253.2474	274.8973	3.938971	47.19514	280.3003
korak 35	532.7475	253.3155	300.027	24.93105	54.7195	296.6255
korak 36	533.7454	253.2099	244.8584	6.85618	30.20831	241.8338
korak 37	534.733	253.0094	267.9691	-15.6002	41.96619	267.1189
korak 38	535.7375	252.9857	279.2764	-6.20627	22.75048	289.5651
korak 39	536.7347	253.0408	279.4807	-30.4335	36.32723	286.5528
korak 40	537.6976	253.2077	304.8171	22.47998	30.15767	299.1082
korak 41	538.7092	253.2432	269.9528	8.791784	41.66634	277.521
korak 42	539.7101	253.2612	287.4762	-15.3582	31.27343	290.6728
korak 43	540.7103	253.3385	271.2736	5.739816	29.83473	280.1625
korak 44	541.7073	253.3583	267.2623	7.510743	21.53005	267.1233
korak 45	542.696	253.3218	276.1443	-4.01744	18.29212	270.6845
korak 46	543.693	253.3453	284.1814	-12.7397	18.6956	283.4764
korak 47	544.6885	253.4362	280.9377	0.740071	18.02878	286.021
korak 48	545.6824	253.5304	283.9969	-0.23642	15.03856	285.5371
korak 49	546.6785	253.607	286.3965	4.783537	13.32423	287.7232
korak 50	547.6767	253.6796	277.9359	-2.69752	14.58166	281.8319

Tabela 5.7 Numerički podaci: promena faktora intenziteta napona sa rastom prslina (levi kraj prslina)

leva strana	x [mm]	y [mm]	K_I [MPa mm ^{0.5}]	K_{II} [MPa mm ^{0.5}]	K_{III} [MPa mm ^{0.5}]	K_{ekv} [MPa mm ^{0.5}]
korak 1	249	250	242.837	-11.9648	1.528759	244.2861
korak 2	248.0051	250.098	244.6918	-2.57897	-4.32699	243.8934
korak 3	247.0139	250.2169	244.531	2.174334	0.215239	243.8265
korak 4	246.0188	250.3167	244.9325	0.4455	1.069418	247.3963
korak 5	245.1737	250.3994	242.5939	-5.48475	0.29883	240.8694
korak 6	244.2719	250.5268	253.7965	-0.06513	1.995074	254.6526
korak 7	243.2813	250.6667	230.7367	-2.92316	-0.55929	238.8187
korak 8	242.6094	250.7794	251.7567	6.457067	2.13715	251.7566
korak 9	242.4074	250.7938	254.1028	5.265989	4.077416	255.6514
korak 10	241.419	250.8729	278.4846	7.003866	-0.21247	275.048
korak 11	240.4213	250.899	253.8715	-8.98052	2.297851	252.3985
korak 12	240.1514	250.9289	271.5444	-15.9609	2.722514	266.7063
korak 13	239.6672	251.0254	-43.40	-296.596	-55.3072	121.6512
korak 14	239.6672	251.0254	-46.09	-298.606	-53.5566	120.7176
korak 15	239.6672	251.0254	-46.43	-298.299	-54.2717	121.453
korak 16	239.6672	251.0254	-46.69	-299.036	-54.5232	121.6634
korak 17	239.6672	251.0254	-46.74	-300.379	-53.5701	121.6626
korak 18	239.6672	251.0254	-47.12	-303.022	-55.5978	122.6338
korak 19	239.6672	251.0254	-46.75	-302.696	-54.9362	122.7516
korak 20	239.6672	251.0254	-47.09	-303.6	-55.0426	122.744
korak 21	239.6672	251.0254	-47.13	-304.617	-55.2157	123.2784
korak 22	239.6672	251.0254	-47.43	-305.376	-55.3758	123.4488
korak 23	239.6672	251.0254	-47.60	-306.234	-55.5074	123.9668
korak 24	239.6672	251.0254	-47.80	-307.091	-55.848	124.21
korak 25	239.6672	251.0254	-48.03	-308.065	-55.7489	124.4644
korak 26	239.6672	251.0254	-47.72	-309.862	-56.4641	124.9838
korak 27	239.6672	251.0254	-47.99	-310.544	-56.2589	125.1984
korak 28	239.6672	251.0254	-48.19	-311.368	-57.1086	125.6
korak 29	239.6672	251.0254	-48.37	-312.12	-57.8558	125.9844
korak 30	239.6672	251.0254	-48.80	-313.056	-57.0131	126.211
korak 31	239.6672	251.0254	-48.74	-314.197	-58.1145	126.702
korak 32	239.6672	251.0254	-48.97	-315.34	-57.5528	126.9434
korak 33	239.6672	251.0254	-49.12	-316.354	-57.8647	127.1838
korak 34	239.6672	251.0254	-49.31	-317.48	-57.5588	127.5182
korak 35	239.6672	251.0254	-49.37	-318.419	-58.2035	127.9536
korak 36	239.6672	251.0254	-49.59	-319.654	-57.8248	128.1218
korak 37	239.6672	251.0254	-49.35	-321.136	-59.0234	128.8284

korak 38	239.6672	251.0254	-49.49	-322.213	-59.3589	129.2228
korak 39	239.6672	251.0254	-49.64	-323.374	-59.5019	129.2908
korak 40	239.6672	251.0254	-50.24	-323.871	-57.954	128.9952
korak 41	239.6672	251.0254	-50.04	-325.35	-59.9205	130.0124
korak 42	239.6672	251.0254	-50.26	-326.448	-59.34	130.164
korak 43	239.6672	251.0254	-50.16	-327.734	-60.447	131.0484
korak 44	239.6672	251.0254	-50.23	-328.877	-61.1447	131.2718
korak 45	239.6672	251.0254	-50.43	-330.026	-61.3031	131.525
korak 46	239.6672	251.0254	-50.66	-331.116	-61.8304	131.9616
korak 47	239.6672	251.0254	-50.73	-332.009	-62.1248	132.4846
korak 48	239.6672	251.0254	-51.00	-333.139	-62.5543	132.8078
korak 49	239.6672	251.0254	-51.09	-334.345	-62.2062	133.0388
korak 50	239.6672	251.0254	-51.17	-335.403	-63.4843	133.6658

Na levom kraju prsline prestaje dalje širenje u koraku 13, što se manifestuje negativnim vrednostima faktora intenziteta napona za mod I- K_I .

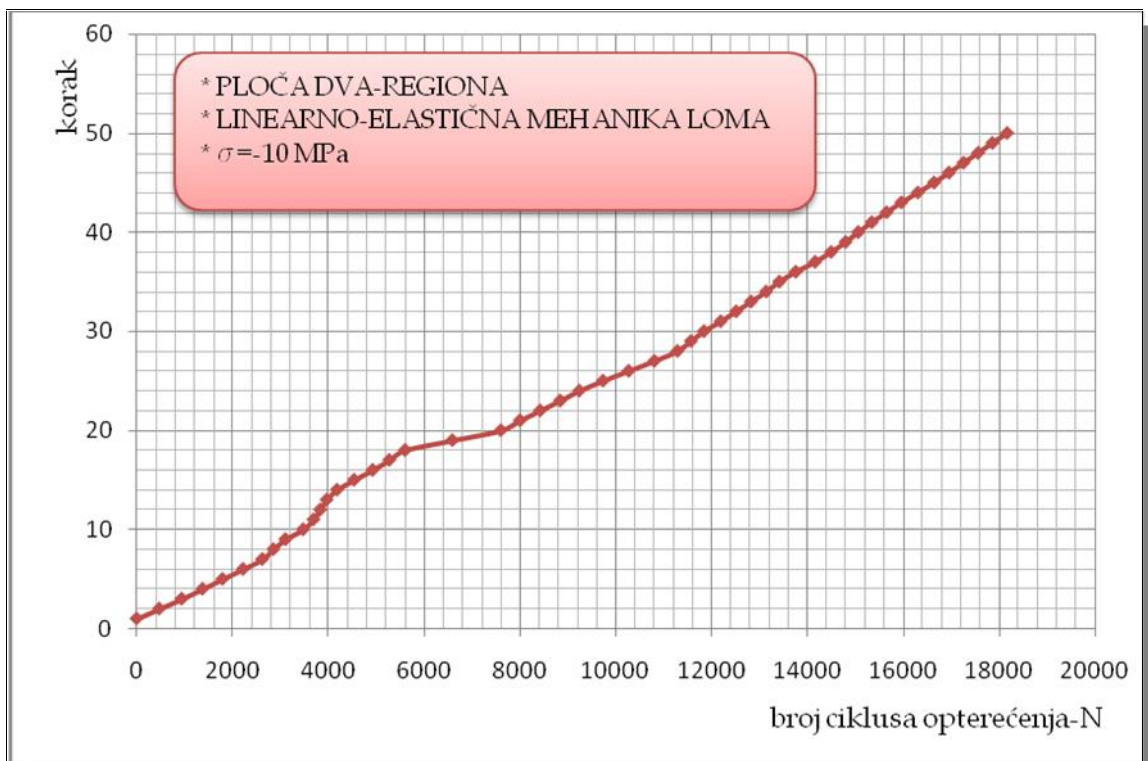


Slika 5.14 Dijagram: promena faktora intenziteta napona sa rastom prsline

Tabela 5.8 Numerički podaci: širenje prsline u funkciji od broja ciklusa opterećenja- N

korak	delta-N	N
1	0	0
2	471.38	471.38
3	468.79	940.17
4	433.20	1373.37
5	417.27	1790.64
6	429.39	2220.02
7	400.42	2620.44
8	231.68	2852.12
9	251.21	3103.33
10	369.03	3472.36
11	216.35	3688.71
12	140.51	3829.22
13	134.86	3964.08
14	215.32	4179.40
15	356.65	4536.05
16	387.56	4923.61
17	345.10	5268.72
18	330.75	5599.47
19	987.24	6586.71
20	1009.26	7595.97
21	399.92	7995.89
22	421.46	8417.35
23	417.56	8834.91
24	397.85	9232.75
25	494.52	9727.27
26	535.17	10262.45
27	535.97	10798.41
28	480.99	11279.40
29	281.88	11561.28
30	272.02	11833.30
31	349.28	12182.58
32	320.64	12503.22
33	311.91	12815.12
34	316.64	13131.76
35	273.53	13405.29
36	342.93	13748.22
37	403.39	14151.61
38	333.66	14485.26

39	302.09	14787.35
40	263.27	15050.61
41	284.04	15334.65
42	307.28	15641.93
43	309.34	15951.26
44	344.00	16295.27
45	337.52	16632.79
46	310.50	16943.29
47	303.32	17246.61
48	305.44	17552.05
49	297.32	17849.37
50	307.14	18156.51



Slika 5.15 Dijagram: širenje prsline u funkciji od broja ciklusa opterećenja- N

5.2.2.2. Primer tankozidne ploče (oblast elasto-plastičnosti)

Kod ovog primera usvojene su sve geometrijske mere, opterećenje i granični uslovi, kao i u prethodnom slučaju.

Jedina razlika je analiziranje rasta prsline u elasto-plastičnoj strukturi, što je uvedeno funkcionalnom zavisnošću između napona- σ i relativne

deformacije u strukturi $-v : \dagger = f(v)$. Podaci su u *Abaqus* uneti u tabelarnoj formi, a korišćeni su iz tabele 3.4 za osnovni materijal. Potrebne konstante u *Paris*-ovoj jednačini iskorišćene su iz tabele 3.5 takođe za osnovni materijal (2024-T351).

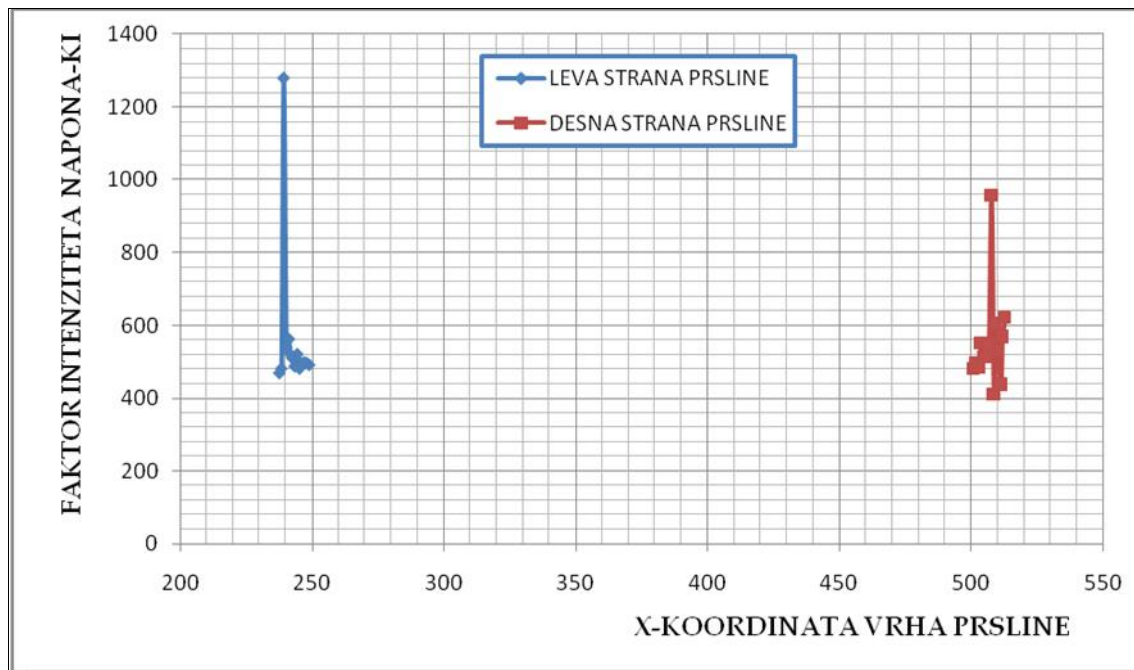
Tabela 5.9 Numerički podaci: promena faktora intenziteta napona sa rastom prsline (desni kraj prsline)

desna strana	x [mm]	y [mm]	K_I [MPa mm ^{0.5}]	K_{II} [MPa mm ^{0.5}]	K_{III} [MPa mm ^{0.5}]	K_{ekv} [MPa mm ^{0.5}]
korak 1	501	250	482.0694	-24.7189	-1.53046	482.4189
korak 2	501.9393	250.096	496.8099	-6.35166	7.821921	500.2413
korak 3	502.9307	250.2233	486.8351	6.468178	-3.11436	484.3321
korak 4	503.8622	250.3164	551.22	8.045626	3.660126	554.5082
korak 5	504.859	250.3874	513.0282	-13.013	0.678104	510.4983
korak 6	505.8489	250.5086	514.7332	6.38136	-0.41604	515.4837
korak 7	506.8114	250.5989	547.8014	-10.8551	12.27043	548.5838
korak 8	507.7943	250.7208	956.0536	-103.063	-20.3351	862.1465
korak 9	508.7306	251.0624	412.2192	124.025	5.747802	444.8628
korak 10	509.4574	250.9368	605.0416	-220.914	21.05634	599.1154
korak 11	510.379	251.3383	528.688	117.0983	13.67997	548.9087
korak 12	511.3623	251.3421	438.3374	-3.94874	20.94783	469.7481
korak 13	511.9123	251.2968	569.2463	56.567	24.57772	541.7117
korak 14	512.009	251.1851	569.2819	74.56247	-24.8995	547.7534
korak 15	512.9042	250.7838	622.4768	-175.086	53.5708	599.3904

Tabela 5.10 Numerički podaci: promena faktora intenziteta napona sa rastom prsline (levi kraj prsline)

leva strana	x [mm]	y [mm]	K_I [MPa mm ^{0.5}]	K_{II} [MPa mm ^{0.5}]	K_{III} [MPa mm ^{0.5}]	K_{ekv} [MPa mm ^{0.5}]
korak 1	249	250	491.3173	-26.0878	2.915527	494.3606
korak 2	248.0061	250.1053	496.4727	-4.36301	2.210727	493.4817
korak 3	247.0171	250.2281	497.9483	5.392384	0.139284	495.22
korak 4	246.022	250.3282	494.0743	1.146362	0.949578	500.5018
korak 5	245.301	250.3977	481.4811	-10.2707	-2.47147	480.1259
korak 6	244.4808	250.5112	520.6022	-2.46456	4.477457	518.075
korak 7	243.4927	250.6567	487.6048	1.201902	5.193073	486.1842
korak 8	242.7936	250.7551	508.8383	-2.73147	3.880629	507.8007
korak 9	242.649	250.7791	510.9353	7.191406	4.959509	511.2499
korak 10	241.6559	250.8984	521.4923	17.40321	2.522699	527.5704

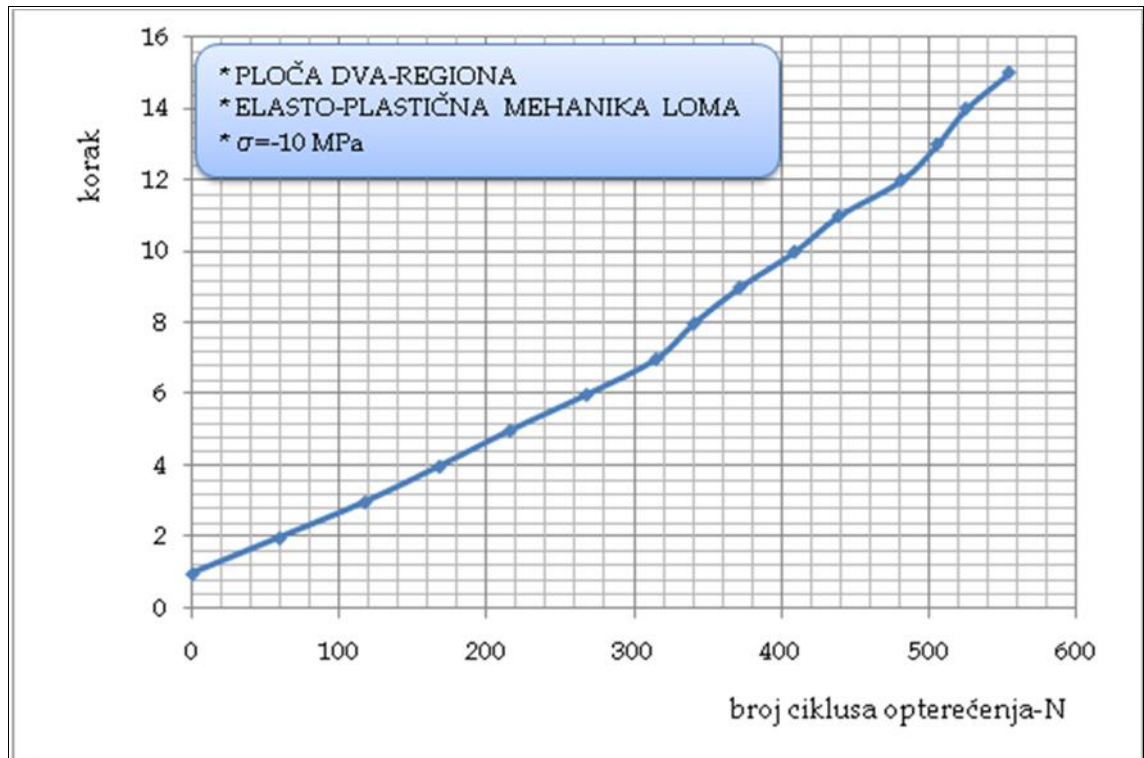
korak 11	241.2423	250.9154	562.1586	-0.222	1.456606	570.1127
korak 12	240.2727	250.9755	540.0574	-1.36845	3.903943	531.8734
korak 13	239.2582	251.0225	1278.887	-287.432	-10.4683	1205.125
korak 14	238.396	251.4829	481.1096	109.0314	20.41761	505.2253
korak 15	237.674	251.4839	468.9819	79.44376	15.57016	520.319



Slika 5.16 Dijagram: promena faktora intenziteta napona sa rastom prsline

Tabela 5.11 Numerički podaci: širenje prsline u funkciji od broja ciklusa opterećenja- N

korak	deltaN	N
1	0	0
2	59.04	59.04
3	58.20	117.23
4	50.51	167.75
5	48.01	215.76
6	51.97	267.73
7	47.29	315.01
8	25.82	340.84
9	30.91	371.74
10	37.26	409.00
11	30.03	439.04
12	42.54	481.58
13	24.31	505.89
14	19.56	525.45
15	29.15	554.60



Slika 5.17 Dijagram: širenje prsline u funkciji od broja ciklusa opterećenja- N

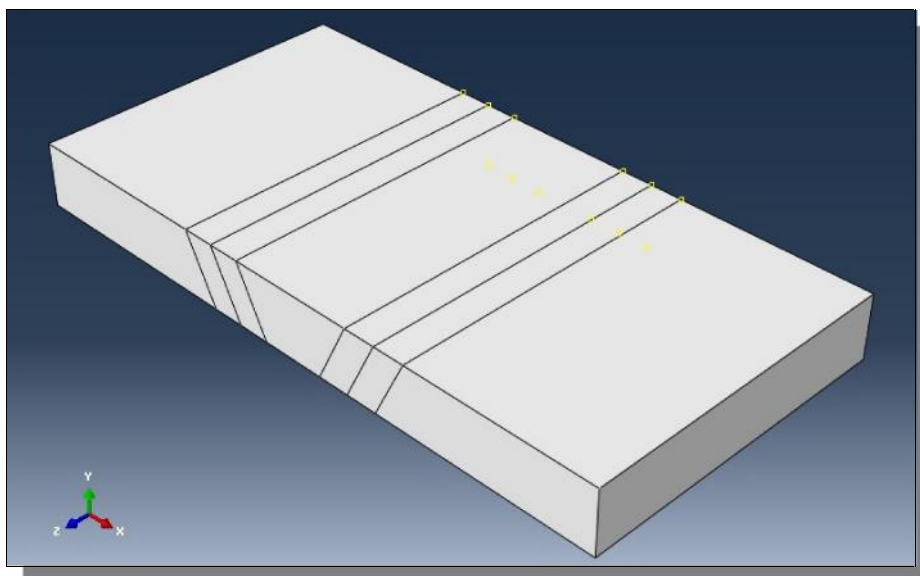
Ukoliko uporedimo dijagrame širenja prsline u funkciji od broja ciklusa primenjenog opterećenja (slike 5.14 i 5.17) primetićemo da postoje značajne razlike u broju ciklusa primenjenog opterećenja. Ova razlika je upravo posledica razmatranja širenja prsline u linearno-elastičnom materijalu ($\dot{\tau} = E \cdot v$), gde napon popuštanja nije striktno definisan i elasto-plastičnom materijalu ($\dot{\tau} = f(v)$), gde je napon popuštanja definisan kao poslednji podatak naveden u tabeli. Na taj način, u slučaju elasto-plastičnog materijala dobijaju se realnije vrednosti proračuna.

Nedostatak *Abaqus/Morfeo*

Prilikom unosa podataka za proračun širenja zamorne prsline, potrebno je uneti konstante materijala u *Paris*-ovoj jednačini (n i C), kao i faktor asimetrije ciklusa- R . Međutim, kada se model sastoji od više regiona (materijala), nemoguće je uneti ove koeficijente (n i C) za svaki region ponaosob. U slučaju proračuna *FSW* spojeva, prednost se ogleda u tome što svaka zona spoja (OM, ZUT, ZTMU i G) ima iste koeficijente.

5.2.3. Primer br.3: FSW spoj

Kao primer analize širenja prsline u FSW spoju, usvojen je model ploče. U okviru *software*-a *Abaqus*-a urađen je 3D model ploče sa FSW zonama (slika 5.18). Dimenzije zona su određene na bazi metalografskih snimaka (slika 3.12).

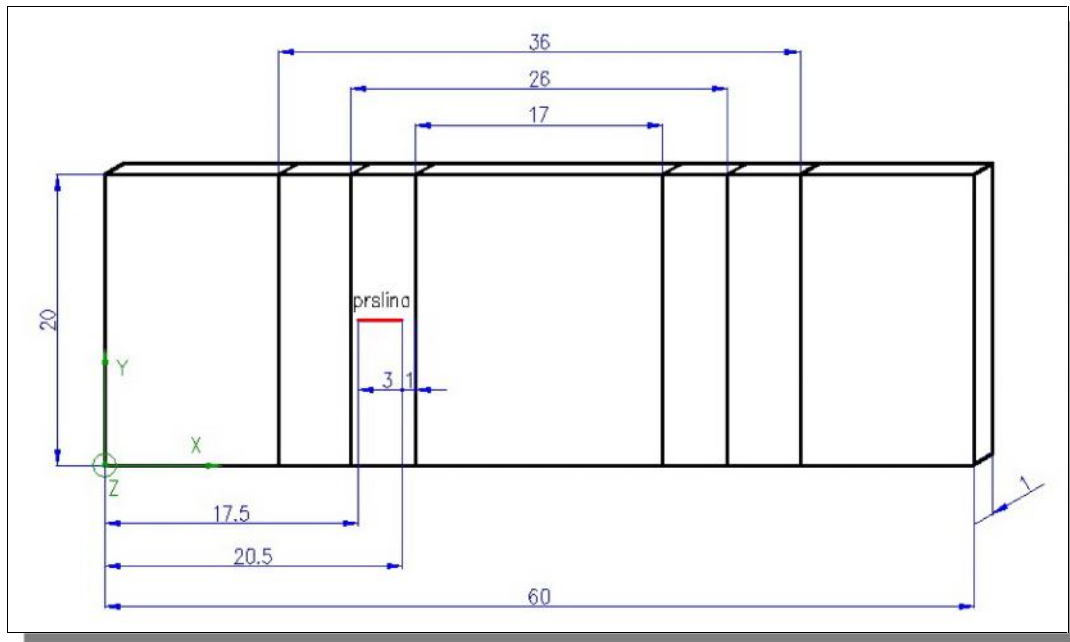


Slika 5.18 3D model FSW spoja

Analizirani su različiti oblici, dimenzije i položaj prsline u FSW spoju. Međutim, daljom detaljnom analizom ustanovljeno je da u okviru *Abaqus software*-a postoje izvesna ograničenja. Dakle, parametre mehanike loma, kao krajnji ishod analize širenja prsline u stukturi, moguće je proračunati samo u slučaju kada se sve tačke fronta prsline u datom trenutku nalaze isključivo samo u okviru jednog regiona (zone). U slučaju modeliranja realnog 3D modela (slika 5.15), bez obzira na obik i dimenzije inicijalne prsline, javlja se ovaj problem koji je nemoguće *software*-ski rešiti.

To dovodi do pojednostavnjenja 3D modela FSW spoja. Izvršena je aproksimacija spoja u formi ravnih zona (slika 5.19). Dimenzije modela su date na slici 3.18. Dakle, ploča je dimenzija $1 \times 20 \times 60$ mm ($2W = 60$ mm, $t = 1$ mm).

U strukturu je uneta prolazna inicijalna prslina dužine $2a_0 = 3$ mm u ZTMU zoni. Desni kraj prsline se nalazi na rastojanju 1 mm od granice G-ZTMU. Posmatrana je njena dalja progresija kroz sve zone spoja. Na slici 5.20 prikazane su zone u FSW spoju.



Slika 5.19 Pojednostavljeni 3D model FSW spoja

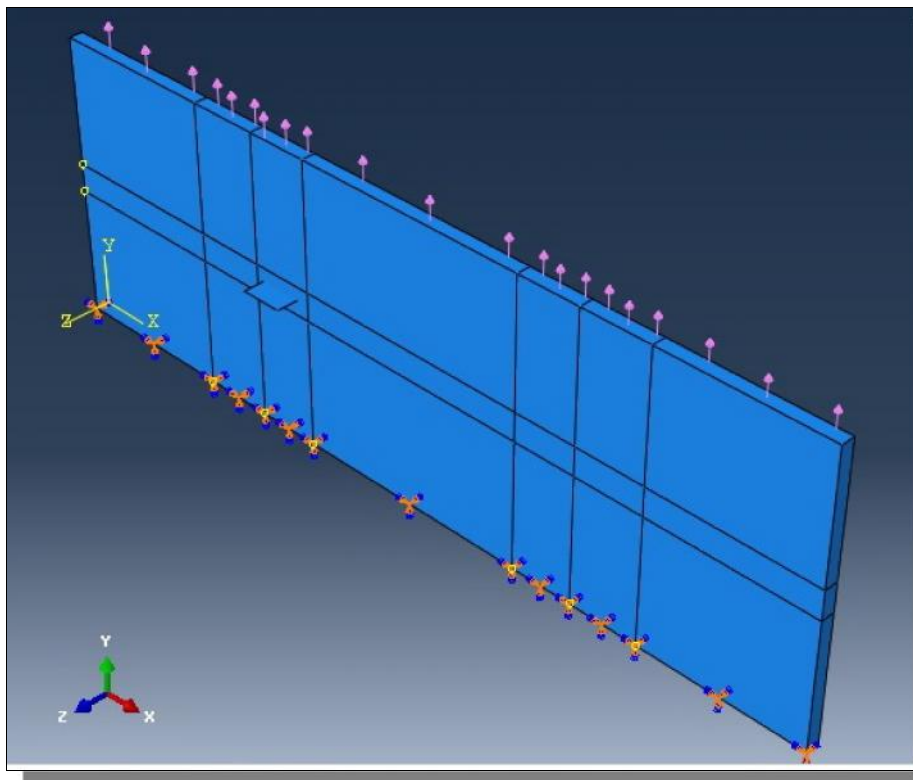


Slika 5.20 Zone u FSW spoju-3D model

- G (Grumen)-NZ (Nugat Zone)
- ZTMU (Zona Termo-Mehaničkog Uticaja)-TMAZ (Thermo-Mechanically Affected Zone)
- ZUT (Zona Uticaja Toplote)-HAZ (Heat Affected Zone)
- OM (Osnovni Materijal)-PZ (Parent Zone)

Ploča je opterećena na zatezanje duž duže ivice, a upravno na pravac pružanja prsline. Suprotna paralelna ivica je uklještena (sva pomeranja su jednaka 0) (slika 5.21).

U daljem proračunu analizirano je dejstvo zamornog zateznog opterećenja, pri faktoru asimetrije opterećenja $R = 0$.

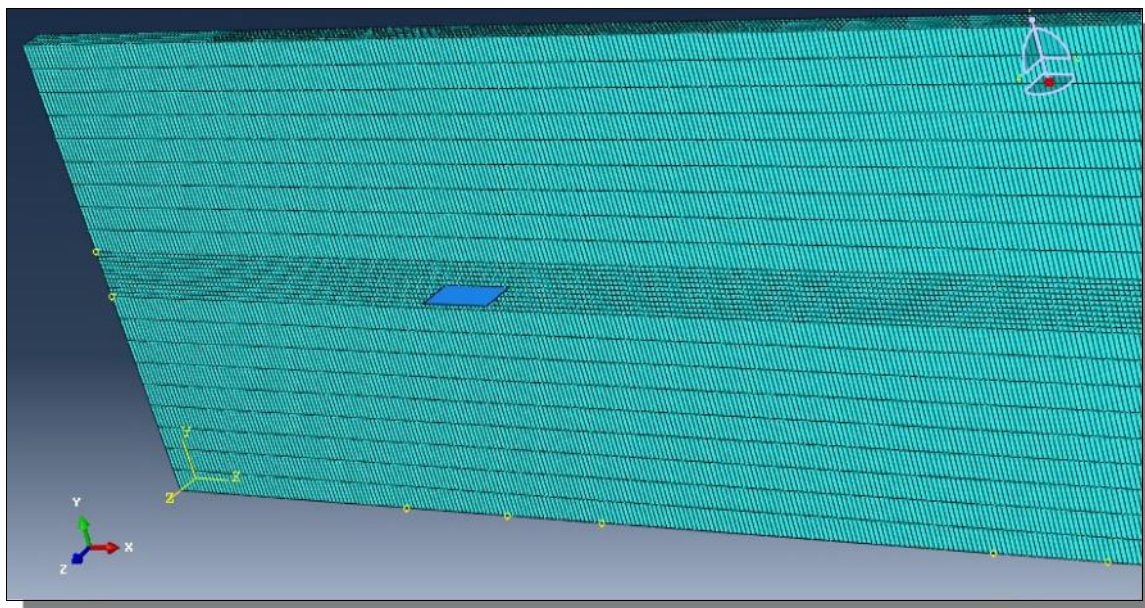


Slika 5.21 Definisanje opterećenja i graničnih uslova kod pojednostavljenog 3D modela FSW spoja

Za svaku zonu ponaosob su unete karakteristične veličine: E -Young-ov moduo elastičnosti, ν -Poisson-ov koeficijent (tabela 3.3), kao i funkcionalna zavisnost napona od relativne deformacije $\sigma = f(\epsilon)$ (podaci su uneti u *Abaqus* u formi tabele-tabela 3.4).

Svi neophodni parametri, konstante materijala u *Paris*-ovoj jednačini (2.115) su usvojeni iz tabele 3.5. Od ponuđena tri rezultata ispitivanja usvojeni su podaci dati od strane *Alli*-ja, jer je za dalji proračun (*software Morfeo*) potrebno jednoznačno definisati ove vrednosti (iste vrednosti za sve zone u spoju).

Mreža je heksaedarska, usitnjena u oblasti vrha inicijalne prsline, kao i u oblasti njenog očekivanog daljeg rasta (slika 5.22).



Slika 5.22 Konačno-elementna mreža 3D modela FSW spoja

U daljem radu analizirana su dva slučaja:

1. Primer FSW spoja izloženog dejstvu većeg zateznog opterećenja
2. Primer FSW spoja izloženog dejstvu manjeg zateznog opterećenja

5.2.3.1. FSW spoj izložen dejstvu većeg zateznog opterećenja

Pri ispitivanju je korišćena vrednost zamornog zateznog opterećenja od $\dagger = -270 \text{ MPa}$, pri koeficijentu asimetrije ciklusa opterećenja $R = 0$.

Tabela 5.12 Numerički podaci: promena faktora intenziteta napona sa rastom prsline (desni kraj prsline)

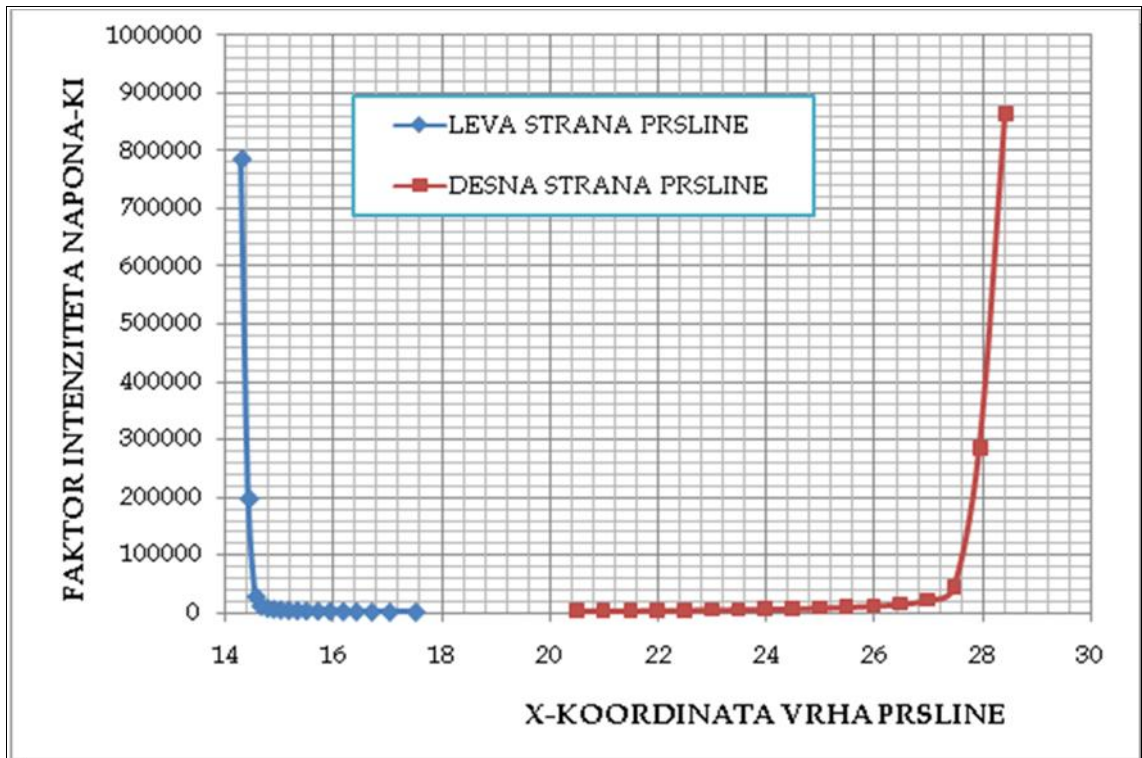
desna strana	x [mm]	y [mm]	K_I [MPa mm ^{0.5}]	K_{II} [MPa mm ^{0.5}]	K_{III} [MPa mm ^{0.5}]	K_{Kv} [MPa mm ^{0.5}]
korak 1	20.5	10	1640.684	-77.5938	-0.21044	1643.905
korak 2	20.99665	9.953149	2060.909	45.61341	1.392326	2062.726
korak 3	21.49476	9.928408	2441.245	-6.82207	-1.74392	2444.124
korak 4	21.99259	9.901152	2907.369	17.86187	-1.01944	2915.777
korak 5	22.49102	9.879996	3324.881	33.62505	-0.00678	3327.514
korak 6	22.98924	9.868938	3883.201	-1.79693	0.60412	3886.936
korak 7	23.48818	9.857436	4428.728	62.43297	5.138088	4432.643
korak 8	23.98639	9.86013	5237.603	-42.173	13.5333	5237.653
korak 9	24.48492	9.854845	5991.541	131.3985	25.55744	5993.653

korak 10	24.98179	9.870828	7278.745	-109.031	58.668	7286.111
korak 11	25.48091	9.872784	8623.602	185.5499	103.903	8621.301
korak 12	25.97826	9.894668	10891.17	-230.864	208.5809	10916.72
korak 13	26.477	9.89828	13592.26	435.9731	438.7179	13643.53
korak 14	26.97389	9.9289	21069.81	-707.284	1358.141	21263.36
korak 15	27.47123	9.936958	42248.33	2087.89	4109.191	43097.35
korak 16	27.94816	9.974976	284808.688	-14694.2	52252.51	299766.19
korak 17	28.43	9.95	865869.38	108709.83	248106.56	986412.63

Tabela 5.13 Numerički podaci: promena faktora intenziteta napona sa rastom prsline (levi kraj prsline)

leva strana	x [mm]	y [mm]	K _I [MPa mm ^{0.5}]	K _{II} [MPa mm ^{0.5}]	K _{III} [MPa mm ^{0.5}]	K _{ekv} [MPa mm ^{0.5}]
korak 1	17.5	10	1615.404	124.228	-0.00243	1626
korak 2	17.02134	10.07319	1793.62	-85.8263	-0.09357	1796.471
korak 3	16.68774	10.09192	2019.982	27.68168	-0.50761	2021.031
korak 4	16.40285	10.1158	2282.087	25.74527	-0.52867	2284.184
korak 5	16.15932	10.14185	2621.82	-12.1396	-0.96479	2623.764
korak 6	15.91271	10.16586	2952.643	32.11474	4.789943	2954.582
korak 7	15.69115	10.19226	3329.472	-6.90492	-1.25086	3330.886
korak 8	15.4773	10.2169	3629.493	147.8292	0.116018	3638.174
korak 9	15.30967	10.25004	4115.839	24.65755	-2.63174	4126.79
korak 10	15.1486	10.28326	4836.55	3.284201	-0.61036	4839.755
korak 11	15.00173	10.31253	5513.954	117.5296	-3.59793	5525.685
korak 12	14.87289	10.34433	6719.394	142.5377	-4.33185	6703.71
korak 13	14.75668	10.37828	8483.46	99.99097	-17.7152	8447.651
korak 14	14.63855	10.41613	12076.9	1044.464	-43.416	12170.17
korak 15	14.55109	10.4613	28318.69	139.9859	-91.6222	28282.64
korak 16	14.42	10.53	197546.6	-5527.51	-592.29	199939.4
korak 17	14.28639	10.58844	784391.2	-24283.81	-3679.525	788557.4

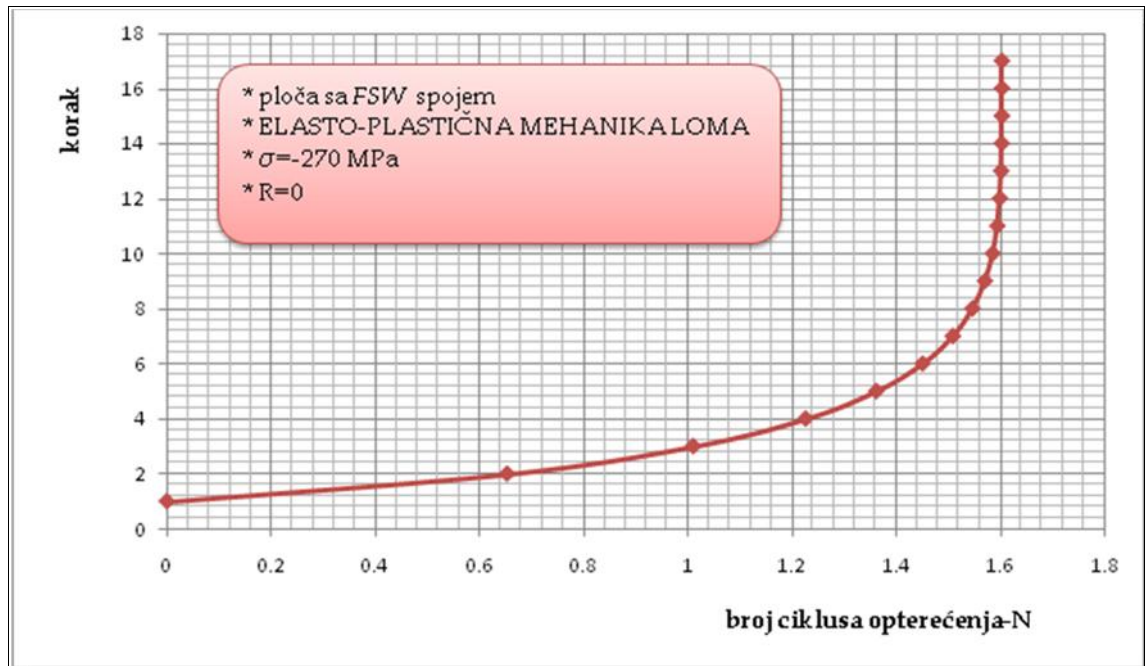
Analiziranjem dobijenih podataka, dolazimo do zaključka da se levi kraj prsline proširio u sledeću zonu (ZUT-Zona Uticaja Toplote), dok se desni kraj proširio u G (Grumen). Vrlo brzo dolazi do naglog porasta faktora intenziteta napona (dijagram na slici 5.23), što indukuje nagli rast prsline.



Slika 5.23 Dijagram: promena faktora intenziteta napona sa rastom prsline

Tabela 5.14 Numerički podaci: širenje prsline u funkciji od broja ciklusa opterećenja- N

korak	deltaN	N
1	0.0000	0.0000
2	0.6530	0.6530
3	0.3573	1.0102
4	0.2161	1.2264
5	0.1354	1.3618
6	0.0890	1.4508
7	0.0580	1.5088
8	0.0378	1.5466
9	0.0239	1.5705
10	0.0150	1.5856
11	0.0087	1.5943
12	0.0050	1.5993
13	0.0025	1.6018
14	0.0011	1.6029
15	0.0003	1.6032
16	0.0000	1.6032
17	0.0000	1.6032



Slika 5.24 Dijagram: širenje prsline u funkciji od broja ciklusa opterećenja- N

Uočava se nagli porast dužine prsline pri izuzetno malom broju ciklusa opterećenja, što je posledica velikog primenjenog zateznog opterećenja $\dagger = -270$ MPa.

5.2.3.2. FSW spoj izložen dejstvu manjeg zateznog opterećenja

Daljom analizom, posmatraćemo uticaj visokocikličnog opterećenja, pri vrednosti zatezno opterećenje od $\dagger = -10$ MPa.

Tabela 5.15 Numerički podaci: promena faktora intenziteta napona sa rastom prsline (desni kraj prsline)

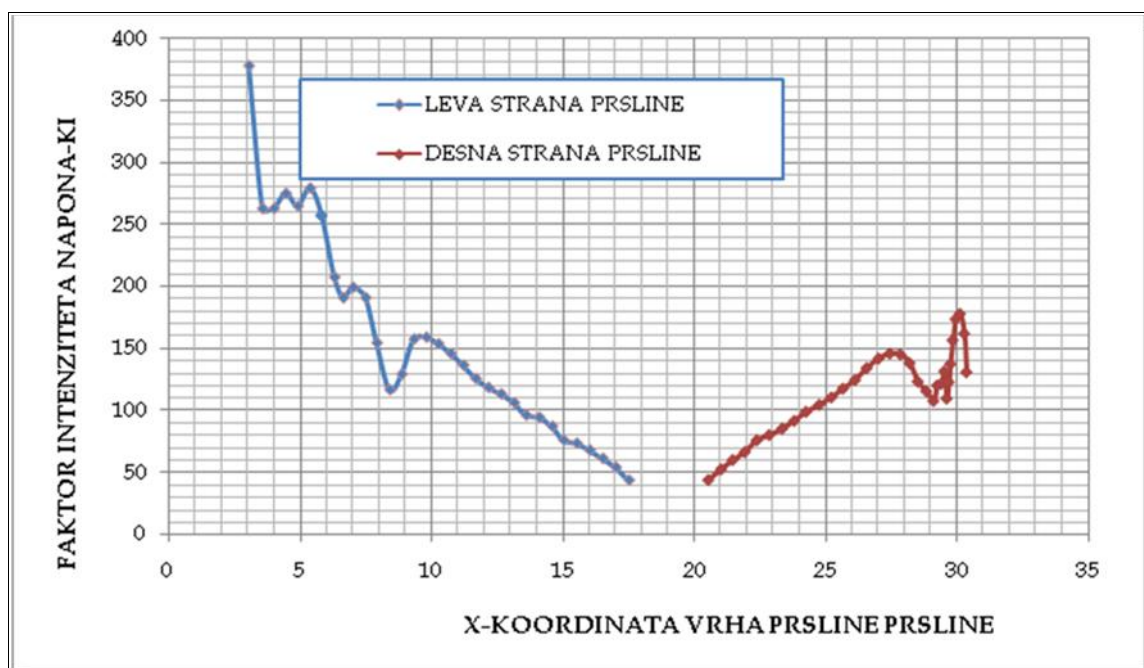
desna strana	x [mm]	y [mm]	K_I [MPa mm ^{0.5}]	K_{II} [MPa mm ^{0.5}]	K_{III} [MPa mm ^{0.5}]	K_{ekv} [MPa mm ^{0.5}]
korak 1	20.5	10	43.48581	-1.96052	-0.00552	43.55863
korak 2	20.98612	9.956274	52.06162	1.427381	0.033732	52.08641
korak 3	21.43211	9.940789	59.58902	-0.1239	0.052764	59.62115
korak 4	21.89227	9.922924	65.96201	0.434849	0.08367	66.02491
korak 5	22.34887	9.911126	75.51936	0.183458	0.094795	72.62514
korak 6	22.82828	9.901238	79.77305	0.450207	0.004949	79.84521
korak 7	23.32663	9.896563	84.94474	-0.23038	0.033747	84.90827

korak 8	23.78822	9.88972	91.26205	1.424903	-0.05277	91.32698
korak 9	24.24095	9.897259	98.5173	0.866877	-0.0136	98.61413
korak 10	24.73867	9.913889	104.1183	1.740658	0.446858	104.2098
korak 11	25.20719	9.945705	110.193	0.466947	0.882754	110.3015
korak 12	25.64922	9.979548	117.2795	0.613528	1.212672	117.3714
korak 13	26.10868	10.01685	124.1756	2.200629	2.763993	124.3537
korak 14	26.55756	10.07071	133.8298	-0.27531	3.901296	134.2827
korak 15	27.01246	10.1244	141.5914	2.99464	6.271485	142.7617
korak 16	27.43709	10.19144	145.6566	0.672111	11.647	148.7457
korak 17	27.83959	10.24837	144.9506	1.887174	22.02354	151.1297
korak 18	28.19614	10.32571	137.9345	-1.07293	35.36951	153.2248
korak 19	28.51285	10.37043	122.9547	6.204732	43.28425	150.3637
korak 20	28.84106	10.41073	115.2034	4.570507	47.23838	150.9562
korak 21	29.10621	10.5253	107.3289	-2.13504	51.72414	149.0067
korak 22	29.25215	10.60431	119.8598	-1.31871	5077484	157.766
korak 23	29.41551	10.6038	121.3377	-10.5105	47.07579	168.1388
korak 24	29.51848	10.58825	131.2915	15.47631	53.96088	167.559
korak 25	29.61166	10.68871	109.3089	-4.11712	46.32562	165.7412
korak 26	29.69397	10.70097	122.492	3.219454	60.18757	174.687
korak 27	29.75515	10.73983	137.231	-5.56897	65.51063	195.8379
korak 28	29.8461	10.74831	156.4098	-13.2456	64.64767	207.834
korak 29	29.96207	10.77865	173.437	7.44743	74.08811	217.4187
korak 30	30.11808	10.81532	177.6598	13.03324	73.34515	223.3122
korak 31	30.28042	10.8298	161.6665	-4.45135	66.67891	223.8328
korak 32	30.37234	10.88321	130.6031	-35.4572	40.52184	226.0398

Tabela 5.16 Numerički podaci: promena faktora intenziteta napona sa rastom prsline (levi kraj prsline)

leva strana	x [mm]	y [mm]	K_I [MPa mm ^{0.5}]	K_{II} [MPa mm ^{0.5}]	K_{III} [MPa mm ^{0.5}]	K_{ekv} [MPa mm ^{0.5}]
korak 1	17.5	10	43.71256	2.58725	-0.0001	43.89936
korak 2	17.00464	10.05845	54.02317	-1.95783	-0.01586	54.01345
korak 3	16.50645	10.0808	61.18174	1.091645	-0.00089	61.35659
korak 4	16.00985	10.12069	67.93631	0.4358	-0.03088	67.96648
korak 5	15.51364	10.167	73.45807	0.019761	0.122614	73.46116
korak 6	15.0168	10.21147	75.92496	2.844718	0.07193	78.70934
korak 7	14.58384	10.26524	87.10749	-1.26861	0.040116	89.49396
korak 8	14.087	10.31477	94.31271	0.721637	0.178088	95.97789
korak 9	13.59221	10.37172	96.10383	0.186787	-0.00773	100.9624

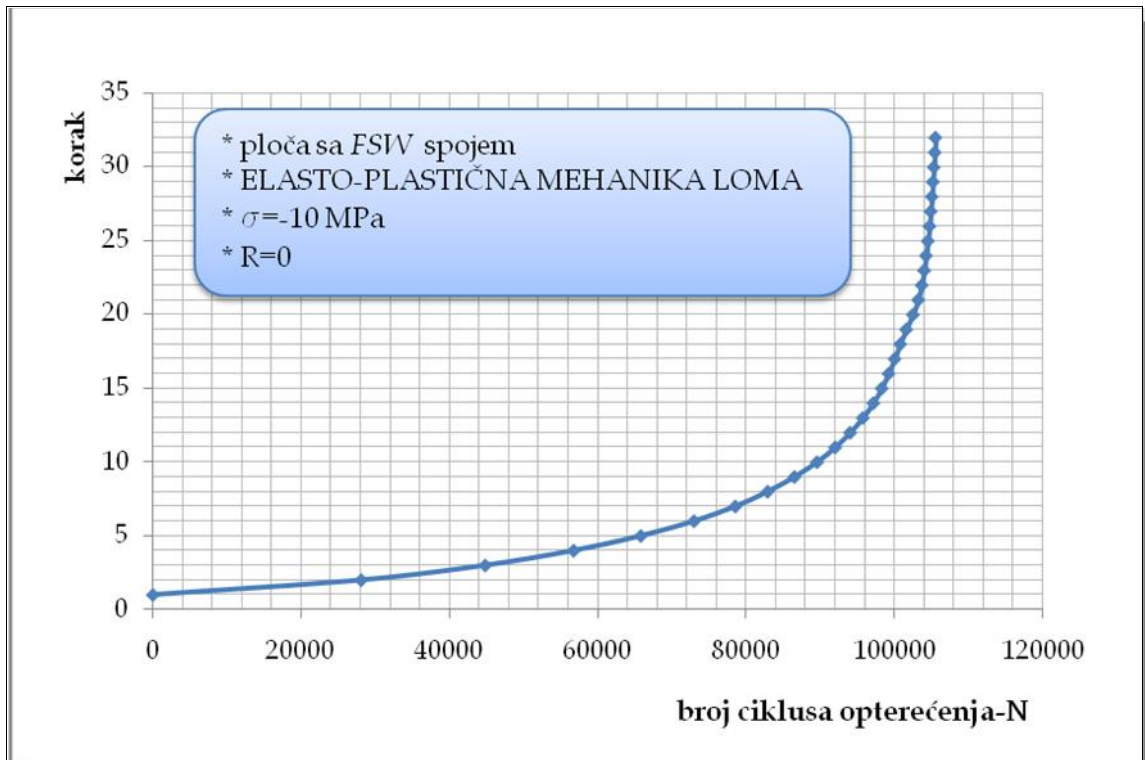
korak 10	13.13348	10.42626	106.1263	-1.74511	-3.22186	107.0356
korak 11	12.63804	10.46308	113.1813	0.265276	-6.52358	114.9459
korak 12	12.15333	10.53038	118.3953	2.776944	-10.6466	120.8648
korak 13	11.67499	10.59917	125.6988	2.864039	-10.2392	128.2862
korak 14	11.20161	10.67279	136.3432	0.555757	-9.9372	138.3855
korak 15	10.7205	10.76169	145.9046	2.517951	-10.615	149.5756
korak 16	10.25068	10.84691	153.5439	1.975566	-10.9503	156.1111
korak 17	9.790916	10.94285	158.8883	4.539608	-13.8764	164.6776
korak 18	9.320946	11.01656	157.4176	-1.39292	-30.4153	173.6211
korak 19	8.859283	11.0018	129.0726	-6.05317	-64.9384	171.4339
korak 20	8.398064	11.00328	116.5437	7.69949	-76.1535	165.0801
korak 21	7.908947	11.00855	154.3143	8.477892	-68.3355	198.7575
korak 22	7.483941	11.10994	190.7459	-9.90229	-45.3974	220.6202
korak 23	7.001381	11.17255	199.1164	-10.3772	-55.0746	233.0691
korak 24	6.632134	11.14661	190.6766	14.83453	-63.2391	230.1156
korak 25	6.297473	11.19488	207.3039	11.84239	-65.5668	247.9256
korak 26	5.815233	11.32751	257.438	-5.99453	-45.8372	284.4368
korak 27	5.374053	11.39277	279.226	-10.3269	-21.776	298.7727
korak 28	4.908677	11.45829	264.6468	9.802522	-45.5573	295.814
korak 29	4.448101	11.56807	274.7561	17.64993	-50.8456	306.6074
korak 30	3.996428	11.71773	262.7231	-38.4444	-77.6109	320.5178
korak 31	3.561982	11.86779	262.5865	-10.4269	-112.781	321.2851
korak 32	3.040136	11.91814	377.7862	72.04499	-38.7924	363.7968



Slika 5.25 Dijagram: promena faktora intenziteta napona sa rastom prsline

Tabela 5.17 Numerički podaci: širenje prsline u funkciji od broja ciklusa opterećenja- N

korak	deltaN	N
1	0	0
2	28100.6	28100.6
3	16743.3	44843.9
4	11929	56772.9
5	9073.33	65846.23
6	7170.8	73017.03
7	5583.47	78600.5
8	4355.69	82956.19
9	3621.4	86577.59
10	3050.74	89628.33
11	2441.18	92069.51
12	2024.28	94093.79
13	1716.49	95810.28
14	1408.46	97218.74
15	1130.81	98349.55
16	932.906	99282.456
17	820.004	100102.46
18	742.806	100845.266
19	811.889	101657.155
20	909.797	102566.952
21	715.494	103282.446
22	460.387	103742.833
23	326.803	104069.636
24	248.564	104318.2
25	258.818	104577.018
26	220.75	104797.768
27	154.39	104952.158
28	146.934	105099.092
29	145.712	105244.804
30	135.324	105380.128
31	128.381	105508.509
32	86.1654	105594.674

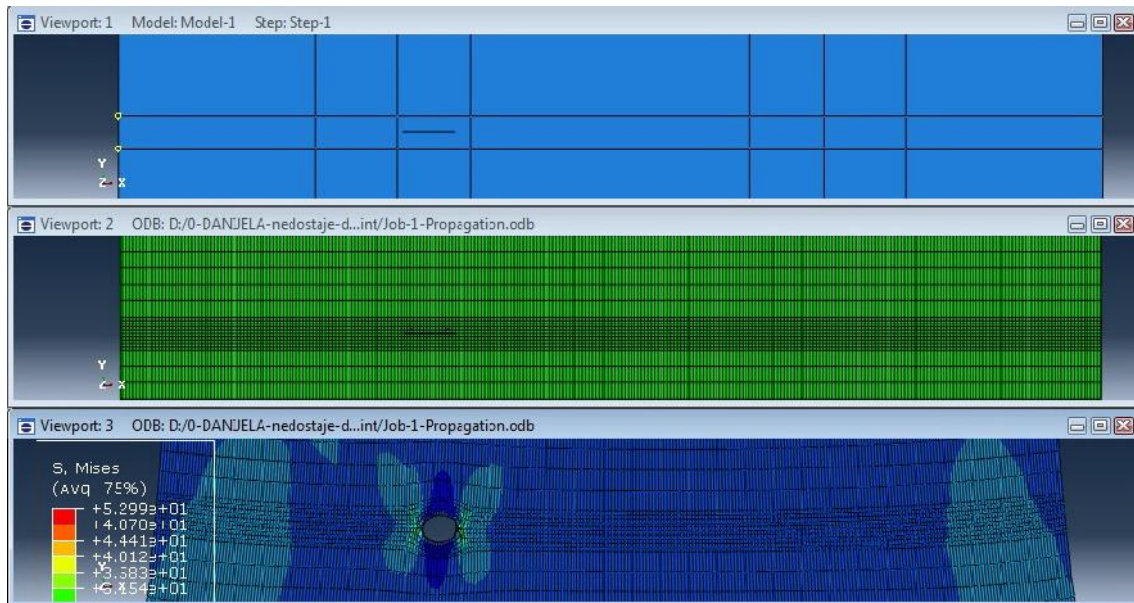


Slika 5.26 Dijagram: širenje prsline u funkciji od broja ciklusa opterećenja- N

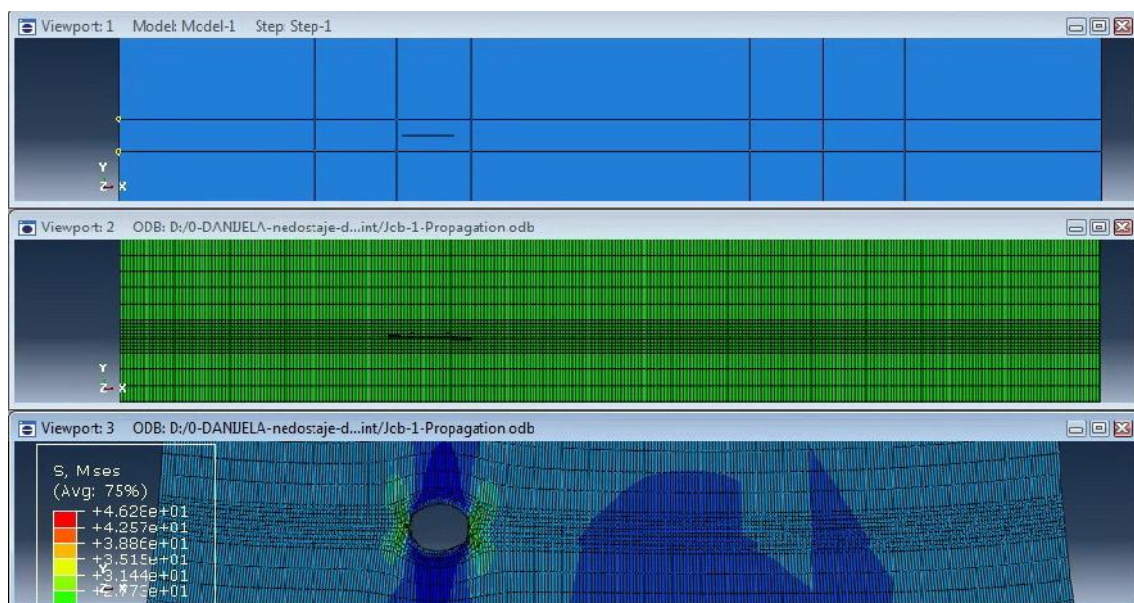
Primenom nižih vrednosti zateznog opterećenja, konstrukcija može biti izložena većem broju ciklusa opterećenja- N , pre nego što se javi nestabilan rast prsline, koji vodi ka lomu.

Na sledećim slikama (slika 5.27-a do 5.27-f) dat je uporedni prikaz:

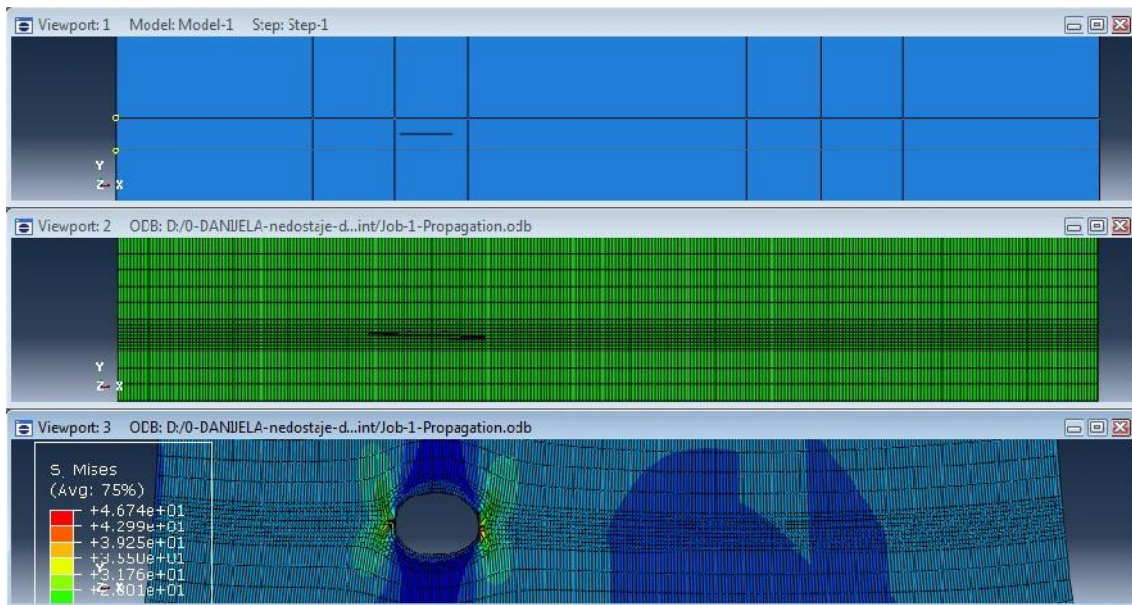
1. nedeformisanog modela sa inicijalnom prslinom,
2. nedeformisanog modela sa prslinom u datom trenutku (koraku) i
3. deformisanog modela sa prslinom u datom trenutku (koraku) sa raspodela *Von Mises*-ovog napona.



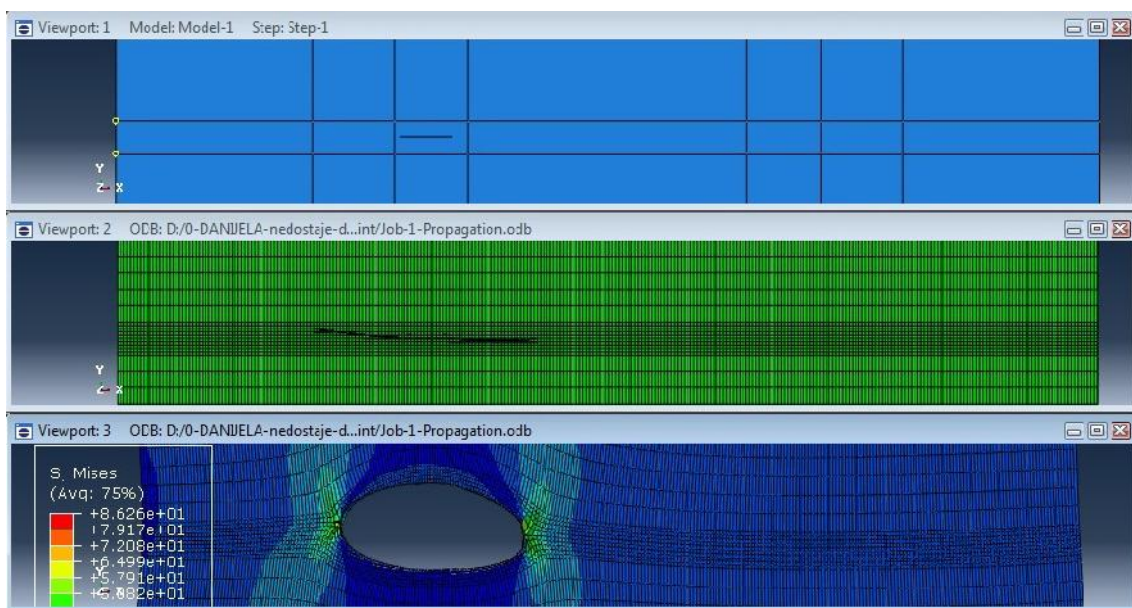
Slika 5.27-a Konačno-elementna mreža 3D modela FSW spoja sa inicijalnom prslinom $2a_0 = 3 \text{ mm}$



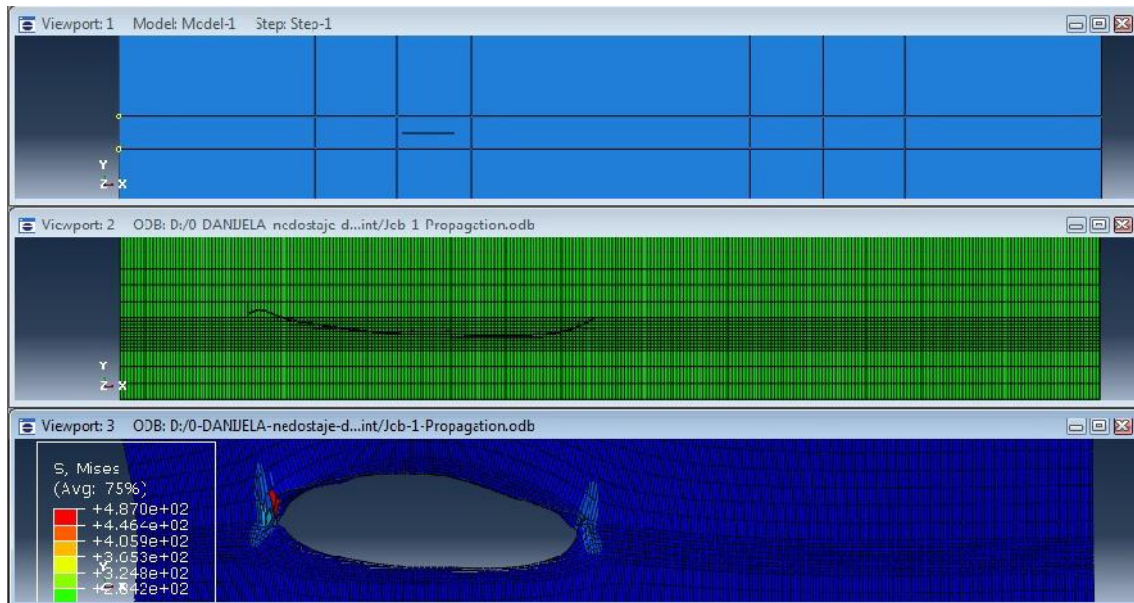
Slika 5.27-b Konačno-elementna mreža 3D modela FSW spoja korak 2-pri progresiji prsline $\Delta a_{\max} = 2 \text{ mm}$



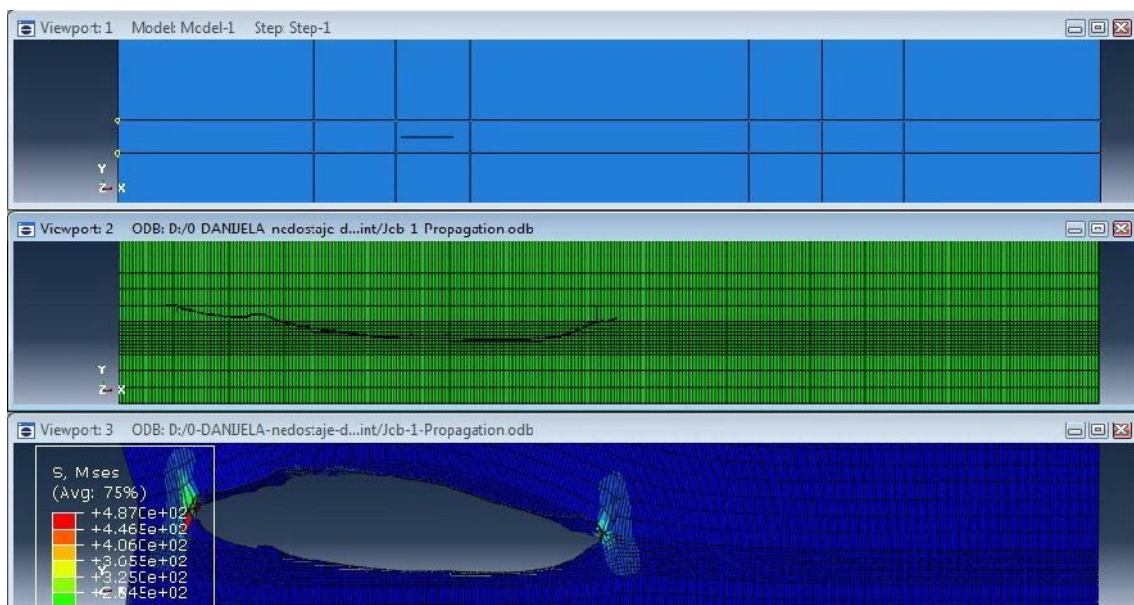
Slika 5.27-c Konačno-elementna mreža 3D modela FSW spoja
korak 4-pri progresiji prsline $\Delta a_{\max} = 4 \text{ mm}$



Slika 5.27-d Konačno-elementna mreža 3D modela FSW spoja
korak 11-pri progresiji prsline $\Delta a_{\max} = 11 \text{ mm}$



Slika 5.27-e Konačno-elementna mreža 3D modela FSW spoja
korak 20-pri progresiji prsline $\Delta a_{\max} = 20 \text{ mm}$



Slika 5.27-f Konačno-elementna mreža 3D modela FSW spoja
korak 31-pri progresiji prsline $\Delta a_{\max} = 31 \text{ mm}$

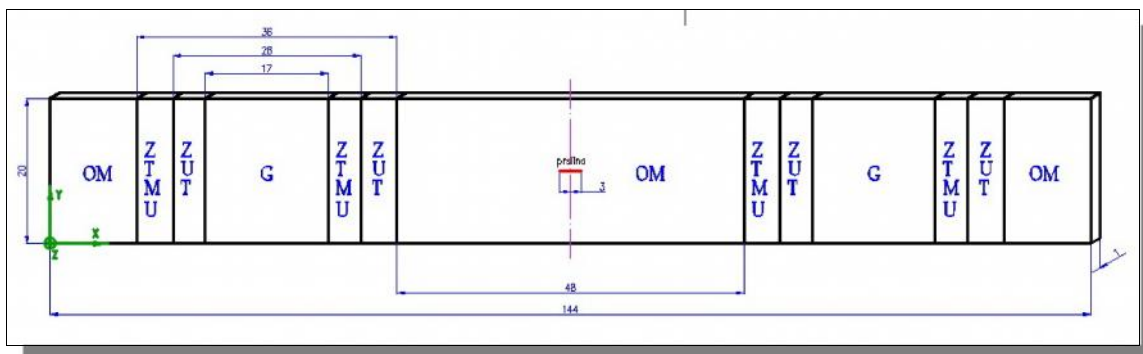
Na osnovu prethodno prikazane analize moguće je zaključiti sledeće:

- maksimalni napon se formira u okolini vrha prsline i dostiže maksimalnu vrednost napona u datoj zoni (videti tabelu 3.4),

- prslina u određenom trenutku menja pravac kretanja (skreće sa pravolinijske putanje), što je posledica deformacije strukture usled loma (širenja prsline). Samim tim, zatezno opterećenje ima i drugu komponentu, tako da se osim zateznog opterećenja i moda I, javljaju i preostali modovi.

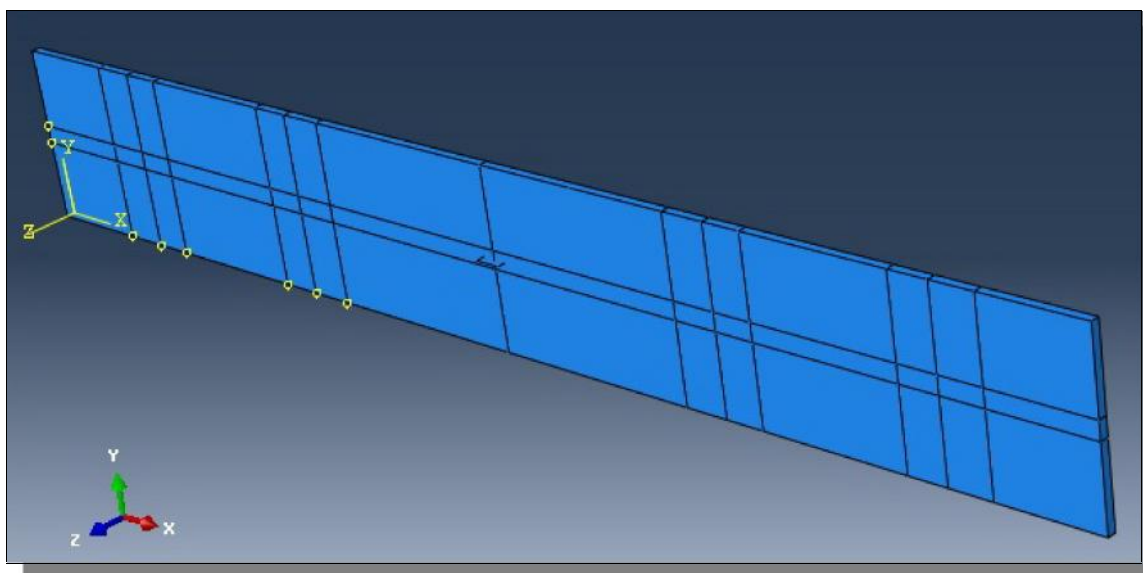
5.2.4. Primer br.4: ploča sa dva FSW spoja (nejačana struktura)

Kao primer daljeg proračuna usvojen je model ploče dimenzija $1 \times 20 \times 144 \text{ mm}$, sa dva FSW spoja. U strukturu je uvedena prolazna inicijalna prslina dužine $2a_0 = 3 \text{ mm}$ između dva spoja, tako da se ne narušava simetričnost (slika 5.28).



Slika 5.28 Ploča sa dva FSW spoja

U *Abaqus*-u je izvršeno modeliranje ploče (slika 5.29). Za svaku od zona spoja unete su karakteristike materijala (iz tabele 3.3, 3.4 i 3.5).



Slika 5.29 3D model ploče sa dva FSW spoja

Analizirano je dinamičko (zamorno) opterećenje, pri koeficijentu asimetrije $R = 0$ i to za dva različita slučaja opterećenja:

1. pri dejstvu većeg zateznog opterećenja $\uparrow = -270 \text{ MPa}$, odnosno

2. pri dejstvu manjeg zateznog opterećenja $\dagger = -10 \text{ MPa}$ (visokociklični zamor)

5.2.4.1. Ploča sa dva FSW spoja (neojačana struktura) izložena dejstvu većeg zateznog opterećenja

Na konstrukciju je primenjeno zatezno opterećenje $\dagger = -270 \text{ MPa}$.

Analizom u *Abaqus/Morfeo software*-ima, dobijaju se sledeći podaci:

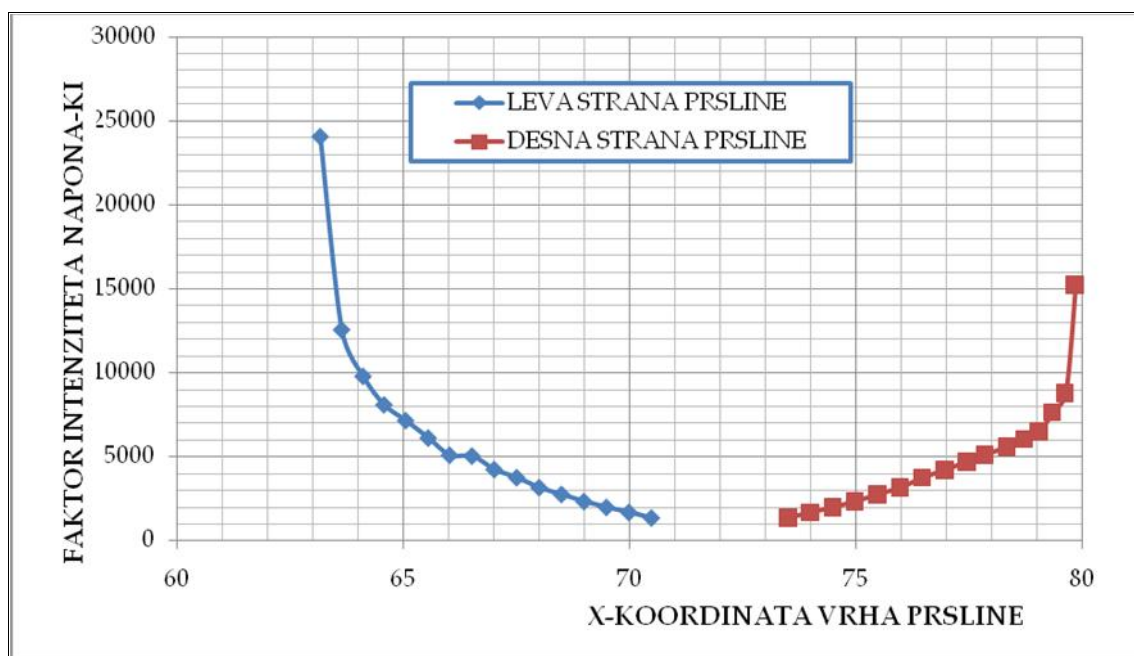
Tabela 5.18 Numerički podaci: promena faktora intenziteta napona sa rastom prsline (levi kraj prsline)

leva strana	x [mm]	y [mm]	K_I [MPa mm ^{0.5}]	K_{II} [MPa mm ^{0.5}]	K_{III} [MPa mm ^{0.5}]	K_{ekv} [MPa mm ^{0.5}]
korak 1	70.5	10	1374.818	9.290982	-0.77586	1377.252
korak 2	70.0031	10.00676	1707.02	0.112497	0.598182	1711.423
korak 3	69.50582	10.01356	2004.464	15.46496	2.029395	2004.168
korak 4	69.0097	10.02803	2352.622	5.879092	-0.11266	2361.227
korak 5	68.51374	10.04498	2773.78	8.5342	3.920178	2772.527
korak 6	68.01801	10.06515	3177.776	20.63519	8.210324	3184.776
korak 7	67.52471	10.09126	3772.814	21.32252	17.13396	3784.849
korak 8	67.02626	10.12424	4256.042	16.71589	34.73516	4263.211
korak 9	66.53636	10.15927	5056.443	49.28418	96.00602	5068.931
korak 10	66.04175	10.20438	5109.351	320.5141	71.28201	5171.575
korak 11	65.5685	10.29199	6126.325	-150.301	105.2426	6247.767
korak 12	65.07109	10.36617	7166.063	142.1162	209.4027	7272
korak 13	64.59294	10.44131	8106.941	697.9463	55.31991	8223.615
korak 14	64.12946	10.56224	9796.062	-49.6452	-380.837	10108.31
korak 15	63.65527	10.68896	12568.59	51.48752	-632.82	12702.26
korak 16	63.18318	10.81535	24051.58	1631.03	-747.792	23320.38

Tabela 5.19 Numerički podaci: promena faktora intenziteta napona sa rastom prsline (desni kraj prsline)

desna strana	x [mm]	y [mm]	K_I [MPa mm ^{0.5}]	K_{II} [MPa mm ^{0.5}]	K_{III} [MPa mm ^{0.5}]	K_{ekv} [MPa mm ^{0.5}]
korak 1	73.5	10	1374.218	9.310411	0.489979	1375.811
korak 2	73.99675	10.00677	1706.365	-1.53173	0.312578	1712.239
korak 3	74.49326	10.01258	2002.163	21.93232	1.383046	2003.085
korak 4	74.98751	10.02905	2349.143	0.434999	-7.18246	2358.981

korak 5	75.48189	10.0461	2780.082	10.49507	-18.4795	2779.136
korak 6	75.97994	10.06593	3178.802	21.23036	-45.6086	3188.234
korak 7	76.47493	10.09433	3765.725	28.7282	-79.8567	3779.808
korak 8	76.96907	10.12643	4238.74	8.981747	-175.838	4261.941
korak 9	77.45636	10.17265	4717.065	155.5111	-333.179	4759.011
korak 10	77.86218	10.21387	5133.151	88.06008	-558.734	5252.675
korak 11	78.34282	10.30179	5598.146	88.73893	-778.432	5857.94
korak 12	78.73488	10.36962	6056.973	44.25613	-1403.86	6641.086
korak 13	79.04968	10.46449	6491.041	125.899	-2083.57	7322.094
korak 14	79.35096	10.51334	7648.807	-481.71	-2553.07	8737.243
korak 15	79.63528	10.57503	8775.786	581.8898	-3186.2	10363.27
korak 16	79.85494	10.61834	15228.62	554.3504	-6359.1	18837.76



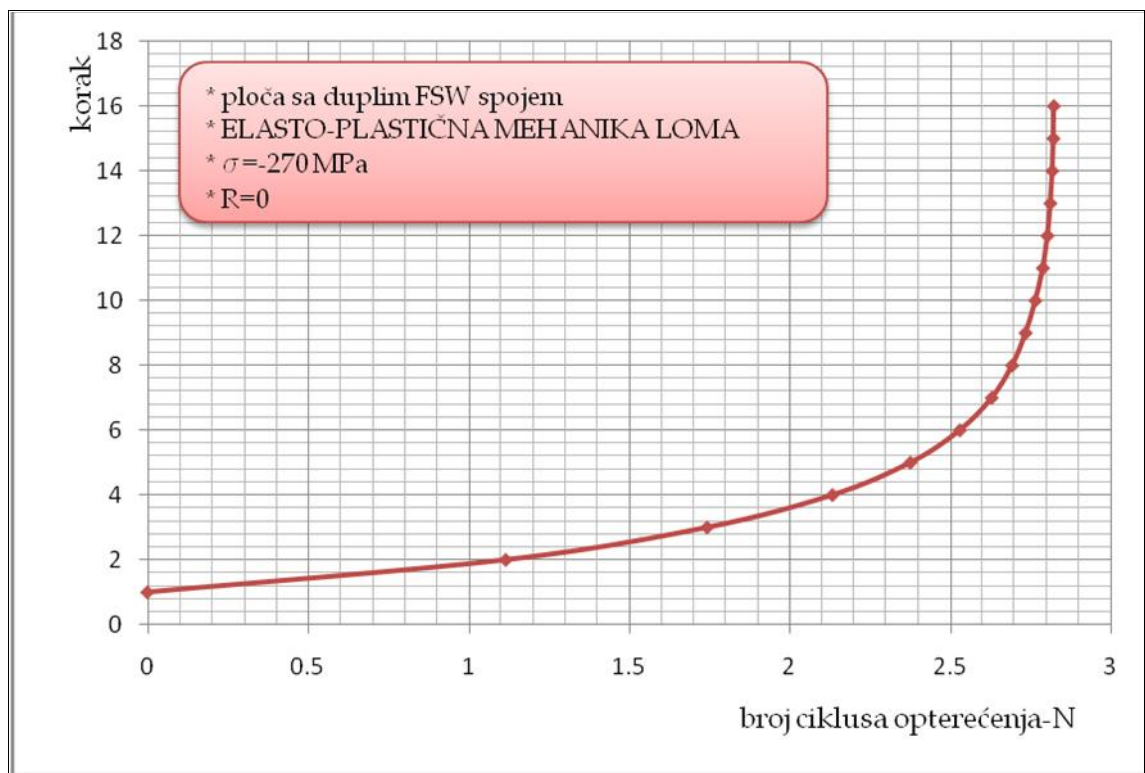
Slika 5.30 Dijagram: promena faktora intenziteta napona sa rastom prsline

U toku svoje stabilne faze (stabilan rast prsline) prsline ne prelazi u preostale zone *FSW* spoja, već se širi unutar osnovnog materijala.

Posle određenog broja koraka, tj. perioda stabilnog širenja prsline, manifestuje se nagli „skok“ faktora intenziteta napona i na levom i na desnom kraju prsline, a što ukazuje na njen rapidan (nestbilan) rast, koji vodi ka lomu konstrukcije.

Tabela 5.20 Numerički podaci: širenje prsline u funkciji od broja ciklusa opterećenja- N

korak	deltaN	N
1	0	0
2	1.11533	1.11533
3	0.626252	1.741582
4	0.390315	2.131897
5	0.242444	2.374341
6	0.154062	2.528403
7	0.0993296	2.6277326
8	0.0635876	2.6913202
9	0.041849	2.7331692
10	0.0302488	2.763418
11	0.0234582	2.7868762
12	0.014452	2.8013282
13	0.00915399	2.81048219
14	0.00592284	2.81640503
15	0.00329831	2.81970334
16	0.00122484	2.82092818



Slika 5.28 Dijagram: širenje prsline u funkciji od broja ciklusa opterećenja- N

Naravno i kod ovog primera uočava se izuzetno mali broj primenjenih ciklusa opterećenja- N (niskociklično opterećenje). Ovaj slučaj se može posmatrati gotovo kao širenje prsline pod dejstvom statičkog opterećenje, jer se zbog visine intenziteta primenjenog zateznog napona prsline rapidno (nestabilno) širi.

5.2.4.2. Ploča sa dva FSW spoja (neojačana struktura) izložena dejstvu manjeg zateznog opterećenja

Analizirano je ponašanje konstrukcije sa dva FSW spoja pod dejstvom zamornog opterećenja sa manjim vrednostima napona: $\dagger = -10 \text{ MPa}$.

U slučaju visokocikličnog zamora (manje opterećenje, veći broj primenjenih ciklusa opterećenja) dobijaju se sledeći podaci:

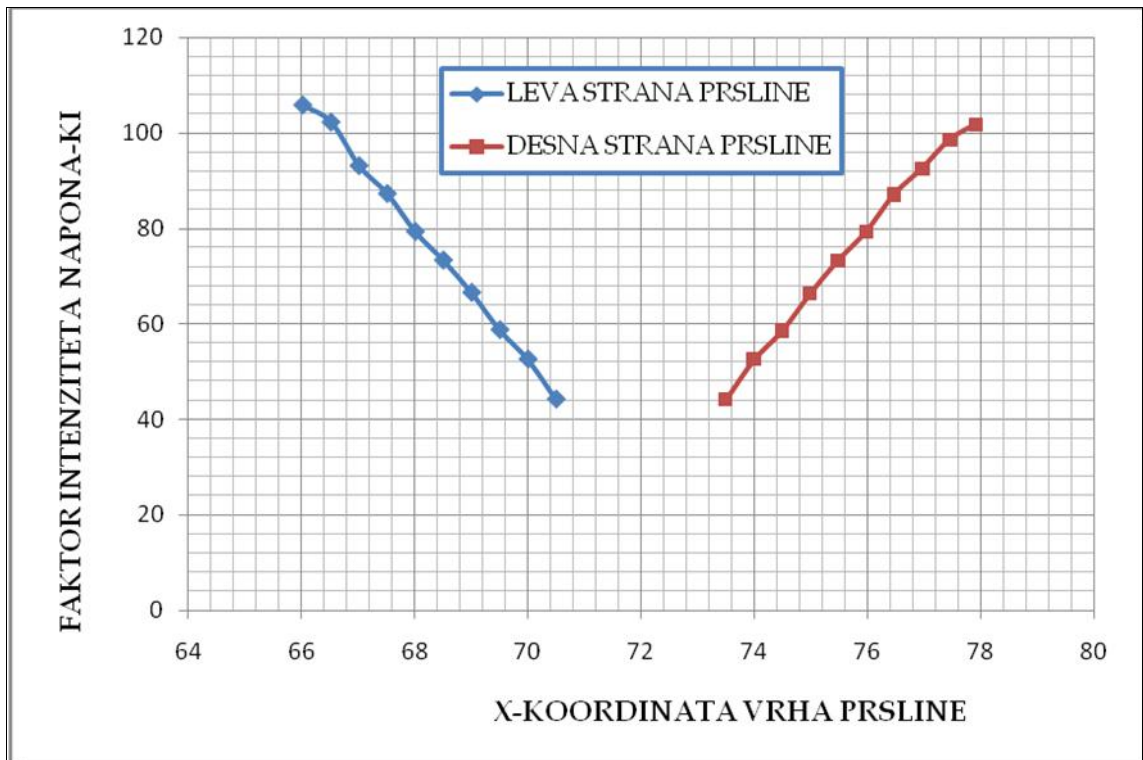
Tabela 5.21 Numerički podaci: promena faktora intenziteta napona sa rastom prsline (levi kraj prsline)

leva strana	x [mm]	y [mm]	K_I [MPa mm ^{0.5}]	K_{II} [MPa mm ^{0.5}]	K_{III} [MPa mm ^{0.5}]	K_{ekv} [MPa mm ^{0.5}]
korak 1	70.5	10	44.18988	0.200514	-0.02486	44.2608
korak 2	70.00308	10.00454	52.57806	-0.00666	0.000707	52.70743
korak 3	69.50551	10.00897	58.75426	0.297365	0.014445	58.76028
korak 4	69.00779	10.01852	66.56618	0.086557	0.048456	66.79225
korak 5	68.50962	10.02932	73.35788	0.245975	0.019613	73.32099
korak 6	68.01248	10.04356	79.37852	0.896758	0.035976	79.68473
korak 7	67.51837	10.06883	87.34881	-0.21448	0.156039	87.69121
korak 8	67.02032	10.09214	93.18851	0.349592	0.382237	93.36657
korak 9	66.5252	10.11846	102.3447	1.873158	0.505289	102.6901
korak 10	66.02802	10.16415	105.9199	0.749744	0.916776	106.185

Tabela 5.22 Numerički podaci: promena faktora intenziteta napona sa rastom prsline (desni kraj prsline)

desna strana	x [mm]	y [mm]	K_I [MPa mm ^{0.5}]	K_{II} [MPa mm ^{0.5}]	K_{III} [MPa mm ^{0.5}]	K_{ekv} [MPa mm ^{0.5}]
korak 1	73.5	10	44.17037	0.201249	0.015724	44.21612
korak 2	73.99675	10.00457	52.54249	-0.07066	0.012236	52.72886
korak 3	74.49305	10.00773	58.57538	0.52168	0.078838	58.6223

korak 4	74.98649	10.01951	66.34716	-0.38624	-0.18848	66.70491
korak 5	75.48022	10.02599	73.31177	1.147647	-0.25006	73.28491
korak 6	75.97631	10.04676	79.34246	-0.05583	-1.38131	79.82144
korak 7	76.47105	10.06994	87.1375	0.89349	-2.39465	87.46488
korak 8	76.9652	10.09858	92.58274	0.469445	-4.51923	93.33622
korak 9	77.45338	10.1519	98.58958	1.05176	-9.89855	100.1579
korak 10	77.90766	10.18792	101.778	1.90337	-11.9482	104.624

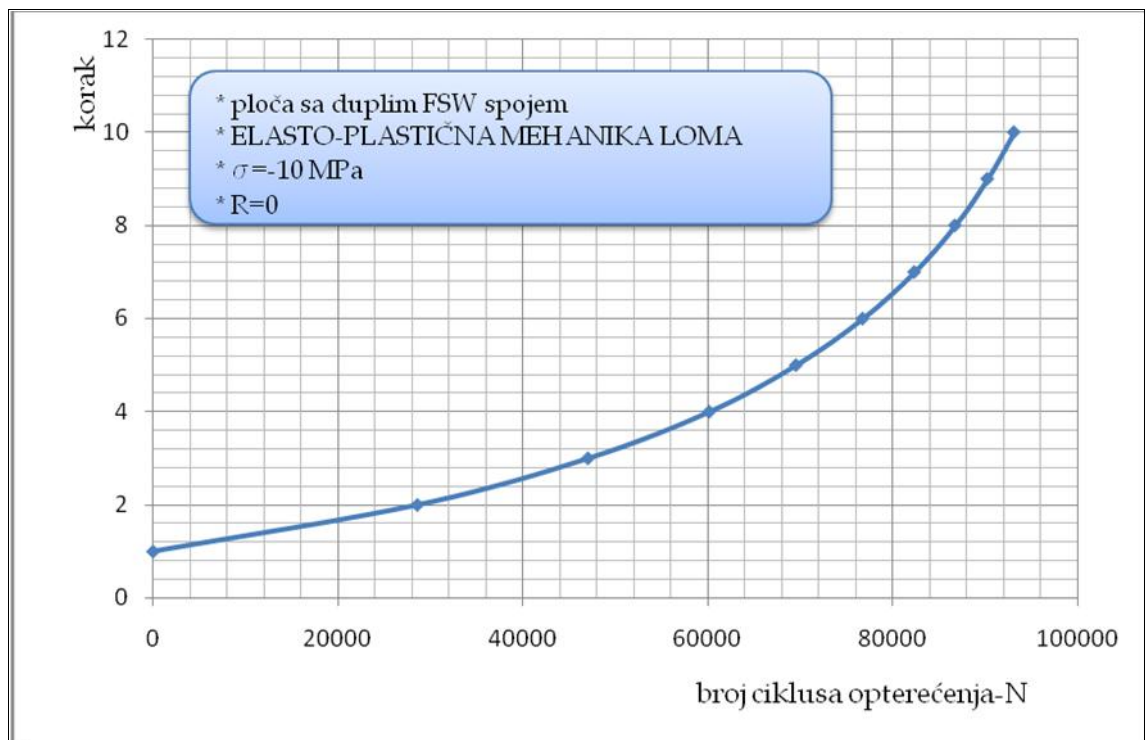


Slika 5.32 Dijagram: promena faktora intenziteta napona sa rastom prsline

Na priloženim dijagramima uočava se stabilan, postepen rast prsline.

Tabela 5.23 Numerički podaci: širenje prsline u funkciji od broja ciklusa opterećenja- N

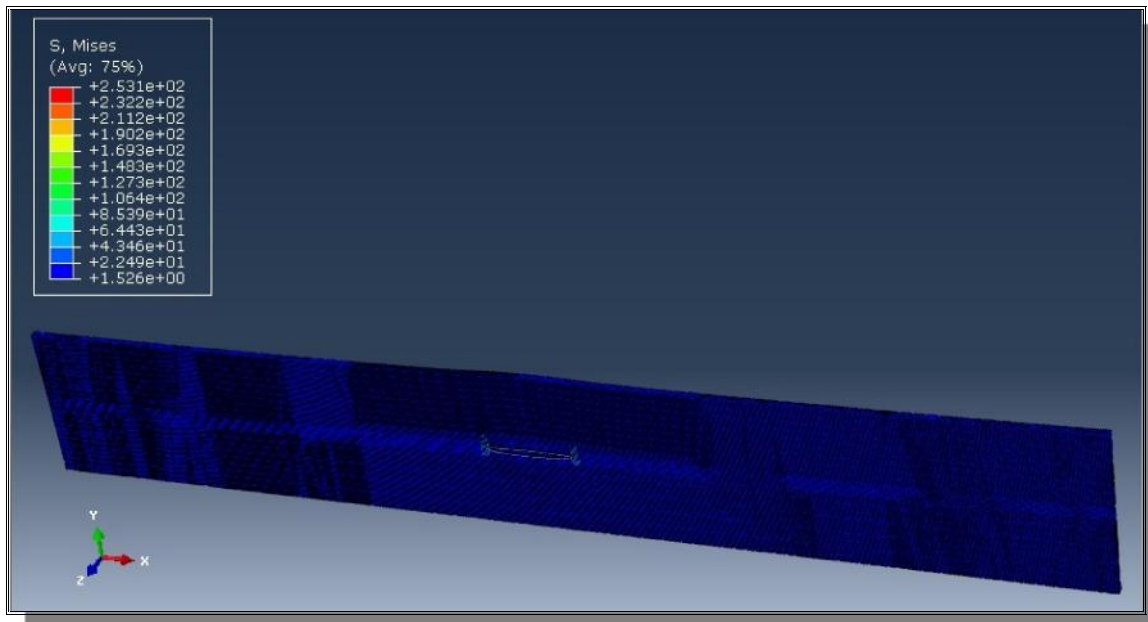
korak	deltaN	N
1	0	0
2	28596.4	28596.4
3	18474.3	47070.7
4	13115.2	60185.9
5	9397.46	69583.36
6	7206.67	76790.03
7	5592.53	82382.56
8	4403.08	86785.64
9	3501.64	90287.28
10	2874.6	93161.88



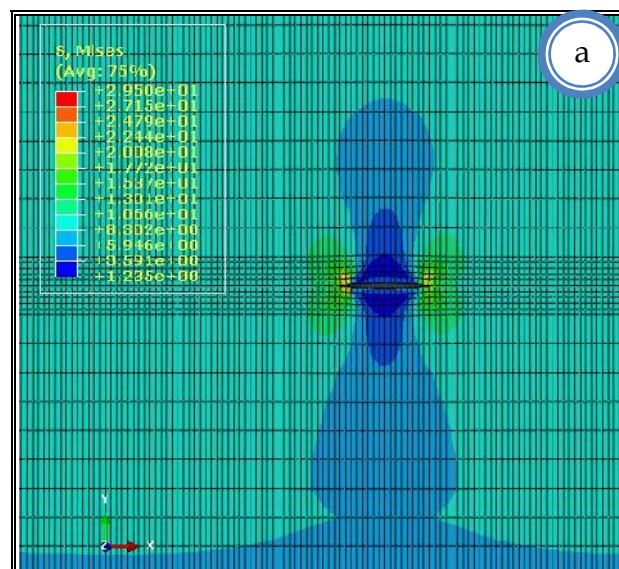
Slika 5.33 Dijagram: širenje prsline u funkciji od broja ciklusa opterećenja- N

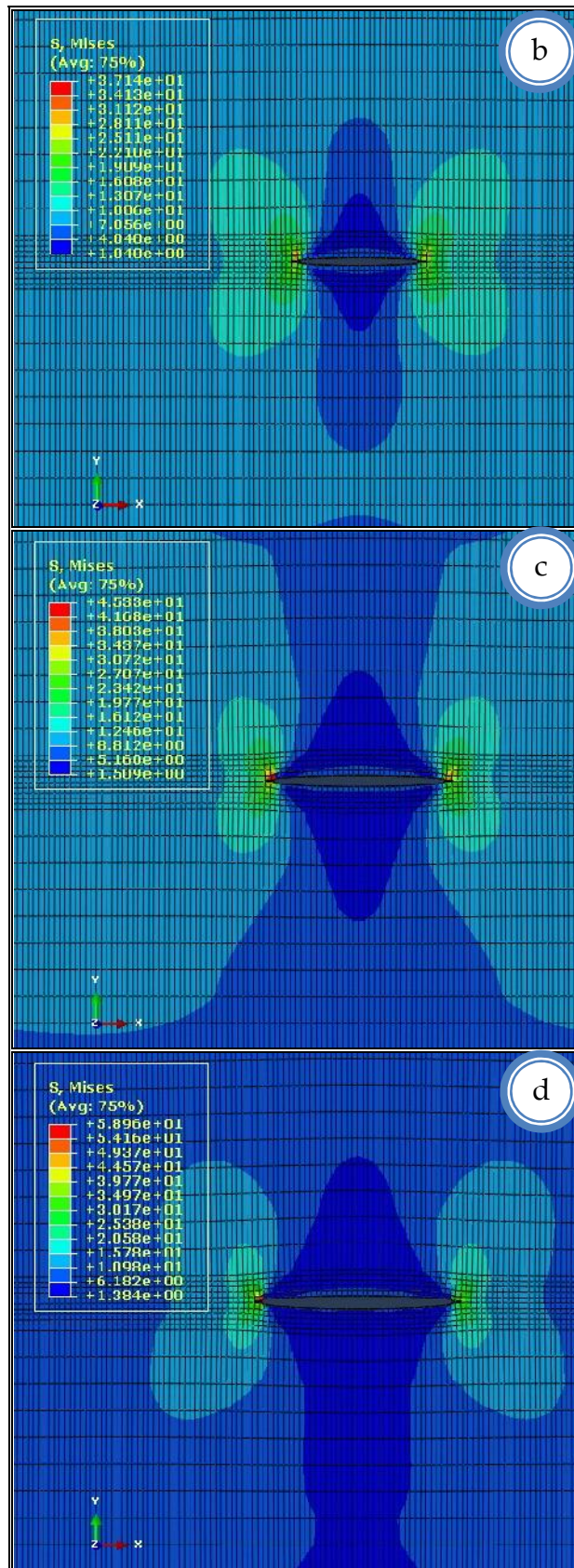
Kod modela ploče sa dva FSW spoja, posmatrano je širenje prsline u domenu osnovnog materijala, između dva FSW spoja.

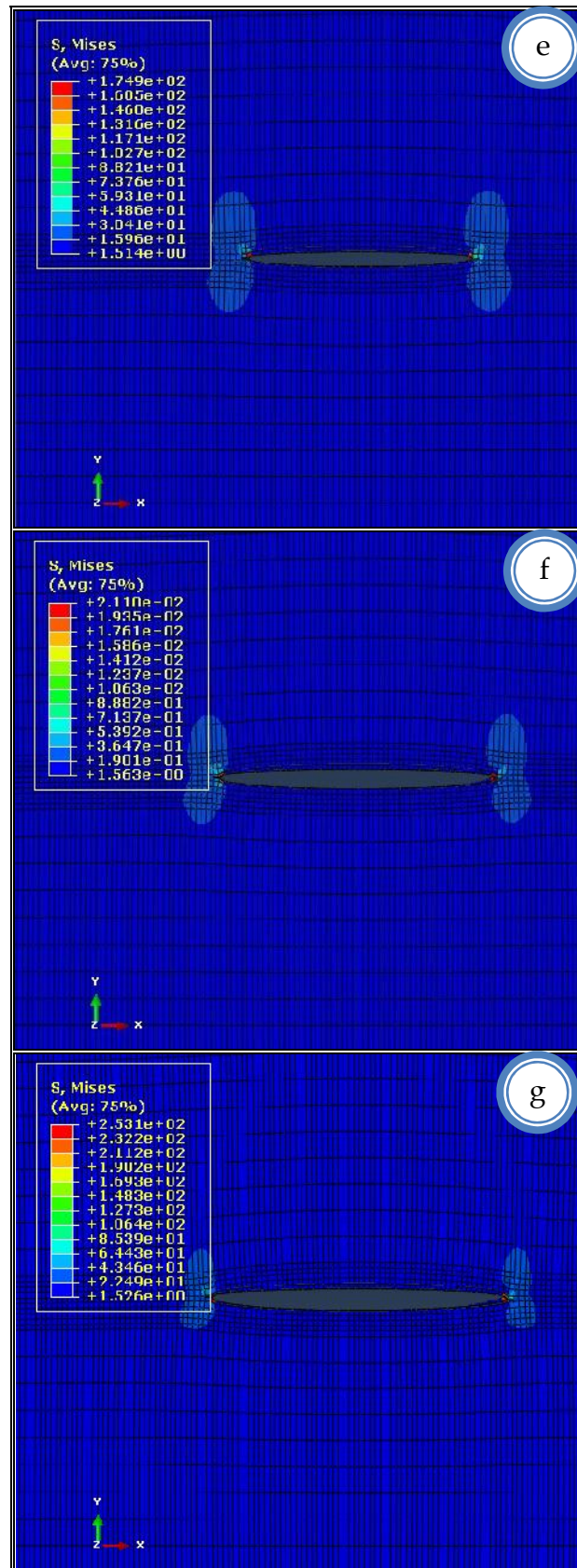
Na sledećim slikama data je raspodela Von Mises napona u strukturi, u nekoliko sukcesivnih koraka širenja.



Slika 5.34 Raspodela Von Mises napona kod ploče sa dva FSW spoja







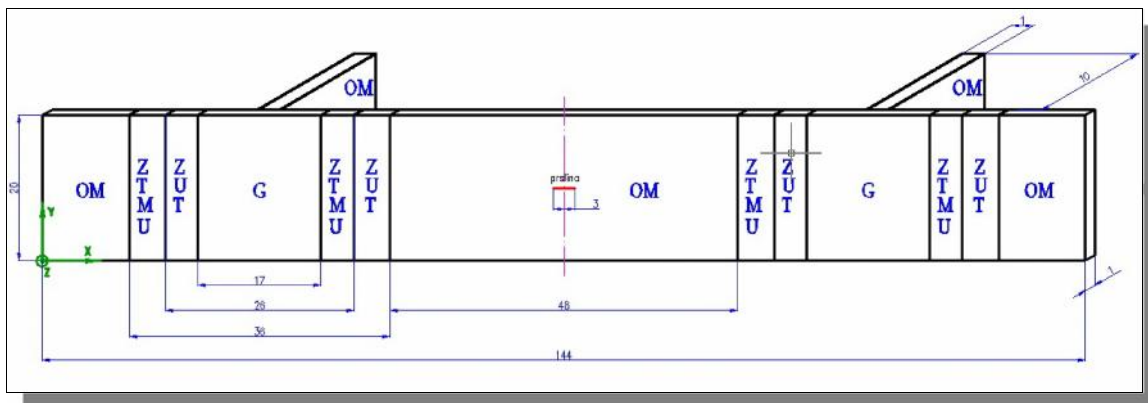
Slika 5.35 Progresija prsline između dva FSW spoja
raspodela Von Mises-ovih napona u okolini vrhova prsline

- a. korak 0*
- b. korak 2*
- c. korak 4*
- d. korak 5*
- e. korak 6*
- f. korak 8*
- g. korak 9*

Na slikama 5.35 (od 5.35a-5.35g) sve deformacije su prikazane sa tzv. faktorom uvećanja (100 puta).

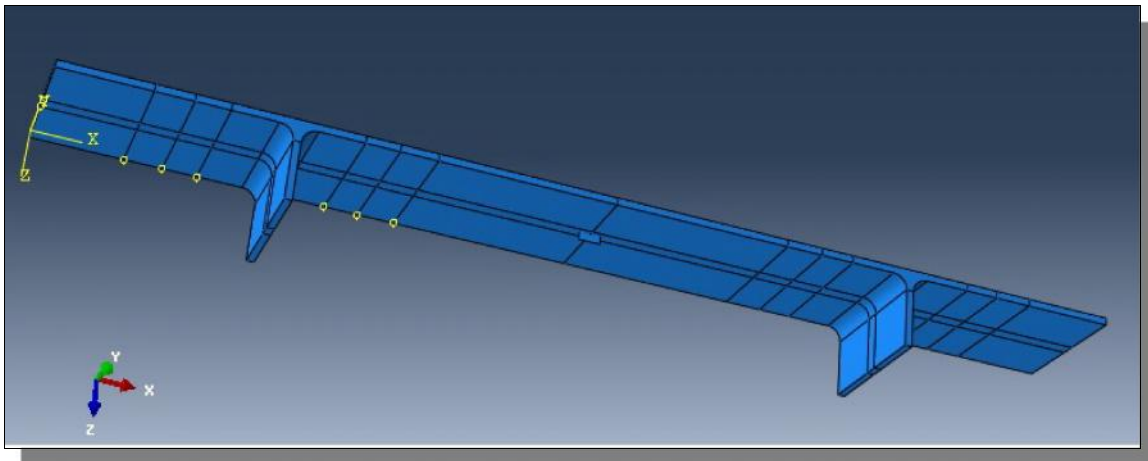
5.2.5. Primer br.5: ploča sa dva FSW T-spoja (ojačana struktura)

Prethodno ispitivana ploča sa dva FSW spoja, dodatno je ojačana sa dva T-spoja povezana sa pločom FSW postupkom (tzv. FSW T-spoj). Geometrijske mere su date na slici 5.36.



Slika 5.36 Ploča ojačana sa dva FSW T-spoja

Potom je izvršeno 3D modeliranje (slika 5.37), sa definisanjem: karakteristika materijala, opterećenja i graničnih uslova.



Slika 5.37 3D model ploče ojačane sa dva FSW T-spoja

I kod ovog modela analizirani su uticaji:

1. niskocikličnog i
2. visokocikličnog zamornog opterećenja.

5.2.5.1. Ploča sa dva FSW T-spoja (ojačana struktura) izložena dejstvu većeg zateznog opterećenja

Primenjeni napon je intenziteta $\dagger = -270 \text{ MPa}$.

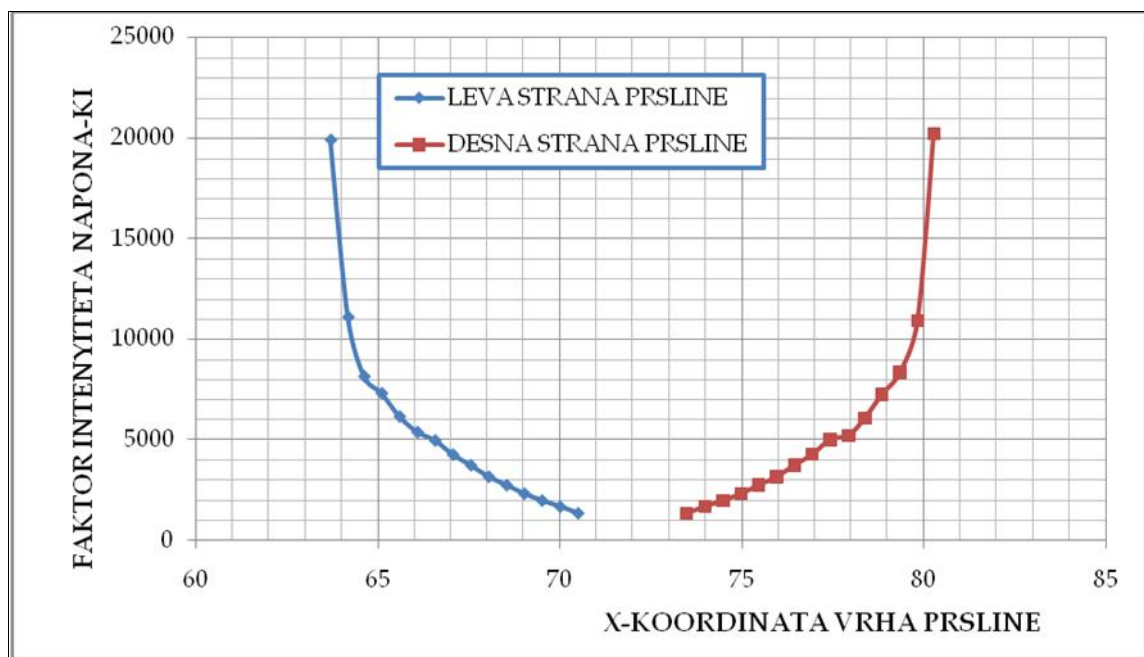
Tabela 5.24 Numerički podaci: promena faktora intenziteta napona sa rastom prsline (levi kraj prsline)

leva strana	x [mm]	y [mm]	K _I [MPa mm ^{0.5}]	K _{II} [MPa mm ^{0.5}]	K _{III} [MPa mm ^{0.5}]	K _{ekv} [MPa mm ^{0.5}]
korak 1	70.5	10	1379.519	11.96667	2.769037	1380.987
korak 2	70.00665	10.00857	1707.997	-5.75218	-0.02053	1712.546
korak 3	69.50936	10.01383	2008.302	20.52614	4.892032	2009.413
korak 4	69.01922	10.0291	2350.873	1.454398	-0.62923	2357.784
korak 5	68.53378	10.0447	2773.498	9.229958	-3.01633	2779.507
korak 6	68.04161	10.06412	3192.059	23.30958	-3.91823	3195.562
korak 7	67.55057	10.09013	3760.385	5.140441	-32.6163	3774.678
korak 8	67.05951	10.11873	4291.625	39.0058	-47.4168	4301.316
korak 9	66.56807	10.15436	4994.479	-3.81559	-136.885	5036.77
korak 10	66.08071	10.19295	5408.598	263.7405	-3.17539	5424.058
korak 11	65.59246	10.26405	6181.849	102.7304	-82.6665	6297.388
korak 12	65.09811	10.34578	7338.482	-9.40266	-48.2834	7457.198
korak 13	64.62029	10.43622	8173.664	453.1047	49.33813	8366.499
korak 14	64.17953	10.5561	11118.07	-137.099	-35.0431	11188.15
korak 15	63.69962	10.67492	19917.9	1333.884	-298.615	20212.82

Tabela 5.25 Numerički podaci: promena faktora intenziteta napona sa rastom prsline (desni kraj prsline)

desna strana	x [mm]	y [mm]	K _I [MPa mm ^{0.5}]	K _{II} [MPa mm ^{0.5}]	K _{III} [MPa mm ^{0.5}]	K _{ekv} [MPa mm ^{0.5}]
korak 1	73.5	10	1380.412	10.73161	-1.08353	1381.583
korak 2	73.99538	10.00774	1708.006	-3.53592	-0.05448	1710.904
korak 3	74.49156	10.01335	2014.15	19.47255	-8.20621	2013.548
korak 4	74.98744	10.02861	2344.686	4.863504	-0.25838	2352.477
korak 5	75.46848	10.04538	2774.63	2.617907	-1.06733	2777.676
korak 6	75.96273	10.06357	3180.131	31.01856	-0.42327	3184.955
korak 7	76.4476	10.09083	3767.996	1.677378	-5.83616	3776.995
korak 8	76.94208	10.11935	4295.342	47.08182	-23.9263	4300.758
korak 9	77.43422	10.15796	5035.297	13.73122	-30.216	5038.853
korak 10	77.9328	10.20004	5233.373	368.8229	-70.3152	5285.261

korak 11	78.37985	10.2814	6091.376	-101.545	-71.8804	6243.163
korak 12	78.84959	10.35801	7274.243	181.4375	-159.705	7493.538
korak 13	79.34355	10.44643	8353.037	648.4696	-158.658	8534.046
korak 14	79.82812	10.56399	10913.88	245.1018	-322.748	11371.55
korak 15	80.27252	10.68868	20186.45	557.9952	-340.774	20398.21

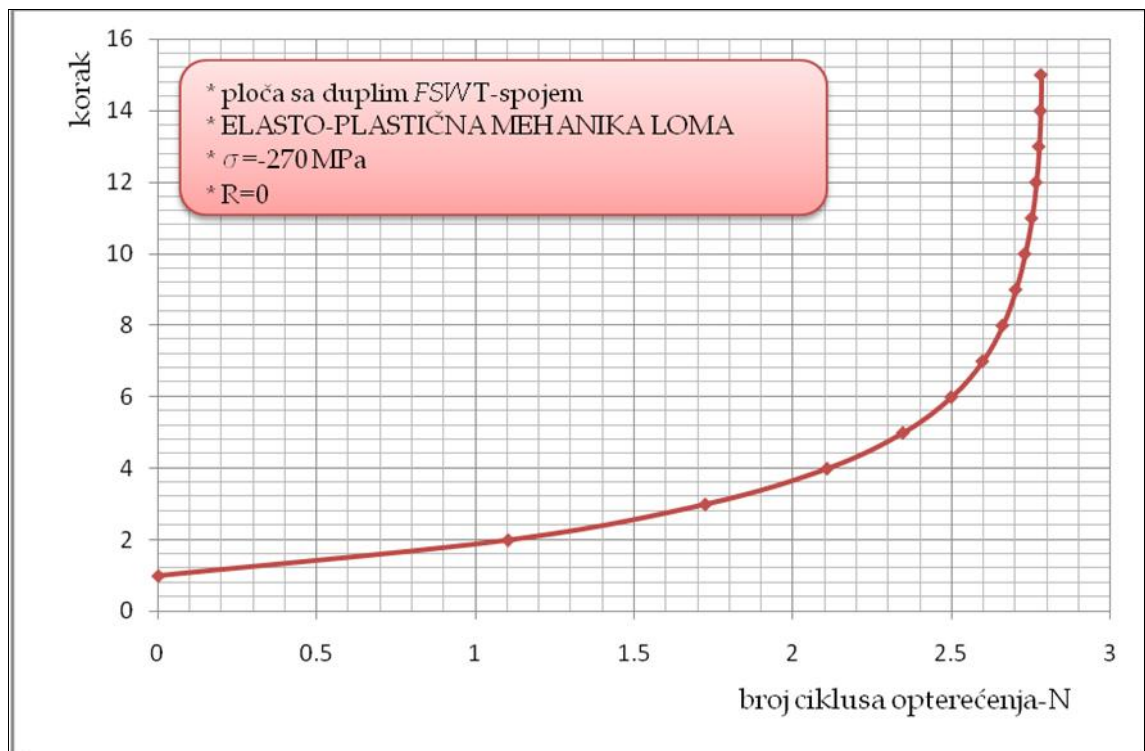


Slika 5.38 Dijagram: promena faktora intenziteta napona sa rastom prsline

Kao i kod neojačane ploče i ovde, kod ojačane ploče se uočava nagli rast prsline. Razlika se ogleda u povišenim vrednostima faktora intenziteta napona- K_1 pri istoj dužini prsline kod neojačane ploče, u odnosu na ojačanu ploču. Ova pojava ukazuje na činjenicu da ojačanja ploče (uzdužnici) preuzimaju deo opterećenja na sebe, što se ogleda u smanjenju faktora intenziteta napona u okolini vrha prsline. Samim tim produžava se radni vek konstrukcije, odnosno ojačana konstrukcija može da izdrži veći broj ciklusa opterećenja- N pre nego što nastane nestabilan rast prsline, koji vodi do loma. Naravno, pri projektovanju realne konstrukcije uvek se uzima u obzir adekvatan stepen sigurnosti.

Tabela 5.26 Numerički podaci: širenje prsline u funkciji od broja ciklusa opterećenja- N

korak	deltaN	N
1	0	0
2	1.10223	1.10223
3	0.621435	1.723665
4	0.3836	2.107265
5	0.239019	2.346284
6	0.152462	2.498746
7	0.0980426	2.5967886
8	0.0628516	2.6596402
9	0.0415641	2.7012043
10	0.0288137	2.730018
11	0.0214726	2.7514906
12	0.0139602	2.7654508
13	0.00870292	2.77415372
14	0.00505732	2.77921104
15	0.00181266	2.7810237

Slika 5.39 Dijagram: širenje prsline u funkciji od broja ciklusa opterećenja- N

5.2.5.2. Ploča sa dva FSW T-spoja (ojačana struktura) izložena dejstvu manjeg zateznog opterećenja

Kod ovog primera primenjen je napon intenziteta $\dagger = -10 \text{ MPa}$.

Tabela 5.27 Numerički podaci: promena faktora intenziteta napona sa rastom prsline (levi kraj prsline)

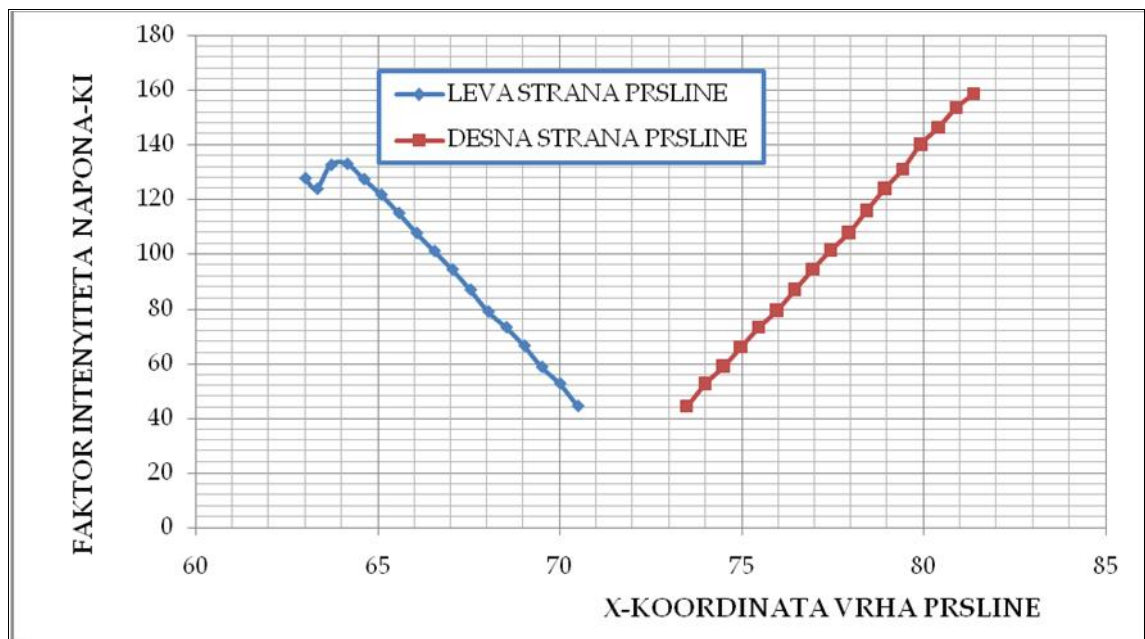
leva strana	x [mm]	y [mm]	K _I [MPa mm ^{0.5}]	K _{II} [MPa mm ^{0.5}]	K _{III} [MPa mm ^{0.5}]	K _{ekv} [MPa mm ^{0.5}]
korak 1	70.5	10	44.33773	0.285768	0.092516	44.38293
korak 2	70.00612	10.00637	52.62157	-0.18963	0.022097	52.75756
korak 3	69.50907	10.00924	58.66688	0.482074	0.161634	58.71309
korak 4	69.02621	10.0199	66.47305	0.193363	0.115836	66.61692
korak 5	68.53039	10.03388	73.22336	-0.12571	-0.00362	73.25194
korak 6	68.03636	10.04617	78.97452	0.738239	-0.26662	79.14705
korak 7	67.54543	10.067	86.97725	0.135814	-0.58472	87.21866
korak 8	67.04809	10.09073	94.43315	0.743949	-1.01284	94.61314
korak 9	66.55537	10.12037	101.1631	1.526233	-1.46089	101.5747
korak 10	66.0651	10.16737	107.7725	-0.02535	-2.57665	108.1838
korak 11	65.57452	10.2083	115.1288	1.17425	-3.58723	115.0113
korak 12	65.08979	10.26678	121.8498	0.071899	-6.82334	122.89
korak 13	64.61755	10.32397	127.5461	1.463958	-10.1863	129.9509
korak 14	64.15517	10.38378	133.1739	0.533382	-19.0957	137.7162
korak 15	63.71262	10.42237	132.7666	1.56597	-25.1481	141.5584
korak 16	63.32857	10.49759	124.0103	-8.76086	-37.4995	146.5017
korak 17	62.99942	10.48716	127.8972	10.51801	-31.4605	149.4686
korak 18	62.69012	10.52481	122.7856	-2.109	-33.1079	151.9447
korak 19	62.41151	10.53256	123.5703	9.094443	-32.7971	154.4398
korak 20	62.19979	10.54096	127.19	3.630322	-41.1269	161.8275
korak 21	61.96766	10.59458	126.8646	-6.39603	-38.3173	166.4813
korak 22	61.7331	10.6142	134.886	12.52041	-21.0438	176.6125
korak 23	61.51315	10.66507	149.9238	0.757514	-18.5634	182.7376
korak 24	61.25515	10.75759	158.6328	-18.5743	-23.9756	198.3915
korak 25	60.92496	10.80643	188.489	18.21246	-10.3836	207.3489
korak 26	60.58871	10.88472	203.4569	-5.60408	-23.6205	220.4172
korak 27	60.26697	10.9666	244.37	6.222124	-29.6494	248.4376
korak 28	59.86716	11.08397	268.5092	7.913051	-24.4739	276.2388
korak 29	59.451	11.22365	297.8434	3.519432	2.963038	300.7955
korak 30	58.97746	11.37624	284.9782	-22.2734	38.07658	313.5998

korak 31	58.57417	11.51308	308.1023	12.51641	75.46183	331.4478
korak 32	58.0805	11.68299	305.5738	17.10957	81.10417	350.4997
korak 33	57.74069	11.82369	301.9143	-6.86815	66.79104	359.4749
korak 34	57.48854	11.9235	329.2668	39.47358	56.72176	375.7635

Tabela 5.28 Numerički podaci: promena faktora intenziteta napona sa rastom prsline (desni kraj prsline)

desna strana	x [mm]	y [mm]	K_I [MPa mm ^{0.5}]	K_{II} [MPa mm ^{0.5}]	K_{III} [MPa mm ^{0.5}]	K_{ekv} [MPa mm ^{0.5}]
korak 1	73.5	10	44.36688	0.245728	-0.03764	44.40301
korak 2	73.99588	10.00554	52.62848	-0.11369	0.002902	52.71806
korak 3	74.49224	10.00887	58.87331	0.402344	-0.25721	58.88811
korak 4	74.98192	10.01881	66.06317	-0.02874	0.100553	66.24861
korak 5	75.46676	10.02833	73.22262	0.492726	0.251101	73.2783
korak 6	75.96215	10.04446	79.30572	0.366949	0.288409	79.415322
korak 7	76.45812	10.0656	86.94668	0.313702	0.242502	87.17262
korak 8	76.95531	10.09002	94.51334	0.706262	0.17397	94.65194
korak 9	77.44863	10.12202	101.5189	1.537687	0.348509	101.8261
korak 10	77.94381	10.16875	107.7484	-0.13372	0.546895	108.1089
korak 11	78.4343	10.21427	115.9397	1.786753	0.667478	116.0322
korak 12	78.92866	10.27249	123.9667	0.013486	1.347863	124.4213
korak 13	79.42294	10.33222	131.0475	1.847438	1.908363	131.6937
korak 14	79.91524	10.40311	140.1637	3.132028	3.242195	140.3021
korak 15	80.4033	10.48784	146.3204	-0.32095	5.135359	147.0893
korak 16	80.89199	10.58311	153.4923	2.199823	8.768297	154.8133
korak 17	81.36545	10.65469	158.5008	3.144108	13.84799	161.0414
korak 18	81.85024	10.79639	156.6977	-5.38339	20.25087	168.436
korak 19	82.33779	10.87511	167.5164	12.71458	30.91956	174.9863
korak 20	82.806343	11.01127	163.8251	2.822488	37.84817	179.2909
korak 21	83.26148	11.11208	161.1828	-11.1101	53.85583	187.4328
korak 22	83.6992	11.18884	156.1059	-5.7814	72.81206	189.5016
korak 23	84.10304	11.16549	143.2342	11.06393	81.13212	186.4117
korak 24	84.50866	11.24918	165.3014	10.53851	80.24225	202.557
korak 25	84.97033	11.46185	212.1774	-8.32638	39.11983	233.8117
korak 26	85.37865	11.58349	235.5569	-13.4603	12.90493	253.805
korak 27	85.86736	11.69811	254.9196	-3.75622	15.98754	276.4438
korak 28	86.32897	11.83629	268.4705	-6.83945	14.71608	281.02325
korak 29	86.74766	11.95921	288.9803	15.71498	26.51119	297.3513
korak 30	87.18836	12.09313	311.4484	9.390474	20.45563	314.312

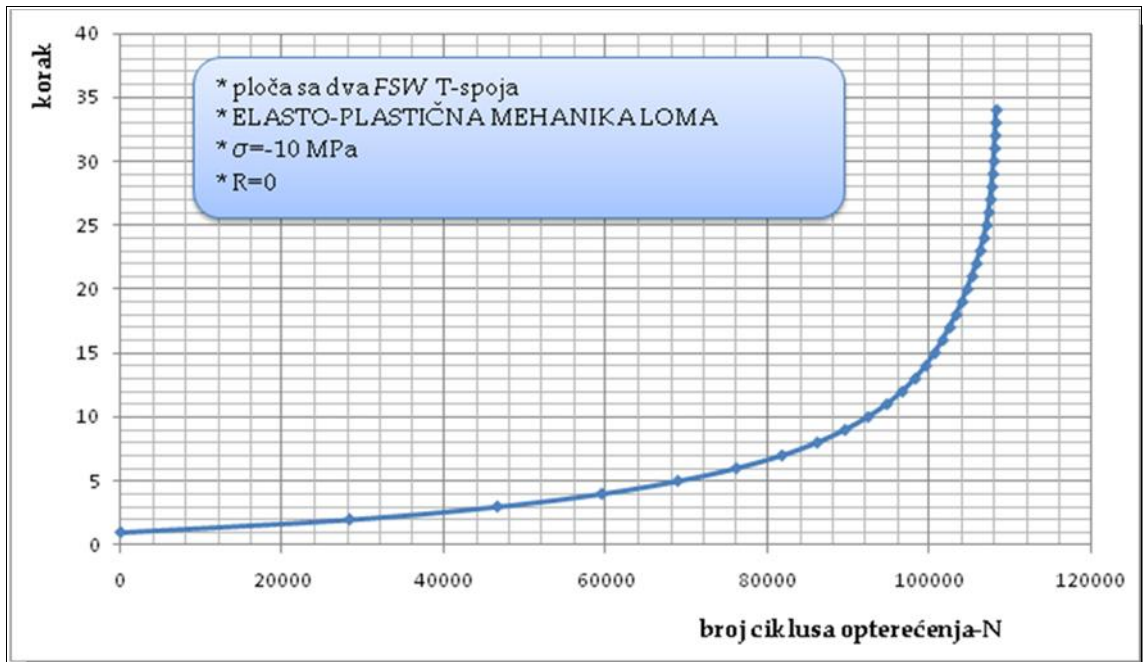
korak 31	87.62927	12.23074	331.6749	11.51853	15.5007	343.0828
korak 32	88.10774	12.41138	340.4671	-9.05823	6.973596	354.2098
korak 33	88.62254	12.59739	341.7311	-37.0091	12.3717	380.6651
korak 34	89.03276	12.68509	255.4135	-21.3904	52.06036	360.8088



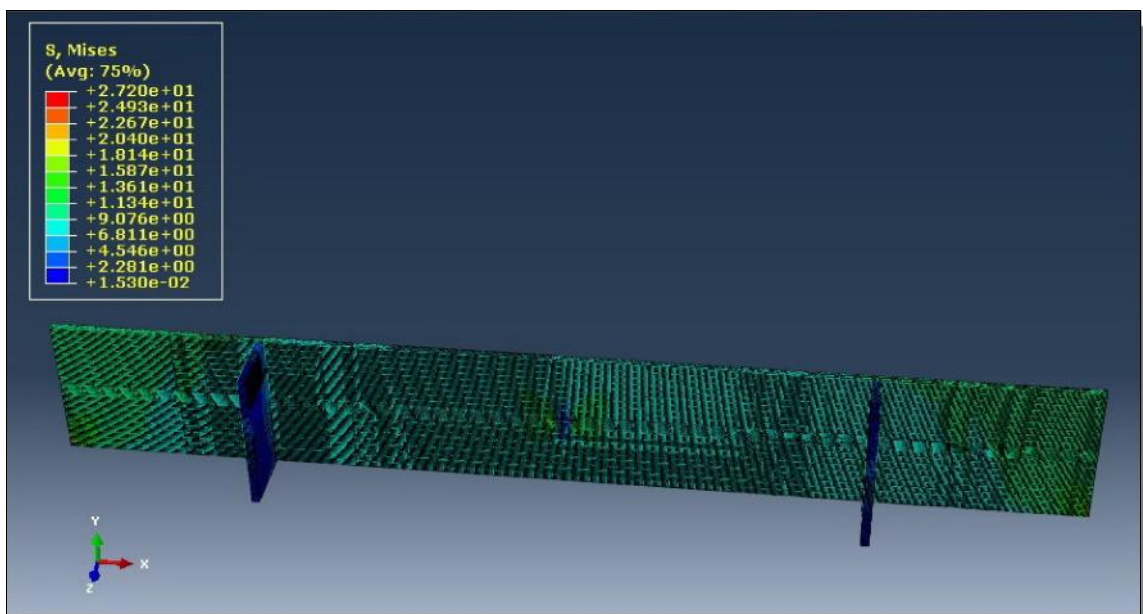
Slika 5.40 Dijagram: promena faktora intenziteta napona sa rastom prsline

Tabela 5.29 Numerički podaci: širenje prsline u funkciji od broja ciklusa opterećenja- N

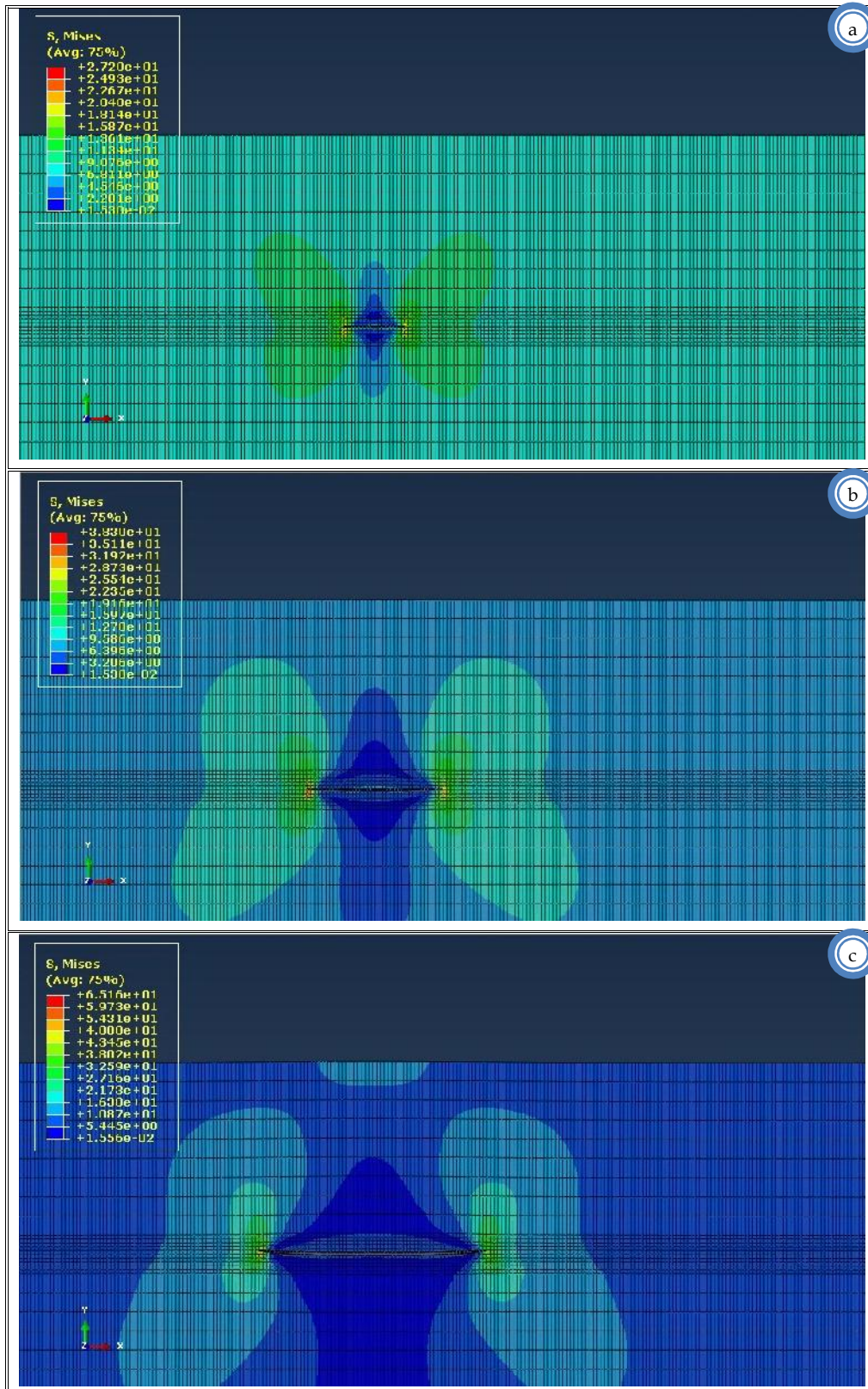
korak	deltaN	N
1	0	0
2	28280	28280
3	18232.4	46512.4
4	12909.5	59421.9
5	9390.25	68812.15
6	7227.28	76039.43
7	5643.18	81682.61
8	4344.88	86027.49
9	3448.72	89476.21
10	2835.31	92311.52
11	2335.02	94646.54
12	1909.33	96555.87
13	1591.95	98147.82
14	1327.68	99475.5
15	1122.44	100597.94
16	971.303	101569.243
17	852.571	102421.814
18	820.644	103242.458
19	728.731	103971.189
20	638.139	104609.328
21	610.821	105220.149
22	527.41	105747.559
23	487.552	106235.111
24	448.247	106683.358
25	333.123	107016.481
26	253.322	107269.803
27	209.945	107479.748
28	163.257	107643.005
29	136.636	107779.641
30	115.049	107894.69
31	98.5346	107993.225
32	84.4231	108077.648
33	65.089	108142.737
34	59.6072	108202.344

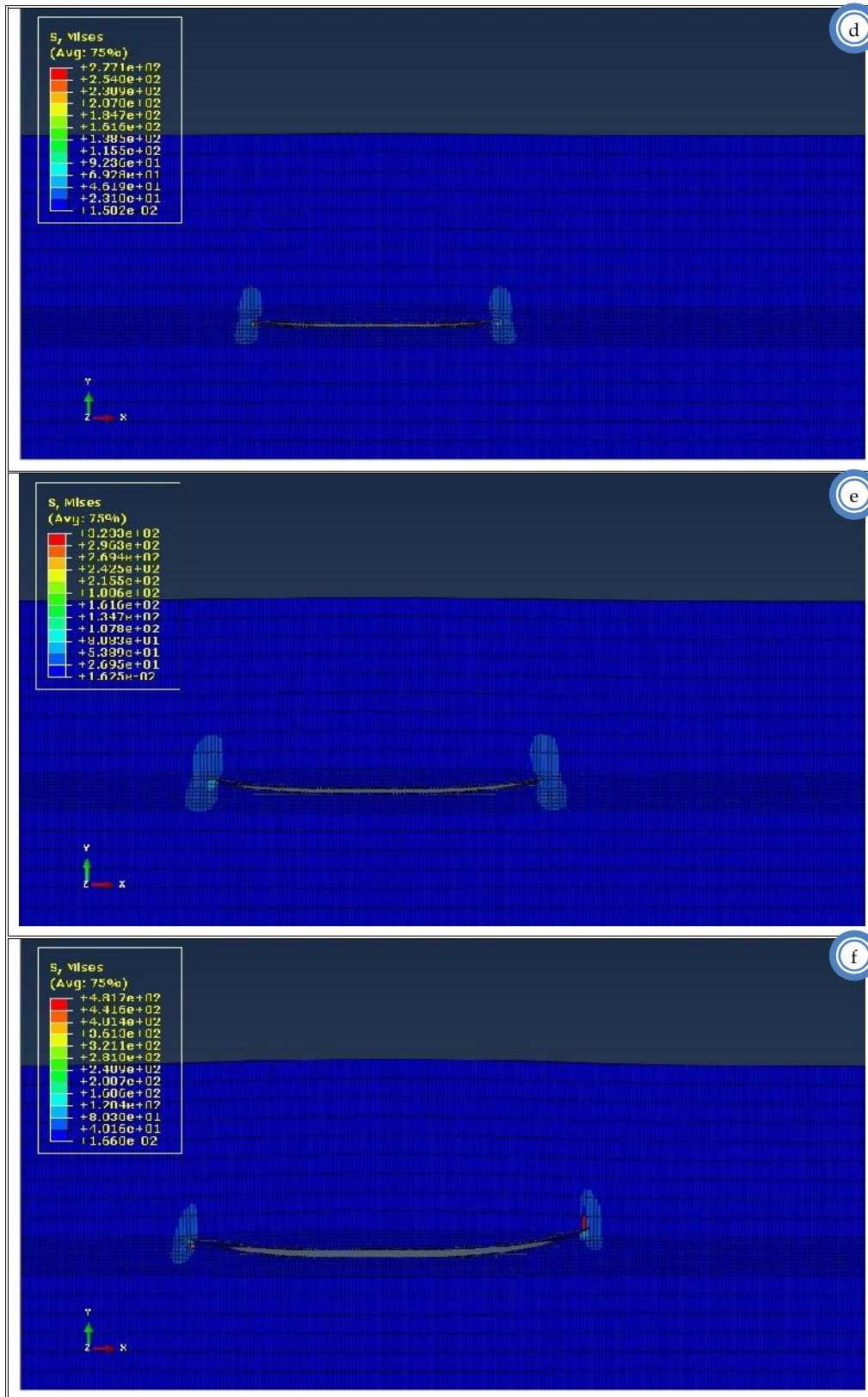


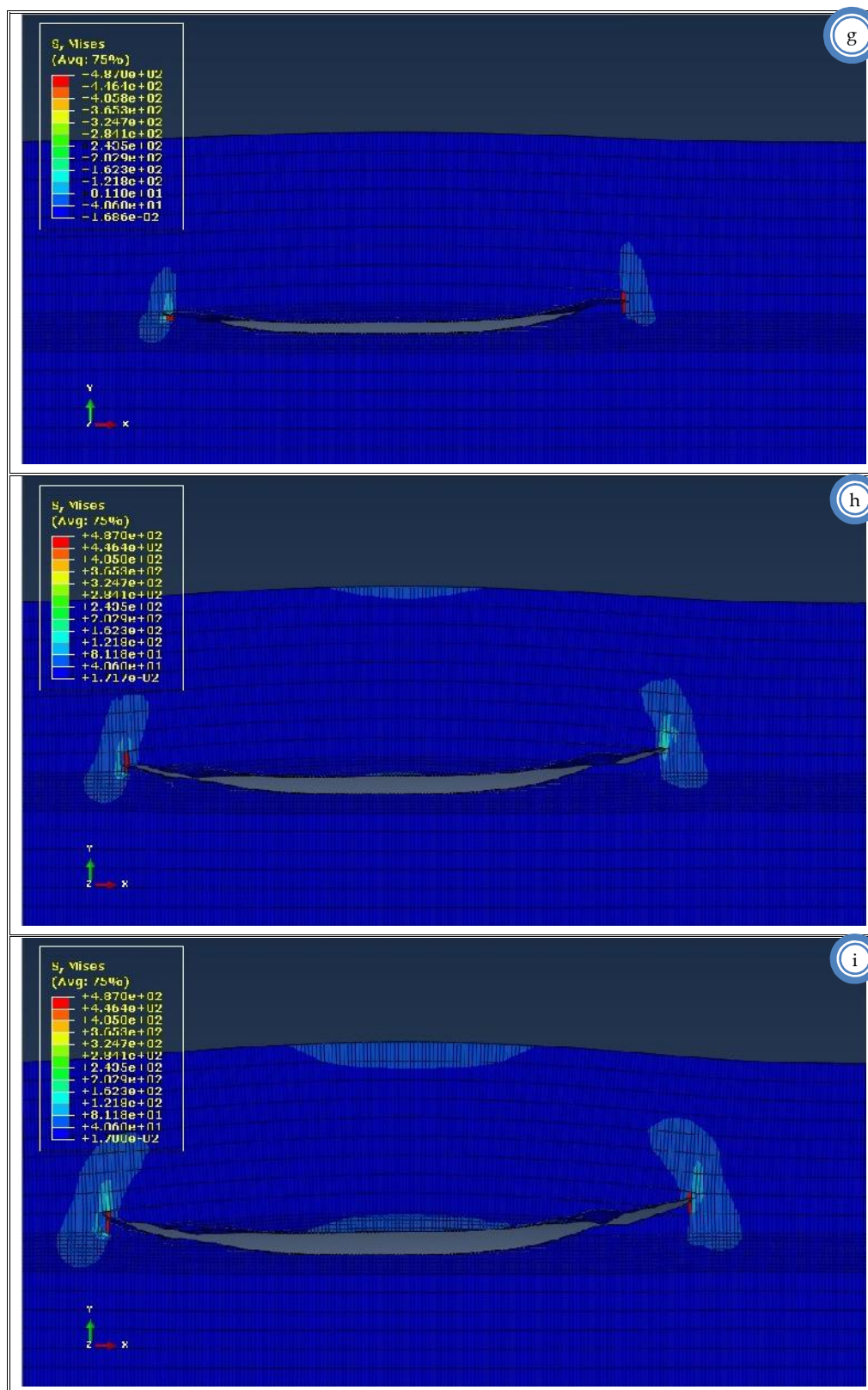
Slika 5.41 Dijagram: širenje prsline u funkciji od broja ciklusa opterećenja- N



Slika 5.42 Raspodela napona kod ojačane ploče sa dva FSW T-spoja







Slika 5.43 Progresija prsline kod ojačane ploče sa dva FSW T-spoja

a. korak 0

b. korak 4

c. korak 9

d. korak 10

e. korak 15

f. korak 20

g. korak 25

h. korak 30

i. korak 33

Na slikama 5.43 (od 5.43a-5.43i) sve deformacije su prikazane sa tzv. faktorom uvećanja (10 puta).

6. ZAKLJUČAK

Cilj istraživanja sprovedenih u okviru ove doktorske disertacije jeste rešavanje problematike procene integriteta zavarene konstrukcije od legura aluminijuma, kao i fenomena rasta inicijalne prsline. U radu su analizirani sledeći primeri, a na osnovu kojih se došlo do relevantnih zaključaka:

➤ Prvo je razmatran primer ploče opterećene na zatezanje sa centralnom prolaznom prslinom. Poređenjem teorijskih vrednosti i numeričkih podataka za faktor intenziteta napona- K_I u okolini vrha prsline ($K_I^{teor} = 5404.38 MPa\sqrt{mm}$, $K_I^{num} = [6361.812, 6874.769] MPa\sqrt{mm}$), dolazi se do zaključka da postoje izvesna odstupanja u ovim vrednostima. Razlika je u granicama od $[17.7, 27.2]\%$. Ova odstupanja su posledica sledećeg:

- kod teorijskog pristupa, podaci su dobijeni za oblast linearne-elastičnosti, dok je kod 3D modela uzeta u obzir elasto-plastična priroda materijala. Dakle, veza između napona i relativne deformacije je data tabelarno na bazi laboratorijskih ispitivanja za osnovni materijal-leguru aluminijuma 2024-T351.
- realan model je konačnih dimenzija u odnosu na teorijski model (beskonačna ploča). Ispitivanjem većeg broja različitih 3D modela, ustanovljeno je da upravo ivice modelirane ploče imaju uticaj na raspodelu faktora intenziteta napona u okolini vrha prsline, odnosno na sam njen rast. Način na koji se definišu granični uslovi (veza sa ostatkom konstrukcije, sklopa), kao i način uvođenja opterećenja u strukturu ima značajan uticaj na dobijanje kvalitetnih rešenja kod numeričkih proračuna. Takođe, definisanje tipa i veličine konačno-elementne mreže na 3D modelu konstrukcije (virtuelna konstrukcija) je od izuzetnog značaja za tačnost proračuna. Dakle, potrebno je izvršiti usitnjavanje mreže u okolini vrha prsline, ali i u oblasti njenog daljeg očekivanog širenja.
- kod teorijskog modela ne uzima se u obzir deformabilnost same ploče, što je naročito specifično za tankozidne strukture (ondulacija). Međutim, kod virtuelnog modela ploče taj aspekt je uzet u obzir, tako da se javljaju i preostali faktori intenziteta napona- K_{II} i K_{III} , koji su značajno manji u poređenju sa faktorom intenziteta napona za mod I- K_I , tako da se njihov uticaj može zanemariti. Ali u slučaju

značajne mere prsline (kada ona zauzima značajan deo konstrukcije) i njena sama deformacija je dominantna, tako da nastaje nagli rast vrednosti preostalih faktora intenziteta napona, te ih je ne moguće zanemariti. Upravo ovaj nagli skok vrednosti faktora intenziteta napona, nakon određenog broja koraka širenja prsline, ukazuje na nestabilnost širenja prsline, što vodi ka lomu konstrukcije.

Dakle, do proširenja prsline za vrednost Δa (korak širenja) dolazi u trenutku kada u okolini vrha prsline napon dostigne vrednost napona popuštanja za dati materijal, što ukazuje na činjenicu da je kao merilo loma korišćen kriterijum maksimalnog napona (napona popuštanja).

➤ U ovoj disertaciji, posebna pažnja je posvećena problematici rasta prsline iz jednog regiona (zone, materijala) u drugi region. Kao najjednostavniji primer, razmatrana je dvokomponentna ploča. Centralna prolazna prslina se širila tako da je levim krajem ostala unutar istog materijala, dok se njen desni kraj nakon svega nekoliko koraka progresije proširio u drugi materijal. Može se zaključiti da upravo u trenutku prelaska desnog vrha prsline iz materijala 1 ($E = 68\,000\text{MPa}$) u materijal 2 ($E = 70\,000\text{MPa}$) dolazi do neznatnog pada faktora intenziteta napona- K_I . Objašnjenje leži u činjenici da materijal 2 ima veću vrednost *Young*-ovog modula elastičnosti u odnosu na materijal 1.

Može se primetiti izvesno skretanje prsline sa pravolinijskog pravca širenja tokom celokupne progresije, što je posledica deformacije strukture, odnosno pojave dominantnijih vrednosti faktora intenziteta napona za preostale modove.

➤ Potom je razmatrano širenje prsline u *FSW* spoju, pri čemu je inicijalna prslina uvedena u *ZTMU*. Eksperimentalno je utvrđeno da je *ZTMU* mesto gde se najčešće javljaju prsline. Desni kraj prsline se kreće ka grumenu, gde ubrzo nakon ulaska u tu zonu dolazi do rasta faktora intenziteta napona- K_I . Levi kraj prsline se kreće ka *ZUT*-u, u kojoj se takođe javlja rast faktora intenziteta napona. Ulaskom u obe bočne zone nakon dostizanja određene dužine prslina intenzivnije skreće sa uobičajenog pravca.

Naravno, i kod ovog primera uočen je intenzivniji rast prsline kod nisko-cikličnog zamornog opterećenja (veća vrednost maksimalno primenjenog napona) u odnosu na blaži rast kod visoko-cikličnog opterećenja (manje vrednosti primenjenog napona). Samim tim, konstrukcija ima duži radni vek kod visoko-cikličnog zamornog opterećenja.

Pri formiranju konačno-elementne mreže potrebno je voditi računa o kvalitetu mreže, jer kada prslina izađe iz regije sa sitnijom mrežom dobijeni numerički podaci više nisu tako precizni-dobija se tzv. „cik-cak“ kriva (pogledati dijagram na slici 5.25-levi i desni kraj dijagrama).

➤ U sledećem koraku teze, razmatrana je problematika širenja inicijalne prsline u ploči koja se sastoji od dva *FSW* spoja. Inicijalna prslina je uvedena na osi simetrije ploče između dva *FSW* spoja. Takođe, analizirana je i ploča ojačana sa dva *FSW* T-spoja.

Ukoliko se konstrukcija dobijena *FSW* postupkom optereti većim intenzitetom zateznog opterećenja $\uparrow = -300\text{MPa}$ bliskim vrednosti napona popuštanja u zonama spoja, dolazi do naglog rasta prsline, tako da konstrukcija može da podnese izuzetno mali broj ciklusa opterećenja pre nego što dođe do njenog loma. Dakle, ovakvo dinamičko opterećenje (zamor) gotovo da ima efekat statičkog opterećenja. Nestabilnost rasta prsline se ogleda u intenzivnom porastu faktora intenziteta napona- K_I . Ako se konstrukcija izloži dejstvu nižih vrednosti zateznog opterećenja $\uparrow = -10\text{MPa}$, znatno manjim u odnosu na napon popuštanja u zonama spoja, konstrukcija će izdržati znatno veći broj ciklusa opterećenja- N (tzv. visoko-ciklični zamor). Potrebno je naglasiti da je u oba slučaja primenjen faktor asimetrije ciklusa $R = 0$.

Na bazi proračuna utvrđeno je da ojačana konstrukcija rezistentnija na zamor, odnosno da može da izdrži veći broj ciklusa primenjenog opterećenja dok ne dođe do nestabilnog širenja prsline u strukturi, koji vodi la lomu. Ovaj fenomen je posledica ravnomernije raspodele napona, a samim tim i faktora intenziteta napona u samoj konstrukciji, jer ojačanja primaju na sebe deo opterećenja.

Dakle, u analizi rasta inicijalne prsline u tankozidnim konstrukcijama (ploča) analizirano je više aspekata:

- širenje prsline kod linearno-elastičnih, odnosno elasto-plastičnih materijala,

- progresija prolazne prsline kroz *FSW* zone spoja,
- uticaj nisko-cikličnog, odnosno visoko-cikličnog zamora,
- uticaj ojačanja.

Posebna pažnja je posvećenja zavarenim tankozidnim konstrukcije od aluminijumske legure 2024-T351. Posebno su definisani regioni (zone) unutar spoja, dok je u konstrukciju uvedena prolazna inicijalna prslina. Potom su vršene naponsko-deformacione analize sa inicijalnom prslinom, kao i za više frotova prsline pri svakom koraku progresije. Analizom dobijenih rezultata, moguće je pratiti rast prsline u strukturi i na osnovu toga proceniti sigurnost konstrukcije sa aspekta pouzdanosti („*fail safe*“).

U okviru ovog rada je izvršena analiza rasta prsline u tankozidnim konstrukcijama sa ojačanjem i bez njega. Žilavost loma- K_C , kao mera otpornosti materijala na stvaranje prsline, je obrnuto proporcionalna debljini konstrukcionog elementa. To znači da će tankozidni elementi (tipa ploče ili ljuske) imati veću rezistentnost ka progresiji postojeće prsline u strukturi, što je pokazano u ovom radu. Kod ojačanih struktura, vrši se preraspodela napona sa tankih delova konstrukcije (sa oplata) na ojačanja (uzdužnici, okviri, ramenjače i rebra). Dakle, doći će do preraspodele opterećenja, tako da će veći deo opterećenja nositi jači delovi konstrukcije. Samim tim, dolazi do pojave smanjenja intenziteta napona u okolini vrha prsline, čime se postiže lokalizovanje iste.

Ovaj rad je pokazao da se prednosti korišćenja *software*-a u proceni integriteta konstrukcija se ogledaju u sledećem: ušteda vremena, sredstava i resursa, što je našlo opravdanost sa ekonomskog aspekta. Dakle, skupa laboratorijaska merenja su zamenjena korisničkim *software*-om, u okviru kog se vrši: modeliranje konstrukcije, sa uvođenjem inicijalne prsline u strukturu, a potom proračun napona i deformacije, kao i simulacija širenja prsline sa svim relevantnim parametrima mehanike loma.

Smernice za dalje istraživanje u cilju detaljnijeg izučavanja fenomena rasta inicijalne prsline u tankozidnim strukturama dobijenih na bazi frikcionog zavarivanja mešanjem su:

- ispitivanja različitih oblika prsline sa različitim položajima u konstrukciji,
- širenje neprolazne (eliptičke i sl.) prsline/a kroz sve zone spoja,

- analiza rasta većeg broja prslina,
 - analiza uticaja zaostalih napona,
 - uticaj različitih formi ojačanja na proces širenja prsline/a,
 - uticaj interakcije opterećenja,
 - uticaj učestanosti dejstva opterećenja,
- uticaj zakrivljenosti ploče (ljuske) i sl.

LITERATURA

- [1] Sedmak, A., *Primena mehanike loma na integritet konstrukcija*, Mašinski fakultet, 2003, ISBN 86-7083-473-1
- [2] Maneski, T., Sedmak, A., *Analiza stanja, dijagnostika ponašanja, procena preostale čvrstoće i radnog veka, revitalizacija*, *Integritet konstrukcije*, *Integritet i vek konstrukcija*, (2/2001), str. 107-110
- [3] Paravinja, D., *Nastanak i rast zamorne naprsline u ojačanim tankozidim konstrukcijama*, magistarski rad, Mašinski fakultet u Beogradu, 2004.
- [4] <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA2024T4> (01.06.2013.god.)
- [5] Wanhill, R.J.H., *Milestone Case Histories in Aircraft Structural Integrity*, *Comprehensive Structural Integrity*, ISBN (set):0-08-043749-4, Volume 1, (ISBN: 0-08-044157-2), 2003, pp.61-72,
- [6] Swift, T., *Damage Tolerance Technology-Stress Analysis Oriented Fracture Mechanics*, EADS Airbus GmbH, Technologiezentrum Hamburg-FinkenWerder, 2000.
- [7] *New aluminium alloys and fuselage structures in aircraft design*, Gerhard Tempus, EADS Airbus GmbH Bremen, "Werkstoffe für transport und verkehr", 18th of May 2001, ETH Zürich, Switzerland
- [8] Seib, E., *Residual strength analysis of laser beam and friction stir weld aluminium panels for aerospace applications*, PhD thesis, Technical University Hamburg, 2005.
- [9] Zerbst, U., Heinemann, M., Donne, C.D., Steglich, D., *Fracture and damage mechanics modeling of thin-walled structures - An overview*, *Engineering Fracture Mechanics*, 76 (2009), pp. 5-43
- [10] Wang, L., Chow, W.T., Kawai, H., Atluri, S.N., *Residual Strength of Aging Aircraft with Multiple Site Damage/Multiple Element Damage*, *AIAA Journal*, Vol.36, No.5, May 1998, pp.840-847

-
- [11] Anderson, T. L., Fracture mechanics-Fundamentals and Applications, Taylor & Francis Group, 2005, ISBN 0-8493-1656-1, ISBN 987-0-8493-1656-2
- [12] Sedmak, S., Uvod u mehaniku loma i konstruisanje sa sigurnošću od loma, monografija, RO Institut SOUR GOŠA-Smederevska Palanka, Tehnološko-metaluški fakultet-Beograd, 1980.
- [13] Sedmak, S. (ured.), Fundamentals of fracture mechanics and structural integrity assessment methods, Mašinski fakultet u Beogradu, Tehnološko-metaluški fakultet u Beogradu, Društvo za integritet i vek konstrukcija u Beogradu, Institut za ispitivanje materijala Srbija u Beogradu, Beograd, 2009., ISBN 978-86-82081-19-7
- [14] Surovek, A.E., Jasthi, B. K. and Widener, C. A., Friction stir welding of steel connection, Proceedings of the 7th International Conference on Connections in Steel Structures, Timisoara, Romania, May 2012
- [15] Đukić, D., Metode analize vazduhoplovnih struktura rezistentnih na zamor, magistarski rad, Mašinski fakultet, Beograd, 2005.
- [16] Grbović, A., doktorska disertacija: Istraživanje zamornog veka nosećih strukturalnih elemenata izrađenih od super legura, Mašinski fakultet, Beograd, 2012.
- [17] Broek, D., The practical use of fracture mechanics, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1989, ISBN 90-247-3707-9 (HB), ISBN 0-7923-0223-0 (PB)
- [18] Vručinić, G., Zavarivanje i zavarljivost aluminija i legura, Aluminij i aluminijske legure - rukovanje, priprema, zavarivanje-5. seminar, Pula, 2008.
- [19] Mathers, G., The Welding of Aluminium and Its Alloys, Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, Abington, Cambridge CB1 6AH, England, 2002, ISBN 1 85573 567 9, pp.160-165
- [20] Živković, A., Uticaj geometrije alata na postupak zavarivanja trenjem pomoću alata na svojstva zavarenog spoja legure Al 2024, doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 2011
-

- [21] Veljić, D., Eksperimentalna i numerička termo-mehanička analiza procesa zavarivanja trenjem mešanjem legura aluminijuma visoke čvrstoće, doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 201?
- [22] Grujičić, M., Arakere, G., Yen, C.F., Cheeseman, B.A., Computational Investigation of Hardness Evolution During Friction-Stir Welding of AA5083 and AA2139 Aluminum Alloys, *Journal of Materials Engineering and Performance*, October 2011, Volume 20, Issue 7, pp. 1097-1108
- [23] www.twi.co.uk (10.05.2013.god.)
- [24] Technical Handbook, Friction Stir Welding, ESAB AB Welding Automatio, Sweden,
<http://www.esab.de/de/de/support/upload/FSW-Technical-Handbook.pdf> (12.12.2012.god.)
- [25] Mishra, R.S., Ma, Z.Y., Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering R 50* (2005), pp. 1-78
- [26] Runčev, D., Zavarivanje trenjem aluminijuma i aluminijumskih legura, *Zavarivanje i zavarene konstrukcije*, 1/2002, pp. 11-14
- [27] Veljić, D., Radović, N., Sedmak, A., Perović, M., Tehnologija zavarivanja aluminijumskih legura postupkom zavarivanja trenjem alatom, *Zavarivanje i zavarene konstrukcije*, 1/2010, pp. 13-20
- [28] Buffa, G., Fratini, L., Micari, F., Shivpuri, R., *Material Flow in FSW of T-joints: Experimental and Numerical Analysis*, Springer, *Int J Mater Form* (2008) Suppl 1: pp. 1283-1286
- [29] Fratini, L., Buffa, G., Filice, L., Gagliardi, F., Friction stir welding of AA6082-T6 T-joints: process engineering and performance measurement, *Proc. IMechE Vol. 220 Part B: J. Engineering Manufacture*, 2005, pp. 669-676

- [30] Castro, R.A.S., Richter-Trummer, V., et al, Friction Stir welding on T-joints: residual stress evaluation, *Mecânica Experimental*, 2011, Vol 19, pp. 55-65, ISSN 1646-7078
- [31] <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA2024T4> (02.07.2013.god.)
- [32] Golestaneh, A.F., Ali, A., Voon, W.S., Faizal, M., Mohammadi, M.Z., Simulation of fatigue crack growth in friction stir welded joints in 2024-T351 Al alloy, *Suranaree J. Sci. Technol.*, Vol. 16 (1), 2009, pp. 35-46
- [33] Zadeh, M., Ali, A., Golestaneh, A.F., Sahari, B.B., Three dimensional simulation of fatigue crack growth in friction stir welded joints of 2024-T351 Al alloy, *Journal of Scientific & Industrial Research*, Vol. 68, September 2009, pp. 775-782
- [34] Ali, A., Brown, M.W., Rodopoulos, C.A., Modelling of crack coalescence in 2024-T351 Al alloy friction stir welded joints, *International Journal Of Fatigue*, 30 (2008) pp. 2030-2043
- [35] Ali, A., Brown, M.W., Zaroog, O.S., Fatigue damage of 2024-T351 Aluminum alloy friction stir welding joints. Part 1: characterisation, *Suranaree J. Sci. Technol.*, 15(2), 2008, pp. 107-116
- [36] Lie, S.T., Xiang, Z., Wang, B., Cen, Z., Experimental and numerical simulation of 3D fatigue crack for plate-to-plate welded joints, *International Journal of Fatigue*, 22 (2000), pp. 411-424
- [37] Fratini, L., Pasta, S., Reynolds, A.P., Fatigue crack growth in 2024-T351 friction stir welded joints: Longitudinal residual stress and microstructural effects, *International Journal of Fatigue*, 31 (2009), pp. 495-500
- [38] Xiang, Z., Lie, S.T., Wang, B., Cen, Z., A simulation of fatigue crack propagation in a welded T-joint using 3D boundary element method, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 80 (2003), pp. 111-120

-
- [39] Liu, H.J., Fijii, H., Maeda, M., Nogi, K., Tensile properties and fracture locations of friction-stir-welded joints of 2017-T351 aluminum alloy, *Journal of Materials Processing Tehnology*, 142 (2003), pp. 692-696
- [40] Fratini, L., Buffa, G., Shivpuri, R., Influence of material characteristics on plastomechanics of the FSW process for T-joints, *Materials and Design*, 30 (2009), pp. 2435-2445
- [41] Shahri, M.M., Sandstrom, R., Effective notch stress and critical distance method to estimate the fatigue life of T and overlap friction stir welded joints, 25 (2012), pp. 250-260
- [42] Buffa, G., Fratini, L., Arregi, B., Penalva, M., A new friction stir welding based technique for corner fillet joints: experimental and numerical study, Springer, *Int J Mater Form* (2010) Vol. 3 Suppl 1: pp. 1039-1042
- [43] Penalva, M.L., Otaegi, A., Pujana, J., Rivero, A., Development of a New Joint Geometry for FSW, *Third Manufacturing Engineering Society International Conference, 2009*, American Institute of Physics, 978-0-7354-0722-0/09/
- [44] Maligno, A.R., Rajaratnam, S., Leen, S.B., Williams, E.J., A three-dimensional (3D) numerical study of fatigue crack growth using remeshing techniques, *Engineering Fracture Mechanics*, 77 (2010), pp. 94-111
- [45] Rabczuk, T., Bordas, S., Zi, G., On three-dimensional modeling of crack growth using partition of unity methods, *Computers and Structures*, 88 (2010), pp. 1391-1411
- [46] Nguyen-Xuan, H., Rabczuk, T., Bordas, S., Debongnie, J.F., A smoothed finite element method foe plate analysis, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 197 (2008), pp. 1184-1203

- [47] Golestaneh, A.F., Ali, A., Zadeh, M., Modelling the fatigue crack growth in friction stir welded joint of 2024-T351 Al alloy, *Materials and Design*, 30 (2009), pp. 2928-2937
- [48] [http://www.simulia.com/services/training/wbtAbaqus69/eXtended Finite Element Method \(XFEM\) in Abaqus \(06.02.2013.god.\)](http://www.simulia.com/services/training/wbtAbaqus69/eXtendedFiniteElementMethod(XFEM)inAbaqus(06.02.2013.god.))
- [49] Jovičić, G., Živković, M., Vulović, S., Proračunska mehanika loma i zamora, Mašinski fakultet u Kragujevcu, 2011, ISBN 978-86-86663-65-8
- [50] Abaqus, Tutorials
- [51] www.matthewpais.com/abaqus (07.12.2012.god.)
- [52] Leven, M., Rickert, D., Stationary 3D crack analysis with Abaqus XFEM for integrity assessment of subsea equipment, Master's Thesis in Applied Mechanics, Göteborg, Sweden, 2012
- [53] Wzart, E., Coulon, D., Pardoën, T., Remacle, J.F., Lani, F., Application of the substructured finite element/extended finite element method (S-FE/XFE) to the analysis of crack in aircraft thin walled structures, *Engineering Fracture Mechanics*, 76 (2009), pp. 44-58
- [54] Bordas, S.P.A., et al, Strain smoothing in FEM and XFEM, *Computer and Structures*, 88 (2010), pp. 1419-1443
- [55] Weaver, C.M., Rigg, P.A., Cordes, J.A., Haynes, A., XFEM Analysis of Critical Cracks in a Pressure Tap for a 40mm Gun Breech, 2011 SIMULIA Customer Conference
- [56] Keswani, K., Singh, K.L., Arokkiaswamy, A., Computation of SIF and Crack Growth Simulation using XFEM Techniques, International Conference on Advanced Research in Mechanical Engineering (ICARME 2012), TRIVENDUM, ISBN: 978-93-81693-9, pp. 125-131
- [57] Reinhardt, L., Cordes, J.A., XFEM Modelling of Mixed-Mode Cracks in Thin Aluminum Panels, 2010 SIMULIA Customer Conference

- [58] Guidault, P.A., Allix, O., Champaney, L., Cornuault, C., A multiscale extended finite element method for crack propagation, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 197 (2008), pp. 381-399
- [59] Shi, J., Chopp, D., tua, J., et al., Abaqus Implementation of Extended Finite Element method Using a Level Set representation for Three-Dimensional Fatigue Crack Growth and Life Prediction
- [60] Živojinović, D., Arsić, M., Sedmak, A., Kirin, S., Tomić, R., Practical aspects of fail-safe design – calculation of fatigue life of cracked thin-walled structures, *Tehnički vjesnik* 18, 4(2011) , pp. 609-617

BIOGRAFIJA

Ime i prezime: Danijela D. Živojinović
Datum rođenja: 04. 10. 1974.
Mesto rođenja: Zemun
Porodično stanje: Udata, dvoje dece

Školovanje:

1981.-1989. Osnovna škola „Mladost“ u Novoj Pazovi
1989.-1993. IX beogradska gimnazija „Mihailo Petrović-Alas“
1993.-1999. Studije na Mašinskom fakultetu u Beogradu, odsek vazduhoplovstvo
01.03.1999. Odbranjen diplomski rad na Mašinskom fakultetu u Beogradu, sa temom „Kompjuterske metode proračuna nosećih struktura letelica“
1999.-2004. Postdiplomske studije na Mašinskom fakultetu u Beogradu, odsek vazduhoplovstvo
04.09.2004. Odbranjen magistarski rad na Mašinskom fakultetu u Beogradu, sa temom "Nastanak i rast naprsline u ojačanim tankozidim strukturama" na odseku za vazduhoplovstvo

Kretanje u poslu:

1999.-2000. stručni saradnik na Mašinskom fakultetu u Beogradu, na Katedri za vazduhoplovstvo
2000.-2003. konstruktor u firmi *EDePro*, Beograd
2003.-2005. saradnik na Višoj tehničkoj školi, Novi Beograd
2005.-2008. predavač na Višoj tehničkoj školi, Novi Beograd
2008.-trenutno predavač na Visokoj tehničkoj školi strukovnih studija, Novi Beograd

Prilog 1.

Izjava o autorstvu

Potpisana Danijela D. Živojinović

broj indeksa _____

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

PRIMENA MEHANIKE LOMA NA PROCENU INTEGRITETA ZAVARENIH
KONSTRUKCIJA OD LEGURA ALUMINIJUMA

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršila autorska prava i koristila intelektualnu svojinu drugih lica.

U Beogradu, 09.09.2013.god.

Potpis doktoranta

Danijela Živojinović

Prilog 2.

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora Danijela D. Živojinović

Broj indeksa _____

Studijski program _____

Naslov rada PRIMENA MEHANIKE LOMA NA PROCENU INTEGRITETA
ZAVARENIH KONSTRUKCIJA OD LEGURA ALUMINIJUMA

Mentor Prof. dr Aleksandar Sedmak

Potpisana Danijela D. Živojinović

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predala za objavljivanje na portalu **Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

U Beogradu, 09.09.2013.god.

Potpis doktoranta
Danijela Živojinović

Prilog 3.

Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

PRIMENA MEHANIKE LOMA NA PROCENU INTEGRITETA
ZAVARENIH KONSTRUKCIJA OD LEGURA ALUMINIJUMA

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predala sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučila.

1. Autorstvo
2. Autorstvo - nekomercijalno
3. Autorstvo - nekomercijalno - bez prerade
4. Autorstvo - nekomercijalno - deliti pod istim uslovima
5. Autorstvo - bez prerade
6. Autorstvo - deliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci date je na poledini lista.)

U Beogradu, 09.09.2013.god.

Potpis doktoranta
Danijele Zivojinović