

# Utjecaj zaostalih napreznja usljed zavarivanja na rast zamornih pukotina

---

**Barjašić, Danijel**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2012**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:280862>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-27**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Danijel Barjašić

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor  
Prof. dr. sc. Željko Božić

Danijel Barjašić

Zagreb, 2012.

# IZJAVA

Izjavljujem da sam diplomski rad na temu „*Utjecaj zaostalih naprezanja usljed zavarivanja na rast zamornih pukotina*“ izradio samostalno uz potrebne konzultacije s mentorom te korištenjem stručne literature navedene na kraju rada.

U Zagrebu, svibanj 2012.

---

Danijel Barjašić

# ZAHVALE

Zahvaljujem svojim roditeljima i bratu na svojoj potpori koju sam imao tijekom studiranja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, te svojoj djevojci Klaudiji.

Posebno zahvaljujem obitelji Valgimigli Alesandro i Ede na podršci i ohrabrenju tokom studija i tijekom izrade rada.

Posebno zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Željku Božiću na vođenju i cjelokupnoj pomoći tokom izrade ovog rada.

## SAŽETAK

U radu je dan pregled problema zamora orebrenih panela u zrakoplovnim konstrukcijama s posebnim osvrtom na panele sa zaostalim naprezanjima uslijed zavarivanja.

Metodom konačnih elemenata istražena je raspodjela faktora intenzivnosti naprezanja  $K_I$  kao funkcija duljine pukotine u eksperimentalnom uzorku orebrenog panela sa središnjom pukotinom. Fronta pukotine je modelirana singularnim 2-D konačnim elementima. Numerička analiza je pokazala da vrijednosti  $K_I$  ovise o duljini pukotine i raspodjeli zaostalih naprezanja. U konkretnom primjeru pokazano je da zaostala vlačna naprezanja početno povećavaju vrijednost  $K_I$  te samim time ubrzavaju rast pukotine, a zatim zaostala tlačna naprezanja snižavaju vrijednost  $K_I$  i tako djeluju na usporavanje rasta pukotine.

## Sadržaj

IZJAVA .....	- 3 -
ZAHVALE .....	- 4 -
Sažetak.....	- 5 -
1 Uvod.....	1
2 Pregled istraživanja zamora zavarenih orebrenih panela.....	4
2.1 Zaostala naprezanja uslijed zavarivanja u tankostjenim konstrukcijama .....	4
2.2 Modeli analize rasta zamornih pukotina temeljeni na linearno elastičnoj mehanici loma.....	10
2.2.1 Utvrđivanje parametara mehanike loma pomoću programskog paketa ANSYS10	
2.3 Analiza napredovanja pukotine koristeći Parisovu jednadžbu .....	11
3 Modeliranje zaostalih naprezanja .....	13
4 Modeliranje utjecaja zaostalih naprezanja na životni vijek orebrenog panela...	28
4.1 Geometrija i materijal eksperimentalnog uzorka orebrenog panela.....	28
4.2 Modeliranje zaostalih naprezanja u orebrenom panelu .....	29
4.3 Modeliranje zaostalih naprezanja za eksperimentalni uzorak orebrenog panela .....	31
5 Zaključak .....	36
6 Literatura .....	37

## POPIS SLIKA

Slika 1-1 Gustoća snage za različite postupke zavarivanja [2] .....	1
Slika 1-2 Deformacije zavarene ploče [2] .....	2
Slika 1-3 Tipična raspodjela zavara po ploči [4].....	3
Slika 2-1 Inicijacija pukotine, a) na mjestu zavara, b) na sredini panela <sup>[1]</sup> .....	5
Slika 2-2 Inicijacija pukotine a) na mjestu zavara b)na kraju ploče.....	5
Slika 2-3 Raspodjela zaostalih napreznja u materijalu s i bez pukotine.....	6
Slika 2-4 Orebreni panel [4] .....	6
Slika 2-5 Životni vijek - usporedba FE i eksperimenta [4] .....	7
Slika 2-6 Zaostala napreznja u eksperimentalnom uzorku [4] .....	7
Slika 2-7 Zaostala napreznja u eksperimentalnom uzorku [5] .....	8
Slika 2-8 Diskretizirani model [5] .....	8
Slika 2-9 Poprečni presjek zavarenog spoja Ti-6AL-4V [6].....	9
Slika 2-10 Poprečni presjek zavarenog spoja Al 7050-T7451 [6] .....	9
Slika 2-11 Mreža oko vrha pukotine generirana naredbom KSCON.....	10
Slika 2-12 Singularni 2D PLANE 183 element.....	10
Slika 2-13 Paris-ova jednadžba [13] .....	11
Slika 2-14 Putanja za J integral [10] .....	12
Slika 3-1 Green-ova funkcija.....	13
Slika 3-2 Dimenzije analizirane ploče s dvostrukom simetrijom.....	16
Slika 3-3 Diskretizacija modela ploče na konačne elemente s primjenjenim rubnim uvjetima .....	16
Slika 3-4 Konvergencija numeričkog rješenja ovisno o gustoći mreže. Prikazane su vrijednosti vertikalne komponente napreznja, $\sigma_y$ .....	17
Slika 3-16 $\sigma_y$ za multilinearu karakteristiku materijala na liniji pukotine .....	23
Slika 3-17 Zaostala napreznja za multilinearu karakteristiku materijala (a=7.7 mm) .....	24
Slika 3-18 Zaostala napreznja i vanjsko opterećenje na ploči .....	24
Slika 3-19 $K_I$ faktor za različite slučajeve opterećenja .....	25
Slika 4-1 Orebreni panel <sup>[15]</sup> .....	28



## POPIS TABLICA

Tabela 3-1 Karakteristike materijala .....	14
Tabela 4-1 Specifikacija modela konačnih elemenata .....	31

## Popis oznaka

$a$ ,	m	-	polovična duljina pukotine
$\Delta a$ ,	m	-	prirast duljine pukotine
$C, m$	-	-	Parisove konstante
$da/dN$	m/ciklus	-	relativno napredovanje pukotine
$E$ ,	MPa	-	Youngov modul elastičnosti
$G$ ,	MPa	-	modul smicanja
$K$ ,	MPa $\sqrt{m}$	-	faktor intenzivnosti naprezanja
$K_I$ ,	MPa $\sqrt{m}$	-	faktor intenzivnosti naprezanja za prvi način otvaranja pukotine
$\Delta K$ ,	MPa $\sqrt{m}$	-	raspon faktora intenzivnosti naprezanja
$N$ ,	-	-	broj ciklusa
$\nu$ ,	-	-	Poissonov koeficijent
$\Delta\sigma$ ,	MPa	-	raspon naprezanja
$\sigma_0$ ,	MPa	-	granica tečenja
$c$	mm	-	udaljenost zaostalih naprezanja vrijednosti nula od zavora

# 1 Uvod

Primjena postupka zavarivanja u zrakoplovstvu seže u doba prvog svjetskog rata, kada su Dutchman i Anthony Fokker primjenjivali proces zavarivanja u proizvodnji trupa za njemačke borbene zrakoplove.

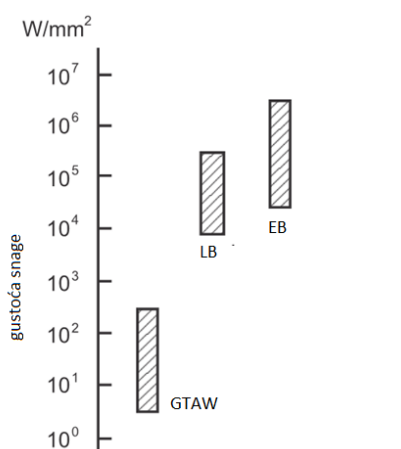
Sve do 1941. godine nema značajnijeg pomaka u razvoju zavarivanja za zrakoplovne konstrukcije. Iste godine inženjeri u Northrup Aircraft Co. Razvijaju proces zavarivanja magnezija. Slijedeće godine, voditelj istraživanja V.H. Pavlecka i inženjer Russ Meredith razvijaju proces zavarivanja s wolframovom niti u atmosferi inertnog plina (GTAW) za zavarivanje magnezija i nehrđajućeg čelika. Sve do početka 90-ih to je bio najrašireniji postupak zavarivanja u zrakoplovnoj industriji.

Prednost zavarenog spoja nad ostalim postupcima spajanja metala je u tome što zavareni spoj ima manju masu nego npr, zakovičasti spoj. [20]

U zrakoplovstvu se najviše primjenjuju ove tri metode zavarivanja:

- zavarivanje s wolframovom niti u atmosferi inertnog plina (GTAW)
- zavarivanje elektronskim snopom (EB)
- zavarivanje laserom (LB)

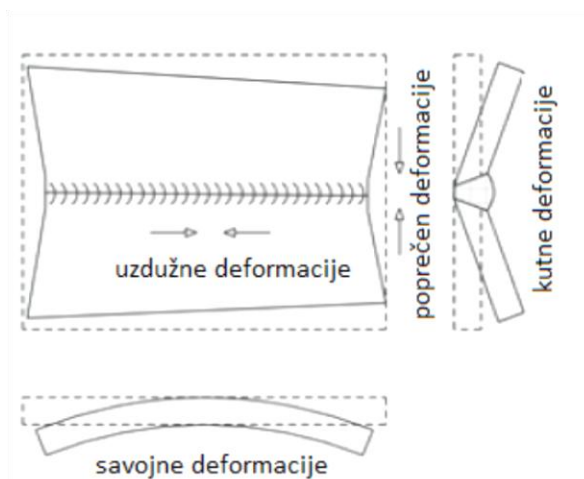
Slika 1 -1 prikazuje gustoću snage za navedene postupke zavarivanja



Slika 1-1 Gustoća snage za različite postupke zavarivanja [2]

Kod postupka zavarivanja s wolframovom niti u atmosferi inertnog plina toplina potrebna za zavarivanje se ostvaruje pražnjenjem između anode i katode uz korištenje nerastaljive elektrode. Inertni plin služi za zaštitu zavarenog spoja od oksidacije. S ovim postupkom se zavaruju metali debljine od 0.3 do 3 milimetra s jednim prolazom. U slučaju nešto većih debljina potrebno je napraviti više prolaza. Kod zavarivanja laserom brzine zavarivanja su velike uz obično jedan prolaz. Visoka penetracija od 5 do 10 mm uz vrlo uske zavare što stvara manju zonu utjecaja topline. Gustoća snage kod zavarivanje elektronskim snopom je veća nego kod laserskog zavarivanja. Zavarivanje se obično izvodi u vakuumskoj komori. Koristi se kod spajanja aluminija ili kod komponenti motora. Postupak je vrlo skup.

Tokom procesa zavarivanja metal je opterećen toplinskim naprezanjima. Što je granica tečenja manja to će više rasti plastična deformacija u zoni zavara. Nakon hlađenje će se zbog plastičnih deformacija pojaviti zaostala naprezanja. Deformacije metala tokom zavarivanja su toplinsko istezanje (privremeno) i zaostala naprezanja (trajno). Ta trajna zaostala naprezanja izazivaju deformaciju ploče kako je prikazano slikom 1-2.

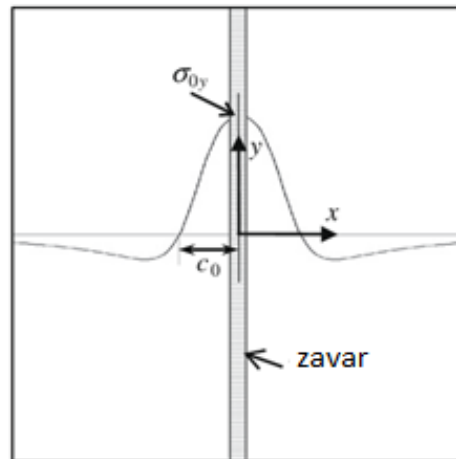


Slika 1-2 Deformacije zavarene ploče [2]

Zaostala naprezanja prema [2] se definiraju kao „Zaostala naprezanja su unutarnje sile koje su u ravnotežene same sa sobom kroz cijelu ploču, bez djelovanja vanjskih sila“.

Zaostala napreznja se dijele na nekoliko razina. Prva razina je na mikroskopskoj veličini i to je srednje napreznje između kristalnih zrna. Druga razina napreznja je između kristalnih regija, a treća razina je na atomskoj veličini kao što su dislokacije.

Tipična raspodjela zaostalih napreznja u ploči sa zavarom po sredini dana je na slici 1-3.



Slika 1-3 Tipična raspodjela zavora po ploči [4]

Vidi se da na području zavora zaostala napreznja su vlačna i dosežu granicu tečenj. a s udaljavanjem od zavora opadaju i postaju negativna te se na taj način uravnotežavaju.

## 2 Pregled istraživanja zamora zavarenih orebrenih panela

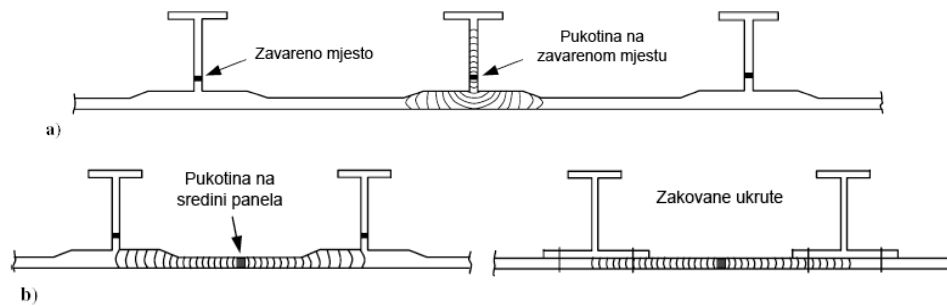
### 2.1 Zaostala naprezanja uslijed zavarivanja u tankostjenim konstrukcijama

Orebreni panel u krilu se može izvesti zakovičastim spojem ili u novije vrijeme u integralnom obliku gdje se glodanjem iz jednog komada izrađuje cijeli orebreni panel. Također se orebreni panel krila u novije vrijeme izvodi u zavarenoj verziji. Još jedan oblik je lijepljena verzija ukruta na ploči koji je u primjeni već duže vrijeme. Zavarena izvedba je vrlo prihvatljiva iz razloga ekonomičnosti i brzine izvedbe te vrlo jednostavnog pristupa inspekciji. Zavarena izvedba orebrenog panela krila mora zadovoljiti tražene zahtjeve sa stajališta integriteta konstrukcije. Jedni od takvih zahtjeva su tolerancija oštećenja (engl. *damage tolerance*) i sigurno popuštanje konstrukcije (engl. *fail safe design*) kako je propisano odredbom FAR 29.571.

Pristup tolerancije oštećenja podrazumijeva da postoje početna oštećenja u konstrukciji kao posljedica defekta nastalih u proizvodnji ili tijekom održavanja, i gdje se promatra životni vijek napredovanja pukotine nakon što je pukotina inicirana pa do njene kritične vrijednosti kod koje nastupa slom dijela konstrukcije ili čitave konstrukcije. Kriterij sigurnog popuštanja konstrukcije temelji se na pretpostavci da je konstrukcija zrakoplova dizajnirana na način da i nakon popuštanja glavne komponente konstrukcije zrakoplov može ostati u eksploataciji do popravka tog dijela.

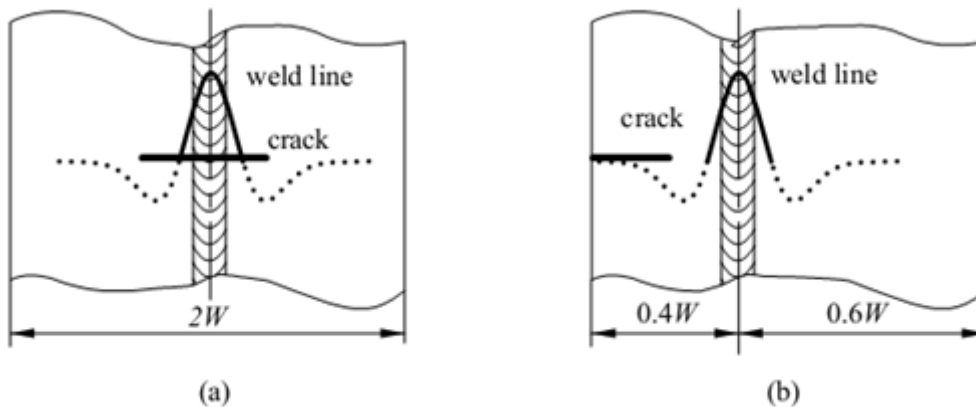
Zhang i Li [1] su istraživali ponašanje rasta pukotine integralnog zavarenog orebrenog panela. Orebreni panel je napravljen od aluminijske legure 2024-T351 i zavaren VPPA postupkom (engl. *variable polarity plasma-arc welding process*). Uzorak simulira dio oplata krila. Životni vijek orebrenog panela analiziran je na temelju linearno-elastične mehanike loma pri čemu su u obzir uzeta zaostala naprezanja unesena postupkom zavarivanja. Simulacija je uspoređena s eksperimentalnim podacima.

Razmatrani su različiti slučajevi položaja pukotine tako da je pukotina inicirana na mjestu zavara, slika 2-1 a) ili na sredini panela slika 2-1 b).



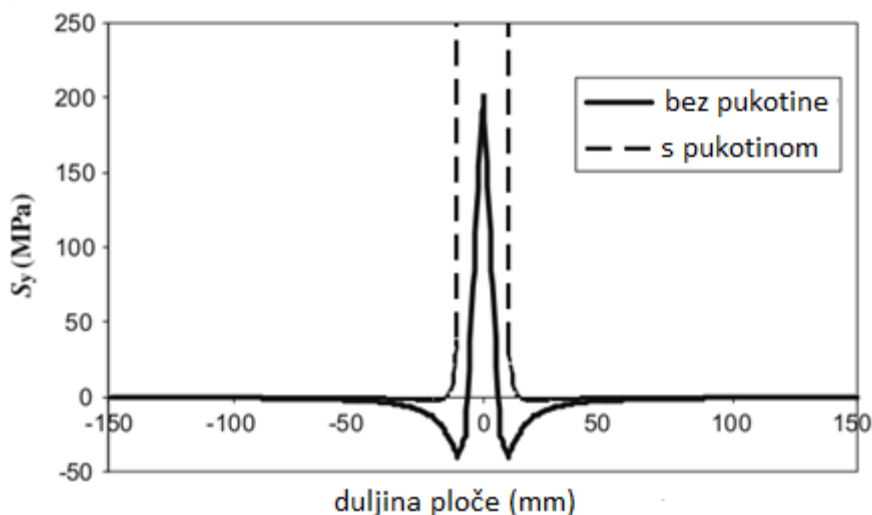
Slika 2-1 Inicijacija pukotine, a) na mjestu zavora, b) na sredini panela <sup>[1]</sup>

Rui Bao i Xiang Zhang [3] su istraživali ponašanja faktora intenziteta naprezanja  $K_I$  zavarenog panela. Razmatrani su različiti slučajevi položaja pukotine kada je pukotina na mjestu zavora i kada je pukotina na rubu ploče daleko od mjesto zavora.



Slika 2-2 Inicijacija pukotine a) na mjestu zavora b) na kraju ploče

Labeas i Diamantakos [11] su istraživali utjecaj zaostalih naprezanja na zavareni panel s pukotinom unutar zavora. Slikom 2-3 je prikazana raspodjela zaostalih naprezanja u materijalu sa i bez pukotine.



Slika 2-3 Raspodjela zaostalih napreznja u materijalu s i bez pukotine

Mahmoud; Robert J. Dexter [4] su istraživali ponašanje rasta pukotine zavarenog orebrenog panela. Početna pukotina se povećala do 305 mm. Rezultate simulacije su usporedili s eksperimentom.

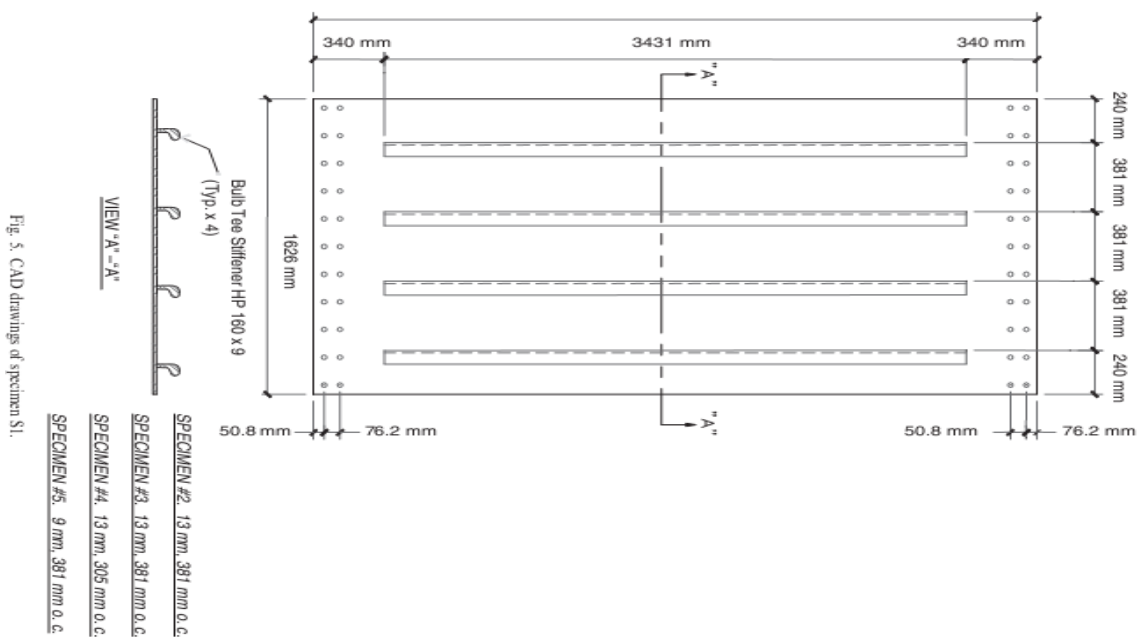
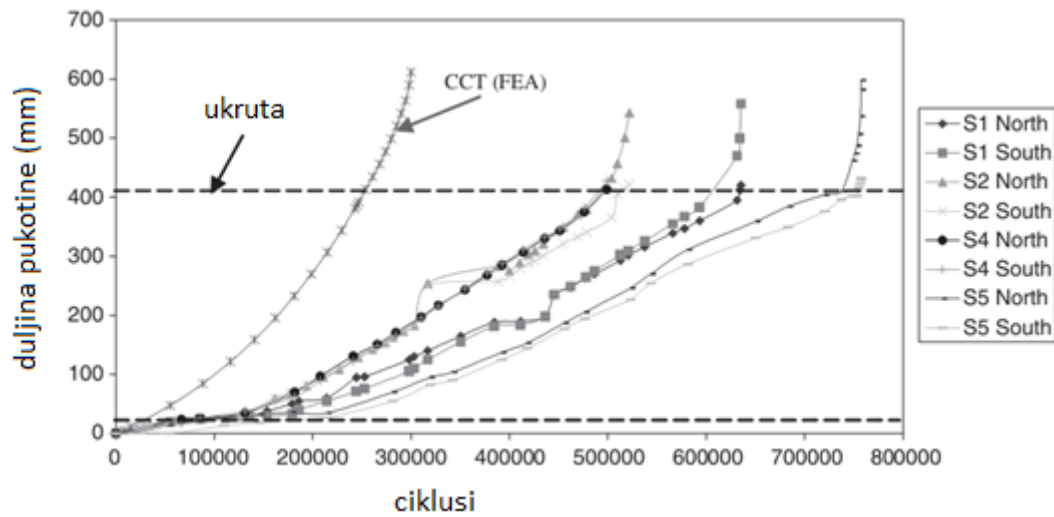


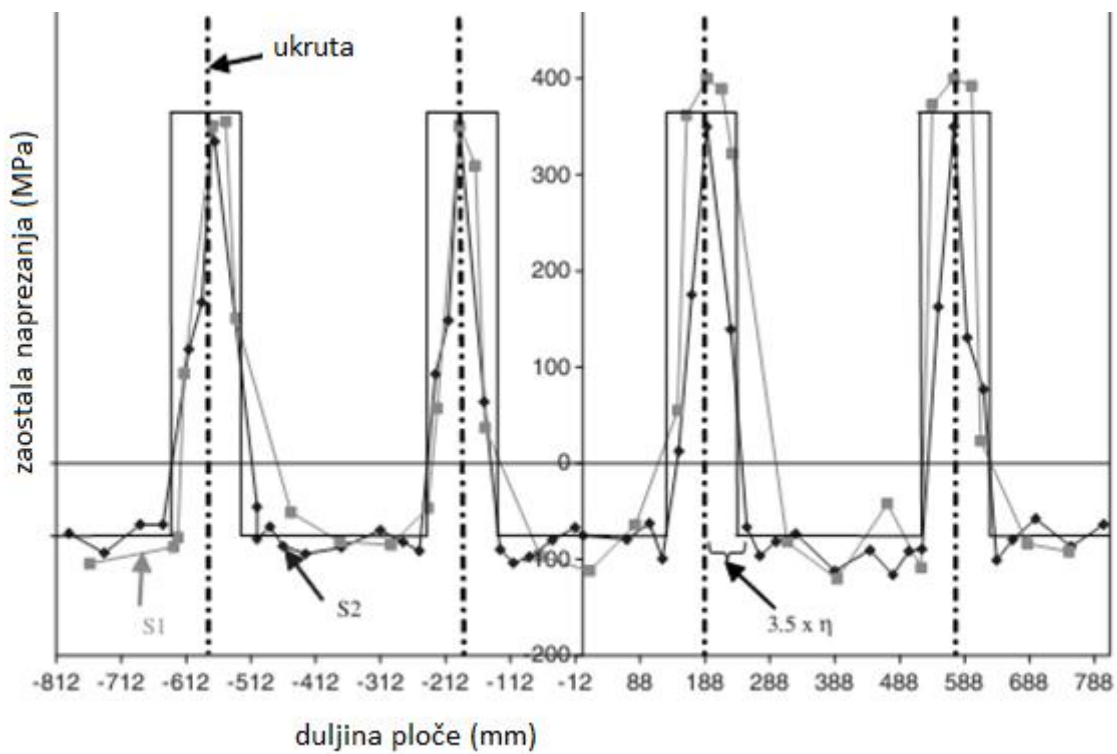
Fig. 5. CAD drawings of specimen S1.

Slika 2-4 Orebreni panel [4]



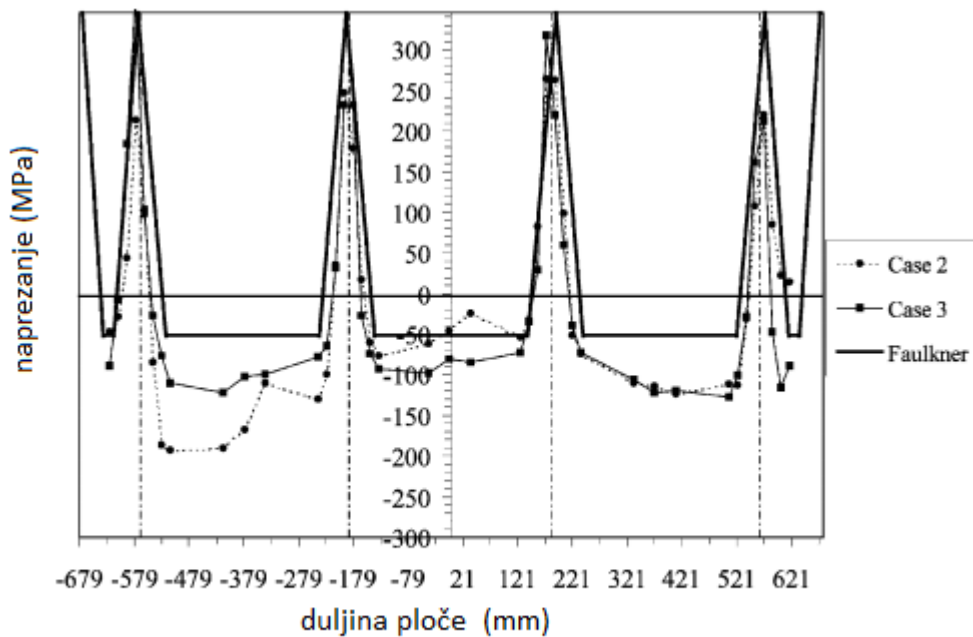


Slika 2-5 Životni vijek - usporedba FE i eksperimenta [4]

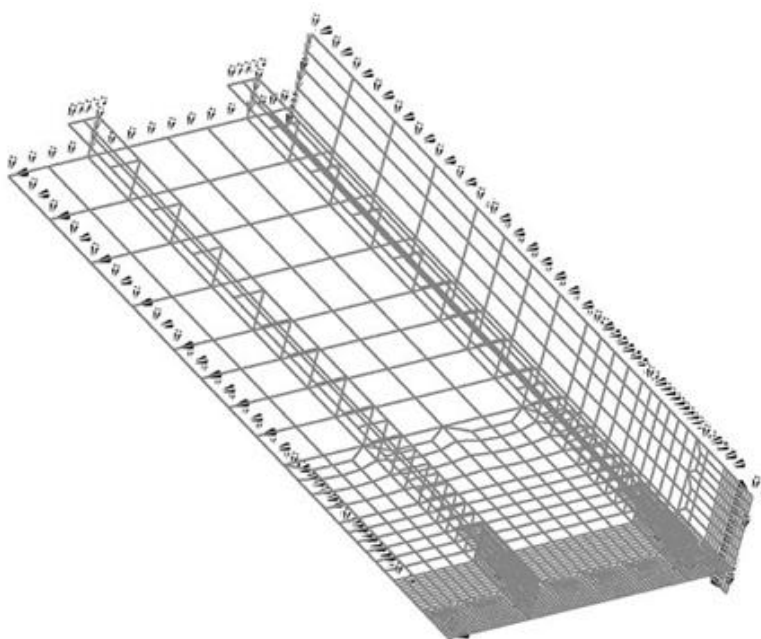


Slika 2-6 Zaostala naprezanja u eksperimentalnom uzorku [4]

Isti autori su istraživali i ponašanja faktora intenziteta naprezanja  $K_I$  zavarenog panela [5] prema podacima dobivenim iz mjerenja zaostalih naprezanja na panelu.

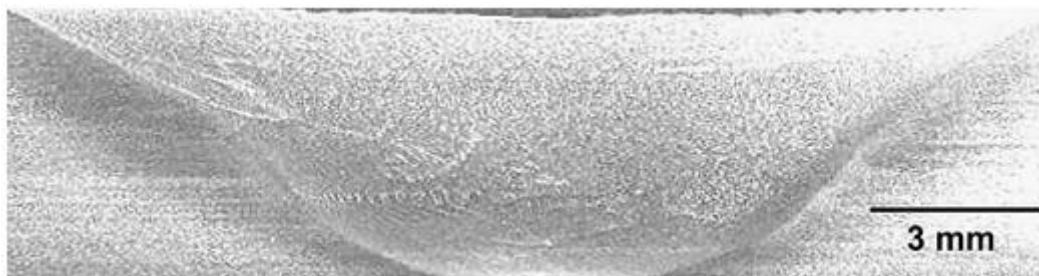


Slika 2-7 Zaostala naprezanja u eksperimentalnom uzorku [5]

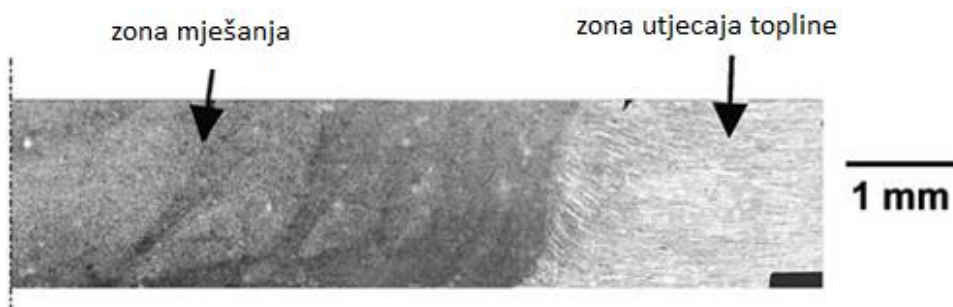


Slika 2-8 Diskretizirani model [5]

Jata i Sadanada [7] su također istraživali rast pukotine na slitini titana Ti-6Al-4V i slitini aluminija Al 7050-T7451 koje imaju široku primjenu u zrakoplovstvu.



Slika 2-9 Poprečni presjek zavarenog spoja Ti-6AL-4V [6]



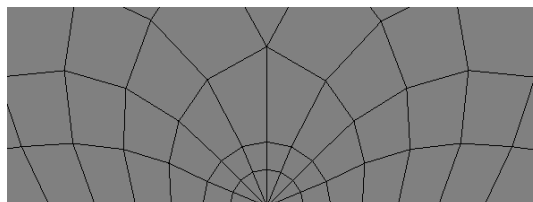
Slika 2-10 Poprečni presjek zavarenog spoja Al 7050-T7451 [6]

## 2.2 Modeli analize rasta zamornih pukotina temeljeni na linearno elastičnoj mehanici loma

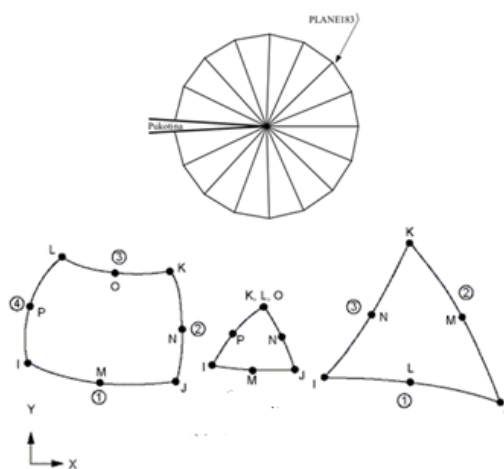
### 2.2.1 Utvrđivanje parametara mehanike loma pomoću programskog paketa ANSYS

U ANSYS-u se vrijednosti faktori intenzivnosti naprezanja izračunavaju iz pomaka čvorova u postprocesoru koristeći KCALC naredbu. Da bi se obuhvatila singularnost na fronti pukotine, oko fronte pukotine koriste se singularni konačni elementi sa središnjim čvorovima pomaknutim na  $\frac{1}{4}$  duljinu stranice elementa od vrha pukotine, slika 2-12. Za ovaj primjer je korišten element PLANE 183 koji je generiran naredbom KSCON oko vrha pukotine.

Naredba automatski generira elemente u obliku jednakokračnog trokuta oko željenog čvora. Pomoću naredbe moguće je kontrolirati radijus i broj elemenata oko vrha pukotine. Slika 2-11 daje prikaz generirane mreže oko vrha pukotine uz korištenje naredbe KSCON.



Slika 2-11 Mreža oko vrha pukotine generirana naredbom KSCON



Slika 2-12 Singularni 2D PLANE 183 element

## 2.3 Analiza napredovanja pukotine koristeći Parisovu jednadžbu

Paris-ova jednadžba se odnosi na niz faktora intezivnosti naprežanja na području subkritičnih pukotina pod utjecajem zamornog opterećenja. Osnovna jednadžba glasi:

$$\frac{da}{N} = C \Delta K^m \quad (1)$$

Gdje je:

$a$  – duljina pukotine

$N$  – broj ciklusa opterećenja

$\frac{da}{N}$  – relativno napredovanj pukotine

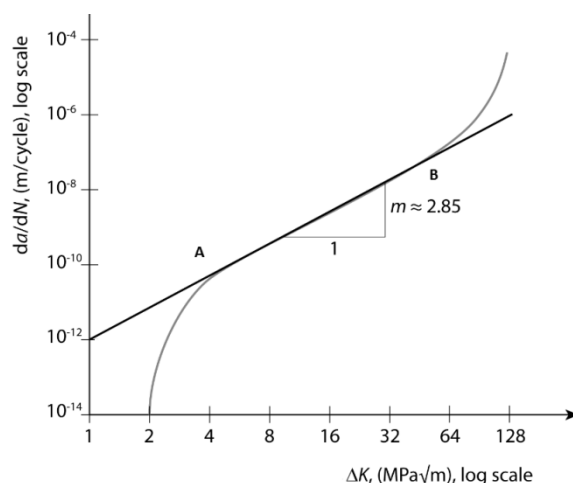
$C, m$  – konstante materijala

$\Delta K$  – rapon faktora inteziteta naprežanja

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (2)$$

Gdje je  $K_{min}$  – minimalni faktor intenziteta naprežanja

$K_{max}$  – maksimalni faktor inteziteta naprežanja



Slika 2-13 Paris-ova jednadžba [13]

Parametri  $C$  i  $m$  određuju se kao konstante pravca koji prolazi točkama A i B, slika 2-13. Konstante se dobivaju tako da se koordinate  $(da/dN)$  i  $\Delta K$  uvrste u Parisovu jednadžbu te se na taj način dobije sustav od dvije jednadžbe s dvije nepoznanice. Rješavanjem tog sustava dobivaju se konstante  $C$  i  $m$ , odnosno  $(da/dN)$  kao funkcija od  $\Delta K$ . [13]

## J –integral

J-integral predstavlja način da se izračuna relativno oslobađanja energije deformacije. Teorijsku osnovu J integrala razvili su Cherepanov (1967) i Rice (1968) neovisno jedan o drugome. Pokazali su da je vrijednost integrala neovisna o putanji. [4]. J integral dan je izrazom

$$J = \int_{\Gamma} w dy + \mathbf{T} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} ds$$

Gdje su :

u: vektor pomaka

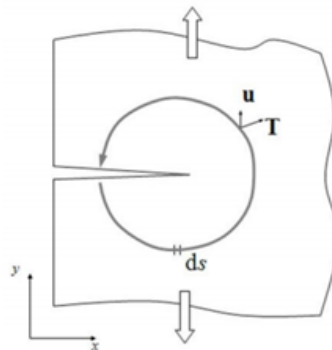
x,y; koordinate koje su paralelne i okomite na ravninu pukotine

s; duljina putanje oko pukotine

$\Gamma$ ; kontura integracije

T; vlačna sila

W; gustoća energije deformacije



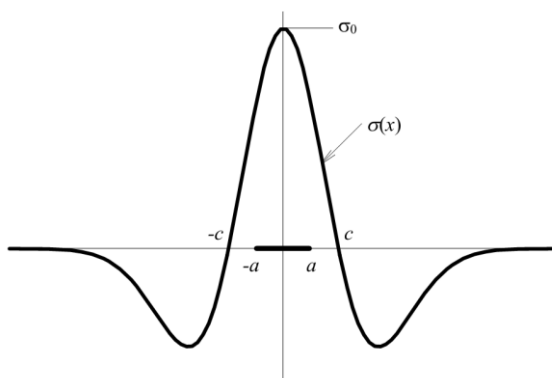
Slika 2-14 Putanja za J integral [10]

### 3 Modeliranje zaostalih napreznaja

Utvrđivanje faktora intenzivnosti napreznaja iz rezultata konačnih elemenata je jedan od osnovnih zadataka u numeričkoj mehanici loma. U ovom radu je računat samo faktor intenziteta napreznaja povezan s prvim načinom otvaranja pukotine,  $K_I$ .

Kako je već prije naglašeno, zaostala napreznaja su uravnotežena u smislu da je integral funkcije napreznaja po širini slobodne neopterećene ploče jednak nuli. Razvile su se razne teorije kako matematički opisati funkciju koja bi točno opisivala raspodjelu zaostalih napreznaja. Najraširenija metoda je metoda po Green-u (Slika 3-1) [6].

$$\sigma(x) = \sigma_0 e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{c}\right)^2} \left[ 1 - \left(\frac{x}{c}\right)^2 \right] \quad (3)$$



Slika 3-1 Green-ova funkcija

Wu i Carlsson [20] su opisali računanje faktora intenziteta napreznaja uslijed zaostalih napreznaja,  $K_{ress}$ .  $\sigma_0$  je granica tečenja materijala,  $a$  je polovična duljina pukotine i  $c$  je odsječak na kojem krivulja napreznaja siječe os  $x$ .

$$K_{ress} = \sigma_0 \sqrt{\pi a} e^{-0.42\left(\frac{x}{c}\right)^2} \left[ 1 - \frac{1}{\pi} \left(\frac{x}{c}\right)^2 \right] \quad (4)$$

Ako s  $K_{res}$  označimo vrijednost faktora intenzivnosti napreznaja za samo zaostala napreznaja, a s  $K_{tot}$  faktor intenzivnosti napreznaja za ukupno djelovanje zaostalih napreznaja i vanjskog opterećenja ( $K_{appl}$ ), možemo reći da je:

$$K_{\text{tot}} = K_{\text{appl}} + K_{\text{ress}} \quad (5)$$

Za računanje  $K_{\text{ress}}$  potrebno je unijeti odgovarajuće vrijednosti zasotalih naprezanja u numerički model koja se slažu s izmjerenim rezultatima. Funkcije za modeliranje zaostalih naprezanja u modelu su dostupne u većini komercijalnih FE alata kao što su ABAQUS subrutina SIGINI [8], ANSYS naredba INISTATE [9]. Zaostala naprezanja se trebaju uravnotežiti u prvom koraku bez vanjskog opterećenja i u modelu bez rubnih uvjeta (ako model nema ravninu simetrije). ABAQUS naredba „UN-BALANCED STRESS“ se poziva za uravnoteženje zaostalih naprezanja. Kod ANSYS-a se poziva naredba INISTATE koja se primjenjuje u prvom koraku opterećenja i automatski uravnotežuje zaostala naprezanja.[3]

Posebnu pažnju treba posvetiti načinu unošenja vrijednosti zaostalih naprezanja u numerički model. Ako postavimo globalni koordinatni sustav tako da je y-os paralelna s linijom zavora, tada svi elementi na x udaljenosti od zavora moraju imati istu vrijednost zaostalih naprezanja. Drugim riječima, na svaki  $x_i$  ide pripadni  $\sigma_i$ . Nije uvijek moguće postići da uravnoteženo naprezanje bude jednako unesenom naprezanju.

U daljnjem radu će se istražiti raspodjela naprezanja i deformacija u ploči polovične širine  $B=120$  mm i duljine  $C=300$  mm, sa i bez pukotine koristeći INISTATE naredbu i pretpostavljene parametre Green-ove funkcije:  $\sigma_0=235$  Mpa,  $c=12$  mm. Karakteristike materijala analizirane ploče dane su u tablici 3-1.

**Tabela 3-1 Karakteristike materijala**

E - modul elastičnosti	206 000 N/mm <sup>2</sup>
$\nu$ - Poissonov koeficijent	0.3
$\sigma_0$ - Granica tečenja	235 MPa

U svrhu primjene i implementacije metodologije modeliranja zaostalih naprezanja na orebrene panele prvo je primijenjena naredba INISTATE (ANSYS [9]) na model ploče sa zavarom po sredini. Dimenzije analizirane ploče i diskretizacija na



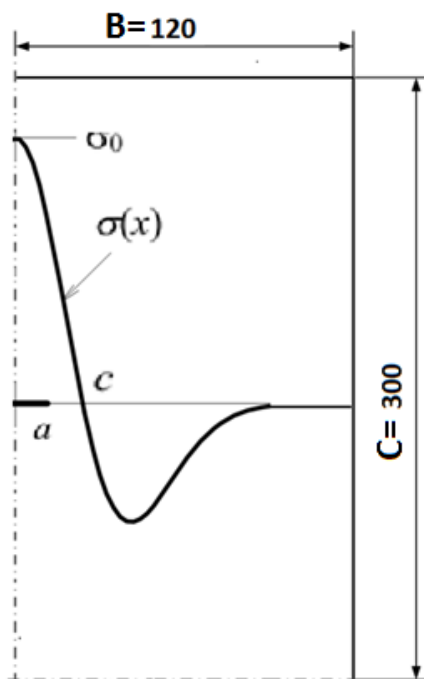
konačne elemente dani su na slikama 3-2 i 3-3. Primjer konvergencije numeričkog rješenja za panel je prikazan slikom 3-4, gdje je pokazana promjena vrijednosti naprezanja  $\sigma_y$  u odnosu na širinu ploče. Zaključeno je da se za finoću mreže kada je duljina stranice elementa jedan milimetar rezultati uravnoteženog naprezanja najbolje slažu s unesenim vrijednostima. Na slici 3-5 prikazan je diskretizirani model sa površinom koja ima finu mrežu u okolini vrha pukotine gdje je veličina elemenata višestruko manja od 1 milimetar.

Raspodjela zaostalih naprezanja definirana Green-ovom funkcijom kada je širina elementa u okolini vrha pukotine manja od 1 milimetar dana je slikom 3-6. Na slici 3-7 prikazan je model iste ploče, ali ovaj puta s modeliranom pukotinom duljine  $a=7.7$  mm. Na slici 3-8 prikazan je uvećani detalj pukotine, a na slici 3-9 rezultati vertikalne komponente naprezanja,  $\sigma_y$  zaostalih naprezanja u modelu s pukotinom od  $a=7.7$  milimetara.

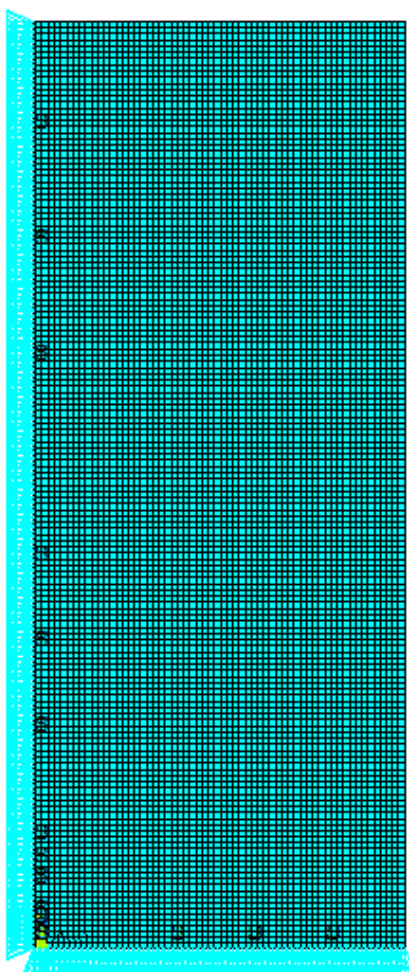
Na slici 3-10 prikazano je naprezanje  $\sigma_y$  u ravnini pukotine za pukotinu duljine  $a=7.7$  mm utvrđeno naredbom INISTATE.

Dijagrami naprezanja na slikama 3-5, 3-7, 3-9 i 3-10 rađeni su na presjeku ravnine pukotine.

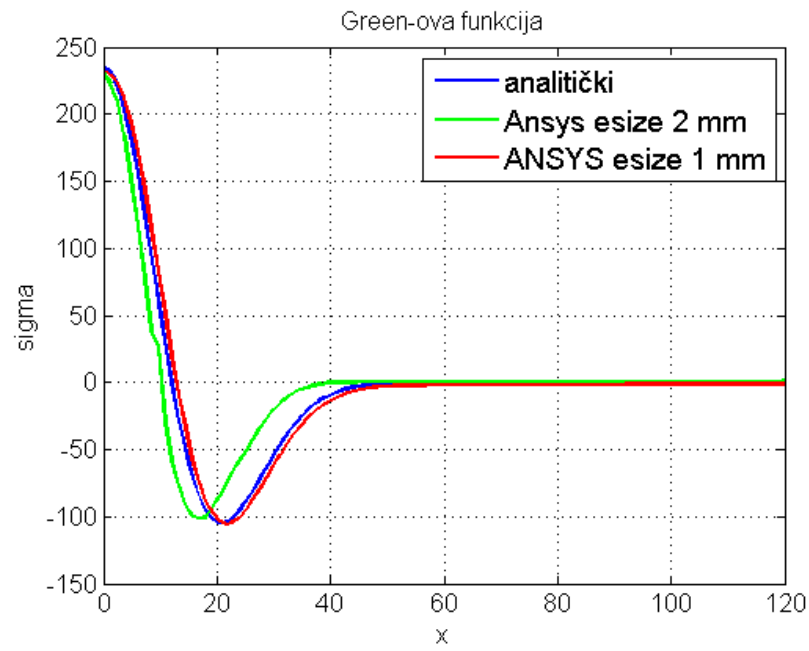
Nakon provjere konvergencije pokazalo se da se za zadani orebreni panel rezultati najbolje poklapaju kada je širina pravokutnog elementa 1 milimetar.



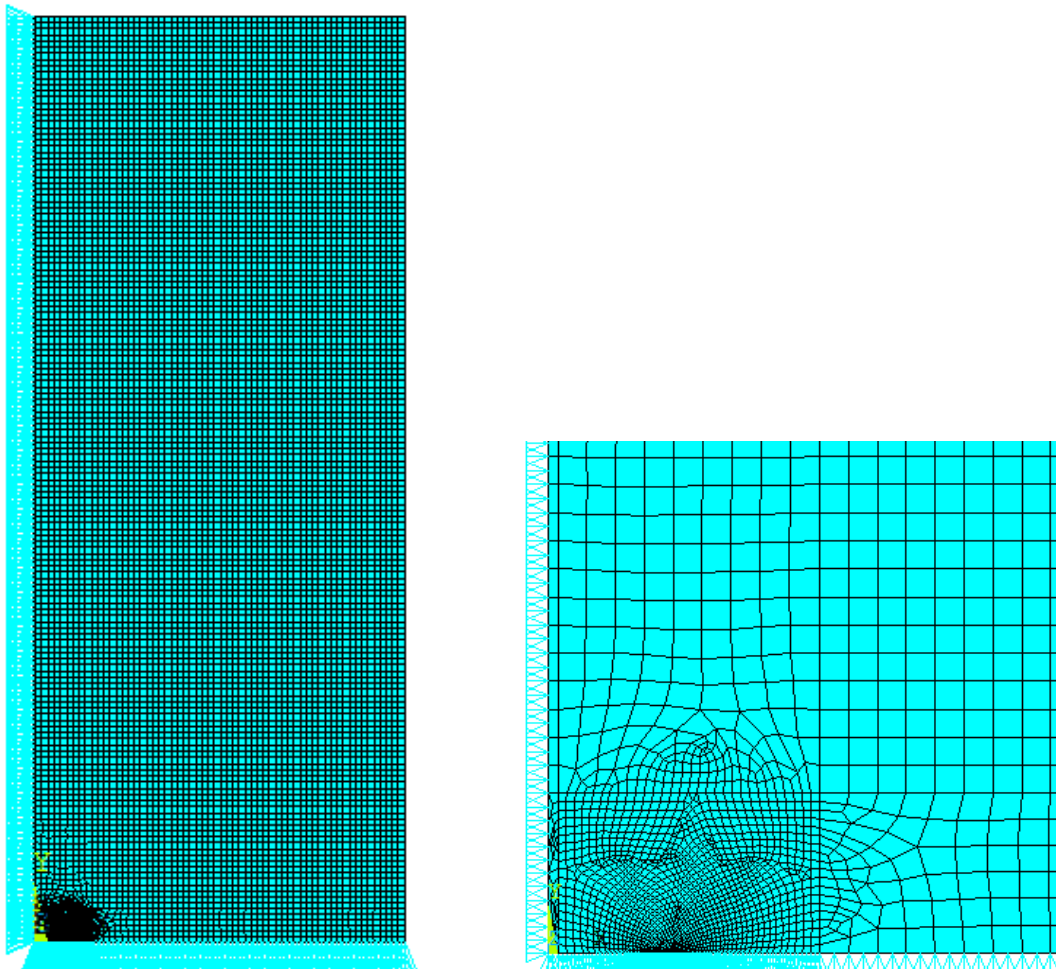
Slika 3-2 Dimenzije analizirane ploče s dvostrukom simetrijom



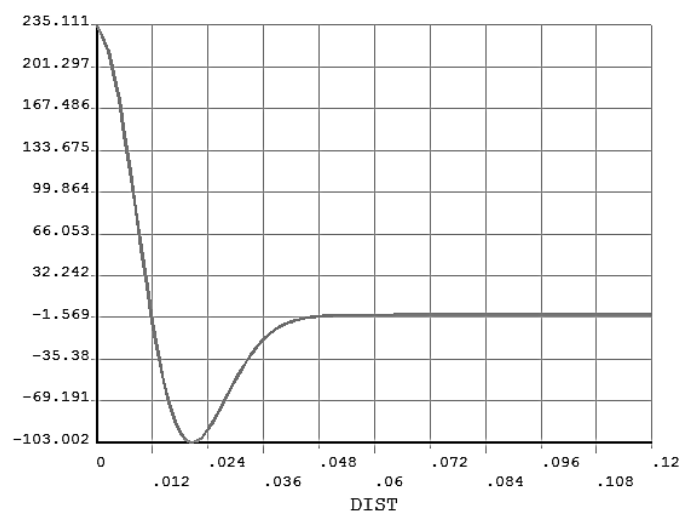
Slika 3-3 Diskretizacija modela ploče na konačne elemente s primjenjenim rubnim uvjetima



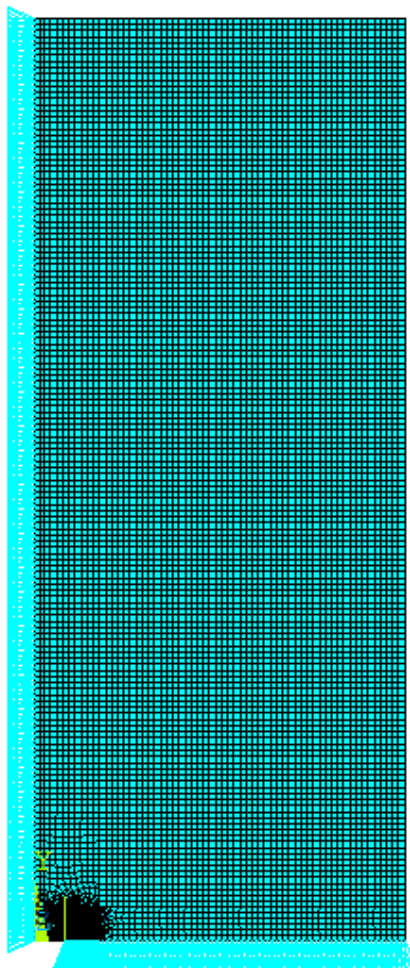
Slika 3-4 Konvergencija numeričkog rješenja ovisno o gustoći mreže. Prikazane su vrijednosti vertikalne komponente naprezanja,  $\sigma_y$ .



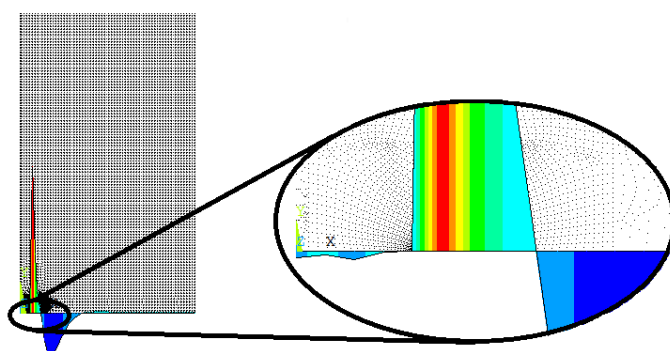
Slika 3-5 Diskretizacija modela na konačne elemente s primijenjenim rubnim uvjetima za ploču s pukotinom: a) jedna četvrtina ploče, b) detalj ploče s finom mrežom



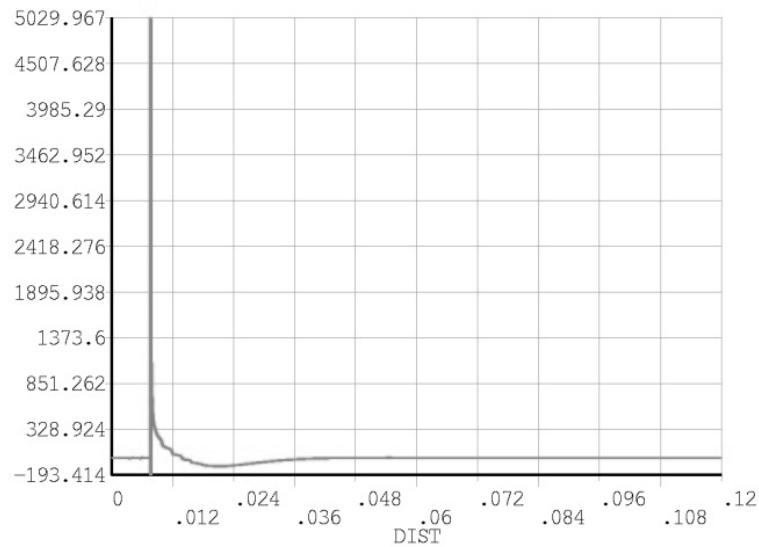
Slika 3-6 Vrijednosti vertikalne komponente naprezanja,  $\sigma_y$  za model s lokalnom finom mrežom prema prethodnoj slici.



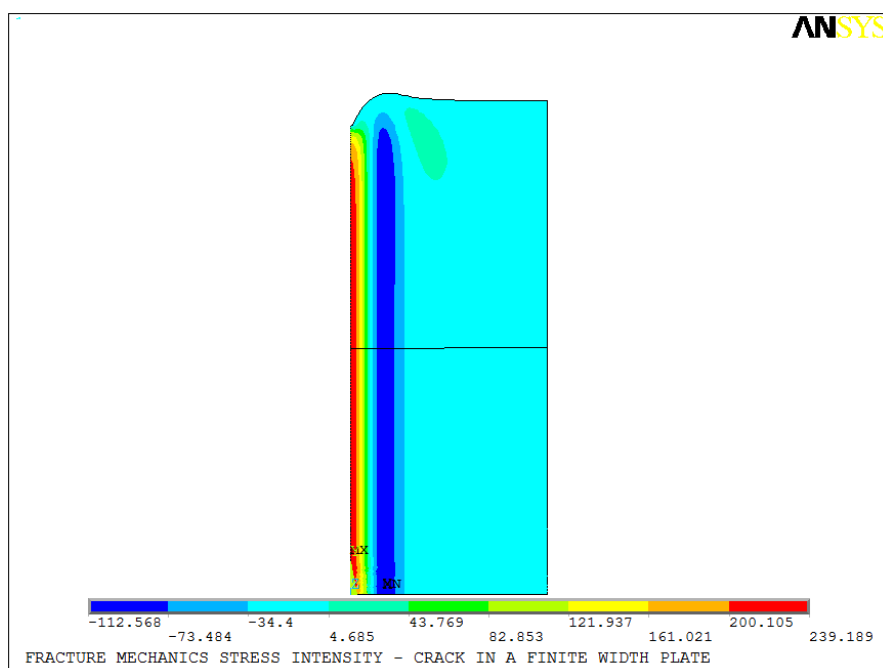
Slika 3-7 Model konačnih elemente ploče s pukotinom duljine  $a=7.7$  mm i primijenjeni rubni uvjeti dvostruke simetrije.



Slika 3-8 Uvećani detalj okolice oko vrha pukotine s rezultatima vertikalne komponente naprezanja,  $\sigma_y$ .



Slika 3-9 Vertikalna komponenta naprezanja,  $\sigma_y$  uslijed zaostalih naprezanja za model s pukotinom duljine  $a=7.7$  mm.

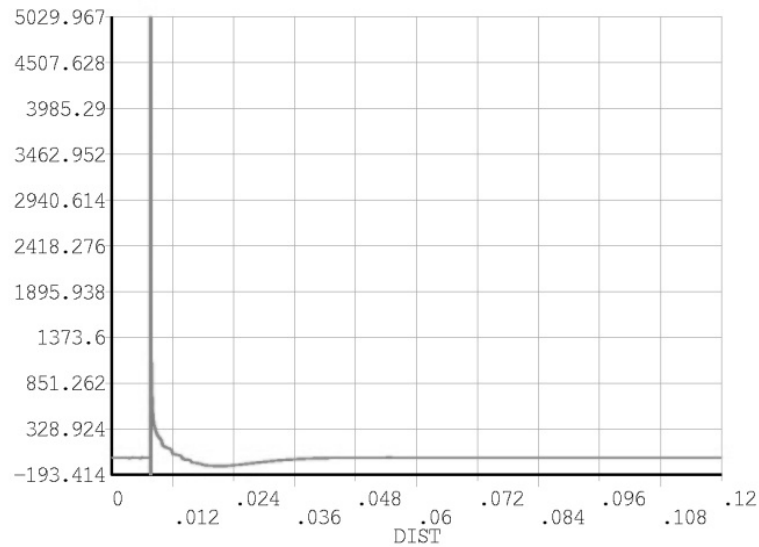


Slika 3-10 Naprezanje  $\sigma_y$  utvrđena naredbom INISTATE uslijed zaostalih naprezanja s finom mrežom oko vrha pukotine

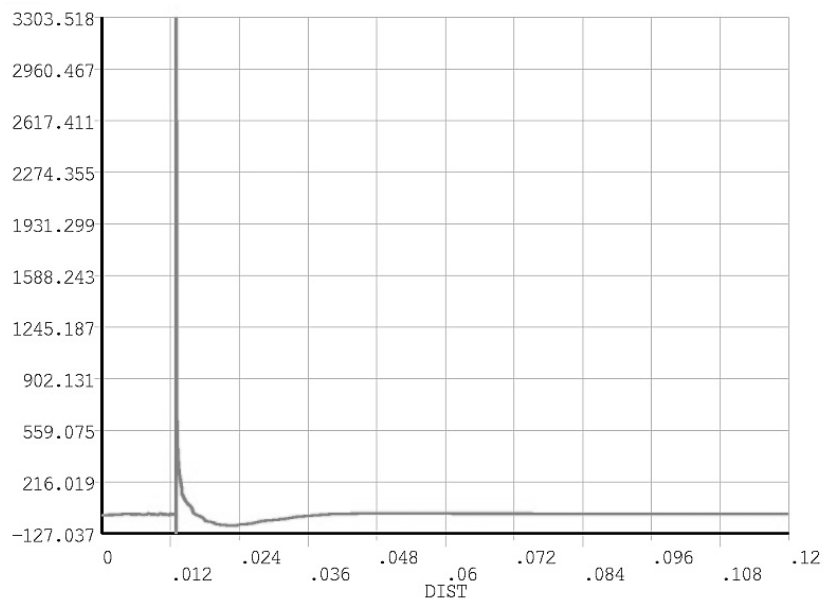
Napravljena su tri modela s tri različita opterećenja za računanje  $K_I$  i vrijednost  $J$  integrala za različite duljine pukotina.

Prvi model je bio opterećen samo s vanjskim opterećenjem od  $\Delta\sigma = 80$  Mpa, drugi model je bio opterećen samo s zaostalim naprezanjima, dok je treći model bio superpozicija prethodnih dvaju modela, zaostalih naprezanja i vanjskog opterećenja.

Slike 3-11 i 3-12 prikazuju naprezanje u ploči s pukotinom od 7.7 i 13 milimetara usljed zaostalih naprezanja.

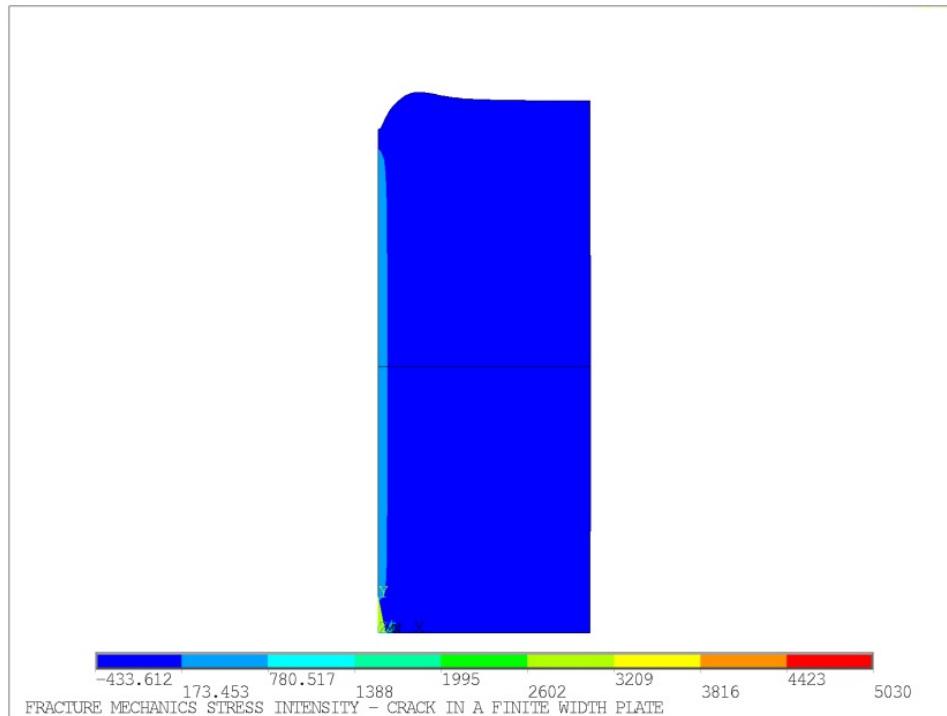


**Slika 3-11 Naprezanje u ploče zbog zaostalih naprezanja ( $a=7.7$  mm)**



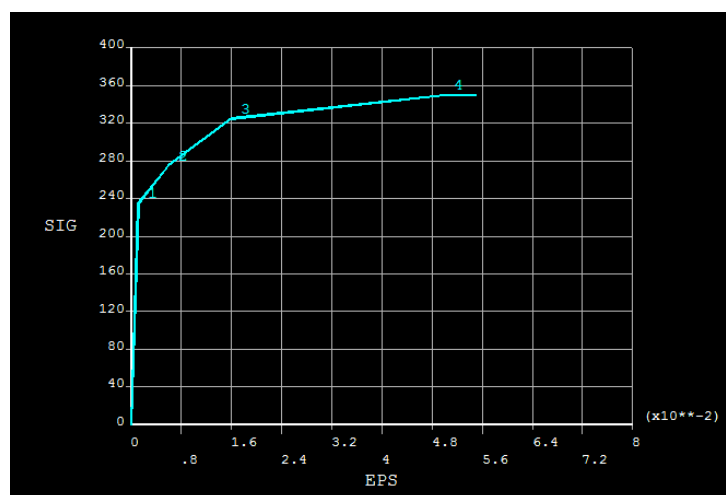
**Slika 3-12 Naprezanje u ploče zbog zaostalih naprezanja ( $a=13$  mm)**

Slika 3-13 prikazuje naprezanje  $\sigma_y$  pri superpoziciji zaostalih naprezanja i vanjskog opterećenja za duljinu pukotine od  $a=7.7$  milimetara.



Slika 3-13 Naprezanje u ploči usljed zaostalih naprezanja i vanjskog opterećenja

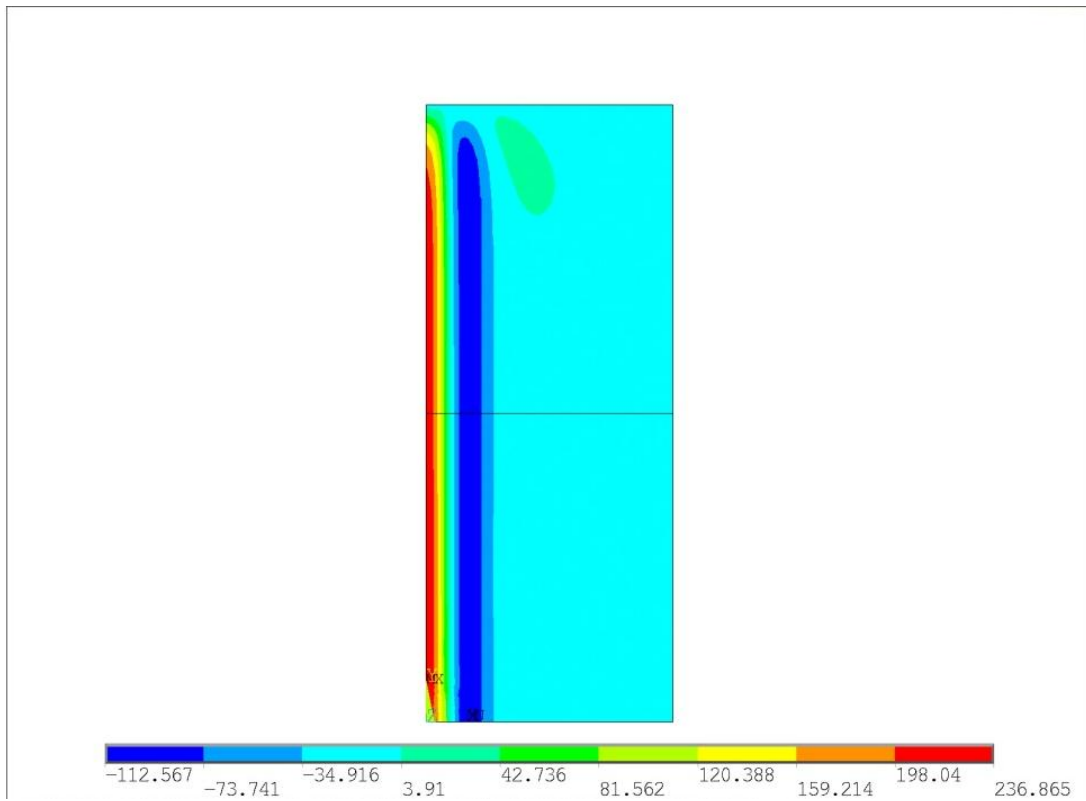
Idući primjer pokazuje utjecaj zaostalih naprezanja na materijal s multilinearom karakteristikom. Multilinearna karakteristika materijala je prikazana slikom 3-14.



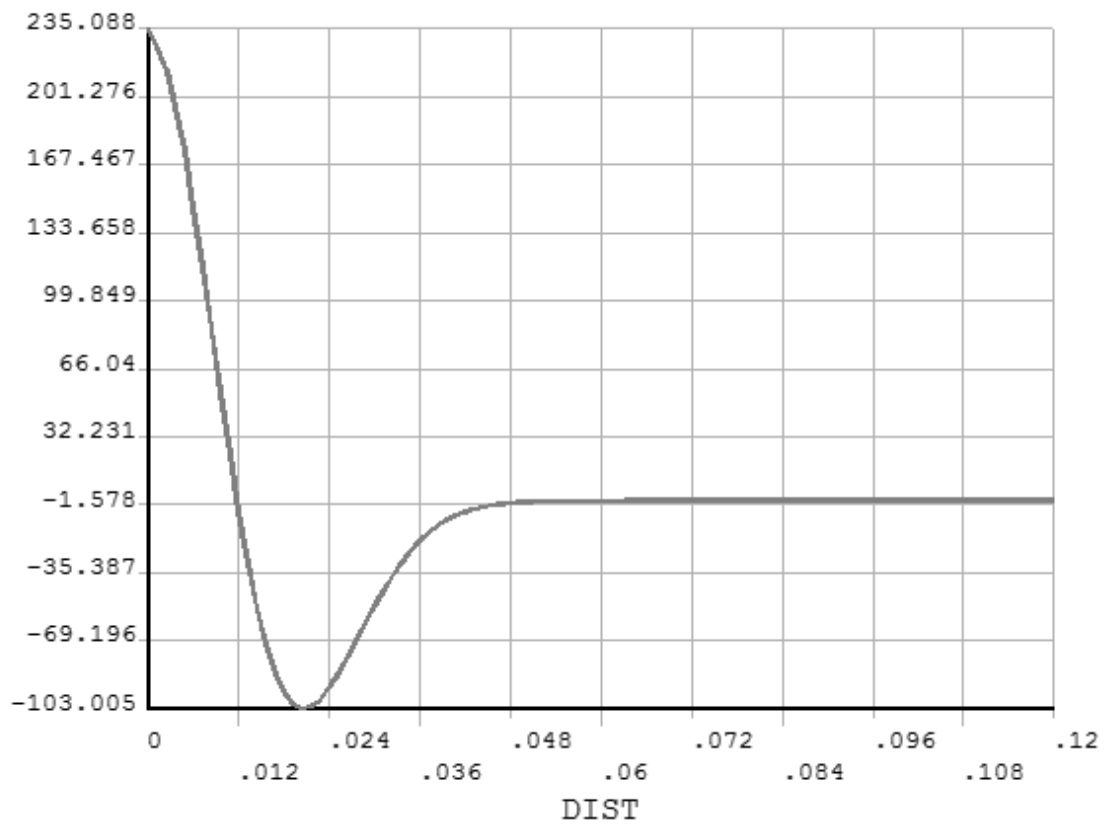
Slika 3-14 Multi linearna karakteristika materijala

Na slikama ispod prikazana su zaostala naprezanja za multilinearu karakteristiku materijala. Multilinearna karakteristika materijala daje praktički iste rezultate naredbom INISTATE kao što daje linearna karakteristika materijala.



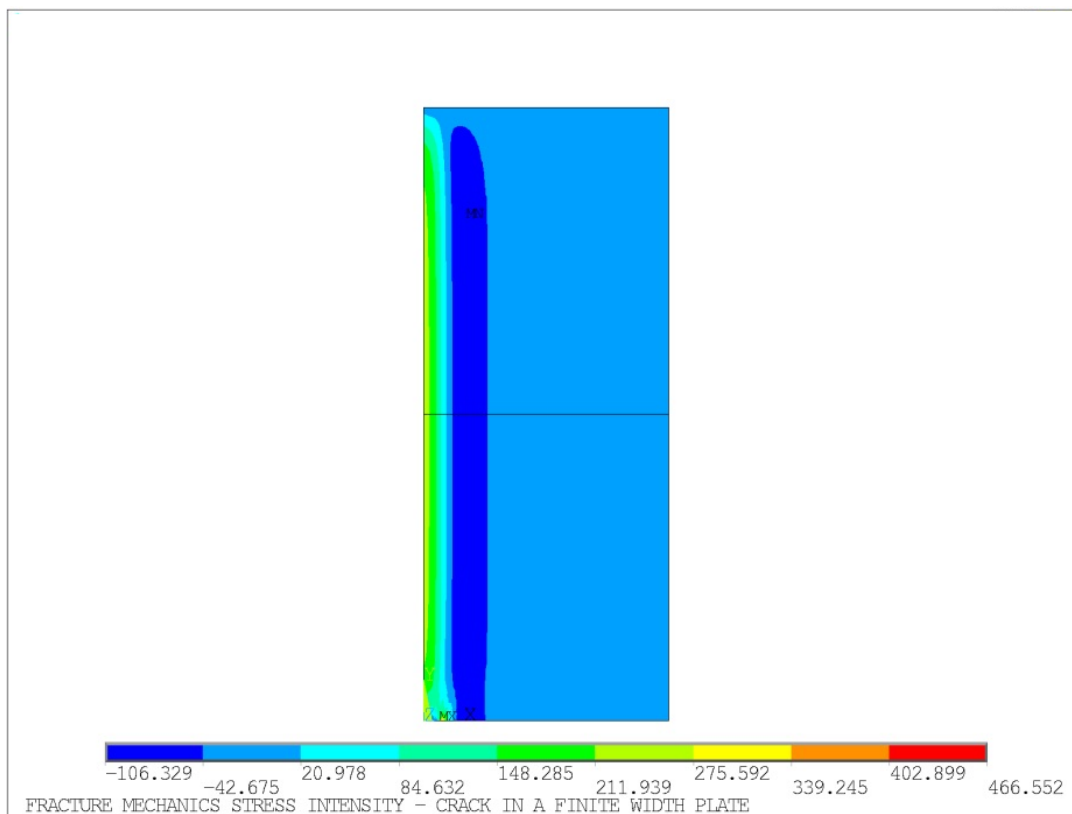


Slika 3-15  $\sigma_y$  za multinearnu karakteristiku materijala



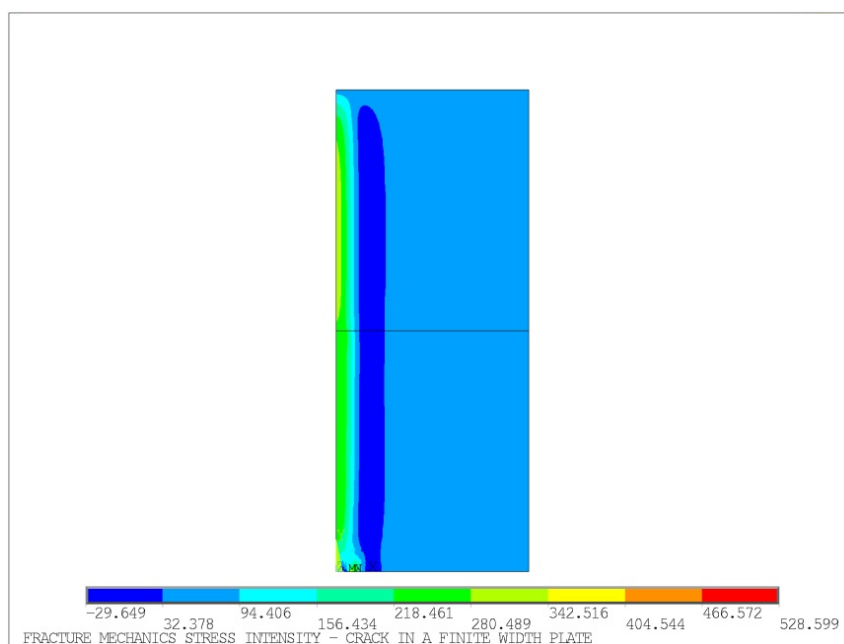
Slika 3-5  $\sigma_y$  za multinearnu karakteristiku materijala na liniji pukotine

Na slici 3-17 je prikazan utjecaj zaostalih napreznaja za duljinu pukotine od 7.7 milimetara.



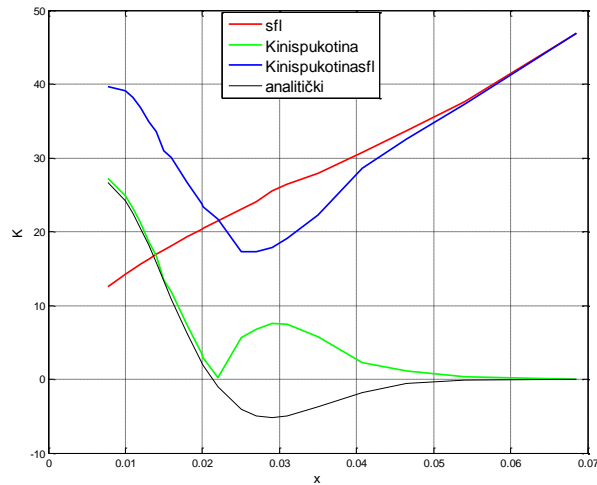
**Slika 3-6** Zaostala napreznaja za multilinearu karakteristiku materijala ( $a=7.7$  mm)

Slijedeća slika prikazuje superpoziciju zaostalih napreznaja i vanjskog opterećenja za multilinearu karakteristiku materijala i veličinu pukotine od 7.7 milimetara



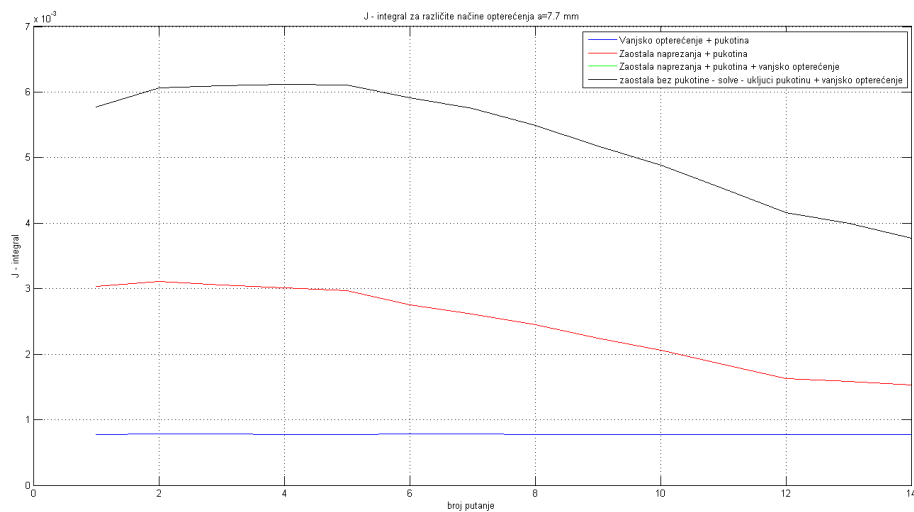
**Slika 3-7** Zaostala napreznaja i vanjsko opterećenje na ploči

Na slici 3-19 može se uočiti kako programski paket ANSYS 12.1 u linearno elastičnoj analizi daje samo apsolutnu vrijednost faktora intenziteta naprezanja. Korištenjem izraza (5) mogu se dobiti vrijednosti  $K_I$  samo za zaostala naprezanja koja su negativna u području tlačnih zaostalih naprezanja.

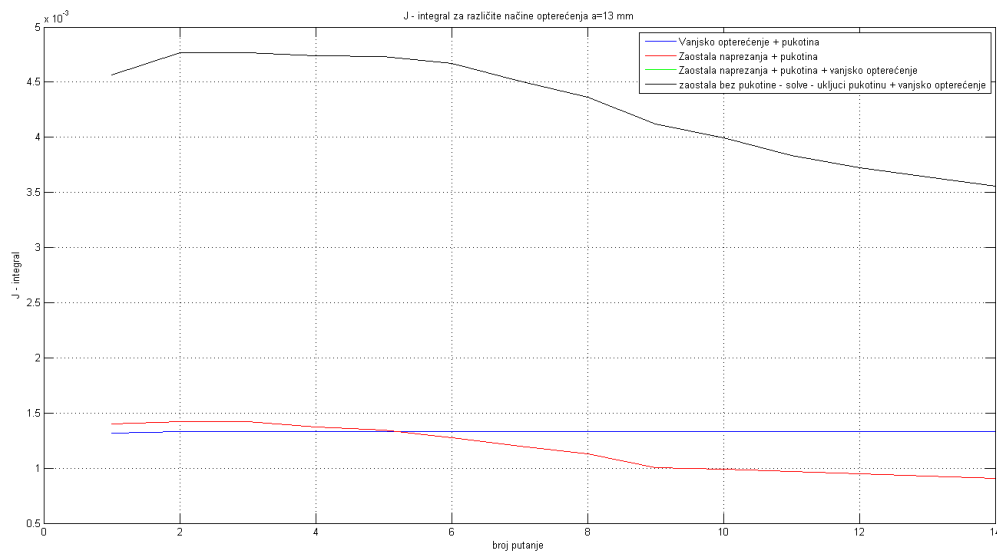


Slika 3-8  $K_I$  faktor za različite slučajeve opterećenja

Na prvoj vrijednosti pukotine od  $a=7.7$  mm slika 3-20 prikazuje vrijednosti J integrala po putanjama.



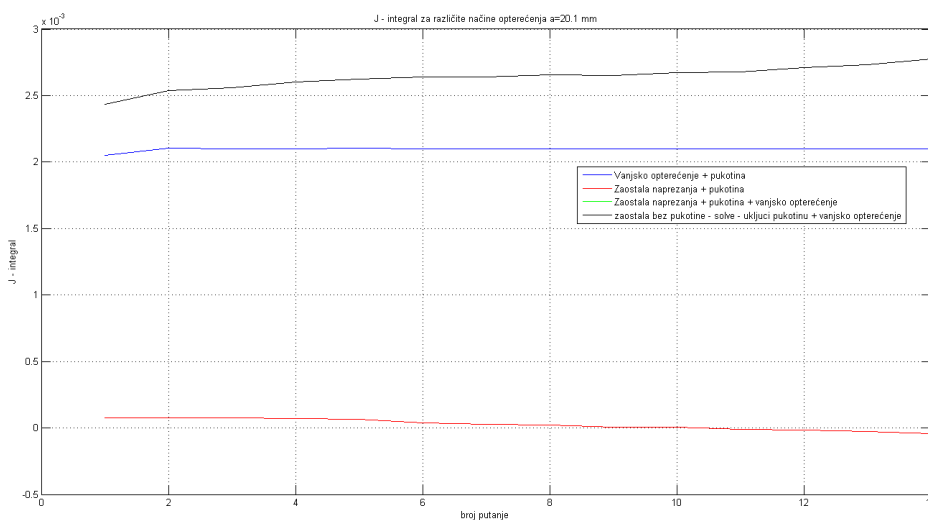
Slika 3-20 Vrijednost J - integrala za različite slučajeve opterećenja  $a=7.7$  mm



Slika 3-21 Vrijednost J - integrala za različite slučajeve opterećenja a=13 mm

Iz prikazanih slika vidimo da se za zaostala naprezanja J ne stabilizira kao što je bio slučaj samo s vanjskim opterećenjem.

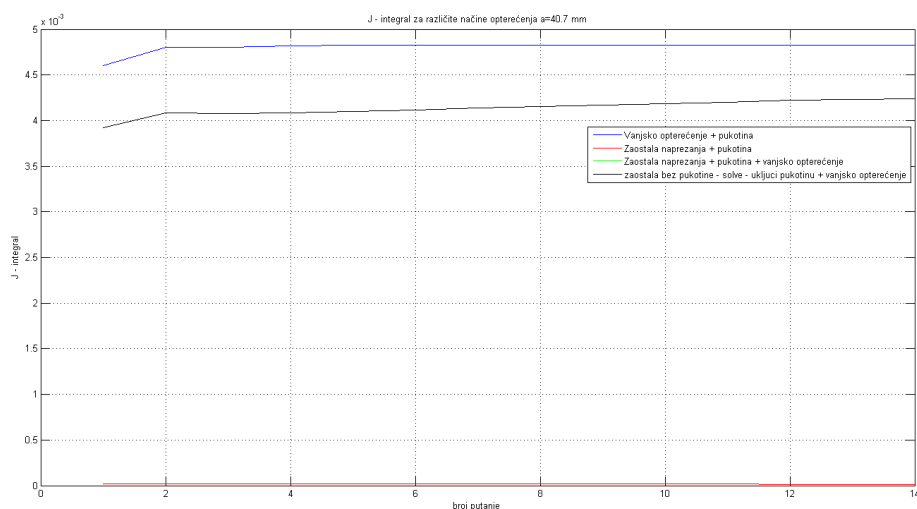
Na slici 3-22 prikazano je kako na području gdje djeluju maksimalna tlačna zaostala naprezanja vrijednost J integrala prelazi u negativnu vrijednost.



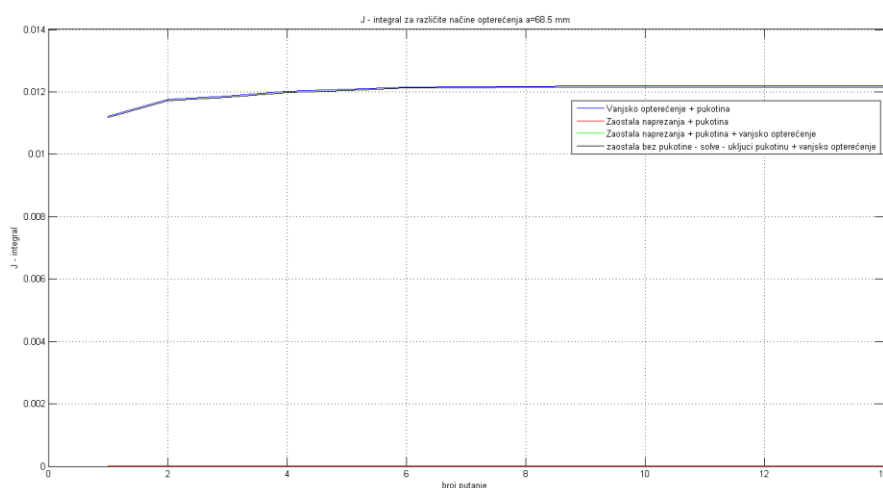
Slika 3-22 J za različite vrste opterećenja (a=20.1)

Kako pukotina propagira iznad 40 milimetara tako zaostala naprezanja imaju sve manji utjecaj na vrijednost J integrala kako je prikazano slikom 3-23. Razlog tomu je

što su se zaostala naprezanja uravnotežila na duljini ploče od 40 milimetara. Na konačnoj duljini pukotine od 68.5 milimetara dominantan je J integral samo zbog vanjskog opterećenja.



Slika 3-23 J za različite vrste opterećenja (a=40.7 mm)



Slika 3-24 J za različite vrste opterećenja (a=68.5 mm)

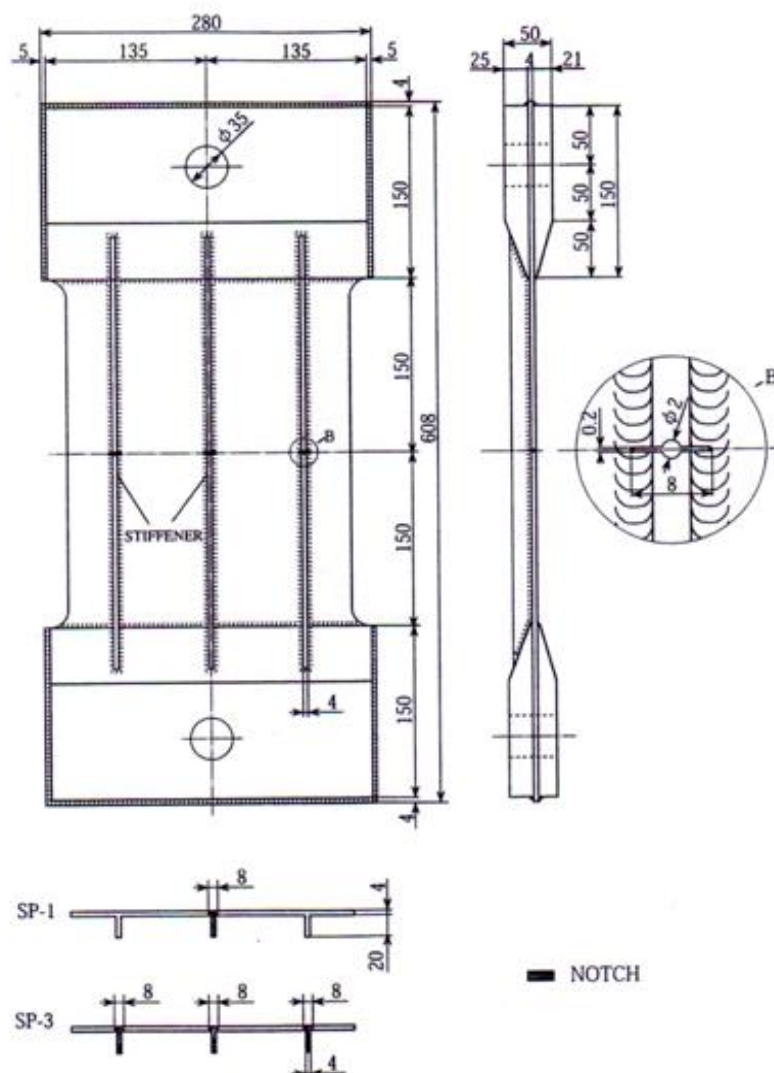
Za pukotine koje se nalaze u području zaostalih tlačnih naprezanja bez vanjskog opterećenja vrijednost J integrala se smanjiva s većom putanjom i prelazi u negativnu vrijednost.

MISO sa zaostalim naprezanjima s pukotinom i s vanjskim opterećenjem u jednom koraku daje iste rezultate kao da u prvom koraku uravnotežimo zaostala naprezanja bez pukotine, a u drugom koraku uključimo pukotinu i vanjsko opterećenje.

## 4 Modeliranje utjecaja zaostalih napreznja na životni vijek orebrenog panela

### 4.1 Geometrija i materijal eksperimentalnog uzorka orebrenog panela

U eksperimentalnom istraživanju, [15], napredovanja pukotine korišten je uzorak orebrenog panela koji ima tri ukrute zavarene na ploču. Materijal uzorka je meki konstrukcijski čelik ( $E = 206\ 000\ \text{N/mm}^2$ ,  $\nu = 0.3$ ,  $S_y = 235\ \text{MPa}$ ). Izgled i dimenzije uzorka orebrenog panela, prikazane su na slici 4-1.

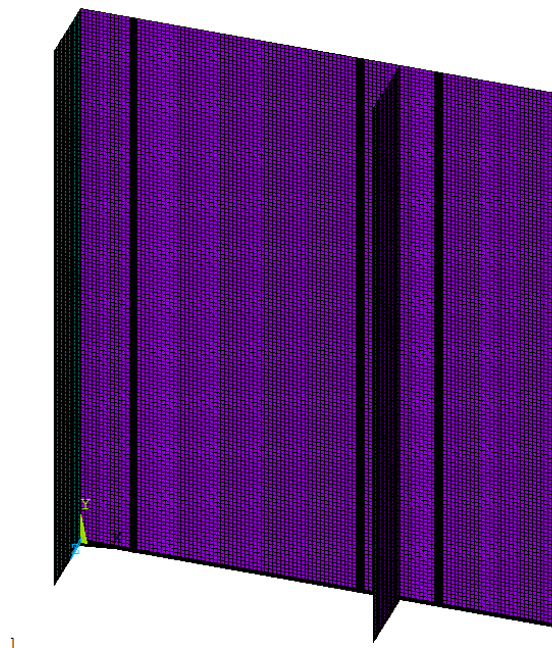


Slika 4-1 Orebreni panel <sup>[15]</sup>

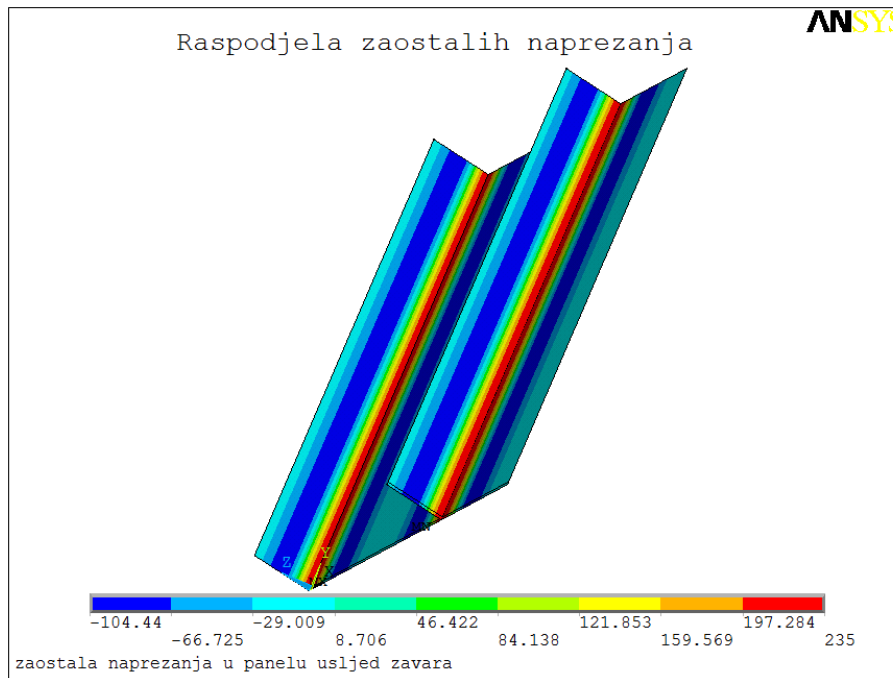
## 4.2 Modeliranje zaostalih naprezanja u orebrenom panelu

Za provjeru modela prvo su unesena zaostala naprezanja po Green-u. Konstanta „c“ za Green-ovu funkciju odabrana je tako da odgovara dvostrukoj debljini ploče ( $c=8$  mm). Na slici 5-1 je prikazan diskretizirani model panela.

Na slici 4-2 prikazan je rezultat raspodjele zaostalih naprezanja u orebrenom panelu dobiven na temelju Green-ove funkcije.

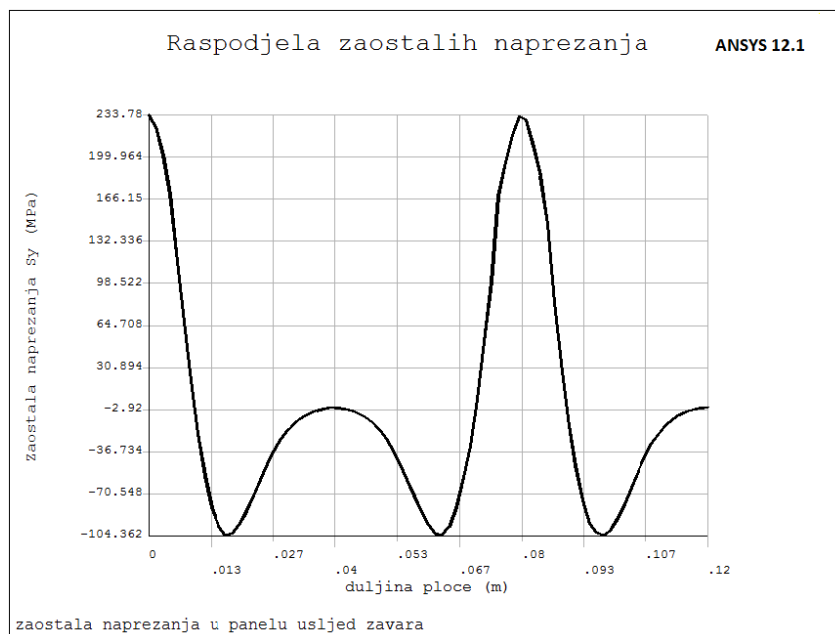


Slika 4-2 Diskretizirani model orebrenog panela



Slika 4-3  $\sigma_y$  naprezanja u orebrenom panelu

Numeričkom integracijom naprezanja po širini ploče utvrđeno ja da su se naprezanja upostpunosti uravnotežila. Naprezanja unutar ploče zbog zaostalih naprezanja mogu se vidjeti na slici 4-4.

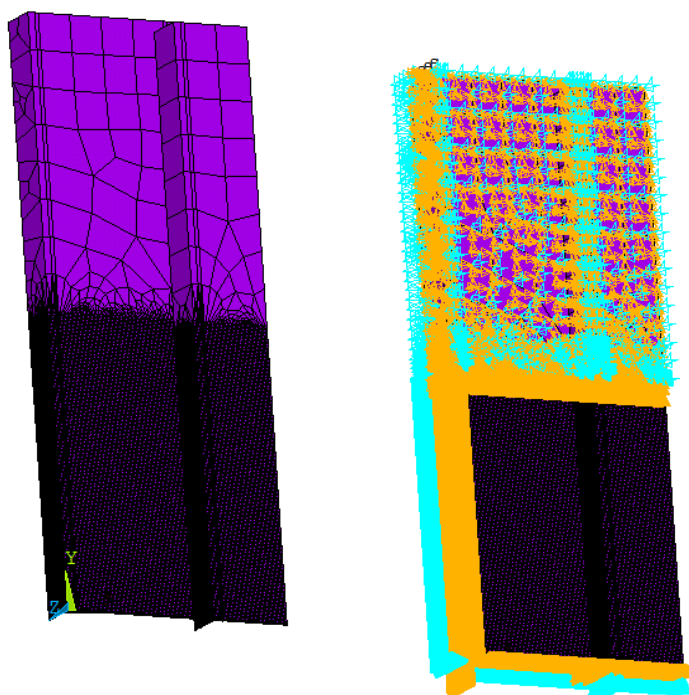


Slika 4-4 Raspodjela zaostalih naprezanja u orebrenom panelu (po Green-u)



### 4.3 Modeliranje zaostalih napreznja za eksperimentalni uzorak orebrenog panela

Na slici 4-5 a) je prikazan diskretizirani model eksperimentalnog uzorka , a na slici 4-5 b) su naznačeni primijenjeni rubni uvjeti.



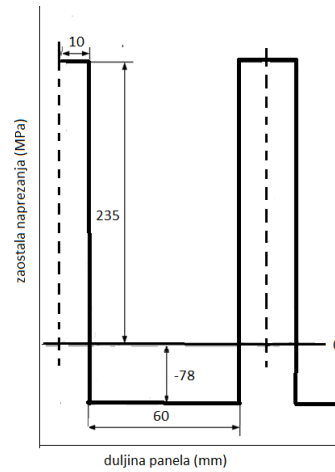
Slika 4-5 Model eksperimentalnog uzorka: a) diskretizirani model b) rubni uvjeti

Najvažnije područje modela nalazi se oko samog vrha pukotine. Da bi se obuhvatila singularnost u vrhu pukotine, oko vrha pukotine koriste se singularni Shell 281 konačni elementi.

Tabela 4-1 Specifikacija modela konačnih elemenata

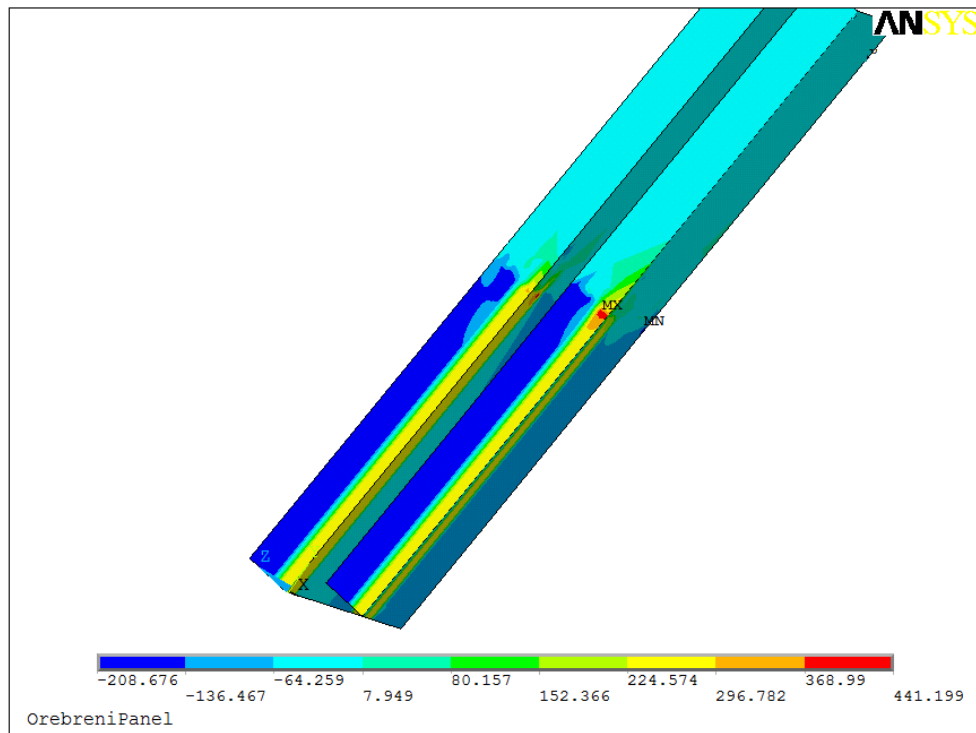
Vrsta konačnog elementa	Broj čvorova elementa	Ukupni broj elemenata
Shell 281	35757	11863
Shell 281 singularni	6	8

U orebreni panel su unesena zaostala naprezanja na način kako je to predložio Dexter [5] na način da su idealizirana pravokutnim površinama kao što je pokazano na slici 4-6.

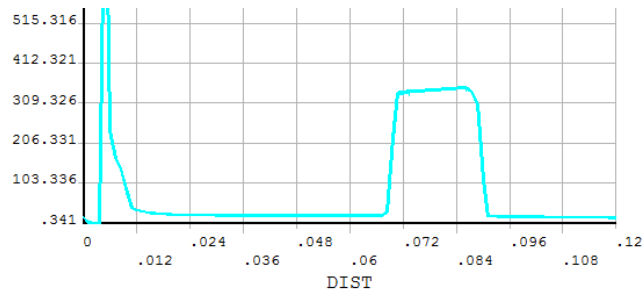


Slika 4-6 Raspodjela zaostalih naprezanja

Na slici 4-7 su prikazana su zaostala naprezanja u orebrenom panelu utvrđena analizom. Na slici 4-8 su prikazana naprezanja u ravnini pukotine ( $a=4.7$  mm).



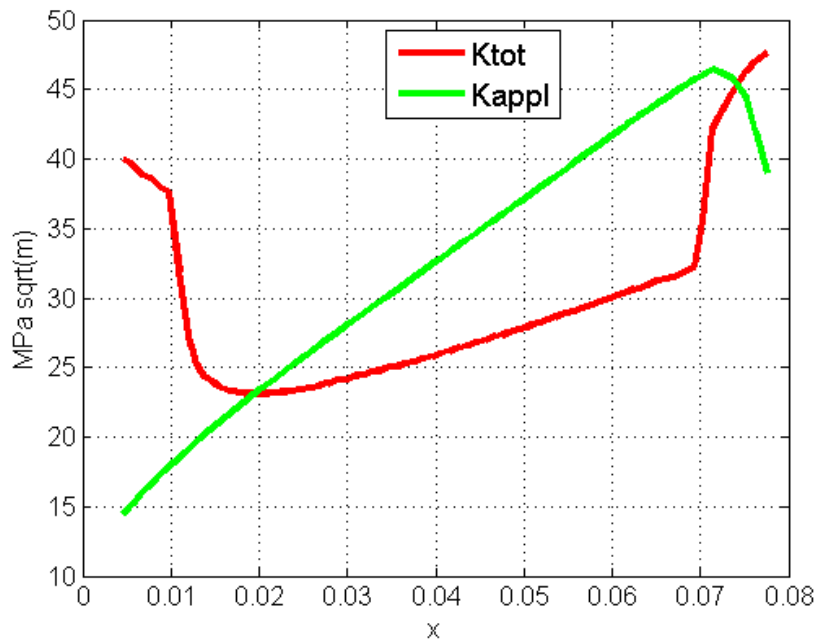
Slika 4-7 Zaostala naprezanja u orebrenom panelu



Slika 4-8 Detalj naprezanja orebrenog panela za  $a=4.7$  mm

Utvrđena je promjena vrijednosti faktora  $K_I$  ovisno o duljini pukotine za slučaj samo vanjskog opterećenja i za slučaj kombiniranog vanjskog opterećenja i utjecaja zaostalih naprezanja. Za slučaj samo vanjskog opterećenja vrijednosti faktora intenzivnosti naprezanja rastu s porastom duljine pukotine do 73 milimetra, a nakon toga počinje opadati zbog djelovanja drugog neoštećenog rebra ( $K_{appl}$ ), kao što se vidi na slici 4-9.

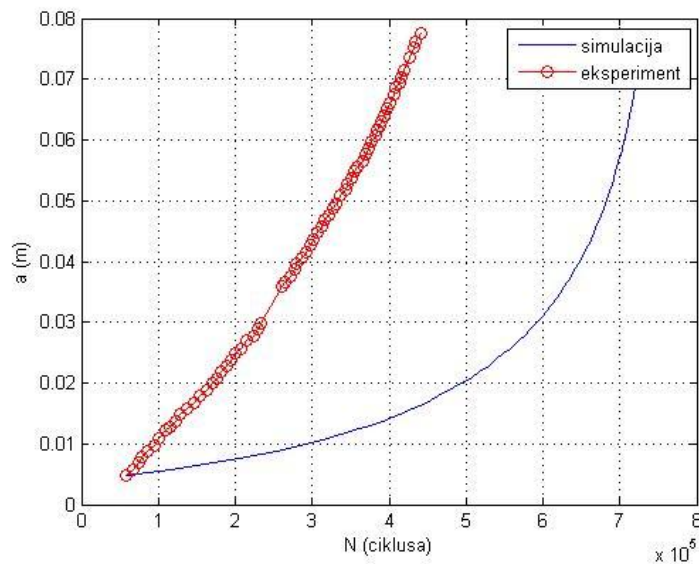
Vlačna zaostala naprezanja u području početnih duljina pukotina značajno povećavaju vrijednost faktora intenzivnosti naprezanja. Nakon tog s porastom duljine pukotine počinju djelovati zaostala tlačna naprezanja te usporavaju rast pukotine.



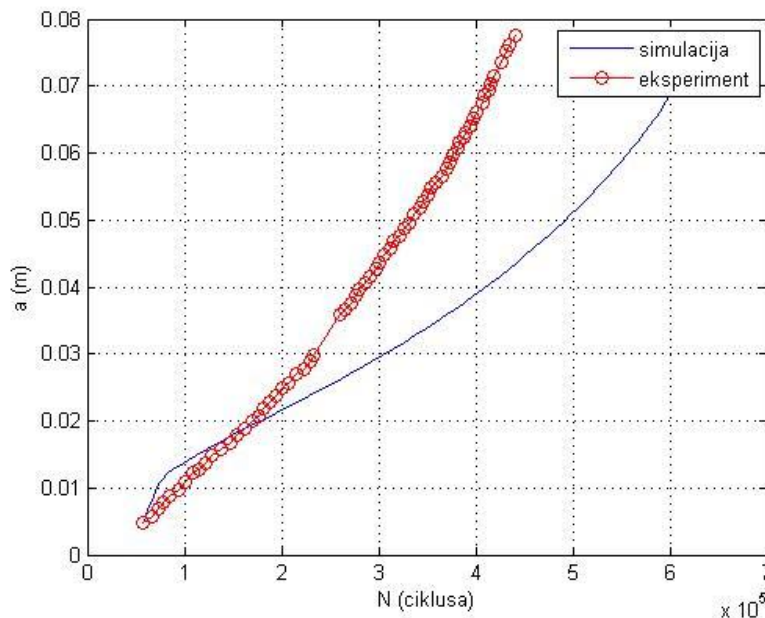
Slika 4-9  $K_{tot}$  i  $K_{appl}$  za uzorak SP1

Za prikaz životnog vijeka eksperimentalnog uzorka korištene su konstante  $C=2.125 \cdot 10^{-12}$  i  $m=3.33$  [15].

Na slici 4-10 prikazan je simulirani životni vijek orebrenog panela samo za vanjsko opterećenje, dok je na slici 4-11 prikazan simulirani životni vijek orebrenog panela za kombinirano opterećenje od zaostalog naprezanja i vanjskog opterećenja.



Slika 4-10 životni vijek orebrenog panela samo za vanjsko opterećenje



Slika 4-11 životni vijek orebrenog panela za kombinirano opterećenje od zaostalog naprezanja i vanjskog opterećenja

Simulirani životni vijek orebrenog panela sa zaostalim naprezanjima i vanjskim opterećenjem je kraći nego što je simulirani životni vijek orebrenog panela opterećenog samo s vanjskog opterećenja. Može se uočiti da je propagacija pukotine nešto brža pri nižim ciklusima.

## 5 Zaključak

U radu je istraženo ponašanje vrijednosti faktora intenzivnosti naprezanja  $K_I$  uslijed djelovanja zaostalih naprezanja za neorebrene i orebrene ploče. Za 2D model neorebrene ploče pukotina je omrežena singularnim PLANE183 konačnim elementima, a za orebreni panel su korišteni ljuskasti elementi SHELL281.

Ukupna vrijednost faktora intenzivnosti naprezanja  $K_I$  utvrđuje se superpozicijom vrijednosti  $K_I$  uslijed vanjskog opterećenja i vrijednosti uslijed zaostalih naprezanja.

Zaostala naprezanja za manje duljine pukotine imaju pozitivan predznak, odnosno vlačni karakter i povećavaju vrijednosti faktora intenzivnosti naprezanja  $K_I$  te ubrzavaju rast pukotine u tom segmentu. Za veće duljine pukotine zaostala naprezanja djeluju tlačno i usporavaju rast pukotine.

## 6 Literatura

- [1] Zhang, X., Li, Y., *Damage Tolerance and Fail Safety of Welded Aircraft Wing Panels*, AIAA Journal, 2005;43:1613-1623.
- [2] Lundback, A., *Finite Element Modelling and Simulation of Welding of Aerospace Components*, AIAA Journal, 2003
- [3] Zhang, X., R. Bao., N.A. Yahaya., *Evaluating Stress Intensity Factors due to Weld Residual Stresses by the Weight Function and Finite Element Methods*, Engineering Fracture Mechanics 77 ,2010
- [4] Dexter, R.J., Mahmoud., *Propagation rate of large cracks in stiffened panels under tension loading*, Marine Structures 18, 2005
- [5] Dexter, R.J., Pilarski P.J., *Analysis of crack propagation in welded stiffened panels*, International Journal of Fatigue 25 (2003) 1169–1174
- [6] Tada, H., Paris, P.C., Irwin, G.R., *The stress analysis of cracks handbook. 3rd ed.* New York: The American Society of Mechanical Engineers; 2000
- [7] John, R., Jata., K.V., Sadanada, K., *Residual stress effects on near-threshold fatigue crack growth in friction stir welds in aerospace alloys*, The American Society of Mechanical Engineers 2008
- [8] ABAQUS user/technical manual version 6.5. Hibbit, Karlsson and Sorensen Inc.;2005.
- [9] Documentation for ANSYS Release 12.1. ANSYS Inc.
- [10] Rooke D.P., Baratta F.I., Cartwright D.J., *Simple methods of determining stress intensity factors*. Eng Frac Mech 1981; 14: 397-426
- [11] Labeas, G., Diamantakos, I., *Numerical investigation of through crack behaviour under welding residual stresses*. Eng Frac Mech 2009; 76: 1691-1702.
- [12] Zhang, X., Li, Y., *Damage Tolerance and Fail Safety of Welded Aircraft Wing Panels*, AIAA Journal, 2005;43:1613-1623.
- [13] Paris, P.C., Sih, G.C., *Stress Analysis of Cracks, Fracture Toughness and Testing and its Applications*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1965;381:30-83.
- [14] Nesterenko G.I. *Damage tolerance of in tegrally stiffened and riveted stiffened structures*. In: Proceedings of the 20th symposium of the international committee on aeronautical fatigue. vol 11. 14–16 July 1999. p. 873–94.

- [15] Yoichi Sumi, Željko Božić, Hisashi Iyama, Yasumi Kawamura, *Multiple Fatigue Cracks Propagating in a Stiffened Panel*, Journal of The Society of Naval Architects of Japan. Vol. 179, Japan, 1996
- [16] Zerbst, U., Heinemann, M., Steglich, D., *Fracture and damage mechanics modelling of thin-walled structures – An overview*, Engineering Fracture Mechanics 76 (2009) 5–43
- [17] Broek, D., *Elementary engineering fracture mechanics, 3rd printing*, Martinus Nijhoff Publishers; Hague, The Netherlands, 1984.
- [18] Mallory, J., *Fatigue Crack Growth in 2324 Aluminium Alloy*, Western Michigan University, Journal of Young Investigators, 2008;19.
- [19] Wu, X.R., Carlsson, A.J., *Weight Functions and Stress Intensity Factor Solutions*. 1st ed. Oxford: Pergamon Press; 1991.
- [20] [http://www.weldinghistory.org/whistoryfolder/welding/wh\\_1900-1950.html](http://www.weldinghistory.org/whistoryfolder/welding/wh_1900-1950.html)