



ANALIZA REZULTATA NASGRO I ABAQUS PROGRAMA NA PRIMERU ZATEZANJA TANKOZIDNE PLOČE

Danijela Živojinović¹, Siniša G. Minić², Miloš Vorkapić³

Rezime: U ovom radu je dat uporedni prikaz rezultata proračuna dobijenih na osnovu dva različita software-a: NASGRO i Abaqus. Proračun je rađen uz primenu zakona mehanike loma inkorporiranih u sam software. Modeliranje konstrukcije je izvršeno posredstvom adekvatnog 3D software-a. U strukturu je uneta inicijalna prslina koja ima određenu dužinu i oblik. Analiziran je uzorak tankozidne ploče sa centralnom prolaznom prslinom. Ploča je opterećena na zatezanje. U radu je dat uporedni prikaz rezultata, sa osvrtom na prednosti i nedostatke raspoloživih programa.

Ključne reči: MKE, Abaqus, softver, analiza

ANALYSIS OF RESULTS OBTAINED BY NASGRO AND ABAQUS SOFTWARES ON EXAMPLE OF THIN PLATE TENSION

Summary: This paper presents a comparative view of the results obtained by calculations based on two different softwares: NASGRO and Abaqus. The calculation was done using the laws of fracture mechanics incorporated in the software. Modeling of structures was performed through appropriate 3D software. An initial crack of certain length and shape was inserted in the structure. A sample of thin-walled plate with a central crack was analyzed in the paper. The plate is subjected to tension. The paper gives a comparative view of the results, with an emphasis on the advantages and disadvantages of available programs.

Key words: FME, Abaqus, software, analysis

1. UVOD

Nagli razvoj *hardware*-a i *software*-a tokom poslednjih decenija omogućio je njihovu primenu na polju rešavanja složenih matematičkih problema. Do rešenja složenih diferencijalnih jednačina, sistema jednačina, matrica i sl. sa velikim brojem nepoznatih, dolazi se primenom numeričkih metoda ugrađenih u *solver* samog *software*-a. Time je omogućeno rešavanje brojnih inženjerskih problema na relativno lak i elegantan način.

¹ Dr Danijela Živojinović, Visoka tehnička škola strukovnih studija, Novi Beograd, e-mail: danijela.zivojinovic@yahoo.com

² Prof.dr Siniša G. Minić, Univerzitet u Prištini-K.Mitrovici, e-mail: sinisa.minic@pr.ac.rs

³ Mr Miloš Vorkapić, Univerzitet u Beogradu, IHTM-CMT, Beograd, e-mail: worcky@gmail.com

Pojava metode konačnih elemenata (MKE) predstavlja krucijalan momenat u rešavanju problematike mehanike loma. 3D model ispitivane konstrukcije se diskretizuje konačnim elementima. Primenom numeričkih jednačina (jednačine mehanike loma) na čvrne tačke diskretizovnog sistema uz unapred definisane početne i granične uslove, omogućava se definisanje nosivosti konstrukcije, odnosno procena preostale čvrstoće.

Analizom dobijenog naponsko-deformacionog stanja u strukturi, moguće je predvideti slabe tačke u konstrukciji i na osnovu toga pravovremeno sprečiti lom iste, i/ili proceniti njen radni vek. Dakle, mehanika loma, kao značajna naučna disciplina dala je svoj doprinos u oblasti različitih industrijskih grana: auto industrija, brodogradnja, železnički saobraćaj, avio industrija, građevinarstvo i sl. Procena integriteta konstrukcije, sa aspekta njene nosivosti u okviru projektovanog radnog veka, predstavlja značajan podatak u rešavanju niza inženjerskih problema u fazi razvoja konstrukcije-projektne faza, ali i u toku eksploatacionog perioda. Korišćenjem personalnih računara uz primenu adekvatnih aplikativnih *software*-a omogućeno je rešavanje niza problema na prilično lak način.

2. MKE I PMKE

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, položaja, geometrije i dimenzija inicijalne prsline pod dejstvom radnog opterećenja.

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 inicijalnu prslinu u strukturu. Pri svakom formiranju novog fronta prsline, program ne menja postojeću konačno-elementnu mrežu, iako se vrši promena geometrije konstrukcije nastale kao posledica progresije prsline kroz strukturu.

Potrebno je prvo odrediti naponsko stanje strukture pod dejstvom spoljašnjeg opterećenja (uz adekvatno definisanje graničnih uslova), 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} , kao i koordinate tačaka fronta prsline- (x, y, z) .

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

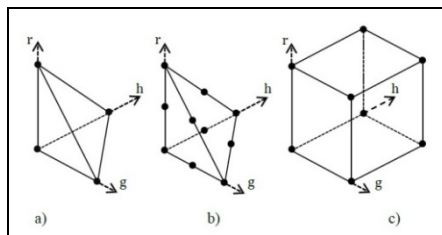
dužinu prsline. U narednom koraku, korišćenjem podataka iz prethodnog koraka generišu se nove vrednosti parametara mehanike loma.

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, pojednostavljenje modela u slučaju simetričnosti strukture, rad sa sklopovima, rad sa *2D* modelima. Kao rezultat analize dobija se raspodela faktora intenziteta napona 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* (kod zamornog opterećenja).

U *Abaqus-u*, kod *XFEM* simulacije, koriste se dva različita tipa elemenata [1]:

- tetraedarski (sl. 1a i 1b) i
- heksaedarski (sl. 1c)



Slika 1: Konačni elementi za *XFEM* [1]

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* :

$$\sigma = C \cdot \varepsilon \tag{1}$$

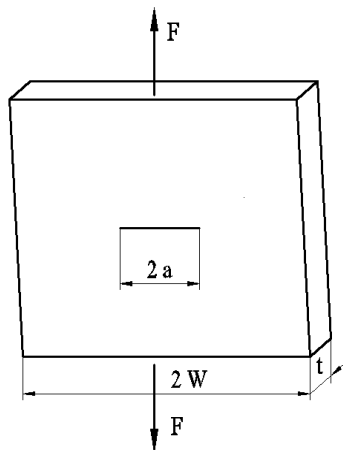
gde su:

σ -matrica napona

ε -matrica relativnih deformacija

3. TEORIJSKI REZULTATI

Kao najjednostavniji primer proračuna izabran je model ploče dimezija 2x750x1120 mm (sl. 2). U ploči je inicijalna prolazna prsline $2a = 252\text{mm}$, paralelna kraćoj strani ($2W = 750\text{mm}$) i centrirana. Ploča je opterećena na zatezanje pri vrednosti adekvatnog zateznog napona $\sigma = 300\text{MPa}$.



Slika 2: Primer prolazne prsline

Faktor intenziteta napona za mod I- K_I dobija se na osnovu sledeće jednačine:

$$K_I = \frac{F}{t \cdot W^{1/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \tag{2}$$

pri čemu je vrednost sile zatezanja:

$$F = \sigma \cdot 2Wt = 300 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot 2 \cdot 0.375\text{m} \cdot 0.002\text{m} = 450 \text{ kN} \tag{3}$$

Parametar koji zavisi od dimenzija ploče, tipa i dimenzija inicijalne prsline, računa se na osnovu sledeće jednačine:

$$\begin{aligned} f\left(\frac{a}{W}\right) &= \sqrt{\frac{\pi a}{4W} \cdot \sec\left(\frac{\pi a}{2W}\right)} \cdot \left[1 - 0.025 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 0.06 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^4\right] = \\ &= \sqrt{\frac{\pi \cdot 0.126\text{m}}{4 \cdot 0.375\text{m}} \cdot \sec\left(\frac{\pi \cdot 0.126\text{m}}{2 \cdot 0.375\text{m}}\right)} \cdot \left[1 - 0.025 \cdot \left(\frac{0.126\text{m}}{0.375\text{m}}\right)^2 + 0.06 \cdot \left(\frac{0.126\text{m}}{0.375\text{m}}\right)^4\right] = 0.47096 \end{aligned} \tag{4}$$

Na osnovu gore izračunatih veličina, za faktor intenziteta napona- K_I , dobija se sledeća vrednost:

$$K_I = \frac{F}{t \cdot W^{1/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{450000\text{N}}{0.002\text{m} \cdot \sqrt{0.375\text{m}}} \cdot 0.47096 = 5440.38 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}} \tag{5}$$

Dobijena vrednost $K_I = 5440.38 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ odgovara vrednosti faktora intenziteta napona u početnom trenutku (odmah nakon otvaranja prsline). Teorijski podaci su izračunati za oblast linearno-elastične mehanike loma.

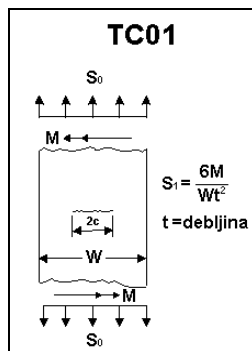
4. PRORAČUN U NASGRO-U

Pri proračunu elemenata konstrukcije, odnosno pri proceni integriteta konstrukcije, korišćen je *software*-ski paket *NASGRO 4.0*. Tvorac programa *NASGRO* je organizacija *NASA* (*National Aeronautics and Space Administration*), koja se bavi istraživanjima u oblasti vazduhoplovstva, obuhvatajući i svemirska ispitivanja.

NASGRO predstavlja kompilaciju više programa, odnosno modula, namenjenim različitim tipovima proračuna:

1. *Crack Propagation and Fracture Mechanics Analysis Module*,
2. *Boundary Element Analysis Stress and/or SIF solution i*
3. *Material Data Processing/Crack Growth Constant Evaluation*.

U ovom radu korišćena je podopcija *NASSIF: Stress Intensity Factor*, koja se koristi za proračun faktora intenziteta napona- K_I u okolini vrha prsline. Pri ispitivanju je korišćen uzorak tipa TC01 – prolazna prsline na sredini ploče (sl. 3).



Slika 3: Prolazna prsline TC01 [2]

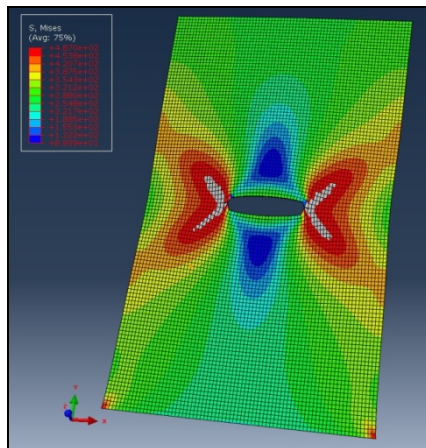
Uzorak je izložen dejstvu zateznog opterećenja: $\sigma_{\max} = S_0 = 300MPa$. Dimenzije uzorka su:

- širina ploče: $W = 750 mm$;
- debljina ploče: $t = 2 mm$;
- veličina inicijalne prsline: $c = a = 126 mm$ (polovina dužine prsline).

Kao karakteristika materijala u program je uneta maksimalna vrednost napona: $\sigma_{\max} = 487MPa$ za dati materijal (Al 2024-T351). Dobijena je vrednost faktora intenziteta napona na vrhu prsline: $K_I = 6421.6087 MPa\sqrt{mm}$.

5. PRORAČUN U ABAQUS/MORFEO-U [2]

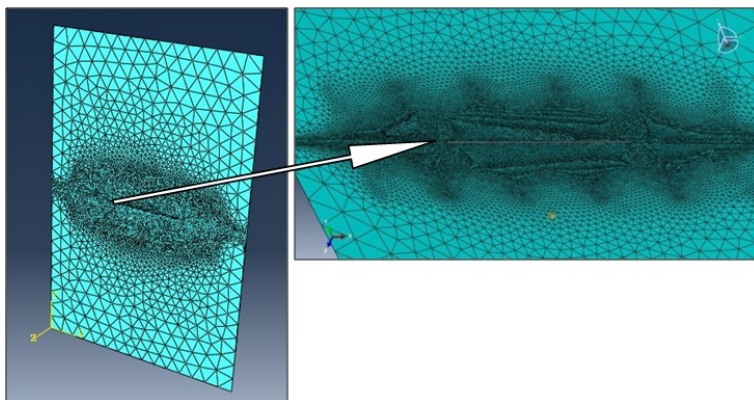
Analiziran je primer ploče opterećene na zatezanje sa centralnom prolaznom prsline (model na sl. 3). U *Abaqus*-u je izmodelirana ploča sa prolaznom inicijalnom prsline. Uvedeno je opterećenje u strukturu duž kraće stranice. Na suprotnoj strani definisani su granični uslovi (uklještenje). Kao karakteristike materijala (legura aluminijuma 2024-T351) dati su sledeći podaci: *Young*-ov moduo elastičnosti: $E = 68000MPa$ i *Poisson*-ov koeficijent: $\nu = 0.33$. Potom je urađena naponsko-deformaciona analiza stanja za stacionarnu prsline.



Slika 4: Raspodela Von Mises-ovih napona [3]

Na sl. 4 je prikazana raspodela *Von Mises* napona u ploči. Uočavaju se maksimalne vrednosti napona upravo u okolini vrhova prsline. Maksimalna vrednost napona $\sigma_{\max} = 487\text{MPa}$ jeste maksimalna vrednost napona (napon popuštanja) definisana za dati materijal-leguru aluminijuma 2024-T351.

Ukoliko se radi naponsko-deformaciona analiza za stacionarnu prslinu konačna mreža je heksaedarska (sl. 4). Međutim, ukoliko se posmatra progresija prsline u strukturi, potrebno je generisati tetraedarsu mrežu, pri čemu se vrši dodatno usitnjavanje mreže u okolini vrha prsline (sl. 5). Razlog tome je postizanje kvalitetnih rešenja (konvergencija rešenja).



Slika 5: Konačno-elementna mreža [3]

Dalji proračun je izvršen primenom Proširene Metode Konačnih Elemenata-PMKE (*XFEM-eXtended Finite Element Method*). Ova numerička metoda je inkorporirana u okviru *software*-a Abaqus, a primenjuje se upravo kod analize progresivne prsline. Postojeće konačno-elementna mreža se ne menja pri svakom novom frontu prsline. Verifikacija PMKE-a je prezentovana u radu [4].

Kao rezultat proračuna date su vrednosti *Von Mises*-ovih napona u strukturi- σ , kao i vrednosti faktora intenziteta napona za sve modove- K_I , K_{II} , K_{III} i K_{ekv} . Pri tome je korišćen *software Morfeo*, koji omogućava prikaz numeričkih rezultata dobijenih na bazi PMKE u okviru *Abaqus*-a.

Tabela 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}]
	249	560	6874.769	-11.5141	-108.788	6859.724

Tabela 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}]
	501	560	6361.812	52.3545	36.84463	6553.413

U tabeli 1, odnosno tabeli 2 su date vrednosti faktora intenziteta napona za levi, odnosno desni kraj prsline, pri čemu se javlja neznatna razlika u dobijenim vrednostima.

6. ZAKLJUČAK

Poređenjem teorijskih vrednosti i numeričkih podataka za faktor intenziteta napona- K_I u okolini vrha prsline, dobijenih primenom različitih aplikativnih *software*-a, primećuju se izvesna odstupanja:

- $K_I^{teor} = 5404.38 MPa\sqrt{mm}$ -teorijska vrednost faktora intenziteta napona u okolini vrha prsline,
- $K_I^{num}_{NASGRO} = 6421.6087 MPa\sqrt{mm}$ -vrednosti faktora intenziteta napona u okolini vrha prsline dobijene u *software*-u *NASGRO*,
- $K_I^{num}_{Abaqus / Morfeo} = (6874.769, 6361.812) MPa\sqrt{mm}$ -vrednost faktora intenziteta napona u okolini vrha prsline dobijene u *software*-u *Abaqus/Morfeo*.

Ova odstupanja su posledica sledećeg:

- 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.

Uočava se značajna mera podudarnosti podataka dobijenih primenom različitih *software-a*. Samim tim, iskazuje se izvesan stepen verifikacije aplikativnih programskih paketa i primenljivosti dobijenih rezultata proračuna u praksi.

Prednost primene *software-a* (NASGRO):

- ne vrši se kreiranje konačno-elementne mreže, koje često predstavlja poteškoću;
- na prilično jednostavan način se dobijaju neophodni podaci (faktor intenziteta napona, radni vek i sl.);
- pristup bazi materijala sa širokim dijapazonom karakteristika materijala dobijenih tokom brojnih laboratorijskih ispitivanja (od strane NASA-e).

Nedostaci primene *software-a* (NASGRO):

- nemogućnost ispitivanja različitih proizvoljnih geometrijskih 3D formi-ograničenost programa na izvesan broj ponuđenih geometrijskih formi;
- nemogućnost prikaza rasta prsline u strukturi, kao i proračuna relevantnih parametara za svaki front prsline.

Prednosti primene *software-a* (Abaqus):

- izuzetno lako modeliranje različitih konstrukcionih modela;
- primenom PMKE omogućen prikaz rasta prsline u konstrukcija sa proračunom relevantnih parametara mehanike loma;
- vizuelizacija celokupnog polja napon-deformacija u okolini vrha prsline.

Nedostaci primene *software-a* (Abaqus) su sledeći:

- tačnost dobijenih rezultata je u tesnoj vezi 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;
- zahtevi po pitanju PC-ja su visoki: višejezgarni procesor, sa većim kapacitetom RAM memorije. Obradjeni primer (sl. 4 i sl. 5) je radjen na osmo-jezgarnom PC-ju sa 24Gb RAM memorije.

LITERATURA

- [1] Abaqus, Tutorials
- [2] <https://vault.swri.org/nasgro/public/logon.asp>
- [3] Živojinović, D., „Primena mehanike loma na procenu integriteta zavarenih konstrukcija od legura aluminijuma“, doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 2013.
- [4] Grbović, A., doktorska disertacija: Istraživanje zamornog veka nosećih strukturalnih elemenata izrađenih od super legura, Mašinski fakultet, Beograd, 2012.