

PROCENA VEKA ELEMENATA KONSTRUKCIJA SA INICIJALNIM OŠTEĆENJIMA

FATIGUE LIFE PREDICTION OF DAMAGED STRUCTURAL ELEMENTS



Dr Slobodanka Boljanović, dipl. inž. maš.

Prof. dr Stevan Maksimović, Vojnotehnički institut - Beograd

Prof. dr Miodrag Janković, Mašinski Fakultet - Beograd

REZIME

U radu je formulisana kompletna metoda za analizu širenja prsline, tj. procenu preostalog veka elemenata strukture tipa oplate krila sa inicijalnim oštećenjima. Metoda je bazirana na energetsom kriterijumu, odnosno gustini energije deformacije. Faktori intenziteta napona su određeni analitičkim putem. Formulisana metoda je zatim korišćena za procenu veka polja oplate u uslovima dejstva aksijalnog i biaksijalnog opterećenja konstantne amplitude.

Ključne reči: Procena veka, Širenje prsline, Gustina energije deformacije, Biaksijalno opterećenje

ABSTRACT

In this paper a complete method for fatigue crack growth i.e. fatigue life prediction of damaged structural elements is formulized. Method is based on energy criteria or more precisely, strain energy density. Stress intensity factors are determined using analytical approach. Formulated method later was used for fatigue life estimation of wing skin subjected to axial as well as biaxial loading with constant amplitude.

Key words: Life estimation, Crack growth, Strain energy density, Biaxial loads

1. UVOD

Spoljašnja opterećenja koja deluju tokom radnog veka, na elemente struktura odnosno cele strukture (npr. avioni, brodovi, turbine) su proizvoljno promenljivog cikličnog karaktera. Takva promenljiva ciklična opterećenja postepeno razaraju element strukture od ciklisa do ciklusa i mogu prouzrokovati lom usled zamora. Zamor zbog svoje složenosti može biti razmatran kroz dve faze. prvu fazu koja je poznata kao faza do pojave inicijalnog oštećenja i drugu, fazu širenja prsline. Bez obzira o kojoj fazi je reč pored realizacije velikog broja eksperimenata, neophodno je razvijati nove i poboljšati već postojeće numeričke modele za procenu veka. U inženjerskoj praksi primena takvih numeričkih modela za procenu veka omogućava da se relativno brzo, matematičkim putem, proceni vek odgovarajućeg elementa strukture. Svaki od numeričkih modela za

procenu veka mora biti baziran na odgovarajućim kriterijumima.

Lom elementa strukture se događa u fazi širenja prsline tako da posebna pažnja mora biti usmerena baš na tu fazu. Pošto do loma najčešće dovodi prisustvo plastičnih deformacija značajno je da se u okviru kriterijuma analizira i uključi u razmatranje prisustvo kako elastične tako i plastične deformacije. Na taj način i proračun veka za fazu širenja prsline realnije opisane stvarno ponašanje elementa strukture u uslovima dejstva cikličnog opterećenja. Jedan od kriterijuma koji uključuje u razmatranje prisustvo i elastične i plastične deformacije je energetska kriterijum. Prilikom formulisanja energetske kriterijuma mogu biti korišćeni različiti parametri. Međutim najbolje je koristiti one parametre pomoću kojih adekvatno može biti definisana energija koja se absorbuje u materijalu i kasnije dovodi do loma elementa strukture. Tako, modeli formulisani od strane Weertman i Burck bili su bazirani na parametrima nisko-

cikličnog zamora. Oni su došli do zaključka da je moguće odrediti absorbovanu energiju do loma uz poznavanje nisko-cikličnih parametara. Nešto kasnije, Liu kao i mnogi drugi u okviru svojih istaživanja su koristili parametre nisko - cikličnog zamora prilikom procene veka elemenata struktura sa inicijalnim oštećenjima. Značajan doprinos je i Chand-a, Garg-a jer su u svom modelu izvršili modifikaciju modela Weertman uz korišćenje Rice-ove metode superpozicije. Za analizu širenja prsline koristi se takođe veoma efikasan metod X-FEM koji ne zahteva reformulaciju mreže konačnih elemenata.

Cilj ovog rada je da se razvije numerički model koji omogućava procenu veka elemenata struktura za fazu širenja prsline. Pored toga, formulisani model je baziran na energetskom kriterijumu. U okviru predloženog modela/procedure koriste se isti parametri koji su potrebni za fazu do pojave inicijalnog oštećenja. U inženjerskoj praksi kada je reč o polju oplata mogu se javiti i biaksijalna opterećenja, u ovom radu je izvršeno poređenje broja ciklusa do pojave loma pod dejstvom aksijalnog i biaksijalnog opterećenja.

2. FORMULISANJE MODELA ZA PROCENU VEKA

Prilikom procene veka elemenata strukture sa inicijalnog oštećenja neophodno je formulisati funkcionalnu zavisnost između gradijenta širenja prsline da/dN i faktora intenziteta napona K_I .

Najveća akumulacija oštećenja se javlja u proces zoni. Samim tim, neophodno definisati a nakon toga i odrediti energiju koja prouzrokuje oštećenje u proces zoni. Za zonu oko vrha prsline odnosno, proces zonu moguće je definisati energiju nastalu usled plastične deformacije ω_p u ciklusu po jedinici dužine kao funkcije opsega faktora intenziteta napona ΔK_I i to:

$$\omega_p = \left(\frac{1 - n'}{1 + n'} \right) \frac{\Delta K_I^2}{E I_{n'}} \psi \quad (2.1)$$

gde su: n' - eksponent deformacionog ojačanja pri cikličnom opterećenju, E - Young-ov moduo elastičnosti, $I_{n'}$, ψ - konstante zavisne od indeksa ojačanja n' .

Pošto je definisana zavisnost za energiju usled plastične deformacije ω_p kao funkcije ΔK_i , sada je

neophodno uspostaviti zavisnost između gradijenta širenja prsline da/dN i ω_p . Prilikom uspostavljanja potrebne zavisnosti mora se početi od činjenice da dolazi do širenja prsline ukoliko energija pri plastičnoj deformaciji ω_p u ciklusu, dostigne apsorbovanu energiju u istom ciklusu W_c , odnosno:

$$\frac{da}{dN} = \frac{\omega_p}{W_c} \quad (2.2)$$

U jednačini (2.2) apsorbovanu energiju u ciklusu W_c može biti definisana ukoliko je poznata relacija napon - deformacija odnosno jednačina ponašanja materijala. Pogodna relacija za ponašanje materijala kojom se uključuje i elastično i plastično ponašanje je Ramberg - Osgood-ova jednačina:

$$e_a = \frac{S_a}{E} + \left(\frac{S_a}{k'} \right)^{1/n'} \quad (2.3)$$

gde su: e_a - amplituda deformacije, S_a - amplituda napona, k' - koeficijent čvrstoće pri cikličnom opterećenju.

Ukoliko je jednačina ponašanja materijala data jednačinom (2.3), apsorbovana energija u ciklusu W_c predstavlja površinu ispod te krive u koordinatnom sistemu S-e, odnosno:

$$W_c = \frac{4}{1 + n'} \sigma_f' \varepsilon_f' \quad (2.4)$$

gde su: σ_f' - koeficijent čvrstoće pri zamoru, ε_f' - koeficijent duktilnosti pri zamoru,

Konačno, ukoliko se u jednačinu (2.2) zamene jednačine (2.1) i (2.3) dobija se funkcionalna zavisnost između gradijenta širenja prsline i faktora intenziteta napona. Nakon toga, dobijena jednačina može biti integraljena od inicijalne dužine prsline a_i do krajnje dužine prsline a_c da bi se dobila relacija koja se može koristiti za procenu veka elemenata struktura koje sadrže inicijalno oštećenje, odnosno:

$$N = \frac{(1 - n') \psi}{4 E I_{n'} \sigma_f' \varepsilon_f'} \int_{a_i}^{a_c} (\Delta K_I - \Delta K_{th})^2 \quad (2.5)$$

gde je ΔK_{th} - konstanta koja zavisi od $R=S_{min}/S_{max}$, odnosno $\Delta K_{th} = \Delta K_{th0}(1 - R)^\gamma$, $\gamma = 0.71$.

3. FAKTOR INTENZITETA NAPONA

Jednačine za gradijent širenja prsline i za procenu broja ciklusa do pojave loma formulišu se kao funkcije faktora intenziteta napona ΔK_I . Faktor intenziteta napona je veličina kojom se u proračun uključuje geometrija elementa strukture i tip spoljašnjeg opterećenja. U analitičkoj relaciji za faktor intenziteta napona, oblika:

$$K_I = Y S \sqrt{\pi a}, \quad (2.6)$$

Y predstavlja korektivnu funkciju kojom se opisuje geometrija elementa strukture i tip opterećenja, a - dužina prsline i S - napon. U ovom radu je u okviru numeričkih primera analizirano i aksijalno i biaksijalno opterećenje koje deluje na polje oplate. Pošto se na polju oplate nalazi jedan otvor poluprečnika R i dve jednake prsline onda korektivne funkcije moraju biti oblika:

- za aksijalno opterećenje

$$Y = -0.28659 + 1.36339 \left(1 - e^{-\frac{((a/r_1) - 0.96104)}{0.08936}} \right)^{0.78013} * \left(e^{-\frac{((a/r_1) - 0.96104)}{43.4814}} \right) \quad (2.7)$$

- za biaksijalno opterećenje

$$Y = 1.00337 - 1.59031 e^{-\frac{((a/r_1) - 0.90288)}{0.07681}} - 1.72484 e^{-\frac{((a/r_1) - 0.90288)}{0.07674}} + 0.38619 e^{-\frac{((a/r_1) - 0.90288)}{1.00844}} \quad (2.8)$$

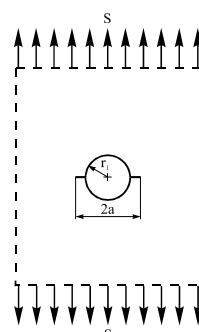
4. NUMERIČKI REZULTATI

Procedura za proračun veka elemenata struktura za fazu širenja prsline formulisana u prethodnom odeljku biće primenjena na polju oplate. U primerima koji slede biće analizirana dva tipa opterećenja aksijalno i biaksijalno.

Primer 1: Procena veka polja oplate pri dejstvu aksijalnog opterećenja

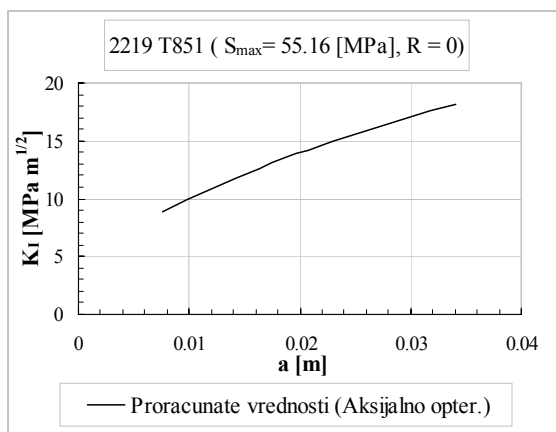
U ovom primeru procenjena je preostala čvrstoća pri zamoru za fazu širenja prsline elementa strukture prikazanog na sl. 1. Reč je o polju oplate koja sadrži jedan otvor i dve jednake prsline. Spoljašnje opterećenje koje deluje na element strukture je aksi-

jalno. Korišćeni materijal za polje oplate je legura aluminijuma 2219 T851. Potrebne karakteristike materijala za proračun veka su: $\sigma_f' = 613$ MPa; $\epsilon_f' = 0.35$; $n' = 0.121$; $k' = 710$ MPa; $S_y = 334$ MPa; $E = 7.1 \cdot 10^4$ MPa; $K_{IC} = 120$ MPa $m^{1/2}$; $I_n' = 3.067$; $\psi = 0.95152$ and $\Delta K_{th0} = 8$ MPa $m^{1/2}$. Pored karakteristika materijala potrebne su i sledeće geometrijske karakteristike za polje oplate: $R = 0.0038$ m; $a_0 = 0.0076$ m.



Sl. 4. 1. Geometrija polja oplate pri dejstvu aksijalnog opterećenja

Prilikom određivanja veka elementa strukture prikazanog na sl. 4.1 neophodno je odrediti faktor intenziteta napona K_I .

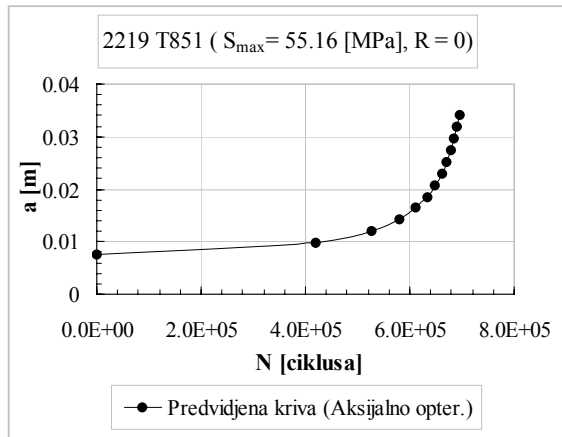


4. 2. Faktor intenziteta napona K_I

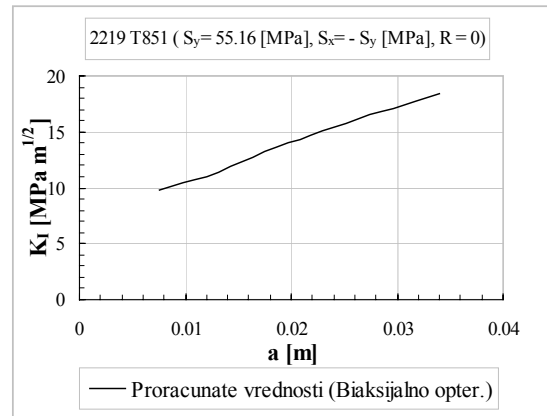
Za određivanje faktora intenziteta napona u ovom primeru korišćene su odgovarajuće analitičke jednačine (2.6) i (2.7).

Dobijene vrednosti za faktor intenziteta napona date su na sl.4.2 kao funkcionalna zavisnost faktora intenziteta napona K_I od dužine prsline a .

Pošto su poznati faktori intenziteta napona K_I moguće je odrediti i gradijente širenja prsline da/dN . Nakon toga, određen je i broj ciklusa do pojave loma N korišćenjem jednačina (2.5), (2.6) i (2.7). Funkcionalna zavisnost dužine prsline a od broja ciklusa do loma N , prikazana je na sl. 4.3.



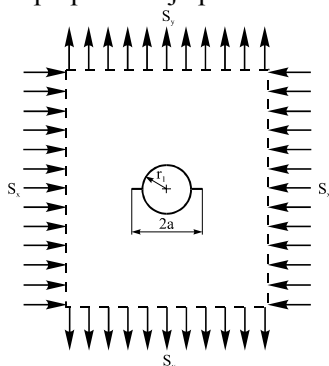
Sl. 4.3 Procenjeni vek do pojave loma



Sl. 4.5 Faktor intenziteta napona K_I

Primer 2: Procena čvrstoće za polje oplata pri dejstvu biaksijalnog opterećenja

Kao u primeru 1. i ovde je određen vek polja oplata iste geometrije i od istog materijala samo što je opterećenje drugog tipa i to biaksijalno ($S_x=55.16$ MPa, $S_y=-0.5S_x$ i $R=0$). Uvođenje novog tipa opterećenja u ovom primeru je iz razloga da bi se uporedile preostale čvrstoće pri zamoru za dva različita tipa opterećenja: aksijalno i biaksijalno. Geometrija i tip opterećenja prikazani su na sl. 4.4.



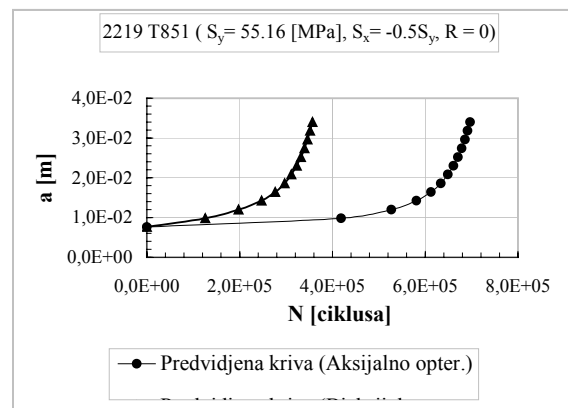
Sl. 4.4 Polje oplata pri dejstvu biaksijalnog opterećenje

Pošto je u ovom primeru na polje oplata dejstvuje biaksijalno spoljašnje opterećenje neophodno je koristiti kao korektivnu funkciju u izrazu za faktor intenziteta napona, jednačinu (2.8). Vrednosti za faktor intenziteta napona K_I prikazane su na dijagramu (sl. 4.5), kao funkcionalna zavisnost između faktora intenziteta napona K_I i dužine prsline a .

Nakon toga, određen je i broj ciklusa do pojave loma N uz upotrebu integralne jednačine (2.5). Proračunska kriva za broj ciklusa do pojave loma pri dejstvu biaksijalnog opterećenja prikazana je na sl. 4.6.

Na istoj slici data je i proračunska kriva za broj ciklusa do loma, ali u uslovima dejstva aksijalnog opterećenja.

Kao što se može videti sa sl. 4.6 za polje oplata date geometrije i $a=0.034$ mm broj ciklusa do pojave loma u slučaju aksijalnog opterećenja je $N_a=69666$ ciklusa, a u slučaju biaksijalnog iznosi $N_b=357150$ ciklusa. Dobijeni broj ciklusa do loma za dva različita tipa opterećenja ukazuje da je vek polja oplata smanjen na oko 50% ukoliko na polje oplata dejstvuje biaksijalno opterećenje kod koga je $S_x=-0.5S_y$, a $S_y=55.16$ MPa i $R=0$.



Sl. 4.6 Proračunski vek do pojave loma, N

5. ZAKLJUČAK

U radu je prezentovana kompletna procedura za procenu veka elemenata konstrukcije tipa oplata krila letelice sa inicijalnim oštećenjima. Predložena procedura je pogodna za procenu preostale čvrstoće pri zamoru jer ne zahteva dodatna eksperimentalna istraživanja za određivanje neophodnih dinamičkih parametara, već se koriste parametri za nisko ciklični zamor (low cyclic properties). Znači ukoliko se za neki element konstrukcije određuje ukupan vek u domenu nisko cikličnog zamora, odmah posle odre-

đenog broja ciklusa do pojave inicijalnog oštećenja, moguće je pristupiti određivanju broja ciklusa do efektivnog loma. Pored toga u radu je pokazano da

prisustvo biaksijalnog opterećenja značajno može smanjiti vek konstrukcije do efektivnog loma elementa strukture.

LITERATURA

1. Weertman, J., Theory of fatigue crack growth based on a BCS theory with work hardening, *Int. J Fracture*, Vol. 9, pp. 125-130, 1973.
2. Burck, L.H., J.N., Weertman, J., Fatigue crack propagation in iron and Mo solid alloys (77-296 K), *Metall Trans. Vol. 7A*, pp. 257-264), 1976.
3. Liu, Y.Y., Lin, F.S., A mathematical equation relating low cycle fatigue data to fatigue crack propagation rates. *Int. J. Fatigue*, Vol. 6, pp.31-36, 1984.
4. Chand, S., Gaarg, S.B.L., Crack propagation under constant amplitude loading, *Eng. Fract. Mech.*, Vol.21(1), pp. 1-30, 1985.
5. Oh, Y.J., Nam, S.W., Low-cycle fatigue crack advance and life prediction. *J. Mater. Sci.* Vol. 27, pp. 2019-2025, 1992.
6. Rice, J.R., Mechanics of crack tip deformation and extension by fatigue, In: *Fatigue Crack Propagation*, ASTM STP 415, Philadelphia, PA: American Society for testing and Materials, pp. 247-311, 1967.
7. Boljanović, S., Maksimović, S., Belić, I., Fatigue Life Prediction of Structural Components Based on Local Strain and an Energy Crack Growth Models, *WSEAS TRANSACTIONS on APPLIED and THEORETICAL MECHANICS Issue 2, Volume 1*, pp. 196-203, December 2006.
8. Maksimović, S., Proračun čvrstoće strukture aviona sa aspekta zamora i mehanike loma, 2. Naučno-stručni skup iz oblasti odbrambenih tehnologija, OTEH 2007, Beograd.
9. Maksimović, S., Fatigue Life Analysis of Aircraft Structural Components, *Scientific Technical Review*, Vol. LV, No.1, 2005.
10. Jovičić, G., Živković, M., Maksimović K., Đorđević, N., The crack growth analysis on the real structure using the X-FEM and EFG methods, *Scientific Technical Review*, No. 2, 2008.