

Metoda konačnih elemenata u proceni brzine rasta prsline na ramenjači lakog aviona izloženoj opterećenju promenljive amplitude

Mr ALEKSANDAR GRBOVIĆ, Mašinski fakultet, Beograd,
Prof. dr BOŠKO RAŠUO, Mašinski fakultet, Beograd

Originalni naučni rad
UDC. 629.7.025.1:620.178.5

Dobra procena zamorne izdržljivosti vazduhoplovnih komponenti i sklopova je poslednjih decenija postala važan segment projektovanja. To se posebno odnosi na glavne strukturne elemente kao što su ramenjača krila, glavni okvir trupa i okovi, čiji bi eventualni lom usled zamorne mogao da dovede do katastrofalnih posledica. Da bi se ispunili strogi zahtevi po pitanju bezbednosti, sprovode se brojna eksperimentalna ispitivanja koja su često skupa i dugotrajna. S obzirom na stalno prisutnu težnju proizvođača da vreme između idejnog projekta i gotovog proizvoda smanje na najmanju moguću meru, korišćenje metode konačnih elemenata (MKE) u proceni zamornog veka se pokazalo kao dobra alternativa eksperimentalnim ispitivanjima. Namena ovog rada je da pokaže da je korišćenjem MKE moguće doći ne samo do dobre procene ukupnog zamornog veka sklopa kao što je ramenjača lakog aviona, već da je moguće predvideti i broj ciklusa opterećenja koji će dovesti do stvaranja prsline određene dužine na ramenjači. Na osnovu rezultata ovakvih proračuna mogu se odrediti intervali preventivnih inspekcija koje bi predupredile nastanak katastrofalnog loma.

Ključne reči: MKE, brzina rasta prsline, procena zamornog veka, ramenjača lakog aviona

1. UVOD

Brojna ispitivanja standardnih epruveta (uzoraka) naponima konstantnih amplituda su dala veliki broj podataka o tome kako se određeni materijal ponaša u različitim zamornim uslovima [1, 2]. Međutim, strukturne komponente vazduhoplova su tokom eksploatacije izložene opterećenjima promenljive amplitude, pa se dostupni rezultati iz ispitivanja epruveta konstantnim amplitudama ne mogu primeniti bez određenih korekcija. Pored toga, geometrija realnih komponenti se značajno razlikuje od geometrije epruveti, što problem predviđanja zamornog veka dodatno usložnjava. Tada se kao rešenje nameće eksperimentalno određivanje zamornog veka komponenti ili sklopova izloženih promenljivim amplitudama opterećenja, ali svaka, pa i najmanja, promena opterećenja, geometrije i načina vezivanja komponenti neminovno vodi ka novim ispitivanjima, što ceo proces projektovanja značajno poskupljuje.

U slučajevima kada je razvijen numerički model strukturne komponente ili sklopa, sve potrebne promene se mogu relativno lako implementirati, pa se nove procene veka d obijaju veoma brzo i po niskoj

Rad primljen: 10.02.2012.

ceni. Ali, pitanje koje se tada postavlja glasi: kako možemo biti sigurni da je numerički model dobar, odnosno da su njegova predviđanja pouzdana i zadovoljavajuće precizna? Očigledno je da se inicijalni numerički model mora eksperimentalno verifikovati, pa se tek nakon verifikacije vrednosti zamornog veka dobijene proračunom za promenljive amplitude opterećenja mogu smatrati dovoljno dobrim. Naravno, odrediti apsolutno tačnu vrednost zamornog veka praktično je nemoguće, jer čak i potpuno iste komponente – izložene tokom eksperimenta istim spektrima opterećenja – mogu da pokažu prilično različite zamorne karakteristike. Međutim, čak i kad ne mogu da obezbede visoku tačnost rezultata (zbog same prirode problema), numeričke analize nam pomažu da definišemo kriterijume za prihvatanje (ili odbacivanje) određenih konstruktivnih rešenja, kao i da uporedimo dva različita koncepta i donesemo odluku koji je od njih prihvatljiviji [3]. A to je već veliki korak ka konačnom cilju – projektovanju bezbednih elemenata vazduhoplovnih struktura.

2. MATERIJAL I METOD

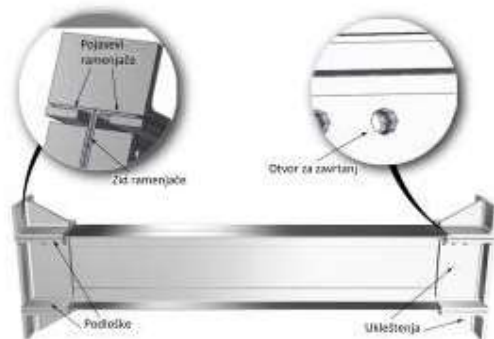
Najvažnije uloge strukture vazduhoplova tokom životnog veka su nošenje opterećenja i obezbeđivanje neophodne sile uzgona koja je posledica aerodina-

Adresa autora: Aleksandar Grbović, Mašinski fakultet, Beograd, Kraljice Marije 16

mičnosti spoljašnjih površina. Ovo se ostvaruje korišćenjem tankozidnih konstrukcija kod kojih su unutrašnje površine ojačane uzdužnim i poprečnim elementima. Dominantan metod koji se koristi za spajanje tankozidnih elemenata lakih letelica u jedinstvenu celinu i dalje je zakivanje.

Krilo predstavlja jedan od najvažnijih sklopova avionskih struktura, pa je jasno da mu se mora posvetiti posebna pažnja pri određivanju zamornog veka letelica. Najvažniji deo krila su tzv. C-grede ili I-grede (poznate kao ramenjače) koje obezbeđuju stabilnost pri pritiscima opterećenjima. One su postavljene po dužini krila, u pravcu normalnom na trup. Obično, krila imaju dve ili tri ramenjače, ali lake letelice većinom imaju krila sa jednom nosećom ramenjačom [4]. Kod lakih letelica, ramenjača nosi gotovo sva savijajuća i smičuća opterećenja, od kojih je najizraženija sila uzgona. Generisana sila uzgona savija krilo naviše i kao posledica toga gornji elementi ramenjače su izloženi pritisku, dok su donji izloženi zatezanju.

Predmet eksperimentalne analize i numeričke simulacije u ovom slučaju je bila ramenjača lake letelice prikazane Slikom 1. Kritična oblast u kojoj tokom eksploatacije najčešće dolazi do pojave prsline na ramenjači se nalazi sa donje strane i obuhvata pojaseve ramenjače i pripadajuću oplatu. Pojasevi su na ramenjači sa slike 1 za zid spojeni zakivcima prečnika 3.2 mm pri čemu pripadajuća oplata nije ispitivana, tako da efekat ojačanja usled njenog prisustva ovde nije uzet u obzir.



Slika 1 - Ispitivana ramenjača lake letelice

Delovi ramenjače se uglavnom izrađuju od ojačanih aluminijumskih legura čije su osnovne prednosti lakoća, visoka specifična čvrstoća i dobra otpornost na koroziju. Legure koje obezbeđuju osnovna mehanička svojstva su Al-Zn-Mg-Cu (kod familije 7xxx) i Al-Cu-Mg (kod familije 2xxx). Dve najčešće korišćene legure u vazduhoplovnim primenama su 7075-T6 i 2024-T3 [5]. Za izradu delova ramenjače sa slike 1 korišćene su ploče debljina 1,6mm (za izradu pojaseva ramenjače) i 1mm (zid ramenjače) od legure 2024-T3. Za potrebe zamornih ispitivanja na-

pravljeno je 10 identičnih ramenjača dužine 600 mm, što je približno jednako dužini centroploanskog dela krila lake letelice.

Najvažnije pitanje koje se postavilo pre početka ispitivanja ponašanja ramenjače izložene opterećenjima promenljive amplitude glasilo je: kakav spektar opterećenja koristiti u eksperimentu i kako ga generisati? Poznato je da je priroda stvarnih opterećenja u letu stohastička i da podaci iz merenja u eksploatacionim uslovima često (iz raznih razloga) nisu dostupni [6, 7]. Zbog toga je poslednjih decenija definisano nekoliko standardizovanih tipova opterećenja sa ciljem pojednostavljenja procedure testiranja na zamor. Ovi standardni spektri su definisani za nekoliko najvažnijih tipova letelica (npr. TWIST i mini-TWIST se koriste kod transportnih aviona, FALSTAFF i mini-FALSTAFF kod borbenih, itd.), ali se oni mogu koristiti i kod letelica za koje ne postoje tačno definisana opterećenja.

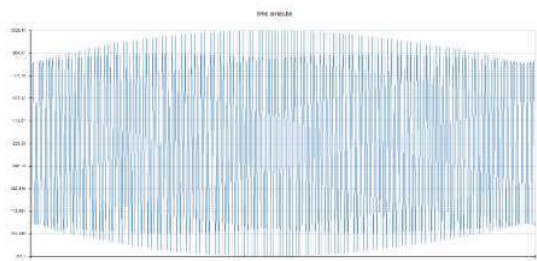
2.1 Oprema korišćena u eksperimentu

Složenost spektara koji se u eksperimentima moraju simulirati zahteva upotrebu kompjuterski kontrolisanih mašina [8], ali se za testiranje ramenjače lakog aviona koristio jednostavniji sistem prikazan Slikom 2. Sila promenljive amplitude je na ramenjaču, sa ekscentričnog diska pričvršćenog na vratilo elektromotora, unošena pomoću poteznice na kojoj se nalazio davač sile tipa U3 50 kN proizvođača Hottinger Baldwin Messtechnik, Nemačka (poz. 1 na slici 2). Uz pretpostavku da je poteznica sve vreme kruta pod dejstvom spoljašnje sile, ugib kraja ramenjače je meren u odnosu na središnju tačku poteznice pomoću linearnog davača pomeraja PM2S 150 mm, proizvođača ELAP Spa, Italija (poz. 2 na slici 2). Naponi su mereni u četiri tačke pomoću mernih traka za aluminijum tipa 1-LY13-10/120 (poz. 3 na slici 2). Svaka od mernih traka je bila, preko jedne slepe merne trake (poz. 4 na slici 2), povezana u polovinu Vitstonovog mosta, a zatim i sa sistemom za akviziciju SPIDER8 proizvođača Hottinger Baldwin Messtechnik.



Slika 2 - Aparatura korišćena u eksperimentu

Ramenjače su prvo testirane opterećenjima konstantnih amplituda da bi se na osnovu dobijenih rezultata proverio numerički model, a zatim su primenjene kompleksnije istorije opterećenja promenljive amplitude (opterećenje sa lo-hi-lo sekvencama, slučajno generisano opterećenje, blokovi opterećenja uskih raspona amplituda itd.) preporučene u literaturi [9]. Ovde će biti prikazane eksperimentalno dobijene vrednosti i rezultati proračuna za slučaj generisanog bloka sa velikim varijacijama amplitude predstavljenog slikom 3. Broj ciklusa opterećenja u ovom bloku iznosio je 157.



Slika 3 - Generisani spektar opterećenja

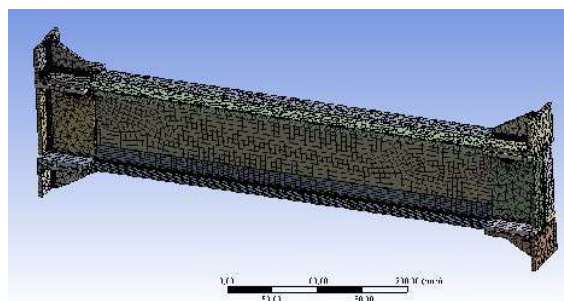
2.2. Verifikacija numeričkog modela

Numeričke model ramenjače lakog aviona (Slika 4) je definisan u programu Ansys Workbench [10] i predstavlja vernu slika realnih ramenjača koje su ispitivane i elemenata veze korišćenih u eksperimentu. Model konačnih elemenata korišćen u završnim proračunima je imao ukupno 2,410,012 čvorova i 1,224,900 konačnih elemenata i dobijen je iterativnim postupkom koji se sastojao iz poređenja proračunskih vrednosti dobijenih za trenutnu mrežu konačnih elemenata i vrednosti dobijenih prethodnim testiranjima ramenjača opterećenjima konstantnih amplituda. U svakoj sledećoj iteraciji mreža je poboljšavana kako bi se proračunske vrednosti približile eksperimentalnim. Vrednosti zamornog životnog veka su proračunavane korišćenjem S-N metode (stress-life method) jer je broj ciklusa koji je dovođio do pojave vidljivog oštećenja u eksperimentima premašivao 3x ciklusa. Kada je vrednost zamornog veka dobijena metodom konačnih elemenata konačno postala bliska srednjoj vrednosti eksperimentalnih rezultata, numerički model je prihvaćen kao zadovoljavajući, pa se prešlo na testiranje opterećenjima promenljivih amplituda među kojima je bio i blok prikazan Slikom 3.

Spektar opterećenja sa slike 3, sa minimalnom vrednošću jednako +391.2 N, maksimalnom +2028 N i frekvencijom od 12.5 Hz, je izazvao jak zatezni napon u pojasevima ramenjače, pa se vidljiva prslina pojavila na levom pojasu ispod uklještenja nakon samo 8542 ciklusa (slika 5).

Prslina je brzo počela da se širi ka zidu ramenjače, da bi, kada mu se približila, promenila pravac i

nastavila da se širi pojasevima pod uglom od 90° u odnosu na prvobitni pravac. Istovremeno ona se širila i ka levoj ivici pojasa. Da bi se širenje prslina pažljivo proučilo, testiranje je s vremena na vreme prekidano, vršene su inspekcije i beležene trenutne dužine prslina. Nakon 39450 ciklusa uočena je još jedna prslina na desnom pojasu ramenjače, za koju je kasnije utvrđeno da je nastala na otvoru za zavrtnj koji je povezivao pojas sa uklještenjem (Slika 6). Prslina je uočena tek kada se proširila na vertikalni deo pojasa jer je nastala ispod uklještenja, pa njeno pojavljivanje nije registrovano vizuelnim pregledom



Slika 4 - Početni numerički model u Ansys-u



Slika 5 - Mesto iniciranja prve prsline



Slika 6 - Putanje prslina na pojasevima

Obe prsline su zatim nastavile da se šire ispod podloški i nisu više bile vidljive, pa je nakon 58520 ciklusa test prekinut i ramenjača je skinuta da bi se utvrdilo šta se dešava ispod podloški. Tada je uočeno da

su obe prsline došle do bočnih otvora za zavrtnjeve i to do poslednjih otvora na oba pojasa (Slika 7 i Slika 8). Utvrđeno je i da se prslina nije pojavila na zidu ramenjače, a u trenutku kada je eksperiment prekinut ništa nije ukazivalo na to da će uskoro doći do konačnog loma ramenjače. Sem prikazanih prslina na pojasevima, nije bilo znakova oštećenja ni na jednom drugom mestu sklopa ramenjače.

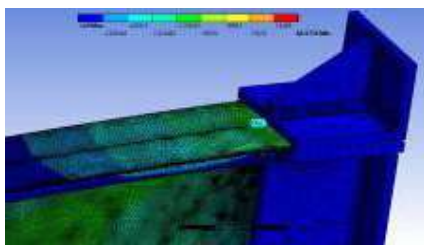


Slika 7 - Konačan izgled prve prsline



Slika 8 - Konačan izgled druge prsline

Nakon sprovedenog eksperimenta pristupilo se proračunu metodom konačnih elemenata da bi se ustanovilo da li će numerički model u Ansys-u, izložen istovetnoj istoriji opterećenja kao i realna ramenjača, dati približnu vrednost zamornog veka. S obzirom da se prva prslina pojavila nakon samo 8542 ciklusa (što je, očigledno, primer nisko-cikličnog zamora), u proračunu je korišćen ε - N metod sa istorijom opterećenja (slika 3) koja je iz SPIDER8 učitana u Ansys. S obzirom da su tokom eksperimenta mereni i promenljiva sila kojom je opterećivana ramenjača i pomeranja koje je ona proizvela, u Ansys-u su sprovedeni proračuni i sa silom koja deluje na kraju ramenjače i sa primenjenim pomeranjem na kraju ramenjače. Rezultati dobijeni u oba slučaja su se neznatno razlikovali i iznosili su 50.6 blokova (slika 9), odnosno 52.6 blokova. S obzirom da se jedan blok sastoji od 157 ciklusa lako je izračunati da analiza u Ansys-u predviđa da će se prslina na ramenjači pojaviti nakon približno 7944 ciklusa. Na Slici 9 se vidi da Ansys predviđa pojavu prsline usled zamora blizu mesta gde je ona i uočena u eksperimentu, što je potvrdilo da je numerički model dobro definisan.



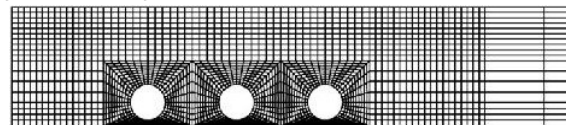
Slika 9 - Rezultati proračuna u Ansys-u

2.3 Numerički model korišćen u simulaciji širenja prsline

Nakon što je i eksperimentalnom i proračunskom metodom dobijen približno isti broj ciklusa koji dovodi do pojave inicijalnog oštećenja, prešlo se na definisanje novog numeričkog modela sa namerom da se pomoću njega izvrši simuliranje rasta zamorne prsline u oba pojasa ramenjače. S obzirom da se obe prsline šire prvo po horizontalnim delovima pojaseva, a onda prelaze na vertikalne delove koji su zakivcima spojeni sa zidom ramenjače, odlučeno je da se rast prsline simulira od trenutka kada su one krenule da se šire vertikalnim delovima prema bočnim otvorima za zavrtnjeve. Procenjeno je da je ovo kritična faza rasta obe prsline, a i simuliranje rasta prsline na horizontalnim delovima nije bilo izazovno jer je tu opterećen samo jedan sloj materijala. Za razliku od toga, simuliranje rasta prsline na vertikalnim delovima je podrazumevalo definisanje tri sloja materijala različitih debljina (dva pojasa i zid) i njihovo međusobno povezivanje konačnim elementima koji će simulirati veze ostvarene zakivcima. Kako su oba pojasa debljine 1,6mm, a zid 1mm, usvojen je dvodimenzionalni (2D) model rasta prsline, a proračun je sproveden u programu za 2D analizu FRANC2D/L [11].

FRANC2D/L je interaktivni program za simuliranje rasta prsline u višeslojnim strukturama koji omogućava i proračun elemenata spojenih zakivcima. Svaki sloj mora biti predstavljen posebnom mrežom koja u zoni preklapanja mora biti identična mrežama ostalih slojeva. Pored toga, slojevi moraju biti ravni, a sa njima je moguće sprovesti 2D, ali i trodimenzionalne (3D) proračune. Međutim, za kompleksnije 3D modele bolje je koristiti softver FRANC3D koji je i razvijen za te potrebe [12].

Na slici 10 je prikazan deo generisane mreže prvog i trećeg sloja (debljina 1,6 mm) oko otvora za zavrtnjeve koji se nalaze na vertikalnim zidovima pojaseva ramenjača.



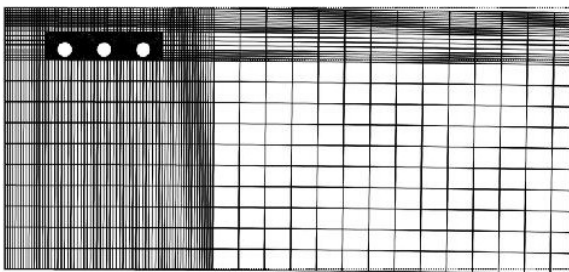
Slika 10 - Mreža konačnih elemenata 1. i 3. sloja

Drugi sloj je predstavljao zid ramenjače debljine 1mm i smešten je između prvog i trećeg sloja. Mreža sva tri sloja je napravljena u programu CASCA [11], a slojevi su međusobno spojeni korišćenjem konačnih elemenata za simulaciju zakivaka. Zakivci se u FRANC2D/L tretiraju kao elastične smičuće opruge, a njihova krutost se uzima kao konstanta materijala (krutost zakivaka je određena korišćenjem približne formule $K_{zakivka} = 12EI$ [13]). Zakivci se mogu modelirati

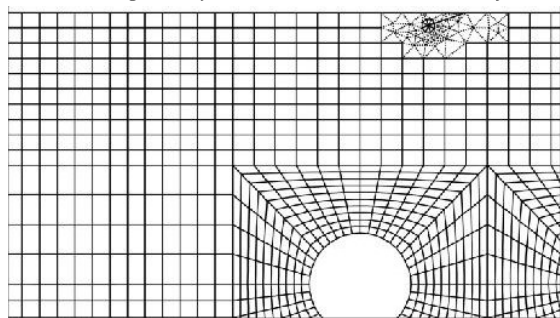
samo u čvorovima, a kada povezuju dva sloja moraju biti definisani u čvoru gornjeg sloja. Treba naglasiti da druga dva pojasa ramenjača nisu modelirana da bi se smanjio broj konačnih elemenata korišćenih u proračunu, a i iz razloga što se na njima nije pojavila prslina tokom eksperimenta.

Nakon što su slojevi povezani, ograničena su pomeranja čvorova u oba pravca na levim ivicama sva tri sloja, kao i čvorova na gornjim i donjim ivicama koji se nalaze u oblasti gde je ramenjača bila fiksirana tokom eksperimenta. Zatim je u čvorove desne ivice drugog sloja (zid ramenjače) uneto vertikalno pomeranje veličine 3mm koje odgovara vrednosti maksimalnog pomeranja izmerenog tokom testiranja blokom sa slike 3. Deformisane mreže sva tri sloja (slika 11) nakon sprovedenog proračuna bile su dokaz da su virtuelni zakivci preneli opterećenje sa sloja 2 na slojeve 1 i 3. Dobijene vrednosti ekvivalentnih napona su bile bliske vrednostima dobijenim u Ansys-u.

Nakon upoređivanja vrednosti napona dobijenih u FRANC2D/L sa vrednostima dobijenim u Ansys-u, inicirane su prsline u slojevima 1 i 3. Za određivanje mesta gde će prsline biti inicirane iskorišćene su slike 7 i 8. Tako je na prvom sloju prslina inicirana na mestu prikazanom slikom 12, a na drugom sloju na mestu prikazanom slikom 13.



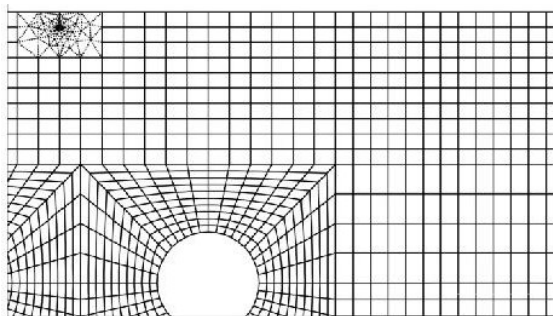
Slika 11 - Izgled deformisanih mreža sva tri sloja



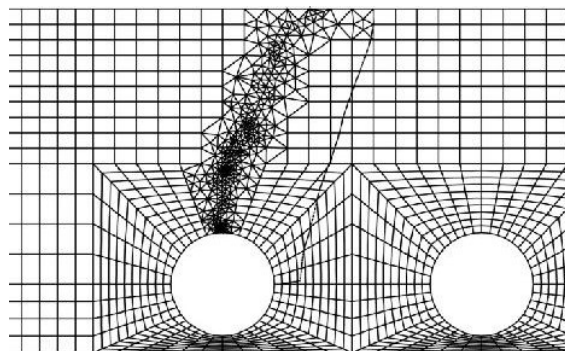
Slika 12 - Mesto inicijacije prve prsline

Prsline su zatim širene korišćenjem standardne metode koja pravac širenja predviđa na osnovu maksimalnog radijalnog napona oko vrha prsline [14]. Svaki put kada su prsline širene nova mreža oko vrhova prslina je generisana i proračun je ponovo sproveden, a vrednosti faktora intenziteta napona računat

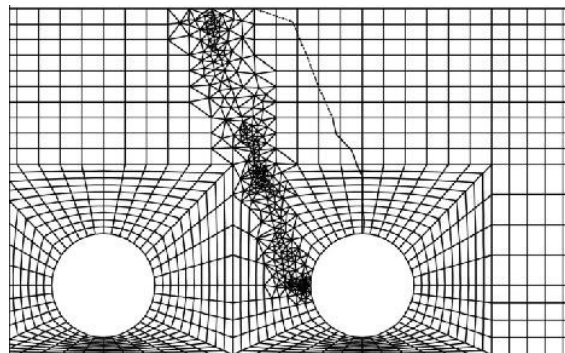
su korišćenjem J-Integral metode [14]. Prsline su širene istovremeno i nakon devet koraka propagiranja došle su do ivica otvora za zavrtneje (slike 14 i 15). Na ovim slikama se može videti da su se prsline širile putanjama veoma sličnim onim dobijenim na realnoj ramenjači.



Slika 13 - Mesto inicijacije druge prsline



Slika 14 - Konačan izgled mreže prve prsline



Slika 15 - Konačan izgled mreže druge prsline

3. REZULTATI SIMULACIJE RASTA PRSLINE

Nakon što je istorija promene faktora intenziteta napona snimljena kao tekstualna datoteka, ona je učitana u program FRANC2D/L Crack Growth (F2D/LCG) [11] kojim se može, integracijom da/dN jednačine, predvideti broj ciklusa spoljašnjeg opterećenja koji dovodi do širenja prsline određene dužine. Pored datoteke sa vrednostima faktora intenziteta napona, ulazni podaci za F2D/LCG su i Time History File (promena spoljašnjeg opterećenja tokom

vremena) i Material File koji mora sadržati podatke o zamornim karakteristikama legure aluminijuma 2024-T3.

Spektri opterećenja se u F2DL/CG broje primenom Range-Pair algoritma [15], a kriva širenja prsline se dobija integracijom modifikovane Forman-Mettuove NASGRO jednačine brzine rasta zamorne prsline u funkciji opsega faktora intenziteta napona [16]:

$$\frac{da}{dN} = C \left[\left(\frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left(1 - \frac{\Delta K_{max}}{\Delta K_{crit}} \right)^q} \quad (1)$$

U ovoj jednačini C , n , p i q su parametri materijala, f je funkcija otvaranja prsline, dok je odnos naponadeinisan kao $R=R_{min}/R_{max}$ (ili $R=K_{min}/K_{max}$). F2D/LCG ima svoju bazu materijala sa svim koeficijentima koji se pojavljuju u jednačini (1), pri čemu je ona formirana na osnovu baze programa NASGRO [17] razvijenom u NASA-inom Džonson Spejs Centru.

Debljina materijala t je jedan od nezavisnih parametara koji se unose u NASGRO jednačinu i ona utiče na kritičnu vrednost ΔI preko jednačine (2)

$$\frac{\Delta K}{K_{Ic}} = 1 + B_k \cdot e^{-\left(\frac{A_k}{t_0} \right)} \quad (2)$$

gde su K_{Ic} , A_k i B_k parametri materijala, dok je t_0 dato sledećom jednačinom (u uslovima ravanske deformacije):

$$t_0 = 2.5 \cdot \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (3)$$

Prilikom integracije jednačine (1), F2D/LCG obično koristi faktor intenziteta napona K_I moda I, dok se K_{II} zanemaruje, pa se ΔK računa po formuli $\Delta K = K_{I_{max}} - K_I$. Međutim, proračunamo korišćenjem K_{II} je za prvu prslinu dao vek $N=124492$ ciklusa što je skoro tri puta više od veka dobijenog eksperimentom, dok je za drugu prslinu vek $N=14001$ ciklusa. Analizom vrednosti faktora intenziteta napona dobijenih proračunom, utvrđeno je da vrednost faktora K_{II} moda 2 u odnosu na vrednosti K_I nije bila zanemarljiva kod prve prsline, pa je odlučeno da se u proračunu iskoristi vrednost K_{eff} koja se izračunava pomoću jednačine

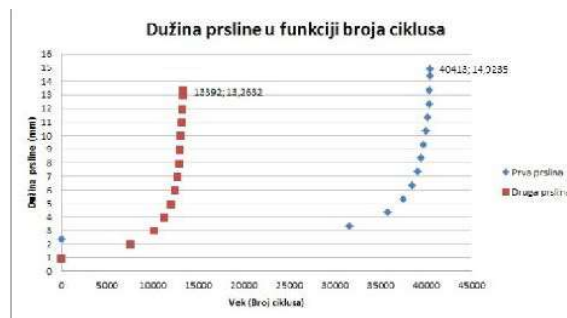
$$K_{eff} = \sqrt{K_I^2 + \beta \cdot K_{II}^2} \quad (4)$$

gde je β karakteristika materijala. Vrednost ΔK u jednačini (1) sada se računa korišćenjem K_{eff} , odnosno

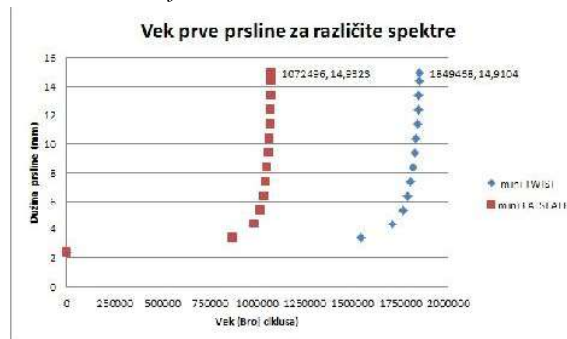
$$\Delta K = K_{eff_{max}} - K_{eff}$$

Konačno, sproveden je novi proračun u kome je integracija jednačine (1) izvršena korišćenjem K_{eff} , pa je dobijeno da će se prva prsline proširiti do dužine $a=14.92\text{cm}$ nakon $N=40413$ ciklusa primenjenih opterećenja (tj. nakon 257.4 blokova sa Slike 3), a da će se druga nakon samo $N=13392$ ciklusa (tj. nakon 85.3 blokova) proširiti do dužine $a=13.26\text{ cm}$ (Slika 16). Izračunate vrednosti se dosta dobro poklapaju sa vrednostima dobijenim eksperimentom što opravdava upotrebu K_{eff} u slučaju prve prsline, dok je razlika broja ciklusa dobijenih korišćenjem K_I i K_{eff} kod druge prsline veoma mala (14001 naspram 13392 ciklusa) što ukazuje na mali uticaj K_{II} na brzinu širenja prsline u ovom slučaju.

Na samom kraju, sproveden je i proračun širenja prsline korišćenjem standardnih spektara opterećenja mini-TWIST i mini-FALSTAFF [18] koji, zbog složenosti, nisu korišćeni u eksperimentima, a da bi se dobile procene vremena potrebnog da se prsline tokom eksploatacije prošire do određenih dimenzija. Proračun u Ansys-u je pri mini-TWIST spektru predvideo pojavu oštećenja nakon približno 660,000 ciklusa opterećenja, a pri mini-FALSTAFF nakon 290,000. Na slici 17 prikazan je proračunski vek $N=1849468$ ciklusa tokom koga se prva prsline proširuje do dužine $a=14.91\text{mm}$ pod dejstvom spektra mini-TWIST, kao i vek iste prsline $N=1072496$ pod dejstvom mini-FALSTAFF spektra.

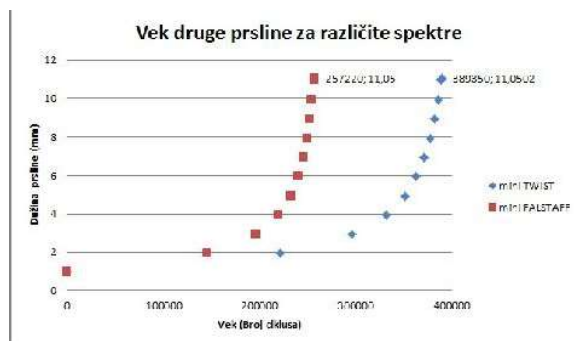


Slika 16 - Dužine prsline u funkciji broja ciklusa opterećenja



Slika 17 - Vek pod zamorom prve prsline

Na slici 18 dati su proračunski vekovi druge prsline u slučaju dejstava pomenutih spektara: pri mini-TWIST spektru dobijeno je $N=389350$ ciklusa, a pri mini-FALSTAFF spektru $N=257220$.



Slika 18 - Vek pod zamorom druge prsline

4. ZAKLJUČAK

Poređenjem vrednosti dobijenih eksperimentom i softverskom simulacijom uočljiva je njihova sličnost. U eksperimentu je prva prslina primećena nakon 8542 ciklusa, a MKE je predvidela pojavu oštećenja najranije nakon 7944 ciklusa dejstva opterećenja promenljive amplitude. Sabiranjem ove vrednosti sa vrednošću $N=40413$ dobijenom za broj ciklusa koji će prslinu na vertikalnom zidu levog pojasa ramenjače proširiti do poslednjeg otvora za zavrtanj, dobijamo ukupan vek prve prsline pod zamorom $N=48357$. U eksperimentu je prslina do otvora za zavrtanj na vertikalnom zidu stigla nakon 58520 ciklusa, a razliku od približno 10000 ciklusa možemo objasniti činjenicom da se, pre prelaska na vertikalni zid pojasa ramenjače, prslina jedno vreme širila oblašću između vertikalnog i horizontalnog zida.

Druga prslina je u eksperimentu uočena nešto kasnije (39450 ciklusa) i to tek kada je postala vidljiva u oblasti između horizontalnog i vertikalnog zida. Kasnije je utvrđeno da je ova prslina nastala na otvoru za zavrtanj ispod gornjeg ukleštenja i njeno iniciranje možemo objasniti pojavom koncentracije napona oko tog otvora. Tačan broj ciklusa do nastanka ove prsline, nažalost, nije zabeležen. Sabiranjem proračunskog broja ciklusa širenja druge prsline do otvora za zavrtanj na vertikalnom zidu (koji je iznosio 13392) i broja ciklusa nakon kojeg je prslina uočena u eksperimentu, dolazimo do ukupnog veka pod zamorom druge prsline koji iznosi 52842. Kao i kod prve prsline, razliku od skoro 6000 ciklusa možemo objasniti kretanjem prsline u oblasti između dva zida.

Proračunske vrednosti veka pod zamorom prsline u slučaju dejstava mini-TWIST i mini-FALSTAFF spektara opterećenja su bile relativno niske, ali treba uzeti u obzir da su ovo standardni spektri koji se koriste kod testiranja transportnih i borbenih aviona, a da su ovde korišćeni u analizi ramenjače lakog avio-

na. Vrednosti veka pod zamorom u slučaju dejstva mini-TWIST spektra (laki avion je, po opterećenjima tokom leta, sličniji transportnom avionu) su reda veličine od nekoliko stotina hiljada ciklusa (druga prslina) do nekoliko miliona ciklusa (prva prslina). Ove vrednosti bi u praksi, prilikom planiranja inspekcijских intervala, ipak trebalo uzeti sa izvesnim faktorom sigurnosti.

Konačno, ceo opisani postupak simulacije širenja prsline korišćenjem metode konačnih elemenata se pokazao kao pouzdan jer je dao vrednosti koje odgovaraju onom što je pokazao eksperiment. Naravno, ne treba zaboraviti da zamor ima stohastičku prirodu i da pri identičnom opterećenju druga ramenjača istih dimenzija i od istog materijala može pokazati različito ponašanje, tj. da do inicijacije prsline može doći ranije ili kasnije, kao i na drugim mestima. Međutim, razvijeni numerički modeli se i tada mogu koristiti da se pomoću njih simulira širenje novih prsline i tako proceni preostali životni vek ramenjače izložene promenljivim opterećenjima.

LITERATURA

- [1] H. E. Boyer (editor), Atlas of Fatigue Curves, American Society for Metals, February 1986.
- [2] G. Qian, Y. Hong, C. Zhou, Investigation of high cycle and Very-High-Cycle Fatigue behaviors for a structural steel with smooth and notched specimens, Engineering Failure Analysis, Volume 17, Issues 7–8, pp. 1517-1525, October 2010.
- [3] V. Infante, J.M. Silva, Case studies of computational simulations of fatigue crack propagation using finite elements analysis tools, Engineering Failure Analysis, Volume 18, Issue 2, pp. 616-624, March 2011.
- [4] R. D. Hiscocks, Design of Light Aircraft, DAR corporation, 2002.
- [5] B. Rasuo, Aircraft Production Technology (in Serbian), Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, 1995.
- [6] M. Nagode, M. Fajdiga, On a new method for prediction of the scatter of loading spectra, Int J Fatigue 20 (4), pp. 271–277, 1998.
- [7] X. He, B. Zhai, Y. Dong, W. Liu, Safe-life analysis accounting for the loading spectra variability, Engineering Failure Analysis, Volume 17, Issue 5, pp. 1213-1220, July 2010.
- [8] B. Rasuo, Experimental Techniques for Evaluation of Fatigue Characteristics of Laminated Constructions from Composite Materials: Full-Scale Testing of the Helicopter Rotor Blades, Journal of Testing and Evaluation (JTE), Volume 39, Issue 2, ASTM International, USA, pp. 237-242, March 2011.

- [9] Fatigue and Fracture, ASM Handbook, Volume 19, 1997.
- [10] www.ansys.com
- [11] www.cfg.cornell.edu/software/software.htm
- [12] A. Grbovic, B. Rasuo, N. Vidanovic, M. Peric, Simulation of Crack Propagation in Titanium Mini Dental Implants (MDI), FME Transactions, Vol. 39 No 4, Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, Serbia, pp. 165-170, 2011.
- [13] M. R. Mitchell, R. W. Landgraf (editors), Advances in fatigue lifetime predictive techniques, 3rd Volume, ASTM, 1996.
- [14] A. F. Bower, Applied Mechanics of Solids, CRC Press, New York, 2009.
- [15] A. F. Liu, Mechanics and Mechanisms of Fracture: An Introduction, ASM International, Ohio, 2005.
- [16] R.G. Forman, S.R. Mettu, Behavior of surface and corner cracks subjected to tensile and bending loads in Ti-6Al-4V Alloy, Fracture mechanics: Twenty-second Symposium, Philadelphia: American Society for Testing and Materials, vol. 1, ASTM STP 1131, pp. 519-546.
- [17] www.swri.org/4org/d18/mateng/matint
- [18] P. C. McKeighan, N. Ranganathan (editors), Fatigue Testing and Analysis Under Variable Amplitude Loading Conditions, ASTM, pp. 245, Mayfield, 2005.

SUMMARY

USE OF FINITE ELEMENT METHOD IN AN ASSESSMENT OF CRACK GROWTH RATE ON A SPAR OF LIGHT AIRCRAFT UNDER VARIABLE AMPLITUDE LOADING

In the last decades, the assessment of the service durability of aerospace components and assemblies has become an important segment of design. It is especially true for the main structural elements whose sudden failure could lead to the catastrophic consequences. In order to meet the strict safety requirements, a number of expensive and long experiments are carried out. Taking into account manufacturers' tendencies to shorten time-to-market periods, the use of finite element method (FEM) for the assessment of fatigue life has been proved as a good alternative to the experimental methods. The purpose of this paper is to show that it is possible, by using FEM, to obtain good estimation of the fatigue life of the spar assembly, as well as a good prediction of a number of load cycles which will propagate a crack on the spar to a certain length. On the basis of these results, it is possible to determine the proper inspections intervals which could prevent the catastrophic failure of the aircraft structure under variable amplitude loading.

Key words: FEM, crack growth rate, fatigue life estimation, spar of the light aircraft