

PROCENA PREOSTALOG VEKA ELEMENATA VAZDUHOPLOVNIH KONSTRUKCIJA

Evaluation and Prediction of the Residual Life of
Aircraft Structural Components

Katarina Maksimović, dipl.inž. Vojnotehnički institut, Katanićeva 15, Beograd



Rezime:

Rad je usmeren na numerički pristup procene preostalog veka kod elemenata vazduhoplovnih konstrukcija u prisustvu inicijalnih prskotina pod dejstvom cikličnih opterećenja. Za tu svrhu razmatrano je ponašanje avionske oplata krila sa inicijalnim prskotinama. Procena preostalog veka je analizirana pri cikličnim opterećenjima konstantne amplitude kao i pri spektru opterećenja.

Ključne reči: Struktura aviona, Dopustiva oštećenja, Metod konačnih elemenata, Procena preostalog veka

Abstract:

This paper is focused on computation method in residual life estimation of aircraft structural elements with initial cracks under cyclic loading. For this purpose behavior of aircraft wing skin structure with initial cracks is investigated. Residual life of structural elements carried out under cycle constant amplitude loads and load spectra is estimated.

Key words: Aircraft structure, Damage tolerance approach, Finite element analysis, Residual life estimation

1. UVOD

Moderan pristup u projektovanju i održavanju letelica sve više koristi numeričke simulacije za predviđanje ponašanja strukture u prisustvu oštećenja tipa prskotina različitih oblika. Da bi se obezbedio integritet strukture konstrukcija izloženih cikličnim opterećenjima za vreme njene eksploatacije, odnosno da bi se osigurala bezbedna struktura u toku zahtevanog veka, razvijane su metode projektovanja istih sa aspekta dopustivih oštećenja.

Intenzivan razvoj vazduhoplovne industrije doveo je do toga da danas postoje norme koje struktura treba da zadovolji i iste su u osnovi

definisane u vidu propisa i preporuka¹. Analiza u ovom radu je usmerena na dopustiva oštećenja u strukturi a koja ne ugrožavaju integritet strukture u toku eksploatacije (za planirani vek upotrebe, u ovom slučaju strukture aviona). Obično se vek upotrebe

Vojnotehnički institut, Katanićeva 15, Beograd strukture definiše u časovima leta aviona do opšte opravke, a da pri tome ne dođe do katastrofnog loma. To znači da struktura aviona (krila, trup, repovi,...) treba da bude projektovana i dimenzionisana tako da i u prisustvu određenih prskotina u kritičnim pozicijama ne sme doći do katastrofnog loma u zahtevanom veku upotrebe. Zbog toga se u kritičnim pozicijama strukture aviona, u ovom slučaju u oplati krila aviona i drugim strukturalnim elementima, pretpostavljaju inicijalne prskotine.

Ove prskotine se pretpostavljaju kao moguće greške u proizvodnji, defekti u materijalu, kao posledice eventualnih preopterećenja i drugih razloga. MIL-A-83444¹ preporučuje tipove i veličine inicijalnih prskotina. Međutim veličine i oblici ovih inicijalnih prskotina mogu se modifikovati u skladu sa iskustvima iz eksploatacije letelice. Na osnovu analize širenja prskotina procenjuje se preostali vek elementa konstrukcije sa prskotinom pri cikličnom opterećenju. Numerička simulacija širenja prskotine koristi se pri proceni veka pri projektovanju avionskih konstrukcija. Ista procedura može se koristiti za procenu preostalog veka elemenata konstrukcije kod kojih je došlo do oštećenja tokom eksploatacije.

Numeričke simulacije ponašanja oštećenih elemenata imaju poseban značaj u situacijama kada na letelici dođe do oštećenja koje nije jednostavno otkloniti kako bi struktura "izdržala" do opšte opravke.

U praktičnom projektovanju vazduhoplovnih konstrukcija ovakve analize su poznate kao analize čvrstoće strukture u prisustvu dopustivih oštećenja ("Damage Tolerance Approach"). To praktično podrazumeva da se posle određivanja naponskog stanja u pojedinim strukturalnim elementima izvrši određivanje faktora intenziteta napona K i to samo u kritičnim zonama. Kritične zone su najčešće opterećena mesta u strukturi aviona i to obično u zoni izvora koncentracije napona (oko otvora, radijusa, $\ddot{y}$). Kada je u pitanju struktura krila aviona jedna od kritičnih zona, primera radi, mogu biti i delovi oplata donjake krila. Za kritični slučaj opterećenja krila oplata donjake je opterećena na istezanje. Naponi u ovoj oplati mogu se odrediti bilo analitičkim (klasičnim) ili numeričkim postupcima (primenom metode konačnih elemenata MKE).

2. NUMERIČKA ANALIZA ŠIRENJA PRSKOTINE

Tokom poslednje dekade uticaj mehanike loma na projektovanje, proizvodnju i održavanje aviona značajno je intenziviran. Uz to, inspekcijski pregledi strukture bez razaranja su značajno poboljšani. Međutim, neke prskotine se ipak ne mogu otkriti tokom ovih pregleda, pa je pri projektovanju potrebno pretpostaviti postojanje inicijalnih oštećenja u kritičnim zonama. Tokom leta takve prskotine će se širiti i sam lom se može javiti ako dužina prskotine dostigne kritičnu vrednost i ako ista nije otkrivena a deo opravljen ili zamenjen. Da bi se obezbedila pouzdanost strukture aviona potrebno je da ista zadovolji zahteve sa aspekta dopustivih oštećenja¹ koja uključuju predviđanje zamornog veka strukture u prisustvu prskotine, odnosno njeno širenje i preostalu čvrstoću strukture pretpostavljajući da postoje male inicijalne prskotine u kritičnim pozicijama nove strukture kao posledica defekata u materijalu, oštećenja tokom proizvodnje ili pak usled preopterećenja tokom eksploatacije.

2.1 Zakoni širenja prskotine

Za procenu veka elemenata konstrukcija sa prskotinom koriste se različiti zakoni širenja prskotine. Jedan od češće korišćenih zakona je modifikovani Parisov model koji uključuje efekte srednjih napona kod cikličnih

opterećenja. Uticaj srednjih napona uspostavljen preko koeficijenta asimetrije, $R (= \sigma_{\min} / \sigma_{\max})$, sam Paris je modifikovao u obliku²:

(2.1)

odnosno

(2.2)

ili

(2.3)

U gornjim izrazima su: a -dužina prskotine, K - faktor intenziteta napona, C i n karakteristike materijala vezane za ponašanje pri cikličnim opterećenjima, $\sigma_{\max}$ - maksimalni napon cikličnog opterećenja, i N - broj ciklusa. Integracijom poslednje jednačine u intervalu do dobijaju se odgovarajući brojevi ciklusa u obliku:

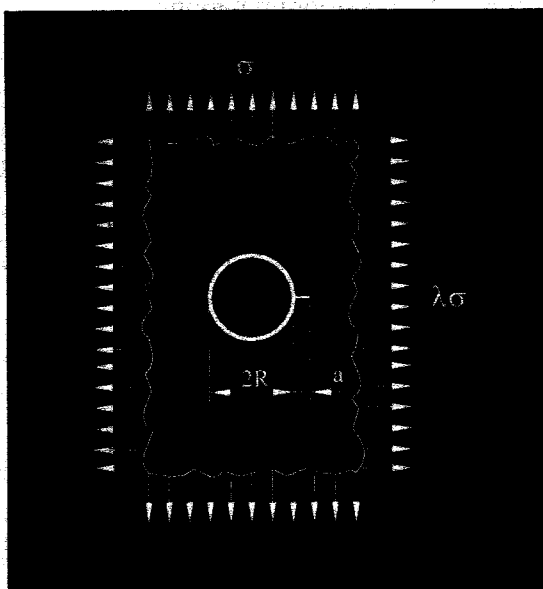
(2.4)

Gornja zavisnost uključuje efekte srednjih napona preko odnosa, R , i zbog svoje jednostavnosti ima značajnu primenu u praksi.

2.2 Faktori intenziteta napona

U zonama izvora koncentracije napona se najčešće javljaju inicijalne prskotine. Karakterističan problem su pojave prskotina u oplatama krila, trupa ili pak repova aviona u zonama zakovanih spojeva. Karakteristični problemi ove vrste su znači otvori sa jednom prskotinom u oplati. Geometrijske karakteristike i opterećenja prikazani su na Sl.1.

Osnovni parametar mehanike loma predstavlja faktor intenziteta napona (FIN), K , koji se može odrediti analitički ili primenom MKE.



Slika 1. Otvor u oplati sa jednom prskotinom

Analitički izrazi za FIN su pogodni za analizu širenja prskotina. Za otvor sa jednom prskotinom, Sl. 1, faktor K definisan je u obliku:

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot F_\lambda(s) \quad (2.5)$$

$$F_\lambda(s) = (1 - \lambda) \cdot F_0(s) + \lambda \cdot F_1(s) \quad (2.6)$$

Korektivne funkcije F_0 i F_1 definisane su sledećim izrazima:

$$F_0(s) = 5.380s^4 - 13.662s^3 + 13.794s^2 - 8.172s + 3.370 \quad (2.7)$$

$$F_1(s) = 1.400s^4 - 2.868s^3 + 2.847s^2 - 2.927s + 2.250 \quad (2.8)$$

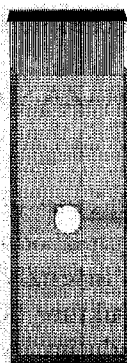
$$s = \frac{a}{R + a} \quad (2.9)$$

Korektivne funkcije $F_0(s)$ i $F_1(s)$ aproksimirane su polinomima četvrtog stepena. Gornje korektivne funkcije izvedene su na osnovu rezultata analize konačnih elemenata³. Faktori intenziteta napona K_I su određivani za otvor sa prskotinom u polju oplata, primenom specijalnih singularnih konačnih elemenata⁴ za različite dužine inicijalnih prskotina. Odlika ovih konačnih elemenata je visoka tačnost jer u samoj formulaciji pretpostavljaju singularno naprezanje u vrhu prskotine. Rezultati analize MKE uzeti su kao tačni i na osnovu istih

formirane su gornje korektivne funkcije koje se koriste u analitičkim izrazima (2.5) odnosno (2.1). Prethodni model ugrađen je u softverski paket LOM-3⁵.

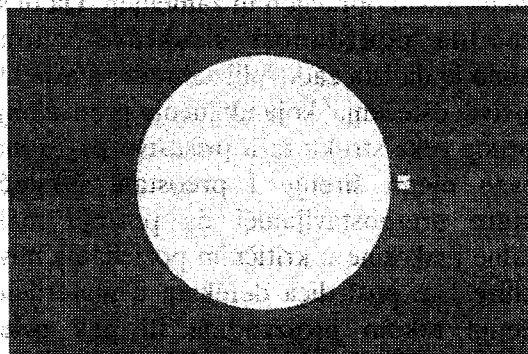
3. NUMERIČKA SIMULACIJA

Za predviđanje preostale čvrstoće, odnosno veka, biće prikazane numeričke simulacije širenja prskotine u polju oplata krila aviona, Sl. 2. Ovde je razmatran slučaj otvora sa jednom prskotinom u oplati oko zakivka. Otvor za zakivak je blizu kraja ivice oplata gde su: rastojanje ose otvora zakivka do kraja ivice $w/2 = 7\text{ mm}$, $2R = 3.2\text{ mm}$, $t = 0.6\text{ mm}$, opterećenje $\sigma_{\max} = 47.8\text{ N/mm}^2$, $R = 0.1$.



Slika 2 Model konačnih elemenata za otvor sa prskotinom u polju oplata

Na Sl. 3 prikazan je model "superelementa" oko vrha prskotine sastavljenog od osam singularnih konačnih elemenata.



Slika 3 Tipičan model "superelementa" oko vrha prskotine

Za napred definisanu geometriju i opterećenje dobijeni su FIN primenom MKE i analitičkim postupkom:

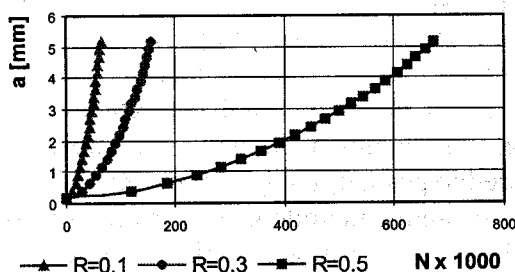
$$K_I = 143.3\text{ N/mm}^{3/2} \text{ Rezultati MKE}$$

$$K_I = 142.3\text{ N/mm}^{3/2} \text{ Prezantovano rešenje}$$

Očigledna je dobra saglasnost prezentovanog analitičkog rešenja i MKE. To sa svoje strane obezbeđuje i tačnost analize širenja prskotine jer od tačnosti FIN primarno zavisi i procena preostalog veka.

Za gornji model izvršena je analiza širenja prskotine koristeći modifikovan Parisov model (2.1). Oplata je od aluminijumske legure čije su karakteristike: $C=2.5710^8$, $n=4$.

Za napred definisanu geometriju i ciklična opterećenja konstantne amplitude izvršena je analiza širenja prskotine, za različite nivoe srednjih napona izraženih preko koeficijenta asimetrije opterećenja R . Rezultati su prikazani na Sl. 3.



Sl. 3 Uticaj srednjeg napona na širenje prskotine

Evidentan je uticaj srednjih napona na preostalu čvrstoću odnosno vek.

Analiza širenja prskotine za napred definisani otvor sa jednom prskotinom sprovedena je za spektar opterećenja datog u Tabeli 1. Spektar dat u tabeli predstavlja jedan blok i odgovara određenom vremenskom periodu leta aviona

Tabela 1: Spektar opterećenja (1 blok)

Nivo	n_i	$\sigma_{\min} [N/mm^2]$	$\sigma_{\max} [N/mm^2]$
1	73	8.30	33.30
2	20	6.74	38.20
3	4	26.80	41.60

Konačan rezultat procenjenog broja blokova:

$$N_{bl}=3452$$

Gore sračunatom broju blokova odgovara određeni vremenski period kada se javlja rapidno širenje prskotine, odnosno lom. Ovakva analiza u suštini određuje preostalu čvrstoću elementa sa prskotinom. Ovakve numeričke simulacije su pogodne za procene da li neki oštećeni element konstrukcije može da se, bez opravke ili zamene, zadrži na avionu pre opšte opravke sa unapred definisanim misijama leta, odnosno spektrima

opterećenja.

3. ZAKLJUČAK

U cilju procene preostale čvrstoće, odnosno veka elemenata vazduhoplovnih konstrukcija u prisustvu oštećenja tipa prskotina, prikazan je analitički postupak simulacije širenja prskotine. Za analizu širenja prskotine izvedeni su analitički izrazi za određivanje faktora intenziteta napona kao osnovnog parametra mehanike loma u proceni preostale čvrstoće. Izvedeni analitički izrazi koriste korektivne funkcije, specifične, za otvor sa prskotinom u polju oplata pod dejstvom biaksijalnog opterećenja. Ove korektivne funkcije su polinomi četvrtog stepena i uspostavljene su na osnovu rezultata MKE, na bazi primene specijalnih singularnih konačnih elemenata. Koristeći analitičke izraze za FIN u sprezi sa različitim zakonima širenja prskotine, u ovom slučaju modifikovani Parisov model, uspostavljena je pogodna numerička procedura za procenu veka na bazi simulacije širenja prskotine. Procedura je ilustrovan za strukture tipa otvora u oplati sa inicijalnom prskotinom. Prikazana procedura se može efikasno koristiti kako u analizi čvrstoće sa aspekta dopustivih oštećenja tako i kod konstrukcija gde se tokom eksploatacije javljaju oštećenja ovog tipa.

LITERATURA

1. "Airplane Damage Tolerance Requirements", MIL-A-83444, Air Force Aeronautical Systems Division, July 1974.
2. Paris, P.C, Gomez, M.P and Anderson, W.E, The trend in engineering, Vol.13, No.1, 1961.
3. Maksimović, K., Proračun čvrstoće sekcije krila lakog školskog aviona sa aspekta dopustivih oštećenja, Izveštaj VTI VJ, 2002.
4. Barsonun, R.S, On the use of isoparametric finite elements in linear fracture mechanics, Int. J. Numerical Methods in Engineering, Vol. 10, 1976, 25-37.
5. Maksimović, S. i Mladenović, J., "LOM-3" Softverski paket za analizu čvrstoće konstrukcija na zamor pri opštim spektrima opterećenja, VTI VJ Žarkovo, 2001.