

UVOD

Integritet konstrukcije je relativno nova naučna i inženjerska disciplina, koja obuhvata analizu stanja i dijagnostiku ponašanja i popuštanja, procenu preostale čvrstoće i radnog veka i revitalizaciju konstrukcije. Analiza stanja i dijagnostika ponašanja konstrukcije objekta izvodi se na računaru primenom numeričke metode konačnih elemenata razvijenim sistemom kompjuterskog modeliranja i proračuna struktura "KOMIPS". Ovaj pristup omogućava određivanje stvarnog ponašanja konstrukcije objekta, pouzdanu prognozu reagovanja konstrukcije u eksploataciji, dobijanje parametara izbora i odluka, određivanje uzroka lošeg ponašanja ili popuštanja konstrukcije, procenu eksploatacionog veka i vremena pouzdanog rada konstrukcije.

Problemi nastali u eksploataciji opreme prvenstveno potiču od nedovoljno dobro projektovane geometrije. Osim toga, oni su često posledica nedovoljne otpornosti materijala, a posebno zavarenih spojeva, na nastanak i rast prslina. Takođe, čest je slučaj da su oba navedena faktora prisutna.

U inženjerskoj analizi nosećih konstrukcija primena izložene metodologije nameće sa kao neminovnost. Ona ima opravdanja zbog vrlo niskih troškova primene uz vrlo visok nivo rezultata.

ANALIZA STANJA I DIJAGNOSTIKA PONAŠANJA KONSTRUKCIJE

Razvijeni sistem "KOMIPS" poseduje i specifični proračun za bliže definisanje stanja i dijagnostike ponašanja. Za sve vrste konačnih elemenata i globalne čvorove preračunava se uporedni napon po Henki-Mizzes-voj hipotezi. Raspodele opterećenja, membranskih i savojnih napona, energije deformacije i kinetičke i potencijalne energije omogućavaju veoma efikasnu analizu stanja i dijagnostiku ponašanja projektovane ili izvedene konstrukcije. One se izražavaju u procentima po izabranoj grupi elemenata i grafički u vidu linija jednakih potencijala opterećenja i energija po modelu.

Težnje dobrom ponašanju konstrukcije u eksploataciju su:

- što veća razlika između najvećeg radnog napona i napona tečenja,
- što ravnomernija raspodela deformacije, napona i energije,
- što manje prisustvo koncentracije napona,
- što veća otpornost materijala na nastanak i rast prslina,
- što veća duktilnost i žilavost materijala,
- što dalji dinamički odzivi od eventualne pobude,
- što viša prva frekvencija i što veće rastojanje između frekvenci,
- što manji faktor dinamičkog pojačanja.

Tok kretanja i raspodela opterećenja

Određivanje toka kretanja i raspodele opterećenja po konstrukciji od mesta njegovog uvođenja do oslonca (od izvora do ponora) predstavlja osnovu razumevanja ponašanja konstrukcije. Najprostije rečeno opterećenje putuje tokom najmanjeg otpora (tok-linija najveće krutosti i najkraći put).

Raspodela membranskih i savojnih napona, normalnih i tangencijalnih napona

Prisutna je za konačni element ploče i grede. Iznalazimo slaba (prisutno u velikoj meri savijanje) i dobra mesta (prisutan samo membranski napon) kao i mesta sa malim nivoom napona. Takođe ukazuje kakve modifikacije treba izvesti da bi se minimizirao negativan uticaj savijanja i bolje preraspodelilo opterećenje. Ukoliko model poseduje u manjoj meri savojni napon tom modelu je moguće primeniti redukciju stepeni slobode na svega tri translacije ili primenu prostijeg konačnog elementa (npr. membrane umesto ploče, štapa umesto grede). Na taj način nalazimo slaba (prisutno u velikoj meri tangencijalnih napona) i dobra mesta (prisutan samo normalni napon).

Raspodela energije deforomacije

Raspodela energije deformacije po grupama elemenata (delovi strukture) veoma efikasno ukazuje na tok opterećenja i delove strukture koji prenose, odnosno nose opterećenje. Takođe, ovim se definiše osetljivost na eventualne modifikacije.

Jednačinu ravnoteže potencijalne energije deformacije i rada spoljašnjih sila dobijamo množenjem osnovne statičke jednačine sa leva transponovanim vektorom pomeranja $\{\delta\}^T [K] \{\delta\} = \{\delta\}^T \{F\} \equiv E_d$. Energija deformacije konačnog elementa e_d glasi: $e_d = \{\delta_{sr}\}_e^T [k_{rs}]_e \{\delta_{sr}\}_e$, gde su: $\{\delta_{sr}\}_e$ - pripadajući globalni vektor pomeranja i $[k_{rs}]_e$ - globalna matrica krutosti elementa "e".

Raspodela kinetičke i potencijalne energije na glavnim oblicima oscilovanja

Raspodela kinetičke i potencijalne energije po glavnim oblicima oscilovanja još preciznije definiše ponašanje. Množenjem dimamičke jednačine sa leve strane sa transponovanom matricom sopstvenih vektora dobijamo jednačinu bilansa (jednakosti) potencijalne i kinetičke energije: $[\mu]^T \cdot [K] \cdot [\mu] = [\mu]^T \cdot [M] \cdot [\mu] \cdot \{\lambda\}$. Kinetička e_k^r i potencijalna e_p^r energija konačnog elementa "e" i cele strukture E^r na r-tom glavnom obliku glase: $e_k^r = \omega_r^2 \{\mu_{sr}\}_e^T [m]_e \{\mu_{sr}\}_e$, $e_p^r = \{\mu_{sr}\}_e^T [k_{rs}]_e \{\mu_{sr}\}_e$, $E^r = E_k^r = E_p^r = \omega_r^2 \{\mu_r\}^T [M] \{\mu_r\} = \{\mu_r\}^T [K] \{\mu_r\}$, gde su ω_r - r-ta sopstvena frekvenca, $\{\mu_r\}$ - r-ti sopstveni vektor i $\{\mu_{sr}\}_e$ - pripadajući r-ti sopstveni vektor elementa.

Promena kvadrata sopstvene r-te frekvence (reanaliza-bez ponovnog proračuna) glasi :

$$\frac{\Delta\omega_r^2}{\omega_r^2} = \frac{\alpha_e \cdot e_p^r - \beta_e \cdot e_k^r}{E^r}, \text{ gde } \alpha_e, \beta_e \text{ definišu modifikaciju e-tog elementa.}$$

PARAMETRI IZBORA I ODLUKE

Kvalitetni parametri proistekli iz analize stanja i dijagnostike ponašanja efikasno se koriste u sledećim aktivnostima:

- projektovanje, izrada ili nabavka konstrukcije,
- produženja preostalog veka,
- rekonstrukcija ili sanacija konstrukcije,
- revitalizacija objekta.

Za donošenje ispravne i precizne odluke u navedenim aktivnostima neophodno posedovati kvalitetnu analizu stanja i dijagnostiku ponašanja konstrukcije.

POPUŠTANJE KONSTRUKCIJE

Nastanak i rast prslina, su problemi sa kojima se sreće veliki broj konstrukcija u eksploataciji. Klasični proračun mehanike loma uzima u obzir ovu pojavu analizom tzv. sila rasta prsline, čijim poređenjem sa otpornošću materijala može da se dobije procena daljeg ponašanja konstrukcije (linearan konzervativni pristup). Realnija slika ponašanja konstrukcije sa prslinom se dobija primenom plastične analize, koja obuhvata određivanje parametara kao što su J integral i otvaranje prsline.

Ovakvim pristupom mogu se iznaći mesta u konstrukciji gde greška, odnosno prslina može "uslovno" da postoji. Postojanje prsline (greške) ne sme mnogo narušiti nosivost elementa, kao i da mogućnost njenog širenja bude minimalna.

Metodologija proračuna ponašanja konstrukcije sa greškom je sledeća:

1. Modeliranje i proračun cele konstrukcije bez i sa greškom,
2. Dijagnostika ponašanja cele konstrukcije bez i sa greškom,
3. Modeliranje i proračun (linearan i nelinearan) elementa konstrukcije sa greškom,
4. Modeli proračuna za različitom pozicijom i veličinom greške i
5. Dijagnostika ponašanja elementa konstrukcije sa greškom.

Dijagnostika ponašanje konstrukcije sa greškom (popuštanje) obuhvata iznalaženje uticaja pozicije i veličine greške (a) na sledeće veličine:

1. Promenu deformacije (maksimalna deformacija, veličinu maksimalnog otvaranja prsline - COD i otvaranje vrha prsline - CTOD) i njene raspodele,
2. Priraštaj popustljivosti elementa (dC/da),
3. Promenu σ_{ekv} , σ_x , σ_y , τ_{xy} i njihovu raspodelu po elementu,
4. Promenu procenta prisustva σ/τ i $\sigma/\tau^{mem} / \sigma/\tau^{sav}$,
5. Promenu energije deformacije E_d ,
6. Priraštaj energije deformacije (dE_d/da),
7. Promenu procentualnog prisustva energije deformacije po zonama,
8. Energiju deformacije elementa na vrhu prsline i
9. Proizvod $\sigma_y \cdot CTOD$.

Veličina napona može biti normirana, odnosno podeljena sa naponom tečenja (σ/R_{eH}). Veličina prsline može biti normirana širinom elemenata.

PROCENA PREOSTALE ČVRSTOĆE I RADNOG VEKA

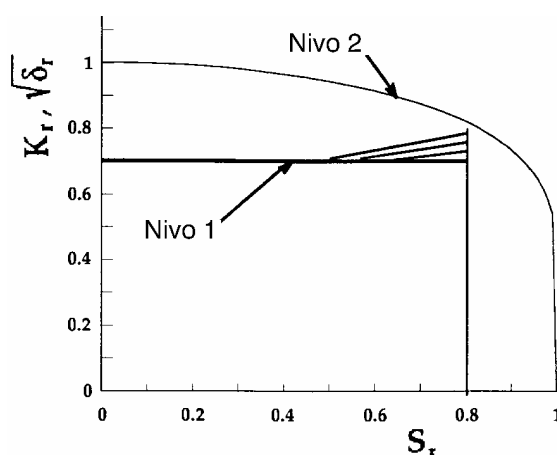
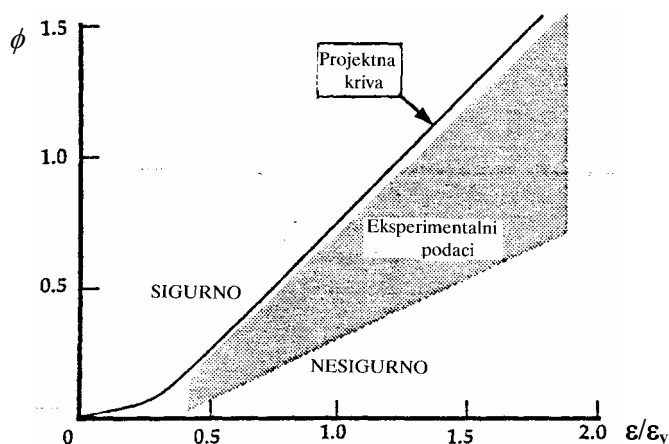
Preostala čvrstoća i radni vek konstrukcije bez prsline određuje se na osnovu ponašanja konstrukcije. Sanaciju i revitalizaciju treba obavljati samo kada konstrukcija ima loše lokalno ponašanje. U slučaju lošeg globalnog ponašanja konstrukciju treba zameniti. Pri tome je potrebno eliminisati loše ponašanje ('lečiti' uzrok, a ne posledicu) pogodnom rekonstrukcijom. Preostala čvrstoća i radni vek konstrukcije sa stvarnom ili simuliranom prsline, određuje se na osnovu ponašanja konstrukcije, uzimajući u obzir veličinu i položaj prsline, odnosno silu rasta prsline, koja se poredi sa otpornošću materijala na rast prsline.

Svojstva otpornosti materijala na prsline se određuju eksperimentalno, prema standardu ASTM E1737. U okviru linearno elastične mehanike loma (LEML), sila rasta prsline se identifikuje sa faktorom intenziteta napona: $K=Y\sigma\sqrt{\pi a}$, gde je Y bezdimenzioni faktor geometrije, σ udaljeni napon, a dužina prsline. Otpornost materijala na nestabilni rast prsline se u okviru linearno elastične mehanike loma predstavlja kritičnom vrednošću faktora intenziteta napona u uslovima ravnog stanja deformacije, K_{Ic} , odnosno žilavošću loma. Uslov za nestabilni rast prsline glasi: $K \geq K_{Ic}$, odakle se određuje kritična dužina prsline a_c , ako se znaju žilavost loma, udaljeni napon σ i faktor geometrije Y , ili se određuje potrebna žilavost loma (izbor materijala) ako se znaju dužina prsline a , udaljeni napon σ i faktor geometrije Y . Uslov nestabilnog rasta prsline može da se koristi i kao kriterijum za određivanje dozvoljenog opterećenja, ako se znaju dužina prsline a , žilavost loma i faktor geometrije Y .

Primena LEML je po pravilu ograničena na dokaz sigurnog rada konstrukcije sa prsline, kod koje se pri tom zanemaruje sposobnost materijala da se plastičnim deformacijama suprotstavi rastu prsline. Kako je uticaj plastične deformacije oko vrha prsline vrlo bitan za većinu konstruktivnih materijala, to je za kompletnu analizu rasta prsline neophodno primeniti parametre elasto-plastične mehanike loma, kao što su CTOD i J integral.

Otvaranje vrha prsline (CTOD - crack tip opening displacement, oznaka - δ) je iskustveni parametar koji omogućava brzu i efikasnu inženjersku procenu značaja prsline za sigurnost konstrukcije. Ova konstatacija je zasnovana na iskustvu stečenom u primeni tzv. projektnih CTOD krivih i dijagrama analize loma (FAD - failure assessment diagram), tj. proceduri opisanoj detaljno u PD 6493. Iako uprošćena, ova procedura je pogodna za većinu inženjerskih problema, jer daje pouzdanu i konzervativnu procenu ponašanja konstrukcije sa prsline.

Projektna CTOD kriva omogućava da se odredi zavisnost između veličine greške, napona i deformacije (opterećenja), i osobina materijala. Projektna kriva može da se predstavi kao granična kriva, gde je na ordinati ϕ bezdimenziono otvaranje prsline, $\phi = \delta / \delta_c$, δ_c kritična vrednost otvaranja vrha prsline, ε ukupna deformacija (sa eventualnim početnim, tj. zaostalim deformacijama), a ε_y deformacija pri tečenju $\varepsilon_y = R_{eH}/E$.



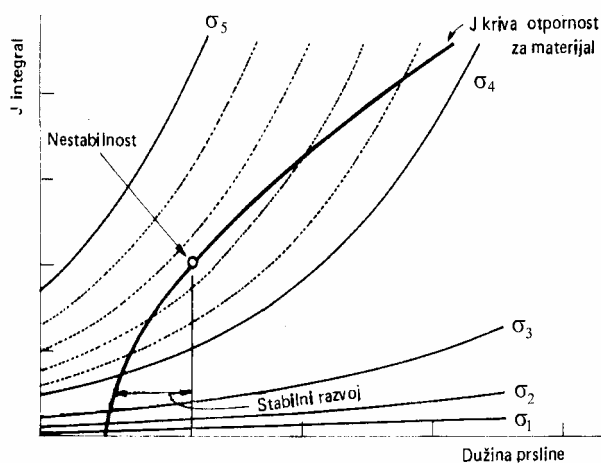
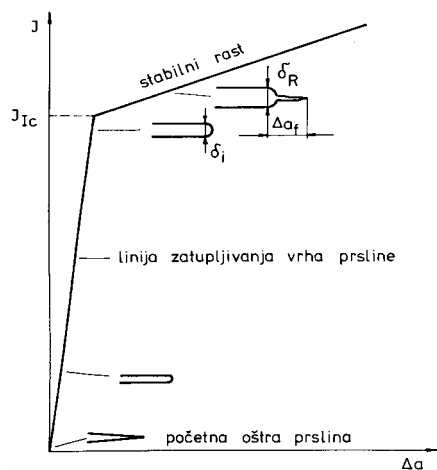
Osim za procenu integriteta konstrukcije, projektna kriva može da se koristi za određivanje kritične dužine prsline ako se zna ukupna deformacija ε , deformacija pri tečenju ε_y , i kritična vrednost otvaranja vrha prsline δ_c , odnosno za izračunavanje δ_c ako se zna dužina prsline a .

Projektna kriva važi za prolazne prsline (po celoj debljini), u polju napona zatezanja, čija je veličina definisana jednom dimenzijom - dužinom. Veliki broj grešaka su, međutim, tzv. površinske greške, čija je veličina definisana pomoću dve dimenzije - dužinom $2c$ i dubinom a . Primena projektna krive na površinske prsline je omogućena uvođenjem ekvivalentne prolazne prsline, čija se dužina određuje tako da uticaj površinske i prolazne prsline bude ekvivalentan.

Projektna CTOD kriva ne uzima u obzir mogućnost tzv. plastičnog kolapsa, koji je posebno važan za relativno kratke prsline. U tom slučaju se koristi **dijagram analize loma** (FAD - Failure Assessment Diagram), ucrtan u koordinatni sistem S_r - K_r ili S_r - $\sqrt{\delta_r}$, gde je S_r bezdimenzioni napon, definisan kao količnik ($S_r = \sigma_n / \sigma_t$) napona u neto preseku σ_n i stvarnog napona tečenja σ_t , a K_r je bezdimenzioni faktor intenziteta napona, $K_r = K_I / K_{Ic}$. Određivanje napona u neto preseku σ_n se svodi na primenu inženjerskih aproksimacija. Stvarni napon tečenja σ_t može da se definiše kao poluzbir zatezne čvrstoće i standardnog napona tečenja, $\sigma_t = (R_m + R_{eH})/2$.

Dijagram analize loma takođe razdvaja sigurnu od nesigurne oblasti i ugrađen je u PD 6493 (kao i projektna CTOD kriva), i to na tri nivoa (I, II i III). Prvi nivo je saglasan sa projektnom CTOD krivom, i koristi se kao osnovni konzervativni pristup u analizi integriteta konstrukcije. Granična kriva u prvom nivou se dobija u preseku dve prave linije, horizontale kojoj odgovara $\sqrt{\delta_r} = 1/\sqrt{2}$ i vertikale kojoj odgovara $S_r = 0,8$, dokle su rezultati nivoa I dovoljno konzervativni. Granična kriva u nivou II odgovara izrazu koji je dobijen primenom tzv. modela trake tečenja. Nivo III proširuje oblast plastičnog kolapsa preko vrednosti $S_r = 1$.

Za analizu kompletnog rasta prsline (stabilnog i nestabilnog) koristi se **J integral**, čija zavisnost od prirasta dužine prisle, Δa , definiše J-R krivu otpornosti na rast prsline. Kritična vrednost J integrala, J_{Ic} , pri kojoj počinje stabilni rast prsline može da se odredi i ako nisu zadovoljeni uslovi ravnog stanja deformacije. J integral, kao parametar elasto-plastične mehanike, posebno je pogodan za procenu preostale čvrstoće konstrukcije, jer s jedne strane predstavlja parametar koji definiše opterećenje i geometriju tela, uključujući prslinu (sila rasta prsline), a s druge strane otpornost materijala na rast prsline (J-R kriva).



Rast prsline zamorom

Rast prsline zamorom je veoma bitna pojava kod konstrukcija opterećenih promenljivom dinamičkom silom, jer je često uzrok njihovog loma. Osnovni parametar kojim se prati ova pojava je brzina rasta prsline, određena Parisovim zakonom, dok se broj ciklusa potreban da prslina poraste od početne dužine (a_0) do krajnje dužine (a_k) određuje izrazom za N_p :

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m, \quad N_p = \frac{1}{C \cdot \Delta \sigma^m} \int_{a_0}^{a_k} \frac{da}{(\sqrt{\pi a} \cdot Y)^m}$$

gde je N broj ciklusa opterećenja, C i m koeficijenti materijala, ΔK **opseg faktora intenziteta napona**, koji se određuje kao i faktor intenziteta napona, ako se umesto napona σ u odgovarajući izraz uvrsti opseg napona $\Delta \sigma$.

REVITALIZACIJA KONSTRUKCIJE

Revitalizacija konstrukcije podrazumeva rekonstrukciju ili sanaciju stare konstrukcije i/ili produženje njenog preostalog veka. Svaka od navedenih stavki razrađuje se na osnovu prethodne analize stanja konstrukcije i dijagnostike njenog ponašanja i popuštanja, odnosno procene preostale čvrstoće i veka. Rekonstrukcija podrazumeva prvenstveno promenu geometrije, a često su potrebne intervencije na materijalu (posebno na zavarenim spojevima), odnosno njihova sanaciju.

LITERATURA

Maneski T., Kompjutersko modeliranje i proračun struktura - KOMIPS, Monografija, Mašinski fakultet, Bgd, 1998
 Sedmak S., Sedmak A. (ured.), Monografije Letnjih Škola Mehanike Loma I-VII, TMF-GOŠA, 1980-2001