

PRIMENA MEHANIKE LOMA NA PROCENU INTEGRITETA KONSTRUKCIJE

STRUCTURAL INTEGRITY ASSESSMENT USING FRACTURE MECHANICS

Pregledni rad / Overview paper

UDK /UDC: 624.042.6:620.16

Rad primljen / Paper received: 5.12.2001.

Adresa autora / Author's address:

Aleksandar Sedmak,
Mašinski fakultet, 27. Marta 80, Beograd
Hyacinth Azuka Anyiam,
138 Powell Lane, Upper Darby, PA 19082, USA

Ključne reči

parametri mehanike loma, procena integriteta konstrukcija, spremnost za upotrebu

Keywords

fracture mechanics parameters, structural integrity assessment, fitness-for-service

Rezime

U radu je dat opšti pristup proceni integriteta konstrukcija primenom mehanike loma. Posebno su analizirani linearno-elastični i elasto-plastični problemi i mogućnosti primene odgovarajućih parametara mehanike loma. Data su dva primera procene integriteta posuda pod pritiskom, jedan primenom Dijagrama analize loma, a drugi primenom J integrala.

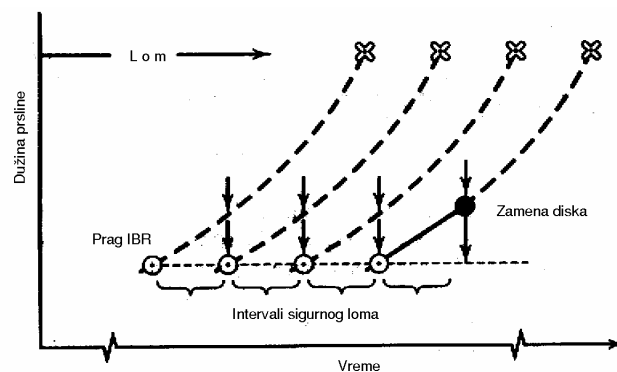
Summary:

A general approach to structural integrity assessment using fracture mechanics is presented. Linear elastic and elastic-plastic problems are analyzed, including a possibility to apply corresponding fracture mechanics parameters. Two examples of pressure vessels integrity assessment are given, one using Failure Assessment Diagramme, and the other one using the J integral

UVOD

Primena mehanike loma je donela značajne promene u inženjerskoj praksi. Kao primeri za ilustraciju ove tvrdnje mogu da se navedu problemi sa Aljaska cevovodom i primena principa konstruisanja sa sigurnošću od loma. U slučaju cevovoda od Aljaske do SAD po prvi put su kriterijumi mehanike loma prihvaćeni kao merodavni, umesto previše konzervativnih standarda o dozvoljenim greškama u zavarenom spoju /1/. Naime, kada je ispitivanjem bez razaranja utvrđen veliki broj grešaka u kružnim zavarenim spojevima, koje je po tada važećim standardima trebalo popraviti, postavilo se pitanje ekonomske opravdanosti, odnosno tehničke neophodnosti popravke. Stoga je nadležna savezna agencija, na zahtev kompanije koja je postavljala cevovod zatražio pomoć od Nacionalnog biroa za standarde (National Bureau of Standards - NBS)*. Detaljna analiza parametara mehanike loma, zasnovana na konceptu otvaranja vrha prslina, obuhvatila je s jedne strane procenu sile rasta prslina, a s druge strane otpornost materijala (metal šava) na rast prslina /1-4/. Rezultati ovog istraživanja su zvanično prihvaćeni, pa je obim popravke drastično smanjen, čime su izbegnuti nepotrebni troškovi, a takođe i opasnost od unošenja novih grešaka reparaturnim zavarivanjem. Možda je najvažnije istaći da je na osnovu ovog istraživanja zaključeno 'da je analiza mehanike loma prihvatljiva osnova za dopušteni izuzetak od postojećih standarda pod određenim okolnostima, ako takva analiza daje ubedljivu i konzervativnu (sigurnu) procenu integriteta konstrukcije'. Treba takođe istaći da se do ovog nivoa primene mehanike loma došlo ne samo detaljnim istraživanjem u konkretnom slučaju, već i prethodnim, intenzivnim razvojem mehanike loma kao naučne discipline.

Drugi primer drastične promene u inženjerskoj praksi je prelazak sa klasičnog principa konstruisanja komponenti koje rade u uslovima zamora (tzv. 'safe-life' princip u okviru koga se određuje preostali vek komponente bez prslina) na princip konstruisanja sa sigurnošću od loma (tzv. 'fail-safe'). Još izraženije nego u prvom primeru, ovde je od suštinskog značaja bio dostignuti nivo mehanike loma kao naučne discipline, a posebno istraživanja u vezi sa zamornim rastom prslina. Drugim rečima, prikupljena saznanja o rastu zamorne prslina su omogućila da se, sa dovoljnom sigurnošću, utvrdi preostali vek komponente sa prslinom i na taj način proceni da li komponenta može da radi do sledeće kontrole. U skladu sa tim, čak i najodgovornije komponente se ne zamenjuju pre nego što se redovnim kontrolama otkriju prslina ili slične greške. Pri tome je komponenta konstruisana tako da u slučaju postojanja prslina manje od minimalne veličine koju može da otkrije primenjena metoda ispitivanja bez razaranja, njen vek (period rasta prslina od navedene 'fiktivne' veličine prslina do kritične veličine za krti lom) bude veći od perioda do sledeće kontrole, sl. 1, /5/.

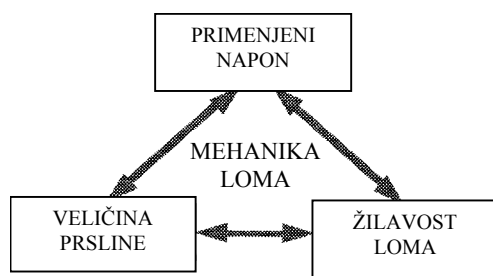


Slika 1. Šematski prikaz konstruisanja sa sigurnošću od loma

* danas Nacionalni institut za standarde i tehnologiju (National Institute of Standards and Technology - NIST)

Mogućnost primene ovog principa na diskove mlaznih motora je analizirana u radu /6/, gde je pokazano da bi se za 20 godina na 23 motora ostvarila ušteda od 1.000.000.000 \$ u odnosu na prvobitnu varijantu sa zamenom diskova posle propisanog radnog veka. Polazna osnova za ovo razmatranje je bila činjenica da je od 1.000 zamenjenih diskova, samo jedan imao prslinu dužine 0,75 mm.

Jasno je dakle da je osnovna promena koju je mehanika loma uvela u inženjersku praksu prihvatanje neminovnosti postojanja prslina i sličnih grešaka i neophodnosti analize njihovog uticaja na integritet konstrukcije. Ilustracija toga je data na sl. 2, gde je prikazano tzv. trougao mehanike loma, koji čine tri promenljive veličine: napon, veličina greške i žilavost loma. Mehanika loma omogućava matematičko izražavanje međusobnog odnosa tih veličina, tako da na osnovu dve poznate veličine može da se izračuna treća. Na primer, ako je na osnovu opterećenja i geometrije konstrukcije poznat napon, a na osnovu ispitivanja žilavost loma materijala od kog je konstrukcija napravljena, onda je moguće odrediti kritičnu veličinu greške. U praksi je takođe čest slučaj da se metodama ispitivanja bez razaranja (IBR) otkrije prslina ili slična greška u konstrukciji za koju se onda određuje kritični napon na osnovu poznate žilavosti loma materijala, ili se određuje minimalna žilavost loma materijala na osnovu naponskog stanja konstrukcije. Konačno, ovaj koncept može da se primeni još u fazi projektovanja, ako se pretpostavi postojanje prslina čije su dimenzije jednake osetljivosti opreme za IBR, pa se odredi dozvoljeni napon na osnovu žilavosti loma, ili obrnuto.



Slika 2. Trougao mehanike loma

Metodologija primene mehanike loma zavisi od raspoloživih podataka, ponašanja materijala, uticaja okolne sredine i opterećenja konstrukcije. U slučaju statičkog opterećenja treba razlikovati ponašanje materijala koje se opisuje kao linearno elastično ('srazmerno malo tečenje') od ponašanja materijala kod koga nije moguće zanemariti njegovu plastičnost. U prvom slučaju se primenjuje linearno elastična mehanika loma (LEML), dok se u drugom slučaju, u zavisnosti od oblika plastičnog tečenja primenjuju različite varijante elasto-plastične mehanike loma. U slučaju dinamičkog opterećenja takođe treba razlikovati linearno elastično od elasto-plastičnog ponašanja materijala, a poseban značaj ima zamor, kao tipični mehanizam rasta prslina pod dejstvom cikličnog opterećenja. Konačno, uticaj okoline može da bude od presudnog značaja, usled povišene temperature ili korozije.

U ovom radu je analizirano statičko opterećenje i različite varijante primene mehanike loma, zavisno od ponašanja materijala (linearno elastično ili elasto-plastično). Posebno je prikazan tzv. dijagram analize loma (Failure Assessment Diagram - FAD), čija je primena ilustrovana odgovarajućim primerima.

PRIMENA LINEARNO ELASTIČNE MEHANIKE LOMA

Primena LEML se zasniva na faktoru intenziteta napona, K_I , koji s jedne strane predstavlja opterećenje i geometriju konstrukcije, uključujući oblik i veličinu prslina, a s druge strane, njegova kritična vrednost, nazvana žilavost loma, K_{Ic} , predstavlja svojstvo materijala. Na osnovu energetskog kriterijuma Grifita, čije se tumačenje svodi na poređenje brzine oslobađanja energije (sile rasta prslina) i otpornosti materijala na rast prslina, važe sledeće zavisnosti:

$K_I \leq K_{Ic}$ - integritet konstrukcije nije ugrožen, odnosno

$K_I > K_{Ic}$ - krsti lom usled nestabilnog rasta prslina.

Treba napomenuti da energetski kriterijum Grifita ima opšte značenje, a da se u oblasti važenja LEML faktor intenziteta napona K_I identifikuje sa silom rasta prslina, dok se žilavost loma K_{Ic} identifikuje sa otpornošću materijala na rast prslina.

Faktor intenziteta napona se u najjednostavnijim slučajevima određuje na osnovu izraza:

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

gde je Y bezdimenzioni geometrijski parametar, σ napon u preseku dovoljno udaljenom od vrha prslina, a dužina prslina. Bezdimenzioni geometrijski parametar Y zavisi od oblika i veličine prslina. Za veliki broj relativno jednostavnih geometrija i opterećenja, postoje približna analitička rešenja za faktor intenziteta napona, odnosno za bezdimenzioni geometrijski parametar, koja mogu da se pronađu u literaturi /7,8/. Za komplikovanije geometrije analitičko rešenje je ponekad moguće dobiti kombinacijom jednostavnijih slučajeva /5/. U slučaju veoma komplikovanih geometrija i potrebe za preciznim rešenjima, neophodna je primena eksperimenatalnih (npr. fotoelastičnost) ili numeričkih (npr. metoda konačnih elemenata) rešenja. Približna analitička rešenja za neke praktične probleme prikazana u daljem tekstu.

Prslina na kružnom otvoru (sl. 3a)

Prslina na kružnom otvoru je posebno važna za vazduhoplovne konstrukcije, koje imaju veliki broj zakivaka. Kružni otvor uslovljava koncentraciju napona, tako da je u tački A napon tri puta veći od nominalnog napona σ . Za relativno male dužine prslina ($L \ll R$) ovaj slučaj se svodi na ivičnu prslinu u zategnutoj ploči, pa faktor intenziteta napona za udaljeni napon 3σ postaje:

$$K = 1,12(3\sigma)\sqrt{\pi L} \quad (1)$$

Ovaj izraz može da se smatra gornjim graničnim rešenjem, jer se sa povećanjem dužine prslina smanjuje uticaj koncentracije napona usled kružnog otvora, pa se smanjuje i vrednost faktora intenziteta napona /5/.

Polukružna ivična prslina (sl. 3b)

Ovakva prslina može da se smatra kombinacijom ivične prolazne prslina i kružne delimično prolazne prslina, pa faktor intenziteta napona može da se predstavi u obliku:

$$K = (1,12)^2 \left(\frac{2}{\pi} \right) \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

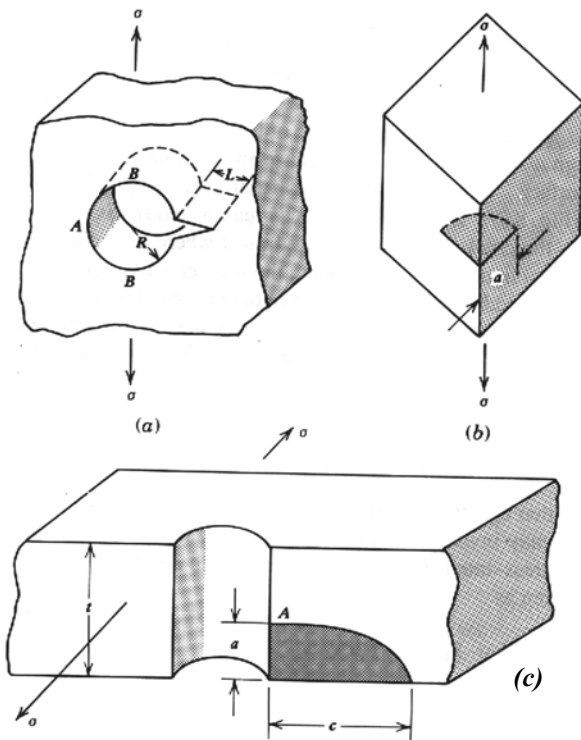
gde je $(1,12)^2$ korekcija za dve slobodne površine, /5/.

Polueliptična ivična prslina na kružnom otvoru (sl. 3c)

Maksimalna vrednost faktora intenziteta napona:

$$K = 1,12(3\sigma) \frac{\sqrt{\pi a}}{Q} \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{2t}\right)} \quad (3)$$

gde 1,12 predstavlja korekciju za slobodnu površinu; 3σ koncentraciju napona; Q korekciju za eliptični oblik prsline, zavisnu od $a/2c$; $\sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{2t}\right)}$ korekciju za konačnu širinu ploče za relativno velike količnike a/t , /5/.



Slika 3. Tipične delimično prolazne prsline

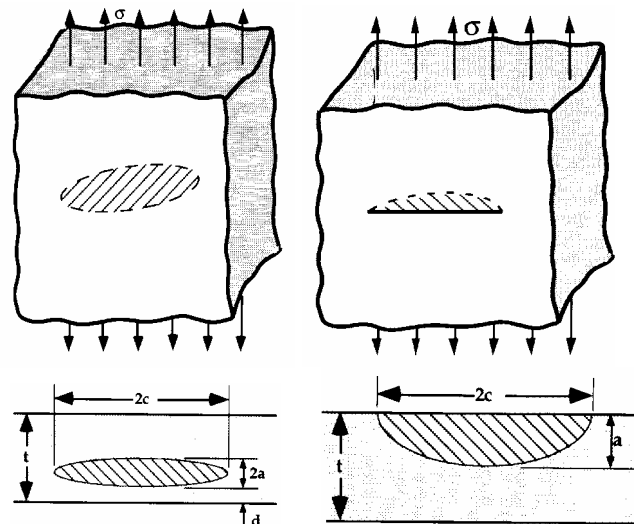
Delimično prolazne prsline (sl. 4)

Delimično prolazne prsline mogu da budu površinske ili unutrašnje, sl. 4. Osim već prikazanog načina određivanja faktora intenziteta napona kombinovanjem jednostavnijih geometrija, za delimično prolazne prsline postoje i 'analitička' rešenja dobijena fitovanjem rezultata proračuna metodom konačnih elemenata, /8,9/:

$$K_I = (\sigma_m + H\sigma_b) F \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (4)$$

Primarni i sekundarni naponi

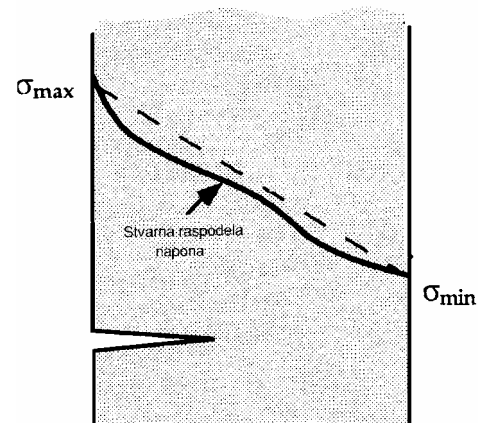
Opterećenje konstrukcije može da se podeli na primarno i sekundarno. Primarni naponi uglavnom nastaju od spoljnih opterećenja i momenata, dok su sekundarni naponi najčešće posledica dejstva neravnomernog zagrevanja i hlađenja, npr. zaostali naponi od zavarivanja lokalizovani i samouravnotežavajući. Primarni naponi, za razliku od sekundarnih, mogu da dovedu do plastičnog loma konstrukcije, ako su dovoljno veliki. Sekundarni naponi doprinose lomu ako su zatezni, dovoljno veliki i u blizini prsline. Napon treba da bude klasifikovan kao primarni kada nije jasno koja kategorija je odgovarajuća.



Slika 4. Delimično prolazne prsline

gde je Q parametar oblika, F i H su parametri koji zavise od a/c , a/t i ϕ , kao i od širine ploče, σ_m i σ_b zatezna i savojna komponenta napona, redom. Karakteristični primeri određivanja F i H su dati u literaturi /8,9/.

Ova rešenja odgovaraju linearnoj raspodeli napona, kod koje se zatezni i savojni napon određuju na sledeći način: $\sigma_m = (\sigma_{min} + \sigma_{max})/2$; $\sigma_b = (\sigma_{min} - \sigma_{max})/2$, gde su σ_{min} i σ_{max} minimalni i maksimalni napon u preseku, sl. 5.



Slika 5. Raspodela napona

Kod linearne analize primarni i sekundarni naponi se tretiraju na isti način, pa je ukupni faktor intenziteta napon jednostavno zbir primarnih i sekundarnih faktora intenziteta napona:

$$K_I^{total} = K_I^p + K_I^s \quad (5)$$

gde indeksi p i s označavaju primarne i sekundarne veličine. Prema tome, razlika između primarnih i sekundarnih napona je važna samo kod elasto-plastične analize.

PRIMENA ELASTO-PLASTIČNE MEHANIKE LOMA

Postoji nekoliko načina da se u proceni integriteta konstrukcije uzme u obzir plastičnost materijala, koji se svode na primenu otvaranja vrha prsline ili J integrala, kao merodavnih parametara elasto-plastične mehanike loma. Otvaranje vrha prsline (crack tip opening displacement - CTOD),

iako nema 'čvrstu' teorijsku osnovu, ima veliku praktičnu primenu, pre svega zbog jednostavnosti određivanja. S druge strane, J integral, po pravilu zahteva komplikovaniji postupak određivanja, ali kao energetski parametar, teorijski utemeljen u osnovnim zakonima mehanike kontinuuma, ima i podjednako važnu praktičnu primenu. Stoga je za detaljnu analizu integriteta konstrukcije neophodno poznavati i primeniti oba navedena parametra elasto-plastične mehanike loma.

Projektna CTOD kriva

Koristeći linearnu zavisnost ukupne deformacije i CTOD u oblasti plastičnosti, /10/, i zavisnost između kritične vrednosti CTOD, δ_{crit} , dobijene ispitivanjem u uslovima srazmerno malog tečenja, i deformacije pri lomu širokih ploča sa dve ivične prsline, ε_f . Burdekin i Dos su formulisali sledeći izraz:

$$\Phi = \frac{\delta_{crit}}{2\pi\varepsilon_y a} = \left(\frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_y}\right)^2 \quad \text{za} \quad \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_y} \leq 0,5 \quad (6)$$

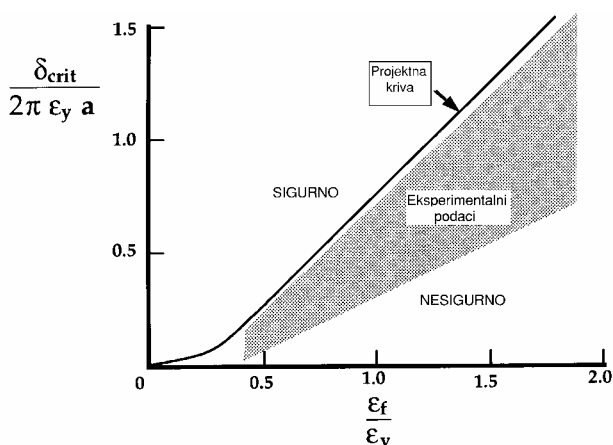
$$\Phi = \frac{\delta_{crit}}{2\pi\varepsilon_y a} = \left(\frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_y}\right) - 0,25 \quad \text{za} \quad \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_y} > 0,5$$

gde je ε_y deformacija tečenja. Treba uočiti da je pri definisanju bezdimenzionog parametra Φ korišćen faktor sigurnosti 2 zbog konzervativnosti pristupa.

Grafički prikaz projektne CTOD krive, sl. 7, omogućava njenu jednostavnu primenu. Naime, ako se za neku konstrukciju dobije tačka koja leži ispod projektne krive tada se za nju smatra da je sigurna od loma. Pri tome se ordinata tačke određuje na osnovu podataka o materijalu (δ_c , ε_y) i dužini prsline, a , a apscisa tačke na osnovu materijala (ε_f) i opterećenja, koje se svodi na deformaciju ε_I :

$$\varepsilon_I = \frac{l}{E} [k_t (P_m + P_b)] + S \quad (7)$$

gde su P_m i P_b primarni membranski i savojni napon, S sekundarni napon, k_t koeficijent koncentracije napona, E modul elastičnosti. Ako se ne zna raspodela zaostalih napona, za S može da se usvoji napon tečenja.



Slika 7. Projektna CTOD kriva

Dijagrami analize loma

Konstrukcije napravljene od žilavih materijala nisu podložne krtom lomu, ali zato se mogu plastično slomiti ako su preopterećene. Mehanizam plastičnog loma (kolapsa) nije obuhvaćen projektom CTOD krivom, pa je za njegovu

analizu neophodan opštiji pristup. Stoga je uveden koncept sa dva kriterijuma loma da bi opisali međusobni uticaj krtog loma i plastičnog kolapsa, realizovan preko dijagrama analize loma (Failure Assessment diagramme - FAD) /12/. Polazna osnova ovog dijagrama je modifikovani model trake tečenja za prolaznu prslinu u beskonačnoj ploči koji povezuje efektivni faktor intenziteta napona K_{eff} sa udaljenim naponom, /13/:

$$K_{eff} = \sigma_Y \sqrt{\pi a} \left[\frac{8}{\pi^2} \ln \sec \frac{\pi \sigma}{2 \sigma_c} \right]^{1/2} \quad (8)$$

Kod realnih konstrukcija treba zameniti napon tečenja σ_Y naponom kolapsa σ_c , koji osim od materijala, zavisi i od geometrije konstrukcije, uključujući prslinu. Sledeći korak u modifikaciji FAD je izražavanje efektivnog faktora intenziteta napona u bezdimenzionom obliku, K_{eff}/K_I :

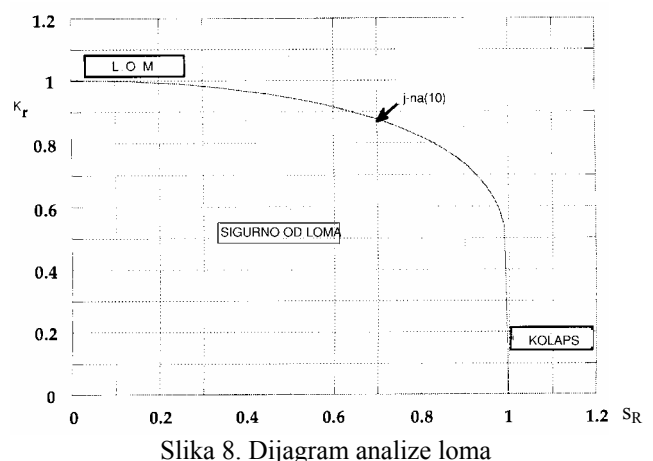
$$\frac{K_{eff}}{K_I} = \frac{\sigma_c}{\sigma} \left[\frac{8}{\pi^2} \ln \sec \frac{\pi \sigma}{2 \sigma_c} \right]^{1/2} \quad (9)$$

Kao završni korak, definišu se bezdimenzione promenljive, $S_r = \sigma/\sigma_c$ i $K_r = K_I/K_{eff}$, koje predstavljaju apscisu i ordinatu u modifikovanom FAD, sl. 8, a jed. (9) postaje:

$$K_r = S_r \left[\frac{8}{\pi^2} \ln \sec \left(\frac{\pi}{2} S_r \right) \right]^{-1/2} \quad (10)$$

Ako je materijal potpuno žilav, konstrukcija se lomi mehanizmom plastičnog kolapsa pri $S_r=1$, dok je za lom konstrukcije od potpuno krtog materijala $K_r=1$. U svim ostalim slučajevima postoji međudejstvo plastičnog kolapsa i krtog loma, pa su K_r i S_r manji od 1, a parovi odgovarajućih vrednosti čine graničnu krivu, koja je prikazana na sl. 8. Pri tome se uzima da je K_{eff} jednaka žilavosti loma materijala, K_{Ic} , pa se K_r određuje prema izrazu:

$$K_r = \frac{K_I}{K_{Ic}} = \frac{K_I^P + K_I^S}{K_{Ic}} \quad (11)$$



Slika 8. Dijagram analize loma

Za izračunavanje S_r uzimaju se samo primarni naponi, jer sekundarni naponi ne utiču na kolaps konstrukcije.

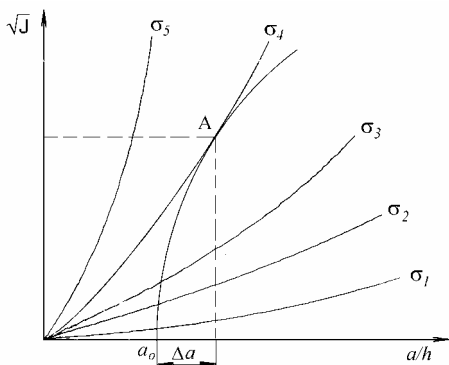
Treba napomenuti da primena FAD nije ograničena na K , već da na ordinati mogu da budu i J ili δ , kao i da postoje mnogobrojne modifikacije ovog dijagrama, kao što je npr. 'nivo III' koji proširuju područje plastičnog kolapsa, /14/.

J integral - analiza stabilnog rasta prsline

Primena J integrala na procenu integriteta konstrukcije podrazumeva njegovo dvojako tumačenje: prvo, po kome je J integral parametar elasto-plastične mehanike loma koji definiše geometriju tela sa prslinom i opterećenje, i drugo, po kome je J integral merilo otpornosti materijala na rast prsline. Osnovna konceptijska razlika u ova dva tumačenja je u rastu prsline - dok je u prvom slučaju veličina prslina nepromenljiva i zajedno sa naponom se tretira kao parametarska veličina, dotle je u drugom slučaju porast njene veličine (dužine) od presudnog značaja. Kriterijum za početak stabilnog rasta prsline formuliše na sledeći način:

$$J(\sigma, a) \geq J_{Ic} \quad (12)$$

gde je $J(\sigma, a)$ sila rasta prsline (SRP), koja zavisi od udaljenog napona (opterećenja) σ i dužine (veličine) prsline a , dok je J_{Ic} otpornost materijala na početak (stabilnog) rasta prsline. Analiza rasta prsline se u slučaju elasto-plastične mehanike loma ne završava na primeni izraza (12), već uključuje i uslov za početak nestabilnog rasta prsline, odnosno J-R krivu, koja se pogodnim grafičkim predstavljanjem upoređuje sa SRP, parametarski predstavljenim sl. 9.



Slika 9. Poređenje krivih sile rasta prsline i J-R krive

Matematički formulisan uslov za nestabilni rast prsline:

$$\partial J(\sigma, a) / \partial a \geq \partial J / \partial a \quad (13)$$

odnosno prirast SRP sa prirastom dužine prsline mora da bude veće od prirasta otpornosti materijala. Važno je napomenuti da se SRP po pravilu određuju teorijsko-analitički (npr. model REI, King, EPRI procedura, /15-19/) ili numerički (npr. MKE, /20-21/), dok se J-R dobijaju eksperimentalno, npr. prema standardu ASTM E1820.

PRIMERI

Za ilustraciju opisanih postupaka procene integriteta konstrukcija poslužiće odgovarajući primeri za FAD i SRP vs. J-R krive.

Prvi primer se odnosi na posudu za komprimovani vazduh u Hidroelektrani Bajina Bašta, kod koje su IBR (u redovnoj kontroli) otkrivene greške, neprihvatljive po važećem standardu (JUS ISO 5817). Radilo se o nekoliko grešaka tipa neprovara ili nalepljivanja, kao što je detaljnije opisano u /22/, od kojih je ovde prikazana greška sa snimka br. 970-64, utvrđena ultrazvukom kao neprovar ukupne dužine 60 mm i širine 2 mm. Pod dužinom greške se podrazumeva njena dimenzija u pravcu šava, a pod širinom greške njena dimenzija u pravcu debljine šava. Ova greška je izabrana kao

jedna od tri 'kritične', kako zbog dimenzija, tako i zbog položaja. Naime po dimenzijama ovo je bila najveća greška, a po položaju najopasnija, jer se prostire u podužnom pravcu i to u blizini prelaska sa cilindričnog omotača na torisferično dance, gde su mogući uticaji lokalnog savijanja.

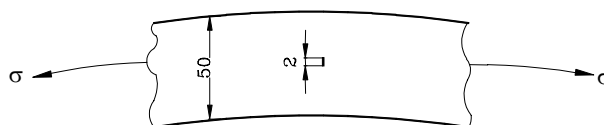
Ostali podaci bitni za analizu su:

- debljina posude $t=50$ mm, srednji prečnik $D=2150$ mm;
- materijal omotača: NIOVAL 50
- unutrašnji pritisak $p=8,1$ MPa, zaostali napon je uzet kao maksimalna vrednost poprečno na šav $\sigma_R=200$ MPa, na osnovu iskustva sa materijalom i posudom sličnih dimenzija, /23/);
- žilavost loma metala šava minimalno 1580 MPa $\sqrt{\text{mm}}$, na osnovu iskustva sa istim osnovnim materijalom /24/.

Imajući u vidu konzervativni pristup u analizi kritičnih grešaka, za grešku 970-64 je usvojeno ne samo da je prslina, nego i da se prostire celom dužinom omotača posude. U tom slučaju problem se posmatra u preseku poprečnom na podužni pravac posude, pri čemu se uticaj krivine zanemaruje, što je za debljinu 50 mm i prečnik 2150 mm opravdano. Dimenzija prsline koja je navedena kao dužina (60 mm) više ne postoji u analizi, a dimenzija navodena kao širina, postaje dužina (2 mm). Faktor intenziteta napona je u tom slučaju određen na osnovu formule:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (14)$$

gde je σ udaljeni napon, a a poludužina prsline. Izraz (14) važi za zategnutu ploču čije su dimenzije znatno veće od dužine prsline, što odgovara analiziranom problemu, sl. 10.



Slika 10. Skica preseka u kome se analizira prslina 970-64

Ako se za udaljeni napon uzme zbir obimskog napona od unutrašnjeg pritiska ('kotlovska formula') i poprečni zaostali napon u sredini šava, za faktor intenziteta napona se dobija:

$$K_I = (pR/t + \sigma_R) \sqrt{\pi a} = (174 + 200) \sqrt{\pi \times 2} = 663 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}} \quad (15)$$

Minimalna vrednost žilavosti loma je 1580 MPa $\sqrt{\text{mm}}$ pa se može zaključiti da nema opasnosti od krtog loma. Ovaj zaključak važi i ako se pretpostavi da je dužina prsline dva puta veća od izmerene (čime se uzima u obzir nesigurnost u merenju), jer je tada faktor intenziteta napona bio 937 MPa $\sqrt{\text{mm}}$, što je 59% minimalne vrednosti žilavost loma i još uvek predstavlja dovoljnu sigurnost od krtog loma.

Dijagram analize loma zahteva dvoparametarsku analizu - određivanje količnika faktora intenziteta napona i žilavosti loma, i određivanje količnika napona u neto preseku (σ_n) i napona tečenja (σ_T), koji je u ovom slučaju definisan kao poluzbir 'standardnog' napona tečenja (R_{eH}) i zatezne čvrstoće (R_M). Kao što je već pokazano količnika faktor intenziteta napona i žilavosti loma za dvostruko veću dužinu prsline od izmerene iznosi $K_R = K_I / K_{Ic} = 0,59$, što se ovde usvaja kao ulazni podatak. Napon u neto preseku je

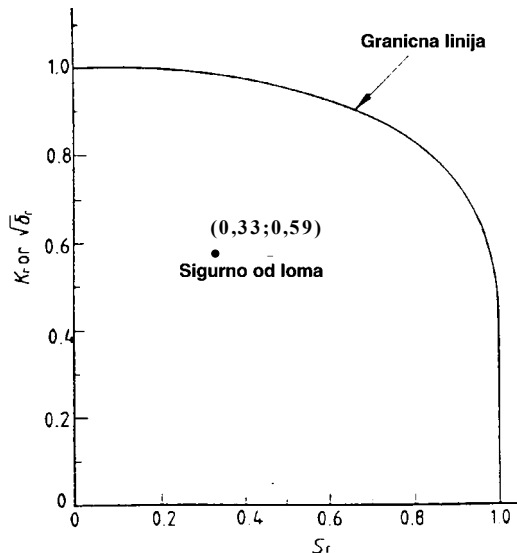
$$\sigma_n = 1,08 \cdot pR/t = 188 \text{ MPa} \quad (16)$$

pri čemu je faktor 1,08 uzet zbog oslabljenja preseka prslinom dužine 4 mm na debljinu 50 mm (8%), pa se dobija:

$$S_R = \sigma_H / \sigma_F = 0,33 \quad (17)$$

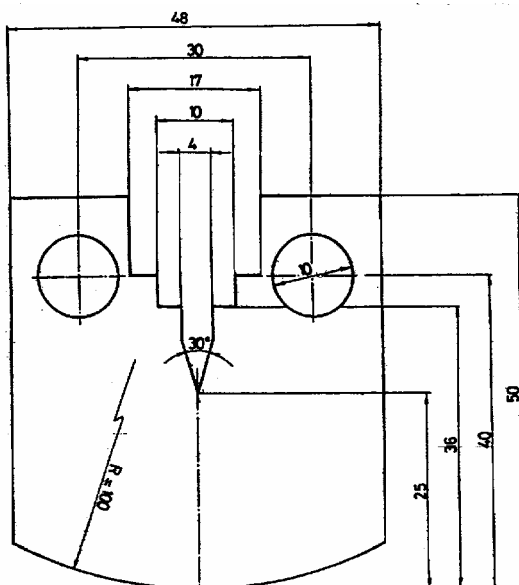
pri čemu je $R_{eff} = 500$ MPa, a $R_M = 650$ MPa, /22/.

Na osnovu dobijenih vrednosti za K_I/K_{Ic} i σ_H/σ_F u dijagram analize loma (FAD) je ucrtana tačka sa koordinatama (0,33; 0,59) koja se nalazi u sigurnom delu dijagrama. Kako je ova tačka dobijena konzervativnom procenom svih uticaja, jasno je da u normalnim radnim uslovima greška 970-64 ne može da izazove krti lom.



Slika 11. FAD za grešku 64

Drugi primer se odnosi na prvu analizu integriteta konstrukcije primenom J integrala koja je rađena kod nas /25/. Prema izveštaju od 15.9.1986. godine, urađena je ocena preostale radne sposobnosti (fitness-for-service) i sigurnosti parnog bubnja Incel Banjaluka primenom krive otpornosti prema razvoju prsline preko J integrala - na sobnoj temperaturi i na 300 °C. Za određivanje (merenje) J integrala korišćena je standardna CT epruveta (sl. 12), čijim ispitivanjem je dobijena J-R kriva.

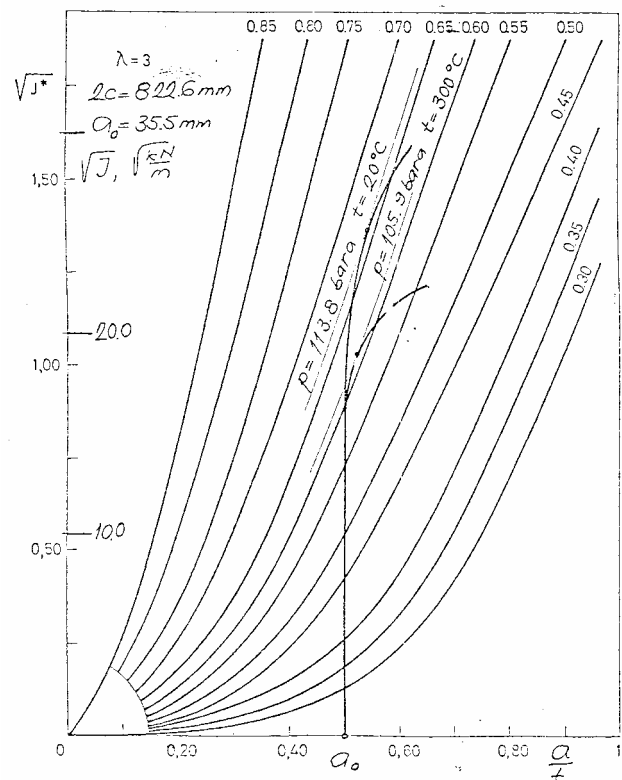


Slika 12. CT epruveta /25/

S druge strane, SRP su određene primenom REI modela /15/ za sledeće podatke:

- materijal: Č3133 sa $R_{0,2} = 210$ MPa (na 300 °C),
- poluprečnik posude $R_s = 900$ mm, debljina zida $t = 71$ mm, radni pritisak $p = 85$ bar.

Dobijeni rezultati su prikazani na sl. 13, za prslinu dužine $2c = 822,6$ mm i dubine $a = 35,5$ mm. Ove dimenzije prsline su odabrane tako da odgovaraju parametru REI modela $\lambda = 3$, i da budu veće od utvrđene dvoplatnosti (dubina 7 mm, dužina 530 mm). Sile rasta prsline su date za različite pritiske, izražene parametarski, $pR_s/tR_{0,2}$, u rasponu od 0,3 do 0,85, a J-R krive su date za dve temperature, sobnu i radnu (300 °C). Kao što se vidi sa sl. 13, pritisak pri kome prsline nestabilno raste je 105,9 bara (na 300 °C), odnosno 113,8 bara (na 20 °C), i veći je od radnog u svakom slučaju. Imajući još u vidu činjenicu da je otkrivena greška ne samo manjih dimenzija, nego i povoljnijeg oblika (dvoplatnost u odnosu na prslinu), zaključak je bio da bubanj može da se dalje koristi, uz povremenu kontrolu ultrazvukom, da bi se proverilo stanje dvoplatnosti.



Slika 13. Poređenje krivih sile rasta prsline i J-R krivih /25/

Literatura

1. R.P.Rid, R.E.Šram, *Prijemna kontrola kružnih zavarenih spojeva cevovoda sa naglaskom na ispitivanje bez razaranja*, Monografija III Letnje škole mehanike loma (ured. S. Sedmak), GOŠA, TMF, 1985, str. 307-318
2. D.T.Rid, *Analiza mehanike loma i krive dopuštenih veličina greški za površinske prsline u cevovodima*, Monografija III Letnje škole Mehanike Loma (ured. S. Sedmak), GOŠA, TMF, 1985, str. 319-338
3. R.P.Reed et al, *Fitness-for-Service Criteria for pipeline Girth-Weld Quality*, Final Report to the U.S. DOT, NBS, Boulder, USA, 1983

4. M.B.Kejsen, G.F.Hičo, *Procena značaja zatupljenih grešaka pri ispitivanju kvaliteta zavarenih cevovoda radi prijema za rad*, Monografija III Letnje Škole Mehanike Loma (ured. S. Sedmak), GOŠA, TMF, 1985, str. 339-353
5. R.W.Hertzberg, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, John Wiley & Sons, 1996
6. J.A.Harris Jr, *Engine component retirement for cause, Vol. 1, Executive Summary*, AFWAL-TR-87-4609, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1987
7. H.Tada, P.C.Paris, G.Irwin, *The Stress Analysis of Cracks Handbook*, Del Research Corp. Hellertown, Pa., 1973
8. T.L.Anderson, *Fracture Mechanics - Fundamentals and Applications*, CRC Press, 1995
9. I.S.Raju, J.C.Jr Newman, *Stress Intensity Factors for Internal and External Surface Cracks in Cylindrical Vessels*, J. Pressure Vessel Technology, Vol. 104, 1982, pp. 293-298
- 10.A.A.Wells, Application of fracture mechanics at and beyond general welding, *British Welding Journal*, Vol. 10, 1963, pp. 563-570
- 11.F.M.Burdekin, D.E.W.Stone, *The Crack Opening Displacement Approach to Fracture Mechanics in Yielding Materials*, J. Strain Analysis, Vol. 1, 1966, pp. 145-153
- 12.R.P.Harrison, K.Loosemore, I.Milne, *Assessment of the Integrity of Structures Containing Cracks*, Int. J. Pressure Vessels and Piping, Vol. 3, 1975, p.77-137
- 13.D.S.Dugdale, *Yielding in Thin Sheets Containing Slits*, J. Mechanics and Physics of Solids, Vol. 8, 1960, p. 100-104
- 14.PD 6493:1980, *Guidance on Some Methods for the Derivation of Acceptance Levels for Defects in Fusion Welded Joints*, BSI, MArch, 1980
- 15.F.Erdogan, M.Ratwani, "Plasticity and the Crack Opening Displacement in Shells" *Int. J. Fract. Mechs*, Vol. 8, No. 4, 1972
- 16.M.Ratwani, S.Sedmak, B.Petrovski, "Procena preostale čvrstoće sudova pod pritiskom sa površinskim greškama pomoću krive otpornosti" Monografija III Letnje škole mehanike loma, GOŠA-TMF, 1984
- 17.R.B.King "Elastic-plastic Analysis of Surface Flaws Using a Simplified Line-spring Model", *Eng. Fracture Mech.*, 1983, p. 217
- 18.D.T.Rid, "Analiza mehanike loma i krive dopuštenih veličina greški za površinske prsline u cevovodima", Monografija 3. MLŠML, Goša-TMF, 1984, str. 319-338.
- 19.V.Kumar, M.D.German, C.F.Shih, *An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis*, EPRI Report NP-1931, EPRI, Palo Alto, CA, 1981
- 20.A.Sedmak: "Primena metode konačnih elemenata na određivanje parametara LEML", Monografija III Letnje škole mehanike loma, GOŠA-TMF, 1984
- 21.A.Sedmak, V.Ogarević, J.Kovačević: "Primena metode konačnih elemenata na određivanje parametara EPML", Monografija IV Letnje škole mehanike loma, GOŠA-TMF, 1986
- 22.A.Sedmak i ostali, Izveštaj br. 0021-12.03/2000 Mašinskog fakulteta u Beogradu
- 23.T.Adžiev, doktorska teza, Mašinski fakultet Skopje, 1988
- 24.K.Gerić, doktorska teza, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1996
- 25.Izveštaj: Ocena preostale radne sposobnosti i sigurnosti parnog bubnja Incel-Banjaluka primenom krive otpornosti prema razvoju prsline preko J integrala, TMF, 1986