



Tehnološko-metalurški fakultet



Jugoslovenski savez za zavarivanje



Institut GOŠA

**EKSPERIMENTALNE I NUMERIČKE
METODE MEHANIKE LOMA U OCENI
INTEGRITETA KONSTRUKCIJA**

EKSPERIMENTALNE I NUMERIČKE METODE MEHANIKE LOMA U OCENI INTEGRITETA KONSTRUKCIJA

Monografija je sastavljena na osnovu predavanja na
Sedmoj međunarodnoj letnjoj školi mehanike loma
Velika Plana, 23 - 27. juni 1997. godine

Uredili: prof. Stojan Sedmak, prof. Aleksandar Sedmak

Beograd, 2000.

Monografiju sufinansiraju:
Savezni sekretarijat za razvoj i nauku
Ministarstvo za nauku i tehnologiju Republike Srbije

Štampanje monografije finansijski pomogla:
Mrs. Milena Sedmak - Vesic, 1722 Duke University Road, 27701 N.C., U.S.A.

Zajedničko izdanje:
Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd
Institut GOŠA, Smederevska Palanka
Jugoslovenski savez za zavarivanje, Beograd

Urednik:
Prof. dr Šćepan Uščumlić

Recenzenti:
Prof. dr Vitomir Đorđević
Prof. dr Vuk Čulafić

Kompjuterska obrada i priprema teksta:
Mr Zoran Radaković

Prevod:
Prof. dr Stojan Sedmak
Prof. dr Aleksandar Sedmak
Mr Zoran Radaković

Stručna redakcija:
Prof. dr Stojan Sedmak
Prof. dr Aleksandar Sedmak

Tiraž: 450 primeraka

Štampa: Zavod za grafičku tehniku
Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd, Karnegijeva 4

Katalogizacija u publikaciji

539.3/4(082)

MEĐUNARODNA letnja škola mehanike loma (7 ; 1997 ; Velika Plana)

Eksperimentalne i numeričke metode mehanike loma u oceni integriteta konstrukcija : monografija sastavljena na osnovu predavanja na Sedmoj međunarodnoj letnjoj školi mehanike loma, Velika Plana, 24-28. jun 1997. godine / stručna redakcija Stojan Sedmak, Aleksandar Sedmak.

-Beograd : Tehnološko-metalurški fakultet : Jugoslovenski savez za zavarivanje ;
Smederevska Palanka : Institut "Goša", 2000 (Beograd : Zavod za grafičku tehniku).

- 352 str. : ilustr. ; 21 cm

Tiraž 450. - Bibliografija uz svaki rad

YU ISBN 86-7401-143-8

1. Gl. stv. nasl. 2. Sedmak, Stojan 3. Sedmak, Aleksandar

620.1:669(082)

006.44:539.42

a) Mehanika loma - Zbornici b) Metalne konstrukcije - Ispitivanje - Zbornici

"Eksperimentalne i numeričke metode mehanike loma u oceni integriteta konstrukcija"

Upravo je prošlo 20 godina od kako je održana Prva međunarodna letnja škola mehanike loma, 30. juni do 3. juli 1980. Posle održane škole izdata je marta 1981. monografija

1. "Uvod u mehaniku loma i konstruisanje sa sigurnošću od loma".

Dobar prijem i veliki interes su uslovlili održavanje sledećih škola (1982, 1984, 1986, 1989), posle kojih su izdate monografije

2. "Savremeni aspekti projektovanja i izrade sudova pod pritiskom i cevovoda" (1983)

3. "Mehanika loma zavarenih spojeva" (1985)

4. "Perspektive razvoja i primene mehanike loma" (1987)

5. "Procena veka energetskih postrojenja uz primenu mehanike loma" (1991).

Dostignuti nivo škole se može oceniti iz podatka da je posle Pete škole izdata monografija na engleskom jeziku u saradnji sa izdavačem EMAS iz Velike Britanije pod naslovom "The application of fracture mechanics to life estimation of power plant components" (1990). To je prirodna posledica ugleda škole i angažovanih predavača, poznatih svetskih stručnjaka u mehanici loma.

Šesta letnja škola je održana od 24. do 28. juna 1991, baš u vreme kada su započeli nemili događaji na našim prostorima. Od tada, pa sve do današnjih dana traje nesigurnost i neizvesnost u našem društvu, praćeno brojnim ratnim aktivnostima, pa i bombradovanjem. To je i razlog što je sa zakašnjenjem od tri godine izdata monografija

6. "Eksploatacijske prsline u posudama pod pritiskom i rezervoarima" (1994).

Ovaj kratak istorijat rada Letnje škole međunarodne mehanike loma i redosleda izdavanja monografija može da posluži za objašnjenje kratkog prekida u radu škole i zakašnjenja u izdavanju poslednje dve monografije.

Čak i u ovim neizvesnim uslovima za privredu, utemeljivači škole, Tehnološko-metalurški fakultet iz Beograda i Industrija "Goša" iz Smederevske Palanke, su ocenili da postoji potreba da se rad škole produži. Tako je krajem juna 1997. održana Sedma međunarodna škola mehanike loma, a predavanja izložena na toj školi su predmet ove monografije.

Kao i u prethodnim školama, značajan je udeo predavača iz inostranstva, i pored izuzetno nepovoljnih uslova za njihov dolazak. Međutim, ono što meni kao osnivaču škole čini posebno zadovoljstvo je da su domaći predavači pretežno iz srednje i mlađe generacije i da su stasali upravo sa razvojem mehanike loma kod nas. I bilo je vreme da ti mlađi stručnjaci preuzmu dalji razvoj, jer je smena generacija neumitna. Nažalost, ona je pogodila i naš kolektiv predavača Letnje škole. U vreme intenzivnih priprema rukopisa svojih predavanja, preminuo je prof. dr Mladen Berković. Ako se pregleda prvih šest monografija vidi se da je, uz prof. Majkla Vnuka, Mladen jedini učestvovao sa predavanjima u svih sedam škola. *Stoga je ova monografija posvećena prof. dr Mladenu Berkoviću.* Nažalost, nismo uspeli da nađemo rukopis predavanja pok. Mladena Berkovića, pa će ova monografija biti uskraćena za jedno izuzetno dobro predavanje iz numerikih metoda. Ni predavanje dr Dušana Kecmana, zbog prekida u komunikacijama sa Engleskom i njegove iznenadne smrti, nije moglo da bude uvršteno u ovu monografiju. Ovom prilikom izražavam i svoju veliku zahvalnost na njihovom doprinosu u radu škole.

SADRŽAJ

Eksperimentalne i numeričke metode mehanike loma u oceni integriteta konstrukcija

S. Sedmak	
Standardna ispitivanja mehanike loma	1
I. Glavardanov, S. Sedmak	
Epruvete za ispitivanja mehanike loma	21
G. Lenki	
Instrumentirano udarno ispitivanje i njegova primena na dinamičku mehaniku loma	39
V. Grabulov	
Dinamička kriva otpornosti-pregled metoda za određivanje dinamičke krive otpornosti	49
M. Zrilić	
Lokalni pristup - eksperimentalna iskustva	65
Z. Burzić	
Ispitivanje promenljivim opterećenjem glatkih i zarezanih epruveta	75
L. Tot	
Zamorni lom konstrukcija - prošlost, sadašnjost i budućnost	93
B. Dogan, K.H. Švalbe	
Puzanje materijala- deformacija, ispitivanje i primena parametara mehanike loma	119
A. Mazur	
Metode zaštite od korozije u cilju sprečavanja lomova	129
B. Petrovski	
Određivanje žilavosti loma u području prelazne temperature.	143
R. Jovičić	
Ocena eksploatacijske sigurnosti posuda pod pritiskom sa prslinom u zavarenom spoju	157
A. Radović	
Ispitivanja mehanike loma zavarenih spojeva	171
P. Agatonović	
Procena integriteta i veka na osnovu analize podržane eksperimentima	179
Z. Radaković, A. Sedmak	
Direktno merenje J integrala na cilindričnim posudama pod pritiskom	199
J. Gočev, T. Adžiev, A. Sedmak	
Procena integriteta zavarenih konstrukcija ispitivanjem pločastih epruveta na savijanje	213

M. Arsić Procena veka zavarene konstrukcije sa prslinom u uslovima promenljivog opterećenja	223
Z. Cvijović Kvantitativna fraktografija	233
I. Blačić Primena fraktografskih ispitivanja u projektovanju metalnih delova i konstrukcija	253
K. Gerić Merenje konačne zone razvlačenja	271
T. Maneski Dijagnostika ponašanja i popuštanja konstrukcije	279
A. Sedmak, Z. Burzić, V. Aleksić Inženjerske metode proračuna parametara mehanike loma zavarenih spojeva	305
B. Omidvar, M. P. Vnuk Lokalna i globalna nestabilnost kontinualno rastuće prsline u disipativnom čvrstom telu	317
M. P. Vnuk, A. Sedmak, T. Adžiev Uticaj geometrije i zaostalih napona na otpornost zavarenih spojeva na rast prslina	329
P. Matejić Adaptivne mreže konačnih elemenata i njihova primena u analizi koncentracije napona	337
M. Rakin Numerička analiza u lokalnom pristupu	345

INŽENJERSKE METODE PRORAČUNA PARAMETARA MEHANIKE LOMA ZAVARENIH SPOJEVA

A. Sedmak, Z. Burzić, V. Aleksić*

UVOD

Namena ovog rada je analiza različitih inženjerskih metoda proračuna parametara mehanike loma zavarenih spojeva. Kako su površinske i unutrašnje prsline najčešća vrsta grešaka u zavarenim spojevima, to se njima ovde posvećuje posebna pažnja. S druge strane, imajući u vidu heterogenost zavarenih spojeva, odnosno pojavu mismečinga (različite čvrstoće metala šava i osnovnog metala), jasno je da analiza mora da obuhvati elasto-plastične parametre mehanike loma, kao što su otvaranje vrha prsline i J integral. Konačno, ova analiza mora da obuhvati i probleme kao što su zaostali naponi i geometrijske nepravilnosti, koji mogu značajno da utiču na ponašanje zavarenih spojeva.

Inženjerske metode mehanike loma mogu da se podele u dve grupe: prva grupa obuhvata metode, zasnovane na analitičko-numeričkim izrazima (metode proračuna elasto-plastičnih parametara za površinske prsline, Kingova za zategnute ploče i Ratvani-Erdogan-Irvinova (REI) za tanke ljsuske), a druga grupa se odnosi na metode zasnovane na eksperimentalnim rezultatima, kao što je CTOD projektna kriva, JWES 2805 i ETM. Sve navedene metode će biti analizirane u ovom radu sa stanovišta primene na proračun parametara mehanike loma zavarenih spojeva, što prvenstveno obuhvata problem zaostalih napona i/ili geometrijskih nepravilnosti, površinskih prsline i uticaja heterogenosti materijala.

REI METODA

Metoda REI je detaljno opisana u prethodnim letnjim školama, /1/, pa je ovde dat samo kratak opis. Radi se o elastoplastičnoj analizi tankih cilindričnih ljsuski sa aksijalnom prsline, za koje se uvode uprošćenja u cilju formulacije i rešavanja integralnih jednačina problema. Osnovne pretpostavke, uvedene radi uprošćenja problema su:

- oblik prsline je pravougaoni (dubina prsline c je konstantna),
- nema poprečnog smicanja (važe Kirhofove pretpostavke za tanke ljsuske),
- materijal je idealno plastičan (nema ojačavanja).

Na osnovu ovih pretpostavki može da se primeni Dagdejlov model plastične trake ispred vrha prsline. Rešenje ovako definisanog problema je dato kao funkcija otvaranja vrha prsline, δ_t , od koordinata X (u pravcu dužine prsline, $2a$) i Z (u pravcu dubine c):

$$\delta_t(X, Z) = \delta(X, 0) + \theta(X) \cdot Z \quad (1)$$

Prema tome, ako se traži sila rasta prsline (SRP) u pravcu dubine, treba uzeti vrednost $(0, c)$, a ako je u pitanju rast prsline u pravcu njene dužine merodavna je vrednost $(a, 0)$. Pri tome se SRP određuju preko J integrala, na osnovu relacije $J = mR_e$, gde je R_e napon tečenja, a $m = 2/\sqrt{3}$ za idealno plastične materijale. Ovakva analiza je sprovedena u radu /2/, gde su SRP

Dr Aleksandar Sedmak, v. prof., Mašinski fakultet, Beograd;
Dr Zijah Burzić, Vojnotehnički institut VJ, Beograd;
Mr Vujadin Aleksić, GOŠA Institut, Beograd

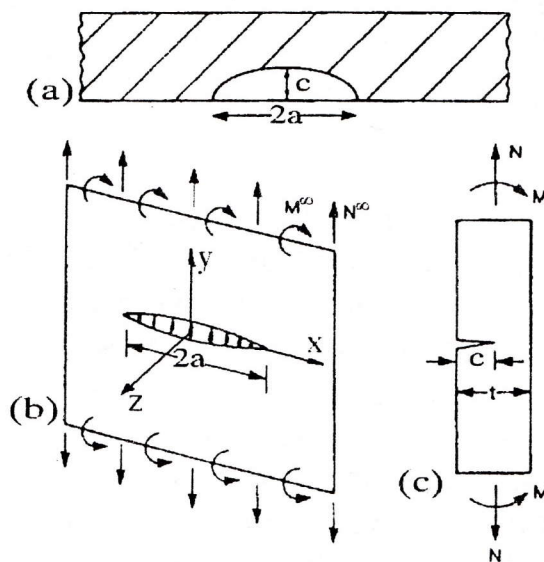
za oba slučaja (rast u dubinu i dužinu) izračunate i upoređene sa odgovarajućom J-R krivom. Osnovna prednost REI modela je njegova jednostavna primena, jer su svi podaci potrebni za proračun dati u bezdimenzionom obliku za karakteristične veličine parametra ljuske, definisanog u obliku:

$$\lambda = \sqrt[4]{12(1-\nu^2)} \frac{2a}{\sqrt{Rt}} \quad (2)$$

gde je R poluprečnik ljuske, t debljina, a ν Poasonov koeficijent. Treba uočiti da vrednost $\lambda=0$ odgovara ravnoj ploči ($R \rightarrow \infty$). Model REI može da se primeni na bilo koju aksijalnu prslinu u cilindričnoj posudi pod pritiskom (prolaznu, površinsku - spoljnu ili unutrašnju, i delimično prolaznu unutrašnju). Ostale geometrijske konfiguracije, kao i zaostali naponi i geometrijske nepravilnosti nisu obuhvaćeni ovim modelom.

KINGOVA METODA

Osnovna ideja Kingove metode je da se 3D problem reši kombinacijom 2D problema (ravnog stanja napona i deformacije). Naime, da je prslina prolazna (po celoj debljini) problem bi bio 2D (ravno stanje napona - RSN), a da je dužina površinske prsline jednaka širini ploče, problem bi se sveo na ravno stanje deformacije - RSD. S obzirom da je površinska prslina između ove dve krajnosti, odgovarajuće rešenje se može dobiti kombinacijom ovih 2D rešenja, pri čemu rešenje problema RSN mora da uzme u obzir lokalne membranske sile N i momente M , zbog postojanja preostalog ligamenta dužine $t - c$, sl. 1.



Slika 1. Kingov model površinske prsline

Kingov model je ustvari model niza opruga, jer se njegova postavka zasniva na nizu opruga koje uprošćeno zamenjuju uticaj preostalog ligamenta, sl. 1. Iako je Kingov model ranije opisan /3, 4/, neki osnovni izrazi dati su i ovde, da bi se ukazalo na probleme u primeni i da bi se razjasnile nedoumice u vezi sa veličinom plastične zone.

Osnovne pretpostavke (uprošćenja) Kingovog modela niza opruga su:

- površinska prslina se nalazi u beskonačnoj ravnoj zategnutoj ploči,
- front prsline je pravougaoni, sa konstantnom dubinom prsline, $c = const$,
- opruga je elastična i idealno plastična,
- plastičnost oko vrha prolazne prsline je uzeta u obzir Dagdejlovim modelom.

Prema tome, označavajući sa σ udaljeni napon, sa $\sigma_c = N/t$ membransko opterećenje i sa $m = M/(t^2/6)$ savojno opterećenje, može da se napiše

$$\sigma_c = \frac{2}{1-\nu^2} \frac{a}{hD} \left[C_{22} + \frac{2}{3(1-\nu)(3+\nu)} \frac{a}{h} \right] \sigma = \alpha \sigma \quad (3)$$

$$m = -\frac{2}{1-\nu^2} \frac{a}{hD} C_{12} \sigma = -\beta \sigma \quad (4)$$

$$D = \left(C_{11} + \frac{2}{1-\nu^2} \frac{a}{h} \right) \left[C_{22} + \frac{2}{3(1+\nu)(3+\nu)} \frac{a}{h} \right] - C_{12}^2 \quad (5)$$

gde su C_{11} , C_{12} i C_{22} koeficijenti koji se dobijaju rešavanjem elastičnog problema ploče sa ivičnom prslinom pri RSD. Ovi koeficijenti su u originalnom radu /3/ dati za vrednosti dubine prsline $c/t \leq 0,8$, ali je prema uskustvu iz ovog rada njihova tačnost ograničena na $c/t \leq 0,6$.

Kao kriterijum tečenja u Kingovom modelu se koristi jednostavan izraz, za koji je pokazano dobro slaganje sa eksperimentalnim podacima /4/:

$$\sigma_c = \frac{h-c}{h} \sigma_F \quad (6)$$

gde je σ_F napon ojačavanja, definisan kao poluzbir napona tečenja i zatezne čvrstoće. Iz izraza (6) sledi izraz za napon pri kome nastaje tečenje ligamenta, σ_{LY}

$$\sigma_{LY} = \frac{1}{\alpha} \left(1 - \frac{c}{h} \right) \sigma_F \quad (7)$$

Posle tečenja, plastičnost ispred vrha prolazne prsline uzima se u obzir korišćenjem "efektivne" dužine prsline, $l_{ef} = l + 4r_y$, gde je l dužina prsline ($l = 2a$), a r_y predstavlja poluprečnik plastične zone, koji se definiše kao polovina dužine trake tečenja, /3/:

$$r_y = (a_p - a) / 2 \quad (8)$$

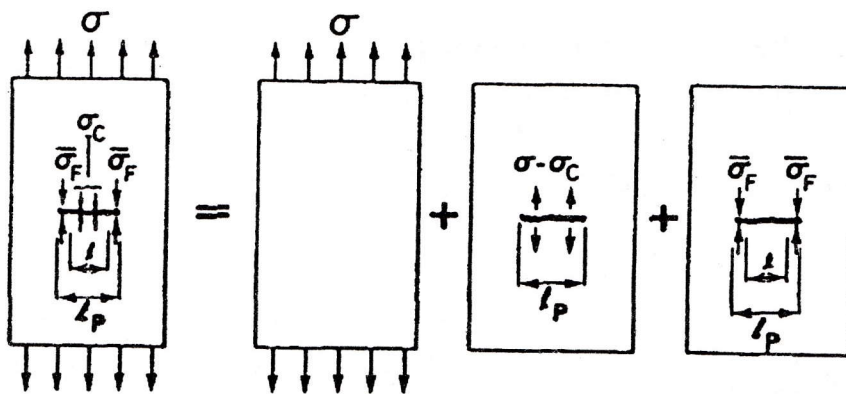
Ovde je važno napomenuti da se u izrazima za parametre elasto-plastične mehanike loma, kao što su CTOD i J integral, koristi efektivna dužina prsline, l_{ef} , u skladu sa Irvinovim modelom plastičnosti ispred vrha prsline, a da se poluprečnik plastične zone, r_y , određuje na osnovu veličine l_p , koja obuhvata dužinu prsline i dužine traka tečenja, sa obe strane prsline, sl. 2. Usvajanje polovine dužine trake tečenja za veličinu poluprečnika plastične zone je iskustveno i može da se smatra parametrom Kingovog modela. U skladu s tim, u ovom radu, kao i u radu /5/, r_y je varirano od vrednosti definisane izrazom (8) do vrednosti jednake dužini trake tečenja, $r_y = a_p - a$.

Primenom Dagdejlovog modela traka tečenja, sl. 2, dobija se

$$\sin \frac{\pi a_p}{w} = \frac{\sin \frac{\pi a}{w}}{\cos \frac{\pi}{2} \frac{\sigma - \sigma_c}{\sigma_F - \sigma_c}} = \frac{\sin \frac{\pi a}{w}}{\cos \frac{\pi}{2} \left[\frac{h}{c} \frac{\sigma}{\sigma_F} - \left(\frac{h}{c} - 1 \right) \right]} \quad (9)$$

gde je w širina ploče. Ploča može da izdrži opterećenje sve dok trake tečenja ne dođu do njenih ivica, što je definisano naponom tečenja neto preseka, σ_{NSY} , koji se dobija ako se u jed. (9) zameni $a_p = w/2$:

$$\sigma_{NSY} = \sigma_F \left(1 - \frac{2a}{w} \frac{c}{h} \right) \quad (10)$$



Slika 2. Rešenje traka tečenja za ploču konačne širine

Ovde treba uočiti da Kingov model važi za ploče konačne širine. Ipak, ako se uzme da $w \rightarrow \infty$, $\sin(\pi a_p/w) \approx \pi a_p/w$ i $\sin(\pi a/w) \rightarrow \pi a/w$ dobija se približno rešenje problema beskonačne ploče:

$$a_p = \frac{a}{\cos \frac{\pi}{2} \left[\frac{h}{2} \frac{\sigma}{\sigma_F} - \left(\frac{h}{c} - 1 \right) \right]} \quad \text{i} \quad \sigma_{NSY} \equiv \sigma_F \quad (11)$$

koje može da se primeni na tanke ljuske sa malom krivinom. Osim toga, za tanke cilindrične cevi sa obimskom prslinom, opterećene na savijanje, mogu da se primene modifikovani izrazi Kingovog modela, dati u radu /6/.

Na osnovu navedenih izraza i geometrijskih relacija, objašnjenih detaljnije u /3/, mogu da se dobiju sledeći izrazi za elastične i plastične komponente parametara mehanike loma:

$$CTOD = \frac{4a\sigma}{E} \left[1 + \left(\frac{2(1+\nu)}{3+\nu} \frac{h-2C}{h} \beta - \alpha \right) \right] \quad (\sigma \leq \sigma_{LY}) \quad (12)$$

$$CMOD = \frac{4a\sigma}{E} \left[1 + \left(\frac{2(1+\nu)}{3+\nu} \beta - \alpha \right) \right] \quad (\sigma \leq \sigma_{LY}) \quad (13)$$

odnosno ($\sigma_{LY} < \sigma < \sigma_{NSY}$)

$$CTOD = \frac{4(a+r_y)}{E} (\sigma - \sigma_{LY}) + CTOD_{LY} \left(\frac{a+r_y}{a} \right) \quad (14)$$

$$CMOD = \frac{4(a+r_y)}{E} (\sigma - \sigma_{LY}) + CMOD_{LY} \cdot \left(\frac{a+r_y}{a} \right) \quad (15)$$

Za izračunavanje J , ($<LY$) mogu da se koriste relacije LEMML:

$$J_c = \frac{1-\nu^2}{E} K_I^2 = \frac{1-\nu^2}{E} h (\sigma_c F_1 + m F_2)^2 \quad (16)$$

gde su F_1 i F_2 faktori intenziteta napona, definisani u /3/ kao polinomi po bezdimenzionoj koordinati (dubina prsline/debljina ploče). Za $\sigma_{LY} < \sigma < \sigma_{NSY}$, J_p se izračunava preko pomeranja napadne tačke opterećenja na ivici prsline

$$J_p = - \int_{\delta_{LY}}^{\delta} \frac{\partial N}{\partial c} d\delta - \int_{\theta_{LY}}^{\theta} \frac{\partial M}{\partial c} d\theta \quad (17)$$

gde za $\partial N / \partial c = -\sigma_F$, $\partial M / \partial c = 0 \Rightarrow$

$$J_p = \sigma_F(\delta - \delta_{LY}) = \frac{4\sigma_F}{E} \left[(a + r_y)\sigma - a\sigma_{LY} - \frac{h-c}{h}r_y\sigma_F \right] \quad (18)$$

Treba uočiti da se elastične komponente parametara mehanike loma određuju različitim pristupima (CMOD i CTOD geometrijski, što je vrlo problematično, posebno u oblasti elastičnosti, a J preko K). Stoga ne iznenađuje dobro ponašanje i slaganje parametara mehanike loma u plastičnoj oblasti, i ponekad "čudno" ponašanje CTOD u elastičnoj oblasti.

Konačno, problem u primeni Kingove metode je i činjenica da napon tečenja ligamenta, definisan izrazom (7), za vrednosti c/h bliske vrednosti 0,8 (koju je kao graničnu usvojio King /3/) počinje da raste (umesto da opada) i postaje veći od napona tečenja neto preseka, koji je definisan izrazom (10), što je fizički nemoguće. Stoga je u ovom radu za napon tečenja ligamenta usvojen izraz

$$\sigma_{LY} = \frac{h-c}{h} \sigma_F \quad (7a)$$

koji je očigledno fizički logičan i takođe najjednostavniji. Primeri koji su analizirani u ovom radu su pokazali opravdanost uvođenja ovog izraza.

CTOD PROJEKTNA KRIVA

CTOD projektna kriva (ugađena u dokument BSI PD6493) je zasnovana na iskustvenim izrazima koji povezuju vrednost CTOD (δ) sa udaljenom deformacijom (kao merom opterećenja) u elastičnoj i plastičnoj oblasti:

$$\delta = \varepsilon_Y \cdot \tilde{a} \cdot (2\pi) \cdot (\varepsilon/\varepsilon_Y)^2 \quad \text{za } \varepsilon/\varepsilon_Y \leq 0,5 \quad (19a)$$

$$\delta = \varepsilon_Y \cdot \tilde{a} \cdot (2\pi) \cdot (\varepsilon/\varepsilon_Y - 0,25) \quad \text{za } \varepsilon/\varepsilon_Y > 0,5 \quad (19b)$$

gde ε označava udaljenu deformaciju, ε_Y deformaciju tečenja, a \tilde{a} tzv. ekvivalentnu dužinu prsline. Udaljena deformacija može da obuhvata i zaostali napon σ_r , u kom slučaju se određuje na osnovu izraza:

$$\varepsilon = (\sigma + \sigma_r)/E \quad (20)$$

gde je σ udaljeni napon. Osim toga, udaljena deformacija može da obuhvati i koncentraciju napona, ako se zna faktor koncentracije napona, K_t :

$$\varepsilon = K_t \cdot \sigma/E \quad (21)$$

Ekvivalentna dužina prsline \tilde{a} se određuje na osnovu zahteva da faktor intenziteta napona za površinsku ili unutrašnju prslinu (koja se analizira) bude jednak faktoru intenziteta napona za prolaznu prslinu ekvivalentne dužine. Na osnovu tog zahteva napravljeni su dijagrami za određivanje \tilde{a} , koji su sastavni delovi dokumenata, kao što je BSI PD6493. Ovaj dokument nije predmet analize u ovom radu, jer se njime definišu kritična stanja, a ne sila rasta prsline. Primena dokumenta BSI PD6493 je prikazana u radovima /7, 8/, i to u prvom slučaju, /7/, upravo na primeru koji se analizira u ovom radu.

JWES2805 /9/

Osnovni principi proračuna u proceduri JWES2805 su isti kao u prethodnom slučaju i svode se na primenu iskustvenih izraza za proračun CTOD u elastičnoj i plastičnoj oblasti, određivanje ekvivalentne dužine prsline i mogućnost analize zaostalih napona i koncentracije napona. Algoritam i detaljniji prikaz procedure JWES2805 je dat u /10/, a jedina bitnija razlika u odnosu na CTOD projektну krivu su primena teorije verovatnoće kojom se uzi-

maju u obzir nesigurnosti u proceni svojstava materijala i odgovarajućih parametara mehanike loma. Treba naglasiti da su jednačine koje se koriste za proračun CTOD kvantitativno različite od jednačina (19), i da daju znatno manje vrednosti za CTOD:

$$\delta = \varepsilon_Y \cdot \bar{a} \cdot (\pi/2) \cdot (\varepsilon/\varepsilon_Y)^2 \text{ za } \varepsilon/\varepsilon_Y \leq 1 \quad (22a)$$

$$\delta = \varepsilon_Y \cdot \bar{a} \cdot (\pi/8) \cdot (9\varepsilon/\varepsilon_Y - 5) \text{ za } \varepsilon/\varepsilon_Y > 1 \quad (22b)$$

Pri tome je interesantno primetiti da faktor 2 u jed. (19) nije posledica iskustvenog prilaza problemu, već nesigurnosti u određivanju veličine greške metodama ispitivanja bez razaranja. Međutim, i ako se ovaj faktor ne uzme u obzir, ostaje značajna kvantitativna razlika između jed. (19) i (22). Osim toga, treba uočiti da je granična vrednost za $\varepsilon/\varepsilon_Y$ između izraza (a) i (b) različita - u jed. (19) to je 0,5 a u jed. (22) granica je 1.

Ovde će biti detaljnije prikazan način određivanja udaljene deformacije usled koncentracije napona, jer je to od interesa za primer koji će biti analiziran. Osnovni izrazi, kojima se koncentracija napona uzima u obzir, dati su u radu /10/, dok su ovde prikazane jednačine za određivanje faktora koncentracija napona K_t za dva najčešća slučaja kod sučeonih zavarenih spojeva, nadvišenje šava (sl. 3a) i ugaono zakretanje zavarenih ploča (sl. 3b):

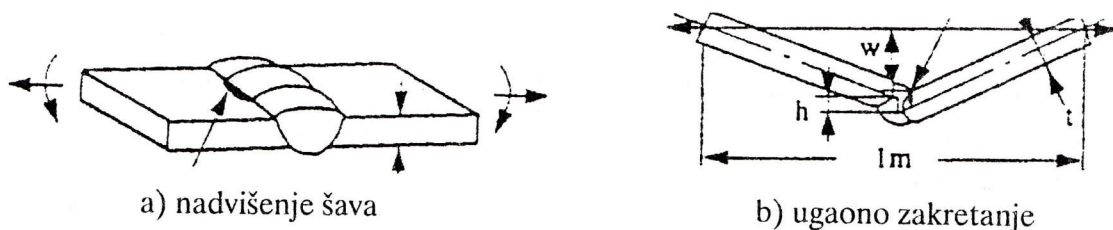
$$K_t = 1,5 \text{ za } c \leq 0,15 \cdot t \quad (23a)$$

$$K_t = 1 \text{ za } c > 0,15 \cdot t \text{ (nadvišenje šava, sl. 3a)} \quad (23b)$$

$$K_t = 1 + 3(w+h)/t \text{ za } c \leq 0,5 \cdot t \quad (24a)$$

$$K_t = 1 + 3(w+h)/2t \text{ za } c > 0,5 \cdot t \text{ (ugaono zakretanje, sl. 3b)} \quad (24b)$$

gde je c dubina površinske prsline. Ostali slučajevi koncentracije napona za površinsku, unutrašnju i prolaznu prslinu, uključujući ugaone zavarene spojeve, dati su u /9/.



Slika 3. Koncentracija napona u sučeonim spojevima

EFAM ETM-MM96 /11/

Model inženjerskog pristupa (Engineering treatment model - ETM) je jedan od novijih inženjerskih proračuna, koji se takođe zasniva na primeni izraza za određivanje CTOD. Ova procedura je razvijena u GKSS poslednjih godina /11-14/, i predstavlja deo metodologije određivanja značaja grešaka tipa prsline u zavarenim spojevima (EFAM) /12/. Procedura ETM-MM96 je specijalizovana za zavarene spojeve sa izraženim mismеčingom (većim od 10%), što je čini jedinstvenom u odnosu na ostale prikazane metode određivanja sila rasta prsline. Dve varijante zavarenih spojeva, koje su obuhvaćene ovom analizom (od ukupno tri) odnose se na središnju prslinu u metalu šava (sl. 4.a) i prslinu na granici metal šava - osnovni metal (sl. 4.b).

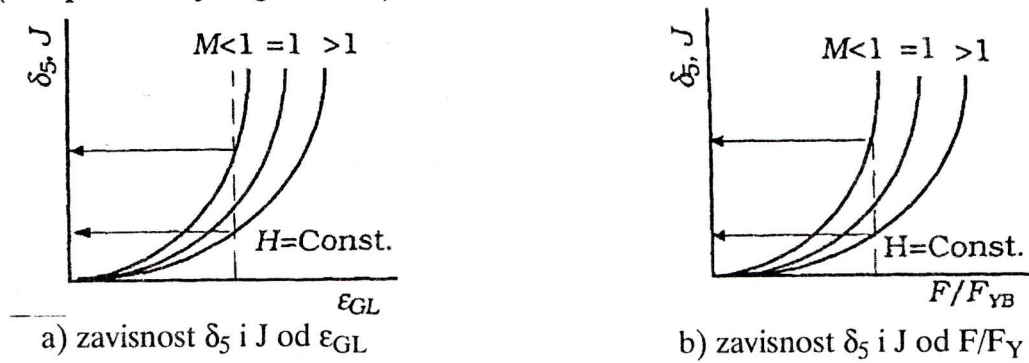
Mismеčing je definisan na osnovu količnika napona tečenja metala šava i osnovnog metala kao andermečing (u slučaju manjeg napona tečenja metala šava):

$$R_{eh}(M\check{S})/R_{eh}(OM) < 1 \quad (25a)$$

odnosno kao overmečing (u slučaju manjeg napona tečenja osnovnog metala)

$$R_{eh}(M\check{S})/R_{eh}(OM) > 1 \quad (25b)$$

Uticaj mismečinga je šematski prikazan na sl. 5, gde su date zavisnosti sile rasta prsline, izražene preko δ_5 ili J integrala, od globalne deformacije ϵ_{GL} (sl. 5a), odnosno količnika sile F i F_Y (sila pri tečenju ligamenta), sl. 5b.



Slika 5. Uticaj mismečinga na parametre mehanike loma

Za razliku od prethodno navedenih metoda proračuna, ETM uzima u obzir ojačavanje materijala u oblasti plastičnih deformacija relacijom tipa Ramberg-Osgud:

$$\sigma/\sigma_{YB} = (\epsilon/\epsilon_{YB})^{N_B} \quad (26a)$$

$$\sigma/\sigma_{YW} = (\epsilon/\epsilon_{YW})^{N_W} \quad (26b)$$

gde su σ_{YB} i σ_{YW} naponi tečenja osnovnog metala i metala šava, ϵ_{YB} i ϵ_{YW} odgovarajuće deformacije, a određivanje koeficijenata N_B i N_W je prikazano u /11/.

ETM ima četiri nivoa primene: nivo isključivanja, nivo posmatranja, osnovno rešenje i opšte rešenje. Ovi nivoi se primenjuju u zavisnosti od problema koji se rešava i potrebnog stepena tačnosti.

Nivo isključivanja (EL - Exclusion Level) ne uzima u obzir uticaj mismečinga na silu rasta prsline, pa se oslanja na EFAM ETM97 /13/, koji se primenjuje za homogene materijale i koristi svojstva osnovnog metala. Pri tome prsline i ligament treba da budu znatno veći od debljine zavarenog spoja.

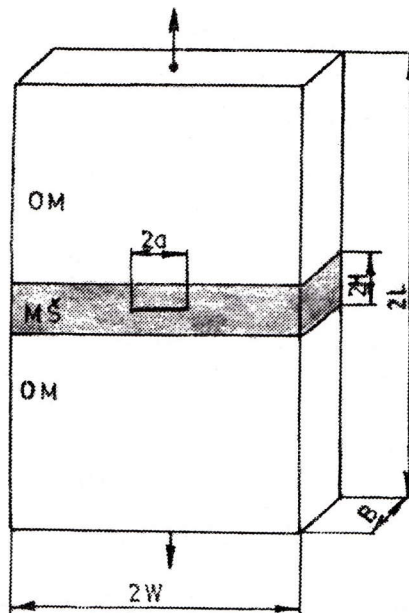
Nivo posmatranja (SL - Screening Level) je konzervativni pristup, koji se primenjuje za sve slučajeve koji ne mogu da se svedu na EL, takođe koristi EFAM ETM97, ali sa nižim od dva napona tečenja (R_{eh} za MŠ i OM) i manjim od dva koeficijenta ojačavanja (N_B i N_W). Ako konzervativni pristup u SL ne daje zadovoljavajuće rezultate, prelazi se na osnovno ili opšte rešenje.

Osnovno rešenje (BL - Baseline solution) je izvedeno na osnovu svojstava čistog metala šava, a sila rasta prsline (δ_5) je izražena u funkciji opterećenja ili udaljene deformacije, i data u obliku dijagrama. Oblast primene su kratke prsline, odnosno postoje ograničenja u primeni u vezi sa dužinom prsline, zavisno od vrste mismečinga.

Opšte rešenje (GL - General Solution) uzima u obzir geometriju, pa stoga zahteva približne zavisnosti opterećenja pri tečenju od geometrijskih parametara, kao npr. a/W , a/H , $(W-a)/H$ i B/H , sl. 6.

Detaljni prikaz svih jednačina, koje se koriste za određivanje parametara mehanike loma u okviru navedenih nivoa, dat je u EFAM ETM-MM 96 /11/, a ovde su dati samo osnovni izrazi za CTOD i J u okviru EL nivoa, za kratke prsline ($a < 0,15 \cdot W$), u oblasti pune plastičnosti (tečenje neto preseka):

$$\delta_5 = 1,5\pi a \cdot \epsilon_{aB} \quad (27)$$



Slika 6. Definicija geometrijskih parametara

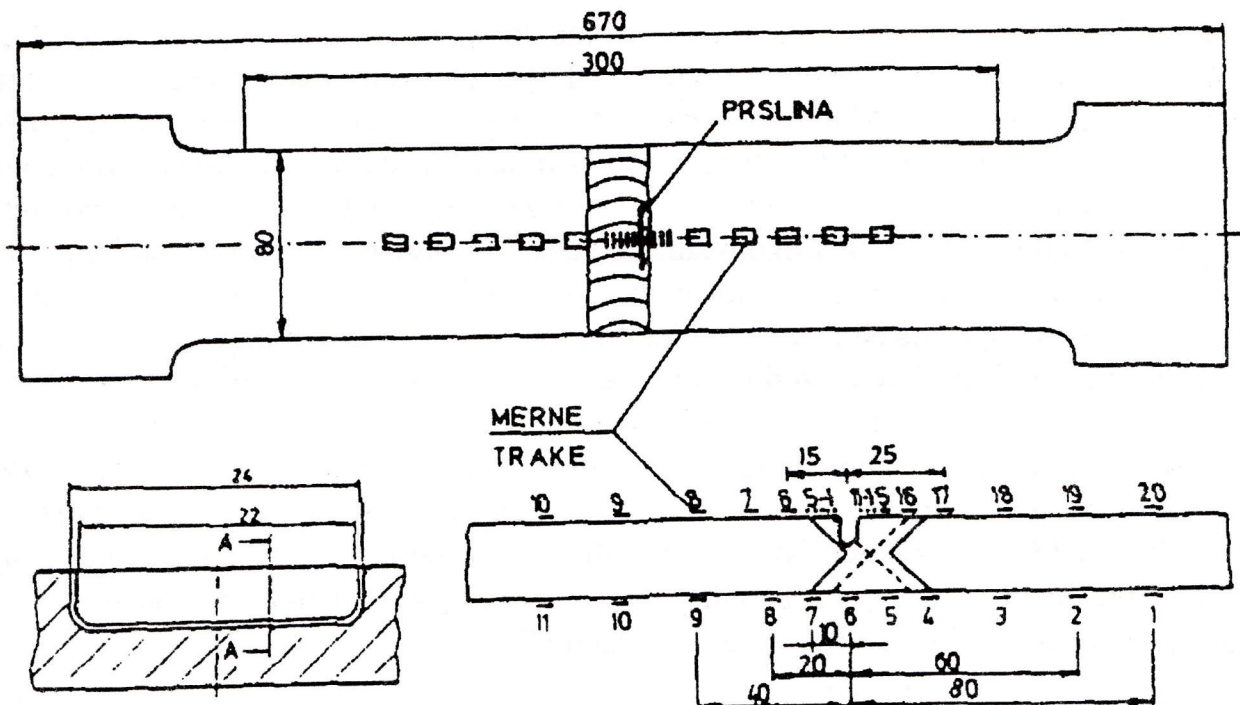
$$J = 1,5\pi a \cdot \sigma_{YB} \varepsilon_{aB} (E \varepsilon_{aB} / \sigma_{YB})^{N_B} \quad (28)$$

gde je ε_{aB} tzv. primenjena deformacija, odnosno mera opterećenja u osnovnom metalu. U izrazima (27-28) dužina prsline može da se zameni ekvivalentnom dužinom prsline, ako se analizira površinska prslina, na isti način kao kod CTOD i JWES procedure. Za razliku od odgovarajućih izraza (19) i (22), izrazi (27-28) nisu samo iskustvenog porekla, već su izvedeni preko osnovnih izraza elasto-plastične mehanike loma.

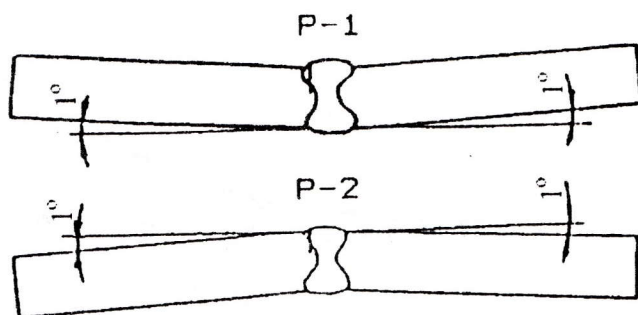
PRIMERI

Za ilustraciju i uporednu analizu nekih od opisanih postupaka određivanja parametara mehanike loma zavarenih spojeva sa površinskom prslinom odabrane su četiri ploče od mikrolegiranog čelika T.StE460 sa prslinom u zavarenom spoju (vrh prsline u ZUT, sl. 7), od kojih su dve termički obrađene posle zavarivanja (P1 i P2), a dve nisu (P3 i P4). Osim toga, kod sve četiri ploče su uočene geometrijske nepravilnosti tako što su ploče P1 i P3 zaokrenute nagore (vrh prsline usmeren prema konveksnoj strani), a ploče P2 i P4 nadole (vrh prsline usmeren prema konkavnoj strani), u oba slučaja za po 1° , sl. 8. Imajući u vidu uticaj zaostalih napona i geometrijskih nepravilnosti na parametre mehanike loma, može da se zaključi da je najpovoljnija situacija kod ploče P2, a najnepovoljnija kod P3. Eksperimentalni rezultati, dobijeni direktnim merenjem J integrala, su prikazani u radu /15/ u obliku dijagrama $J-\sigma$, $CMOD-\sigma$ i $CMOD-\varepsilon$, a ovde se koriste samo rezultati koji su potrebni za poređenje sa rezultatima iz ovog rada.

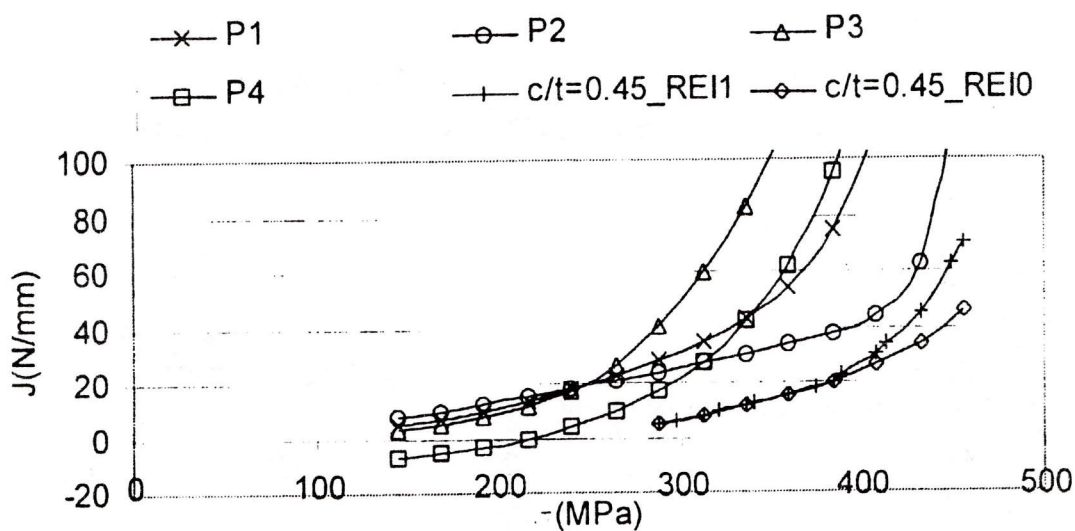
Poređenje eksperimentalnih rezultata i rezultata dobijenih REI metodom je dato na sl. 9, gde je prikazana zavisnost J integrala od napona. Rezultati dobijeni REI metodom su dati u dve varijante - jedna dobijena originalnom procedurom, a druga dobijena modifikovanom varijantom, u kojoj je uslov tečenja zamenjen uslovom koji se koristi u Kingovom modelu /16/. Imajući u vidu nemogućnost ugradnje zaostalih napona i geometrijskih nepravilnosti u REI metodu, jasno je da se najbolje slaganje rezultata moglo očekivati u odnosu na ploču P2, što se sa sl. 9 i vidi. Takođe je očigledno da modifikovana varijanta REI modela daje bolje slaganje od originalne procedure.



Slika 7. Ploče sa prslinom u ZUT



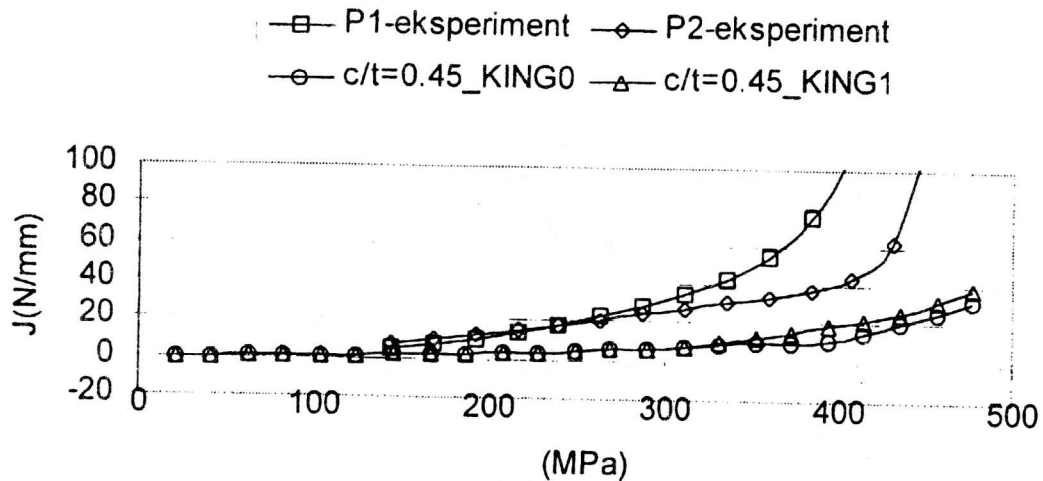
Slika 8. Geometrijske nepravilnosti



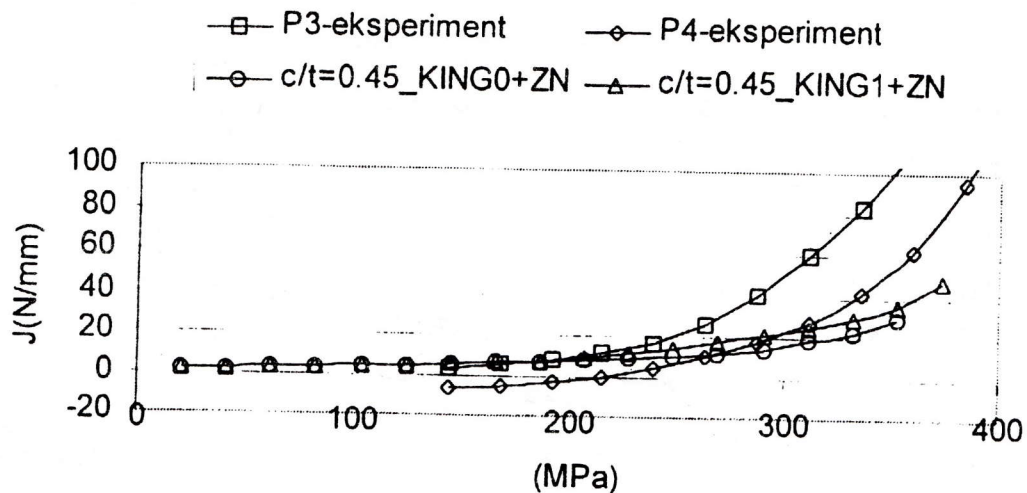
Slika 9. Poređenje eksperimentalnih rezultata i rezultata dobijenih REI metodom

Poređenje eksperimentalnih rezultata i rezultata dobijenih Kingovom metodom je dato na isti način, sl. 10 (bez uticaja zaostalih napona) i sl. 11 (sa uticajem zaostalih napona), a rezultati dobijeni Kingovom metodom su takođe dati u dve varijante - primenom originalne i modifikovane procedure. Očigledno je da modifikovana procedura daje bolje rezultate i da je slaganje rezultata mnogo bolje kada se porede ploče sa zaostalim naponima, ali su odstupanja od eksperimentalnih rezultata u svakom slučaju velika. Odstupanja u odnosu na eksperiment mogu samo delimično da se objasne uticajem geometrijskih nepravilnosti, koje nisu uzete u obzir. Treba napomenuti da su rezultati prikazani na sl. 10 i sl. 11 dobijeni preko jed. 8, a da se bolje slaganje sa eksperimentom dobija preko relacije koja za radijus plastične zone uzima veću vrednost, npr. $r_y = a_p - a$, kao što je pokazano u radu /16/.

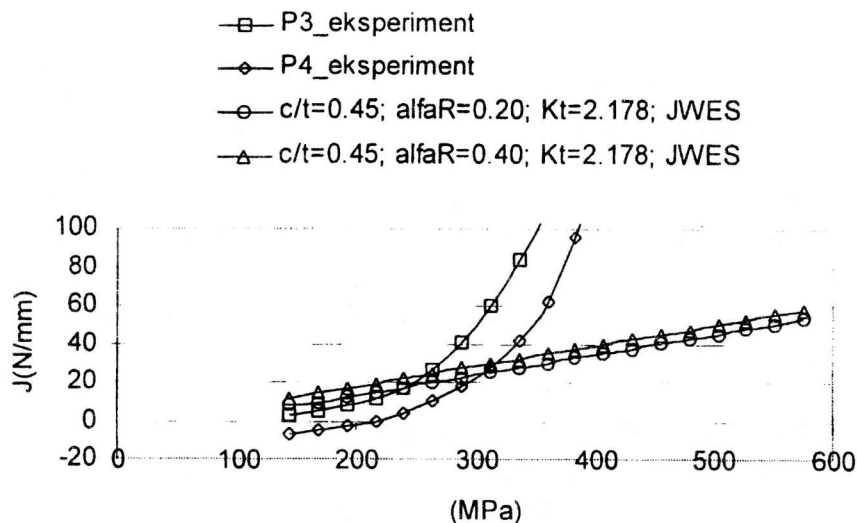
Poređenje rezultata dobijenih eksperimentalno i iskustvenim jednačinama prema JWES 2805 je dato na sl. 12, pri čemu su uzeti u obzir i zaostali naponi (u dve varijante - kao $0,4 \cdot R_{eh}$ i kao $0,2 \cdot R_{eh}$) i geometrijske neoppravilnosti. Slaganje rezultata je znatno bolje u elastičnom području nego u plastičnom, gde linearna zavisnost J integrala od napona očigledno ne odgovara realnom ponašanju ploče sa prslinom.



Slika 10. Poređenje eksperimentalnih rezultata i rezultata dobijenih Kingovom metodom - bez uticaja zaostalih napona



Slika 11. Poređenje eksperimentalnih rezultata i rezultata dobijenih Kingovom metodom - uticaj zaostalih napona uzet u obzir



Slika 12. Poređenje eksperimentalnih rezultata i rezultata dobijenih JWES metodom

UPOREDNA ANALIZA METODA I ZAKLJUČAK

Na osnovu teorijskih razmatranja i primene inženjerskih metoda, analiziranih u ovom radu, moguć je tabelarni prikaz osnovnih karakteristika navedenih metoda, tab. 1.

Tabela 1. Usporedni prikaz osnovnih karakteristika inženjerskih metoda

Karakteristika	King	REI	CTOD	JWES	ETM
Zaostali napon /geometrija	da	ne	da	da	da
Površinske prsline	da	da	ekvivalentno	ekvivalentno	ekvivalentno
Heterogenost (mismečing)	ne	ne	ne	ne	da
Ojačanje materijala	delimično	delimično	delimično	ne	da
Ploče/ljuske	ploče	ljuske	ploče	ploče	ploče

Delimično, preko koeficijenta m , bez ROR

Ekvivalentno, svodenjem na prolaznu prslinu

Analiza rezultata proračuna parametara mehanike loma različitim metodama i njihovo poređenje sa eksperimentalnim rezultatima ukazuje na nekoliko činjenica:

- Neke metode daju relativno dobro slaganje sa eksperimentalnim rezultatima u oblasti elastičnosti (JWES), ali u celini gledano odstupanja u elastičnom području su velika.
- U oblasti plastičnih deformacija odstupanja su takođe značajna, verovatno zbog rasta prsline, koji nije simuliran inženjerskim metodama. Odstupanja su mnogo veća kod metoda zasnovanih na iskustvenim formulama, dok se kod Kingove i REI metode rezultati modifikovanih varijanti značajno približavaju eksperimentalnim rezultatima.
- Ugradnja zaostalih napona i geometrijskih nepravilnosti približava rezultate inženjerskih metoda eksperimentalnim rezultatima, ali je rast prsline prepreka još boljem slaganju. Naime odstupanja rezultata inženjerskih metoda u odnosu na eksperimentalne očigledno raste sa povećanjem plastične deformacije, što odgovara početku rasta prsline, koji u inženjerskim metodama nije simuliran.
- Odstupanja rezultata inženjerskih metoda u odnosu na eksperimentalne rezultate mogu delimično da se objasne i nepravilnostima kod eksperimenta, odnosno uticaju položaja vrha prsline, za koji nije uvek moglo da se pouzdano utvrdi gde se nalazio.

Literatura

1. M.M. Ratvani, S. Sedmak i B. Petrovski, Procena preostale čvrstoće sudova pod pritiskom sa površinskim greškama, Monografija 2. MLŠML, Goša-TMF, 1982, str. 131-162.
2. A. Sedmak, S. Sedmak, Z. Jokanović, Numerical analysis of crack behaviour in the full-scale pressure vessel test, Proc. 5th Int. Conf. NMFPM, Pineridge Press, Freiburg, 1990, p. 611-618.
3. R.B. King, Elastic-plastic analysis of surface flaws using a simplified line-spring model, Eng. Fract. Mech. 18, 1983, 217-231.
4. D.T. Rid, Analiza mehanike loma i krive dopuštenih veličina greški za površinske prsline u cevovima, Monografija 3. MLŠML, Goša-TMF, 1984, str. 319-338.
5. V. Kosta, Određivanje sila rasta prsline zavarene konstrukcije primenom Kingovog i Ratvanijevog modela, magistarski rad, Mašinski fakultet, Beograd, 1997.
6. R.B. King, Y.W. Cheng, D.T. Read, J-integral analysis of surface flaws in pipeline steel plates, 2nd Int. Symp. Elastic-Plastic Fracture Mechanics, Philadelphia, 1981.
7. T. Adžiev, Zaostali naponi od zavarivanja - uticaj na ponašanje posuda pod pritiskom sa prslinom, Monografija 6. MLŠML, Goša-TMF, 1994, str. 127-148.
8. M. Vnuk, Projektovanje posuda pod pritiskom prijemnom dozvoljenog oštećenja na osnovu nelinearne mehanike loma, Monografija 6. MLŠML, Goša-TMF, 1994, str. 170-191.
9. Japanese Welding Engineering Society Standard WES2805: Method of assessment for defects in fusion welded joints with respect to brittle fracture, 1983
10. M. Vnuk, A. Sedmak, Uticaj geometrije i zaostalih napona na otpornost zavarenih spojeva na rast prsline, Monografija 7. MLŠML, Goša-TMF, 2000.
11. K.-H. Schwalbe et al, EFAM ETM-MM96 - The ETM Method for assessing the significance of crack-like defects in joints with mechanical heterogeneity, GKSS report 97/E/9, Geesthacht, Germany, 1997.
12. K.-H. Schwalbe, EFAM93-2: Engineering Flaw Assessment Method, Internal GKSS report, Geesthacht, Germany, 1993.
13. K.-H. Schwalbe et al, EFAM ETM97 - The ETM Method for assessing the significance of crack-like defects in engineering structures, GKSS report, Geesthacht, Germany, 1997.
14. K.-H. Schwalbe, The CTOD and J integral under strain control and fully plastic conditions estimated by the engineering treatment model for plane stress tension, ASTM STP 1207, p. 636-651, 1994.
15. T. Adžiev, Zaostali naponi od zavarivanja - uticaj na ponašanje posuda pod pritiskom sa prslinom, Monografija 6. MLŠML, Goša-TMF, 1994, str. 127-148.
16. V. Aleksić, magistarski rad, Mašinski fakultet, Beograd, 1999.