



A. Sedmak, S. Sedmak

PROCENA INTEGRITETA ZAVARENIH SPOJEVA PRIMENOM INŽENJERSKIH METODA***WELDMENT STRUCTURAL INTEGRITY EVALUATION BY USING ENGINEERING METHODS****Pregledni rad / Review****UDK/UDC:** 621.791.052:624.014.2.078.45:539.42**Rad primljen / Paper received:** 20.09.2001**Ključne reči:****integritet konstrukcija, zavareni spoj, dijagram analize loma, mehanika loma****Izvod**

U radu je prikazana primena nekih inženjerskih metoda za procenu integriteta zavarenih spojeva. Razmatrana je, kao najopštija, procedura PD6493, sa posebnim osvrtom na mogućnost primene na zavarene spojeve, i procedure JWE2805 i GKSS ETM, koje su razvijene specijalno za zavarene spojeve. Prikazan je primer analize integriteta zavarenih spojeva u posudama pod pritiskom, u kojima su ispitivanjem bez razaranja otkrivena greške tipa prslina.

Adresa autora / Author's address:

Prof.dr Aleksandar Sedmak
Mašinski fakultet, 27 Marta 80, Beograd
Prof.dr Stojan Sedmak
Tehnološko-metalurški fakultet, Karnegijeva 4, Beograd

Keywords:**Structural integrity, Weldment, Failure analysis diagram, fracture mechanics****Abstract**

The application of engineering methods to weldment integrity assessment has been analyzed. As the most general, procedure PD6493 has been considered, with special emphasis to its applicability to weldments, as well as procedures JWE2805 and GKSS ETM, specialized for weldments. The integrity assessment of the weldments in pressure vessels, where non-destructive examination had revealed crack-like defects, has been shown.

* Izlagano oktobra 2001., međunarodna konferencija "Stanje i perspektiva zavarivanja na početku novog veka".

UVOD

Ocena integriteta konstrukcija zasnovana je na osnovnim zakonima mehanike loma i raspoloživim podacima o konstrukciji i materijalu. Kriterijum koji se koristi za ocenu integriteta svodi se na poređenje sile rasta prslina, koja predstavlja opterećenje i geometriju posmatranog tela, uključujući prslinu (grešku), i žilavosti loma (svojstvo materijala kojim se definiše njegova otpornost na rast prslina). U zavisnosti od ponašanja materijala koristi se linearno-elastična ili elasto-plastična mehanika loma. U prvom slučaju sila rasta prslina se svodi na faktor intenziteta napona, a žilavost loma na njegovu kritičnu vrednost u uslovima ravnog stanja deformacije. Ovakav pristup je konzervativan kada se primenjuje na konstruktivne čelike i njihove zavarene spojeve, jer zanemaruje plastičnu deformaciju. Postoje različiti modifikovani pristupi, koji uzimaju u obzir plastičnost materijala, a ovde je primenjen pristup zasnovan na primeni dijagrama analize loma (FAD), koji je posebno značajan jer omogućava uključivanje zaostalih napona u analizu [1].

Osim FAD, postoji još nekoliko procedura, od kojih su JWES 2805 [2] i ETM MM96 [3, 4], kao procedure razvijene specijalno za zavarene spojeve, ukratko opisane.

DIJAGRAM ANALIZE LOMA

Da bi se prema dijagramu analize loma procenio značaj greške u konstrukciji treba znati [1]:

- Faktor intenziteta napona ili neki drugi parametar mehanike loma (kao što su $CTOD$ ili J -integral), koji definiše naponsko stanje oko vrha prslina, i otpornost materijala na rast prslina, tzv. žilavost loma;
- Spoljnje (radno) opterećenje, i opterećenje pri kome nastaje plastični kolaps.

U slučaju krtog loma dovoljno je primeniti linearno elastičnu mehaniku loma (**LEML**), odnosno parametar kao što je K_I , koja opisuje I način loma cepanjem. Kriterijum loma se u tom slučaju svodi na jednostavnu relaciju:

$$K_I = K_{Ic} \quad (1)$$

gde je K_{Ic} žilavost loma, odnosno otpornost materijala na nestabilni rast prslina.

Primena ovog parametra je, međutim, ograničena samo na krti lom. Stoga je uveden novi parametar, otvaranje vrha prslina ($CTOD$ - Crack Tip Opening Displacement), koji pokriva elasto-plastični ili potpuno duktilni lom (čupanje).



Postoji više načina izračunavanja vrednosti $CTOD$ za prslinu poznate dužine i konstrukciju poznate geometrije na koju deluje poznato opterećenje. Jedna od mogućnosti, kojom se izbegava korišćenje metode konačnih elemenata ili drugih komplikovanih matematičkih postupaka, je primena Barenblat-Dagdejlovog modela. Pomeranje upravno na površi prsline (otvaranje prsline) na mestu koje se definiše kao 'fizički' vrh prsline je ustvari $CTOD$. Za I način loma ova veličina, koja se još obeležava kao δ_t , povezana je sa delujućim naponom σ , poludužinom prsline a , i svojstvima materijala kao što su napon tečenja R_{eH} , Jangov modul E i Puasonov koeficijent ν , izrazom

$$\delta_t = \frac{8 \cdot R_{eH} \cdot a}{\pi \cdot E'} \cdot \text{Insec} \left(\frac{\pi \cdot \sigma}{2 \cdot R_{eH}} \right) \quad (2)$$

Treba uočiti i vezu otvaranja vrha prsline i J -integrala (pri RSN, tj. $m = 1$):

$$\delta_t = \frac{J}{R_{eH}} \quad (3)$$

S druge strane, J -integral, može da se transformiše u efektivni K faktor dobro poznatom relacijom:

$$K_{eff} = \sqrt{J \cdot E'} \quad (4)$$

Kombinovanjem jed. (2), (3) i (4) dobija se

$$K_{eff} = R_{eH} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot \left[\frac{8}{\pi^2} \text{Insec} \left(\frac{\pi \cdot \sigma}{2 \cdot R_{eH}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Sada mogu da se definišu granična stanja koja dovode do gubitka integriteta konstrukcije: $K_r \rightarrow K_{lc}$, koji važi za krti lom, i $\sigma \rightarrow \sigma_c$, koji važi za plastični kolaps, gde je σ_c napon pri kome nastaje plastični kolaps. Na osnovu ovih izraza definišu se bezdimenzione promenljive S_r i K_r :

$$K_r = \frac{K_l}{K_{lc}} \quad \text{ili} \quad K_r = \frac{K_l}{K_{eff}} \quad (6)$$

$$S_r = \frac{\sigma}{\sigma_c} \quad \text{ili} \quad S_r = \frac{P}{P_c} \quad (7)$$

Jasno je da se granična stanja definišu kao $K_r \rightarrow 1$ (krti lom), odnosno $S_r \rightarrow 1$ (plastični kolaps). Ako se za središnju prslinu u velikoj ploči uzme da je $K_l = \sigma \sqrt{\pi a}$, a u izrazu za K_{eff} , jed. (5) zameni R_{eH} sa σ_c , dobija se

$$\frac{K_{eff}}{K_l} = \frac{\sigma_c \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot \left[\frac{8}{\pi^2} \text{Insec} \left(\frac{\pi \cdot \sigma}{2 \cdot \sigma_c} \right) \right]^{\frac{1}{2}}}{\sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}} \quad (8)$$

Ako se u jed. (8) zamene izrazi za bezdimenzione promenljive K_r i S_r , dobija se jednačina kojom se definišu kritične tačke u koordinatnom sistemu (K_r , S_r):

$$K_r = S_r \cdot \left[\frac{8}{\pi^2} \text{Insec} \left(\frac{\pi}{2} \cdot S_r \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Jednačina (9) definiše tzv. *dijagram analize loma* (FAD - Failure Assessment Diagram), ili drugim rečima, projektnu krivu pomoću koje se procenjuje preostala čvrstoća komponente sa prslinom.

Treba imati u vidu da u prikazanoj varijanti FAD ne uzima u obzir geometriju komponente i ojačavanje materijala u plastičnom domenu. S druge strane, zaostali naponi mogu jednostavno da se uzmu u obzir, bilo direktnim dodavanjem pri analizi napona (konzervativni pristup), bilo primenom postupka koji uzima u obzir njihovu interakciju sa spoljnim opterećenjem [1].

Procedura JWES 2805 [2]

Standard Japanskog zavarivačkog društva WES 2805 koristi elasto-plastičnu mehaniku loma i oslanja se na $CTOD$ (δ) koncept za procenu značaja greške u zavarenim spojevima. Greška koju otkrije ispitivanje bez razaranja (IBR) se uprošćeno predstavlja u idealizovanom obliku, kao što je polueliptična površinska ili eliptična unutrašnja prslina, a zatim odredi ekvivalentna dužina odgovarajuće prolazne prsline (a_{eq}), na osnovu pravila linearno-elastične mehanike loma [2]. Ako rast prsline usled promenljivog opterećenja treba da se uzme u obzir, mora da se sprovede analiza zamornog rasta površinske ili unutrašnje prsline. Značaj greške se procenjuje na osnovu uslova:

$$\text{sila rasta prsline} \geq \text{otpornost materijala (žilavost loma)} \quad (10)$$

Žilavost loma se određuje standardnim $CTOD$ ispitivanjem, pri čemu se usvaja najniža vrednost dobijena na tri epruvete. Ako je $CTOD$ ispitivanje nepraktično ili nemoguće, žilavost loma može da se proceni na osnovu Šarpijevog udarnog ispitivanja, prema eksperimentalno utvrđenoj korelaciji, imajući u vidu odgovarajući faktor sigurnosti [2].

Sila rasta prsline se na osnovu jednačine koja povezuje $CTOD$ i deformaciju, definisana kao u pretpostavljenoj oblasti prsline, ali bez uticaja prsline:

$$\delta = \varepsilon_Y \cdot a_{eq} \cdot \left(\frac{\pi}{2} \right) \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_Y} \right)^2 \quad \text{za} \quad \frac{\varepsilon}{\varepsilon_Y} \leq 1 \quad (11a)$$

$$\delta = \varepsilon_Y \cdot a_{eq} \cdot \left(\frac{\pi}{8} \right) \cdot \left(9 \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_Y} - 5 \right) \quad \text{za} \quad \frac{\varepsilon}{\varepsilon_Y} > 1 \quad (11b)$$

gde je ε_Y deformacija tečenja materijala. Deformacija ε , definisana kao mera naponskog stanja na mestu greške, određuje se kao suma primarne deformacije (ε_1) koja potiče od radnog opterećenja, sekundarne deformacije usled zaostalih napona od zavarivanja (ε_2) i sekundarne deformacije usled koncentracije napona (ε_3).

Primarna deformacija (ε_1) se određuje na osnovu radnih napona, izraženih preko zatezne i savojne komponente:



$$\varepsilon_1 = \frac{(\sigma_t + H \cdot \sigma_b)}{E} \quad (12)$$

gde je σ_t zatezna, a σ_b savojna komponenta radnog napona, dok je H faktor definisan standardom [2]. Sekundarna deformacija usled napona od zavarivanja (ε_2) se određuje zavisno od položaja prsline u odnosu na zavareni spoj, pomoću relacije

$$\varepsilon_2 = a_R \cdot \varepsilon_Y \quad (13)$$

gde je $a_R = 0.6$ kada je prsline upravna na zavareni spoj, odnosno 0-0.2 kada je prsline paralelna zavarenom spoju (zavisno od vrste prsline [2]). Sekundarna deformacija usled koncentracije napona (ε_3) se izračunava prema izrazu:

$$\varepsilon_3 = (K_t - 1) \cdot \varepsilon_1 \quad (14)$$

gde je K_t faktor koncentracije napona. Novija istraživanja su otkrila da jed. (14) može da bude nekonzervativna ako se u oblasti koncentracije napona pojavi plastična deformacija, jer je tada K_t manje od K_ε . Stoga je u revidiranoj verziji K_ε dato u zavisnosti od K_t i nivoa lokalne deformacije, $\varepsilon/\varepsilon_Y$, uz pretpostavku da ponašanje materijala može da se opiše eksponencijalnim zakonom ($\sigma \propto \varepsilon^n$) [2]:

$$K_\varepsilon = K_t \quad \text{za } K_t \cdot \sigma \leq R_{eH} \quad (15a)$$

$$K_\varepsilon = K_t + A \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_Y} - \frac{1}{K_t} \right) \quad \text{za } \sigma_{net} \leq R_{eH} \leq K_t \cdot \sigma \quad (15b)$$

gde je

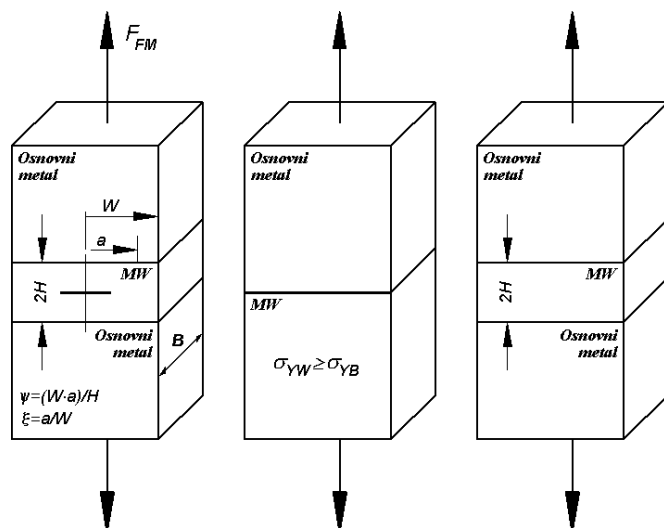
$$A = \frac{\lambda \cdot \left(K_t^{1-n} - K_t \right)}{1 - \frac{\lambda}{K_t}};$$

$$n = 0.12 \cdot \ln \left(\frac{1390}{R_{eH}} \right) - R_{eH} \text{ u MPa};$$

$$\lambda = \frac{\sigma}{R_{eH}}.$$

Procedura GKSS

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 nekoliko godina [3], i predstavlja deo metodologije određivanja značaja grešaka tipa prsline u zavarenim spojevima (EFAM), [4]. Procedura ETM-MM96 je specijalizovana za zavarene spojeve sa izraženim mismečingom (većim od 10 %), što je čini jedinstvenom u odnosu na ostale prikazane metode određivanja sila rasta prsline. Tri varijante zavarenih spojeva, koje su obuhvaćene ovom analizom, prikazane su na slici 1.



Slika 1. Zavareni spojevi obuhvaćeni procedurom ETM-MM96

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

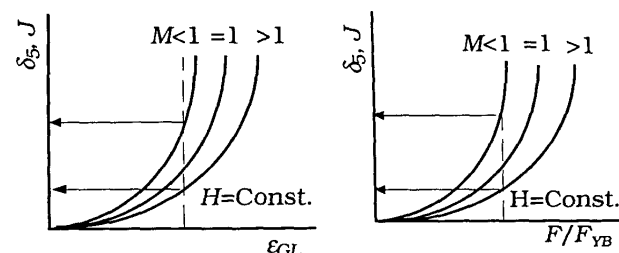
$$\frac{R_{eH}(M\check{S})}{R_{eH}(OM)} < 1 \quad (16a)$$

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

$$\frac{R_{eH}(M\check{S})}{R_{eH}(OM)} > 1 \quad (16b)$$

Uticaj mismečinga je shematski prikazan na slici 2, gde su date zavisnosti sile rasta prsline, izražene preko δ_5 ili J -integrala, od globalne deformacije ε_{GL} (sl. 2a), odnosno količnika sile F i F_Y (sila pri tečenju ligamenta), (sl. 2b).

ETM uzima u obzir ojačavanje materijala u oblasti plastičnih deformacija pomoću relacija tipa Ramberg-Ozgdudove:



a) zavisnost δ_5 i J od ε_{GL} b) zavisnost δ_5 i J od F/F_Y

Slika 2. Uticaj mismečinga na parametre mehanike loma

$$\frac{\sigma}{\sigma_{YB}} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{YB}} \right)^{NB} \quad (17a)$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_{YW}} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{YW}} \right)^{NW} \quad (17b)$$



gde su σ_{YB} i σ_{YW} naponi tečenja osnovnog metala i metala šava, ε_{YB} i ε_{YW} odgovarajuće deformacije, a NB i NW odgovarajući koeficijenti ojačavanja [3].

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 [3], 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 (NB i NW). 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. 1.

Detaljni prikaz svih jednačina, koje se koriste za određivanje parametara mehanike loma u okviru navedenih nivoa, dat je u EFAM ETM-MM 96 [4], a ovde su dati samo osnovni izrazi za $CTOD$ i J -integral u okviru EL nivoa, u oblasti pune plastičnosti (tečenje neto preseka):

$$\delta_5 = 1.5 \cdot \pi \cdot a \cdot \varepsilon_{aB} \quad (18a)$$

$$J = 1.5 \cdot \pi \cdot a \cdot \sigma_{YB} \cdot \varepsilon_{aB} \cdot \left(\frac{E \cdot \varepsilon_{aB}}{\sigma_{YB}} \right)^{NB} \quad (18b)$$

gde je ε_{aB} tzv. primenjena deformacija, odnosno mera opterećenja u osnovnom metalu. U izrazima (18) dužina prsline može da se zameni ekvivalentnom dužinom prsline, ako se analizira površinska prsline, na isti način kao kod $CTOD$ i JWES procedure. Za razliku od izraza (11), izrazi (18) nisu samo iskustvenog porekla, već su izvedeni preko osnovnih izraza elasto-plastične mehanike loma.

Primer - analiza integriteta posuda pod pritiskom u HE Bajina Bašta

Prikazan je primer analize integriteta zavarenih spojeva u posudama pod pritiskom u HE Bajina Bašta, u kojima su redovnim ispitivanjem bez razaranja otkrivene

greške tipa prsline. Primenjena je procedura PD6493, kao najpogodnija za ovu analizu.

Na osnovu pregleda radiograma sa "nedozvoljenim" greškama, dodatnog ultrazvučnog snimanja i analize stanja posuda kao "kritične" izdvojene su greške nađene u posudama br. 970 (greška br. 970-64, neprovar dužine 60 mm i širine 2 mm), 978 (neprovar 978-14 dužine 25 mm i širine 2 mm) i 971 (nalepljivanje 971-57 dužine 10 mm) [5].

Greške izdvojene kao "kritične" su analizirane metodama mehanike loma, primenjujući konzervativni pristup da bi se dokazao integritet posuda. U tom cilju sve tri greške su smatrane prslinama.

Greška 970-64

Podaci bitni za analizu su:

- geometrija posude (debljina $t = 50$ mm, prečnik $D = 2150$ mm);
- materijal omotača posude: NIOVAL 50 (niskolegirani čelik povišene čvrstoće), $R_{eH} = 500$ MPa, $R_M = 670$ MPa;
- geometrija prsline (dužina 60 mm, širina 2 mm, pravac - duž šava, lokacija - koren podužnog metala šava u blizini kružnog šava na vezi sa dancem, daleko od priključaka);
- opterećenje (unutrašnji pritisak $p = 8.1$ MPa, zaostali napon $\sigma_R = 200$ MPa - maksimalna vrednost poprečno na šav, uzeto na osnovu iskustva sa materijalom i posudom sličnih dimenzija [5]);
- žilavost loma metala šava minimalno 1580 MPa $\sqrt{\text{mm}}$ (50 MPa $\sqrt{\text{m}}$), uzeto na osnovu iskustva sa istim osnovnim materijalom [5].

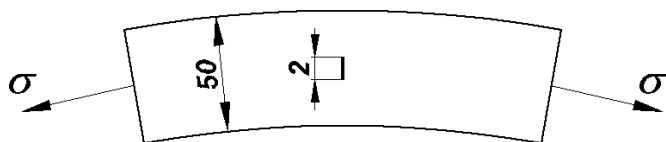
Imajući u vidu konzervativni pristup u analizi kritičnih grešaka, za prsline 970-64 je usvojeno da se prostire celom dužinom omotača posude. U tom slučaju problem se posmatra u preseku poprečnom na podužni pravac posude (sl. 3), pri čemu se uticaj krivine zanemaruje, što je za debljinu 50 mm i prečnik 2150 mm potpuno opravdano. Dimenzija prsline koja je do sada navedena kao dužina (60 mm) više ne postoji u analizi, a dimenzija do sada navođena kao širina postaje dužina (2 mm). Faktor intenziteta napona je u tom slučaju $K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$, gde je σ udaljeni napon, a a poludužina prsline. Ova formula važi za zategnutu ploču čije su dimenzije znatno veće od dužine prsline, što odgovara analiziranom problemu (sl. 3). Pri tome se zanemaruje asimetrija problema, koja potiče od položaja prsline (prsline je udaljena 22 mm od donje strane ploče, a 27 mm od njene gornje strane). Ako se za udaljeni napon uzme zbir obimskog napona od unutrašnjeg pritiska (kotlovska formula) i poprečni zaostali napon u sredini šava, faktor intenziteta napona postaje:

$$K_I = \left(\frac{p \cdot R}{t} + \sigma_R \right) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} = (174 + 200) \cdot \sqrt{\pi} = 633$$

MPa $\sqrt{\text{mm}}$



Imajući u vidu minimalnu vrednost žilavosti loma (1580 MPa√mm) može da se zaključi 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 bi tada faktor intenziteta napona bio 937 MPa√mm, što je 59 % minimalne vrednosti žilavost loma, tj. $K_R = K_I/K_{Ic} = 0.59$.



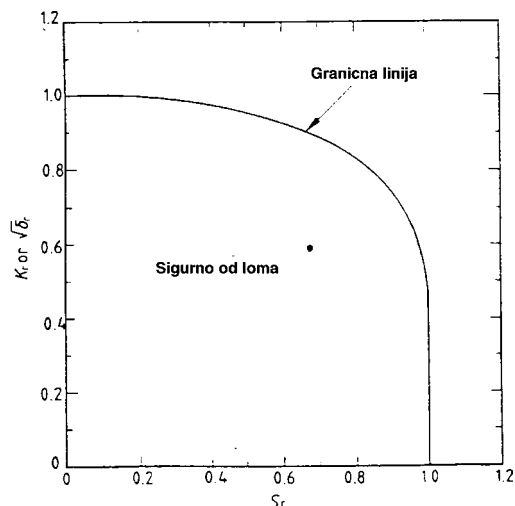
Slika 3. Skica preseka u kome se analizira prslina 970-64

Napon u neto preseku je $\sigma_n = 1.08pR/t + \sigma_R$, pri čemu je faktor 1.08 uzet zbog oslabljenja preseka prslinom dužine 4 mm na debljinu 50 mm (8 %). Shodno tome dobija se

$$S_R = \frac{\sigma_n}{\sigma_F} = 2 \cdot \frac{1.08 \cdot \frac{p \cdot R}{t} + \sigma_R}{R_{eH} + R_M} = 0.67$$

Uticao blizine danca je procenjen kao zanemarljiv, jer diskontinuitet koji se pri tome javlja izaziva veliku promenu napona u torusnom delu danca, ali ne i u cilindričnom omotaču [4].

Na osnovu dobijenih vrednosti za K_I/K_{Ic} i σ_n/σ_F u dijagram analize loma (FAD) je ucrtana tačka sa koordinatama (0.67; 0.59) koja se nalazi u sigurnom delu dijagrama (sl. 4).



Slika 4. Dijagram analize loma za grešku 970-64

Greška 978-14

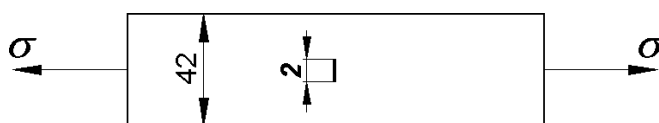
Greška 978-14 (neprovar dužine 25 mm i širine 2 mm u kružnom šavu na vezi sa donjim dancem) je predstavljena kao površinska prslina, ali je za potrebe konzervativne analize usvojeno da se ova prslina prostire celim obimom posude. Od podataka bitnih za analizu razlike u odnosu na prethodni slučaj su u geometriji posude (debljina $t = 42$ mm, srednji prečnik $D = 1958$ mm), geometriji prsline (dužina 25 mm, širina 2 mm, pravac - duž šava, lokacija - koren kružnog

metala šava na vezi sa dancem, daleko od priključaka), i unutrašnjem pritisku $p = 7.8$ MPa.

U ovom slučaju problem se posmatra u preseku poprečnom na obimski pravac posude (sl. 5). Prikazani presek je uprošćen jer je i deo koji pripada dancu prikazan kao ravan, što je opravdano zanemarivanje uticaja krivine. Ako se kao udaljeni napon uzme zbir podužnog napona od unutrašnjeg pritiska (kotlovska formula) i poprečni zaostali napon u sredini šava, za faktor intenziteta napona se dobija:

$$K_I = \left(\frac{p \cdot R}{2 \cdot t} + \sigma_R \right) \sqrt{\pi \cdot a} = (91 + 200) \sqrt{\pi} = 515$$

MPa√mm

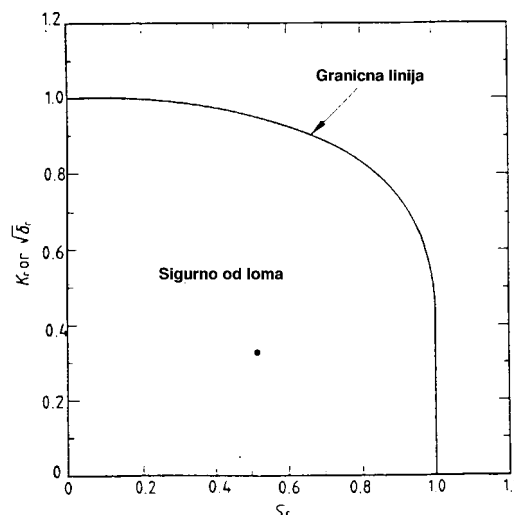


Slika 5. Skica preseka u kome se analizira prslina 978-14

Imajući u vidu minimalnu vrednost žilavosti loma može da se zaključi da nema opasnosti od krtog loma, jer je faktor intenziteta napona (K_I) svega 33 % od svoje kritične vrednosti, $K_R = K_I/K_{Ic} = 0.33$.

Napon u neto preseku je $\sigma_n = 1.05pR/2t + \sigma_R = 295$ MPa, pri čemu je faktor 1.05 uzet zbog oslabljenja preseka prslinom dužine 2 mm na debljinu 42 mm (5 %). Shodno tome za apscisu tačke koja u dijagramu analize loma predstavlja grešku 978-14 dobija se $S_R = \sigma_n/\sigma_F = 295/575 = 0.51$.

Na osnovu dobijenih vrednosti za K_I/K_{Ic} i σ_n/σ_F u dijagram analize loma (FAD) je ucrtana tačka sa koordinatama (0.51; 0.33) koja se nalazi u sigurnom delu dijagrama (sl. 6).



Slika 6. Dijagram analize loma za grešku 978-14

Greška 971-57

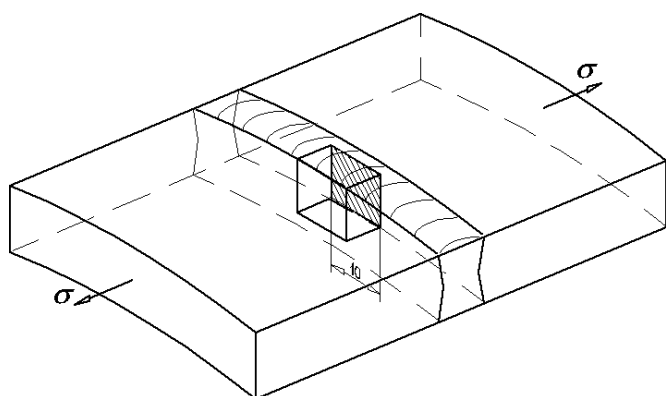
Greška 971-14 (nalepljivanje dužine 10 mm u kružnom šavu na sredini posude) je predstavljena kao prolazna prslina. Od podataka bitnih za analizu, razlike u odnosu



na prethodne slučajeve su u geometriji posude (debljina $t = 50$ mm, srednji prečnik $D = 2150$ mm), geometriji prsline (dužina 10 mm, pravac - duž šava, lokacija - kružni metal šava u sredini posude, daleko od priključaka), unutrašnjem pritisku $p = 8.1$ Mpa i veličini zaostalih napona $\sigma_R = 175$ MPa - poprečno na šav, izvan centra.

I u ovom slučaju problem se posmatra kao zategnuta ploča (ali ne u preseku, već kao "izdvojeni" deo omotača), sl. 7. Ako se kao udaljeni napon uzme zbir podužnog napona od unutrašnjeg pritiska ('kotlovska formula') i poprečnog zaostalog napona izvan sredine šava, za faktor intenziteta napona se dobija:

$$K_I = \left(\frac{p \cdot R}{2 \cdot t} + \sigma_R \right) \sqrt{\pi \cdot a} = 1039 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$$



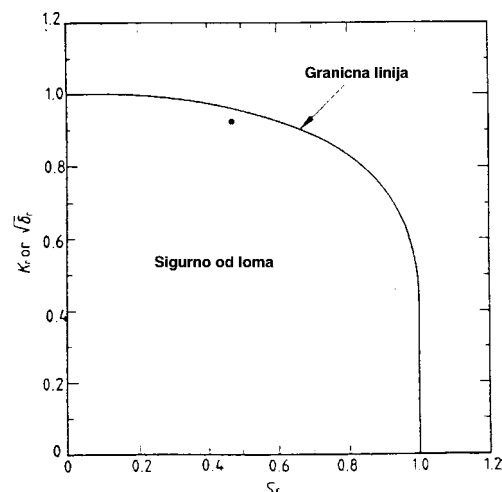
Slika 7. Skica dela omotača u kome se analizira prsline 971-57

Imajući u vidu minimalnu vrednost žilavosti loma metala šava ($1580 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$) može da se zaključi da nema opasnosti od krtog loma, jer je faktor intenziteta napona (K_I) svega 66 % od kritične vrednosti, iako je analiza bila izrazito konzervativna u svim aspektima. Čak i da se pretpostavi da je dužina prsline dvostruko veća, faktor intenziteta napona ($K_I = 1465 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ za $2a = 20$ mm) ostaje manji od kritične vrednosti, $K_R = K_I/K_{IC} = 0.92$.

Napon u neto preseku je $\sigma_n = pR/2t + \sigma_R = 262$ MPa, pri čemu nije uzet u obzir faktor oslabljenja preseka jer je njegov uticaj zanemarljiv. Shodno tome za apscisu tačke koja u dijagramu analize loma predstavlja grešku 978-14 dobija se $S_R = \sigma_n/\sigma_F = 262/575 = 0.46$, pa je u dijagram analize loma ucrтана tačka sa koordinatama (0.46; 0.92), koja se takođe nalazi u sigurnom delu dijagrama (sl. 8).

LITERATURA

- [1] PD 6493 (1996): *Guidelines on some methods for the derivation of acceptance levels for defects in fusion welded joints*, BSI, London
- [2] Japanese Welding Engineering Society Standard WES2805: *Method of assessment for defects in fusion welded joints with respect to brittle fracture*, 1983.
- [3] Schwalbe, K.-H. 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.



Slika 8. Dijagram analize loma za grešku 971-57

DISKUSIJA I ZAKLJUČCI

Kako su sve tri tačke u FAD dobijene konzervativnom procenom svih uticaja, to može da se zaključi da analizirane greške ne mogu da izazovu krti lom pod uslovom da se posuda koristi na predviđeni način, da prsline ne počne da raste kroz ZUT i da ne postoje drugi mehanizmi rasta prsline (korozija, zamor, puzanje).

Od tri predstavljene procedure za analizu integriteta zavarenih spojeva, za konkretnu primenu u ovom radu izabarna je PD6493 procedura, prvenstveno zbog jednostavnosti u njenoj primeni. Posebna pogodnost uprošćene varijante ove procedure je da se od svojstava materijala traži samo napon tečenja, dok se kod preostale dve procedure (JWES 2805 i ETM MM96) kao ulazni podatak traži kriva zatezanja, odnosno eksponencijalni zakon ojačavanja. Stoga je ovde, kao logično inženjersko rešenje, primenjena najjednostavnija, a pri tom konzervativna procedura, kojom je dokazan integritet analiziranih posuda. Treba napomenuti, da bi u suprotnom slučaju ojačavanje materijala moglo da se uzme u obzir u cilju preciznije procene integriteta posuda. Ovakva mogućnost postoji i u proceduri PD6493, u tzv. nivou III, gde se koristi modifikovana granična kriva. Konačno, treba imati u vidu da su procedure PD6493 i ETM MM96 osnova evropskog projekta SINTAP (Structural INTEgrity Assessment Procedure) [6], kojim se detaljno propisuju postupak procene integriteta konstrukcija.

- [4] Schwalbe, K.-H. et al: *EFAM ETM97 - the ETM Method for assessing the significance of crack-like defects in engineering structures*, GKSS report, Geesthacht, Germany, 1997.
- [5] Sedmak, A.: *Analiza integriteta posuda pod pritiskom u HE Bajina Bašta*, Izveštaj Mašinskog Fakulteta u Beogradu br. 9810/12.03, 1998.
- [6] SINTAP (Structural INTEgrity Assessment Procedure): *European Union Brite-Euram Fourth Framework Scheme*, Final version, 1999.