

PONAŠANJE KOMPONENTI ZAVARENOG SPOJA ČELIKA NN-70 U PRISUSTVU GREŠKE TIPA PRSLINE

Dženana Gačo¹, Nermin Bišćević², Zijah Burzić³, Edvin Bolić¹

¹Univerzitet u Bihaću, Tehnički fakultet Bihać, Bihać, Bosna i Hercegovina, dzgaco@bih.net.ba,

²JU Masinsko-saobraćajna mješovita srednja škola Bihać, Bosna i Hercegovina, nerminbiscevic@yahoo.com

³Vojnotehnički institut, Beograd, Srbija, zijah.burzic@vti.vs.rs

KLJUČNE RIJEČI: Faktor intenziteta napona, J integral, J - Δa kriva.

SAŽETAK:

U ovom radu je opisano ponašanje komponenti zavarenog spoja čelika NN-70 u prisustvu greške tipa prsline pri djelovanju statičkog opterećenja. Korišteni su standardni postupci određivanja parametara mehanike loma. Eksperiment je rađen sa tri grupe epruveta u zavisnosti od mjesta urezivanja zarez epruveta sa vrhom zamorne prsline u OM, epruveta sa vrhom zamorne prsline u MŠ i epruveta sa vrhom zamorne prsline u ZUT. Korištena je metoda ispitivanja jedne epruvete sukcesivnim parcijalnim rasterećenjem, odnosno metodom popustljivosti.

1. UVOD

Primjena mehanike loma je donijela značajne promjene u inženjerskoj praksi. Kao primjer za ilustraciju ove tvrdnje mogu da se navedu problemi sa Aljaska cjevovodima i primjena principa konstruisanja sa sigurnošću od loma. U slučaju cjevovoda od Aljaska do SAD po prvi put su kriterijumi mehanike loma prihvaćeni kao mjerodavni, umjesto previše konzervativnih standarda o dozvoljenim greškama u zavarenom spoju. Naime, kada je ispitivanjem bez razaranja utvrđen veliki broj grešaka u kružnim zavarenim spojevima, koje je po tad važećim standardima trebalo popraviti, postavilo se pitanje ekonomske opravdanosti, odnosno tehničke neophodnosti popravke. Stoga je nadležna savezna agencija, na zahtjev kompanije koja je postavila cjevovod zatražila pomoć od Nacionalnog biroa za standarde (National Bureau of Standards - NBS).

Detaljna analiza parametara loma, zasnovana na konceptu otvaranja vrha prsline, obuhvatila je s jedne strane procjenu sile rasta prsline, a s druge strane otpornost materijala (metal šava) na rast prsline. Rezultati ovog istraživanja su zvanično prihvaćeni, pa je obim popravke drastično smanjen, čim su izbjegnuti nepotrebni troškovi, a takođe i opasnost od unošenja novih grešaka reparaturnim zavaranjem. Ovdje je najvažnije istaći da je analiza mehanike loma prihvatljiva osnova za dopušteni izuzetak od postojećih standarda pod određenim okolnostima, ako takva analiza daje ubjedljivu i konzervativnu (sigurnu) procjenu integriteta konstrukcije [1].

Drugi primjer drastične promjene 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 vijek komponente bez prsline) na princip konstruisanja sa sigurnošću od loma (tzv. fail – safe). Još izraženije nego u prvom primjeru, ovdje je od suštinskog značaja bio dostignut nivo mehanike loma kao naučne discipline, a posebno istraživanje u vezi sa zamornim rastom prsline. Drugim riječima,

DŽ.Gačo, N.Biščević, Z.Burzić, E.Bolić - Ponašanje komponenti zavarenog spoja čelika NN-70..... prikupljena saznanja o rastu zamorne prsline su omogućila da se, sa dovoljnom sigurnošću, utvrdi preostali vijek komponente sa prslinom i na taj način procijeni da li komponenta može da radi do sljedeće kontrole. U skladu sa tim, čak i najodgovornije komponente se ne zamjenjuju prije nego što se redovnim kontrolama otkriju prsline ili slične greške. Pri tome je komponenta konstruisana tako da u slučaju postojanja prsline manje od minimalne veličine koju može da otkrije primijenjena metoda ispitivanja bez razaranja, njen vijek (period rasta prsline od navedene fiktivne veličine prsline do kritične veličine za krti lom) bude veći od perioda do sljedeće kontrole [1].

Sigurnost zavarenih konstrukcija u eksploataciji, a posebno posuda pod pritiskom se mora razmotriti još u fazi projektovanja. Proučavanje otpornosti prema lomu zavarenih spojeva posuda pod pritiskom je neophodno, jer u slučaju loma mogu nastati katastrofalne posljedice sa velikim materijalnim štetama i ljudskim žrtvama, a mogući su i ekološki višegodišnji poremećaji. Radi toga treba raspolagati pouzdanim metodama za procjenu integriteta i preostalog vijeka konstrukcija, a u cilju minimiziranja opasnosti od loma.

U posljednjih 30 godina ostvaren je značajan napredak u razvoju nisko i mikrolegiranih čelika povišene i visoke čvrstoće. Radi proširenja područja primjene u novije vrijeme se posebna pažnja poklanja faktorima koji obezbjeđuju duktilnost, žilavost, sposobnost oblikovanja i zavarljivost. Bilo je neophodno da se razviju čelici sa što manjim sadržajem ugljika i nižom prelaznom temperaturom krtosti, a sa dobrim mehaničkim osobinama, kako bi se u potpunosti iskoristile prednosti usavršenih tehnologija zavarivanja. Zahtjevane osobine se postižu pažljivo odabranim hemijskim sastavom i strogo kontrolisanim tehnološkim procesom izrade. Prema veličini zrna ovi su čelici sitnozrni, a prema minimalnim dodacima legirajućih elemenata, najčešće niobijuma, vanadijuma i titana su mikrolegirani.

Prednost primjene niskolegiranih čelika visoke čvrstoće (HSLA) u konstrukcijama, posebno za posude pod pritiskom, je u smanjenoj težini proizvoda i ekonomičnijoj proizvodnji. Osnovni materijal, niskolegirani čelik visoke čvrstoće, NN - 70 [2], je namijenjen za izradu opreme pod pritiskom, i projektovan za rad na niskim temperaturama. Dobro se zavaruje, uglavnom je to "over matching" gdje metal šava ima veću čvrstoću od osnovnog metala.

Poznavajući uslove pod kojim će posuda pod pritiskom raditi, odnosno znajući tehnologiju zavarivanja istog, može se solidno proračunati i pretpostaviti preostali vijek eksploatacije. Taj vijek eksploatacije će se moći bolje i tačnije odrediti, ukoliko se o materijalu i zavarenom spoju zna više. Upravo ta osjetljivost zavarenog spoja čelika NN - 70 prema uticaju zarezata, prsline i uključaka čini ova istraživanja još svrsishodnijim [2].

2. MATERIJAL

Za ponašanje komponenti zavarenog spoja u prisustvu greške tipa prsline pri djelovanju statičkog opterećenja, izabran je čelik NN - 70. Materijal je isporučen u obliku limova debljine 20 mm. Hemijski sastav dostavljenih limova je dat u tabeli 1, a mehanička svojstva su data u tabeli 2.

Tabela 1: Hemijski sastav čelika NN – 70 [2]

Šarža	% mas.									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al
211605	0,10	0,20	0,23	0,009	0,018	1,24	3,10	0,29	0,05	0,08

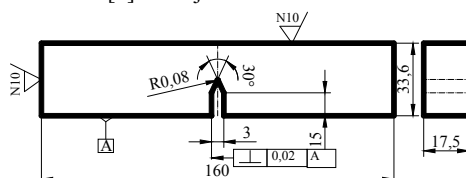
Tabela 2: Mehanička svojstva čelika NN – 70 [2]

Šarža	Pravac ispitivanja	Napon tečenja $R_{p0,2}$, MPa	Zatezna čvrstoća, R_m , MPa	Izduženje A, %, min.
211605	L - T	710	770	14

3. ISPITIVANJE MEHANIKE LOMA

Ispitivanje epruveta sa prslinom pokazuje lokalno ponašanje materijala oko vrha prsline i polazi od pretpostavke da je materijal oko prsline dovoljno homogen, što znači da se rezultati lokalnog ponašanja mogu tretirati globalno, odnosno da se mogu neposredno prenijeti na odgovarajuću konstrukciju. Uticaj heterogenosti strukture i mehaničkih osobina zavarenog spoja se prije svega ogleda kroz položaj vrha zamorne prsline i osobina područja kroz koje se lom razvija. Ispitivanje žilavost loma pri ravnoj deformaciji, K_{Ic} , je rađeno u cilju određivanja kritičnog faktora intenziteta napona, K_{Ic} , odnosno ocjene ponašanja OM i komponenti zavarenog spoja, metala šava (MŠ) i zone uticaja toplote (ZUT) u prisustvu greške tipa prsline, kao najopasnije od svih grešaka u konstrukcijskim materijalima, a posebno zavarenim spojevima. Samo ispitivanje je rađeno na sobnoj temperaturi od 20°C. Rađene su tri grupe epruveta u zavisnosti od mjesta urezivanja zarez, odnosno mjesta vrha zamorne prsline, i to epruvete sa vrhom zamorne prsline u OM, epruvete sa vrhom zamorne prsline u MŠ i epruvete sa vrhom zamorne prsline u ZUT.

Za određivanje K_{Ic} na sobnoj temperaturi korištene su epruvete za savijanje u tri tačke (SEB) čija geometrija je definisana standardom ASTM E399 [3] i data je na slici 1.



Slika 1: Epruveta SEB za ispitivanje mehanike loma [3]

Kako je definisao standard ASTM E399, odnosno BS 7448 Part 1 [4], prvo se pristupilo pripremanju epruvete, odnosno stvaranju zamorne prsline. Zamorna prsline je potrebna da bi se stvorili uslovi ravnog stanja deformacije. Određivanje nazivne granične sile, F_L , odnosno maksimalne sile početka zamaranja za SEB epruvetu je definisano izrazom:

$$F_L = \frac{B \cdot b^2 \cdot R_T}{2L} \quad (1)$$

gdje je: B - širina SEB epruvete, mm; b - dužina ligamenta; L - raspon između oslonaca, mm, i R_T - efektivni napon tečenja, MPa.

Približno 50% završne dužine zamorne prsline je izvedeno pri maksimalnoj sili zamaranja $F_{max} = 0,4 \cdot F_L$. Minimalna sila je bila $F_{min} = 0,1 \cdot F_{max}$. Stvaranje zamorne prsline kod SEB epruveta je rađeno na visokofrekventnom pulzatoru "AMSLER". Ovaj uređaj može da ostvari sinusoidalno jednosmjerno promjenljivo opterećenje u opsegu od -100 do 100 kN. Srednje opterećenje i amplituda opterećenja je registrovana sa tačnošću ± 50 N. Ostvarena učestanost se kretala od 110 do 130 Hz što je u direktnoj zavisnosti od nivoa srednjeg opterećenja i veličine amplitude opterećenja. Kako zahtjevi za ispunjenje uslova ravnog stanja deformacije:

$$B \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_{Ic}}{R_{p0,2}} \right)^2 \quad (2)$$

nisu zadovoljeni, umjesto primjene linearno - elastične mehanike loma (LEML) definisane standardom ASTM E399 [1], pristupilo se korištenju elasto-plastične mehanike loma (EPML) definisane standardima ASTM E813 [5], ASTM E1820 [36] i BS 7448 Part 1 i 2 [4, 7]. Cilj korištenja elasto - plastične mehanike loma je da se vrijednost kritičnog faktora intenziteta napona, K_{Ic} , odredi posredno preko kritičnog J integrala, J_{Ic} , odnosno da se prati razvoj prsline u uslovima izražene

Dž.Gačo, N.Biščević, Z.Burzić, E.Bolić - Ponašanje komponenti zavarenog spoja čelika NN-70.....
 plastičnosti. Ponašanje elasto - plastičnog materijala u koji spadaju i čelik NN - 70, kao i komponente
 zavarenog spoja, pri stabilnom rastu prsline može da se opiše dijagramom $J - \Delta a$, gdje je Δa
 priraštaj prsline.

Tačka pregiba u početnoj fazi se uzima kao J_{Ic} , pa se na osnovu te vrijednosti može odrediti kritični
 faktor intenziteta napona K_{Ic} . Uslov za debljinu epruvete je:

$$B > 25 \cdot \frac{J_{Ic}}{R_T} \quad (3)$$

gdje je J_{Ic} kritična vrijednost J integrala.

Očigledno je da se debljina može provjeriti tek poslije ispitivanja. Isto ograničenje vrijedi i za dužinu
 početnog ligamenta, b , odnosno:

$$b = W - a_0, b > \frac{25J_{Ic}}{R_{p0,2}} \quad (4)$$

gdje je: W - širina epruvete, mm, i a_0 - početna dužina zamorne prsline, mm.

3.1 Eksperimentalno određivanje parametara mehanike loma

Eksperimenti su izvedeni metodom ispitivanja jedne epruvete sukcesivnim parcijalnim rasterećenjem,
 odnosno metodom popustljivosti jedne epruvete, kako je to definisano standardom ASTM E813. Cilj
 metode popustljivosti sa rasterećenjem je da se registruje veličina razvoja prsline, Δa , koja nastaje
 tokom ispitivanja. Samo ispitivanje epruveta sa vrhom zamorne prsline u OM, MŠ i ZUT, rađeno je
 na sobnoj temperaturi od 20°C, na elektromehaničkoj kitalici. Kod ispitivanja na sobnoj temperaturi
 epruveta je bila opremljena COD ekstenzometrom radi registrovanja otvaranja vrha prsline.
 Opterećenje na savijanje, se uvodilo malom brzinom, i u konkretnom slučaju brzina uvođenja
 opterećenja iznosila je 1 mm/min. Opterećenje se uvodilo sa povremenim rasterećivanjima do
 trenutka velikih plastičnih deformacija ili loma epruvete, odnosno izlaska iz opsega mjerenja
 ekstenzometra, odnosno induktivnog davača. Za to vrijeme su se A/D konvertorom prikupljali podaci
 o opterećenju, pomjeranju i otvaranju vrha prsline. Potom se epruvete lome, da bi mogle da se izmjere
 početne a_0 i krajnje dužine prsline a_f . S obzirom da front prsline nije paralelan sa ulaznom ivicom
 epruvete mjerenja se vrše duž 5 do 9 paralelnih mjernih linija, u zavisnosti od debljine epruvete i
 pravilnosti fronta zamorne prsline. Uočljiva rasterećenja na krivoj sila F – otvaranje vrha prsline δ ,
 služe za određivanje popustljivosti ispitivane epruvete pri trenutnoj dužini prsline a ($a = a_0 + a_2$).
 Iz popustljivosti, koja je predstavljena odnosom priraštaja sile F i priraštaja otvaranja vrha prsline δ
 na liniji rasterećenja, moguće je odrediti dužinu prsline preko izraza:

$$\Delta a_i = \Delta a_{i-1} + \left(\frac{b_{i-1}}{\eta_{i-1}} \right) \cdot \left(\frac{C_i - C_{i-1}}{C_{i-1}} \right) \quad (5)$$

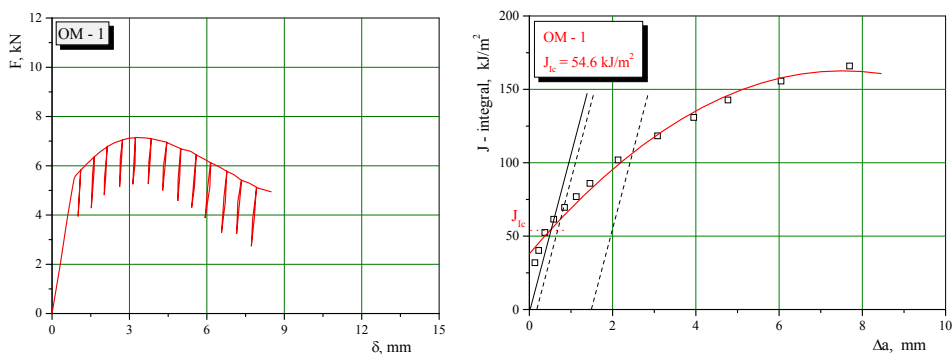
gdje je: a_{i-1} – prethodna dužina prsline, $C_i = tg \alpha_i$ - nagib posmatrane linije rasterećenja, $C_{i-1} = tg \alpha_{i-1}$ -
 nagib prethodne linije rasterećenja i $\eta_{i-1} = 2$ - koeficijent za SEB epruvete. J integral je jednak zbiru
 elastične komponente J integrala i plastične komponente J integrala [6]:

$$J_{(i)} = J_{el} + J_{pl} \quad (6)$$

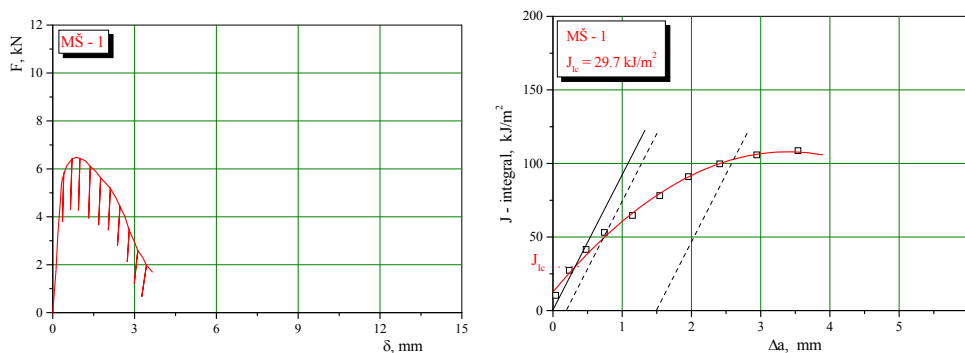
Na osnovu dobijenih podataka konstruiše se $J - \Delta a$ kriva na kojoj se konstruiše regresiona linija prema
 ASTM E813. Iz dobijene regresione linije dobija se kritični J integral, J_{Ic} . Poznavajući vrijednosti
 kritičnog J_{Ic} integrala može se izračunati vrijednost kritičnog faktora intenziteta napona ili žilavost
 loma pri ravnoj deformaciji, K_{Ic} , pomoću zavisnosti:

$$K_{Ic} = \sqrt{\frac{J_{Ic} \cdot E}{l - \nu^2}} \quad (7)$$

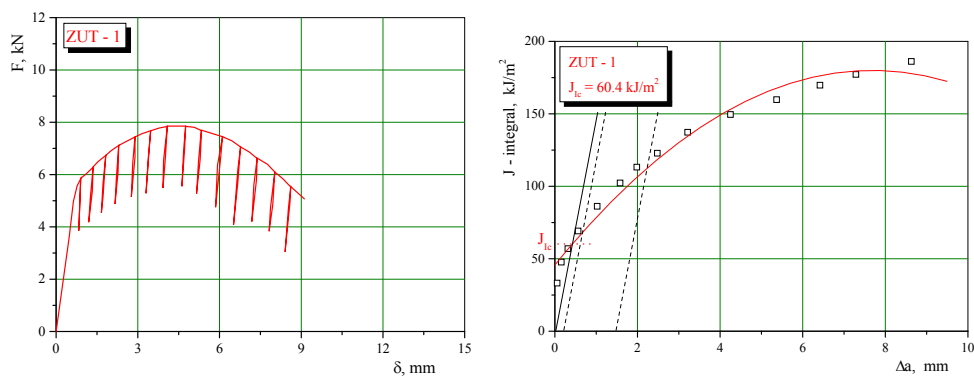
Na slikama od 2 do 4 su dati primjeri dijagrama F - δ , i J - Δa za epruvete sa zarezom u osnovnom metalu (OM), metalu šava (MŠ) i zoni uticaja toplote (ZUT), gdje se po samom izgledu dijagrama vidi uticaj heterogenosti strukture na žilavosne osobine komponenti zavarenog spoja.



Slika 2: Dijagrami F - δ , i J - Δa dobijeni ispitivanjem epruvete OM – 1 [2]



Slika 3: Dijagrami F - δ , i J - Δa dobijeni ispitivanjem epruvete MŠ – 1 [2]



Slika 4: Dijagrami F - δ , i J - Δa dobijeni ispitivanjem epruvete ZUT – 1 [2]

Dž.Gačo, N.Biščević, Z.Burzić, E.Bolić - Ponašanje komponenti zavarenog spoja čelika NN-70.....
 Poznavajući vrijednosti kritičnog J_{Ic} integrala može se izračunati vrijednost kritičnog faktora intenziteta napona ili žilavost loma pri ravnoj deformaciji, K_{Ic} , pomoću zavisnosti 7.

Tabela 3: Vrijednosti parametara mehanike loma [2]

Oznaka epruvete	Kritični J integral J_{Ic} , kJ/m ²	Kritični faktor intenziteta napona, K_{Ic} , MPa m ^{1/2}
OM-1	54.6	112.2
OM-2	51.9	109.4
OM-3	56.3	114.0
MŠ-1	29.7	82.8
MŠ-2	32.1	86.1
MŠ-3	34.7	89.5
ZUT-1	60.4	118.1
ZUT-2	62.3	119.9
ZUT-3	66.4	123.8

Izračunate vrijednosti žilavosti loma pri ravnoj deformaciji, K_{Ic} , su date u tabeli 3.

4. ZAKLJUČAK

Najveću izmjerenu vrijednost K_{Ic} imaju epruvete sa zarezom u ZUT. Nešto niže vrijednosti K_{Ic} imaju epruvete sa zarezom u OM, međutim u konkretnom slučaju su razlike relativno male i kreću se približno 5 - 10MPa m^{1/2} u odnosu na minimalnu i maksimalnu vrijednost. Ove razlike ne moraju da imaju značajnijeg uticaja kod konstrukcija koje su u radu izložene kako statičkom tako i dinamičkom opterećenju. Karakter krivih, se isključivo mijenja u zavisnosti od mjesta postavljanja zareza, odnosno mjesta dokle je prodrla zamorna prslina. Analizirajući dobijene krive, vidimo gotovo identičnu zavisnost karaktera pojedinačnih krivih u svakoj grupi, s tim što je razlika između epruveta isključivo u vrijednosti maksimalne sile, F_{max} , što je u direktnoj zavisnosti od dužine zamorne prsline a . Primijetno je da strukturne i mehaničke heterogenosti zavarenog spoja imaju značajni uticaj na njegovu otpornost prema razvoju prsline, kako u elastičnom, tako i u plastičnom području. Zbog toga je potrebno pri propisivanju uslova za ispitivanje mehanike loma, definisati ne samo postupak ispitivanja i položaj zamorne prsline, već i način tumačenja i značenje rezultata.

5. LITERATURA

- [1] Burzić Z., Sedmak S., Manjgo M.: *Eksperimentalno određivanje parametara mehanike loma zavarenih spojeva*, Integritet i vek konstrukcija, No. 2, str. 97, 2001.
- [2] N. Biščević, *Mogućnosti primjene koncepta integriteta konstrukcije na spremnost za upotrebu posuda pod pritiskom*, Magistarski rad, Tehnički fakultet, Bihać, 2012.
- [3] ASTM E399 - 02, *Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials*, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01., 2002.
- [4] BS 7448., *Fracture mechanics toughness tests. Part 1. Method for determination of K_{Ic} critical CTOD and critical J values of metallic materials*, BSI, 2006.
- [5] ASTM E813 - 89, *Standard Test Method for JIC, A Measure of Fracture Toughness*, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01. p. 651, 1993.
- [6] ASTM E 1820 - 08, *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03. 01., 2008.
- [7] BS 7448 - Part 2, *Fracture mechanics toughness tests - Methods for determination of K_{Ic} critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials*, BSI, 2010.