



1.Meri Burzić, 2.Mersida Manjgo, 3.Tomaž Vuherer, 4.Radica Prokić-Cvetković, Olivera Popović, 5.Zijah Burzić

## SKLONOST KA KRTOM LOMU SIMULIRANOG ZUT-a ČELIKA POVIŠENE ČVRSTOĆE

**Originalni naučni rad / Original scientific paper**

**UDK / UDC: 621.791.691.7**

**Rad primljen / Paper received:**

Januar 2014.

**Adresa autora / Author's address:**

1.I.C.Mašinski fakultet Beograd, Srbija

2.Mašinski fakultet, Mostar,B.i.H

3.Fakultet za strojništvo,Maribor,Slovenija

4.Mašinski fakultet ,Beograd,Srbija

5.Vojnotehnički institut,Beograd,Srbija

**Ključne reči:** Zavarivanje mikrolegiranih čelika, mehanika loma zavarenih spojeva, krti lom, sigurnost zavarenih spojeva, ZUT, udarna žilavost, žilavost loma

**Key words:** Microalloys steels welding, fracture mechanics of welded joints, brittle fracture, , HAZ, impact toughness, fracture toughness

**Izvod:** Ocena sklonosti ka krtom lomu je analizirana ispitivanjem epruveta sa zamornom prslinom u simuliranoj zoni ZUT. Analizirano je kako heterogenost strukture i mehaničkih svojstava različitih zona ZUT, dobijenih simulacijom jednoprolaznog i dvoprolaznog ZUT utiče na pojavu i rast prslina, što omogućava da se kvantitativno izraze parametri koji kontrolišu lokalno deformacijsko ponašanje i rast prsline.

**Abstract:** Susceptibility to brittle fracture has been analyzed by testing specimens precracked by fatigue in simulated HAZ region. It has been analyzed how the heterogeneity of microstructure and mechanical properties off different HAZ regions, obtained by simulation of one-pass and two-passes HAZ affects crack occurrence and growth, enabling to express quantitatively the parameters, controlling local deformation behaviour and crack growth.

### 1. Uvod

Proizvodnja savremenih zavarenih čeličnih konstrukcija zahteva korišćenje čelika povišene i visoke čvrstoće, sa povećanim i visokim naponom tečenja, stabilnom žilavošću na niskim i povišenim radnim temperaturama i prihvatljivom zavarljivošću. Kod razmatranja načina ojačavanja čelika povišene i visoke čvrstoće pažnja se najviše poklanja naponu tečenja kao osnovnom pokazatelju mehaničke čvrstoće materijala, jer se smatra da je napon tečenja pokazatelj ponašanja konstrukcije pod otperećenjem. Ovakav prilaz bazira na činjenici, da nije zabeležen slučaj otkazivanja konstrukcije, osim kod krtog i zamornog loma, pri naponima nižim od napona tečenja.

Uspešna primena čelika povišene čvrstoće NIOMOL 490K, projektovanog za jako opterećene zavarene konstrukcije, koji se koriste na niskim temperaturama, zavisi od svojstava kritičnih područja zavarenog spoja. Zona uticaja toplote (ZUT) predstavlja mesta smanjenih mehaničkih svojstava, pre svega duktilnosti, i povećane sklonosti ka krtom lomu. Zbog toga se pažnja pri izradi zavarenih spojeva posvećuje greškama iz

kjih u toku eksploatacije mogu da se razviju prsline. Kako su greške tipa prslina realne u izradi zavarenih konstrukcija to je za čelike povišene i visoke čvrstoće potrebno odrediti veličine parametara mehanike loma, koji se mogu koristiti u oceni integriteta zavarenih konstrukcija sa utvrđenom greškom [1].

Uvodeći novi pristup u projektovanju zavarenih konstrukcija, a radi bolje efikasnosti ispitivanja, mikrostruktura područja ZUT kao najkritičnijeg mesta zavarenog spoja je simulirana na simulatoru ZUT. Termičkom simulacijom, zagrevanjem do određene temperature i programiranim hlađenjem, se na uzorcima dobija mikrostruktura različitih područja ZUT.

Ocena sklonosti ka krtom lomu je analizirana ispitivanjem epruveta sa zamornom prslinom u simuliranim zonama ZUT. Radi potpunijeg razumevanja uzroka i načina pojave i rasta prslina u zavarenim spojevima čelika povišene čvrstoće potrebno je da se utvrdi kako heterogenost strukture i mehaničkih svojstava različitih zona ZUT utiče na pojavu i rast prslina i da se kvantitativno izraze parametri koji kontrolišu lokalno deformacijsko ponašanje i rast prsline [2]. Kao



parametar mehanike loma u analizi je korišćen faktor intenziteta napona. Analizom dobijenih rezultata ocenjena je sklonost ka krtom lomu konstituenata zavarenog spoja, što se uspešno može primeniti i za ocenu sigurnosti zavarene konstrukcije.

Definitivna potvrda primenjene metodologije i realno ispitivanje kritičnih delova zavarenog spoja je moguće primenom simulacije termičkog ciklusa zavarivanja. Poznavanjem parametara osnovnog metala i kritičnih područja zone uticaja toplote može se uspešno oceniti sigurnost konstrukcije. Pri tom je od značaja identifikacija i dobro poznavanje

strukture i osobina kritičnih položaja ZUT, što se može postići simuliranjem [3].

## 2. EKSPERIMENTALNI DEO

### 2.1. Materijal

Režim simulacije ZUT i njegov uticaj na žilavosne karakteristike (parametre mehanike loma) je analiziran kod čelika povišene čvrstoće NIOMOL 490K, proizvedenog u "Železarni ACRONI" Jesenice [4]. Hemijski sastav ispitivanog čelika je dat u tab. 1, a mehanička svojstva u tab. 2.

Šarža	Hemijski sastav, mas. %									
	C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	V	Nb	Al
21 5422	0,10	0,41	0,57	0,008	0,002	0,41	0,65	0,01	0,064	0,042

Tabela 1. Hemijski sastav ispitivane šarže čelika NIOMOL 490K [4]

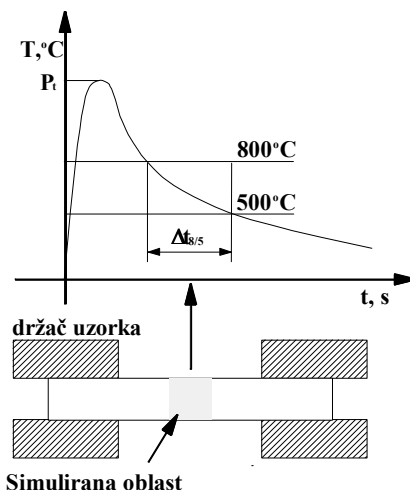
Šarža	Pravac ispitivanja	Napon tečenja, $R_{p0,2}$ , MPa	Zatezna čvrstoća, $R_m$ , MPa	Izduženje A, %	Energija udara, ISO-V, J
21 5422	L - T	553	688	24,5	231, 243, 250
	T - L	545	682	21,9	238, 243, 245

Tabela 2. Mehanička svojstva ispitivanog čelika NIOMOL 490K [4]

### 2.2. Simulacija zone uticaja toplote

Izrada složenih i visoko odgovornih zavarenih konstrukcija podrazumeva znatno oštrije kriterijume prihvatljivosti grešaka. Istovremeno, zbog značaja ovakvih konstrukcija, još pre par decenija je jasno prepoznata potreba za pouzdanijim utvrđivanjem stvarnih mehaničkih svojstava svih zona unutar zone uticaja toplote - ZUT. U tom cilju koriste se

simulatori zavarivanja. Simulator zavarivanja je uređaj kojim se postiže kontrolisano zagrevanje i hlađenje, slično onom pri zavarivanju. Simulacijom se na srednjem delu uzorka, maksimalnih dimenzija 15 x 15 x 120mm, dobije mikrostrukturno područje širine oko 10 mm, koje odgovara području ZUT, što omogućava utvrđivanje osnovnih mehaničkih svojstava simuliranog područja [5]. Shematski prikaz simulacije ZUT je dat na sl. 1

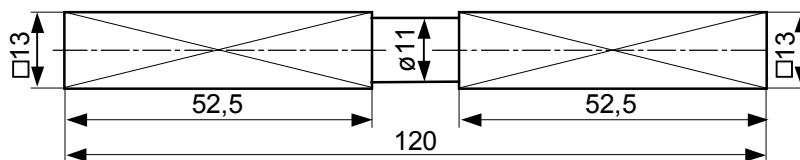


Slika 1. Shematski prikaz simulacije zavarenog spoja



Pri zagrevanju tokom simulacije dobijaju se važni su podaci toplotnog ciklusa o maksimalnoj temperaturi i vremenu hlađenja  $\Delta t_{8/5}$ , koje predstavlja vreme za koje se uzorak ohladi sa 800°C na 500°C. Sam postupak simulacije ZUT je urađen na savremenom simulatoru termičkog

ciklusa "SMITWELD. Za simulaciju su korišćene epruvete čija je geometrija data na sl. 2. Pre zagrevanja se na sredini epruvete navari termopar Cr - NiCr, pomoću koga se prati promena temperature tokom simulacije.



Slika 2. Shema epruvete za simulaciju ZUT

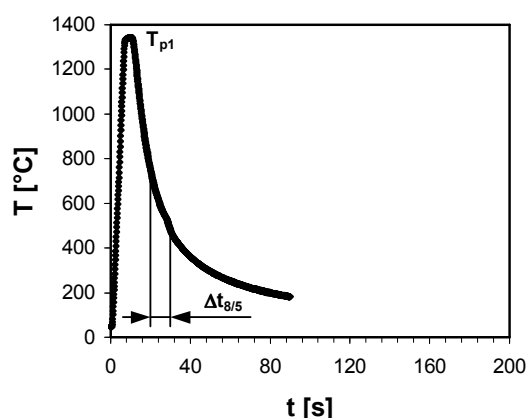
Simulacija termičkih uslova kod zavarivanja je napravljena primenom termičkih ciklusa na uzorcima osnovnog materijala. Parametri simulacije su dati u tab. 3:

Oznaka uzorka	Brzina zagrevanja $\dot{T}$ , °C/s	Termički ciklus, $T_{p1}$ , °C	Vreme hlađenja $\Delta t_{8/5}$ , s	Termički ciklus, $T_{p2}$ , °C	Vreme hlađenja $\Delta t_{5/3}$ , s
A <sub>a</sub>	200	1343	10,6	–	–
A <sub>b</sub>	200	1344	10,3	–	–
A <sub>c</sub>	200	1343	10,4	–	–
I <sub>a</sub>	200	1342	10,2	774	20,7
I <sub>b</sub>	200	1344	10,3	774	20,6
I <sub>c</sub>	200	1378	10,5	776	20,4

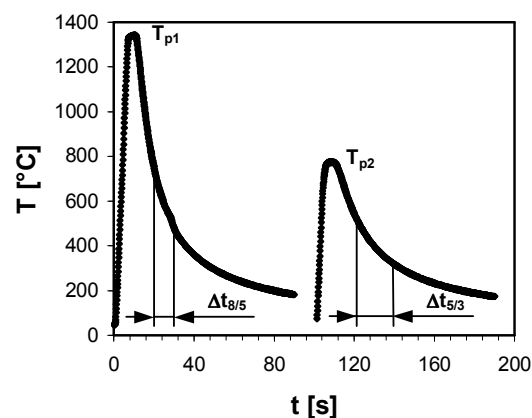
Tabela 3. Parametri simulacije

Shematski prikaz termičkog ciklusa jednoproznog

ZUT je prikazan na sl. 3, a dvoproznog ZUT na sl. 4.



Slika 3. Termički ciklus jednoproznog ZUT



Slika 4. Termički ciklus dvoproznog ZUT

### 2.3. Ispitivanja mehanike loma

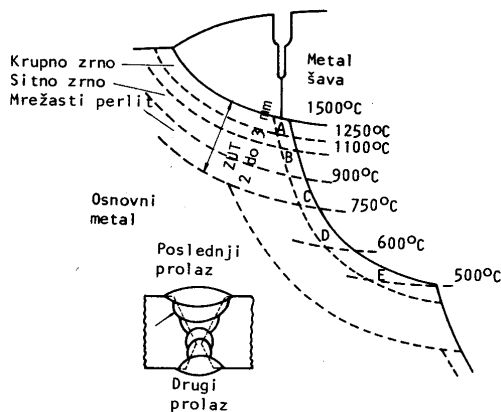
Ispitivanje epruveta sa prslinom pokazuje lokalno ponašanje materijala oko vrha prsline dovoljno homogenog materijala epruvete, tako da se rezultati lokalnog ponašanja mogu tretirati globalno,

odnosno da se mogu neposredno preneti na odgovarajuću konstrukciju. Imajući u vidu heterogenu strukturu zavarenog spoja, ovakav postupak ispitivanja nije dovoljno pouzdan, jer vrh



prslina pri razvoju loma može da prolazi kroz područja različitih struktura i mehaničkih osobina zavarenog spoja. Zbog toga je potrebna analiza zavarenog spoja sa aspekta primene mehanike loma. Složenost u mikrostrukturnom i geometrijskom pogledu pri određivanju žilavosti loma i drugih mehaničkih osobina u ZUT ilustruje sl. 5, na kojoj je

prikazan niskolegirani, termomehanički obrađeni čelika povišene čvrstoće u višeprolaznom šavu. Po pravilu, kod spojeva ovih čelika se u ZUT pod dejstvom ponovljenih termičkih ciklusa i plastičnih deformacija, u uzanom pojasu ZUT uz liniju stapanja pojavljuju mesta smanjene žilavosti loma (naznačena mesta A i E na sl. 5).



Slika 5. Presek kroz ZUT šava niskolegiriranog čelika povišene čvrstoće [5]

Kada je u pitanju preporuka da se pri direktnom određivanju žilavosti loma u kritičnoj zoni spoja uzme najniža izmerena vrednost, sl. 5. ilustruje niz teškoća sa kojima je ovakvo određivanje skopčano. Kada je, kao kod čelika, ZUT kritično područje u kome se najčešće pojavljuju prsline, njegova veličina od 2-3 mm u osnovnom metalu uz liniju stapanja ukazuje na eksperimentalne teškoće postavljanja vrha početne zamorne prsline na kritično mesto. Praktična istraživačka iskustva pokazuju da je i uz najbrižljiviji rad potrebno ispitati desetine uzoraka da bi se uspešno locirao vrh prslina u veoma uzana kritična područja i pouzdano odredile stvarne minimalne vrednosti žilavosti loma u ZUT, što drugim rečima ograničava stepen iskorišćenja na najviše 10-20% ispitanih uzoraka [5].

Sledeća teškoća u određivanju žilavosti loma je trag rasta zamorne prsline, čiji je vrh lociran u ZUT (područje A na sl. 5), jer ona će da prodiere u područja ZUT različitih mikrostrukturnih i mehaničkih karakteristika. Različite karakteristike u odnosu na ravan rasta prslina rezultiraju u asimetričnom formiranju plastične zone ispred vrha prslina. Imajući još u vidu da stvarne vrednosti nekih mehaničkih osobina, npr. napona tečenja, ne mogu direktno da se odrede za usko krto područje A i E u ZUT, očigledno je da su narušene uslovi za određivanje vrednosti parametara mehanike loma po postupcima za homogene materijale.

Zbog opisanih ograničenja različite metode mehanike loma nisu podjednako primenljive za

određivanje najniže vrednosti žilavosti loma u zavarenom spoju. Ako se ima u vidu da je problem postavljanja vrha zamorne prslina na kritično mesto u ZUT zajednički za sve metode, onda bi kriterijum za ocenu primenljivosti pojedinih metoda mogao da bude njihova sposobnost da mere žilavost loma neposredno ispred vrha prslina, nezavisno od uticaja materijala na većim rastojanjima od tzv. procesne zone na vrhu prslina. U tom pogledu je  $K_{Ic}$ , kao linearno-elastični pokazatelj žilavosti loma, u prednosti, jer su uslovi ograničene plastične zone pri njegovom određivanju oštiri nego kod elasto-plastičnih pokazatelja. U realnim situacijama, pri ispitivanju šavova, ovi oštri uslovi retko mogu da se ispune, zato što je u pitanju najčešće čelik relativno visoke žilavosti loma. Kontrola veličine plastične zone povećanjem dimenzija uzorka je teško ostvarljiva, prvo zato što bi kod mekših čelika debljina uzorka bila višestruko veća od debljine konstrukcijskih elemenata, a zatim što se kod uzoraka isečenih iz šavova sa povećanjem dimenzija dodatno komplikuje postavljanje vrha prslina u kritičnu zonu [5].

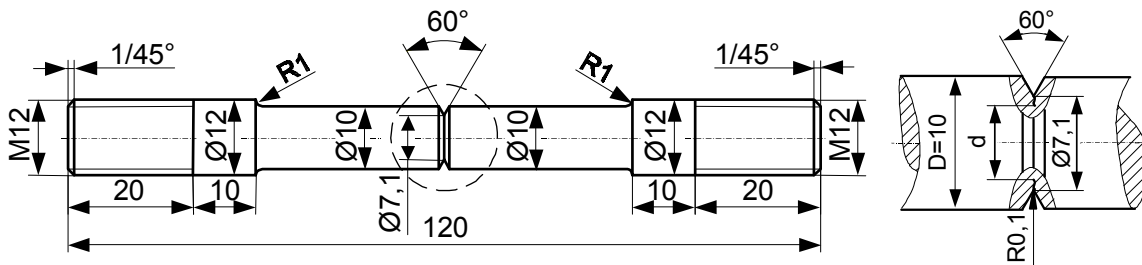
Prema tome, heterogenost strukture i mehaničkih osobina zavarenih spojeva (različitih uslova simulacije) usložnjava problem, pre svega u zavisnosti od položaja vrha zamorne prslina i osobina područja kroz koja se lom razvija. Uzorak sa simuliranom zonom je obrađen na konačne dimenzije, sl. 6. Ovaj tip epruvete ne spada u grupu standardnih epruveta, ali je u saglasnosti sa standardom BS7448 [6,7].



Kako zahtevi za ispunjenje uslova ravnog stanja deformacije:

$$B \geq 2,5 \cdot \left( \frac{K_{Ic}}{R_{p0,2}} \right)^2 \quad (1)$$

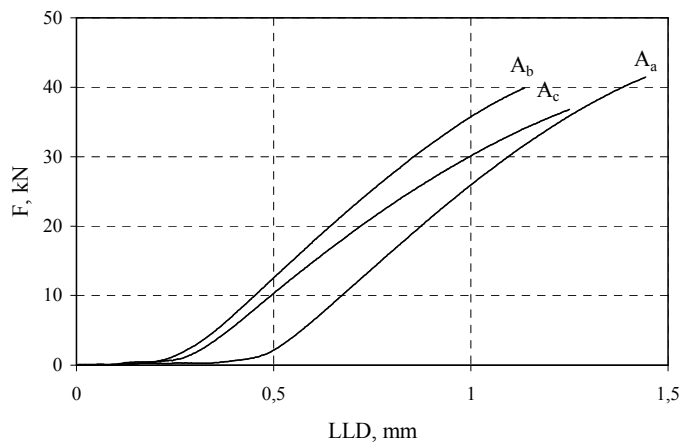
nisu zadovoljeni, umesto parametra linearno-elastične mehanike loma definisane standardom ASTM E399,  $K_{Ic}$ , određen je kritični faktor intenziteta napona  $K_c$ .



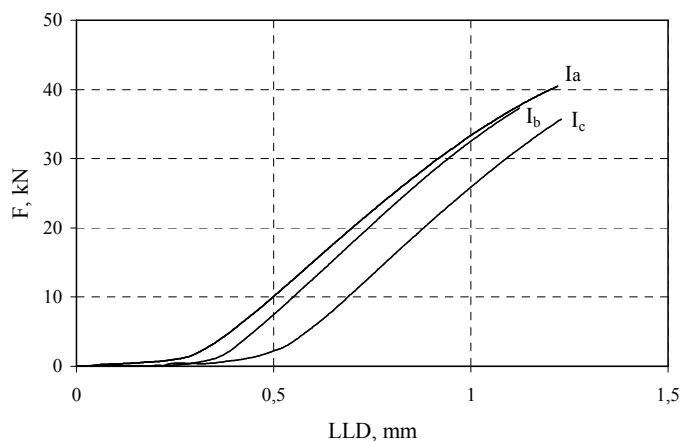
Slika 6. Epruveta za određivanje faktora intenziteta napona  $K_c$

Prema zahtevima standarda BS7448 Part-2, prvo se pristupilo pripremi epruvete, odnosno stvaranju zamorne prslina. Zamorna prslina je potrebna da bi se obezbedili uslovi ravne deformacije, jer se oko vrha zamorne prslina može ostvariti željeno polje napona na reproduktivnan način, ali pod uslovom da su pri zamaranju poštovani odgovarajući uslovi.

Ispitivanje epruveta je izvedeno na sobnoj temperaturi na elektromehaničkoj kitalici SCHENCK TREBEL RM 100, u kontroli hoda. Tipične krive zavisnosti sile  $F$  i pomeranja napadne tačke sile (load-line displacement) LLD date su na sl. 7 za epruvete gde je simuliran jednoprolazni ZUT, i na sl. 8 za epruvete gde je simuliran dvoprolazni ZUT.



Slika 7. Dijagram sila  $F$  – pomeranje napadne tačke sile LLD za jednoprolaznu ZUT

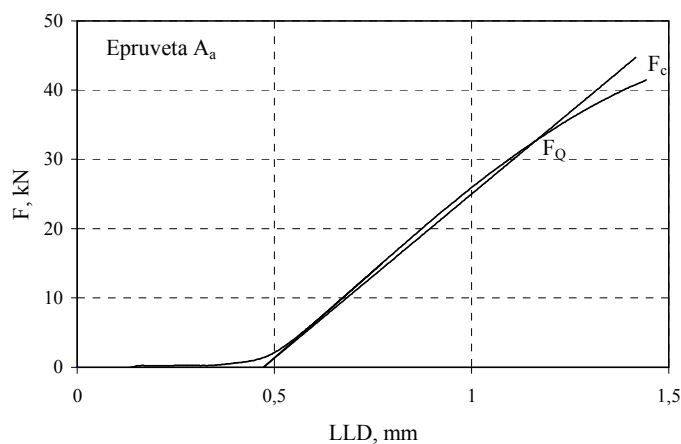


Slika 8. Dijagram sila  $F$  – pomeranje napadne tačke sile LLD za dvoprolaznu ZUT

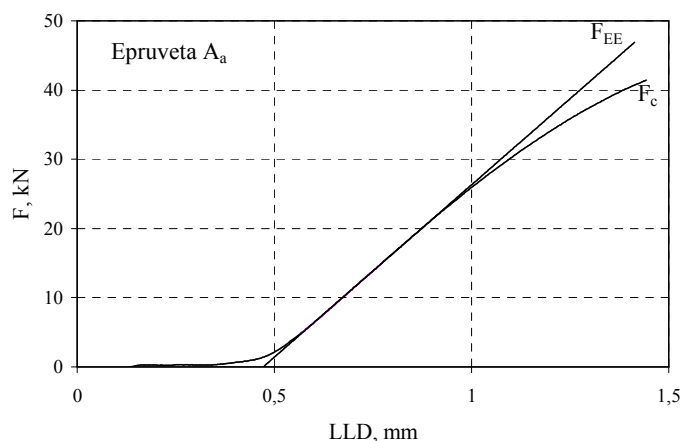


Metodologija određivanja kritične (maksimalne) sile  $F_c$ , prethodne sile  $F_Q$  i sile ekvivalentne energije  $F_{EE}$ , potrebne za izračunavanje kritičnog faktora intenziteta napona,  $K_c$ , prethodnog faktora

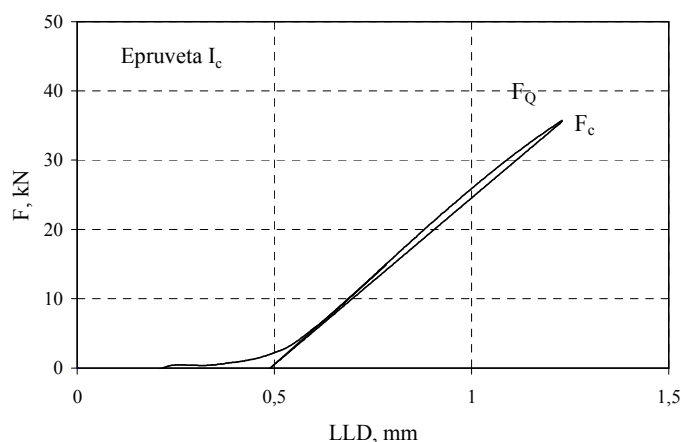
intenziteta napona  $K_Q$ , i faktora intenziteta napona pri sili ekvivalentne energije  $K_{EE}$ , je prikazana na sl. 9 i 10 za jednoprolazni ZUT (epruveta  $A_a$ ) i sl. 11 i 12 za dvoprolazni ZUT (epruveta  $I_a$ ).



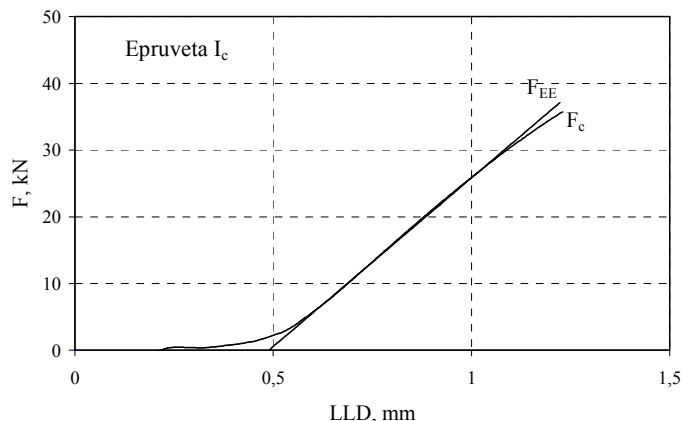
Slika 9. Jednoprolazni ZUT (epruveta  $A_a$ ), za vreme eksperimenta registrovani diagram sa prekidom zbog loma pri sili  $F_c$ , postupak određivanja pokusnog opterećenja  $F_Q$  na preseku krive ispitivanja i prave dobijene smanjenjem početnog nagiba krive ispitivanja za 5 %



Slika 10. Jednoprolazni ZUT (epruveta  $A_a$ ), za vreme eksperimenta registrovani diagram sa prekidom zbog loma pri sili  $F_c$ , postupak određivanja merodavne sile  $F_{EE}$  za proračun ekvivalentne energije na pravoj sa prvobitnim nagibom



Slika 11. Dvoprolazni ZUT (epruveta  $I_c$ ), za vreme eksperimenta registrovani diagram sa prekidom zbog loma pri sili  $F_c$ , postupak određivanja pokusnog opterećenja  $F_Q$  na preseku krive ispitivanja i prave dobijene smanjenjem početnog nagiba krive ispitivanja za 5 %



Slika 12. Dvoprolazni ZUT (epruveta  $I_c$ ), za vreme eksperimenta registrovani diagram sa prekidom zbog loma pri sili  $F_c$ , postupak određivanja merodavne sile  $F_{EE}$  za proračun ekvivalentne energije na pravoj sa prvobitnim nagibom

Dobijeni rezultati određivanja kritičnog faktora

intenziteta napona simuliranih zona ZUT su dati u tab. 4.

Oznaka epruvete	$A_a$	$A_b$	$A_c$	$I_a$	$I_b$	$I_c$
Maksimalna sila, $F_c$ , kN	41,46	39,9	36,8	40,47	37,31	35,75
Prethodna sila, $F_Q$ , kN	32,59	32,27	24,17	37,58	36,47	35,75
Sila ekvivalentne energije, $F_{EE}$ , kN	46,88	44,46	42,9	44,2	39,15	37,15
Stvarni prečnik d, mm d	6,08	6,02	6,25	6,35	6,13	6,37
Nominalni prečnik D, mm D	10	10	10	10	10	10
$\alpha$	0,608	0,602	0,625	0,635	0,613	0,637
$f(\alpha)$	0,46	0,46	0,45	0,45	0,46	0,45
$K_Q$ , MPa $m^{1/2}$	50,17	50,56	35,42	53,51	55,33	50,61
$K_{EE}$ , MPa $m^{1/2}$	72,17	69,65	62,87	62,93	59,40	52,59
$K_c$ , MPa $m^{1/2}$	63,82	62,51	53,93	57,62	56,61	50,61

Tabela 4. Rezultati određivanja parametara mehanike loma

### 3. DISKUSIJA

Kako uslovi ravnog stanja deformacije nisu zadovoljeni dobijene vrednosti kritičnog faktora intenziteta napona  $K_c$  nisu karakteristika materijala, ali predstavljaju upotrebljivu vrednost ocene ponašanja materijala u prisustvu greške tipa prsline [8]. Primenom osnovne formule mehanike loma

$$K_{Ic} = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a_c} \quad 2.$$

te unošenjem vrednosti konvencionalnog napona tečenja,  $R_{p0,2} = \sigma$ , izračunavaju su približne vrednosti za kritičnu dužinu prsline,  $a_c$ . Očigledno je da će dozvoljeni napon, koji je manji od konvencionalnog napona tečenja dati veće vrednosti za kritičnu dužinu prsline. To znači da ispitivani materijal može imati u eksploataciji prslinu

do nivoa izračunatih dužina, bez opasnosti od pojave krtog loma. Zbog toga, a u cilju sigurnog otkrivanja prsline pre nego što dostigne kritičnu dužinu, treba iskoristiti pogodne postupke ispitivanja bez razaranja, pogotovo imajući na umu da je debljina materijala od koga su izrađene posude pod pritiskom veće od kritične dužine prsline.

Važno je napomenuti da se dobijene vrednosti kritične dužine prsline,  $a_c$ , na osnovu zavisnosti 2, odnose na uslove ravne deformacije i konstrukcije konačnih debljina, i da se za svaki konkretan slučaj mora korigovati u odnosu na stvarnu debljinu materijala konstrukcije.



#### 4. ZAKLJUČAK

Na osnovu eksperimentalno dobijenih rezultata ispitivanja epruveta sa zarezom tipa R-Bar sa simuliranim jednoproložnim i dvoproložnim ZUT, može se zaključiti da su vrednosti kritičnog faktora intenziteta napona  $K_{Ic}$  za ovu grupu materijala relativno niske (po pravilu vrednosti  $K_{Ic}$  karakteristike materijala je još niža) i predmetni čelik svrstavaju u kategoriju materijala slabo otpornih na prisustvo greške tipa prsline, I da one predstavljaju značajan podatak kod izbora parametara zavarivanja predmetog čelika NIOMOL 490K.

#### 5. LITERATURA

- [1] R. Jovičić, M.M. Algoal, U. Tatić, O. Popović, U. Lukić, M. Burzić, Storage Tank Integrity Assessment after the Removal of Weld Cracks, Structural Integrity and Life, Vol. 14, No. 1, pp. 35-38, 2014.
- [2] I. Čamagić, Z. Burzić, A. Sedmak, N. Vasić, B. Ćirković, M.M. Algoal, Influence of Mechanical Properties and Microstructural Heterogeneity of Welded Joint Constituents on Tensile Properties and Fracture Toughness at Plane Strain,  $K_{Ic}$ , Structural Integrity and Life, Vol. 14, No. 1, pp. 45-49, 2014.
- [3] D. Veljić, N. Radović, A. Sedmak, M. Perović "Tehnologija zavarivanja aluminijumskih legura postupkom zavarivanja trenjem alatom", Zavarivanje i zavarene konstrukcije, Vol. 42, No 1 str 12 2010
- [4] "High Strength Low Alloyed (HSLA) Steels", ACRONI Jesenice, 2002.
- [5] A. Radović, "Zavarljivost i ispitivanje zavarljivosti", Treća međunarodna letnja škola mehanike loma, Aranđelovac, str. 211-225, 1984.
- [6] BS 7448 - Part 1:2006. "Fracture mechanics toughness tests - Methods for determination of  $K_{Ic}$ , critical CTOD and critical J values of metallic materials"
- [7] BS 7448 - Part 2:2006. "Fracture mechanics toughness tests - Methods for determination of  $K_{Ic}$ , critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials"
- [8] Z. Burzić, S. Sedmak, M. Manjgo: Eksperimentalno određivanje parametara mehanike loma zavarenih spojeva, Integritet i Vek Konstrukcija, No. 2, str. 97, 2001.