



G. Adžiev\*, A. Sedmak\*\*, V. Gliha\*\*\*, T. Vuherer\*\*\*

## UTICAJ TIPA PRSLINE NA LOMNU ŽILAVOST ZUT MIKROLEGIRANOG ČELIKA

### CRACK TYPE EFFECT ON FRACTURE TOUGHNESS OF HAZ MICROALLOYED STEELS

#### Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK/UDC: 620.178.2:669.15-194  
620.178.2:62-112.81

Rad primljen / Paper received:  
decembar 2003.

**Ključne reči:** lomna žilavost, CMOD, kriva otpornosti, korelacioni faktor, ZUT

#### Izvod

Izvršeno je eksperimentalno ispitivanje lomne žilavosti malih nesimuliranih i simuliranih SENB epruveta mehanike loma sa erozimatnom i zamornom prslinom. Uspostavljena je neophodna korelacija za korekciju rezultata ispitivanja realnog zavarenog spoja sa erozimatnom prslinom u ZUT [1]. Osnovni materijal je mikrolegirani fino-zrni čelik povišene čvrstoće, kvaliteta T StE 420 prema DIN 17102, sa titanom kao legirajućim elementom. Uzorci osnovnog materijala i uzorci sa simuliranim mikrostrukturama ZUT i to: jednoprolazni sa termičkim ciklusom od 1350 °C, i dvoprolazni sa drugim ciklusom od 780 i 960 °C, ispitani su na +20 °C.

#### UVOD

Za eksperimentalno istraživanje, određivanje lomne žilavosti standardima je predviđeno na epruvetama standardnih dimenzija i standardnom prslinom dobijenoj zamaranjem. Međutim, kod zavarenih spojeva lociranje vrha prsline zamaranjem praktično je nemoguće izvesti kada treba da bude u tačno određenom području ZUT, koje je veoma malih dimenzija i volumena, kao i nepravilne geometrije. Zbog toga, za precizno lociranje vrha prsline u tačno određeno područje ZUT, eksperimentalne erozimatne prsline su nezamenljive.

U okviru ovog istraživanja sprovedena su eksperimentalna ispitivanja malih nesimuliranih i simuliranih SENB epruveta za mehaniku loma za erozimatnom i zamornom prslinom, radi procene korelacije za korekciju rezultata dobijenih ispitivanjem realnog zavarenog spoja sa erozimatnom prslinom u ZUT. Cilj istraživanja je određivanje lomne žilavosti karakterističnih mikrostrukture ZUT i osnovnog materijala, kao i uticaja tipa eksperimentalne prsline, odnosno, koliko je zamorna prsline konzervativnija u odnosu na erozimatnu prslinu, čime bi se uspostavila korelacija između ova dva pristupa za konkretnu vrstu čelika. Radi se o fino-zrnom mikrolegiranom čeliku

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

\* Dr Gorgi Adžiev, Mašinski fakultet, Karpoš II bb, Skopje Makedonija

\*\* Dr Aleksandar Sedmak, Mašinski fakultet, 27. marta, Beograd

\*\*\* Dr Vladimir Gliha i mr Tomas Vuherer, Fakultet za strojništvo, Smetanova, Maribor, Slovenija

**Key words:** Fracture toughness, CMOD, resistance curve, factor of correlation, HAZ.

#### Abstract

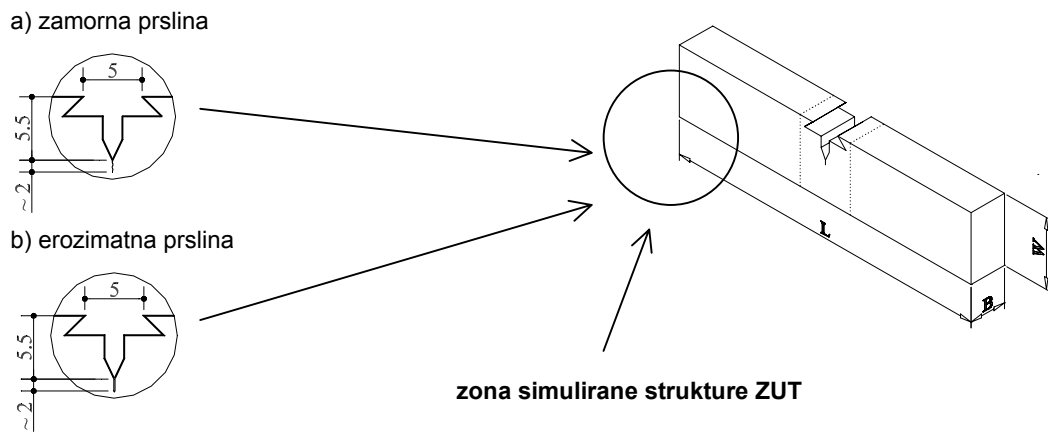
Fracture toughness test of SENB specimens with eroded and fatigue precracked cracks has been performed. Correlation factor between fatigue precracked and eroded crack is introduced for correction of the results of test performed on real welded joint with eroded crack in the HAZ [1]. Four materials are investigated, base metal, is highstrength microalloyed fine-grained steel, class T StE 420, with titanium as basic alloy element, as well as three simulated HAZ's microstructures: single cyclic at 1350 °C, and double cyclic at 780 and 960 °C, tested on +20 °C.

povišene čvrstoće, sa sledećim zateznim osobinama:  $R_{eH} = 420$  MPa,  $R_m = 604$  MPa i  $A_5 = 25$  %. Karakterističan je sadržaj ugljenika (0.2 %) koji je relativno visok za ovaj tip čelika što doprinosi povećanju čvrstoće, i titana (0.12 %), koji doprinosi usitnjavanju zrna i postizanju povoljnog odnosa čvrstoće i plastičnosti.

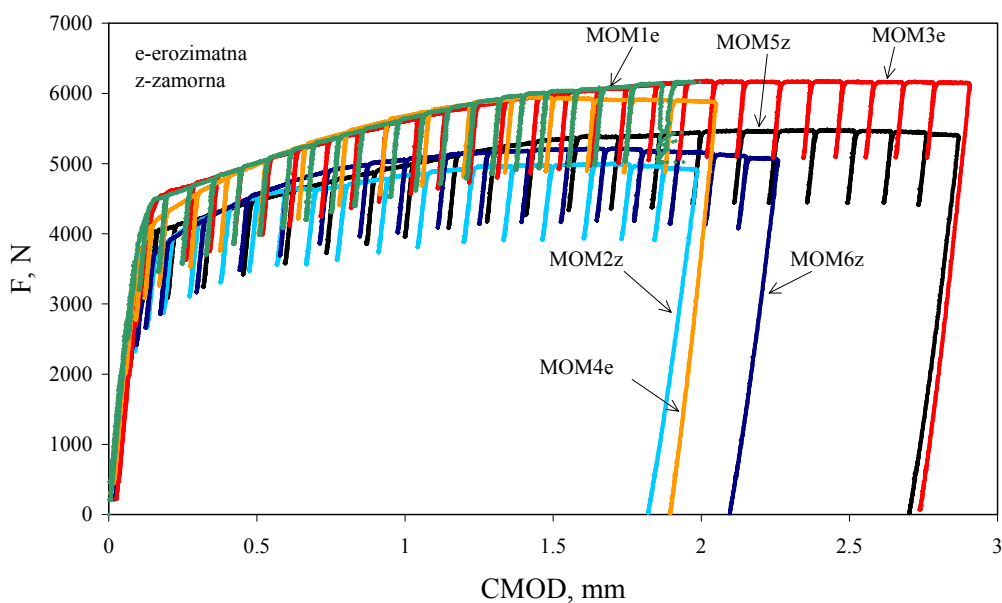
#### ISPITIVANJE LOMNE ŽILAVOSTI I DISKUSIJA

Izrada zarez a i prsline epruveta, metode ispitivanja, proračun i tumačenje dobijenih rezultata je urađeno u saglasnosti ASTM E 1820 / E 1152 / E 1290 / E 1737. [3-6]. Dimenzije epruveta su sledeće:  $B = 8.0$  mm,  $W = 14.8$  mm,  $L = 70.0$  mm [1], (sl. 1).

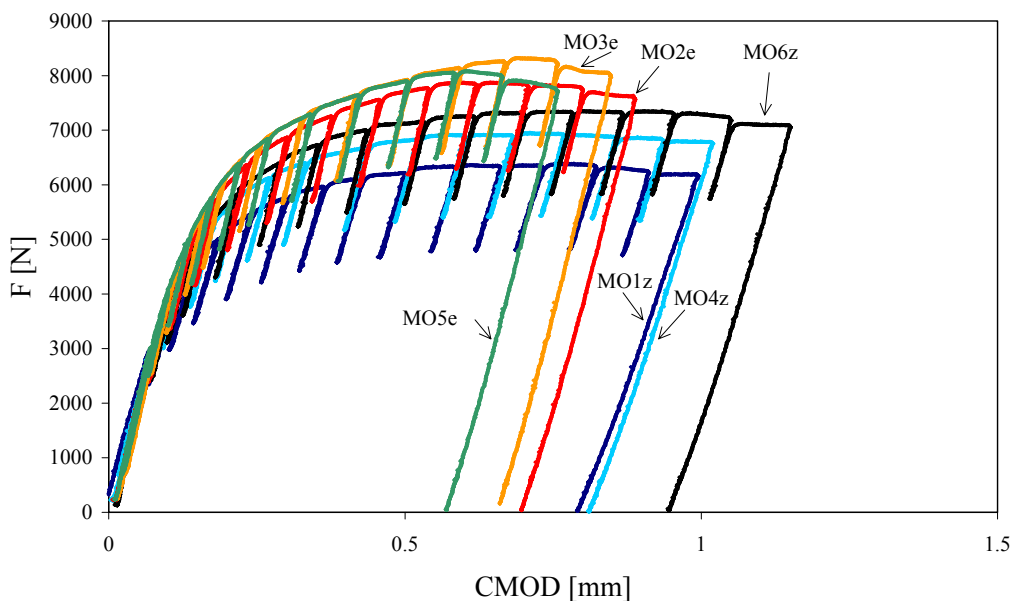
Ispitivanje svih epruveta je urađeno saglasno ASTM E 1820-99a, pri čemu je primenjena tehnika jediničnog uzorka (singlespecimen technique) elastičnog popuštanja, a realizovano je na uređaju tipa Smitweld TTU 2002. Korišćen je CMOD davač kao i linijski induktivni LVDT davač sile, pri čemu su kao izlazni signali zapisani sila i otvaranje prsline ( $F$ -CMOD). Na slikama 2 do 5 su prikazane  $F$ -CMOD krive za sve ispitivane materijale.



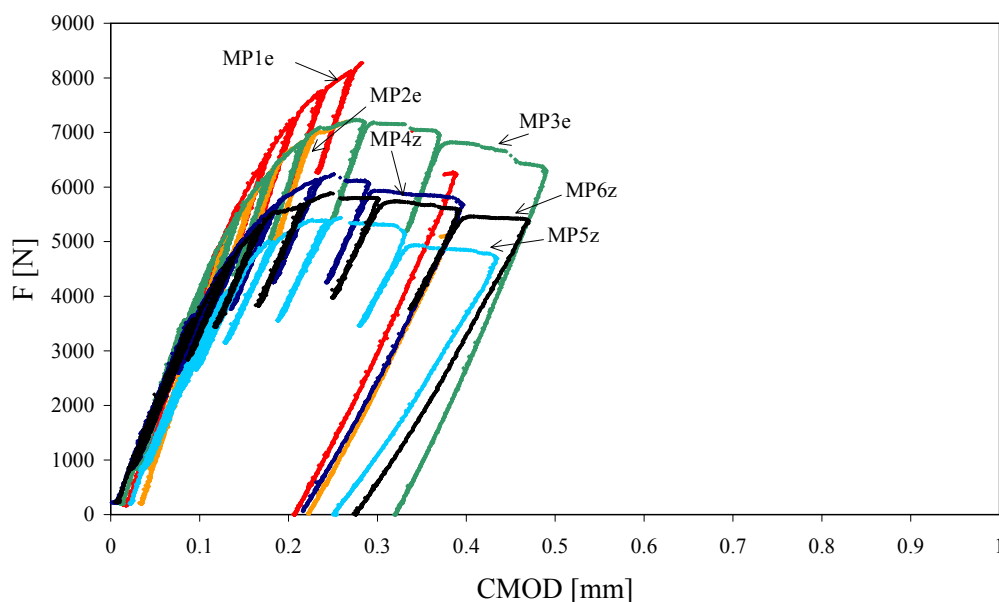
Slika 1. Oblik i dimenzije SENB epruvete



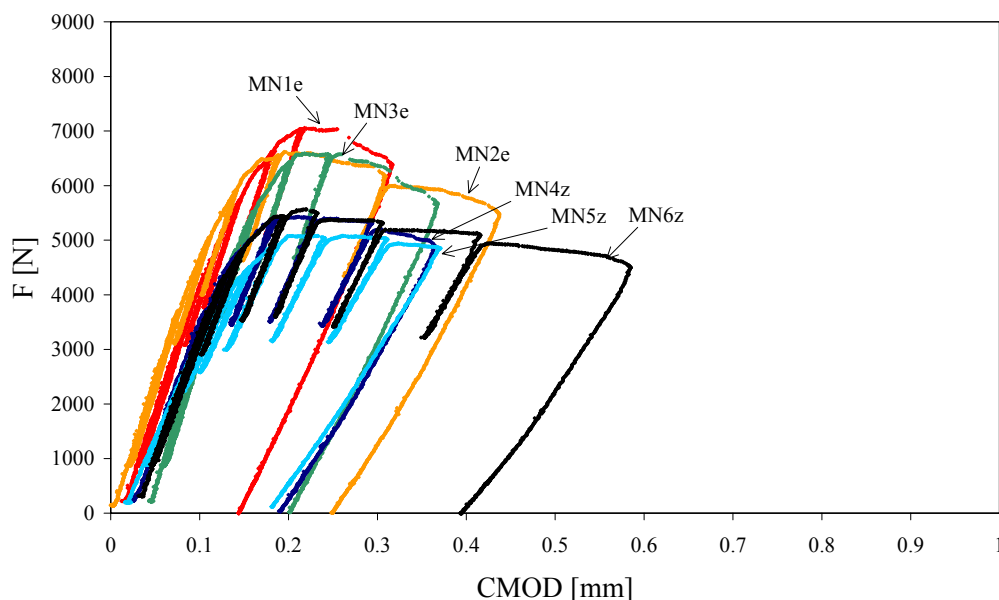
Slika 2. F-CMOD krive osnovnog materijala



Slika 3. F-CMOD krive za dvociklusnu 1350/960 °C finostrukturnu



Slika 4. *F-CMOD* krive za dvociklusnu 1350/780 °C grubozrnu strukturu



Slika 5. *F-CMOD* krive za jednociklusnu 1350 °C grubozrnu strukturu

Kao što se vidi sa eksperimentalnih krivi *F-CMOD*, ispitivanje epruveta od osnovnog materijala, kao i epruveta simulirane dvociklusne 1350/960 °C strukture pokazalo je izrazito nelinearno ponašanje sila-pomeranje koje prethodi nestabilnom lomu, što se očekivalo.

Kod simuliranih jednociklusnih (1350 °C) i dvociklusnih (1350/780 °C) grubozrnih struktura karakterističan je nestabilan rast prsline odmah nakon linearnog toka krive, praćen pojavom naglih skokova pomeranja, i opadanje opterećenja koje prethodi nestabilnom lomu, t.j. pop-in efektu. Kod krive dobijene za osnovni materijal (sl. 2) između epruvete sa simuliranom erozimatnom prslinom i epruvete sa zamornom prslinom vidljiva je razlika u veličini opterećenja pri

početku izraženih plastičnih deformacija i u maksimalno dostignutoj sili pre nestabilnog razvoja prsline.

Ista slika, ali sa manje izraženom razlikom, je i za dvociklusnu (1350/960 °C) fino-zrnu strukturu (sl. 3). Kod jednociklusne (1350 °C) i dvociklusne (1350/780 °C) grubozrne strukture, takođe postoji manja razlika između epruvete sa erozimatnom i zamornom prslinom, ali i izraženije rasturanje rezultata, što je svakako posledica krтости, tako da je teže konstatovati jasnu razliku.

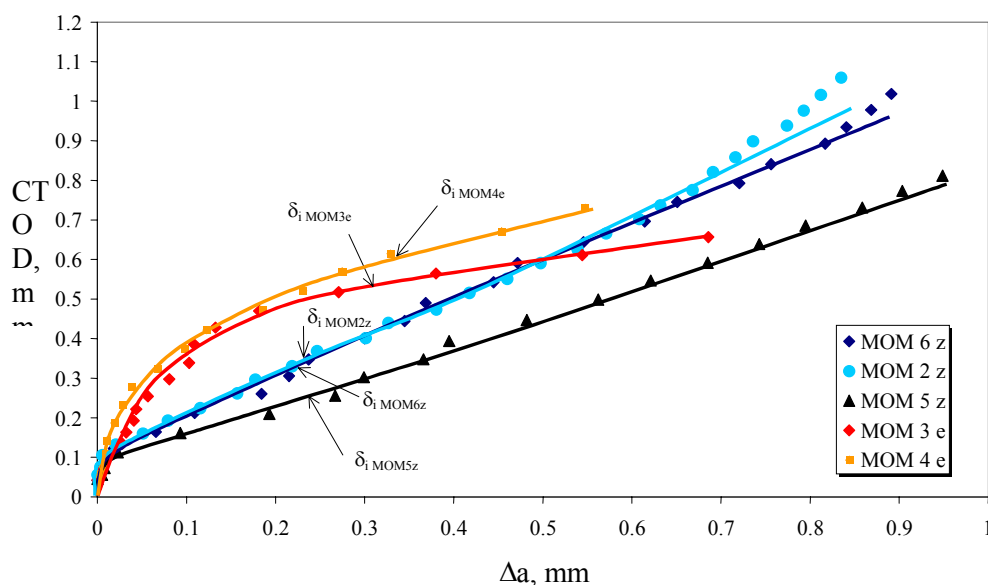
#### ODREĐIVANJE *CTOD* - R KRIVE

U okviru analize izvršen je i proračun  $\delta_i$  (*CTOD<sub>i</sub>*), i na slici 6 i 7 dati su i dijagrami *CTOD* u funkciji od prirasta

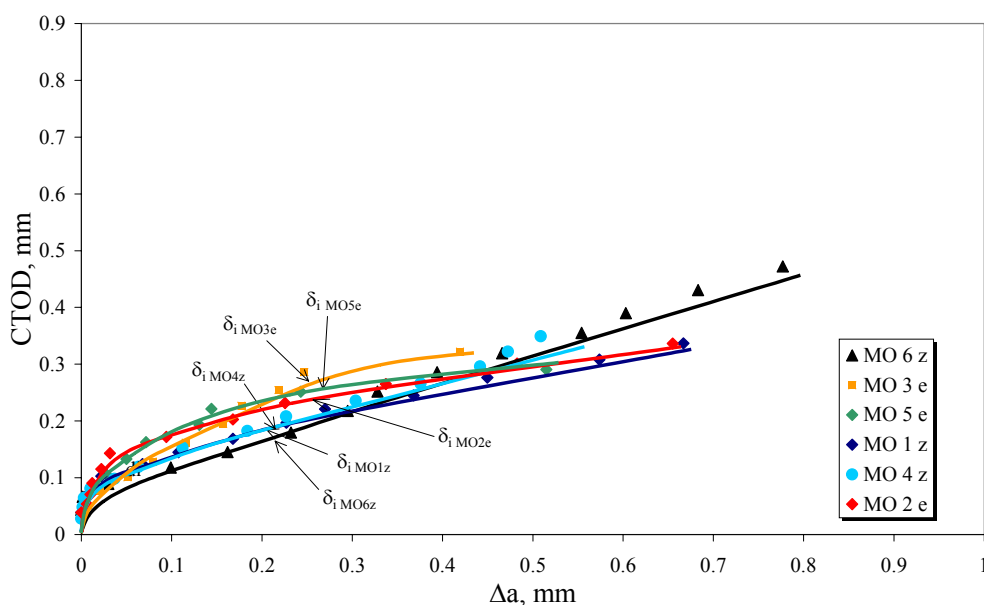


prslina  $\Delta a$  t.j.  $R$  - krive otpornosti, za osnovni materijal i dvociklusnu 1350/960 °C finostruktu za koje se dobio stabilan rast prslina. Za ostale strukture, s obzirom da se nije pojavio nikakav stabilan rast prslina,

određena je samo lomna žilavost. Otvaranje vrha prslina  $CTOD$  je proračunato standardnom procedurom prema ASTM E 1820.



Slika 6.  $CTOD$ - $R$  krive za epruvete od osnovnog materijala



Slika 7.  $CTOD$ - $R$  krive za epruvete od dvociklusne 1350/960 °C finostrukture

Za ostala dva materijala koji su isključivo krti, i kod kojih nije bilo stabilnog rasta prslina, dobilo se veće rasipanje rezultata s obzirom na to što se nije javio karakterističan proces elastične popustljivosti. Kod njih nije registrovan stabilni rast prslina već se nestabilni lom desio čak i pre  $\Delta a = 0.2$  mm, što se uzima kao kriterijum u odnosu na početak stabilnog ili nestabilnog rasta prslina, i u odnosu na šta se određuje karakter loma.

Iz analize  $CTOD$ - $R$  krivi i rezultata datih u tabeli 1, za osnovni materijal mogu se dati dve karakteristične

konstatacije. Prva je razlika u obliku krive  $CTOD$ - $\Delta a$  kod epruveta sa erozimatnom prslinom u odnosu na epruvete sa zamornom prslinom, i druga, razlika u karakterističnim vrednostima  $CTOD$  u funkciji od  $\Delta a$ .

Prva konstatacija je rezultat različite brzine razvoja prslina u odnosu na  $CTOD$ , ili obrnuto, promena  $CTOD$  u funkciji od  $\Delta a$ . Ovo važi za prvi stadijum stabilnog rasta prslina. Kod epruveta sa erozimatnom prslinom karakterističan je sporiji rast  $\Delta a$  u odnosu na  $CTOD$ , što je rezultat razvoja značajne plastične deformacije koja produžuje rast prslina.



Tabela 1.

Materijal	Oznaka	$a_0$ (mm)	tip loma	$\delta_{Ic} = \delta_{0.2}$ (mm)	$\delta_m$ (mm)	$\delta_c$ (mm)
Osnovni materijal	MOM1e	7.1653	stabilan rast	- <sup>*)</sup>	- <sup>*)</sup>	-
	MOM3e	7.1241	stabilan rast	0.533	0.518	-
	MOM4e	7.0481	stabilan rast	0.605	0.521	-
	MOM2z	7.63375	stabilan rast	0.351	0.821	-
	MOM5z	7.1853	stabilan rast	0.255	0.592	-
	MOM6z	7.2263	stabilan rast	0.325	0.893	-
1350 / 960 °C	MO2e	7.08156	stabilan rast	0.252	0.232	-
	MO3e	6.9353	stabilan rast	0.280	0.254	-
	MO5e	6.9644	stabilan rast	0.265	0.221	-
	MO1z	7.6706	stabilan rast	0.191	0.276	-
	MO4z	7.5025	stabilan rast	0.181	0.236	-
	MO6z	7.3	stabilan rast	0.175	0.319	-
1350 / 780 °C	MP1e	6.9153	nestabilan rast	-	-	0.052
	MP2e	6.7825	nestabilan rast	-	-	0.045
	MP3e	6.8822	nestabilan rast	-	-	0.053
	MP4z	7.55	nestabilan rast	-	-	0.041
	MP5z	7.85813	nestabilan rast	-	-	0.038
	MP6z	7.6819	nestabilan rast	-	-	0.040
1350 °C	MN1e	6.791	nestabilan rast	-	-	0.034
	MN2e	6.7266	nestabilan rast	-	-	0.032
	MN3e	6.72	nestabilan rast	-	-	0.029
	MN4z	7.2238	nestabilan rast	-	-	0.029
	MN5z	7.7713	nestabilan rast	-	-	0.031
	MN6z	7.221	nestabilan rast	-	-	0.031

Za razliku od ovih, kod epruveta sa zamornom prslinom brzina rasta  $\Delta a$  od  $CTOD$  je veća, što je rezultat manjeg radijusa u vrhu prsline, zbog čega je i koncentracija napona veća, a time je i kritično opterećenje za početak stabilnog rasta manje.

U vezi druge konstatacije može se reći da je kod svih epruveta od osnovnog materijala nastala inicijacija prsline t.j. njen stabilni rast. Ali, kod epruveta sa erozimatnom prslinom stabilni rast je započeo pri relativno većoj vrednosti  $CTOD$  t.j.  $\delta_{Ic} \approx 0,57\text{mm}$ , dok je kod epruveta sa zamornom prslinom stabilni rast započeo još pri  $\delta_{Ic} \approx 0,31\text{mm}$ . Ovo još jednom potvrđuje uticaj radijusa u vrhu prsline, i ako se uradi korelacija između zamorne i erozimatne prsline, dobija se:

$$\Delta\delta = \frac{\delta_{Ic \text{ zamorna}}}{\delta_{Ic \text{ erozimatna}}} = 0.544 \quad (1)$$

Takođe, kod epruvete sa erozimatnom prslinom inicijacija stabilnog rasta se desila neposredno pre ili nakon dostizanja platoa, t.j. maksimalne sile, što je rezultat značajne plastične deformacije koja se razvila oko vrha prsline, dok se stabilni rast kod epruvete sa

zamornom prslinom desio daleko pre dostizanja platoa sile. Ovo se može objasniti činjenicom da je veće zaobljenje u vrhu prsline omogućilo da se plastična deformacija proširi na veći volumen i time da rastereti naponsko stanje u zoni oko vrha. Kod zamorne prsline deformacija je bila koncentrisana oko malog volumena zbog čega je plastičnost u materijalu obuhvaćenom tom deformacijom bila ranije iscrpljena, i ranije je počeo rast prsline.

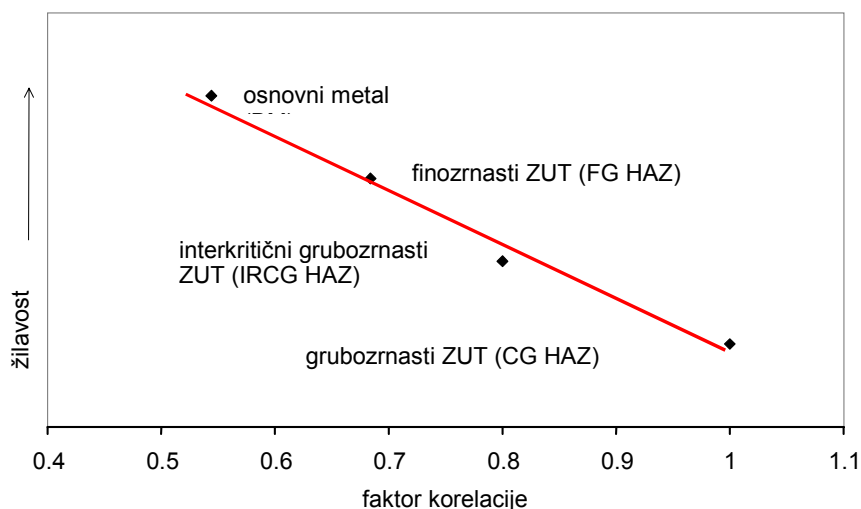
Kod epruvete za dvociklusnom 1350/960 °C finostrukturom mogu da se daju iste konstatacije, s tim što su razlike u veličini  $CTOD$  pri inicijaciji stabilnog rasta  $\delta_{Ic}$  manje, a manje su i razlike u obliku krive. Kod ovih, za epruvete sa erozimatnom prslinom  $\delta_{Ic} \approx 0.266 \text{ mm}$ , a kod epruvete sa zamornom prslinom  $\delta_{Ic} \approx 0.182 \text{ mm}$ . Ovo daje faktor korelacije  $\Delta\delta = 0,684$ . Ako se ovi rezultati uporede sa rezultatima ispitivanja udarne žilavosti [1, 2] koji ukazuju na visoku ukupnu energiju loma, ali manju sposobnost za apsorbovanje plastične deformacije u odnosu na osnovni materijal, jasno je da je ovde smanjen uticaj veličine radijusa i oblika vrha prsline.



Kod jednociklusnih 1350 °C i dvociklusnih 1350/780 °C grubozrnih struktura nije konstatovan nikakav stabilan rast prsline, što znači da je  $\Delta a = 0$ . Ipak, kod dvociklusne 1350/780 °C strukture nestabilni rast se desio pri  $\delta_c \approx 0.05$  mm za erozimatnu, t.j.  $\delta_c \approx 0.04$  mm za zamornu prslinu, i ovde može da se definiše približni faktor korelacije  $\Delta \delta = 0.8$ . Ova razlika ukazuje da se ipak kod simulirane grubozrne strukture, i pored toga što nema stabilnog rasta prsline, pre loma desila minimalno veća plastičnost oko vrha erozimatne prsline u odnosu na zamornu prslinu.

Kod jednociklusne 1350 °C strukture praktično nema razlike u ponašanju epruvete sa erozimatnom i zamornom prslinom. Lom se desio pri prosečnoj vrednosti CTOD od  $\delta_c = 0.032$  mm za erozimatnu prslinu, i  $\delta_c = 0.03$  mm za zamornu, što se i ne može da tretira kao razlika, jer i sam eksperiment sadrži određenu grešku. Minimalno veća vrednost  $\delta_c$  za dvociklusnu 1350/780 °C strukturu u odnosu na jednociklusnu 1350 °C strukturu poklapa se i sa dobijenim rezultatima za udarnu žilavost za +20 °C, t.j.:

$$\frac{\delta_{c1350}}{\delta_{c1350/780}} \approx \frac{A_{1350}}{A_{1350/780}} \approx 0.69 \quad (2)$$



Slika 8. Faktor korelacije u zavisnost od strukture (žilavosti)

Dobijena korelacija je veoma značajna za određivanje realne otpornosti loma zavarenog spoja sa prslinom u ZUT, zbog toga što je lociranje vrha prsline zamaranjem u specifičnom području ZUT nepouzdan pristup, zbog njegovih veoma malih dimenzija i volumena kao i nepravilne geometrije, te je umesto standardizovane zamorne prsline neophodna izrada erozimatne prsline.

#### LITERATURA

[1] G. Adžijev: Uticaj mismečinga na integritet zavarene konstrukcije sa prslinom; doktorska disertacija, Mašinski fakultet u Skoplju, 2003.

[2] G. Adžijev, A. Sedmak, V. Gliha, T. Vuherer: Uticaj termičkih ciklusa zavarivanja na žilavost ZUT mikrolegiranog čelika; Zavarivanje i zavarene konstrukcije, Vol. 3, pp 144-147, 2003.

[3] ASTM E 1290-93: Standard test method for crack-tip opening displacement (CTOD) fracture toughness measurement, American Society for testing and Materials, Philadelphia, 1993.

[4] ASTM E 1152-87: Standard test method for determining J-R curves, Philadelphia, 1987.

[5] ASTM E 1820-99a: Standard test method for measurement of fracture toughness, Philadelphia, 1999.

[6] ASTM E 1737-96: Standard test method for J-Integral characterization of fracture toughness, Philadelphia, 1996.