

**EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE PARAMETARA
MEHANIKE LOMA ZAVARENIH SPOJEVA**
**EXPERIMENTAL EVALUATION OF WELDMENT
FRACTURE MECHANICS PARAMETERS**

Stručni rad /Professional paper
UDK / UDC 621.791.05:539.42
Rad primljen / Paper received: 1.11.2001.

Adresa autora / Author's address:
Dr Zijah Burzić, Vojnotehnički institut VJ, Beograd
Prof. dr Stojan Sedmak, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd
Mersida Manjgo, Mašinski fakultet Univerziteta u Mostaru, BIH

Ključne reči

zavareni spoj, metal šava (MŠ), zona uticaja topote (ZUT), parametri mehanike loma

Rezime

U ovom radu su opisani standardni postupci određivanja parametara mehanike loma zavarenih spojeva ispitivanjem epruveta sa prslinom: žilavosti koma K_{Ic} , otvaranja prsline CTOD i J-integrala, nezavisnog od putanje. Kao primer, analizirana je žilavost loma određena ispitivanjem J integrala zavarenog spoja čelika Č4730 i uticaj heterogenosti strukture i mehaničkih osobina

UVOD

Mehanika loma je teorijskim i eksperimentalnim analizama ponašanja tela sa prslinom otvorila nove mogućnosti u obezbeđenju sigurnosti konstrukcija. Razvoj standarda za određivanje žilavosti loma pri ravnoj deformaciji, K_{Ic} omogućio je primenu linearno-elastične mehanike loma na realne konstrukcije, izrađene od materijala visoke čvrstoće. Uslov važenja tih ispitivanja je da je razvijena samo mala zona plastične deformacije oko vrha prsline pre nego što dođe do razvoja prsline i loma. Direktno određivanje žilavosti loma K_{Ic} i njegova primena su ograničeni samo na materijale visoke čvrstoće, jer je kod većine konstrukcijskih materijala oko vrha prsline razvijena velika zona plastične deformacije. Zbog toga su analizom plastičnog ponašanja materijala sa prslinom, kojom se bavi elasto-plastična mehanika loma, uvedena još sledeća dva parametra:

- otvaranje vrha prsline CTOD (δ), i
- konturni (J) integrala, nezavisani od putanje integracije.

U linearno-elastičnoj oblasti, kada su ispunjeni uslovi ravne deformacije, ova dva parametra predstavljaju kritične veličine (δ_{lc} i J_{lc}) i direktno su povezani sa veličinom K_{Ic} . Pogodnost primene parametara δ i J je u mogućnosti njihove analize i posle razvoja značajnih plastičnih deformacija, sa jedne strane, kao i u pogodnosti njihovog standardima propisanog eksperimentalnog određivanja, s druge strane.

Prve predloge standarda za određivanje žilavosti loma pri ravnoj deformaciji su objavili Američko društvo za ispitivanje i materijale (American Society for Testing and Materials - ASTM) - ASTM E399-70T, i Britanska institucija za standarde (British Standard Institution - BSI) - DD 3. Ovi su predlozi prihvaćeni pod naslovom "Standardni postupak ispitivanja žilavosti loma pri ravnoj deformaciji metalnih materijala" (Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials) kao ASTM E 399 – 83 /1/, odnosno BS

Keywords

welded joint, weld metal (WM), heat-affected-zone (HAZ), fracture mechanics parameters

Summary:

The paper describes standard procedures for the evaluation of fracture mechanics parameters of welded joint by testing cracked specimens: fracture toughness K_{Ic} , crack opening displacement CTOD and path-independent J-integral. As an example, K_{Ic} , obtained by testing J-integral for Č4730 welded joint and the effect of heterogeneity of microstructure and mechanical properties is investigated.

5447. Nešto kasnije je BSI objavio predlog standarda za određivanje otvaranja prsline DD 19 (Standard Test Method for Crack Opening Displacement), usvojen kao BS 5762.

Posle usvajanja ovih standarda, predložen je veliki broj standarda za ispitivanje epruveta sa prslinama. Među njima su najviše korišćeni:

- ASTM E 813 - 89: Standard Test Method for J_{lc} , A Measure of Fracture Toughness (Standardni postupak ispitivanja J_{lc} , mere žilavosti loma) /2/
- ASTM E 1152 - 87: Standard Test Method for Determining J-R Curve (Standardni postupak ispitivanja za određivanje J-R krive) /3/
- ASTM E 1290 - 89: Standard Test Method for Crack - Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement (Standardni postupak ispitivanja žilavosti loma merenjem otvaranja vrha prsline (CTOD))
- ASTM E 1737 - 96: Standard Test Method for J Integral Characterization of Fracture Toughness (Standardni postupak ispitivanja za određivanje žilavosti loma pomoću J integrala). Ovaj standard je objedinio dva standarda (E 813 i E 1152), koji su u najvećem delu podudarni, a na osnovu iskustva iz njihove primene u prošireno područje primene J integrala u karakterizaciji materijala.
- ASTM E 1820 - 99a: Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness (Standardni postupak ispitivanja za merenje žilavosti loma). Ovaj standard je objedinio standarde E 399, E 1290 i E 1737.

Slični pristup je usvojen i u Britanskim standardima, pa je u BS 7448 "Fracture mechanics toughness tests" /4, 5/ definisano ispitivanje žilavosti loma, odnosno u njegovom prvom u delu "Methods for determination of K_{Ic} , critical CTOD and critical J values of metallic materials" objedinjeni su postupci za određivanje K_{Ic} , kritičnog CTOD i kritične J vrednosti metalnih materijala. U drugom delu BS

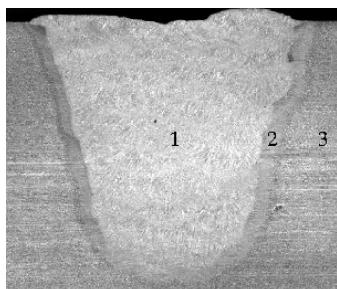
7448 "Methods for determination of K_{Ic} , critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials", koji je objavljen 1997. godine, propisuje se postupak ispitivanja mehanike loma zavarenih spojeva. U razradi su treći deo za određivanje dinamičke žilavosti loma i četvrti deo za određivanje krivih otpornosti.

Tendencija objedinjavanja standarda, zasnovana na istim oblicima epruvete i sličnom postupku ispitivanja, iskazana je i u pristupu koji je prihvaćen u Evropi.

Jugoslovenski standardi (JUS), koji se odnose na mehaniku loma, predloženi su znatno kasnije, oko 1990. godine. To su standardi JUS C.A4.083 - Mehanička ispitivanja materijala. Osnovni pojmovi i veličine u mehanici loma /6/ i JUS C.A4.084 - Mehanička ispitivanja. Ispitivanje žilavosti loma pri ravnoj deformaciji (K_{Ic}) /7/.

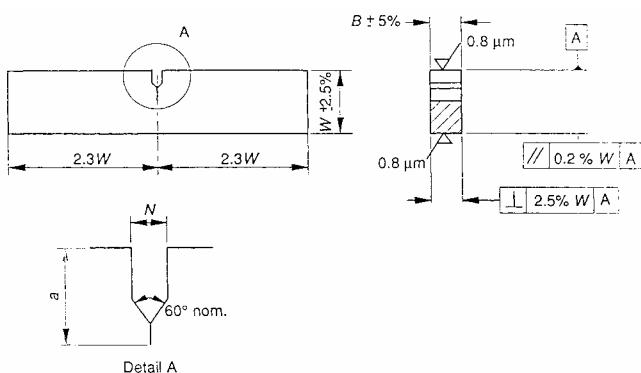
Ono što je za zavarene spojeve od posebnog značaja, je opšte prihvaćeno mišljenje da je u prisustvo prslina i drugih grešaka moguće, pa čak i neizbežno. Odatle i potiče veliki interes da se parametri mehanike loma primene na zavarene spojeve i konstrukciju. Međutim, postoje dva značajna problema u primeni parametri mehanike loma na analizu ponašanja zavarenih spojeva /8/

- Ograničena mogućnost otkrivanja grešaka u pogledu njihove veličine i položaja.
- Heterogenost mikrostrukture, sl. 1, i mehaničkih osobina zavarenog spoja.

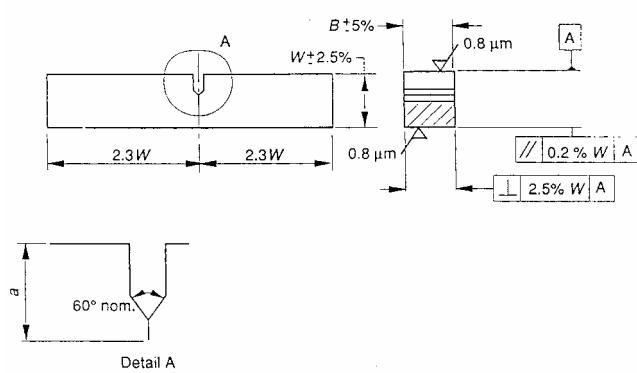


Slika 1. Makroskopski izgled zavarenog spoja [5]:
1 - MŠ, 2 - ZUT, 3 - OM

Prema tome, pouzdanost u proceni sigurnosti zavarenih spojeva nije dovoljno pouzdana, jer nema dovoljno podataka o greškama, a nije izvesno kako će se prsina razvijati prolazeći kroz različite strukture zavarenog spoja. Zbog toga je jedan od značajnih problema u ispitivanju uzorka sa prslinom iz zavarenog spoja lokacija vrha prsline /8, 9/.



a) pravougli presek



b) kvadratni presek

Slika 2. Epruveta za savijanje u tri tačke /2, 3/

S obzirom na različite mehaničke osobine, jasno je da će uslovi rasta prsline, čiji je vrh u različitim oblastima zavarenog spoja, biti različiti. Ove teškoće nisu prepreka eksperimentalnom određivanju žilavosti loma u kritičnim zonama zavarenog spoja ili zavarenog spoja kao celine, već se pre teškoća u tumačenju izmerenih vrednosti /9/.

ISPITIVANJA MEHANIKE LOMA ZAVARENIH SPOJEVA

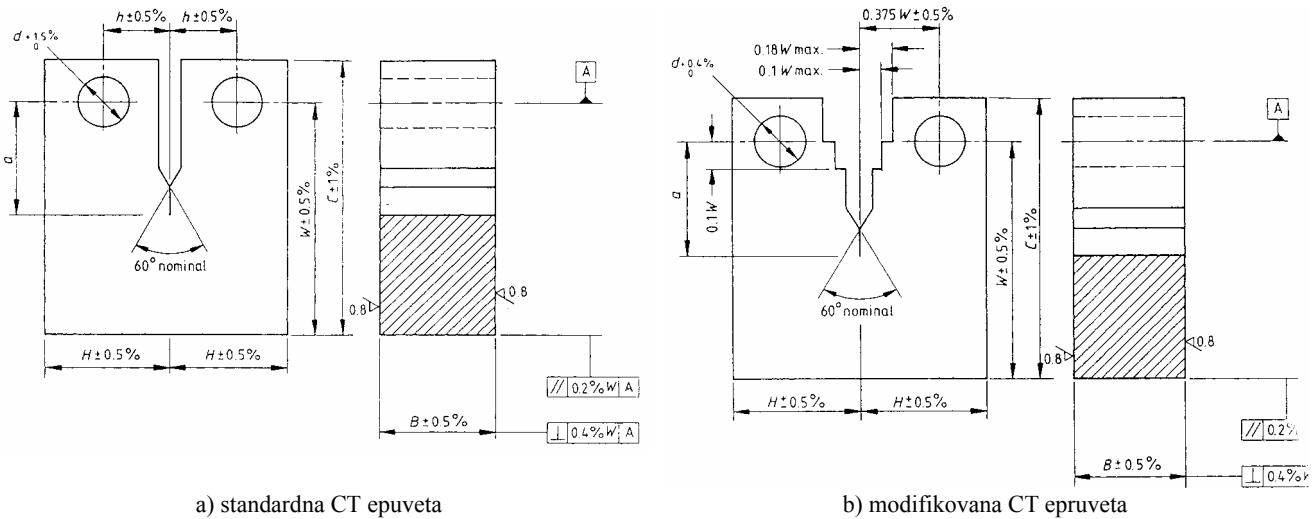
Da bi se dobila što potpunija slika o primeni ispitivanja mehanike loma na zavarene spojeve potrebno je opisati epruvete i ukazati na greške i odstupanja koja su pri tom moguća. Pre svega, predviđeno je da se epruvete mehanike loma ispituju zatezanjem ili savijanjem. Među brojnim oblicima koji su u različitim istraživanjima korišćeni, najširu primenu su našle epruvete za savijanje u tri tačke, sl. 2. i kompaktne epruvete za zatezanje, sl. 3 /2, 3, 7/.

Epruveta za savijanje u tri tačke (savijanje silom) se pokazala veoma prikladnom za praksu, pa se primenjuje u ispitivanjima sva tri navedena parametra mehanike loma (K_{Ic} , δ , J). Kompaktna epruveta za zatezanje omogućava značajnu uštedu materijala u poređenju sa drugim oblicima epruveta, kao i srazmerno manju silu za ispitivanje.

Ispitivanja mehanike loma su veoma složena. Da bi se dobili što tačniji rezultati sve faze ispitivanja su precizno definisane i svi zahtevi u pogledu važenja rezultata moraju da budu budu ispunjeni. Pri tom se struktura materijala, od koga su epruvete izrađene, smatra homogenom, što omogućava da definicije budu dovoljno precizne. Ipak je potrebno da se istaknu moguća odstupanja u rezultatima ispitivanja, kako bi se i ona uzela u obzir kada se ispituju epruvete sa prslinom iz zavarenog spoja, čija je struktura heterogena:

- uticaj konačnosti dimenzija epruveta,
- odstupanja i greške izrade i pripreme epruveta,
- odstupanja i greške vezane za proces ispitivanja, i
- odstupanja i greške u analizi rezultata ispitivanja.

Prvi uticaj na tačnost rezultata je konačnost dimenzija epruveta. Parametri mehanike loma su prvobitno definisani za tanku ploču beskonačne dužine i širine. Uvođenjem graničnih uslova zbog konačnih dimenzija ploče moraju se rezultati korigovati, jer odnos dužine prsline a i širine ploče je konačna vrednost i ne može se zanemariti kao u slučaju beskonačne ploče. Taj se problem rešava tzv. K-kalibracijom /10/. Kada je odnos dužine prsline i širine epruvete malii (blizak nuli,) važi osnovna jednačina mehanike loma, kojom se određuje faktor intenziteta napona K_I



Slika 3. Kompaktna epruveta za zatezanje /2, 7/

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (1)$$

gde je σ delujući prosečni napon u udaljenom preseku, gde nema prsline, dok je a poludžina prsline. Ako se uzmu u obzir granice ploče onda će biti /7/

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot f\left(\frac{a}{w}\right) = \frac{F}{B \cdot w} \cdot \sqrt{a} \cdot Y \quad (2)$$

pa je jasna definicija faktora K-kalibracije:

$$Y = \frac{K_I \cdot B \cdot w}{F \cdot \sqrt{a}} = f\left(\frac{a}{w}\right) \cdot \sqrt{\pi} \quad (3)$$

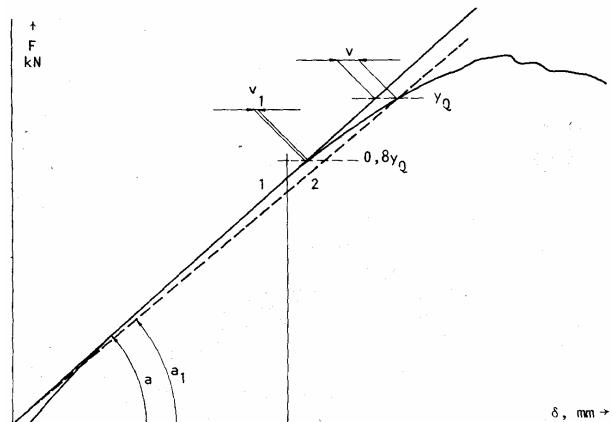
Drugi razlog mogućih grešaka u rezultatu vezan je za izradu i pripremu epruveta. Bez obzira na ostvarivu preciznost u izradi i kontroli mera, izvesna odstupanja mera epruveta iz iste serije su uobičajena. Priprema epruveta obuhvata i početnu zamornu prslinu, ostvarenu prema postupku i uz ograničenja koja propisuju standard, npr. /2,7/. Sem značajnog uslova da faktor intenziteta napona pri zamaranju bude ograničene veličine (do nivoa $0.8K_{Ic}$), ovde kao mogući razlog greške treba navesti merenje dužine prsline. I tu se postavljaju dva pitanja: tačnost merenja i princip merenja. Front zamorne prsline je više ili manje zakriviljen, i bez obzira na svu pažnju pri zamaranju, on će se od epruvete do epruvete razlikovati. Princip linearizacije fronta prsline merenjem većeg broja tačaka i uzimanjem proseka, uz subjektivnu i objektivnu tačnost merenja u svakom slučaju daje približan, a ne tačan rezultat za dužinu prsline. Dodatno je pitanje što ligament ima različitu ulogu pri zatezanju i pri savijanju, što će i grešku u oceni dužine prsline učiniti većom ili manjom.

Greške i odstupanja se javljaju i u toku ispitivanja. Sem grešaka mernih instrumenata, koji prate veličine opterećenja i deformacija, značajna mogućnost grešaka potiče od postavljanja epruvete. Tako se raspon oslonaca pri savijanju menja od epruvete do epruvete, a menjaće se i u toku ispitivanja s obzirom na ugib. Sem toga trenje u osloncima, iako zanemarljivo, doprinosi nekorisnom utrošku opterećenja.

Četvrta grupa odstupanja se odnosi na analizu zapisanih rezultata. Na sl. 4. prikazan je realni dijagram važećeg ispitivanja K_{Ic} /11/. Standardom ASTM E399, BS 7448 ili JUS C.A4.084 definisan je postupak uzimanja podataka. Propisani postupak određivanja veličine K_Q preko sile F_Q

dopušta značajna odstupanja u definisanju ordinate y , koje, prema stečenom iskustvu može iznositi čak i 5%.

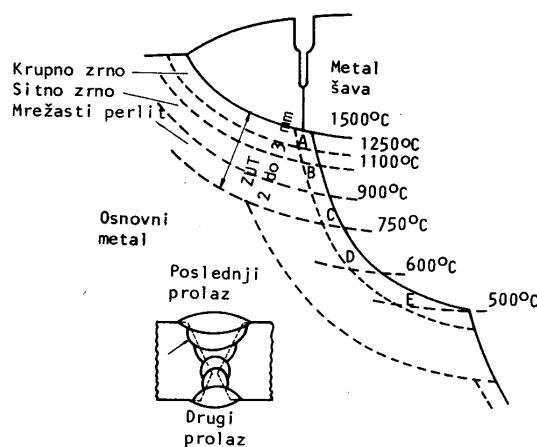
Ako se dopusti odstupanje zbog K-kalibracije do 1%, zbog izrade i pripreme epruveta do 3%, zbog ispitivanja do 3% i zbog očitavanja rezultata do 5%, što je s obzirom na složenost postupka ispitivanja mehanike loma moguće, ukupna greška može da bude i veća od 10%. Primena računara doprinosi većoj tačnosti ispitivanja i rezultata.



Slika 4. Dijagram sila - otvaranje prsline važećeg ispitivanja

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 sa sl. 1, ovakav postupak ispitivanja nije dovoljno pouzdan, jer vrh prsline pri razvoju loma može da prolazi kroz područja različitih struktura i mehaničkih osobina zavarenog spoja. Zbog toga je potrebna analiza zavarenog spoja s aspekta primene mehanike loma. Složenost u mikrostruktturnom i geometrijskom pogledu pri određivanju žilavosti loma i drugih mehaničkih osobina u ZUT ilustruje sl. 5, na kojoj je prikazan niskolegirani, termomehanički obrađeni čelika povisene 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 (šrafirano naznačena mesta A i E na sl. 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 najbržljiviji rad potrebno ispitati desetine uzoraka da bi se uspešno locirao vrh prsline u milimetarski 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 /12/.



Slika 5. Presek kroz ZUT niskolegiranog čelika povisene čvrstoće

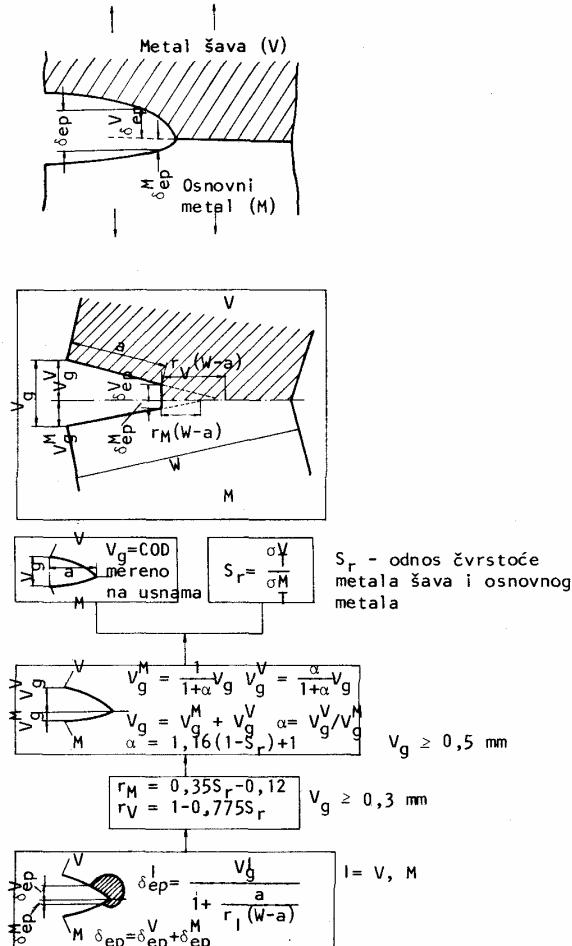
Sledeća teškoća u određivanju žilavosti loma je trag rasta zamorne prsline, čiji je vrh lociran u ZUT (šrafirano područje A na sl. 5), jer ona će prodire u područja ZUT različitih mikrostrukturalnih i mehaničkih karakteristika. Različite karakteristike u odnosu na ravan rasta prsline rezultiraju u asimetričnom formirajući plastične zone ispred vrha prsline. 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 prsline 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 prsline, nezavisno od uticaja materijala na većim rastojanjima od tzv. procesne zone na vrhu prsline. U tom pogledu je K_{lc} , kao linearno-elastični pokazatelj žilavosti loma, u prednosti, jer su uslovi ograničene plastične zone pri njegovom određivanju oštrij nego kod elasto-plastičnih pokazatelja. U realnim situacijama, pri ispitivanju šavova, ovi oštiri 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 prsline u kritičnu zonu.

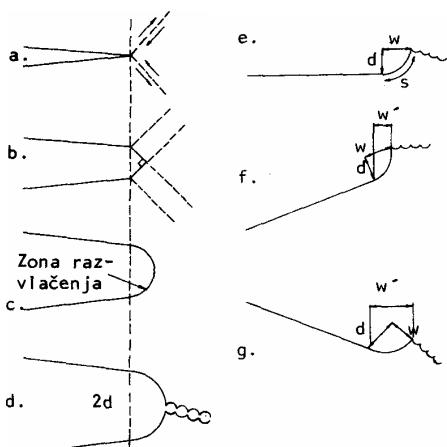
Da je CTOD najviše praktično korišćeni parametar mehanike loma zavarenih spojeva svedoči veliki broj publikovanih radova istraživanja u različite svrhe, a naročito više od 40 primena pri izradi odgovornih zavarenih konstrukcija (npr. cevovodi i morske platforme), od izbora dodatnih materijala i provere postupka zavarivanja, do ocene veličine prihvatljive greške /13, 14/.

Analički postupak za određivanje CTOD je usredsreden na deformacije oko vrha prsline, što mu obezbeđuje veće lokalno značenje od drugih naponskih i energetskih kriterijuma, jer je eksperimentalno određivanje kritične vrednosti jednostavnije nego za druge pokazatelje, što uz preciznije lokalno značenje dobijenog rezultata predstavlja značajnu prednost. Važna je i mogućnost korekcije ovog parametra pri deformacijskoj i naponskoj asimetriji, sl. 6 /15/.



Slika 6. Shematski prikaz postupka za određivanje CTOD po liniji stapanja

Podesnost COD koncepta za određivanje žilavosti loma šava se izražava i kroz određivanje širine zone razvlačenja (stretch zone width) nastale u procesu zaobljavanja vrha prsline pre početka rasta, sl. 7. Nakon dužih istraživačkih pokušaja /16/ da se merenje širine zone razvlačenja iskoristi za ocenu žilavosti loma, danas je ona uvedena kao standardni parametar za određivanje žilavosti loma /17/. Od merenja širine zone razvlačenja u području zavarenih spojeva se očekuje dalji napredak u boljem određivanju lokalne žilavosti loma, kao i u preciznijem određivanju uticaja asimetrije.



Slika 7. Shematski prikaz razvoja zone razvlačenja na vrhu prsline

Kao pokazatelj elasto-plastične mehanike loma J-integral je sledeći parametar žilavosti loma. On je osetljiviji od drugih parametara na nehomogenost i asimetriju ponašanja šava. Kritična vrednost žilavosti loma, J_{lc} , se određuje ekstrapolacijom iz J_R krive kao i za homogene materijale.

Ključno pitanje žilavosti loma u šavu je u kojoj je meri i pod kojim uslovima najniža vrednost žilavosti loma u vrlo uskim područjima od uticaja na ponašanje čitavog šava kao dela konstrukcije, pa time i čitave zavarene konstrukcije. Na sadašnjem nivou znanja na ovako formulisano pitanje mogu da se daju samo intuitivni odgovori. Stohastički pristup problemu loma u zavarenim spojevima omogućava da se umesto intuitivnih daju egzaktni odgovori. U ovom pristupu se otvaranje prsline (δ) i žilavost loma K_{lc} tretiraju kao stohastične, a ne kao determinističke promenljive /18/.

Stepen sigurnosti se u ovom pristupu izražava numerički preko verovatnoće da će do otkaza konstrukcije doći. Stohastički pristup, čiji značaj raste sa stepenom odgovornosti konstrukcije (npr. nuklearna postrojenja), istovremeno ukazuje i na praznine u znanju, i nedostatke u podacima sa kojima je stohastički tretman ocene sigurnosti suočen.

ANALIZA HETEROGENOSTI STRUKTURE I OSOBINA ZAVARENIH SPOJEVA

Heterogenost strukture i mehaničkih osobina zavarenih spojeva usložnjava problem, pre svega u zavisnosti od položaja vrha zamorne prsline i osobina područja kroz koja se lom razvija. Ali, ako se zavareni spoj tretira kao konstruktivska celina, onda je od interesa odrediti podatke za najslabije mesto kada je u pitanju lokalno ispitivanje, kakvo je određivanje parametara mehanike loma. Takođe je jasno da pri određivanju zateznih karakteristika, naročito zatezne čvrstoće, podatak za zavareni spoj kao celinu mora da se prihvati kao merodavniji za zavarenu konstrukciju nego pojedinačni rezultat bilo za metal šava ili za osnovni metal.

Na primeru MAG postupkom zavarenog spoja čelika Č4730 /19/ može jasnije da se sagleda heterogenost mehaničkih osobina, iskazana kroz veličinu K_{lc} . Kako zahtevi za ispunjenje uslova ravnog stanja deformacije:

$$B \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_{lc}}{R_{p0,2}} \right)^2 \quad (4)$$

nisu zadovoljeni, umesto linearno-elastičene mehanike loma definisane standardom ASTM E399, korišćena je elasto-plastična mehanika loma, tj. standard ASTM E813 /2/ koji omogućava da se vrednost kritičnog faktora intenziteta napona, K_{lc} , odredi preko kritičnog J integrala, J_{lc} .

Postupak ispitivanja se sastoji u definisanju R-krive, odnosno $J-\Delta a$ krive, zavisnosti J integrala i priraštaja prsline Δa . Eksperimenti su izvedeni metodom ispitivanja jedne epruvete sukcesivnim parcijalnim rasterećenjem, odnosno metodom popustljivosti, kako je to definisano standardom ASTM E1152 /3/. Dobijeni dijagrami F-COD (δ) i $J-\Delta a$ za osnovni metal, metal šava i ZUT su prikazani na sl. 8.

Sem u području izražene plastične deformacije (deo dijagrama od maksimalne sile do konačnog loma epruvete), tok dijagrama za ove epruvete se poklapa u velikoj meri. Kada se, međutim, postupkom regresione linije odredi veličina J_{lc} onda se dobijaju jasne razlike, jer je za osnovni metal $J_{lc}=115,3 \text{ kJ/m}^2$, za metal šava $J_{lc}=96,6 \text{ kJ/m}^2$ i za ZUT je $J_{lc}=82,2 \text{ kJ/m}^2$.

Iz veličine kritičnog J_{lc} integrala može da se izračuna vrednost kritičnog faktora intenziteta napona ili žilavost loma pri ravnoj deformaciji K_{lc} , pomoću zavisnosti:

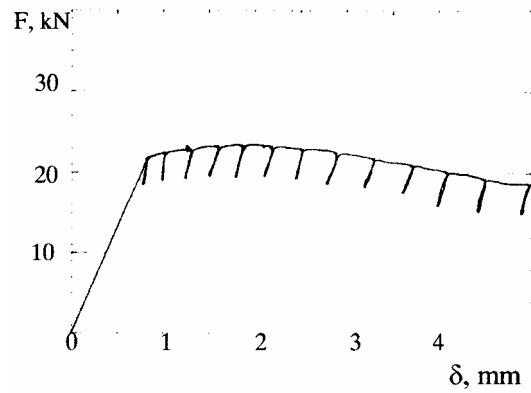
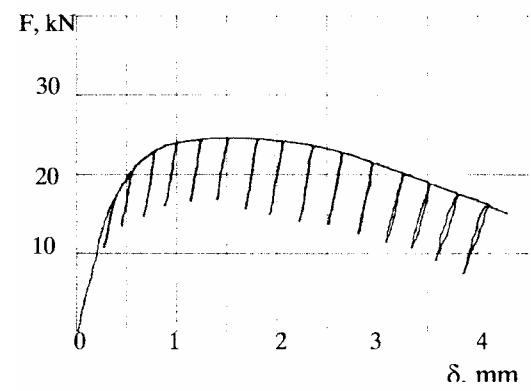
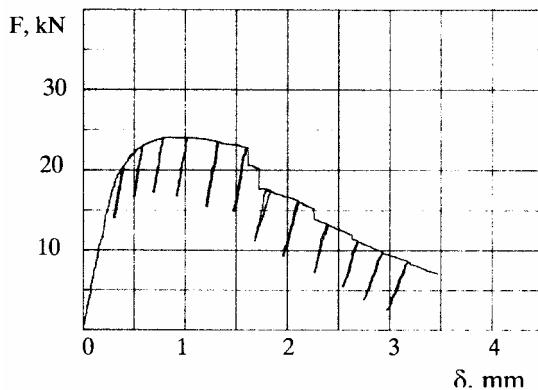
$$K_{lc} = \sqrt{\frac{J_{lc} \cdot E}{1 - \nu^2}} \quad (5)$$

Vrednost K_{lc} za osnovni metal je $153,7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, za metal šava $140,7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, a za ZUT $129,8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$.

Očigledno je da heterogenost zavarenog spoja ima značajan uticaj na otpornost prema razvoju prsline, kako u elastičnom, tako i u plastičnom području. Zbog toga pri propisivanju uslova za ispitivanje mehanike loma treba definisati ne samo postupak ispitivanja i položaj zamorne prsline, već i način tumačenja rezultata. Ovde treba napomenuti da sa konstruktivskog aspekta osobine materijala mogu bolje da se procene kroz pojedinačne veličine K_{lc} i R_e i njihov odnos K_{lc}/R_e (koji je i u standardu E399, odnosno BS 7448 merodavna veličina), nego samo na osnovu jedne od njih. Kod zavarenih spojeva napon tečenja R_e metala šava je veći (overmečing) ili manji (andermečing) od odgovarajuće vrednosti za osnovni metal. Imajući u vidu razlike u veličini K_{lc} (kao u primeru za čelik Č4730), očigledno je da će puna ocena zavarenog spoja zahtevati analizu obe veličine, R_e i K_{lc} . Standardom za ispitivanje mehanike loma zavarenih spojeva treba propisati način izvođenja te analize.

STANDARDNO ISPITIVANJE PARAMETARA MEHANIKE LOMA ZAVARENIH SPOJEVA

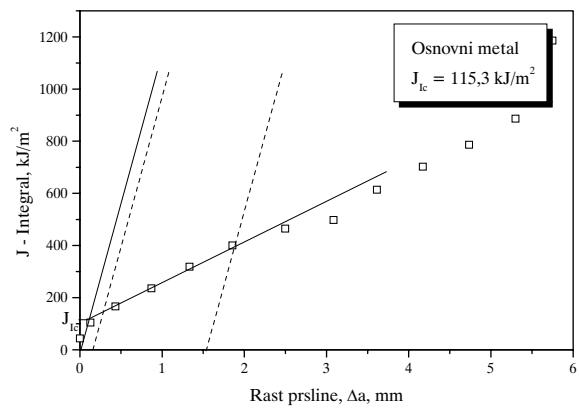
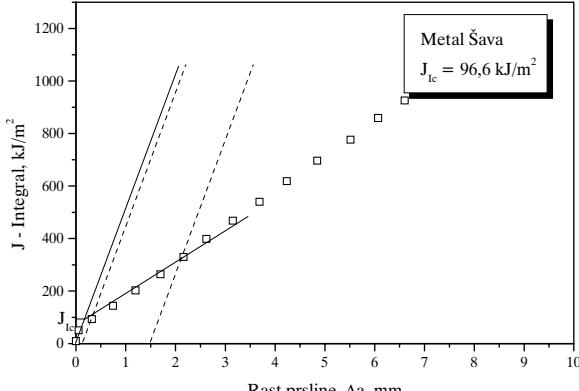
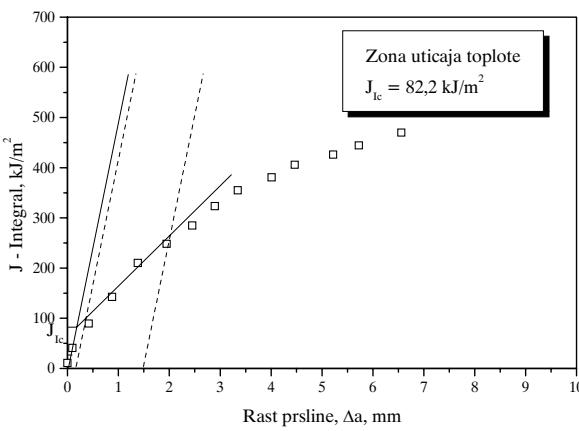
Veliki broj različitih proba zavarljivosti ukazuje na to da je problemu prsline u zavarenim spojevima uvek poklanja posebna pažnja. Ispitivanjem bez razaranja mogu se otkriti različite greške, ali u mnogim slučajevima se donosi odluka da se one ostave. To znači da zavareni spoj može imati greške i prsline koje nisu otkrivene i one, koje su otkrivene, ali nisu otklonjene. Lako je zaključiti da je u tom slučaju ocena lokalnog ponašanja područja zavarenog spoja u blizini greške baristo toliko važna kao i ocena globalnog ponašanja spoja. Iako ispitivanje epruveta sa V rezom na klatnu (Šarpi) daje dragocene podatke o lokalnom ponašanju područja vrha zareza, ti podaci ne mogu u potpunosti da objasne uslove nastanka ili rasta prsline.

a) $F - \delta$ osnovni metalb) $F - \delta$ metal šavac) $F - \delta$ zona uticaja toplice

Slika 8. Dijagrami za određivanje J integrala sukcesivnim rasterećenjem jedne epruvete

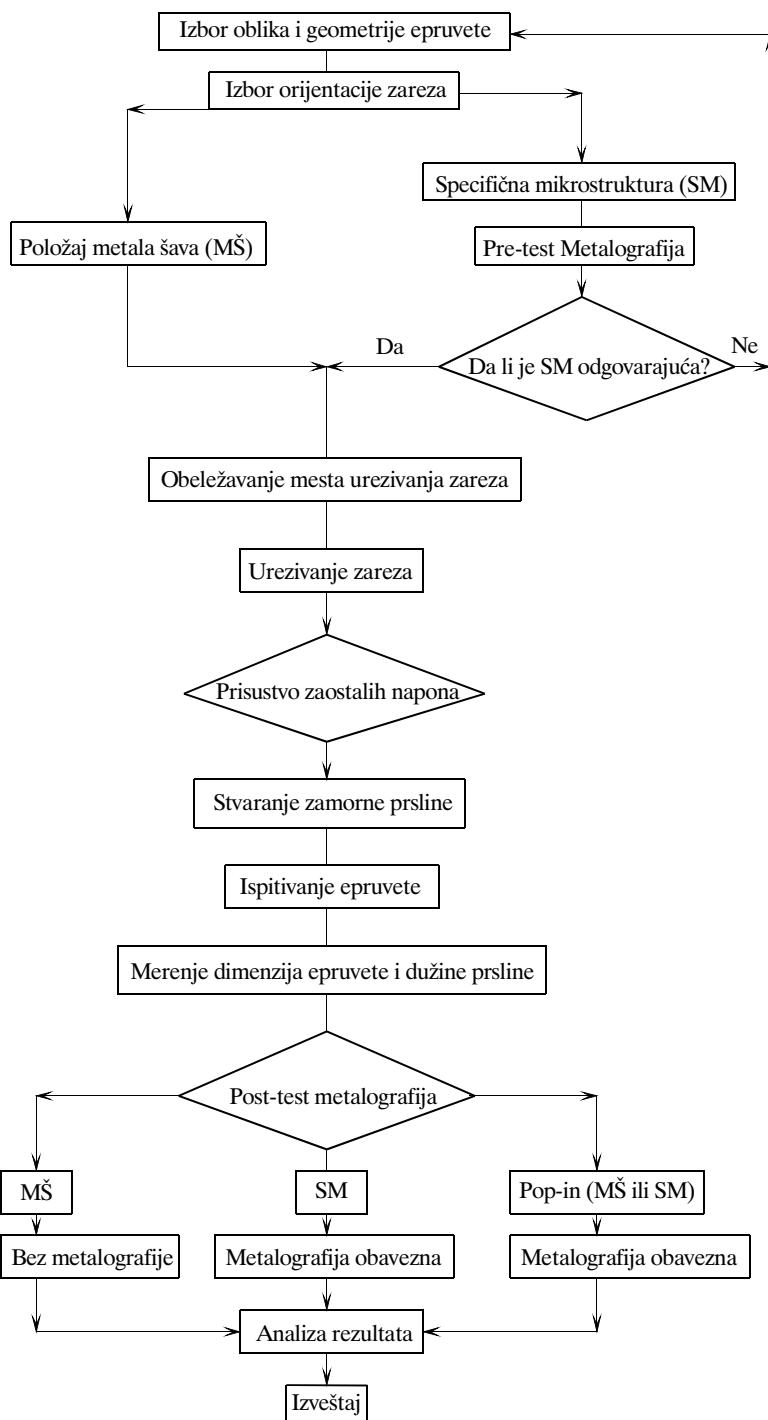
Veliki interes za primenu ispitivanja mehanike loma zavarenih spojeva je već u početku naišao na ograničenja. Pre svega, prema već navedenoj analizi treba ispitati bar 10 epruveta mehanike loma da bi se odredio neki od parametara mehanike loma zavarenog spoja. Vrednost ispitivanja jedne epruvete je oko 100 EVRA, pa za ocenu jednog zavarenog spoja sa aspekta mehanike loma treba odvojiti bar 1000 EVRA. Ovako skupa ispitivanja će u mnogim slučajevima biti ekonomski opravdana ako doprinose sigurnosti konstrukcije ili povećanju veka, imajući pri tom u vidu da se više od polovine ukupno proizvedenog čelika u svetu ugrađuje u zavarene konstrukcije.

Treba imati u vidu da ispitivanja mehanike loma podrazumevaju poznavanje mehaničkih osobina. Kada su u

a) $J - \Delta a$ osnovni metalb) $J - \Delta a$ metal šavac) $J - \Delta a$ zona uticaja toplice

pitanju zavareni spojevi često nedostaje pouzdan podatak o veličini napona tečenja, koji je prema standardima za ispitivanje parametara mehanike loma jedan od osnovnih uporednih parametara mehaničkih osobina.

I pored svih teškoća i nedoumica, primena mehanike loma na ispitivanje zavarenih spojeva je sve šira. Razlog je, pre svega, u boljem i potpunijem razumevanju ponašanja zavarenog spoja sa prslinom na osnovu analize podataka dobijenih u tim ispitivanjima. Standard BS 7448 /4, 5/ predviđa primenu sva tri parametra (K_{lc} , CTOD, J integral) za karakterizaciju otpornosti zavarenog spoja prema nastajanju i rastu prsline, i propisuje slučajeve u kojima je svaki od njih merodavan. Uprošćena procedura postupka ispitivanja prema standardu BS 7448, deo 2, data je shematski na sl. 9.



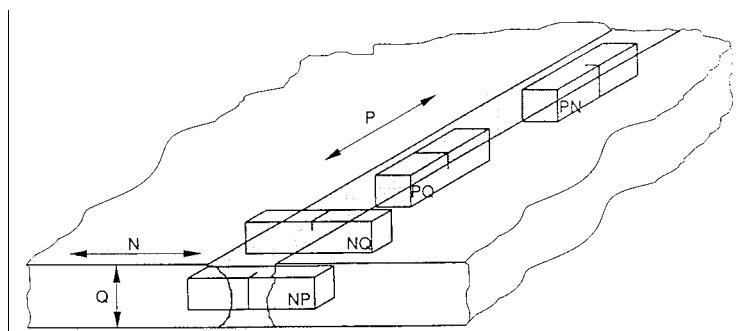
Slika 9. Shematski prikaz procedura ispitivanja mehanike loma kod zavarenih spojeva prema BS 7448 - deo 2 /5/

U pogledu položaja zareza i zamorne prsline, standard ide dalje i definije različite varijante za sučeoni X i K šav, kao i jednopravni šav. Zahtevi za položaj prsline su:

- Zarez treba postaviti tako da ravan zamorne prsline bude paralelna sa uzdužnom osom zavarenog spoja. Vrh prsline treba da se većom dužinom nalazi u oblasti koja se ispituje, da ne bi došlo do lokalnih oštećenja u maloj zapremini materijala.
- Zarez se postavlja u metal šava, liniju stapanja ili ZUT. Za utvrđivanje pogodnosti izbora dodatnog materijala ispituje se metal šava. Shema vađenja epruveta sa zarezom i zamornom prslinom u metalu šava je data na sl. 10.

Epruvete za određivanje parametara mehanike loma se izrađuju iz pridruženih probi, izrađenih na isti način kao i stvarni proizvod. Za ploče manje debljine od 50 mm koriste se epruvete pune debljine. Otpornost prema razvoju prsline u MŠ i ZUT ispituje se na epruvetama sa zarezom i zamornom prslinom, što je shematski prikazano na sl. 11-13.

Za ocenu zbirnog uticaja svih područja zavarenog spoja (MŠ, linija stapanja i ZUT) i tehničkih uslova zavarivanja zarez se postavlja tako da obuhvata usku traku sva tri područja, pri čemu se kosina vrha ostvaruje na dubini 1,5 - 2,5 mm.



N - pravac normalan na MŠ
P - pravac paralelan MŠ
Q - pravac po debljini MŠ

Slika 10. Način vađenja epruveta i položaj prsline pri ispitivanju metal-a šava

| Pravac | Geometrija epruvete | Položaj zareza |
|--------|---------------------|--|
| NP | B x B ili B x 2B | MŠ – duž centralne linije |
| NQ | B x B | MŠ - iz korena duž centralne linije |
| NP | B x B ili B x 2B | ZUT- zarez u liniji stapanja na polovini debljine |
| NP | B x B ili B x 2B | ZUT- zarez u liniji stapanja na četvrtini debljine |
| PQ | B x B | Poprečno u MŠ |
| PN | B x B | Poprečno u MŠ duž centralne linije |

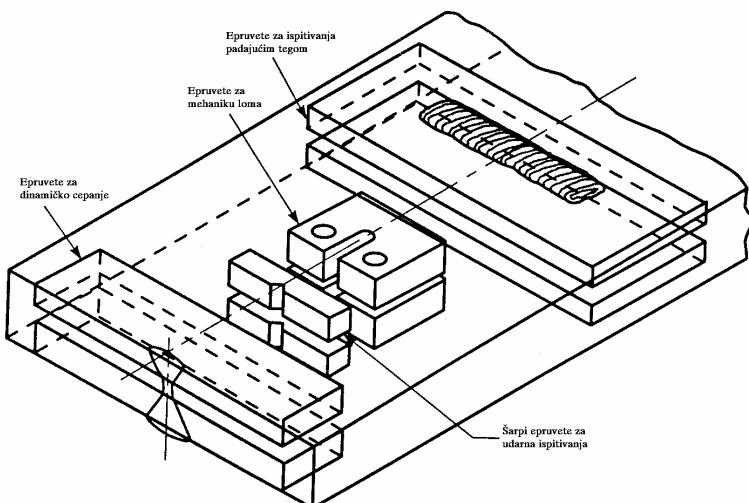
Slika 11. Položaj zareza u epruvetama mehanike loma za ispitivanje zavarenog spoja /5/

Postupak određivanja parametara žilavosti loma zavarenih spojeva je dat i u standardu AWS B4.0M:2000 "Standard Methods for Mechanical Testing of Welds" (Standardne metode za mehanička ispitivanja zavarenog spoja), /20/, koji je zajedničko izdanje American National Standards Institute - ANSI, American Society for Testing and Materials - ASTM i American Petroleum Institute-API.

Ovaj standard predviđa ispitivanje epruveta sa zarezom u metalu šava (MŠ) i zoni uticaja toplice (ZUT).

| Pravac | Geometrija epruvete | Položaj zareza |
|--------|---|---|
| NQ | B x B | Upravno na MŠ duž centralne linije |
| NQ | B x B | U prvom zavaru korena MŠ |
| NQ | B x B | Krupnozrna struktura ZUT uz MŠ |
| NP | B x B ili B x 2B | Kroz najveću zapreminu MŠ duž spoja |
| NP | B x B ili B x 2B | Upravno na najveću zapreminu MŠ |
| NP | B x B ili B x 2B - za uzorke deblje od 50 mm | Najmanje 15% čela prsline u krupnozrnoj ZUT |
| NP | B x B ili B x 2B | ZUT - 5 mm od linije stapanja |

Slika 12. Primeri položaja zareza /5/



Slika 13. Shema vađenja uzorka za ispitivanja žilavosti loma prema standardu AWS B4.0M:2000 /20/

ZAKLJUČAK

Primena ispitivanja mehanike loma na zavarene spojeve otvorila je put propisivanju standarda za određivanje odgovarajućih parametara. Danas su opšte prihvaćeni standardi BS 7448 - deo 2 /4, 5/, kao i AWS B4.0M:200 /20/. Veći uspeh u primeni ovih ispitivanja je još uvek ograničen određenim brojem problema, koji su posledica osnovnih osobina zavarenog spoja i njegovih pojedinačnih područja, sa jedne strane, i posledica složenosti ispitivanja mehanike loma i tumačenja rezultata, sa druge strane. Potpunije razumevanje ponašanja zavarenog spoja sa prslinom na osnovu ispitivanja epruveta sa prslinom i tumačenja dobijenih rezultata će omogućiti proizvodnju ekonomičnijih, a sigurnijih i pouzdanijih zavarenih konstrukcija.

Literatura

1. ASTM E399-87, Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, Annual Book of ASTM Standards 1986, Vol. 03. 01. p. 522.
2. ASTM E 813 - 89, "Standard Test Method for J_{lc} , A Measure of Fracture Toughness", Annual Book of ASTM Standards 1986, Vol. 03. 01. p. 651.
3. ASTM E 1152 - 91, "Standard Test Method for Determining J-R Curve" Annual Book of ASTM Standards 1986, Vol. 03. 01. p. 724
4. BS 7448 - Part 1:1991, "Fracture mechanics toughness tests - Methods for determination of K_{lc} , critical CTOD and critical J values of metallic materials"
5. BS 7448 - Part 2:1997, "Fracture mechanics toughness tests - Methods for determination of K_{lc} , critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials"
6. JUS C.A4.083 - Mehanička ispitivanja materijala. Osnovni pojmovi i veličine u mehanički loma.
7. JUS C.A4.084-Mehanička ispitivanja. Ispitivanje žilavosti loma pri ravnoj deformaciji (K_{lc}).
8. Radović A, "Mogućnosti korišćenja kriterijuma mehanike loma u oceni sigurnosti zavarenih spojeva", Letnja škola mehanike loma - Mehanika loma zavarenih spojeva, Arandelovac, 1984, str. 15-43.
9. Sedmak A, Burzić Z, "Izveštaj o kvalifikaciji tehnologije reparativnog zavarivanja reaktora DC-301, Mašinski fakultet Beograd, 1999.
10. Brown, W. F., Srawley, J. E., "Plane Strain Crack Toughness Testing of High Strength Metallic Materials", Special Technical Publication STP 410, Philadelphia, 1969.
11. Sedmak S, "Istraživanje uticaja količine zavarivanjem unete toplove na promene u ZUT kompleksno legiranih čelika visoke čvrstoće", Naučnoistraživački projekt Fabrike vagona Kraljevo i OZN regionala Kraljevo-Čačak, TMF, Beograd, 1980-1981.
12. Gittus, M, Dolby, R, Welding Research International, No. 9, 1989.
13. Harrison, J. D, "The state-of-the-art in crack tip opening displacement (CTOD) testing and analysis - Part 3", Application of the CTOD approach, Metal Construction, 1980, p. 600/5.
14. Harrison, J. D., Dawes, M. G., and Archer, G. L. "The COD Approach and its Application to Welded Structures", ASTM, Philadelphia, 1979;
15. Satoh, K., Toyoda, M, "The Incidence of Mechanical Heterogeneity on Fracture Toughness Evaluation of Welds", IIW Doc. X-1031-83, p. 232-248, 1983.
16. Harris, D, and Elliott, D, "The Practical Significance of Stretch Zones in Fracture Toughness Testing", The Mechanical and Physics of Fracture, Cambridge, p. 107-118, 1975.
17. Miyamoto, M, Kobayashi, H, and Ohtsuka, H, "Standard Method of Test for Elastic-Plastic Fracture Toughness J_{lc} Recommended in Japan", ICM4, Stockholm, Vol. 2, p. 747-753, 1983.
18. Bokalrud, T, and Korsgren, T "Some aspects of the application of probabilistic fracture mechanics for design purposes", Bratislava, p. 275-285, 1979.
19. Manjgo M, "Uticaj količine unešene toplove na mehanička i eksploracijska svojstva zavarenog spoja čelika Č4730", Magistarski rad, Mašinski fakultet Zenica, 2000.
20. AWS B4.0M:2000, "Standard Methods for Mechanical Testing of Welds", American National Standards Institutut (ANSI), July 25, 2000.