

**MOGUĆNOST KORIŠTENJA KRITERIJUMA MEHANIKE LOMA U
OCJENI KVALITETA ZAVARENIH SPOJEVA**

**A POSSIBILITY OF APPLICATION OF THE FRACTURE
MECHANICS CRITERIAS BY ESTIMATION OF QUALITY OF THE
WELDMENTS**

**Nedeljko Vukojević, dipl.ing.
Mašinski fakultet u Zenici
Zenica, BiH**

Ključne riječi: zavareni spoj, kvalitet, mehanika loma

REZIME:

Osnovni pristup osiguranja kvaliteta i sigurnosti zavarene konstrukcije ne dopušta postojanje pukotina, kako pri izradi, tako i u toku eksploatacije, što po pravilu uslovljava sanaciju konstrukcije radi otklanjanja otkrivene pukotine. S obzirom da su greške neizbježna pojava u konstrukcijama i zavarnim spojevima neophodno je da se one obezbjede od mogućih štetnih posljedica njihovog širenja. U tom smislu Mehanika loma omogućava na svojim teorijskim i eksperimentalnim postavkama da se da ocjena greške tipa pukotine u konstrukciji i spriječi njihovo širenje.

Key words: welded joints, quality, fracture mechanics

SUMMARY:

By basis access of quality insurance and welded construction safety cracks are not allowed. Cracks are not allowed by production and exploitation of welded construction. If cracks exist in that case construction must be repaired and cracks refused. In cosideration of inevitable occurrence of defects in constructions and weldments protection of its prejudicial effects is necessary. In that sense evaluation of defects, especially cracks, in constructions and weldments is based on theoretical and experimental approach of Fracture mechanics.

1. UVOD

Procjena sigurnosti sa aspekta potrebnog kvaliteta zavarenog spoja se postiže ispunjenjem odgovarajućih tehničkih zahtjeva a koji se prije svega odnose na poznavanje uticaja grešaka u zavarenom spoju i ovakav pristup spada u tzv. "upotrebnu spremnost" (*fitness for purpose*) i predstavlja dokaz integriteta konstrukcije u realnim uslovima. Odnosno može se reći da je proizvod pogodan za predviđenu namjenu kada zadovoljavajuće funkcioniše u toku proizvodnog vijeka.

Očuvanje sigurnosti zavarenih konstrukcija u toku eksploatacije je jedan od osnovnih zadataka u održavanju i preventivi. Nova zavarena konstrukcija se smatra sigurnom, ako je izvedena prema projektnoj i tehnološkoj dokumentaciji. Osnovni pristup osiguranja kvaliteta i sigurnosti zavarene konstrukcije ne dopušta postojanje pukotina, kako pri izradi, tako i u

toku eksploatacije, što po pravilu uslovljava sanaciju konstrukcije radi otklanjanja otkrivene pukotine.

S obzirom da su greške neizbježna pojava u konstrukcijama i zavarnim spojevima neophodno je da se one obezbijede od mogućih štetnih posljedica njihovog postojanja. U tom smislu mehanika loma omogućava na svojim teorijskim i eksperimentalnim postavkama da se da ocjena značaja greške u konstrukciji, a naročito greške tipa pukotine kao najopasnije greške. Veoma je važno i pravovremeno otkriti grešku prije nego dostigne kritičnu veličinu nakon koje nastupa trajno oštećenje i lom.

2. OSIGURANJE KVALITETA ZAVARENIH SPOJEVA

Izrada zavarenih spojeva topljenjem je jedini način da se postigne čvrstoća spoja nivoa osnovnog materijala, ali pri tome niz metalurških i termičkih pojava i drugih problema često uslovljava pojavu različitih grešaka. U realnim uslovima ne smije da se isključi mogućnost pojave grešaka u zavarenom spoju.

Optimalno tehno-ekonomsko rješenje je u proizvodnji dovoljno kvalitetnih zavarenih spojeva po što nižoj cijeni, pri čemu se pod pojmom kvalitet podrazumijeva sposobnost da se zadovolje potrebe naručioca (korisnika). Problemom kvaliteta zavarenih spojeva se bave mnogi standardi, kako u oblasti zavarivanja tako i u oblasti zavarenih konstrukcija.

Detaljno poznavanje grešaka koje nastaju zavarivanjem i procjena njihovog uticaja na integritet zavarene konstrukcije omogućava definisanje graničnih vrijednosti veličine greške u zavisnosti od nivoa kvaliteta. Osim ovako definisanih graničnih vrijednosti veličine greške postoji mogućnost korištenja osnovnih zakona mehanike loma kojima se preciznije definišu granične vrijednosti veličine greške.

2.1 Standardi za osiguranje kvaliteta zavarenih spojeva

Pitanje kvaliteta zavarenih spojeva je postavljeno sa početkom njihovog uvođenja u izradu konstrukcija. Razvoj postupaka zavarivanja i postupaka ispitivanja bez razaranja omogućava da se primjena zavarivanja kao postupka spajanja proširi na veliki broj različitih materijala i na vrlo odgovorne i opterećene konstrukcije. Istovremeno to uslovljava propisivanje preciznijih odredbi u pogledu kvaliteta zavarenih spojeva, jer i pored mnogih jasno definisanih propisa dolazi do značajnog broja otkaza, vrlo često praćenih katastrofalnim posljedicama. Zbog toga je potreba ujednačavanja kriterijuma na različitim nivoima, sve do svjetski prihvaćenih standarda, postala neizbježna kada se zahtjeva isti nivo kvaliteta zavarenih spojeva.

Donošenjem serije standarda ISO 9000 definisani su opšti zahtjevi sistema kvaliteta u oblasti proizvodnje i usluga, a specifičnosti zavarivačkih zahtjeva su dodatno definisani. Donošenjem ovih standarda promjenjen je pristup edukaciji i certifikaciji kadrova, periodičnoj provjeri zavarivača, kvalifikaciji tehnologije zavarivanja, a promjenjen je i osnovni standard koji određuje nivo kvaliteta zavarenih spojeva i kriterijume prihvatljivosti. Prema ISO 9000 zavarivanje je specijalni proces čiji kvalitet ne može u potpunosti da se dokaže ispitivanjem gotovog proizvoda, razvijen je niz standarda za osiguranje kvaliteta zavarenih spojeva, kao što su [1,2,7]:

- ISO 3834 identičan sa EN 729 koji se odnosi na "Zahtjeve kvaliteta pri zavarivanju. Zavarivanje topljenjem metalnih materijala";
- ISO 5817 koji se odnosi na "Elektrolučno zavarivanje čelika. Kriterijumi prihvatljivosti grešaka zavarenih spojeva";

- ISO 10042 koji se odnosi na "Elektrolučno zavarivanje aluminijuma i njegovih legura. Kriterijumi prihvatljivosti grešaka zavarenih spojeva";
- ISO 6520 koji se odnosi na "Klasifikaciju geometrijskih nepravilnosti (grešaka) u metalnim materijalima";
- EN 287 koji se odnosi na "Zavarivanje-Zavarivanje topljenjem. Ispitivanje stručne osposobljenosti zavarivača";
- EN 288 koji se odnosi na "Specifikaciju i odobrenje tehnologije zavarivanja metalnih materijala";

Naravno ovdje nisu navedeni svi standardi koje treba primjenjivati kako bi se dobila kvalitetna zavarena konstrukcija. Postoji još niz EN i ISO standarda čijom primjenom se na posredan ili neposredan način može osigurati kvalitet zavarenog spoja, kao što su standardi koji tretiraju dodatni i pomoćni materijal, opremu za zavarivanje, metode za ispitivanje sa i bez razaranja, itd.

2.2 Nivoi kvaliteta i greške zavarenih spojeva

Prema standardu EN 25817 [7], kvalitet zavarenih spojeva je definisan sa tri grupe nivoa : niski (D), srednji (C), visoki (B), a u posebnim slučajevima mogu da se definišu i veoma visoki nivo (A) i veoma niski nivo (E). Nivo kvaliteta mora da se utvrdi prije početka proizvodnje, po mogućnosti u fazi ugovaranja. Greške su navedene u redoslijedu prema njihovim stvarnim veličinama, a za njihovo otkrivanje i određivanje potrebno je koristiti jednu ili više metoda kontrole bez razaranja. Otkrivanje i vrednovanje grešaka zavisi od metode ispitivanja i obima ispitivanja utvrđenih standardom ili ugovorom. Ovim standardom utvrđene su granične vrijednosti atributa grešaka za svaki nivo kvaliteta. Pri izboru nivoa kvaliteta moraju se uzeti u obzir konstrukcione karakteristike, naknadna obrada, vrsta naprezanja, uslovi eksploatacije, kao i posljedice loma. Ekonomski faktori koji su takođe bitni i moraju da obuhvate ne samo troškove zavarivanja nego i kontrole, ispitivanja i popravke.

Kvalitet zavarenih spojeva u velikoj mjeri određuje sigurnost u eksploataciji kao i ekonomičnost konstrukcije. Prisustvo grešaka u zavarenim spojevima, neispunjenje traženih osobina, oblika i homogenosti zavara, kao i osobina i homogenosti metala u zoni uticaja toplote, može poremetiti eksploatacijske karakteristike konstrukcije, a u nekim slučajevima dovesti do loma u procesu izrade, montaže ili eksploatacije konstrukcije. Njihov broj je realni pokazatelj racionalnosti primjenjene tehnologije, pravilnog izbora materijala, stručnosti kadra, tehničke spremnosti opreme koja se koristi odnosno opšteg tehničkog nivoa koji je potreban za izradu određene konstrukcije.

Greške u zavarenom spoju mogu se podijeliti po uzroku nastajanja, vrsti, položaju, obliku, veličini i brojnosti. Klasifikacija po uzroku nastajanja (konstruktivne, metalurške i tehnološke) je važna jer ukazuje i na mogućnost otklanjanja uzroka.

Među fenomenima koji ograničavaju zavarljivost metala najveći problem predstavlja upravo sklonost ka pojavi pukotina, naročito u zoni uticaja toplote. Pri ocjeni zavarljivosti čelika polazi se od pretpostavke da je zavareni spoj homogen, tj. bez mikro i makro pukotina, neprovarenih mjesta i drugih vrsta grešaka. Upravo pukotine i predstavljaju greške homogenosti materijala, izrazite koncentratore napona i općenito su neprihvatljive u svim vrstama zavarenih konstrukcija.

3. KRITERIJUMI MEHANIKE LOMA U OCJENI OSOBINA ZAVARENIH SPOJEVA

Mehanika loma spada u kategoriju savremenih metoda ispitivanja materijala, koja je svojim teorijskim i eksperimentalnim analizama krstog ponašanja tijela sa pukotinom otvorila nove mogućnosti u obezbjeđenju sigurnosti konstrukcija. Termin mehanika loma u užem smislu se odnosi na istraživanje uslova razvoja pukotine, a u širem smislu on obuhvata i dio otpornosti materijala, koji se odnosi na završnu fazu procesa deformisanja pod dejstvom opterećenja. Ovako postavljena, mehanika loma predstavlja disciplinu u kojoj je neizbježno povezivanje teorijskih razmatranja sa eksperimentalnim rezultatima, sa jedne, i sa pojavom lomova i havarija u eksploataciji konstrukcija, sa druge strane.

Standardi ASTM E399 , BS 5447 , odnosno JUS C.A4.083 i 084 za određivanje žilavosti loma pri ravnoj deformaciji K_{Ic} proces razvoja linearno-elastične mehanike loma (LEML) su zaokružili do njene primjene na realne konstrukcije, izrađene od materijala visoke čvrstoće, kod kojih se u prisustvu pukotine ostvaruje ravno stanje deformacije. Uslov važenja tih ispitivanja je da plastična deformacija zahvata samo zanemarljivo malo područje oko vrha pukotine prije nego što dođe do razvoja pukotine i loma. Kako se kod većine konstrukcijskih materijala oko vrha pukotine razvija veliko područje plastične deformacije, to direktno određivanje parametra K_{Ic} nije moguće, i njegova je primjena u realnim uslovima ograničena. Analiza plastičnog ponašanja materijala, kojom se bavi elasto-plastična mehanika loma (EPML), dovela je do definicije dva slijedeća parametra:

- pomjeranja otvora na vrhu pukotine CTOD (δ), i
- konturnog (J) integrala.

U linearno-elastičnoj oblasti ova dva parametra su direktno povezana sa veličinom K_{Ic} i predstavljaju kritične veličine (δ_{Ic} i J_{Ic}) za koje su ispunjeni uslovi ravne deformacije. Pogodnost primjene parametara δ i J je u mogućnosti njihove analize i poslije razvoja značajnih plastičnih deformacija, kao i u pogodnosti njihovog eksperimentalnog određivanja, propisanog standardima.

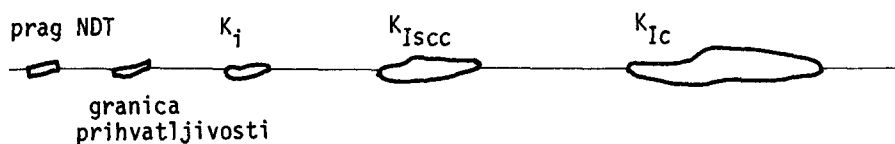
Prema tome, mehanika loma je definisala tri osnovna parametra za ocjenu ponašanja tijela sa pukotinom (K_{Ic} , δ , i J) i propisala postupke za njihovo određivanje ispitivanjem uzoraka sa pukotinama u vidu međunarodno prihvaćenih standarda [7].

Ono što je za zavarene konstrukcije od posebnog značaja, a čime se bavi i mehanika loma jesu pukotine svih vrsta, problemi neprovarenih mjesta, prisustvo uključaka itd. , jer takve greške mogu biti mjesta začetka loma. Znači, realno je prihvaćeno gledanje da je u zavarenim konstrukcijama prisustvo pukotina i drugih grešaka moguće, čak i vjerovatno. Odatle i potiče veliki interes da se parametri mehanike loma primjene na zavarene konstrukcije. Postoje i značajne smetnje u analizi ponašanja zavarenih konstrukcija na principima mehanike loma, a to su:

- ograničena mogućnost otkrivanja pukotina i drugih grešaka u zavarenim spojevima i konstrukcijama u pogledu njihove veličine i položaja
- mehanika loma pretpostavlja homogen materijal, ne samo u okolini vrha pukotine već i na udaljenju od njega, kako bi ostali u važnosti teorijske pretpostavke i značenje žilavosti loma kao osobine izmjerene nekom od metoda mehanike loma.

Zavareni spoj, kao sastavni dio konstrukcije, predstavlja nehomogenost po mikrostrukturi i mehaničkim osobinama, koju prate različite mehaničke osobine pojedinih područja zavarenog spoja (osnovnog metala, metala zavara i zone uticaja toplote). S obzirom na nehomogenost po mikrostrukturi i mehaničkim osobinama uslovi razvoja pukotine čiji je vrh u različitim oblastima zavarenog spoja će biti različiti. Ove teškoće nisu onemogućile eksperimentalno određivanje žilavosti loma u pojedinim kritičnim zonama zavarenog spoja, ili zavarenog spoja kao cjeline, već se prije pojavljuju kao teškoća u tumačenju značenja izmjerenih vrijednosti.

Smisao konstruisanja sa sigurnošću od loma zasnovanom na pojmu početne greške bilo koje vrste u konstrukciji može biti pogodno prikazan dijagramom na sl. 1.



SLIKA 1. NIVO KARAKTERISTIČNIH VELIČINA PUKOTINE U NJENOM RAZVOJU.

Ako se pretpostavi najmanja pukotina koja se može otkriti ispitivanjem bez razaranja (X-zracima, neutronsom difrakcijom, magnetnom metodom ili ultrazvukom) i označi sa "prag NDT", onda je njeno mjesto u krajnjem lijevom položaju na sl. 1. Da bi se postigla željena sigurnost neće se prihvatiti dio koji sadrži pukotine veće od one koja je na sl. 1. označena sa "granica prihvatljivosti". Jasno je da granica prihvatljivosti mora biti veća od praga NDT, jer samo u tom slučaju može biti otkrivena. U isto vrijeme, ona mora biti manja od veličine pukotine koja odgovara nivou početka razvoja pukotine (K_I). Ako se zamisli da je zbog subjektivne greške kontrole ili zbog nekog nepredviđenog uticaja početna greška nešto veća od granične za početak razvoja pukotine, onda, će se ona u radnim uslovima dijela stabilno povećavati zbog procesa plastičnog čupanja (nivo početne žilavosti za taj proces označen je sa K_I). Ovaj razvoj se ubrzava kada pukotina dostigne veličinu pri kojoj postaje aktivan mehanizam korozije pod naponom (ovaj nivo je označen sa K_{Isc}). Konačno, ako je pukotina ostala neotkrivena i u narednim kontrolama, može lako da dostigne kritičnu veličinu (označenu sa K_{Ic}), pri kojoj pojava loma više nije kontrolisana. U toj tački dolazi do katastrofalnog loma.

To znači da ne postoji dovoljna pouzdanost u procjeni sigurnosti zavarenih spojeva, jer sa jedne strane nema dovoljno podataka o greškama, a sa druge strane nije izvjesno kako će se pukotina razvijati prolazeći kroz različite strukture zavarenog spoja. Zbog toga je jedan od značajnih problema u ispitivanju uzoraka sa pukotinom iz zavarenog spoja gde postaviti vrh pukotine, i kako analizirati dobijene rezultate.

4. MEHANIKA LOMA ZAVARENIH SPOJEVA

Da bi se dobila što potpunija slika o primjeni ispitivanja mehanike loma na zavarene spojeve potrebno je ukratko opisati epruvete i ukazati na greške i odstupanja koja su pri tom moguća. Prije svega, predviđeno je da se epruvete mehanike loma ispituju zatezanjem ili savijanjem. Među brojnim oblicima koji su u različitim istraživanjima korišteni, najširu primjenu su našle epruvete za savijanje (sl. 2) i kompaktne epruvete za zatezanje (sl. 3).

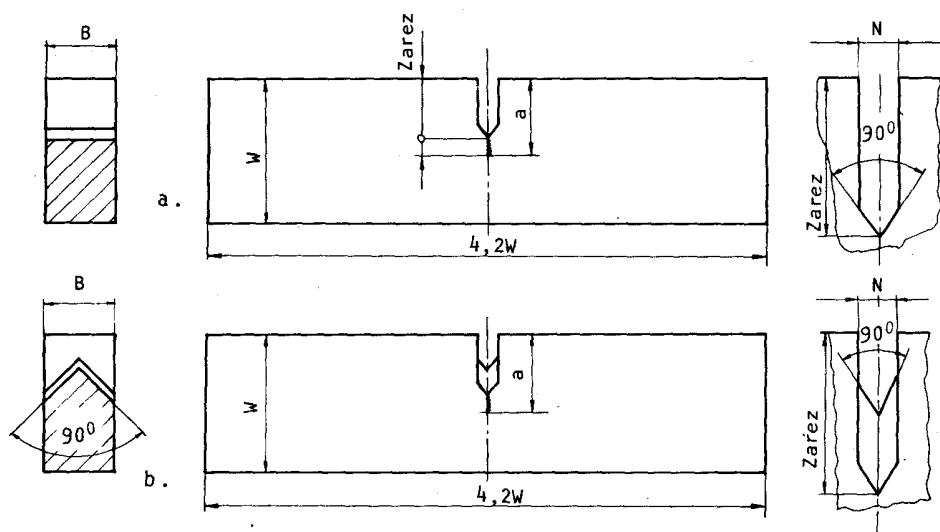
Epruveta za savijanje u tri tačke (savijanje silom) se pokazala veoma prikladnom za praksu, pa se primjenjuje u ispitivanjima za određivanje sva tri navedena parametra mehanike loma (K_{Ic} , δ , J). Kompaktna epruveta za zatezanje omogućava značajnu uštedu materijala u poređenju sa drugim oblicima epruveta,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

Ispitivanja mehanike loma su veoma složena. Da bi se dobili što tačniji rezultati moraju sve faze ispitivanja da budu precizno definisane i da svi zahtjevi u pogledu važenja rezultata budu ispunjeni.

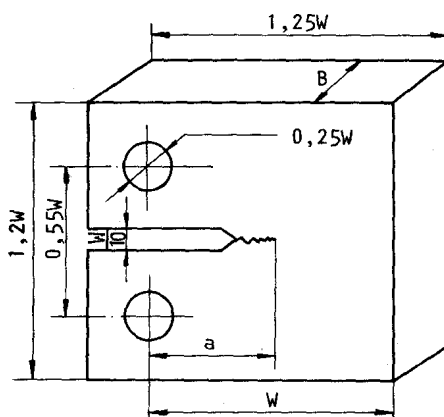
Pri tom se struktura materijala, od koga su epruvete izrađene, smatra homogenom, što omogućava da potrebne definicije budu dovoljno precizne. Ipak je potrebno da se istaknu moguća odstupanja u rezultatima ispitivanja, kako bi se i ona uzela u obzir kada se ispituju epruvete sa pukotinom iz zavarenog spoja, čija je struktura heterogena, a to su:

- uticaj konačnosti dimenzija epruveta,

- odstupanja i greške vezane za izradu i pripremu epruveta,
- odstupanja i greške vezane za tok ispitivanja, i
- odstupanja i greške vezane za analizu rezultata ispitivanja.



SLIKA 2. EPRUVETA ZA SAVIJANJE SA PRAVIM (A) I STRELASTIM (B) POČETNIM ZAREZOM.



SLIKA 3. KOMPAKTNA EPRUVETA ZA ZATEZANJE.

Ispitivanje epruveta sa pukotinom pokazuje lokalno ponašanje materijala oko vrha pukotine i polazi od pretpostavke da je materijal epruvete dovoljno homogen, što znači da se rezultati lokalnog ponašanja mogu tretirati globalno, odnosno da se mogu neposredno prenijeti na odgovarajuću konstrukciju. Imajući u vidu strukturu zavarenog spoja, ovakav postupak ispitivanja se pokazuje nedovoljno pouzdanim, jer vrh pukotine pri razvoju loma može da prolazi kroz područja različitih struktura i mehaničkih osobina zavarenog spoja. Zbog toga je potrebna detaljna analiza zavarenog spoja sa aspekta primjene mehanike loma.

Iskustva vezana za eksploataciju zavarenih spojeva su pokazala da su kritična mjesta u otpornosti prema lomu najčešće zona uticaja toplote i metal zavara. Ovo važi utoliko više, ukoliko se od mekih čelika i mekših legura pomjera ka čelicima i legurama visoke čvrstoće, kod kojih je teško obezbijediti takve dodatne materijale koji bi metalu zavara dali dovoljnu čvrstoću i plastičnost da najniži otpor prema lomu bude u osnovnom metalu.

Zbog opisanih ograničavajućih faktora uslovljenih mikrostrukturnom i makrostrukturnom nehomogenošću zavarenog spoja kao dijela konstrukcije, raspoložive metode koje mehanika loma nudi nisu podjednako primjenljive za određivanje najniže vrijednosti žilavosti loma u spoju. Ako se ima u vidu da je problem postavljanja vrha zamorne pukotine na kritično oslabljeno mjesto u zoni uticaja toplote zajednički za sve metode, onda bi kriterijumi za ocjenu primjenljivosti pojedinih metoda morali da se traže u njihovoj sposobnosti da mjere žilavost loma neposredno ispred vrha pukotine, nezavisno od uticaja materijala na većim rastojanjima od tzv. procesne zone na vrhu pukotine. U tom pogledu bi K_{Ic} kao linearno-elastični pokazatelj žilavosti loma bio u nesumnjivoj prednosti, jer su uslovi za ograničavanje plastične zone pri njegovom određivanju oštiri nego kod elasto-plastičnih pokazatelja. U realnim situacijama, pri ispitivanju zavora, ovi oštri uslovi nažalost rijetko mogu da se ispune, zato što je u pitanju najčešće čelik relativno visoke žilavosti loma K_{Ic} i istovremeno relativno niske granice tečenja σ_T a veličina plastične zone ispred vrha pukotine je proporcionalna sa $(K_{Ic}/\sigma_T)^2$. Kontrola veličine plastične zone povećanjem dimenzija uzorka je teško ostvarljiva, prvo zato što zahtjevi kod mekših čelika traže uzorke koji višestruko prelaze debljinu konstrukcijskih elemenata, a zatim što se kod uzoraka isječenih iz zavora sa povećanjem dimenzija komplikuje postavljanje vrha pukotine u kritičnu zonu.

Otvaranje na vrhu pukotine δ (CTOD) u poređenju sa drugim parametrima mehanike loma se pokazalo kao najpogodnija mjera žilavosti loma u zavaru, što svjedoči veliki broj publikovanih istraživačkih radova, a naročito više od 40 primjena pri izradi odgovornih zavarenih konstrukcija (cjevovodi, morske platforme itd.) [3,6,8].

Otvaranje na vrhu pukotine δ (CTOD) kao deformacijski kriterijum najdalje zadire u oblast duktilnog loma. Analitički postupak za određivanje karakteristične vrijednosti otvaranja je usredsređen na deformacije oko vrha pukotine, što mu obezbjeđuje veće lokalno značenje od drugih naponskih i energetskih kriterijuma. U vezi s tim, eksperimentalno određivanje kritične vrijednosti je jednostavnije nego kada su u pitanju drugi pokazatelji, što uz preciznije lokalno značenje dobijenog rezultata predstavlja značajnu prednost. Otvaranje na vrhu pukotine CTOD se pokazalo pogodnijim od drugih pokazatelja žilavosti loma i po tome što je do sada od svih pokazatelja mehanike loma jedino za δ_c napravljen pokušaj prilagođavanja na mikrostrukturnu asimetriju na vrhu pukotine, koja ima direktne posljedice po deformacijsku i naponsku asimetriju.

Slijedeći parametar žilavosti loma je J-integral kao pokazatelj elasto-plastične mehanike loma. J-integral je kao parametar dosta osjetljiviji od drugih parametara na nehomogenost zavora i na asimetriju koja iz nje proizilazi. J_{Ic} kao kritična vrijednost žilavosti loma se po metodologiji za homogene materijale određuje ekstrapolacijom iz J_R krive.

Ključno pitanje u razmatranju žilavosti loma u zavaru je u kojoj je mjeri i pod kojim uslovima najniža vrijednost žilavosti loma u uskim područjima veličine dijelova milimetra od presudnog uticaja na ponašanje čitavog zavora kao dijela konstrukcije, pa time i čitave zavarene konstrukcije.

Heterogenost strukture i mehaničkih osobina zavarenih spojeva doprinosi usložnjavanju problema, prije svega u zavisnosti od položaja vrha zamorne pukotine i osobina područja kroz koja se lom razvija. Ali, ako se zavareni spoj tretira kao konstrukcijska cjelina, onda je od interesa odrediti odgovarajuće podatke za najslabije mesto kada je u pitanju lokalno ispitivanje, kakvo je određivanje parametara mehanike loma.

Poznavajući vrijednosti kritičnog J_{Ic} integrala može se izračunati vrednost kritičnog faktora intenziteta napona ili žilavost loma pri ravnoj deformaciji K_{Ic} , pomoću zavisnosti:

$$K_{Ic} = \sqrt{\frac{J_{Ic} \cdot E}{1 - \nu^2}} \quad [\text{MPa}\sqrt{\text{m}}]. \quad \dots 1$$

Očigledno je da strukturne i mehaničke heterogenosti zavarenog spoja imaju značajni uticaj na njegovu otpornost prema razvoju pukotine, 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 pukotine, već i način tumačenja i značenje rezultata. Ovde treba napomenuti da se sa konstrukcijskog aspekta osobine materijala mogu mnogo bolje procjeniti kroz pojedinačne veličine K_{Ic} i σ_T i njihov odnos K_{Ic}/σ_T (koji je i u standardu E399, odnosno BS 5447 mjerodavna veličina), nego samo na osnovu jedne od njih. Kod zavarenih spojeva će često napon na granici tečenja σ_T metala zavara biti veći ili manji od odgovarajuće vrijednosti za osnovni metal. Imajući u vidu razlike u veličini K_{Ic} , očigledno je da će puna ocjena zavarenog spoja zahtijevati analizu ove dvije veličine σ_T i K_{Ic} .

5. ZAKLJUČAK

Bez obzira na uslove koje propisuju standardi o kvalitetu zavarenih spojeva u realnim uslovima zavarena konstrukcija ipak sadrži greške i pukotine. Iako tehnike ispitivanja bez razaranja mogu otkriti različite greške, u mnogim slučajevima će biti donijeta odluka da se one ostave do granice prihvatljivosti (Slika 1.). U tom slučaju ocjena lokalnog ponašanja područja zavarenog spoja u blizini greške je isto toliko važna kao i ocjena globalnog ponašanja čitavog spoja.

I pored svih nedoumica i neizvjesnosti, primena mehanike loma kod ispitivanja zavarenih spojeva je sve šira. Razlog treba tražiti, prije svega, u boljem i potpunijem razumjevanju ponašanja opterećenog zavarenog spoja sa pukotinom na osnovu analize podataka dobijenih u tim ispitivanjima

6. LITERATURA

- [1] Bajramović Armina: Osiguranje kvaliteta zavarenog spoja, Diplomski rad, Mašinski fakultet, Zenica, 2000.,
- [2] Zbirka standarda: Obezbjedenje kvaliteta u zavarivanju, Savezni zavod za standardizaciju, Beograd, 1996.,
- [3] Monografija: Mehanika loma zavarenih spojeva, Institut GOŠA, Smederevska palanka, 1984.,
- [4] Zijah H. Burzić: Mikromehanički aspekti iniciranja i rasta prsline kod legura na bazi Al-Li sistema, Doktorska disertacija, Tehnološko-metalurški fakultet u Beogradu, 1995.,
- [5] D.Šumarac i D.Krajčinović: Osnovi mehanike loma, Naučna knjiga, Beograd, 1990.,
- [6] A.Sedmak i drugi: Mašinski materijali-2.dio, Mašinski fakultet, Beograd, 2000.,
- [7] Standardi: ISO, EN, ASTM, BS, JUS, BAS,
- [8] Monografija: Eksperimentalne i numeričke metode mehanike loma u ocjeni integriteta konstrukcija, Velika Plana, 1997.,