

# VPLIV TRDNOSTNE NEENAKOSTI NA LOMNO VEDENJE VISOKOTRDNOSTNEGA ZVARNEGA SPOJA Z MEHKIM KORENSKIM SLOJEM

## EFFECT OF STRENGTH MISMATCH ON FRACTURE BEHAVIOUR OF HSLA STEEL WELD JOINT CONTAINING SOFT ROOT LAYER

ZDRAVKO PRAUNSEIS, I. RAK

<sup>1</sup>Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo

*Prejem rokopisa - received: 1997-10-01; sprejem za objavo - accepted for publication: 1997-12-19*

Glede na varivost poboljšanih visokotrdnostnih malolegiranih konstrukcijskih jekel ter predvsem s stališča ekonomičnosti je izvedba zvara z manjšo napetostjo tečenja oziroma z "mehkimi" korenskimi sloji (uporaba elektrod z manjšo napetostjo tečenja) zaželena, če lahko dosežemo veliko žilavost zvara, ki ne bo ogrožala varnega obratovanja zvarjenih konstrukcij.

V prispevku so preučevane lomne lastnosti večvarkovnega manj trdnega zvarnega spoja X z mehkim korenskim slojem in brez njega, varjenega na poboljšanem visokotrdnostnem malolegiranim konstrukcijskem jeklu (debelina 40 mm) MICRAL 690 in v zaščitni atmosferi plina (80 % Ar + 20 % CO<sub>2</sub>). Za CTOD preizkušanje zvarnih spojev so bili uporabljeni standardni upogibni preizkušanci z globoko ( $a/W = 0,5$ ) razpoko v toplotno vplivanem področju in zvaru. Vrednosti lomne žilavosti CTOD so bile neposredno izmerjene na konici razpoke (CTOD -  $\delta_5$ ) z merilno metodo  $\delta_5$ , ki je posebno primerna za določitev lomne žilavosti trdnostno heterogenih zvarnih spojev. V primeru zvarnega spoja X z mehkim korenskim slojem je opazen vpliv slednjega z najmanjšo trdnostjo na lomno žilavost CTOD celotnega zvarnega spoja.

**Ključne besede:** trdnostna neenakost, nižja trdnost zvara, mehki korenski sloj, lomna žilavost, preizkus CTOD, oviranje deformacije, lokalno krhka področja (LKP)

At welding of quenched and tempered (Q + T) high strength low alloyed steels (HSLA) the weld strength undermatching can be used to satisfy the toughness requirements for the weld deposit. Cost of reduced pre-heating of these steels can be saved if one can prove that use of soft electrodes for root passes do not endanger the overall quality of the joint.

Present work deals with the measurements of Charpy impact toughness and CTOD fracture toughness of undermatched X-grooved multy pass weld joints with soft and without soft root layer mode on HSLA steel (40 mm thick) grade HT 80. The FCAW (Fluxo Cored Arc Welding) welding procedure was applied. CTOD SENB specimens were used with the respect to different deep ( $a/W = 0.5$ ) location in the HAZ and WM of the mentioned weld joints. Direct local CTOD ( $\delta_5$ ) technique is found to be particular useful for the determination of fracture toughness values on such complex weldments. CTOD values were clearly influenced by softer material in the root layer. The metallographical post-test sectioning has revealed the initiation points (LBZs) mainly at the lowest weld metal strength.

**Key words:** strength mismatching, undermatched welds, soft root layer, fracture toughness, CTOD test, constraint effect, local brittle zones (LBZ)

### 1 UVOD

V zvarnih spojih močno in kompleksno obremenjenih konstrukcij, izdelanih iz visokotrdnostnih malolegiranih konstrukcijskih jekel pogostokrat nastopajo trdnostne neenakosti med zvarom, osnovnim materialom in toplotno vplivanim področjem (TVP). Zvarni spoj je sestavljen iz zvara in TVP. V primeru, kadar ima strjeni zvar manjšo napetost tečenja od osnovnega materiala, govorimo o zvarnem spoju z manjšo trdnostjo. Koefficient trdnostne neenakosti (M) je definiran kot razmerje med napetostjo tečenja strjenega zvara in napetostjo tečenja osnovnega materiala in je v primeru zvarnega spoja z manjšo trdnostjo  $M < 1$ . Z njim lahko opišemo stanje trdnostne heterogenosti v vsaki točki na prerezu zvarnega spoja.

Za varno obratovanje zvarjenih konstrukcij je izredno pomembno, da upoštevamo možnost ploskovnih napak (razpoke zaradi vodika, zlepljena mesta itd.), skratka napak in lokalno krhkih področij, ki lahko povzročijo lom

v TVP ali zvaru. Osnovna značilnost zvarnega spoja z manjšo trdnostjo, v katerem je ravninska napaka, je v tem, da TVP in osnovni material pri preobremenitvi zvarnega spoja ostane v elastičnem napetostnem področju, medtem ko se material strjenega zvara že prične plastično deformirati. Zaradi tega je potrebna velika žilavost zvara, da se le-ta pri lokalni plastični deformaciji vede duktilno oziroma da s tem zagotovimo utrjevanje materiala zvara brez hitre porušitve.<sup>7-8</sup>

S stališča varivosti visokotrdnostnih malolegiranih konstrukcijskih jekel ter predvsem ekonomičnosti je izvedba zvara z manjšo napetostjo tečenja zaželena. Varke z manjšo trdnostjo uporabljamo pri reparaturnem varjenju zvarnih spojev, ki so bili poškodovani pri obratovanju zaradi ostrih obratovalnih razmer ali celo pri trenutni preobremenitvi konstrukcije. Strjeni zvari z manjšo trdnostjo se priporočajo za preprečevanje vodikove razpokljivosti v hladnem, še posebej za zvarne spoje iz visokotrdnostnih malolegiranih konstrukcijskih jekel z napetostjo tečenja nad 700 MPa.

**Preglednica 2.1:** Tehnologija varjenja homogenega in heterogenega zvarnega spoja z manjšo trdnostjo

**Table 2.1:** Welding procedure for undermatched joint with homogeneous and heterogeneous weld metals

| Zvarni spoj                             | Homogeni zvarni spoj |             | Heterogeni zvarni spoj |             |
|---|----------------------|-------------|------------------------|-------------|
|   | koren                | teme        | mehki koren            | mehko teme  |
| Mesto zvara                             |                      |             |                        |             |
| Dodajni material (polnjena žica - f1.2) | WELTEC B575          | WELTEC B575 | WELTEC B370            | WELTEC B575 |
| Temp. predgrevanja, °C/2h               | 120                  | /           | /                      | /           |
| Vnesena energija, Q(kJ/cm)              | 16.5                 | 16-23       | 10,1                   | 16-23       |
| Izračunani Dt <sub>8/5,s</sub>          | 9.5                  | 10.7        | 7.1                    | 10.3        |
| Izmerjeni Dt <sub>8/5,s</sub>           | 8.9                  | 9.2         | 6.7                    | 8.6         |
| Medvarkovna temp., °C/2h                | 135                  | 135         | 50                     | 135         |
| Temp. pogrevanja °C/2h                  | /                    | 200         | /                      | /           |
| Število varkov                          | 2                    | 14          | 2 (4)                  | 16 (15)     |

Glavni namen naše raziskave je bil ugotoviti ali je izbrana varilna tehnologija za zvarni spoj z mehkim korenskim slojem priporočljiva oziroma uporabna za izboljšanje varivosti visokotrdnostnih malolegiranih konstrukcijskih jekel komercialne kakovosti (MICRAL 690) glede na doseženo lomno žilavost zvara oziroma mehkega korenskega sloja in ali lahko jamčimo varno obratovanje zavarjene konstrukcije v primeru poostrenih razmer.

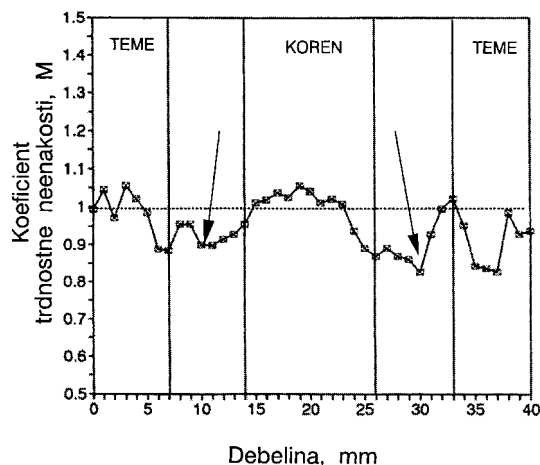
## 2 REZULTATI IN OBRAVNAVA

Z izbrano tehnologijo varjenja (pregl. 2.1) in MAG postopkom varjenja v zaščitni atmosferi plinske mešanice (80 % Ar + 20 % CO<sub>2</sub>) je bil zavarjen homogeni (zvarni spoj brez mehkega korenskega sloja) in heterogeni (zvarni spoj z mehkim korenskim slojem) večvarkovni sočelni zvarni spoj X. Homogeni zvarni spoj je bil izveden s predgrevanjem in pogrevanjem os-

**Preglednica 2.2:** Mehanske lastnosti in kemična sestava homogenega in heterogenega zvarnega spoja z manjšo trdnostjo

**Table 2.2:** Mechanical properties and chemical composition of homogeneous and heterogeneous undermatched weld joints

| Material   | Rp (MPa) |      | Rm (MPa) | A (%) | Udarna žilavost (J) pri -10°C |      |      | Pričakovan M  | Dosežen M     |    |    |    |
|--|----------|------|----------|-------|-------------------------------|------|------|---------------|---------------|----|----|----|
| Osnovni material - MICRAL 690  |          |      |          |       |                               |      |      |               |               |    |    |    |
| OM   | 693      |      | 830      | 19,6  | 79, 78, 64                    |      |      | -             | -             |    |    |    |
| Homogeni zvar (celoten zvar iz WELTEC B 575)                             |          |      |          |       |                               |      |      |               |               |    |    |    |
| zvar - teme  | 687      |      | 804      | 22,3  | 110, 104, 102                 |      |      | 0,76          | 0,99          |    |    |    |
| zvar - koren   | 730      |      | 803      | 21,8  | 72, 38, 50                    |      |      | 0,76          | 1,05          |    |    |    |
| Heterogeni zvar (mehki koren - WELTEC B 370 + teme zvara - WELTEC B 575) |          |      |          |       |                               |      |      |               |               |    |    |    |
| zvar - 2x mehki koren  | 567      |      | 625      | 19,7  | -                             |      |      | 0,56 v korenu | 0,81 v korenu |    |    |    |
| zvar - 4x mehki koren  | 631      |      | 673      | 21,9  | 35, 17, 34                    |      |      | 0,56 v korenu | 0,91 v korenu |    |    |    |
| Kemična sestava (%)  |          |      |          |       |                               |      |      |               |               |    |    |    |
|  | C        | Si   | Mn       | P     | S                             | Cr   | Ni   | Mo            | Cu            | Al | Ti | Nb |
| zvar hom. - teme   | 0,04     | 0,44 | 1,48     | 0,010 | 0,009                         | 0,12 | 1,63 | 0,49          | 0,12          | -  | -  | -  |
| zvar hom. - koren  | 0,10     | 0,33 | 0,89     | 0,013 | 0,008                         | 0,73 | 1,11 | 0,42          | 0,13          | -  | -  | -  |
| zvar - 2x mehki koren  | 0,12     | 0,41 | 0,78     | 0,015 | 0,006                         | 0,40 | 0,10 | 0,17          | 0,16          | -  | -  | -  |
| zvar - 4x mehki koren  | 0,10     | 0,33 | 0,78     | 0,012 | 0,007                         | 0,24 | 0,13 | 0,11          | 0,13          | -  | -  | -  |



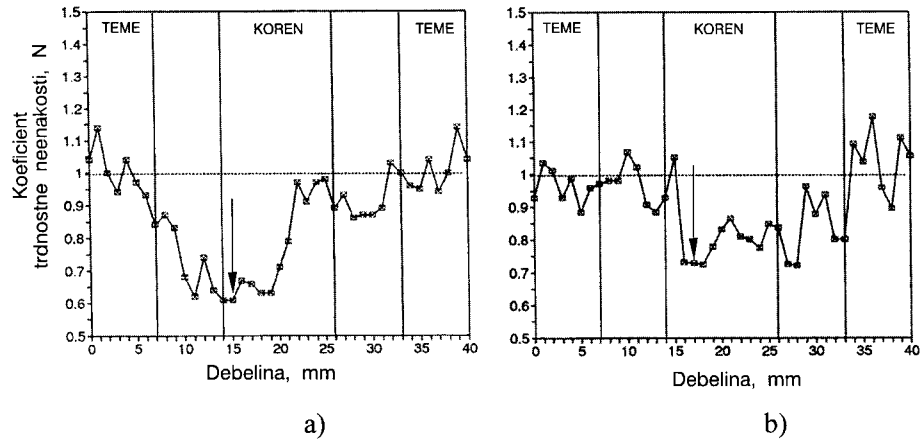
**Slika 2.3:** Koefficient trdnostne neenakosti M skozi debelino večvarkovnega homogenega zvara z manjšo trdnostjo

**Figure 2.3:** Distribution of the strength mismatching factor M across the thickness of multi-pass homogeneous undermatched weld

novnega materiala in je bil v celoti grajen z enakim dodajnim materialom (žica WELTEC B 575) ter s predvidenim koefficientom  $M = 0,76$ . Heterogeni zvarni spoj je bil zavarjen z namenom, da bi se izognili predgrevanju osnovnega materiala in hkrati preprečili nastanek razpok v hladnem. Zaradi tega je bil uporabljen za korensko polnitev zvara mehkejši dodajni material, žica WELTEC B 370 s pričakovanim koefficientom  $M = 0,56$ , medtem ko je bilo teme zvara zavarjeno z žico WELTEC B 575 in pričakovano vrednostjo koefficienta  $M = 0,76$ .

### 2.1 Mehanske lastnosti in določitev koefficienta trdnostne neenakosti M

Pričakovane mehanske lastnosti heterogenega strjenega zvara niso bile dosežene v polnilnih varkih in tudi ne v korenu homogenega zvara. Navedeno lahko ugotovimo s primerjavo mehanskih lastnosti in medsebo-



**Slika 2.4:** Koeficient trdnostne neenakosti  $M$  v smeri debeline zvara z dvovarkovnim a) in štirivarkovnim b) mehkim korenem  
**Figure 2.4:** Distribution of the strength mismatch factor  $M$  across the thickness of the undermatched welded joints with two-pass a) and four-pass b) soft root layer

jno primerjavo pričakovanih in doseženih koeficientov  $M$  (preglednica 2.2).

Vzrok za to je legiranje strjenega zvara z elementi iz osnovnega materiala. Vpliv legiranja je večji v korenu kot pa v polnilnih varkih. To je tudi glavni razlog za neenake trdnosti v smeri debeline homogenega in heterogenega zvara. Spreminjanje koeficienta trdnostne neenakosti  $M$  (izračunanega<sup>6</sup> iz trdote) po debelini homogenega in heterogenega zvara (sliki 2.3 in 2.4) kaže na to, da je določitev globalnega  $M$  za realne zvarne spoje zelo kompleksen problem.

Eden od pomembnih razlogov za to je gotovo legiranje zvara med varjenjem ter s tem povezana sprememba kaljivosti. Koeficiente trdnostne neenakosti na slikah 2.3 in 2.4 ter preglednici 2.2 lahko primerjamo med seboj. Zavedati se moramo, da so mehanske lastnosti v preglednici 2.2 povprečne lastnosti natanko tistih področij zvara, iz katerih so bili odvzeti okrogli preizkušanci za natezni preizkus, in ne kažejo natančneje trdnostne neenakosti celotnega zvarnega spoja. Iz vrednosti koeficientov trdnostne neenakosti  $M$  v preglednici 2.2 ugotovimo, da se je korenu homogenega zvara zvečala trdnost ( $M = 1,05 \Rightarrow 5\%$  zvar z večjo trdnostjo) do take mere, da se lahko v njem pojavijo razpoke v hladnem. Področje polnilnih varkov pa se je približalo trdnostnim lastnostim osnovnega materiala ( $M = 0,99 \Rightarrow 0\%$ ). To dejstvo opravičuje odločitev gradnje heterogenega zvara z dvovarkovnim ( $M = 0,8 \Rightarrow 20\%$  zvar z manjšo trdnostjo) oziroma štirivarkovnim ( $M = 0,9 \Rightarrow 10\%$  zvar z manjšo trdnostjo) mehkim korenem za preprečitev razpokanja v hladnem oziroma varjenje heterogenega zvara brez predgrevanja osnovnega materiala (preglednica 2.1).

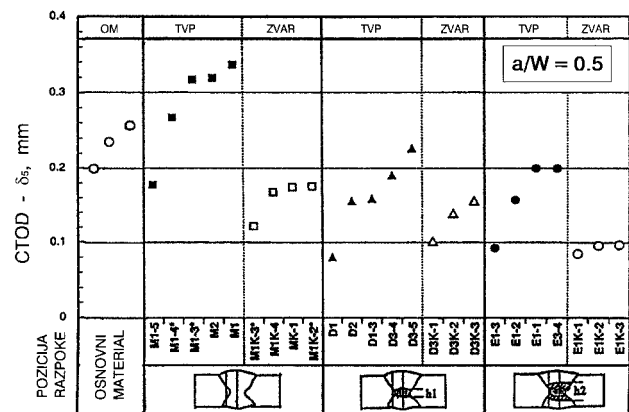
### 2.2 Določitev vrednosti kritičnega odpiranja konice razpoke (CTOD)

Na tritočkovnih preizkušancih Bx2B ( $B=36\text{mm}$ ) je bila pred izvajanjem preizkusa CTOD narejena utrujenostna razpoka z globino  $a/W = 0,5$  in nameščena pravokotno na debelino zvarnega spoja v TVP in zvar homogenega in heterogenega zvarnega spoja. Za izdelavo

enakomerne fronte utrujenostne razpoke je bila uporabljena metoda SHR (ang.: Step-wise High R-ratio). Vsi preizkusi so bili izvedeni pri  $-10^\circ\text{C}$ . Vrednost CTOD je bila določena po standardu BS 5762 in z neposrednim merjenjem po metodi  $\delta_5$ , ki omogoča meritev pomikov dveh točk ob konici utrujenostne razpoke na razdalji 5 mm. Za opazovanje stabilne rasti razpoke je bila med preizkušanjem uporabljena tehnika merjenja padca potenciala enosmernega toka.

Globalna primerjava izmerjenih lomnih CTOD žilavosti zvarov homogenega in heterogenega zvarnega spoja z mehkim korenem debeline  $h_1 \approx 8\text{ mm}$  podaja približno enaki velikostni red (slika 2.5), vendar pri debelini mehkega korenskega sloja  $h_2 \approx 11\text{ mm}$  rezultati CTOD že kažejo na zmanjševanje lomne žilavosti heterogenega zvarnega spoja.

Na upogibnih preizkušancih z razpoko v homogenem zvaru (zvaru brez mehkega korena) smo pričakovali lokalna krhka področja v korenu zvara, kjer je izmerjena najmanjša udarna žilavost homogenega zvara (slika 2.5). Na tem mestu je oviranje deformacije zaradi oblike



\*) Neenakomerna fronta utrujenostne razpoke

**Slika 2.5:** CTOD ( $\delta_5$ )-lomne žilavosti homogenega in heterogenega zvarnega spoja z manjšo trdnostjo, izmerjene pri temperaturi  $-10^\circ\text{C}$  za preizkušance B x 2B

**Figure 2.5:** CTOD ( $\delta_5$ ) fracture toughness values for specimens B x 2B in homogeneous and heterogeneous undermatched weld joints, measured at  $-10^\circ\text{C}$

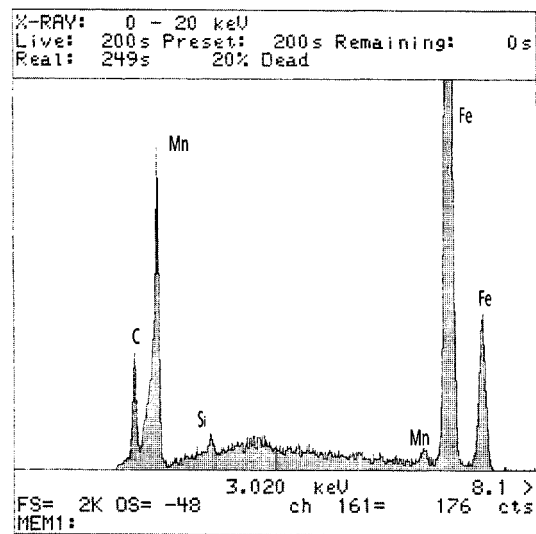
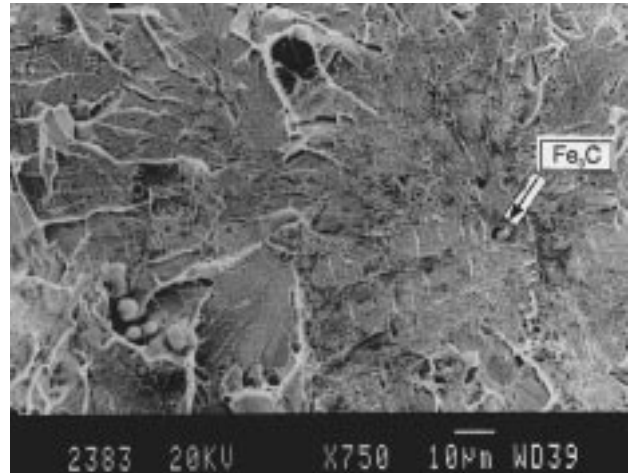
zvarnega žleba  $X$  (koeficient širine zvara ( $H$ )/dolžini nezlomljenega ligamenta ( $W-a$ ) in globine razpoke ( $a/W = 0,5$ ) največje, saj je koeficient  $H/W-a$  najmanjši. Zaradi vpliva lokalne trdnostne neenakosti  $M$  na fronti utrujenostne razpoke oziroma zaščitnega vpliva korena zvara z večjo trdnostjo so se sprožilci začetnega krhkega loma pojavili v najmehkejšem področju zvara, tj. na mestu z najmanjšimi vrednostmi koeficienta  $M$  (slika 2.3 - glej puščice) oziroma na obeh straneh korena zvara z večjo trdnostjo, tj. v polnilnih varkih.

Vrednosti lomne žilavosti CTOD -  $\delta_s$  (slika 2.5) preizkušancev  $B \times 2B$  z globoko razpoko v heterogenem zvaru kažejo na zmanjševanje lomne žilavosti z večanjem volumna mehkega korena pri debelini mehkega sloja v korenu  $h > 8$  mm. Pri omenjenih CTOD-preizkušancih se je krhki lom pojavil v sredini mehkega korena brez predhodnih krhkih začetkov loma, in sicer na mestu najmanjše vrednosti koeficienta  $M$  (slika 2.4 - glej puščice) kot posledica izrazito majhne žilavosti mehkega korena (slika 2.5). Glavni vzrok za majhno žilavost mehkega korena je sprememba mikrostrukture čistega zvara pri varjenju mehkega korena zaradi delovanja različnih mehanizmov legiranja v talini korena.

S slike 2.5 je razvidno, da je TVP lomna žilavost v homogenem zvarnem spoju znatno večja od TVP lomne žilavosti v heterogenem zvarnem spoju. Razlog za veliko žilavost v TVP je sestavljena fronta utrujenostne razpoke, ki prečka le ozko področje TVP oziroma grobozrnatega področja TVP z izrazito majhno lomno žilavostjo. Preostali del, večinski delež utrujenostne fronte, pa sestavlja bolj žilav material polnilnih varkov, osnovnega materiala in preostalo fino-zrnato področje TVP.

Pri upogibnih preizkušancih z razpoko v TVP homogenega zvarnega spoja so se prvi začetki krhkega loma pojavili v materialu zvara z majhno vrednostjo koeficienta  $M$  (slika 2.3 - glej puščici) zaradi zaščitnega vpliva korena zvara z večjo trdnostjo. Povečanje intenzitete napetosti v TVP je med obremenjevanjem privedlo do končnega krhkega zloma preizkušanca preko grobozrnatega področja TVP in osnovnega materiala, ki sta dajala premajhen odpor na sredini preizkušanca. Začetek končnega krhkega zloma je bil v bolj žilavem področju TVP z drobnim zrnom, segretem na medkritično temperaturo. Odklon razpoke se je pojavil v smeri mehkejšega osnovnega materiala zaradi vpliva korena zvara z večjo trdnostjo oziroma njegovega zaščitnega efekta.

V primeru lomnomehanskega preizkušanja preizkušancev z mehkim korenem sta se prva krhka loma pričela v grobozrnatem področju TVP, ponovno segretem na medkritično temperaturo. Zaradi velike lokalne trdnostne neenakosti  $M$  med osnovnim materialom in mehkim korenem se je nato razpoka odklonila proti področju z majhno žilavostjo oziroma proti liniji zlitja in zvaru z manjšo trdnostjo. Kot sprožilec začetnega krhkega loma smo identificirali karbid  $Fe_3C$  (slika 2.6).



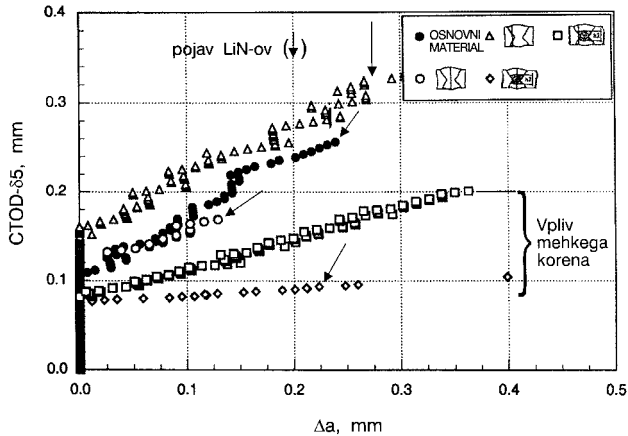
b)

**Slika 2.6:** Identifikacija sprožilca krhkega loma  $Fe_3C$  a) z analizo EDX b) na prelomni površini preizkušanca s plitvo razpoko v TVP zvarnega spoja

**Figure 2.6:** Identification of brittle fracture initiation point as  $Fe_3C$  a) using EDX analysis b) on the fracture surface of specimen with shallow crack in HAZ

Mehki koren je vplival na porazdelitev deformacij vzdolž fronte utrujenostne razpoke v tolikšni meri, da je povzročil koncentracijo deformacij v samem mehkem korenem. To je povzročilo zaradi njegove majhne žilavosti začetek končnega krhkega zloma preizkušanca v področju TVP z bolj grobim zrnom, segretem na medkritično temperaturo in odklon razpoke proti mehkeemu korenem zvara z manjšo trdnostjo, kar je še dodatno zmanjšalo nivo žilavosti, ki bi lahko bil dosežen pri večji žilavosti mehkega korena.

Iz medsebojne primerjave odpornostnih krivulj za preizkušance z globoko razpoko v zvaru in TVP heterogenega zvarnega spoja (slika 2.7) je razvidno, da je vpliv mehkega korena na lomno žilavost zvara večji (izrazitejši) kot na lomno žilavost TVP, kar se kaže v manjši lomni žilavosti zvara.



**Slika 2.7:** Medsebojna primerjava R krivulj preizkušancev (B x 2B) z globoko razpoko ( $a/W = 0,5$ ) v zvaru in TVP homogenega in heterogenega zvarnega spoja z manjšo trdnostjo

**Figure 2.7:** Comparison of R curves for specimens (B x 2B) with deep crack ( $a/W = 0.5$ ) in HAZ and weld metal of homogeneous and heterogeneous undermatched weld joints.

### 3 SKLEPI

Rezultati eksperimentalne raziskave<sup>1-5</sup> lomnomehanskega vedenja homogenega in heterogenega zvarnega spoja z manjšo trdnostjo vodijo do naslednjih sklepov:

1. V večvarkovnem homogenem in heterogenem zvarnem spoju nastopa poleg globalne trdnostne neenakosti ( $M = R_{pzvara}/R_{pOM}$ ) tudi lokalna trdnostna neenakost, ki nastane zaradi legiranja materiala zvara in ima posebno velik vpliv na lomnomehansko vedenje področij zvara z majhno žilavostjo.
2. Izbira žilavega mehkega dodatnega materiala (varilne žice) še ne pomeni izdelavo žilavega korenskega sloja v zvarnem spoju. Stopnja legiranja korena zvara s strani osnovnega materiala je odvisna od izbranega dodatnega materiala in tehnologije varjenja.
3. Lomna žilavost CTOD zvara z mehkim korenem se zmanjšuje z večanjem volumna mehkega korena ( $h > 8$  mm).
4. Lomnomehansko vedenje preizkušancev CTOD z globoko razpoko je odvisno od naslednjih treh parametrov na konici razpoke: geometrijskega oviranja deformacije, ki nastane zaradi različne globine

razpoke  $a/W$ , koeficienta oblike zvarnega žleba  $H/W$  a ter koeficienta oviranja plastične deformacije v korenu zvarnega spoja zaradi heterogenosti trdnostnih lastnosti.

5. Tehnologija varjenja brez predgrevanja visokotrdnostnih malolegiranih konstrukcijskih jekel oziroma varjenje zvarnega spoja z mehkim korenem je tehnološki izziv za izdelavo modernih zvarjenih konstrukcij, vendar jo je možno uporabiti le, če dosežemo veliko žilavost mehkega korenskega sloja, ki je večja od žilavosti drugih polnilnih in temenskih varkov, ter TVP. Ker pa navedeno trenutno ni možno doseči pri visokotrdnostnih malolegiranih konstrukcijskih jeklih, lahko navedeno tehnologijo varjenja uporabimo le pri manj izkoriščenih zvarnih spojih ter tam, kjer zaradi velike togosti nastane nevarnost vodikovih razpok v hladnem.

### 4 LITERATURA

1. Rak, I., Kocak, M., Gliha, V., Gubeljak, N., Praunseis, Z.: "Effect of global and local strength mis-match on fracture toughness of HSLA steel weld joints." IIW doc. IX-1821-95, Stockholm, Sweden, 1996
2. Praunseis, Z. and Rak, I.: "Fracture toughness of undermatched weld joints containing soft root passes made on HSLA steel." Proceeding of the International Welding Conference - Welding science & Technology. Tatranska Lomnica, Slovakia, March 5th - 7th, 1996, 310-319
3. Rak, I., Kocak, M., Gliha, V., Gubeljak, N., Praunseis, Z.: "Effect of soft root layer on fracture toughness of under-matched weld joints on Q+T steel." Proceedings of the 15th International Conference OMAE, Florence, Italy, June 16 - 20, 383-393
4. Praunseis, Z. and Rak, I.: "Fracture behaviour of mis-matched weld joints of HSLA steel containing soft root layer." Proceedings of the 8th International Conference of the Joining of Materials JOM-8, Helsingor, Denmark, May 11 - 14, 1997
5. I. Rak, M. Kocak, B. Petrovski.: "Fracture toughness of under-matched welded joints containing soft root layers." Proceeding of the International Conference of filler materials and other consumables for welding and applied techniques, Poreč, Croatia, 10.-13. Oct. 1996
6. R.J. Pargerter.: "Yield Strength From Hardness Reappraisal for Weld Metal", pp. 241-257, Nov. 1978.
7. F. Planička, V. Laš, V. Vacek.: "Contribution to a behaviour of a crack in the region of brittle fracture", Acta Mechanica Slovaca, Košice (1998) 2, 125-130
8. N. Gubeljak.: "Fracture behaviour of specimens with notch tip partly in base metal of strength mis-match welded joints", submitted to International Journal of Fracture.