

LOMNA ŽILAVOST "OVER-MATCHED" ZVARNEGA SPOJA, IZMERJENA NA VELIKIH IN MAJHNIH PREIZKUŠANCIH

FRACTURE TOUGHNESS OF OVER-MATCHED WELD JOINT MEASURED ON LARGE AND SMALL SCALE SPECIMENS

Danilo Rojko, Tomaž Vuherer, Vladimir Gliha

Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru, Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenija
danilo.rojko@uni-mb.si

Prejem rokopisa - received: 2000-10-10; sprejem za objavo - accepted for publication: 2000-11-17

Pri tem delu smo eksperimentalno analizirali posledice trdnostne neenakosti "over-matched" zvarnega spoja in položaja konice na vedenje pri lomu. Zvarni spoj je bil izdelan z varjenjem pod praškom (EPP). Primerjali smo lomno žilavost CTOD, določeno pri standardnih upogibnih (SENB) in velikih nateznih (WP) preizkušancih, ter ocenili vpliv "constraint"-a pri nizkih temperaturah. Pri obeh tipih preizkušancev je bila razpoka narejena z utrujanjem materiala. Konica razpoke je bila v varu in grobozmatem toplotno vplivanem področju (GZTVP).

Lomno žilavost CTOD smo določili na podlagi predpisov, ki jih podaja BS 7448, oziroma smernic raziskovalnega centra GKSS.

Ključne besede: zvarni spoj, konstrukcijsko jeklo, NIOMOL 490K, trdnostna neenakost, lokalna krhka področja, upogibni SENB-preizkušanec, velik natezni WP-preizkušanec, lomna žilavost CTOD, var, grobozmatno toplotno vplivano področje

The effects of weld-joint strength mismatching and the crack-tip position on the fracture behaviour of over-matched welded joints produced by submerged arc welding (SAW) have been experimentally analysed. The comparison of CTOD fracture toughness values, determined on standard three-point bend (SENB) specimens and the large-scale tensile (WP) specimens, and the evaluation of the influence of constraint at low temperatures has been made. In both types of specimen the crack was made by fatigue. The crack tip was located in the weld metal and the coarse-grained heat-affected zone (CGHAZ).

Fracture toughness values were calculated according to BS 7448 using the direct measuring method (method₅), developed at the Research Centre Geesthacht GKSS.

Key words: weld joint, constructional steel, NIOMOL 490K, strength mismatching, local brittle zones, three-point bend specimens, large-scale tensile specimens, CTOD fracture toughness, weld metal, coarse-grained heat-affected zone

1 UVOD

Poleg teoretičnih in praktičnih znanj iz mehanike loma je treba pri poglobljeni analizi lomnih lastnosti zvarnih spojev upoštevati tudi posledice delovanja termičnega in deformacijskega vpliva varjenja, ki se izraža v heterogenosti mehanskih in metalurških lastnostih.

Neenakost mehanskih lastnosti vara, toplotno vplivanega področja (TVP) in osnovnega materiala povzroča težave pri določevanju in vrednotenju lomne žilavosti, saj so napetosti in deformacije na konici razpoke v trdnostno heterogenem materialu drugačne kot v homogenem. Rezultati raziskav kažejo, da je treba poleg globalne trdnostne heterogenosti upoštevati tudi lokalno, zlasti ko je konica razpoke v bližini linije zlitja.

Nastanek in potek loma ni odvisen samo od različnih deformacijskih zmožnosti osnovnega materiala in materiala vara, temveč tudi od načina obremenjevanja, geometrijske oblike preizkušanca oziroma zvarjene konstrukcije ter stopnje oviranja plastične deformacije na konici razpoke pod vplivom okoliškega manj deformiranega materiala (angl.: constraint).

Zaradi omejenih dimenzij standardnih preizkušancev za določevanje lomnih lastnosti zvarnih spojev so vrednosti, ki so določene z njihovo uporabo, nižje od

dejanskih. Ti rezultati zato niso realni pokazatelj stanja varjene konstrukcije. Če se želimo približati realnim razmeram, moramo lomno žilavost izmeriti pri velikih nateznih (WP) preizkušancih.

Pri tem delu smo eksperimentalno analizirali posledice trdnostne neenakosti zvarnega spoja in vpliv samega položaja konice razpoke v materialih različnih trdnostnih lastnosti na vedenje zvarnega spoja "over-matched" pri lomu. Primerjali smo CTOD-vrednosti lomne žilavosti, ki smo jih izmerili pri velikih nateznih (WP) in standardnih upogibnih (SENB) preizkušancih. Analiza rezultatov je pripeljala do nekaj zanimivih sklepov, ki kažejo na kompleksnost problema trdnostne neenakosti zvarnega spoja.

2 MATERIAL, ZVARNI SPOJ

2.1 Osnovni in dodajni material

Pri eksperimentalnem delu smo uporabili visokotrdnostno konstrukcijsko jeklo NIOMOL 490K, proizvajalca ACRONI Jesenice, s feritno-bainitno mikrostrukturo, drobnim zrnom in dobro žilavostjo pri nizkih temperaturah. Kemična sestava in mehanske

lastnosti uporabljenega jekla so prikazane v **tabelah 1 in 2**.

Za izdelavo korenskih varkov smo uporabili polno žico NiMo1-IG premera 1,2 mm proizvajalca Bohler¹, za polnilne varke pa polnjeno stržensko žico FILTUB 128 premera 4 mm ter varilni prašek FBTT². Kemična sestava in mehanske lastnosti dodatnih materialov so prikazane v **tabelah 3 in 4**, kemična sestava varilnega praška pa je podana v **tabeli 5**.

2.2 Izdelava zvarnega spoja

Na pločevini debeline 19 in 25 mm smo izdelali asimetrični K-zvarni spoj. Koren zvara smo zavarili po MAG-postopku, polnilne varke pa po EPP-postopku. Da bi dosegli zadovoljive mehanske lastnosti posameznih struktur zvarnega spoja, smo za korenske varke pred-

Tabela 1: Kemična sestava jekla NIOMOL 490K

Table 1: Chemical composition of steel NIOMOL 490K

Kemični element	C	Si	Mn	P	S
Atest (%)	0,08	0,24	0,36	0,008	0,002
Kemični element	Al	Cr	Mo	Nb	
Atest (%)	0,031	0,57	0,25	0,031	

Tabela 2: Mehanske lastnosti jekla NIOMOL 490K

Table 2: Mechanical properties of steel NIOMOL 490 K

	R _{p0.2} (MPa)	R _m (MPa)	A ₅ (%)	Udarna žilavost pri -60 °C (J)
Zahteve	≥470	520-670	≥17	60
Atest	491	531	20,9	300, 300, 300

Tabela 3: Kemična sestava dodatnih materialov

Table 3: Chemical composition of all weld metal

Dodatni material (%)	C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni
NiMo1	0,09	0,62	1,77	0,011	0,003	0,31	0,95
FILTUB 128	0,05	0,20	1,40	-	-	0,40	1,2

Tabela 4: Mehanske lastnosti dodatnega materiala

Table 4: Mechanical properties of all weld metal

Dodatni material	R _{p0.2} (MPa)	R _m (MPa)	A ₅ (%)
NiMo1	>550	650-680	>20
FILTUB 128	>550	630-730	>20

Tabela 5: Kemična sestava varilnega praška FB TT

Table 5: Chemical composition of flux FBTT

	Si+MgO (%)	CaO+MgO (%)	Al ₂ +MnO (%)	CaF ₂ (%)
FB TT	15	40	20	25

Tabela 6: Lomna žilavost SENB-preizkušancev

Table 6: Fracture toughness value of SENB specimens

	Položaj utrujenostne razpoke	a ₀ (mm)	a ₀ /W	Δa (mm)	δ (mm)
SENB1	TVP	22,57	0,5130	-	0,0453
SENB2	Var	22,55	0,5114	0,94	0,2344

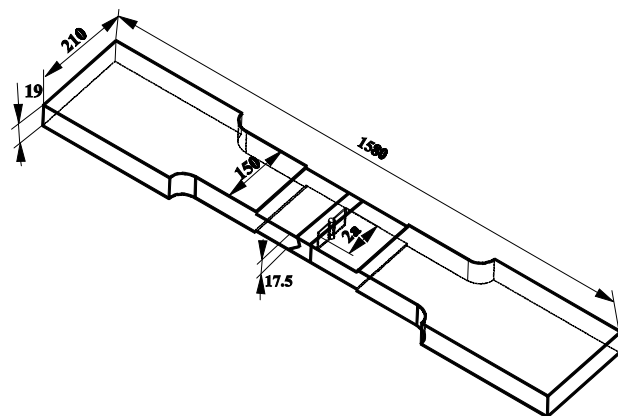
videli povprečni vnos toplote 6 kJ/cm, za polnilne varke pa 13 kJ/cm. Gradnja varkov se je zaradi velikih dimenzij etalonov izvajala najprej na eni strani etalona in se nato nadaljevala na drugi. Da bi se izognili kotni deformaciji etalonov po varjenju, smo pred začetkom varjenja uporabili preddeformacijo etalonov. Temperatura predgrevanja je bila T_p=50 °C, medvarkovna temperatura pa T_i=70 °C.

2.3 Izdelava preizkušancev

Standardne upogibne SENB-preizkušance (B=22mm, W=44mm, L=220mm, a/W=0,5) smo izrezali iz zvarnega spoja debeline 25 mm, medtem ko smo natezne WP-preizkušance izrezali iz zvarnega spoja debeline 19 mm. Oblika in dimenzije nateznega WP-preizkušanca z razpoko velikosti a/W=0,5 so razvidne s **slIKE 1**. Z elektroerozijo smo napravili režo širine 0,3 mm in dolžine 69 mm, ki je rabila za izdelavo utrujenostne razpoke. Pri obeh tipih preizkušancev je utrujenostna razpoka potekala skozi celotno debelino in je bila narejena s kontroliranim utrujanjem materiala pri nizki amplitudi ter je bila v področju materiala vara in TVP. Pri izdelavi razpoke smo uporabili metodo SHR (Step wise High R-ratio)³.

3 REZULTATI

Lomno žilavost zvarnega spoja z razpoko v GZTVP smo pri SENB-preizkušancih določili po metodi razbremenjevanja (single specimen method) na podlagi predpisov BS 7448⁴, medtem ko smo lomno žilavost pri nateznih WP-preizkušancih določili na podlagi smernic raziskovalnega centra GKSS po metodi neposrednega merjenja odpiranja konice razpoke (metoda δ₅)⁵. Temperatura preizkušanja je bila -40 °C. Rezultati lomne žilavosti, dobljeni pri standardnih upogibnih SENB-preizkušancih, so podani v **tabeli 6**, rezultati lomne žilavosti pri velikih nateznih WP-preizkušancih, pa v **tabeli 7**.



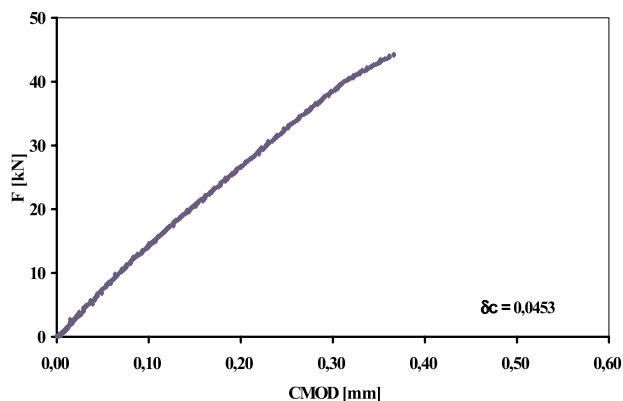
Slika 1: Oblika in dimenzije WP preizkušancev

Figure 1: Shape and dimensions of WP specimens

Tabela 7: Lomna žilavost WP-preizkušancev**Table 7:** Fracture toughness value of WP specimens

Oznaka preizk.	Položaj utrujenostne razpoke SD-ZL/SL-ZD	a_0 (mm)	a_0/W	Δa_{SD-ZL} (mm)	Δa_{SL-ZD} (mm)	δ_{5SD-ZL} (mm)	δ_{5SL-ZD} (mm)
WPT1	TVP/ strjeni zvar	76,38	0,5086	-	-	0,0925	0,2480
WPT2	Strjeni zvar/ strjeni zvar	75,18	0,5060	0,11	0,24	0,247	0,3825

Opomba: SD - spredaj desno, SL - spredaj levo, ZL - zadaj levo, ZD - zadaj desno

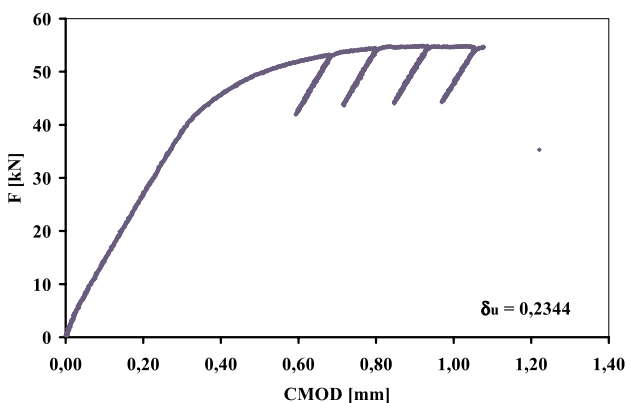


Slika 2: Dokaj linearen diagram F-CMOD, registriran pri preizkusu SENB-preizkušancev pri $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ z razpoko na TVP (SENB1)

Figure 2: Rather linear diagram F-CMOD to record test on SENB specimens at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ with crack in HAZ (SENB1)

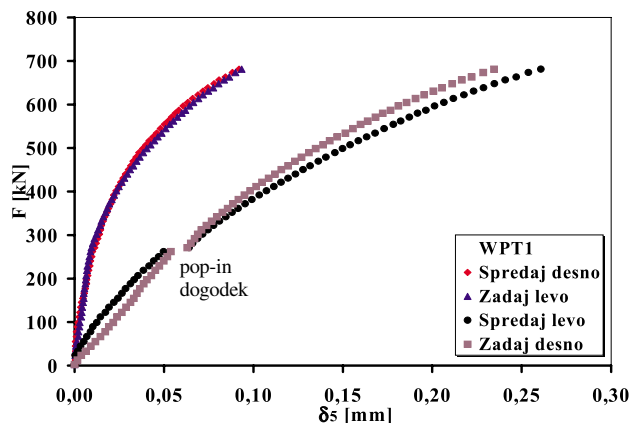
Vedenje SENB-preizkušancev med preizkusom je razvidno s **slike 2** (razpoka v TVP) in **slike 3** (razpoka v varu). Pri teh diagramih je prikazana odvisnost F-CMOD.

Vedenje WP-preizkušancev med preizkusom pa je razvidno s **slik 4 in 5**. Pri teh diagramih je prikazana odvisnost $F-\delta_5$.



Slika 3: Nelinearen diagram F-CMOD, registriran pri preizkusu SENB-preizkušancev pri $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ z razpoko v varu (SENB2)

Figure 3: Non-linear diagram F-CMOD to record test on SENB specimens at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ with crack in weld metal (SENB2)

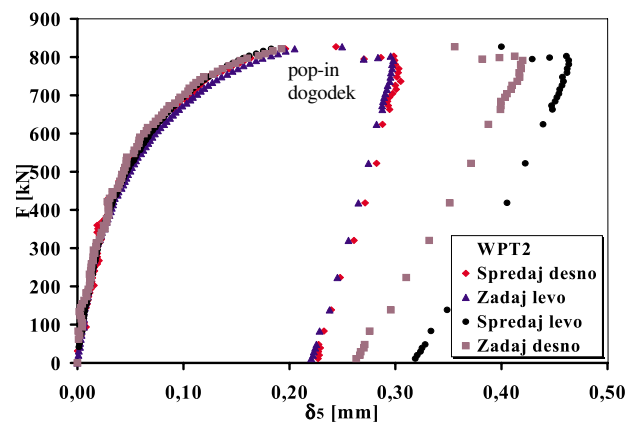


Slika 4: Diagram $F-\delta_5$, registriran pri preizkusu WP-preizkušancev pri $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ z razpoko na TVP (WPT1)

Figure 4: Diagram $F-\delta_5$ to record test on WP specimens at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ with crack in HAZ (WPT1)

4 DISKUSIJA REZULTATOV

Vedenje standardnega upogibnega SENB-preizkušanca z razpoko v varu (SENB2) je dokaz stabilnega širjenja razpoke. Vrednost odprtja konice razpoke pri zlomu (δ_u) je sorazmerno visoka. Nasprotno pa se je pri preizkušancu z razpoko v GZTVP (SENB1) po začetni otovitvi konice razpoke pojavil nestabilni lom, ki se je



Slika 5: Diagram $F-\delta_5$, registriran pri preizkusu WP-preizkušancev pri $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ z razpoko v varu (WPT2)

Figure 5: Diagram $F-\delta_5$ to record test on WP specimens at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ with crack in weld metal (WPT2)

izražal tudi v nizki vrednosti kritičnega odprtja konice razpoke (δ_c).

Vedenje velikega nateznega WP-preizkušanca z razpokama na področju vara (WPT2) pa kaže, da je po začetni otopitvi obeh konic prišlo do stabilnega širjenja razpok. Rast obeh razpok je potekala do trenutka, ko je konica ene od razpok zadela lokalno krhko področje, kar je povzročilo iniciacijo krhkega loma, ki se je širil v var.

Tudi pri preizkušancu WPT1 je prišlo po začetni otopitvi konice razpoke do majhnega stabilnega širjenja razpoke. Smer širjenja razpoke se je zaradi trdnostne neenakosti odklonila v var, o čemer pričajo tudi višje vrednosti parametra δ_5 v primerjavi s konico razpoke na drugi strani. Tu se je po začetni otopitvi konice razpoke pojavil nestabilni lom. Širjenje razpoke je spremljala tudi lokalna nestabilnost.

Primerjava rezultatov lomne žilavosti med standardnimi upogibnimi SENB-preizkušanci ter velikimi nateznimi WP-preizkušanci, ko je razpoka v varu in GZTVP, kaže, da so razlike majhne.

5 SKLEP

Izmerjene vrednosti lomne žilavosti pri standardnih upogibnih SENB-preizkušancih in pri velikih nateznih WP-preizkušancih ne kažejo posebnega optimizma glede odpornosti zvarnega spoja zoper iniciacijo in nestabilno širjenje razpoke. Dobljeni rezultati potrjujejo domneve nekaterih raziskovalcev (Minami, Toyoda, Longayue)⁶, da lahko visokotrnostni zvarni spoj, katerega napetost

tečenja zvara je za 20% ali več višja od napetosti tečenja osnovnega materiala, vodi k zniževanju lomno-žilavostnih lastnosti zvarnega spoja. Primerjava dobljenih vrednosti lomne žilavosti za oba tipa preizkušancev tudi kaže, da prihaja pri nizkonapetostnem lomu, ki je odvisen tudi od nizkih temperatur, le do manjših razlik. Pri nizkonapetostnem lomu je "constraint" pri obeh tipih preizkušancev sicer velik, vendar približno enak. Tudi razlika debelin preizkušancev nima pomembnejšega vpliva na vrednosti lomne žilavosti, saj če imamo na konici razpoke majhno področje plastifikacije, so vrednosti lomne žilavosti neodvisne od geometrije preizkušancev.

6 LITERATURA

¹ Böhler Welding Guide

² SŽ Elektrode Jesenice, Katalog dodatnih materialov, Jesenice 1998

³ M. Kocak, K. Seifert, S. Jao, H. Lampe, Comparison of fatigue precracking methods for fracture toughness testing of weldments, Local Compression and Step wise High R-ratio Proc., Of the International conference Welding 90, Geesthacht, Germany, 1990

⁴ BS 7448, Fracture mechanics toughness test, Part 1, Method for determination of K_{IC} , critical CTOD and critical J values of metallic materials

⁵ K. H. Schwalbe, B. K. Neale, J. Heerens, The GKSS test procedure for determining the fracture behaviour of materials, GKSS Research Center Geesthacht, Institute of Materials Research, EFAM GTP 94

⁶ M. Kocak, R. Denys, CTOD and Wide Plate Testing of welds with particular emphasis on mismatched welded joints, GKSS Research Center Geesthacht, Institute of Materials Research, University of Ghent, Belgium, IIW Doc. XI-641-95, IIW Doc. X-F-028-95