

Vpliv mehkega korena na vedenje zvarnega spoja pri lomu

Influence of Soft Root on Weld Joint Fracture Behaviour

V. Gliha,¹ I. Rak, N. Gubelj, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru

Prejem rokopisa - received: 1996-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1997-01-17

Primerjali smo lomno žilavost treh različnih zvarnih spojev, katerih meja plastičnosti je presegala mejo plastičnosti osnovnega materiala. Dva zvara smo v korenskem delu zavarili z mehkejšim dodatnim materialom, da smo lahko opustili predgrevanje. Mehki koren vpliva na znižanje lomne žilavosti spoja. Rezultati merjenja lomne žilavosti so na zvaru, kjer je bil koren izdelan dvovarkovno, višji od štirivarkovnega.

Ključne besede: zvarni spoj, koren zvara, dodatni material, lomna žilavost, krhki lom

A comparison of fracture toughness results on three different yield stress over-matched weld joints was performed. Two welds were made with the soft root to avoid preheating. Soft root lowers fracture toughness of the joint. Results of fracture toughness measurement on weld with two pass soft root are higher than those on four pass one.

Key words: weld joint, weld root, consumable, fracture toughness, brittle fracture

1 Uvod

Faktor M zvarnega spoja je razmerje med mejo plastičnosti materiala zvara (MZ) in osnovnega materiala (OM). Pri $M > 1$ so manjše napake v zvaru zaščitene pred velikimi deformacijami, saj se OM prej plastično deformira¹. Ker je v splošnem težko zagotoviti visoko žilavost MZ, je tako verjetnost pojava krhkega loma manjša. Pri zvarnih spojih z $M > 1$, na jeklih visoke trdnosti, je treba pri varjenju računati tudi s hladno razpokljivostjo MZ, posebno v korenu debelih zvarov. Takšne zveze zato predgrevalimo, še posebno pri izdelavi korena. Stroški predgrevanja so velik del celotnih stroškov izdelave varjenih konstrukcij. Varjenje korena zvara z dodatnim materialom, ki zagotovi lokalno $M < 1$ v takšnem obsegu, da se nosilnost celotnega zvarnega spoja ne zniža, zmanjša nevarnost nastanka hladnih razpok, zato predgrevanje ni več potrebno. Pričakovati pa je, da bodo mehkejša področja v zvaru bistveno vplivala na vedenje zvarnih spojev pri lomu.

2 Material in eksperimentalno delo

Na konstrukcijskem jeklu visoke trdnosti nionocral 70 debeline 40 mm (OM v tabeli 1) smo zavarili tri spoje z $M > 1$. Prvi (homogeni zvar) je bil v celoti izdelan z enim samim dodatnim materialom (MZ₁ v tabeli 1), ki je trdnostno enakovreden OM. Druga dva (heterogena zvara) sta bila izdelana z dvema različnima dodatnima materialoma. Koren zvara je bil varjen z dodatnim materialom, ki je mehkejši od OM (MZ₂ v tabeli 1), ostali del zvara pa z istim dodatnim materialom kot homogeni zvar (MZ₁). Mehki koren je bil varjen dvo- in štirivarkovno. Hitrost ohlajanja med 800° in 500°C ($\Delta t_{8/5}$) je bila -9 s.

Za razliko od homogenega zvara pri izdelavi mehkih korenov zvarov nismo predgrevali. Mehanske lastnosti in kemična sestava OM, MZ₁ in MZ₂ so navedeni v tabeli 1. Parameter P_{cm} , ki ga izračunamo po formuli: $P_{cm} = C + Si/30 + (Mn+Cu+Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B$, je merilo občutljivosti materiala na hladno razpokljivost². Vrednost faktorja M se tu ne tiče dejanskega zvarnega spoja in je le teoretična ocena, kako velik M lahko v zvarnih spojih pričakujemo.

Udarne žilavost in mehanske lastnosti posameznih delov MZ smo ugotovili na preizkušanjih, odvzetih iz dejanskih zvarov. Preizkušanci za udarno žilavost preseka 10 x 10 mm so bili prečni na os zvara, okrogli trgalni preizkušanci premera 5 mm pa vzdolžni. Iz skoraj celotne debeline spojev smo izdelali upogibne CTOD preizkušance z razpoko po debelini in z razmerjem razpoke in višine preizkušanca $a/W \sim 0,5$. Vse razpoke na preizkušanjih niso bile tako ravne, kot to zahteva standard³. Vzrok so zaostale napetosti, ki so posledica varjenja. Vseeno pa smo zlomili tudi te preizkušance. Na osnovi meritev trdote MZ smo po formuli: $R_{PMZ} = 3,15 HV-168^4$, izračunali vrednost faktorja M po celotni debelini obravnavanih zvarov.

Tabela 1: Mehanske lastnosti in kemična sestava osnovnega materiala (OM) in obeh materialov čistih zvarov (MZ₁, MZ₂)

Table 1: Mechanical properties and chemical composition of base metal (OM) and two all-weld metals (MZ₁, MZ₂)

material	R _{p0,2}	R _m	δ ₅	E _{40°C}	M				
	MPa	MPa	%	J					
OM	711	838	20	54	–				
MZ ₁	770	845	16	58	(1,08)				
MZ ₂	403	466	32	153	(0,57)				
%	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	P _{cm}
OM	.09	.27	.25	.015	.004	1.12	2.63	.25	.228
MZ ₁	.06	.35	1.43	.011	.008	.86	3.01	.56	(.274)
MZ ₂	.05	.25	.61	.011	.008	.06	.07	.03	(.095)

¹ Mag. Vladimir GLIHA
Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo
Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenija

3 Rezultati in razprava

Mehanske lastnosti in kemična sestava MZ homogenega zvara v korenu in temenu (MZ_{hom-k} , MZ_{hom-t}) ter obeh nehomogenih zvarov v korenu ($MZ_{2\ var}$, $MZ_{4\ var}$) so navedene v **tabeli 2**. Tu so tudi vrednosti P_{cm} in M dejanskih zvarov. Udarina žilavost $MZ_{2\ var}$ ni bila izmerjena, saj debelina dvovarkovnega korena tega ni omogočila.

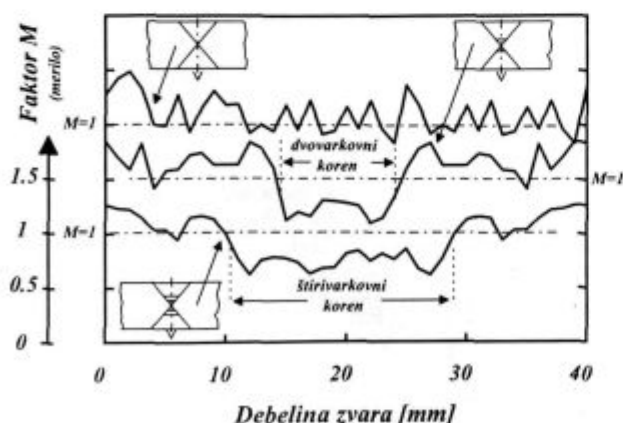
Tabela 2: Mehanske lastnosti in kemična sestava delov dejanskih zvarov

Table 2: Mechanical properties and chemical composition of regions of actual welds

material	Rp0.2 MPa	Rm MPa	δ ₅ %	E-10°C J	M				
MZ _{hom-t}	861	951	12	56	1.21				
MZ _{hom-k}	807	905	15	61	1.14				
MZ _{2 var}	623	677	16	—	0.88				
MZ _{4 var}	632	674	16	23	0.89				
%	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	P _{cm}
MZ _{hom-t}	.07	.36	1.27	.008	.015	.86	2.21	.47	.257
MZ _{hom-k}	.08	.32	.78	.012	.013	.99	2.50	.35	.244
MZ _{2 var}	.08	.26	.32	.012	.007	.38	.82	.16	.148
MZ _{4 var}	.08	.26	.43	.011	.008	.20	1.32	.12	.150

Na **sliki 1** je faktor M prikazan po debelini zvarov, na **sliki 2** pa vrednosti CTOD teh zvarov, skupaj z nevplivanjem OM. Izmerjene so bile pri $-10^\circ C$. Iz slike je razvidno, da je bil karakter zlomov različen. Pri OM krhkega zloma nismo ugotovili. Pri homogenem zvaru se je pri polovici preizkušancev pojavil krhek lom (pop-in), pri drugi polovici pa ne. Pri heterogenem zvaru z dvovarkovnim mehkim korenom je bil le en preizkušavec, pri katerem ni bilo krhkega loma, pri tistem s štirivarkovnim pa nobenega.

Neujemanje med "teoretičnimi" in dejanskimi faktorji M v **tabelah 1 in 2** je posledica namešanja MZ realnih zvarov, česar pri čistem zvaru ni bilo, ter drugač-



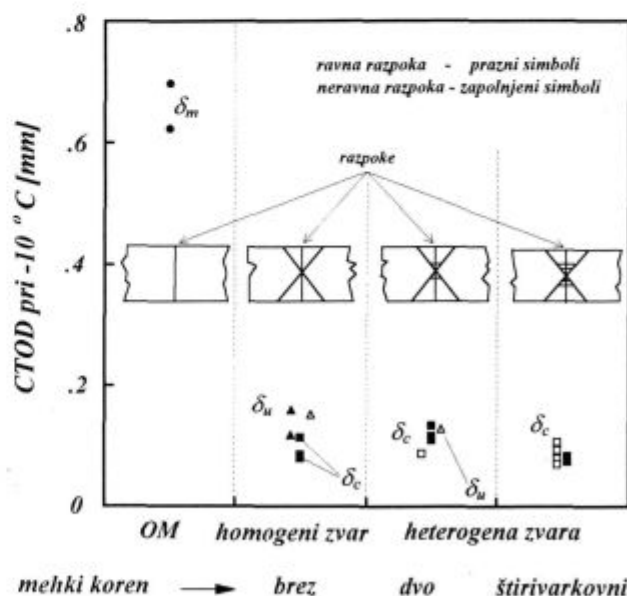
Slika 1: Porazdelitev faktorjev M po debelini zvara za tri zvarne spoje z $M>1$ (Vrednosti $M=1$ so na y-osi za vsak spoj prikazane ločeno)

Figure 1: Factor M distribution over the weld for three over-matched weld joints (value $M=1$ on the y-axis for each joint is shown separately)

nega vnosa toplote pri varjenju čistega zvara, ki je rabil proizvajalcu dodatnega materiala za analizo lastnosti, in s tem drugačne hitrosti ohlajanja. Namešanje je večje v korenskih varkih, kar je razvidno iz kemične sestave. Razen tega pride tudi do razlik v trdnosti zaradi kaljenja in popuščanja, kar je posledica termičnega delovanja kasnejših varkov. To je vzrok za dodatno lokalno porazdelitev faktorja M po debelini zvarov (**slika 1**).

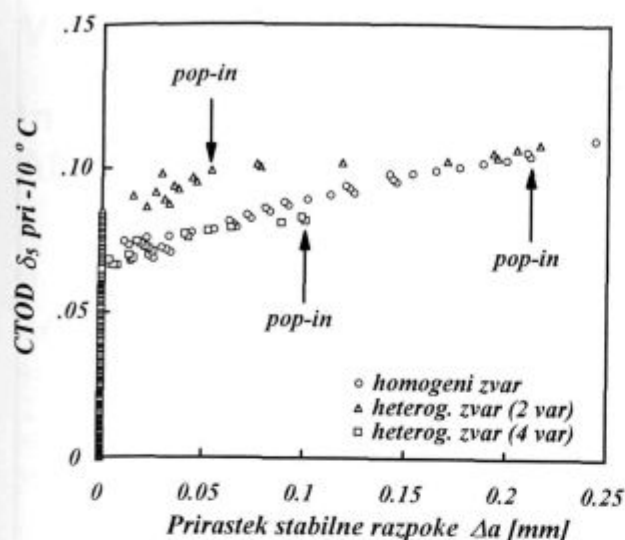
Glede na vrednosti udarne žilavosti (**tabela 2**) ni bilo pričakovati, da se bo pri homogenem zvaru krhki lom pričel v korenu. Vzrok, da se je, je višji faktor M v temenskem delu zvara, ki je zaščitil razpoko pri preizkusu CTOD bolj kot v korenskem delu. V posameznih delih zvara vrednost faktorja M ni konstantna, zato je deformacijska situacija v okolici najnižjih vrednosti M najbolj akutna. Poleg tega pa je tudi razmerje $2H(W-a)$ v korenu zvara X najmanjše ($2H$ je širina zvara v določeni poziciji), kar dodatno zmanjšuje zaščitni vpliv višjetrdnostnega MZ. V primeru homogenega zvara je tako koren zvara lokalno krhko področje⁵.

Pri heterogenih zvarih je bilo zaradi bistveno nižje udarne žilavosti MZ in $M<1$ v korenu pričakovati začetek krkega loma. Pomembno je, kako takšne razmere v korenu zvara vplivajo na vedenje pri lomu oziroma koliko znižajo lomno žilavost zvarnega spoja kot celote. S primerjavo izmerjenih vrednosti CTOD (**slika 2**) z vrednostmi, izmerjenimi na homogenem zvaru, in karakterjev loma (trije reprezentativni primeri so na **sliki 3**), se da skleniti, da je dvovarkovno varjenje korena primernejše, saj je glede na homogeni zvar žilavost komaj kaj manjša. Pri zvaru s štirivarkovnim mehkim korenom so vrednosti CTOD opazno nižje.



Slika 2: Karakter loma in vrednosti CTOD izmerjene na preizkušancih v celotni debelini zvarnega spoja (Homogeni zvar nima, heterogena pa imata mehki koren, in to dvo- oziroma štirivarkovnega)

Figure 2: Fracture character and weld joint full thickness CTOD values (homogeneous weld has not, but heterogeneous ones have soft root - two and four pass soft root)



Slika 3: Vedenje zvarnih spojev pri CTOD-preizkusu

Figure 3: Weld joint fracture behaviour by CTOD testing

4 Sklep

Pri realnih večvarkovnih zvarih faktor M v zvaru ni konstanten zaradi namešanja in termičnih vplivov kasnejših varkov. Lokalno odstopanje v meji plastičnosti

MZ v korenu zvara z $M > 1$ na jeklih visoke trdnosti je lahko namerno, saj tako ni potrebno predgrevanje. Mehak in žilav dodajni material pa še ne zagotavlja žilavega korena zvara. To je v največji meri odvisno od varilnega postopka in parametrov varjenja. Vrednosti CTOD obeh heterogenih zvarov z mehkim korenem so bile nižje od homogenega zvara, vendar je dvovarkovni koren ugodnejši od štirivarkovnega. Ker kljub opustitvi predgrevanja pri obeh zvarih z mehkim korenem nismo registrirali hladnih razpok, je bolj priporočljiva tehnologija izdelave zvarov z $M > 1$ na visokotrdnih jeklih tista z dvovarkovnim mehkim korenem, v katerem je lokalno $M < 1$.

5 Literatura

- ¹ R. Denys: Strength and Performance Characteristics of Welded Joints, *Mismatching of Welds-ESIS 17*, Edited by K.-H. Schwalbe and M. Koćak, Mechanical Engineering Publication, London, 1994, 59-102
- ² Y. Ito, K. Bessyo, Weldability Formula of High Strength Steels, *IW doc. IX-576-68*, 1968
- ³ BS 5762: 1979, Method for Crack Opening Displacement (COD) Testing, The British Standards Institution, 1979
- ⁴ R. J. Pargeter, *Welding Research Bulletin*, 1978, 11
- ⁵ R. D'Haeyer, J. Defourny, Literature Data Concerning the Problem of Local Brittle Zones (LBZs), *IW doc. IX-1606-90*, Annual Assembly of Int. Inst. of Welding, Montreal, Canada, 1990