

OCENITEV OBČUTLJIVOSTI NA RAZPOKLJIVOST V HLADNEM PRI VARJENJU VISOKOTRDNOSTNEGA JEKLA NIOMOL 490 K

AN ESTIMATION OF THE COLD CRACKING SENSITIVITY IN WELDS OF HSLA STEEL NIOMOL 490K

Zdravko Praunseis, Vladimir Gliha, Inoslav Rak

Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenija

Prejem rokopisa - received: 1999-11-02; sprejem za objavo - accepted for publication: 1999-12-20

V članku je predstavljena analitična (z empiričnimi enačbami) in eksperimentalna (z Y-preizkusom) določitev temperature predgrevanja visokotrdnostnega jekla Niomol 490 K debeline 19 mm, pri kateri ne bo prišlo do pojava razpok v hladnem v zvarnem spoju. Ugotovljeno je, da je pri varjenju jekla Niomol 490K z oplasčeno elektrodo EVB NiMo nastanku razpok v hladnem bolj podvržen var kot osnovni material. Z izračuni lahko dovolj natančno napovemo temperaturo predgrevanja jekla, vendar je treba dokazati temperaturo predgrevanja tudi z Y-preizkusom.

Ključne besede: visokotrdnostno jeklo, razpokljivost v hladnem, Y-preizkus, temperatura predgrevanja

This paper deals with the analytical (with empirical equations), and experimental (with JIS-y test) determination of the preheating temperature for HSLA steel Niomol 490K with a thickness of 19 mm, at which cold cracking in the welded joint could be eliminated. It was found that cold cracking is more pronounced in the weld metal than in the base material in steel Niomol 490K welded joints made with covered electrode EVB NiMo. It is possible to predict the preheating temperature using an analytical calculation, but it should be determined by a JIS-y test.

Key words: HSLA steel, cold cracking, JIS-y test, preheating temperature

1 UVOD

Problematika varivostnosti visokotrdnostnih malolegiranih konstrukcijskih jekel (VTML) se kaže tudi v fenomenu razpokljivosti v hladnem¹⁻³. Razpoke v hladnem v zvarnih spojih ogrožajo varno obratovanje zvarjene konstrukcije. Hladne razpoke nastanejo pri ohlajanju zvarnega spoja pri temperaturi pod 150°C. Lahko se pojavijo v toplotno vplivanem področju ali varu. Nastanek razpok v hladnem je odvisen od občutljivih mikrostruktur, vodika in vpetosti vara. Razpokljivost v hladnem preprečujemo s predgrevanjem, za zagotovitev ustrezne mikrostrukture, s sušenjem elektrod (pri ročnem elektroobločnem varjenju) in s pogrevanjem zvarnega spoja (za izhajanje raztopljenega vodika). Ker pomeni predgrevanje visok strošek pri gradnji zvarjene konstrukcije, je treba temperaturo predgrevanja določiti čim bolj natančno.

2 IZRAČUN TEMPERATURE PREDGREVANJA

Potrebno temperaturo predgrevanja materiala, pri kateri ne bo prišlo do pojava razpok v hladnem, izračunamo z uporabo empiričnih formulacij, ki so jih razvili Dueren¹, Ito - Bessyo² in Suzuki³.

2.1 Koncept Dueren

Ogljikov ekvivalent C_E se izračuna po enačbi:

$$C_E = C + \frac{Si}{25} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cr}{10} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{40} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} \quad (1)$$

Kemijski elementi v enačbi so izraženi v masnih procentih. Oznaka C pomeni ogljik. Temperaturo predgrevanja T_p določimo z empirično enačbo (enačba velja samo za bazične elektrode in vsebnost $H_D = 2-6$ ml/100g):

$$T_p = 739 C_E - 104 \quad (2)$$

2.2 Formulacija Ito - Bessyo

Vpliv kemičnih elementov zajema parameter hladne razpokljivosti P_{CM} :

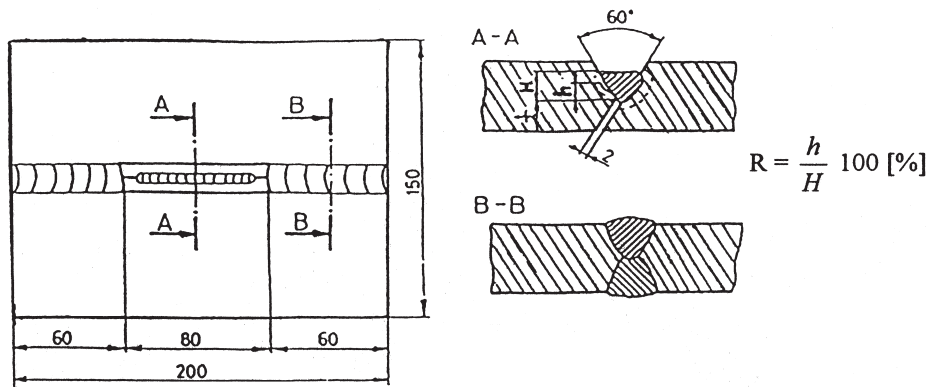
$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (3)$$

Za določitev P_C , ki omogoča izračun temperature predgrevanja, je pomembna debelina plošče t in vsebnost difuzijskega vodika H_D , t se meri v [mm], H_D pa v [ml/100g]

$$P_C = P_{CM} + \frac{t}{600} + \frac{H_D}{60} \quad (4)$$

Temperaturo predgrevanja določimo z empirično enačbo:

$$T_p = 1440 P_C - 392 \quad (5)$$



Slika 1: Standardizirani preizkušaneec za izvedbo Y - preizkusa
Figure 1: Standard JIS - y test specimen

2.3 Koncept Suzuki

Pri Y - preizkusu je bila ugotovljena interakcija med koncentracijo vodika in vpetostjo R_{FY} . Koncentracija vodika je največja na korenski strani, kjer je vpetost največja.

Vpetost R_{FY} je odvisna od elastičnega modula E , debeline plošče t in širine Y preizkušanca L (slika 1).

$$R_{FY} = \frac{E \cdot t}{L} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (6)$$

Akumulacija vodika v korenu je določena s parametrom P_{HA} :

$$P_{HA} = \log(\lambda H_D') + F \quad (7)$$

Za nizkovodične oplašene elektrode je $\lambda = 0,6$ in $H_D' = H_D$. Pri visokovodičnih oplaščenih elektrodah je $\lambda = 0,48$ in $H_D' = H_D/2$. Vrednost F je odvisna od P_{CM} in R_{FY} ter se izračuna na osnovi empiričnih enačb v viru³. V našem primeru (za debelino pločevine 20 mm) je vpetost $R_{FY} = 20\,900 \text{ N/mm}^2$. Tej vrednosti R_{FY} ustreza naslednja empirična enačba za izračun vrednosti F , ki velja v področju vpetosti $10\,000 \text{ N/mm}^2 - 32\,000 \text{ N/mm}^2$:

$$F = (7,17 + 1,54 \cdot 10^{-4} R_{FY}) P_{CM} - 0,121 \cdot 10^{-4} R_{FY} - 1,92 \quad (8)$$

Temperatura predgrevanja je določena z izrazom:

$$T_p = 146 P_{HA} \quad (9)$$

Preglednica 1: Mehanske lastnosti jekla Niomol 490 K (šarža št. 21 2624) in dodatnega materiala EVB NiMo

Table 1: Mechanical properties of the steel Niomol 490 K (sample No. 21 2624) and welding consumable - EVB NiMo

Material	R_p (MPa)	R_m (MPa)	A (%)	CVN (J)
Niomol 490K	491	531	20,9	300,300,300 pri -60 °C
EVB NiMo čisti var	510	580 - 710	22	50 pri -20 °C

Preglednica 2: Kemična sestava osnovnega in dodatnega materiala

Table 2: Chemical composition of the base material and welding consumable

Kemična sestava (%)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Al	C_E	P_{CM}
Niomol 490K	0,09	0,25	0,37	0,011	0,001	0,58		0,21			0,024	0,191	0,160
EVB NiMo čisti var	0,06	0,40	0,90				1,10	0,33					
EVB NiMo var	0,08	0,37	0,94	0,02	0,01	0,10	0,79	0,29	0,10	0,02		0,198	0,179

3 EKSPERIMENTALNO DELO IN REZULTATI

3.1 Podatki o materialu

Raziskava je bila narejena na poboljšanjem VTML-jeklu NIOMOL 490K debeline $t = 19 \text{ mm}$. Preizkusni varki pri Y - preizkusu so bili narejeni z oplašeno bazično elektrodo EVB NiMo premera $\phi 4 \text{ mm}$. Mehanske lastnosti in kemična sestava osnovnega in dodatnega materiala (čistega vara in strjenega vara) so navedene v **preglednici 1 in 2**.

3.2 Podatki o vodiku v varu

Vsebnost difuzijskega vodika H_D je bila določena s standardizirano glicerinsko merilno metodo (DIN 8572) pri varjenju s sušeno in nesušeno elektrodo. Nesušeno stanje elektrode pomeni tisto količino H_D v zvaru, ki jo dobimo pri varjenju z elektrodo iz skladišča. S sušenjem elektrode pri temperaturi $T_S = 380^\circ\text{C}$ dve uri neposredno pred varjenjem znižamo količino H_D na minimum. Izmerjene vrednosti H_D so podane v **preglednici 3**.

Preglednica 3: Izmerjene vrednosti difuzijskega vodika H_D pri varjenju z elektrodo EVB NiMo

Table 3: Hydrogen content values measured at welding with covered electrode EVB NiMo

T_S (°C)	H_D (ml/100g)
nesušena elektroda	5,80
380°C	0,47

3.3 Izračun temperature predgrevanja

Podatki za izračun temperature predgrevanja za vsakega od treh obravnavanih konceptov (C_E , P_C in P_{HA}) so izračunani z enačbami 1, 4, 7. Temperature predgrevanja T_p , izračunane iz enačb 2, 5, 9, so podane v **preglednici 4**. Pomenijo orientacijske vrednosti za eksperimentalno določitev temperature predgrevanja z Y - preizkusom.

3.4 Eksperimentalna določitev temperature predgrevanja z Y - preizkusom

Y - preizkus je standardiziran kvalitativen preizkus za določanje temperature predgrevanja, pri kateri se več ne pojavijo razpoke v hladnem. Na preizkušancu za Y - preizkus (**slika 1**), izdelanem iz VTML jekla Niomol 490K, sta bila najprej zavarjena X zvarna spoja. Na takšen način je bila dosežena togost in ustrezna vpetost kasneje varjenega preizkusnega varka. Sledilo je še žarjenje (580°C/2 uri) za odpravo zaostalnih napetosti. Y - preizkušanelec smo segreli na preskusno temperaturo (razen v primerih brez predgrevanja), nato pa izvršili varjenje preizkusnega varka (elektroda EVB NiMo ϕ 4 mm) v žleb s predpisanim vnosom energije $Q = 17$ kJ/cm. Po 48 urah (v tem času se odplini večina vodika) smo Y - preizkušanelec razrezali in izdelali metalografske

obruse. Sledil je pregled z optičnim mikroskopom. Kadar smo ugotovili nastanek razpoke, smo izmerili dimenzijo h in izračunali delež razpokljivosti v hladnem R. Razpoka nastane v varu v primeru, ko je parameter razpokljivosti v hladnem P_{CM} zvara višji od P_{CM} osnovnega materiala (enačba 3) in obratno. V primeru, da smo pri preizkusu ugotovili neki delež razpokljivosti v hladnem, smo preizkus ponovili pri višji temperaturi predgrevanja, vse dokler nismo dosegli temperaturo predgrevanja, pri kateri je razpokljivost $R = 0\%$.

Y - preizkus na VTML-jeklu NIOMOL 490K smo izvedli s sušeno in nesušeno elektrodo EVB NiMo ϕ 4 mm najprej pri sobni temperaturi. Pri nesušeni elektrodi smo preizkus opravili še pri $T_p \approx +50^\circ\text{C}$. Rezultati Y - preizkusov so podani v **preglednici 5**.

3.5 Pregled metalografskih brusov z optičnim mikroskopom

Vsi metalografski brusni so bili fino brušeni in jedkani s 3 % nitalom ter nato pregledani z optičnim mikroskopom NIKON EPIPHOT 300.

4 RAZPRAVA

Iz primerjave vrednosti P_{CM} za osnovni material in var je razvidno (**preglednica 2**), da je material vara bolj občutljiv za nastanek razpok v hladnem kot osnovni material, ker je P_{CM} v varu višji kot v osnovnem materialu. To je pokazal tudi Y - preizkus, kjer se je pri varjenju z nesušeno elektrodo brez predgrevanja razpoka v hladnem pojavila v varu (**slika 2**).

Za izračun temperatur predgrevanja bi bila uporaba kemične sestave čistega vara neprimerna, zato smo uporabili kemično sestavo realnega večvarkovnega K -

Preglednica 4: Izračunane temperature predgrevanja za osnovni material in var pri sušeni ($H_D = 0,47$ ml/100g) in nesušeni ($H_D = 5,80$ ml/100g) elektrodi EVB NiMo

Table 4: Calculated preheating temperatures for base material and weld metal at welding with dry ($H_D = 0,47$ ml/100g) and undried ($H_D = 5,80$ ml/100g) covered electrode EVB NiMo

Koncept	Dueren				Ito - Bessyo				Suzuki			
	sušena	nesušena	sušena	nesušena	sušena	nesušena						
Stanje elektrode	C_E	T_p (°C)	C_E	T_p (°C)	P_C	T_p (°C)	P_C	T_p (°C)	P_{HA}	T_p (°C)	P_{HA}	T_p (°C)
Niomol 490K	-	-	0,191	+ 37	0,199	-105*	0,288	+ 23	- 1,059	- 155*	0,030	+4*
Zvar	-	-	0,198	+ 42	0,218	- 78*	0,307	+ 50	- 0,862	- 126*	0,229	+33

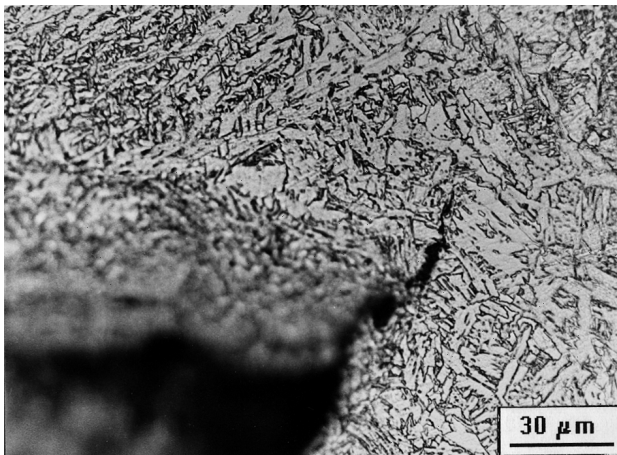
* ni potrebno predgrevanje!

Preglednica 5: Rezultati meritev po izvedbi Y - preizkusa na jeklu NIOMOL 490K z elektrodo EVB NiMo, ϕ 4mm

Table 5: Results of measurements after JIS-y testing of steel NIOMOL 490 with covered electrode EVB NiMo ϕ 4mm

Št.preizkusa	t(mm)	T_S (°C)	H_D (ml/100g)	T_p (°C)	h (mm)	H (mm)	R (%)
1	19	nesušena elektroda	5,80	20	0,34*	4,90*	7*
					razpoka v varu!		
2	19	nesušena elektroda	5,80	50	0	5,22*	0
3	19	380 °C	0,47	20	0	5,15*	0

* povprečna vrednost, izmerjena na 5 metalografskih brusih



Slika 2: Mikrostruktura v okolici razpoke v hladnem
Figure 2: Microstructure in the surroundings of cold crack

vara. Ta zaradi različnega namešanja sicer ni povsem identična s kemično sestavo preizkusnega varka pri Y - preizkusom (**preglednica 2**), je pa gotovo bolj primerna.

Večjo občutljivost materiala vara za nastanek razpok v hladnem so pokazali tudi izračuni temperatur predgrevanja za var in osnovni material (**preglednica 4**). Razvidno je, da so izračunane temperature predgrevanja za material vara višje. Zaradi tega se upoštevajo za eksperimentalno določitev temperature predgrevanja z Y - preizkusom kot odločilne in hkrati orientacijske vrednosti izračunane temperature predgrevanja za material vara. Iz njihove medsebojne primerjave (**preglednica 4**) lahko sklenemo, da pri varjenju s sušeno elektrodo ($H_D = 0,47$ ml/100g) predgrevanje ni potrebno, kar smo potrdili tudi z Y - preizkusom. Pri varjenju z

nesušeno elektrodo ($H_D = 5,8$ ml/100g) pa je bila pričakovana temperatura predgrevanja 33°C . Z Y - preizkusom smo dokazali, da se pri varjenju z nesusušeno elektrodo pri temperaturi predgrevanja $T_p = +50^\circ\text{C}$ popolnoma odpravi razpokljivost v hladnem.

5 SKLEPI

Teoretična ocena in eksperimentalni rezultati kažejo, da je pri varjenju jekla Niomol 490K z elektrodo EVB NiMo nastanku razpok v hladnem bolj podvržen zvar kot osnovni material.

Za VTML-jeklo Niomol 490K debeline 19 mm je potrebno pri varjenju z nesusušeno elektrodo EVB NiMo s vsebnostjo $H_D \approx 5,8$ ml/100g predgrevanje na temperaturo $+50^\circ\text{C}$. Pri varjenju s sušeno elektrodo (sušenje $380^\circ\text{C}/2$ uri) z vsebnostjo $H_D \approx 0,47$ ml/100g zvara predgrevanje ni potrebno.

Iz rezultatov je razvidno, da lahko z analitičnimi izračuni temperatur predgrevanja dovolj natančno napovemo temperaturo predgrevanja, ki jo je treba potrditi z Y- preizkusom.

6 LITERATURA

- ¹ Ito, Y., Bessyo, K.: Cracking Parameter of High Strength Steels related to Heat-Affected-Zone Cracking, Rep. 1, *Jour. JWS*, 37 (1968) 9, 983-991. Rep.2, ibidi, 38 (1969) 10, 1134 -1144. IIW Doc. IX-576-68, 1968
- ² Dueren, C.: *Equation for the prediction of cold cracking resistance in field - welding large diameter pipes*; International Institute of Welding, Subcommission IX, 27-35, IIW Doc. IX - 1356-85, 1985
- ³ Suzuki, H., Yurioka, N.: *Prevention against cold cracking by the hydrogen accumulation cracking parameter P_{HA}* ; Journal of Japan Welding Research Institute, 51 (1982)6, 456-471, IIW Doc. IX - 1232-82, 1982