

ŠTUDIJ RAZPOKLJIVOSTI V HLADNEM V VEČVARKOVNEM VARU, GRAJENEM S POSTOPKOM VARJENJA POD PRAŠKOM

A STUDY OF THE COLD CRACKING IN MULTI-PASS WELD METAL MADE BY A SUBMERGED-ARC WELDING PROCESS

Zdravko Praunseis¹, Masao Toyoda²

¹Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenija

²Osaka University, Faculty of Engineering, Yamadaoka 2-1, 565-0871 Osaka, Japan
zdravko.praunseis@uni-mb.si

Prejem rokopisa - received: 2000-10-02; sprejem za objavo - accepted for publication: 2000-11-29

Problematika varivostnosti visokotrnostnih malolegiranih konstrukcijskih jekel se kaže tudi v fenomenu razpokljivosti v hladnem. V raziskavi je namenjena posebna pozornost nastajanju razpok v hladnem v večvarkovnem strjenem varu. Razpokljivost v hladnem v strjenem varu preprečujemo s predgrevanjem, za zagotovitev ustrezne mikrostrukture, s sušenjem oplaščenih elektrod ali praškov in s pogrevanjem zvarnega spoja za izhajanje raztopljenega vodika. Ker predgrevanje pomeni visok strošek pri gradnji zvarjene konstrukcije, je potrebna natančna določitev ustrezne temperature predgrevanja.

V raziskavi je predstavljena eksperimentalna določitev temperature predgrevanja večvarkovnega strjenega vara debeline 50 mm, pri kateri ne bo prišlo do pojava razpok v hladnem.

Ugotovljeno je, da nastajajo prečne razpoke v hladnem v večvarkovnem strjenem varu, grajenem s polnjeno žico Filtub 128 po postopku varjenja pod praškom (EPP postopek) pri temperaturi predgrevanja, ki je nižja od 70 °C.

Ključne besede: večvarkovni var, razpokljivost v hladnem, temperatura predgrevanja, malolegirana konstrukcijska jekla

One of the weldability problems with high-strength low-alloy (HSLA) steels is the cold-cracking phenomenon. In this research special attention has been paid to cold cracks appearing in the multi-pass weld metal. Cold cracking is prevented by the preheating of steel prior to welding in order to achieve a beneficial microstructure, and by the drying of welding flux and the post-heating of a welded joint for the expulsion of dissolved hydrogen. An accurate determination of the preheating temperature is necessary because of the high cost of the preheating during the build up of a welded structure.

This paper deals with the experimental determination of the preheating temperature for multi-pass weld metal, with a thickness of 50 mm, at which cold cracking in the welded joint could be eliminated.

It was found that in the multi-pass weld metal made by Filtub 128 flux-cored wire and a submerged-arc welding process, transverse cold cracks appear at preheating temperatures lower than 70 °C.

Key words: multi-pass weld metal, cold cracking, preheating temperature, high strength low alloy steels

1 UVOD

Razpoke v hladnem¹ se pojavijo pri ohlajanju zvarnega spoja pri temperaturi pod 450 °C in lahko nastanejo v toplotno vplivanem področju (TVP) ali strjenem varu. Nastanek teh razpok je odvisen od občutljivih mikrostruktur, vodika in vpetosti vara. Za varno obratovanje zvarjenih konstrukcij je pomembno, da njihov nastanek preprečimo. Razpokljivost v hladnem preprečujemo s predgrevanjem za zagotovitev ustrezne mikrostrukture, s sušenjem oplaščenih elektrod (pri ročnem elektroobločnem varjenju) oziroma praškov (pri varjenju pod praškom - EPP postopek) in s pogrevanjem zvarnega spoja za izhajanje raztopljenega vodika.

Kljub relativno pogostem pojavu razpokljivosti v hladnem v strjenem varu je bilo narejenih malo raziskav o pojavu hladnih razpok v varu v primerjavi z razširjenimi raziskavami fenomena razpokljivosti v hladnem v TVP enovarkovnega vara². Prevladovala je domneva, da se problematika razpokljivosti v hladnem v zvaru ne pojavlja pri uporabi nizko - srednjetrnostnih jekel. S povečano uporabo nizkoogljčnih jekel t. i. visokotrd-

nostnih malolegiranih konstrukcijskih (VTML) jekel in polnjenih žic (elektrod) se je začela pojavljati razpokljivost v hladnem pogosteje tudi v varu. Največkrat so nastajale razpoke v hladnem v varu pri varjenju debelostenskih cevovodov zaradi tradicionalne uporabe oplaščenih elektrod z nekoliko višjo vsebnostjo vodika³.

Največje zaostale napetosti se pri soležnih zvarnih spojih pojavijo v varu in TVP⁴. Če zvarni spoj ni vpet, se pojavijo v omenjenih področjih predvsem visoke natezne vzdolžne zaostale napetosti. V primeru toge vpetosti soležnega zvarnega spoja pa se lahko pojavijo na prej omenjenih področjih tudi visoke natezne prečne zaostale napetosti. Velikost vzdolžnih ali prečnih natezних zaostalnih napetosti lahko na teh področjih doseže vrednosti napetosti tečenja materiala. Pri varjenju večjih debelin se lahko pojavijo zaostale napetosti tudi v smeri debeline. Takrat se pojavi v notranjosti materiala triosno napetostno stanje. Širjenje prečnih razpok v hladnem povzročajo predvsem natezne komponente vzdolžnih zaostalnih napetosti. In nasprotno, širjenje vzdolžnih razpok v hladnem povzročajo natezne komponente prečnih zaostalnih napetosti.

Poleg karakterističnih razpok v hladnem lahko nastanejo v varu tudi druge oblike razpokljivosti v hladnem, kot so npr. mikrorazpoke, "ribja očesa" in Chevronove razpoke.

V primeru, ko ima var manjšo napetost tečenja od osnovnega materiala, govorimo o varu z manjšo trdnostjo (TRN - var). Kadar ima var večjo napetost tečenja od osnovnega materiala, pa govorimo o varu z večjo trdnostjo (TRV - var) ⁵.

S stališča varivosti VTML - jekel ter predvsem ekonomičnosti je gradnja TRN - varov zaželena. TRN - zvarni spoji se uporabljajo za preprečevanje razpokljivosti v hladnem brez predgrevanja, še posebej za zvarne spoje iz VTML - jekel z napetostjo tečenja nad 700 MPa. Večja nevarnost nastanka razpok v hladnem nastopi pri gradnji TRV - varov, saj je pri večji trdnosti vara težje doseči zadovoljivo žilavost. Zaradi tega TRV - vari zahtevajo predgrevanje, kar pomeni znaten strošek ter pazljivo in disciplinirano gradnjo vara. Temu sledi še često izbrana termična ali mehanska obdelava zvarnega spoja po varjenju, kar stroške izdelave zvarnega spoja še povečuje.

Čeprav želimo razpokljivost v hladnem popolnoma odpraviti že med izdelavo zvarnega spoja z gradnjo TRN - varov oziroma s predgrevanjem TRV - zvarnih spojev, je za varno obratovanje zvarjenih konstrukcij iz VTML

izredno pomembno, da upoštevamo možnost nastanka in s tem nastanek razpok v hladnem (ravninskih napak) v TRN - ali TRV - varu tudi po varjenju oziroma po izdelavi zvarnega spoja.

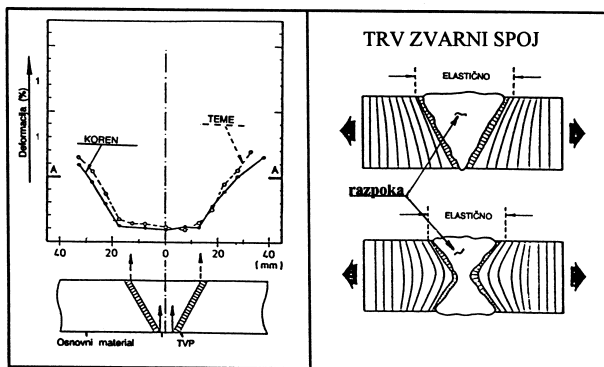
Osnovna značilnost TRV - vara (slika 1a) z razpoko v hladnem je, da ostane material zvara pri preobremenitvi zvarnega spoja v elastičnem napetostnem področju, medtem ko se duktilnejši osnovni material že prične plastično deformirati. Pri tem je dosežena stabilnost (zaščitni efekt) razpok v hladnem (kratke ravninske napake) v TRV - varu, dokler osnovni material z utrjevanjem ne doseže vrednosti meje tečenja strjenega vara.

Nasprotno, pri preobremenitvi TRN - vara s prisotno razpoko v hladnem, se pojavi plastična deformacija najprej v varu, medtem ko ostane TVP in osnovni material v elastičnem napetostnem področju (slika 1b).

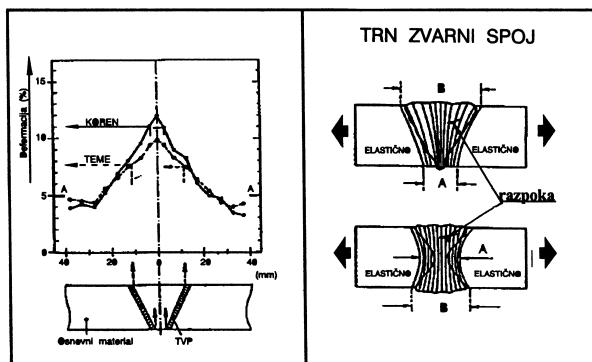
Iz povedanega sledi, da je s stališča lomno mehanskega obravnavanja zvarnega spoja z razpoko v hladnem oziroma varnosti zvarjene konstrukcije bolj neugodno, če razpoke v hladnem nastanejo v TRN - varu, namesto v TRV - varu. Takrat razpoke v hladnem postanejo zaznavne in lahko ob premajhni duktilnosti (žilavosti) strjenega vara vplivajo na sprožitve loma v strjenem varu in s tem povzročijo porušitev zvarjene konstrukcije že pri relativno majhni obremenitvi.

Zaradi tega je potrebna natančna in sistematična ocenitev občutljivosti na razpokljivost v hladnem v varu z varivostnim preizkusom. Temperaturo predgrevanja, pri kateri ne bo prišlo do pojava razpok v hladnem v varu, lahko določimo analitično (z empiričnimi enačbami) in s praktično izvedbo varivostnega preizkusa. Ker pomeni predgrevanje visok strošek pri gradnji zvarjene konstrukcije, je potrebna natančna določitev ustrezne temperature predgrevanja.

V raziskavi je na osnovi izvedenega varivostnega preizkusa predstavljena ocenitev občutljivosti na razpokljivost v hladnem v večvarkovnem varu, grajenem s polnjeno žico Filtub 128 po postopku varjenja pod praškom (EPP postopek).



a)



b)

Slika 1: Porazdelitev plastičnih deformacij v simetričnem X in Y TRV - a) in TRN - b) strjenem varu

Figure 1: Distribution of plastic strains in the symmetrical X and Y undermatched a) and overmatched b) multipass weld metal

2 EKSPERIMENTALNI POSTOPEK

2.1 Podatki o materialu

Za izdelavo preizkušancev za varivostni preizkus po Yurioku⁶ ni posebej predpisana vrsta materiala oziroma njegove mehanske lastnosti in kemična sestava. Predpisana je debelina materiala, ki naj bo 50 mm. Odločili smo se, da bodo preizkušanci za varivostni preizkus izdelani iz konstrukcijskega jekla z mejo tečenja 355 MPa in natezno trdnostjo 520 MPa. Preizkusni večvarkovni simetrični Y-var je zavarjen s polnjeno stržensko žico Filtub 128 premera ϕ 4 mm po postopku EPP. Pri varjenju je uporabljen aglomerirani prašek FB TT. Mehanske lastnosti in kemična sestava dodatnega materiala so navedeni v tabeli 1 in 2.

Tabela 1: Mehanske lastnosti dodatnega materiala Filtub 128

Table 1: Mechanical properties of welding consumable - Filtub 128

Material	R _p (MPa)	R _m (MPa)	A %	CVN J
Filtub 128 čisti var	550	630-730	20	160 pri +20 °C
Filtub 128 strjeni var	710*	802*	21,5*	122, 187, 100 pri +20 °C

*vrednost je povprečje dveh meritev

Tabela 2: Kemična sestava dodatnega materiala Filtub 128

Table 2: Chemical composition of welding consumable - Filtub 128

Kemična sestava (%)	C	Si	Mn	Ni	Mo	C _E	P _{CM}
Filtub 128 - čisti var	0,05	0,20	1,40	1,20	0,40	0,184	0,173

Ogljikov ekvivalent C_E v preglednici 2 se izračuna po enačbi⁷:

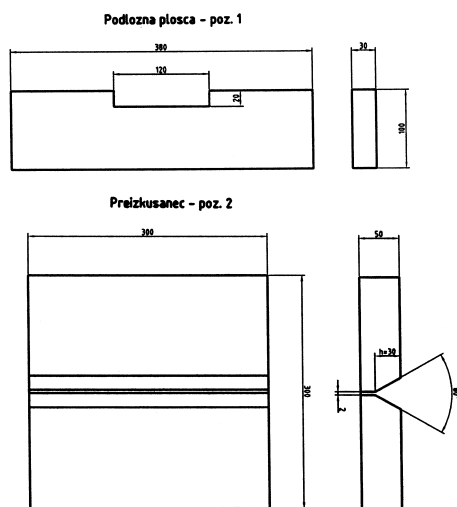
$$C_E = C + \frac{Si}{25} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cr}{10} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{40} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} \quad (1)$$

Vpliv kemičnih elementov zajema parameter hladne razpokljivosti P_{CM}⁸:

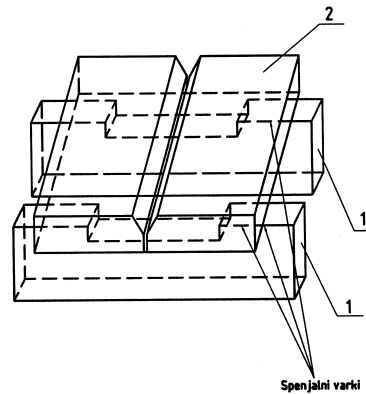
$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (2)$$

2.2 Podatki o vodiku v varu

Vsebnost difuzijskega vodika H_D v varu je bila določena s standardizirano glicerinsko merilno metodo (DIN 8572) pri EPP-varjenju s sušenim in nesušenim praškom FB TT. Nesušeno stanje praška pomeni tisto količino H_D v strjenem varu, ki jo dobimo pri EPP-varjenju s praškom shranjenim v skladišču. S sušenjem praška pri temperaturi sušenja T_S = 380 °C v času 2 ur neposredno pred varjenjem znižamo količino H_D v varu na minimum. Izmerjene vrednosti H_D so podane v tabeli 3.



Slika 2: Preizkušaneec za izvedbo varivostnega preizkusa
Figure 2: Weldability test specimen



Slika 3: Priprava in vpetje preizkušanca pred izvedbo varivostnega preizkusa

Figure 3: Preparation and restraint of specimens before weldability test execution

2.3 Eksperimentalna določitev temperature predgrevanja z varivostnim preizkusom

Preizkus po Yurioku⁶ spada med tiste varivostne preizkuse za določanje temperature predgrevanja, pri kateri se več ne pojavijo prečne razpoke v hladnem v večvarkovnem varu. Preizkušaneec za izvedbo varivostnega preizkusa je izdelan iz konstrukcijskega jekla debeline 50 mm z mejo tečenja 355 MPa in natezno trdnostjo 520 MPa s simetrično Y-obliko zvarnega žleba (slika 2).

Preizkušaneec je ločen od podlage s podložnimi ploščami debeline 30 mm, da dosežemo čim bolj enakomerno ohlajanje preizkušanca po varjenju. Togost in ustrezno vpetost kasneje varjenega preizkusnega večvarkovnega vara je dosežena s prispojnitvijo preizkušanca k podložnim ploščam s spenjalnimi varki (slika 3).

Preizkušaneec smo segreli na preskusno temperaturo predgrevanja (razen v primerih brez predgrevanja), nato pa izvršili varjenje preizkusnega večvarkovnega vara (polnjena strženska žica Filtub 128, φ4 mm) v Y- zvarni žleb z ustrezno tehnologijo varjenja (tabela 4 in 5). Varjenje preizkusnega večvarkovnega vara smo izvedli le s sušenim praškom (380 °C/ 2 uri in H_D = 0,10 ml/100g).

Tabela 3: Izmerjene vrednosti difuzijskega vodika H

Table 3: Hydrogen content values measured in the weld metal made by a submerged-arc welding process with Filtub 128 flux - cored wire and FB TT flux

T _S °C	H _D ml/100g
nesušeni prašek	3,69
380 °C	0,10

Po enem tednu (v tem času difundira večina vodika) smo preizkušaneec prerezali vzdolžno po sredini vara (slika 4 - prerez A-A) in izdelali metalografske obruse.

Sledil je pregled z optičnim mikroskopom NIKON EPIPHOT 300. V primeru, da smo pri pregledu obrusov

Tabela 4: Tehnologija varjenja za varjenje večvarkovnega vara pri sobni temperaturi

Table 4: Welding procedure of multi-pass weld metal for welding at room temperature

Številka varka	Premer elektrode (mm)	Napetost (V)	Jakost el. toka (A)	Pol	Medvark. temp.	Hitrost varjenja (cm/min)	Vnos toplote* (kJ/cm)	$\Delta t_{8/5}$ -eksp. (s)
1	4	28	500	DC-	sobna t.	58	14,4	
2	4	29	510	DC-	50	60	14,7	6,4
3	4	29	515	DC-	50	60	14,9	
4-42	4	29-33	500-530	DC-	50-54	60	14,5-17,4	9,6-11,2

* Pri varjenju toplotni izkoristek ni upoštevan. Za realni izračun vnosa toplote za EPP-varjenje lahko vzamemo $\eta = 0,95$.

Tabela 5: Tehnologija varjenja za varjenje večvarkovnega vara pri temperaturi predgrevanja $T_p \approx +70^\circ\text{C}$

Table 5: Welding procedure of multi-pass weld metal for welding at preheating temperature $T_p \approx +70^\circ\text{C}$

Številka varka	Premer elektrode (mm)	Napetost (V)	Jakost el. toka (A)	Pol	Medvark. temp.	Hitrost varjenja (cm/min)	Vnos toplote* (KJ/cm)	$\Delta t_{8/5}$ -eksp. (s)
1	4	29	510	DC-	70	60	14,7	
2	4	29	515	DC-	70	60	14,9	7,1
3	4	30	515	DC-	70	60	15,4	
4-40	4	29-33	500-530	DC-	70-73	60	14,5-17,4	10,1 - 11,9

* Pri varjenju toplotni izkoristek ni upoštevan. Za realni izračun vnosa toplote za EPP varjenje lahko vzamemo $\eta = 0,95$.

Tabela 6: Rezultati meritev po izvedbi varivostnega preizkusa na večvarkovnem strjenem varu, varjenem s polnjeno stržensko žico Filtub 128 $\phi 4$ mm in sušenim praškom FB TT

Table 6: Results of measurements after weldability test of multi-pass weld metal at welding with Filtub 128 flux - cored wire $\phi 4$ mm and FB TT dry flux

Št. preizkusa	t (mm)	T_s ($^\circ\text{C}$)	H_D (ml/100g)	H (mm)	T_p ($^\circ\text{C}$)	T_{p^*} ($^\circ\text{C}$)	Opom.
1	50	380	0.10	49,5	Sobna temperatura	+60	Razpoke!
2	50	380	0.10	49,0	+70	+57	Brez razpok!

* izračunana temperatura predgrevanja po enačbi (3)

z optičnim mikroskopom opazili razpoke v hladnem, smo preizkus ponovili pri višji temperaturi predgrevanja, vse dokler nismo dosegli temperaturo predgrevanja, pri

kateri ne bi prišlo do nastanka razpok v hladnem v večvarkovnem varu.

Varivostni preizkus smo izvedli s polnjeno stržensko žico Filtub 128 $\phi 4$ mm in sušenim praškom FB TT najprej pri sobni temperaturi. S sušenim praškom FB TT smo varivostni preizkus opravili še pri $T_p \approx +70^\circ\text{C}$. Rezultati varivostnih preizkusov so podani v preglednici 6.

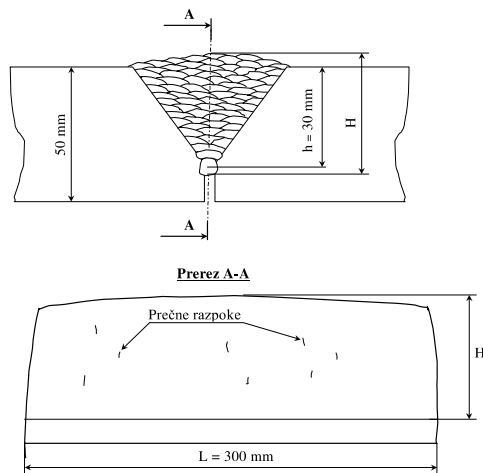
Temperaturo predgrevanja, pri kateri ne bo prišlo do nastanka razpok v hladnem v večvarkovnem varu, lahko izračunamo tudi po empirični enačbi ¹:

$$T_p = 120 + 120 \log\left(\frac{H_D}{3,5}\right) + 5(H - 20) + 8\left(\frac{R_m}{10} - 83\right) \quad (3)$$

Za določitev T_p je pomembna vsebnost difuzijskega vodika H_D , debelina večvarkovnega vara H (slika 5) in natezna trdnost vara R_m . H_D se meri v ml/100g, H v mm in R_m v MPa.

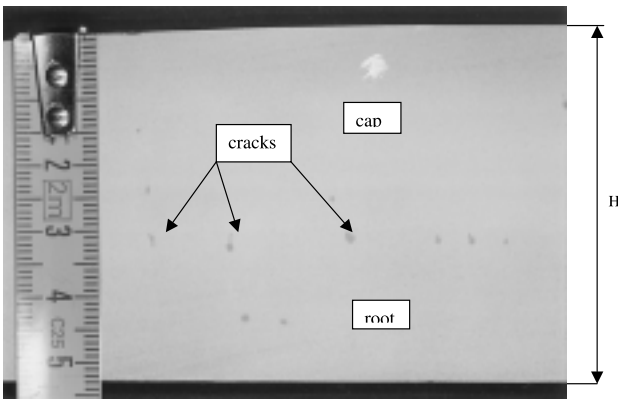
2.4 Pregled metalografskih obrusov z optičnim mikroskopom

Vsi metalografski obrusi so bili fino brušeni in jedkani s 3 % nitalom, ter nato pregledani z optičnim



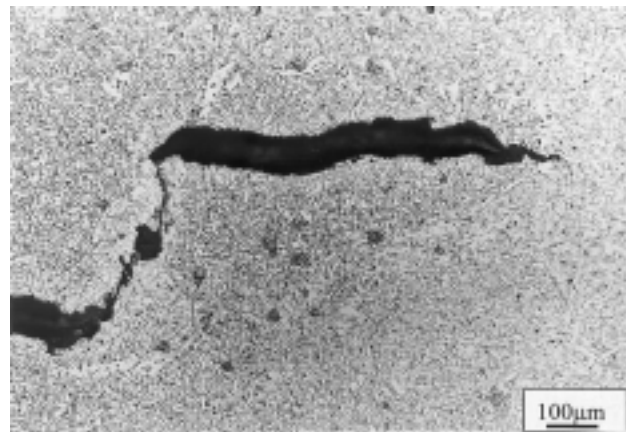
Slika 4: Shematski prikaz razreza preizkušanca s preizkusnim večvarkovnim Y - varom po varjenju

Figure 4: Sectioning of specimen with tested multipass Y- weld metal after welding



Slika 5: Posnetek vzdolžnega prereza preizkusnega večvarkovnega strjenega zvara z razpokami v hladnem, identificiranimi s penetrantsko metodo, pri varjenju s sušenim praškom pri sobni temperaturi; povečava 1,5-krat

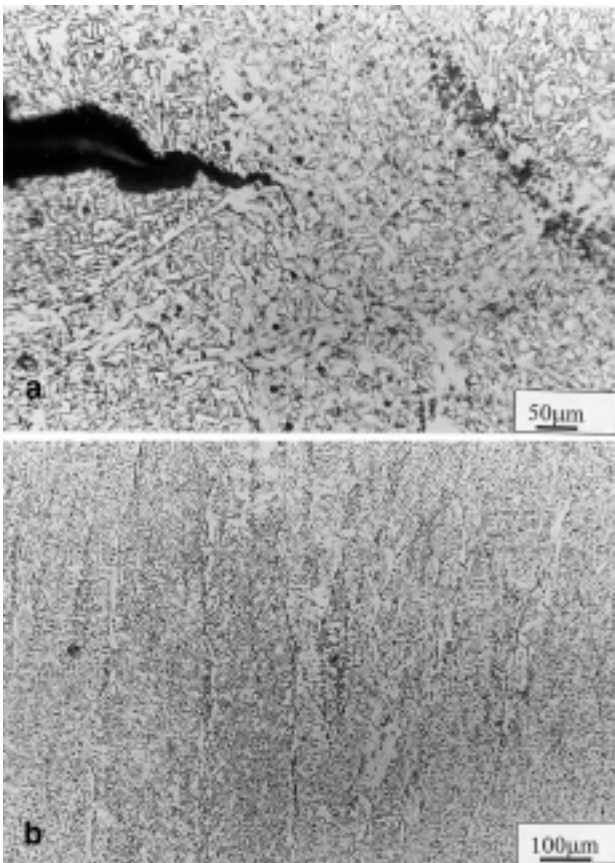
Figure 5: Cross-section of tested multi-pass weld metal with cold cracks, identified with the penetration method, for welding with dry flux at room temperature, 1.5X



Slika 7: Bainitna mikrostruktura v okolici področja stopničaste razpoke v hladnem

Figure 7: Bainitic microstructure in the surroundings of stepped cold crack

mikroskopom NIKON EPIPHOT 300. Opazovane mikrostrukture večvarkovnega vara so bile ocenjene po proceduri ⁹.



Slika 6: Bainit a) v varu tik ob izolirani razpoki v hladnem s sledovi primarnega ferita (PF). Na sliki b) so vidna kristalna zrna primarnega ferita (PF-G), nastalega po kristalnih mejah primarnih avstenitnih zrn b).

Figure 6: Bainite a) in weld metal close to isolated cold crack with contours of primary ferrite (PF). At higher magnification primary ferrite along the grain boundary is visible (PF-G), formed at primary austenitic grains b)

3 RAZPRAVA

Za analitični izračun temperatur predgrevanja je bila uporabljena natezna trdnost vara (**tabela 1**), ki je dejanska trdnost večvarkovnega vara po varjenju in ima zaradi tega pomemben vpliv na velikost izračunanih temperatur predgrevanja (**enačba 3**).

Iz primerjave izračunanih temperatur predgrevanja (**tabela 6**) lahko sklenemo, da je predgrevanje potrebno že pri varjenju s sušenim praškom ($H_D = 0,10$ ml/100g). V primeru varjenja s sušenim praškom (380 °C/ 2 uri) je pričakovati temperature predgrevanja med 57 °C in 60 °C, ki so orientacijske vrednosti za eksperimentalno določitev temperature predgrevanja vara pri varivostnem preizkusu. Ta je pokazal, da se pri varjenju s sušenim praškom pri temperaturi predgrevanja $T_p = +70$ °C popolnoma odpravi razpokljivost v hladnem.

Predhodno smo opravili preizkus še pri sobni temperaturi. Razrez preizkušanca in ogled njegove površine (**slika 5**) je pokazal, da so nastale prečne razpoke v hladnem v smeri, pravokotno na površino vara, na področju med korenem in temenom vara. Razpoke v hladnem so nastajale v grobozrnatem dendritskem delu varkov in TVP-varkov kot stopničaste (razvejene) in izolirane (nerazvejene) prečne razpoke. Izolirane razpoke so nastajale na trših področjih (≈ 285 HV1) vara z bainitno mikrostrukturo, ki so pogostokrat mejila na mehkejša področja (≈ 255 HV1) vara z mikrostrukturo primarnega ferita (**slika 6**).

Stopničaste razpoke v hladnem so se pojavljale najpogosteje v popuščenem TVP-področju varkov in so nastajale s povezovanjem izoliranih razpok preko trše grobozrnate bainitne mikrostrukture (**slika 7**).

4 SKLEPI

Z varivostnim preizkusom je bilo ugotovljeno, da nastajajo prečne razpoke v hladnem v večvarkovnem EPP-varu pri varjenju s polnjeno žico Filtub 128 in s sušenim praškom ($H_D = 0,10$ ml/100g) pri temperaturi predgrevanja, ki je nižja od 70 °C.

Iz rezultatov je razvidno, da lahko z analitičnimi izračuni dovolj natančno napovemo interval dejanske temperature predgrevanja. Le-to je treba potrditi z varivostnim preizkusom.

5 LITERATURA

¹ Alcantara, N. G.: Weld metal hydrogen cold cracking, Doctoral Theses, Cranfield Institute of Technology of Industrial Science, University Library of Cranfield, Great Britain, 1982

² Praunseis, Z., Gliha, V., Rak, I., *Materiali in Tehnologije*, 34 (2000) 1-2, 27-30

³ Graville, B.: A short review of weld metal hydrogen cracking, 33-46, IIW Doc. IX - 1374 - 85, 1985

⁴ Vuherer, T.: Analiza zaostalih notranjih napetosti s posebnim poudarkom na ponovnem vnosu toplote in njih meritev v sočelnih zvarnih spojih, Master's degree, Maribor, 1999

⁵ Praunseis, Z.; Rak, I.: Problematika trdnostne neenakosti visokotrnostnih zvarnih spojev, *Proizvodne tehnologije in sistemi*, Mednarodna multi-konferenca Informacijska družba - IS98, 89-91, Ljubljana 1998

⁶ Yurioka, N.: Test results of cold cracking in multi - pass weld metal, 83-96, IIW Doc. IX - 1903 - 98, 1998

⁷ Dueren, C.: Equation for the prediction of cold cracking resistance in field - welding large diameter pipes; International Institute of Welding, Subcommision IX, 27-35, IIW Doc. IX - 1356 - 85, 1985

⁸ Ito, Y., Bessyo, K.: Cracking Parameter of High Strenght Steels Related to Heat-Affected-Zone Cracking, Rep. 1, Jour. JWS, 37(1968) 9, 983-991, Rep.2, ibid, 38, (1969), 10, 1134-1144, IIW Doc. IX-576-68, 1968

⁹ Guide to the light microscope examination of ferritic steel weld metals, International Institute of Welding, 66-78, Doc. IIS/IIW-999-88, 1985