

VARIVOSTNI PREIZKUS Z VSTAVKOM IZ JEKLA Z NIZKIM P_{CM}

WELDABILITY TEST USING AN IMPLANT MADE OF A LOW PCM STEEL

Vladimir Gliha, Tomaž Vuherer, Inoslav Rak

Fakulteta za strojništvo, Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenija
vladimir.gliha@uni-mb.si

Prejem rokopisa - received: 2001-11-15; sprejem za objavo - accepted for publication: 2003-04-22

V industrijski praksi se je treba pri obločnem varjenju ogljikovih konstrukcijskih jekel včasih spoprijeti z možnostjo pojava razpokljivosti v hladnem v večvarkovnih varjih. To je le takrat, ko ima dodajni material višji P_{CM} kot osnovni. V pričujočem prispevku smo z metodo vstavka eksperimentalno določili občutljivost enega takšnega vara za razpokljivost v hladnem.

Če ima pri varivostnem preizkusu z vstavkom material vstavka nižji P_{CM} od navarka, raztopljeni vodik, ki je bil vnesen v zvarno kopel pri varjenju z oplaščeno elektrodo, ne difundira v vstavek. Kljub nezadostni duktilnosti materiala vstavka napetost na meji tečenja ne povzroči nastanka hladnih razpok. Občutljivosti materiala vstavka za razpokljivost v hladnem se v tem primeru ne da oceniti. Možnost difuzije vodika iz navarka v vstavek in iz njega v material podložne plošče je odvisna od kemične sestave. Navarek je material elektrode, nalegiran z osnovno ploščo. Problem difuzije vodika je mogoče obiti z izbiro ustreznega materiala za osnovno ploščo.

Ključne besede: razpokljivost v hladnem, večvarkovni var, zaostale napetosti, difuzija vodika, transformacija, navarek, nalegiranje elektrode z osnovnim materialom, temperatura predgrevanja

Cold cracking of multi-pass weld-metal is sometimes met in industrial practice with the arc welding of carbon structural steels. It happens only when the P_{CM} of the consumable is higher than the P_{CM} of the base metal. In this article the cold-cracking sensitivity of one such weld metal was experimentally determined.

When the P_{CM} of the implant material is lower than the P_{CM} of the bead on the plate the diffusible hydrogen introduced into the weld pool during welding with the covered electrode did not diffuse in the implant. Despite the unsatisfactory ductility of the implant material the applied stress on the level of the material yield stress does not cause the formation of cold cracks. In this case the cold-cracking sensitivity of the implant material can not be assessed. The possibility of hydrogen diffusion from the bead on plate into the implant and from the implant to the material of the backing plate depends on the chemical composition. The bead on plate is an electrode picked-up by the backing plate. The problem with hydrogen diffusion can be avoided by the selection of a suitable material for the backing plate.

Keywords: cold cracking, multi-pass weld metal, residual stresses, hydrogen diffusion, transformation, bead on plate, electrode pick-up, preheating temperature

1 UVOD

Pri obločnem varjenju ogljikovih konstrukcijskih jekel z istovrstnimi dodajnimi materiali se pod določenimi pogoji po nekem času lahko na toplotno vplivanem področju zvara (TVP) ali pa v varu pojavijo razpoke. Ta pojav, ki je poglavitni problem varivosti teh jekel, je znan kot hladna, vodikova ali zapoznena razpokljivost zvarov. Eden od pogojev za pojav razpokljivosti v hladnem je vodik, druga dva pa sta nezadostna odpornost materiala proti lomu na mestu, kjer se vodik pri ohlajanju akumulira, in natezne napetosti.

Vodik v zvaru je neposredna posledica vode v obloku. Vir vode so osnovni, dodajni in zaščitni materiali, ki se jih uporablja pri varjenju. Odpornost TVP in vara proti lomu, oziroma njihova duktilnost je odvisna od kaljivosti obeh materialov in hitrosti ohlajanja. Kaljivost je funkcija kemične sestave materiala. Kemična sestava TVP je enaka osnovnemu materialu. Za kemično sestavo vara sta pomembni predvsem sestavi osnovnega in dodajnega materiala. Hitrost ohlajanja vseh delov zvara je funkcija parametrov varjenja, debeline zvara in same

oblike spoja. Pri ohlajanju in posledičnem krčenju materiala se vzpostavi v zvaru polje natezних napetosti. Te so poznane kot zaostale napetosti. So zelo velike, saj ponekod dosežejo kar mejo tečenja materiala. Napetostno polje tlačnih zaostalih napetosti dlje od zvara je reakcija na visoke natezne zaostale napetosti v njem. Za pojav razpokljivosti v hladnem je pomemben tudi obstoj koncentradorjev napetosti. Ti zaostale napetosti še povečajo in lokalno omogočijo obstoj večosnega nateznega napetostnega polja.

Občutljivost jekel za razpokljivost v hladnem se meri z vrednostjo P_{CM}.

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

Ponavadi so vari iz dodajnih materialov, ki so trdnostno enakovredni osnovnim, manj občutljivi za razpokljivost v hladnem kot osnovni material. Razlog je vsebnost ogljika, ki je v varu zaradi kemične sestave dodajnih materialov praviloma nižja. Morebitna razpokljivost v hladnem se zato pojavi v TVP.

Kadar pa načrtujemo zware z višjimi mehanskimi lastnostmi od osnovnega materiala, je zaradi večje legiranosti dodatnega materiala P_{CM} vara lahko višji od osnovnega materiala. Morebitna razpokljivost zvarov v hladnem se bo v tem primeru pojavila v varu in ne v TVP. V pričujočem prispevku smo z varivostnim preizkusom z vstavkom (implant-test) analizirali material večvarkovnega vara, ki ima v realnem spoju višji P_{CM} od varjenega jekla^{1,2}. Rezultate smo poskusili uskladiti s tistimi, ki so bili dobljeni pri Y-preizkusu pri istem jeklu z elektrodo podobne kemične sestave, kot jo ima obravnavani večvarkovni var³.

2 OCENITEV OBČUTLJIVOSTI JEKEL ZA RAZPOKLJIVOST V HLADNEM

Sorazmerno enostavno je občutljivost jekla za razpokljivost v hladnem oceniti z Y-preizkusom⁴. Preizkušavec je pravzaprav model varjenja korenskega varka z izbrano elektrodo v znanem stanju in z določnim vnosom toplote. Varjenje korenskega varka je s stališča razpokljivosti v hladnem najbolj kritična faza izdelave večvarkovnih zvarnih spojev. Oblika pripravljene zvarnega žleba pri tem varivostnem preizkusu je takšna, da pri ohlajanju po varjenju nastanejo v varku in neposredni okolici zaradi samovpetosti velike zaostale napetosti. Napetosti na samem spoju verek-osnovni material so zaradi oblikovne koncentracije še povečane. Polje najbolj koncentriranih napetosti obsega del varjenega osnovnega materiala, torej nastali TVP, in del vara. Ob zadostni vsebnosti raztopljenega vodika in nezadostni duktilnosti, ki jo je pa moč regulirati s temperaturo varjenega materiala, torej s predgrevanjem, hladne razpoke nastanejo na tistem mestu, kjer je P_{CM} višji. Zaradi obremenitve preizkusnega varka "pri kontroli pomika" se z nastankom razpok napetosti relaksirajo, kar vpliva na njihovo nadaljnje napredovanje. Zato je treba preizkušavec 24 ur po varjenju na več mestih prerezati in ga metalografsko natančno analizirati.

Temperatura predgrevanja, ki prepreči nastanek razpok pri Y-preizkusu, pravzaprav pa takratna hitrost ohlajanja, zagotavljata pri dejanskem varjenju, pri katerem se vnaša v var enako količino vodika kot pri preizkusu, da se razpokljivost v hladnem pri varjenju korenskega varka ne pojavi. Če gre za razpokljivost v hladnem v TVP je tolikšno predgrevanje več kot zadovo-

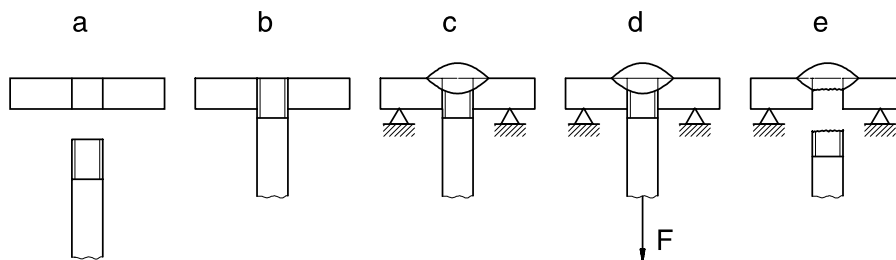
ljivo tudi pri varjenju drugih varkov. Takrat vpetost ni več tako velika kot pri preizkusu. Mesto, na katerem nastane pri Y-preizkusu razpoka, pa je natančen pokazatelj, kje je treba pričakovati pojav razpokljivosti v hladnem pri dejanskem varjenju.

Občutljivost jekla za razpokljivost v hladnem je mogoče oceniti tudi pri preizkusu z vstavkom^{5,6}. Ta varivostni preizkus, za katerega je potrebna posebna naprava, je zahtevnejši od Y-preizkusa. Ker ni tolikšnih priprav na začetku in tako natančne analize na koncu, ga je mogoče opraviti hitreje in z manjšimi stroški. Tudi pri preizkusu z vstavkom gre za neke vrste model varjenja korenskega varka, le da napetosti, ki so potrebne za pojav razpokljivosti v hladnem, niso posledica krčenja materiala po varjenju, ampak jih ustvarimo v izbranem obsegu z zunanjo obremenitvijo vstavka. Koncentracijo napetosti na pravem mestu zagotovimo z zarezo.

Posamezne sekvence preizkusa so prikazane na **sliki 1**. Izdelamo vstavek z zarezo in podložno ploščo z izvrtino (a). Vstavek namestimo v pripravljeno izvrtino (b), ga čelno pritrdimo na ploščo z navarkom (c) in obremenimo na posebni napravi s silo F (d). Vstavek se v odvisnosti od obremenitve po nekem času zlomi ali pa ne (e).

Vstavek izdelamo iz preizkušane jekla. Material za podložno ploščo predpisane debeline mora biti podobne kvalitete kot material vstavka ali pa je konstrukcijsko jeklo C-Mn⁵. Navarek naredimo z izbrano vrsto elektrode v znanem stanju in s predpisanim vnosom toplote. Nosilnost navarka mora zadoščati za maksimalno možno obremenitev vstavka. Konstanten vnos toplote in debelina podložne plošče zagotavljata, da je hitrost ohlajanja TVP odvisna samo od temperature materiala pred varjenjem. To uravnavamo s predgrevanjem.

Za razpokljivost v hladnem je navarek, s katerim togo spnemo ploščo in vstavek, pomemben še zaradi vnosa vodika. Pri varjenju z oplaščeno elektrodo pride v material navarka vodik. Če transformacija avstenita pri ohlajanju nastopi v navarku prej kot v vstavku, lahko vodik difundira iz že transformiranega navarka v še avstenitni najbolj segreti del vstavka. To je izpolnjeno takrat, ko je P_{CM} materiala vstavka višji od navarka. Vstavek obremenimo s predvideno silo, ko se v zvarih vzpostavi polje zaostalih napetosti. Vodik se v TVP akumulira prav tam, kjer so tudi napetosti koncentrirane. Ob nezadostni duktilnosti materiala TVP nastanejo v koncentriranem polju napetosti hladne razpoke, ki



Slika 1: Pet sekvenc varivostnega preizkusa z vstavkom
Figure 1: Five sequences of an implant test

zmanjšajo nosilni presek vstavka. Zaradi obremenitve "v kontroli sile" sledi ponavadi nastanku razpok popolna porušitev vstavka. To omogoča nadvse enostavno interpretacijo rezultatov tega varivostnega preizkusa.

Razpoke pri preizkusu z vstavkom, pa tudi sicer, nastanejo v obdobju prvih 24 ur po varjenju, saj v tem času tudi pri sobni temperaturi vodik z difuzijo zapusti kritično področje vstavka. Da bi odkrili tiste razpoke, ki so premajhne, da bi povzročile porušitev vstavka, včasih opravimo metalografsko analizo nezlomljenega vstavka skupaj z navarkom.

Y-preizkus ni primeren za ocenitev občutljivosti večvarkovnega vara za razpokljivost v hladnem. Pokaže le, kje je pričakovati nastop razpokljivosti v hladnem, v TVP ali v varu. Če nastanejo pri tem preizkusu razpoke v varku, je to dokaz, da je P_{CM} dodatnega materiala višji od osnovnega. Nalegiranost varka z osnovnim materialom tega ne more prikriti. Zato je Y-preizkus primeren le za zagotavljanje kakovosti korenskih varkov. Pri njem je nalegiranje dodatnega materiala z osnovnim skoraj takšno kot v dejanskem zvaru. Nalegiranje vseh naslednjih varkov je manjše, saj natalijo manj osnovnega materiala kot korenski varek.

Za ocenitev občutljivosti večvarkovnega vara za razpokljivost v hladnem se uporabi preizkus, ki bolje ustreza realnemu stanju v pravem večvarkovnem varu, tako glede na kemično sestavo vara kot na napetostno stanje^{7,8}. Razpoke, ki nastanejo v večvarkovnem varu zaradi razpokljivosti v hladnem so praviloma prečne, nasprotno od vzdolžnih, ki nastanejo pri TVP. Vzrok je smer največjih zaostalih napetosti v enem in drugem primeru.

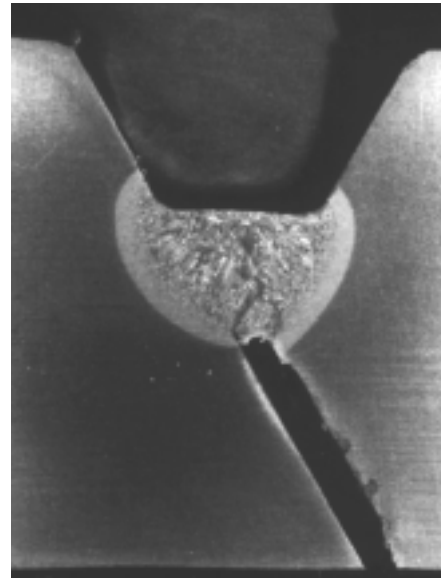
3 EKSPERIMENTALNO DELO

V pričujoči raziskavi smo občutljivost materiala večvarkovnega vara za razpokljivost v hladnem poskusili oceniti pri preizkusu z vstavkom in tako potrditi rezultate, ki so bili dobljeni že prej pri Y-preizkusih pri jeklu Niomol 490K³. Ko preizkušanca niso predgreli in je bila njegova temperatura enaka sobni, je preizkusni varek, narejen z elektrodo EVB NiMo z vsebnostjo vodika 3,5 ml/100 g vara, počil v varu (slika 2). Pri temperaturi predgrevanja 50 °C razpokljivosti v hladnem niso več opazili. Kemični sestavi osnovnega materiala in preizkusnega varka sta prikazani v tabeli 1 (vrstici 1 in 2).

Tabela 1: Kemična sestava vseh osnovnih materialov in varov

Table 1: Chemical composition of all base metals and weld metals

	material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Nb	Al	Cu	P _{CM}
		%												
1	Niomol 490 K	0,09	0,24	0,37	0,009	0,002	0,19	0,90	0,22		0,032	0,029	0,27	0,179
2	varek pri Y-preizkusu	0,08	0,37	0,94	0,02	0,01	0,79	0,10	0,29	0,02			0,10	0,184
3	večvarkovni var	0,07	0,35	1,29	0,010	0,005	0,97	0,26	0,39	0,01		0,016	0,25	0,220
4	pod. plošča (C-Mn jeklo)	0,19	0,42	1,06	0,007	0,003	0,06	0,07	0,03			0,036	0,13	0,270
5	pod. plošča z nizkim P _{CM}	0,03	0,01	0,22	0,005	0,005	0,10	0,02	0,01			0,035	0,12	0,051



Slika 2: Y-preizkus pri jeklu Niomol 490K, izveden z elektrodo EVB NiMo pri sobni temperaturi. Razpokljivost v hladnem se je pojavila v varu.

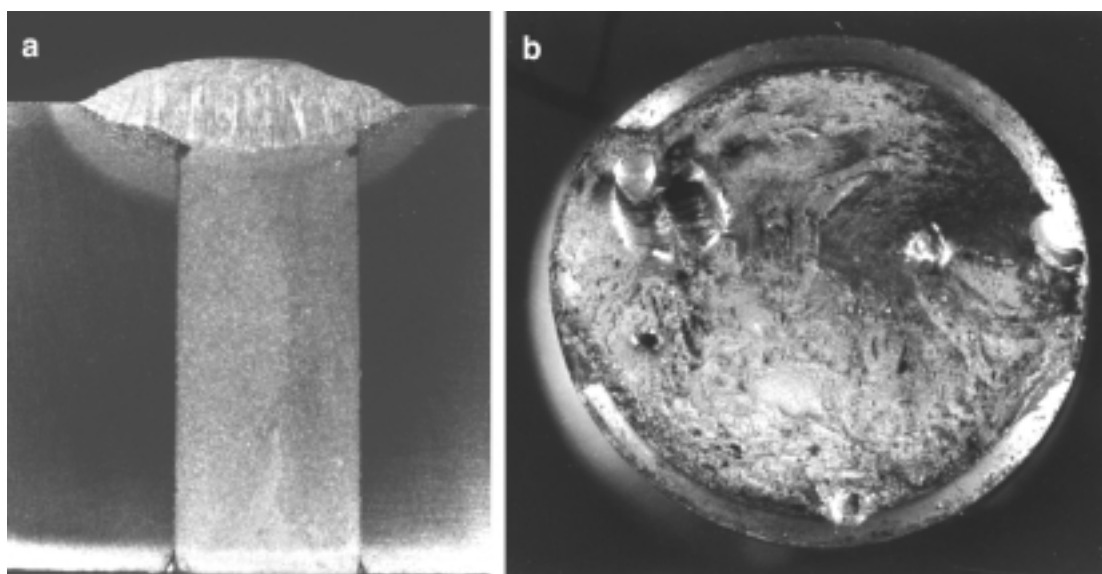
Figure 2: Y-test on the Niomol 490K steel executed with an EVB NiMo electrode at room temperature. Cold cracking appeared in the weld bead.

Vstavki so bili iz dejanskega večvarkovnega soležnega zvara, ki je bil narejen pri jeklu Niomol 490K z dodatnim materialom Filtub 128^{1,2}. Njuna kemična sestava je prikazana v tabeli 1 (vrstici 1 in 3). Mehanske lastnosti obeh materialov so prikazane v tabeli 2. Mehanske lastnosti materiala vstavka so precej višje od osnovnega materiala, zato je razumljivo, da je tudi njegov P_{CM} višji. Pri takšnem zvaru se lahko razpokljivost v hladnem pojavi le v varu, kar je pokazal Y-preizkus pri nekaj malega nižjem P_{CM} preizkusnega varka (vrstici 2 in 3 v tabeli 1).

Tabela 2: Mehanske lastnosti jekla Niomol 490K in večvarkovnega vara

Table 2: Mechanical properties of Niomol 490K steel and multipass weld metal

material	R _{p0.2}	R _m	A
	MPa	MPa	%
Niomol 490 K	560-613	661-673	25,3-26,3
večvarkovni var	717-747	753-777	19,0-23,0



Slika 3: Z navarkom pritrjen vstavek na podložno ploščo (a) in prelomna površina porušenega vstavka brez razpok (b)
Figure 3: Implant fastened using a bead on plate to the backing plate (a) and the fracture surface of an implant without any cold cracks (b)

Pri Y-preizkusu je preizkusni varek na koncu zaradi samovpetosti in velike togosti preizkušanca obremenjen do napetosti tečenja. Za potrditev rezultatov Y-preizkusa pri preizkusu z vstavkom smo raziskali, pri kateri temperaturi razpokljivost v hladnem ne nastane več, če je nominalna napetost v vstavku, tako kot pri Y-preizkusu, na sami meji tečenja.

4 REZULTATI IN RAZPRAVA

Tudi v predhodni raziskavi ³ so poskusili občutljivost večvarkovnega vara oceniti pri preizkusu z vstavkom. Uporabili so vstavek premera 8 mm s krožno zarezo. Podložna plošča je bila iz jekla C-Mn, ki je po standardu ⁵ primerno za tak preizkus. Kemična sestava podložne plošče je prikazana v **tabeli 1** (vrstica 4). P_{CM} takega jekla je znatno višji od vstavka (vrstici 3 in 4).

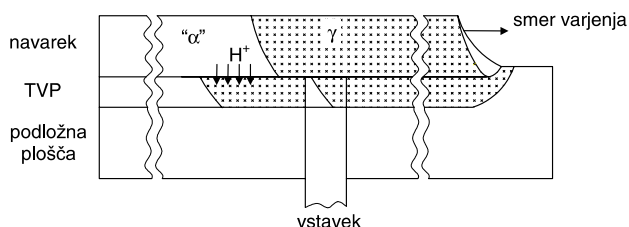
Za varjenje navarka je bila v ³ uporabljena oplaščena elektroda EVB NiMo z vsebnostjo vodika 3,5 ml/100 g vara. To je elektroda, uporabljena že pri Y-preizkusu, katerega rezultate smo hoteli v tej raziskavi potrditi ali pa ovreči. Po varjenju navarka so vstavek poskusili obremeniti do meje tečenja materiala vstavka. Izbrali so srednjo vrednost eksperimentalno določene meje tečenja obravnavanega večvarkovnega vara (**tabela 2**).

Pri enem delu preizkusov so se vstavki iztrgali iz navarka že med obremenjevanjem, tako da končna obremenitev sploh ni bila dosežena. To je bil dokaz, da so dejanske dimenzije in mehanske lastnosti navarka za potrebne napetosti (napetost tečenja materiala vstavka oziroma večvarkovnega vara) neustrezne. Velikost nosilnega preseka spoja vstavek-podložna plošča je odvisna od velikosti navarka in premera uporabljenega vstavka, njegove mehanske lastnosti pa so pri predpisanih varilnih parametrih odvisne od kemične sestave. Dimenzije

navarka so tudi funkcija predpisanih varilnih parametrov oziroma vnesene toplote na enoto dolžine ⁵. Dodatna težava pri korektni izvedbi tega varivostnega preizkusa je potrebna oddaljenost krožne zareze od čela vstavka. Uvar mora biti tolikšen, da se del zareze nahaja na področju, kjer se material pri varjenju navarka segreje skoraj do tališča (TVP na vstavku).

Pri drugem delu preizkusov, kjer se vstavki med obremenjevanjem niso iztrgali iz navarka, se je pokazalo, da porušitev ni posledica razpokljivosti v hladnem, ampak prevelike obremenitve (**slika 3**). To pa pomeni, da pri teh preizkusih vodik ni difundiral iz navarka v vstavek. Navarek se je torej s podložno ploščo tako močno nalegiral, da je bil P_{CM} navarka višji od vstavka. Zato je bil navarek avsteniten dlje kot material vstavka. Razmere so shematsko prikazane na **sliki 4**.

Zaradi težav pri preizkusih z vstavkom v predhodni raziskavi ³ smo pri tej uporabili vstavke premera 6 mm s spiralno zarezo. Ker je zaradi manjšega premera vstavka nosilni presek navarka večji, potrebna obremenitev pa

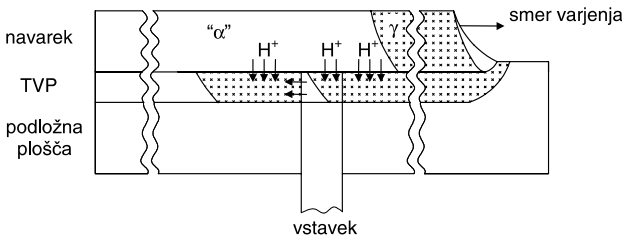


Slika 4: Skica vzdolžnega prereza preizkušanca z vstavkom z vrisanimi izotermami γ - α transformacije. P_{CM} podložne plošče je višji od navarka in vstavka. P_{CM} navarka je višji od vstavka.

Figure 4: Sketch of the implant-test longitudinal cross-section with marked isotherms of the γ - α transformation. The P_{CM} of the backing plate is higher than those of the bead on plate and the implant. The P_{CM} of the bead on plate is higher than that of the implant.

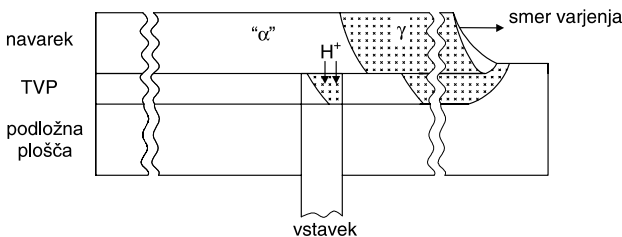
manjša, smo preprečili, da bi se vstavki iz navarka lahko iztrgali. Pri spiralni zarezi pa ni težav z uvarom pri varjenju navarka. Del spiralne zareze je bil vselej na pravem mestu. Za izdelavo navarka smo uporabili elektrodo EVB 50 z vsebnostjo vodika 3,86 ml/100 g vara, ki ima sicer nižjo trdnost od elektrode EVB NiMo, vendar pa tudi nižji P_{CM} . Pričakovali smo, da se z nalegiranjem od podložne plošče P_{CM} navarka ne bo mogel toliko zvišati, da bi bila preprečena difuzija vodika iz navarka v vstavek. Vendar pa je del vodika pri ohlajanju iz vstavka lahko z difuzijo prešel v TVP podložne plošče, saj je to zaradi sorazmerno nizkega P_{CM} vstavka obravnavanega večvarkovnega vara bistveno dalj časa avstenitno kot material vstavka. V najbolj obremenjenem delu vstavka se je tako zmanjšala koncentracija raztopljenega vodika, kar je preprečilo, da bi se pojavile razpoke. Razmere so shematsko prikazane na **sliki 5**.

Zato smo ukrepali še pri kvaliteti podložne plošče, kar je v standardu ⁵ v nekaterih primerih dovoljeno. Zaradi sorazmerno nizkega P_{CM} materiala vstavka smo si priskrbeli material z zelo nizkim P_{CM} (vrstica 5 v **tabeli 1**). Pri nalegiranju s to ploščo se P_{CM} navarka ne more zvišati, lahko se le zniža. Tako je P_{CM} vstavka zanesljivo višji od navarka in vodik lahko difundira iz navarka v najbolj segreti del vstavka. Hkrati pa ni več možnosti, da bi iz vstavka del vodika difundiral v TVP podložne



Slika 5: Skica vzdolžnega prereza preizkušanca z vstavkom z vrisanimi izotermami γ - α transformacije. P_{CM} podložne plošče je višji od navarka in vstavka. P_{CM} navarka je nižji od vstavka.

Figure 5: Sketch of the implant-test longitudinal cross-section with marked isotherms of the γ - α transformation. The P_{CM} of the backing plate is higher than those of the bead on plate and the implant. The P_{CM} of the bead on plate is lower than that of the implant.

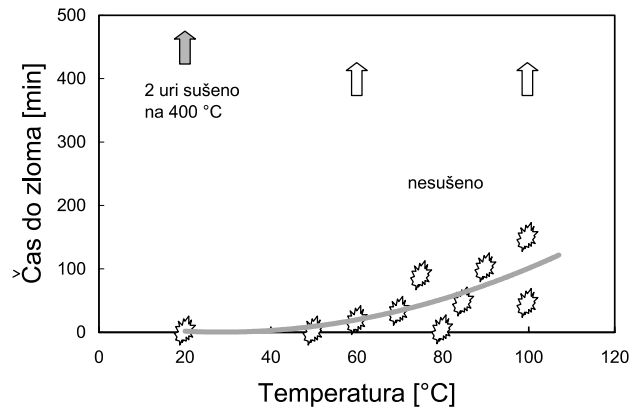


Slika 6: Skica vzdolžnega prereza preizkušanca z vstavkom z vrisanimi izotermami γ - α transformacije. P_{CM} podložne plošče je nižji od navarka in vstavka. P_{CM} navarka je višji od vstavka.

Figure 6: Sketch of the implant-test longitudinal cross-section with marked isotherms of the γ - α transformation. The P_{CM} of the backing plate is lower than those of the bead on plate and the implant. The P_{CM} of the bead on plate is higher than that of the implant.

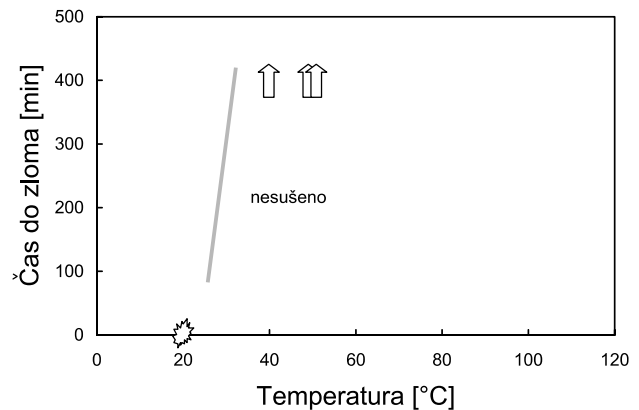
plošče, saj, ko se transformira material vstavka, ta ni več avsteniten. Razmere so shematsko prikazane na **sliki 6**.

Rezultati prvih opravljenih poskusov pri obremenitvi vstavkov na napetost tečenja večvarkovnega vara niso bili prav vspešni, čeprav so bile vse porušitve posledica razpokljivosti v hladnem (**slika 7**). Razsop rezultatov je zelo velik in temperature predgrevanja, ki bi ustrezala rezultatom Y-preizkusa ³, nismo mogli



Slika 7: Rezultati preizkusov z vstavkom pri obremenitvi na meji tečenja vstavka, ko je navarek narejen s sušeno elektrodo (vsebnost vodika <1 ml/100 g vara) in nesušeno (vsebnost vodika 3,86 ml/100 g vara). Preizkusi, pri katerih se ne pojavi razpokljivost v hladnem po 24 urah, so označeni s puščicami. Pri nesušeni elektrodi temperature predgrevanja ni mogoče eksaktno določiti.

Figure 7: The results of the implant-test by loading at the yield stress level of the implant material when the execution of the bead on plate is made with a dried electrode (hydrogen content <1 ml/100 g weld metal) and a nondried electrode (hydrogen content 3.86 ml/100 g weld metal). The tests when cold cracking did not appear after 24 hours are marked by arrows. Using nondried electrode preheating the temperature cannot be exactly determined.



Slika 8: Rezultati preizkusov z vstavkom pri obremenitvi na meji tečenja jekla Niomol 490K, ko je navarek narejen z nesušeno elektrodo (vsebnost vodika 3,86 ml/100 g vara). Temperatura predgrevanja je 40 °C, morda tudi nekaj manj. Puščice imajo enak pomen kot na **sliki 7**.

Figure 8: The results of the implant-test by loading at the yield stress level of the Niomol 490K steel when the execution of the bead on plate is made with a nondried electrode (hydrogen content 3.86 ml/100 g weld metal). The preheating temperature is 40 °C or a little lower. The meaning of the arrows is the same as in **Figure 7**.

opredeliti. Vzrok so dejanske lastnosti materiala večvarkovnega vara. Obremenitev smo namreč nastavili na povprečno mejo tečenja večvarkovnega vara. Očitno se meja tečenja od vstavka do vstavka precej razlikuje. Temperaturo predgrevanja pri preizkusih z vstavkom pri tako neenakomernih mehanskih lastnostih bi lahko enolično opredelili le pri obremenitvi, ki v nobenem primeru bistveno ne bi preseгла vsakokratne meje tečenja materiala.

Pri Y-preizkusu obremenitev preizkusnega varka zaradi samovpetosti preizkušanca dejansko ne more doseči meje tečenja obravnavanega večvarkovnega vara. Obremenitev oziroma napetost pri tem varivostnem preizkusu po ohladitvi je odvisna od najšibkejšega materiala v okolici preizkusnega varka. To so nevlivani osnovni material, vsi deli TVP in varek. Varek in TVP imata gotovo višjo mejo tečenja od termično nevlivnega jekla. Prvi ima takšno kemično sestavo, da je zaradi tega trdnjši, drugi pa je osnovni material, ki se je pri varjenju zakalil. Manj trden pa je lahko tisti del poboljšane jekla, ki pri varjenju varka ni segret nad temperaturo A_{c1} , ampak le nad temperaturo popuščanja jekla. Ker gre v primeru Y-preizkusa za enovarkovni termični vpliv na poboljšano jeklo, se zmeščanje materiala izrazi tudi pri obremenitvi varka. Ta je zato lahko celo nižja od meje tečenja osnovnega materiala.

Pri naslednjih preizkusih smo vstavke obremenili le do meje tečenja osnovnega materiala. Njegove dejanske mehanske lastnosti so navedene v tabeli 2. Rezultate, ki so prikazani na **sliki 8**, je moč enolično interpretirati. Potrebno predgrevanje je 40 °C ali celo nekaj manj. Ti rezultati se dobro skladajo z rezultati Y-preizkusa v poprej opravljeni raziskavi ³.

5 SKLEP

Pri obravnavanem varivostnem preizkusu vnesemo potreben vodik v navarek z varjenjem z oplaščeno elektrodo. Vodik mora imeti možnost difundirati v vstavek, ki je pri preizkusu napet zaradi zunanje obreme-

nitve. V pričujoči raziskavi je bila nominalna napetost vstavka na meji tečenja materiala, enkrat večvarkovnega vara, enkrat pa termično nevlivnega osnovnega materiala. Difuzija vodika iz navarka v vstavek je možna, če je P_{CM} vstavka višji od navarka. Za to je treba izbrati primerno elektrodo. Da ne bi vodik pri preizkusu difundiral iz vstavka v TVP podložne plošče, smo poskrbeli, da P_{CM} materiala plošče ni bil višji od vstavka. To pa je bila zaradi sorazmerno nizkega P_{CM} večvarkovnega varka precejšnja težava.

Eksperimentalno dobljena temperatura predgrevanja pri preizkusih z vstavkom, ko je ta obremenjen na napetost tečenja osnovnega materiala obravnavanega večvarkovnega zvara, se sklada s temperaturo predgrevanja, ki so jo dobili pri Y-preizkusu pri istem jeklu. Razlika v P_{CM} vstavka pri preizkusu z vstavkom in preizkusnega varka pri Y-preizkusu ni tolikšna, da bi bistveno vplivala na rezultat.

6 LITERATURA

- ¹ T. Vuherer: An analysis of the residual stresses with the special emphasis on repeated heat input and their measurement in butt-welded joints (in Slovene), Master's degree, Fakulteta za strojništvo, Maribor, 1999
- ² Z. Pučko: The influence of the vibrational stabilisation during and after welding on the properties of welded joints (in Slovene), Master's degree, Fakulteta za strojništvo, Maribor, 1999
- ³ B. Kranjc: The evaluation of welded joint performed in the high-strength steel Niomol 490K as regards cold cracking susceptibility (in Slovene), Bachelor's degree, Fakulteta za strojništvo, Maribor, 1998
- ⁴ Z. Praunseis, V. Gliha, I. Rak: Ocenitev občutljivosti na razpokljivost v hladnem pri varjenju visokotrnostnega jekla Niomol 490K, *Materiali in Tehnologije*, 34 (2000) 1-2, 27-30
- ⁵ NF A 89-100: Cold Cracking Test, Methods using implants, 1982
- ⁶ T. Vuherer, V. Gliha, A. Vaupotič: Implant strength of three structural carbon steels, *Materiali in tehnologije*, 37 (2003) 3-4, 199-203,
- ⁷ N. Yurioka: Test Results of Cold Cracking in Multi-Pass Weld Metal, IIW Doc. IX-1903-98, 1998
- ⁸ N. Yurioka: Predictive methods for prevention and control of hydrogen assisted cold cracking, IIW Doc. IX-1938-99, 1999