

## Primerjava lastnosti toplotno vplivanega področja večvarkovnega zvara na jeklu Nionical 70 pri dveh različnih vnosih toplote

### Comparison of Multirun Heat Affected Zone Properties on the Steel Nionical 70 for Two Different Heat Inputs

V. Gliha in D. Toplak, Tehnološko razvojni center, d.o.o. Maribor

*Analizirali smo nekatere lastnosti TVP v prehodu zvara, ki so pomembne za nosilnost realnih zvarnih spojev. Najvišja temperatura pri drugem termičnem ciklu je odločilna za lastnosti pri obeh vnosih toplote, posebno za udarno žilavost in trdnost (trdoto). Vpliv varilnih parametrov in načina izdelave zvara na dinamično trdnost ni tako izrazit.*

*Ključne besede: varjenje, termični cikel, toplotno vplivano področje - TVP, prehod zvara, žilavost, trdnost, utrujanje, inicial.*

*Some properties of HAZ at the weld toe important for the load carrying capacity of the real weld joints were analyzed. The peak temperature of the second thermal cycle is decisive for the properties of both heat inputs, especially impact toughness and strength (hardness). The influence of the welding parameters and weld built up on the fatigue strength is less pronounced.*

*Key words: welding, thermal cycle, heat affected zone - HAZ, weld toe, toughness, strength, fatigue, small flaw.*

#### 1 Uvod

Elemente nosilnih kovinskih konstrukcij in delovnih strojev je možno trdno, zanesljivo, hitro in sorazmerno poceni spojiti z varjenjem. Tudi kadar sta dodajni material in način varjenja namenu uporabe povsem ustrezno izbrana, zvarni spoji niso področja s homogenimi lastnostmi. Analize vzrokov nastalih okvar na teh objektih, ki navadno povzročijo večjo materialno škodo, ogrozijo pa tudi človeška življenja, kažejo, da so začetki lomov zvarnih spojev pogosti prav na prehodu zvara v osnovni material. Povzročitelji so:

- nehomogen material
- spremenjene lastnosti
- napetosti, ki niso posledica zunanjih obremenitev
- koncentracija napetosti zaradi oblike.

Omenjeni prehod se nahaja v s toploto vplivanemu področju (TVP) zvara. Med varjenjem je bil tu material segret tako visoko, da se to odraža tako na mikrostrukturi, kot lastnostih in včasih tudi na homogenosti. Nivo, do katerega je posamezna točka TVP segreta, je odvisen od njene oddaljenosti od vsakokratne linije topljenja. Nastala mikrostruktura in lastnosti so funkcija kemične sestave in stanja varjenega materiala ter celotnega termičnega vpliva. Tu se misli na dosežene najvišje temperature in na

hitrosti vsakokratnih ohlajanj. Termično delovanje varjenja na določene točke v TVP je odvisno od parametrov varjenja in načina izdelave spoja, termodinamskih lastnosti materiala ter oblike in debelin. Neenakomerno krčenje segretega materiala med ohlajanjem in fazne transformacije, še posebno, če so zaključene pri sorazmerno nizki temperaturi, so glavni vzrok za obstoj zaostalih napetosti. Koncentracija napetosti na prehodu pa je posledica večje debeline zvara v primerjavi z vgrajenim materialom.

Z uporabo metode končnih elementov (MKE) lahko numerično določimo termično delovanje v posameznih točkah v TVP. Tako dobljeni podatki omogočajo na simulatorju izdelati ustrezne mikrostrukture in jih eksperimentalno analizirati. Če lastnosti niso zadovoljive, se varilne parametre ali način izdelave zvara korigira. Možno pa je pristopiti tudi z druge strani: na simulatorju izdelamo vrsto verjetnih mikrostruktur, ki jih eksperimentalno analiziramo. Z MKE nato izračunamo kakšnim varilnim parametrom in načinu izdelave zvara izbrane lastnosti TVP ustrezajo.

V prispevku so prikazani rezultati podobnega pristopa pri varjenju domačega visokotrdnostnega konstrukcijskega jekla Nionical 70.

#### 2 Zvarni spoj in izdelava le-tega

Na sliki 1 je prikazan soležni zvarni spoj narejen s sedmimi

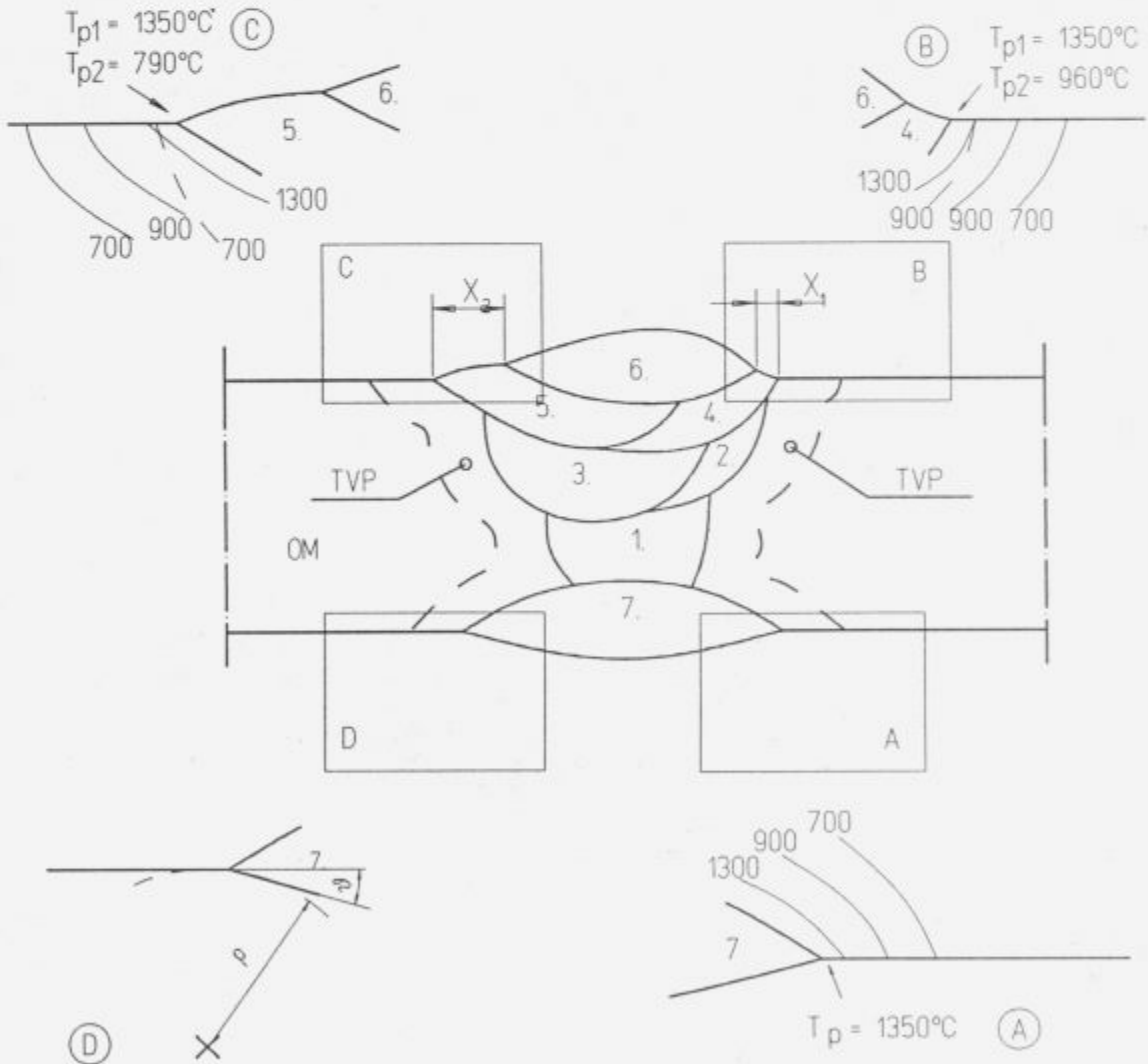
varki. Zadnji (št. 7) je zavarjen po žlebljenju korenskega varka (št. 1), s čimer se zagotovi največjo mogočo homogenost zvara tudi v korenu. Na temenski strani zvara pa je namen izvedbe varka št. 6 popraviti lastnosti grobozrnatega dela TVP v prehodu zvara v osnovni material. S toploto vplivani material na treh označenih prehodih A, B in C je med varjenjem tako deležen treh različnih termičnih delovanj:

- TVP na prehodu A je grobozrnato. Med izvedbo varka št. 7 je bilo segreto skoraj do tališča in zrna so se močno povečala
- TVP na prehodu B je po izvedenem prvem vplivnem varku (št. 4) grobozrnato. Temperatura pri drugem vplivnem varku (št. 6) je presegla  $900^{\circ}\text{C}$ , oziroma AC3 točko. Ta termični cikel bi naj že povzročil normalizacijo poprej grobozrnatega TVP.
- TVP na prehodu C je po prvem vplivnem varku (št. 5) grobozrnato. Temperatura pri drugem vplivnem varku (št. 6) ni presegla  $800^{\circ}\text{C}$ . Drugi termični cikel, ki je segrel grobozrnato področje TVP med AC1 in AC3 točko, je tako povzročil le delno spremembo.

Seveda lahko v prehodu zvara v osnovni material pride tudi do nekaj drugačnega vpliva drugega termičnega cikla na sprva grobozrnati del TVP. Ta se lahko segreje pod AC1 ali pa precej nad AC3 točko. To se zgodi, če vrednosti  $X_1$  in  $X_2$  na sliki 1, ki predstavljata toleranci, znotraj katerih naj bi se ta normalizacijski varek izvedel, nista predpisani optimalno. Običajna praksa predvideva variti od 1 do 3 ali 4 mm od prehoda zvara oziroma od linije topljenja.

Zvar na sliki 1 se ekonomično izdelava z avtomatskim postopkom varjenja v zaščiti praška. Varilni parametri so takšni, da je vnos toplote  $38,1 \text{ kJ cm}^{-1}$ , hitrost varjenja pa  $60 \text{ cm min}^{-1}$ . Izkoristek pri takšnem varjenju je skoraj 1.

Manj ekonomično se enak zvar izdelava z ročnim elektroobločnim varjenjem. Takrat so parametri varjenja in izkoristek drugačni, zato je vnos toplote nižji in sicer  $13,7 \text{ kJ cm}^{-1}$ . Hitrost varjenja je  $15 \text{ cm min}^{-1}$ . Seveda je treba zaradi manjšega vnosa toplote napraviti več varkov, vendar pa je postopek za normaliziranje grobozrnatega dela TVP enak.

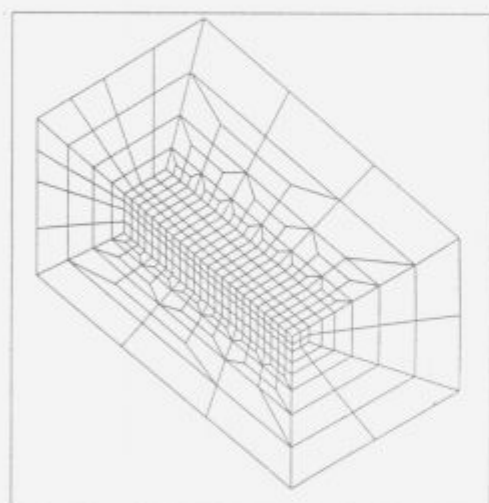


Slika 1. Zvarni spoj z različnim termičnim delovanjem varjenja v TVP na prehodih zvara v OM.

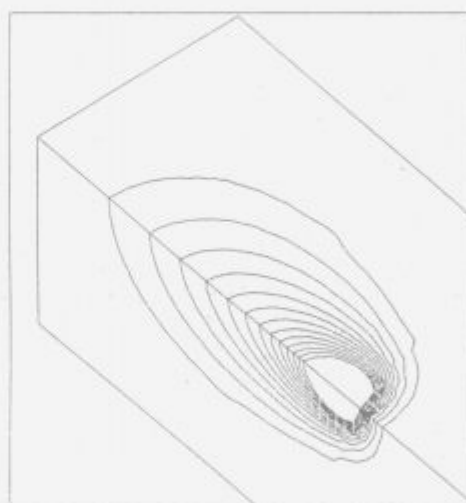
Figure 1. Weld joint and various thermal treatments of the HAZ at the weld toes.

### 3 Izračun termičnega delovanja varjenja

Da bi ugotovili, kako izvesti varjenje varka ali varkov, ki bodo vplivali na lastnosti grobozrnatega dela TVP v prehodu zvara v pozitivnem smislu, smo varjenje po obeh postopkih simulirali z uporabo MKE<sup>1</sup>. Primera uporabljene mreže in izračunanega poteka izoterm v nekem časovnem prerezu sta za ročno varjenje prikazana na **sliki 2**. Ker se izvor toplote (oblok) pri varjenju premika z znano hitrostjo, je za vsako točko v določeni oddaljenosti od linije topljenja mogoče izračunati njen celotni termični cikel. To so hitrost segrevanja, najvišja dosežena temperatura  $T_p$  in hitrost ohlajanja, ki jo okarakteriziramo s časom  $\Delta t_{8/5}$  v katerem se material ohladi od  $800^\circ$  do  $500^\circ\text{C}$ . Izračunan  $\Delta t_{8/5}$  je pri varjenju jekla debeline 30 mm za ročno varjenje 9 s, za avtomatsko varjenje v zaščiti praška pa 25 s. Na **sliki 3a** so za zadnji primer časovni poteki temperature na mestih, kjer le-ta doseže  $1100^\circ$ ,  $960^\circ$  in  $790^\circ\text{C}$ . Ta so od linije topljenja "normalizacijskega" varka oddaljene 2.23, 2.94 in 3.91 mm. V primeru ročnega varjenja so tolikšne  $T_p$  dosežene že pri oddaljenostih 1.53, 2.10 in 2.94 mm.



a)



b)

**Slika 2.** Simulacija varjenja z MKE za ročno varjenje a) mreža b) izoterme

**Figure 2.** Manual arc welding simulation by FEM. a) the mesh b) the isothermal lines

### 4 Material, preizkušanci in eksperimentalno delo

Raziskovalno delo je bilo opravljeno na domačem visokotrnostnem konstrukcijskem jeklu Nionical 70. Njegova kemična sestava v % je: 0.09 C, 0.27 Si, 0.30 Mn, 0.015 P, 0.010 S, 1.05 Cr, 0.045 Al, 2.63 Ni, 0.07 V, 0.026 Ti, 0.27 Mo. Meja plastičnosti je 688 MPa, trdnost 742 MPa, raztezek  $\delta_5$  20 %, udarna žilavost pri  $-50^\circ\text{C}$  pa 173 J. Vzorce za izdelavo sintetičnih mikrostruktur različnih področij TVP smo izrezali v smeri valjanja 30 mm debele pločevine tik pod površino. Vzorci, ki so služili za kasnejšo izdelavo preizkušancev za udarni preizkus so bili dimenzij  $11 \times 11 \times 55$ , tisti za utrujenostne preizkuse pa dimenzij  $15 \times 9 \times 70$ .

Na simulatorju termičnega cikla Smitweld smo na teh vzorcih izdelali serijo mikrostruktur za  $\Delta t_{8/5}$  9 in 25 s.

Spreminjali smo najvišjo doseženo temperaturo drugega termičnega cikla  $T_{p2}$ . Da je bila po prvem ciklu mikrostruktura za enak  $\Delta t_{8/5}$  zmeraj enako grobozrnata smo poskrbeli tako, da je  $T_{p1}$  bila vsakokrat med  $1350^\circ$  in  $1370^\circ\text{C}$ . Primer takšne simulacije je na **sliki 3b**.  $T_{p2}$  je približno  $790^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t_{8/5}$  pa 9 s, kar pomeni, da ustreza ta primer simulacije ročnemu varjenju.

Vzorci s sintetičnimi mikrostrukturami so služili za:

- meritev trdote
- meritev udarne žilavosti na preizkušancih z V zarezo
- meritev upogibne trajne in dinamične trdnosti na preizkušancih z okroglo zarezo.

Okrogla zareza je povzročala približno tolikšno koncentracijo napetosti, kot jo povzroči prehod realnega zvara (1,74). Ti preizkušanci so bili gladki in takšni z iniciali.

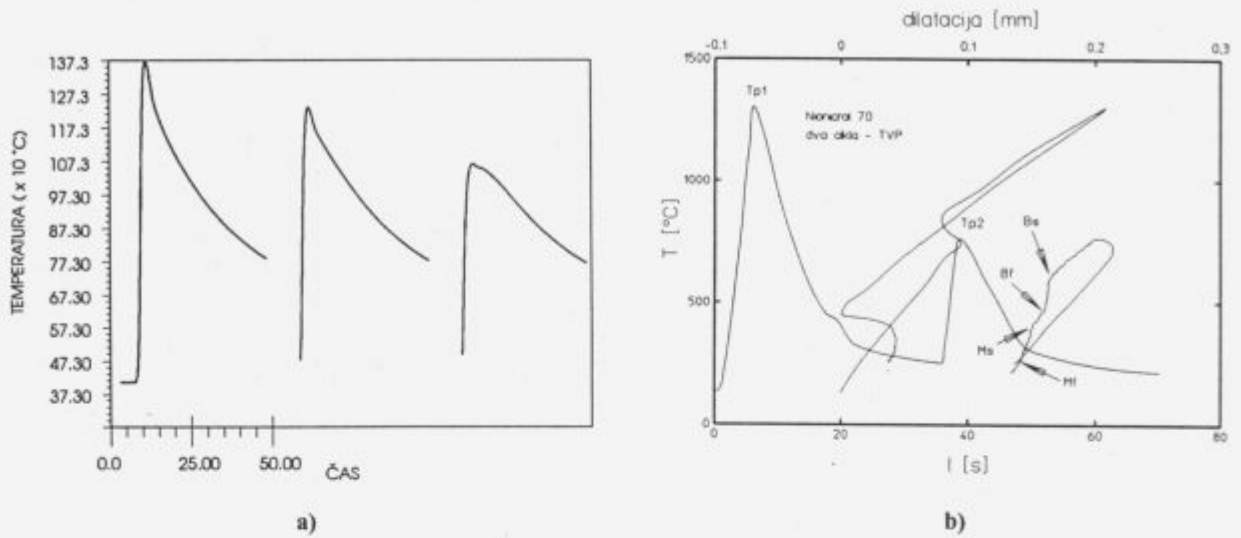
Koncentracije okoli 1,74 smo registrirali na realnih zvarnih spojih, narejenih z avtomatskim varjenjem v zaščiti praška<sup>2</sup>. Za njihov izračun je treba meriti natančne dimenzije

zvara kot celote in prehoda zvara. Pri izračunu so uporabljene znane empirične formule<sup>3</sup>. Pomembne dimenzije prehoda so kot  $\theta$  in radij  $\rho$  (**slika 1**, detajl D). Te podatke smo dobili z meritvami na silikonskih replikah prehodov realnih zvarov.

### 5 Rezultati

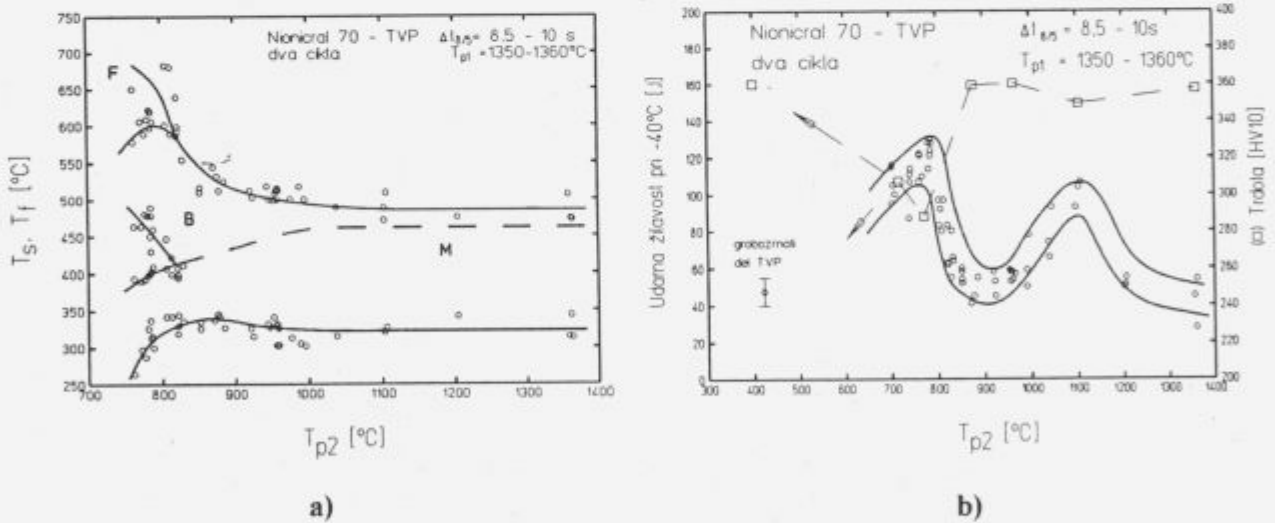
Rezultati metalografske analize mikrostruktur dvovarkovnega TVP ob liniji spajanja ter meritev udarne žilavosti pri  $-40^\circ\text{C}$  in trdote, v odvisnosti od  $T_{p2}$ , so za primer ročnega varjenja prikazani na **sliki 4**.

S **slike 4a** je razvidno, da je za visoke  $T_{p2}$  mikrostruktura večinoma martenzitna z majhnim deležem bainita. Ta delež je pri  $\Delta t_{8/5}$  9 s manjši kot pri 25 s. Pri nižjih  $T_{p2}$  se delež bainita povečuje. Ko se avstenitizira le del snovi, je mogoče



Slika 3. Termični cikli a) rezultati simulacije varjenja z MKE ( $T_p = 1100^\circ, 960^\circ, 790^\circ\text{C}$ ) b) primer izdelave mikrostrukture ( $T_{p1} \sim 1350^\circ\text{C}$ ,  $T_{p2} \sim 790^\circ\text{C}$ )

Figure 3. Thermal cycles a) the results of FEM simulation of welding ( $T_p = 1100^\circ, 960^\circ, 790^\circ\text{C}$ ) b) an example of microstructure making ( $T_{p1} \sim 1350^\circ\text{C}$ ,  $T_{p2} \sim 790^\circ\text{C}$ )



Slika 4. Vpliv dosežene temperature drugega cikla  $T_{p2}$  a) mikrostrukture (temperatura začetka in konca transformacij) b) žilavost in trdota

Figure 4. Influence of the peak temperature of the second cycle  $T_{p2}$ : a) the microstructure (start and finish transformation temperatures) b) the toughness and the hardness

registrirati tudi nekaj ferita. Temperaturi  $B_f$  in  $M_s$  se razmakneta. Delež martenzita je pri najnižjih  $T_{p2}$  za 25 s v primerjavi z 9 s že skoraj zanemarljiv.

Udarne žilavosti je bila merjena na standardnih preizkušancih. Na sliki 4b je izmerjena odvisnost le-te od  $T_{p2}$  za  $\Delta t_{8/5}$  9 s. Najbolj žilava mikrostruktura je pri  $T_{p2}$  okoli

$1100^\circ$  in malo pod  $800^\circ\text{C}$ . Pri  $900^\circ$  je žilavost za več kot 50 % nižja. Približno isto velja pri  $T_{p2}$  nad  $1350^\circ\text{C}$ . Odvisnost žilavosti od  $T_{p2}$  pri  $\Delta t_{8/5}$  25 s je podobna, le razlike niso tako velike.

Trdota je tudi odvisna od  $T_{p2}$ . Najnižja je tam, kjer je žilavost najboljša ( $800^\circ\text{C}$ ). Pri  $1100^\circ\text{C}$  je znižanje trdote

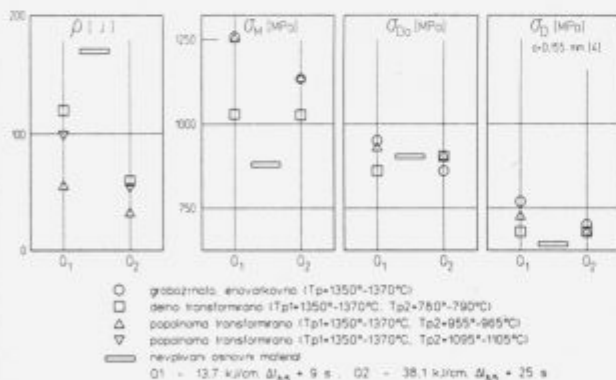
komaj zaznavno. Pri  $\Delta t_{8/5}$  25 s je odvisnost trdote od  $T_{p2}$  slična, le trdote so za 30-40 HV nižje.

Mikrostruktura enovarkovnega TVP ob liniji topljenja je skoraj povsem enaka kot tista pri  $T_{p2} = 1350^\circ\text{C}$ , le da je malo manj grobozrnata. Žilavost pri  $-40^\circ\text{C}$  in trdota takšnega TVP sta vnešeni na sliki 4b.

Nevplivani osnovni material ima popuščeno martenzito-bainitno mikrostrukturo. Žilavost pri  $-40^\circ\text{C}$  je 170 J, trdota pa 246 HV.

Dinamično trajno trdnost smo določili na preizkušancih dimenzij  $14,5 \times 8 \times 70$  z okroglo zarezo globine 3,2 mm in ostrino  $r=3,0$  mm. Obremenjevanje je bilo tritočkovno upogibno z razponom podpor 59 mm. Razmerje R med najnižjo in najvišjo napetostjo je bilo med 0,02 in 0,04. Eksperimente smo izvedli na resonančnem pulzirnem stroju Amsler v kontroli razpona obremenitve. Temperatura je bila sobna, frekvenca obremenjevanja pa 126-128 Hz. Površina zareze je bila brušena in glajena do hrupavosti le nekaj  $\mu$ . Vpliv "mikro" inicialov smo simulirali z odtisi po Vickersu v liniji, tako da so predstavljali linijski inicial dimenzije  $650-700 \mu \times 45 \mu$ . To ustreza efektivni dimenziji razpoke  $155 \mu$ .

Rezime vseh rezultatov za obravnavana načina varjenja je na sliki 5. Najprej je udarna žilavost  $\rho$ , sledijo pa trdnost  $\sigma_M$ , utripna upogibna trajna trdnost za gladke preizkušance  $\sigma_{D0}$  ter enaka trajna trdnost za preizkušance z "mikro" inicialom  $\sigma_D$ .  $\sigma_M$  je preračunana iz trdot.



Slika 5. Rezime izmerjene žilavosti, trdnosti (trdote) ter upogibne trajne dinamične trdnosti brez in z iniciali

Figure 5. Recapitulation of the measured values of the toughness, the strength (hardness) and the bending fatigue strength with and without small artificial flows.

## 6 Razprava

Žilavost nevplivanega osnovnega materiala se v prehodu zvara v varjeni material, ki sovпада s TVP tik ob liniji topljenja, močno zniža, trdota oziroma trdnost pa poviša. Ker je korelacija med lomno in udarno žilavostjo večja od nič, pomeni to manjšo velikost napak, ki se jih sme

tolerirati. Napake na tem mestu so seveda površinske, iz česar sledi, da so še bolj nevarne:

- površinske ravninske napake določene velikosti imajo s stališča mehanike loma skoraj dvakrat večji učinek, kot notranje
- tu pridejo do izraza tudi negativni vplivi okolja, kot so delovanje  $\text{H}_2\text{S}$ , korozija ipd

Tudi upogibne napetosti so največje natezne na eni od obeh površin, pri zvarnem spoju torej tudi v prehodu zvara. Poleg tega so napetosti zaradi koncentracije lokalno tu zvečane, zanemariti pa ne gre niti zaostalih napetosti, ki jih je potrebno seveda prišteti, saj te vselej spremljajo varjenje. Zaradi vsega tega moramo pri kontroli kvalitete zvarnih spojev posebno pozornost posvetiti homogenosti tega področja.

Tveganje je mogoče precej zmanjšati, če poskrbimo, da znižanje žilavosti in porast trdnosti nista prevelika. To je mogoče regulirati z načinom izdelave in z izbiro parametrov varjenja oziroma samega postopka varjenja. Kot vidimo na sliki 4b in podobnih<sup>1,5</sup>, je možno z izvedbo dodatnega varka žilavost popraviti, trdnost pa zmanjšati. Zanimivo je, da smo pri obravnavanem jeklu dobili še najmanjše izboljšanje pri  $T_{p2}$  okoli  $900^\circ\text{C}$ , ko se pri drugem termičnem ciklu vsa mikrostruktura za kratek čas v celoti austenitizira. Le delna austenitizacija in termični vpliv celo malce pod AC1 točko povzročita bistveno večje izboljšanje. Povečanje žilavosti za  $T_{p2}$  okoli  $1100^\circ\text{C}$  je očitno posledica popolne normalizacije poprej grobozrnatega dela TVP. Očitno je potreben določen čas zadrževanja na temperaturi austenitizacije, ki je pa pri realnem varjenju zelo kratek. Proces je pospešen, če je dosežena temperatura višja, ne pa previsoka.

Pri dinamičnih lastnostih prehoda zvara v osnovni material, kjer se pri utrujanju skoraj praviloma najprej pojavijo razpoke, ni videti, da bi se dalo veliko narediti s parametri varjenja. To velja tako za prehode, ki so v mikroskopskem smislu gladki, kot za tiste z iniciali na mikroravni. Ker je pglavitni razlog za nastanek razpok in njihovo začetno razširjanje koncentracija napetosti, je potrebno način izdelave zvara, predvsem pa uporabljen postopek, prilagoditi zmanjšanju le-te.

Zarezna občutljivost materiala je odvisna od njegove trdnosti in stanja<sup>6</sup>. Pri mehkih materialih je manjša kot pri trdih. Normalizirana jekla imajo nižjo zarežno občutljivost kot poboljšana. To nakazujejo tudi rezultati na sliki 5, ki prikazujejo  $\sigma_{D0}$ . Vrednost  $\sigma_{D0}$  za nevplivani osnovni material je pri enakih teoretičnih koncentracijah napetosti in bistveno nižji statični trdnosti v primerjavi z ostalimi (slika 5, ki prikazuje  $\sigma_M$ ) videti previsoka. Zato se ponuja misel, da bi bilo mogoče v prehodu zvara z reguliranjem trdnostnih lastnosti in stanja vplivati tudi na zapoznelost porajanja utrujenostnih razpok.

## 7 Zaključek

Celotno termično delovanje varjenja na varjeni material v prehodu zvara nima na vse lastnosti enakega vpliva. Tega je možno spreminjati z varilnimi parametri, ki vplivajo v prvi vrsti na hitrost ohlajanja  $\Delta t_{8/5}$ , in z oddaljenostjo drugega



vplivnega varka od prehoda zvara. Vendar pa je dejanski vpliv drugega termičnega cikla, ki je odvisen od najvišje dosežene temperature v prehodu zvara, odvisen tudi od materiala samega. Ker se zahtev po oddaljenosti linije topljenja drugega vplivnega varka od prehoda zvara v praksi ni možno prav natančno držati, poleg tega pa je ta odvisen tudi od vnosa toplote oziroma samega varilnega postopka, je dobro, če lastnosti niso močno odvisne od temperature  $T_{p2}$ , in da drugi cikel vpliva ugodno na lastnosti v širokem temperaturnem območju. Tudi to bi lahko bil eden od kriterijev za boljšo ali slabšo varivost materiala.

#### Reference

- <sup>1</sup> D. Toplak, V. Gliha: Toughness Prediction of Entire HAZ of Multi-Run Welded Joint, The International Conference on the Joining of Materials - JOM 6; Helsingör, 1993
- <sup>2</sup> V. Gliha, D. Toplak: Fatigue Strength of a Butt Welded HSLA Structural Steel with Backing, The Application of Fracture Mechanics to Life Estimation of Power Plant Components, Dubrovnik, 1989
- <sup>3</sup> K. Sakai in ostali: A Study on Fatigue Evaluation of A 5083 - 0/A5183 Stiffened Plate Structure, IIW - XIII - 1096/83.
- <sup>4</sup> Y. Murakami, M. Endo: Effects of Hardness and Crack Geometries on  $\Delta K_{th}$  of Small Cracks Emanating from Small Defects, The Behaviour of Short Fatigue Cracks (izdala K. J. Miller in E. R. de los Rios), 1986
- <sup>5</sup> V. Gliha, M. Taučer: Effects of Welding Parameters on Brittle Fracture Resistance of Heat Affected Zone, The International Conference on the Joining of Materials - JOM 6; Helsingör, 1993
- <sup>6</sup> R. E. Peterson: Stress Concentration Factors, John Wiley & Sons, 1974