

DINAMIČNA TRDNOST MATERIALA NA PREHODU TEMENA VARA PRI ZVARNEM SPOJU NA VISOKOTRDNEM KONSTRUKCIJSKEM JEKLU

FATIGUE STRENGTH OF A MATERIAL AT THE WELD TOE OF THE WELD JOINT ON A HIGH-STRENGTH STRUCTURAL STEEL

Vladimir Gliha

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

Prejem rokopisa - received: 2000-03-15; sprejem za objavo - accepted for publication: 2000-04-11

Pri zelo kakovostnih soležnih zvarnih spojih, ki so dinamično obremenjeni, nastanejo razpoke zaradi utrujenosti materiala zmeraj na prehodu temena vara v osnovni material, torej v TVP (toplotno vplivano področje) tik ob črti taljenja. Eksperimentalno delo je bilo opravljeno na vzorcih materiala TVP, ki so bili pripravljene s simulacijo termičnih razmer pri varjenju. Primerjali smo trajno dinamično trdnost materiala TVP v razmerah koncentriranih napetosti in hitrost ohlajanja pri varjenju varka, ki material najbolj segreje, ter zadnjega vplivnega varka. Trajno dinamično trdnost materiala na prehodu je mogoče oceniti na osnovi njegove trdote. Pri dvovarkovnih TVP sta trajna in statična trdnost odvisni od zadnjega termičnega vpliva, ki material na prehodu segreje nad temperaturo A_{c3} . To je mogoče uporabiti za izboljšanje dinamične nosilnosti zvarnih spojev, ki so varjeni produktivno.

Ključne besede: varjenje, soležni zvarni spoj, prehod temena vara, razpoke, utrujenost materiala, dinamična nosilnost, hitrost ohlajanja, prekrystalizacija, produktivno varjenje

With high-quality butt-welded joints that are dynamically loaded, cracks caused by material fatigue originate at the toe of weld that is in the HAZ (heat affected zone) adjacent to the fusion line. The experimental work was carried out on samples from the HAZ material prepared by the simulation of thermal conditions during welding. The endurance limit in the concentrated stress state was correlated with the cooling time of the thermally most intensive weld pass and the last one that affects microstructure. The weld-joint load-carrying capacity can be assessed by the use of hardness data. In the case of a double-cycle HAZ, the endurance limit and the static strength depend on the last thermal influence that reheats the material at the toe above the A_{c3} temperature. This can be successfully used for welded-joint load-carrying-capacity improvement in production.

Key words: welding, butt-welded joint, weld toe, fatigue crack, dynamic load-carrying capacity, cooling rate, recrystallization, productive welding

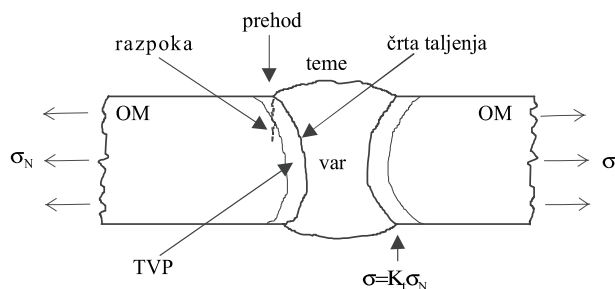
1 UVOD

Če so dinamične obremenitve večje od nosilnosti zvarnih spojev, se ti sčasoma porušijo. To velja tudi za najbolj kakovostne soležne zvarne spoje, v katerih sploh ni makroskopskih napak. Zaradi utrujenosti materiala nastanejo pri njih na prehodu temena vara v osnovni material majhne razpoke, ki se pod vplivom dinamičnih obremenitev širijo. Ko postanejo tako velike, da je medsebojni učinek razpok in napetosti večji, kot to prenese material, povzročijo zlom. Razpoke nastanejo na mestu, kjer so zaradi oblike vara napetosti zmeraj nekoliko koncentrirane, število mikronapak pa je zaradi varjenja povečano (slika 1).

Za porušitev zvarnega spoja je potemtakem ključen nastanek razpoke. Nivo dinamičnih napetosti, ki povzročijo nastanek razpoke zaradi utrujenosti materiala, mora biti višji od trajne dinamične trdnosti. Zato je nosilnost kakovostnih soležnih zvarnih spojev dejansko odvisna od trajne dinamične trdnosti materiala na prehodu temena vara v osnovni material v razmerah koncentriranih napetosti.

Ozek pas materiala vzdolž vara je s toploto vplivano področje (TVP). Tu je bil med izdelavo zvarnega spoja

osnovni material tako močno segret, da je njegova mikrostruktura sedaj drugačna kot prej. Ali se bodo pri dinamičnih obremenitvah na nekem nivoju iz obstoječih mikronapak na prehodu sploh razvile makrorazpoke, pa je odvisno od ovir za širjenje mikrorazpok.



Slika 1: Pri zelo kakovostnih soležnih zvarnih spojih nastane razpoka zaradi utrujenosti materiala zmeraj na prehodu temena vara v osnovni material (OM), kar je tik ob črti taljenja. Na tem mestu je TVP, kjer je zaradi varjenja število mikronapak močno povečano. Oblika temena vara je vzrok za zvišanje napetosti na prehodu

Figure 1: By high quality butt-welded joints the fatigue crack originates always at the toe of weld that is adjacent to the fusion line. There is HAZ where the number of micro-defects is much higher due to the welding. The consequence of the shape of weld profile is higher stress level at the toe

Kristalne meje polikristalnih kovinskih materialov so ena od mikrostrukturnih ovir za začetno širjenje mikro-raspok zaradi utrujenosti materiala. Za material TVP tik ob črti taljenja, ki se nahaja na prehodu temena vara v osnovni material, je značilno, da je bil med izdelavo zvarnega spoja vsaj enkrat segret skoraj do tališča. Pri tako visoki temperaturi pa so kristalna zrna nekaj časa rasla, zaradi česar je to grobozrnato TVP. Velikost zrn v grobozrnatem TVP je odvisna od kemične sestave in izhodne mikrostrukture varjenega materiala ter od parametrov varjenja in načina gradnje vara. Ker so lastnosti kovinskih materialov funkcija mikrostrukture, je pričakovati, da bo tako tudi z dinamično trdnostjo materiala na prehodu temena vara v osnovni material.

V tem prispevku so prikazani rezultati eksperimentalnega študija lastnosti materiala dinamično najšibkejšega člena kakovostnih večvarkovnih soležnih zvarnih spojev na visoko trdnem konstrukcijskem jeklu nionicral 70. To so lastnosti, ki so pomembne za dinamično nosilnost takšnih zvarnih spojev v primeru, ko lahko vpliv mikronapak, nastalih zaradi varjenja, zanemarimo.

2 EKSPERIMENTALNO DELO

Vzorci materiala TVP, ki ga v zvarnem spoju najdemo tik ob črti taljenja, smo pripravili v laboratorijskih razmerah s simulacijo termičnega vpliva varjenja na varjeni material. Za to smo uporabili računalniško voden simulator termičnega cikla. Tako smo dobili dovolj velike vzorce relevantnega materiala TVP, iz katerih je bilo mogoče izdelati preizkušance. Za simulacijo termičnih razmer pri izdelavi zvarnega spoja na določenem materialu pa moramo vedeti, kaj vpliva na potek termičnih ciklov, ki so posledica varjenja posameznih varkov, in kako.

2.1 Termični vpliv izdelave zvarnega spoja

Termični cikel pri varjenju nekega varka opišemo s hitrostjo naraščanja temperature pri segrevanju, z najvišjo doseženo temperaturo in s hitrostjo upadanja temperature pri ohlajanju¹:

Segrevanje

Pri varjenju je hitrost segrevanja materiala, ki bo po varjenju tik ob varku, zelo velika, ponavadi več kot 200 K/s. Nekoliko manjša je v primeru zelo velikih vnosov toplote in pa na večji oddaljenosti od varka².

Najvišja temperatura

Med približevanjem vira toplote neki točki v varjenem materialu se ta segreje do najvišje temperature termičnega cikla T_p . To temperaturo je mogoče analitično določiti ob predpostavki, da je vnašanje toplote v material pri varjenju točkovno in enakomerno³. Ker je v odvisnosti od debeline varjenih plošč odvod

toplote iz točke, kjer se vnaša toplota, lahko ravninski (2D) ali pa prostorski (3D), sta možni dve rešitvi:

$$T_p(r) - T_0 = \begin{cases} \frac{q}{\sqrt{2\pi\rho c_v d}} \cdot \frac{1}{r}; & 2D \\ \frac{2q}{\pi\rho c_v} \cdot \frac{1}{r^2}; & 3D \end{cases} \quad (1)$$

$T_p(r)$ je najvišja temperatura termičnega cikla v tistih točkah, ki so za r oddaljene od črte, po kateri vir toplote potuje s konstantno hitrostjo. T_0 je temperatura materiala pred varjenjem. Z virom toplote vnašamo v časovni enoti točno določeno količino energije. Pri znani hitrosti varjenja je količina toplote na enoto dolžine varka konstantna. To je specifični vnos toplote $q = \eta \times P / v$, pri čemer je P moč vira, v hitrost varjenja, η pa toplotni izkoristek. Konstanti ρ in c_v sta gostota in specifična toplota varjenega materiala, d pa njegova debelina. Enačba 1 velja za varjenje tankih, enačba 2 pa za varjenje debelih plošč. Pri točkovnem vnašanju toplote je čas, ko je material segret na temperaturo T_p , zelo kratek.

Ohlajanje

Takoj, ko je pri varjenju dosežena najvišja temperatura T_p , se prične ohlajanje. Takrat je časovna odvisnost temperature v točki r takšna:

$$T(r,t) - T_0 = \begin{cases} \frac{q}{\sqrt{4\pi\rho c_v \lambda t d}} \cdot e^{-\frac{r^2}{4Dt}}; & 2D \\ \frac{q}{2\pi\lambda} \cdot e^{-\frac{r^2}{4Dt}}; & 3D \end{cases} \quad (3)$$

t je čas. Konstanti λ in D sta toplotna prevodnost in difuzivnost materiala. Če nista odvisni od temperature, lahko s tema dvema enačbama izračunamo parameter, ki je ključen za izoblikovano mikrostrukturo v neki točki TVP. Pri jeklih je to $\Delta t_{8/5}$, čas ohlajanja skozi temperaturni pas 800 - 500 °C.

$$\Delta t_{8/5} = \begin{cases} \frac{q^2}{4\pi\rho c_v \lambda d^2} \cdot \left(\frac{1}{(500 - T_0)^2} - \frac{1}{(800 - T_0)^2} \right); & 2D \\ \frac{q}{2\pi\lambda} \cdot \left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right); & 3D \end{cases} \quad (5)$$

Da je tako izračunana velikost $\Delta t_{8/5}$ uporabna pri simulaciji termičnih razmer pri varjenju, je treba poznati za λ in c_v povprečne vrednosti med 800 in 500 °C.

Z izenačitvijo izrazov v enačbah 5 in 6 dobimo debelino varjenega materiala, pri kateri sta hitrosti ohlajanja pri 2D in 3D rešitvi enaki:

$$d_{2/3} = \sqrt{\frac{q}{2\rho c_v} \cdot \left(\frac{1}{500 - T_0} + \frac{1}{800 - T_0} \right)} \quad (7)$$

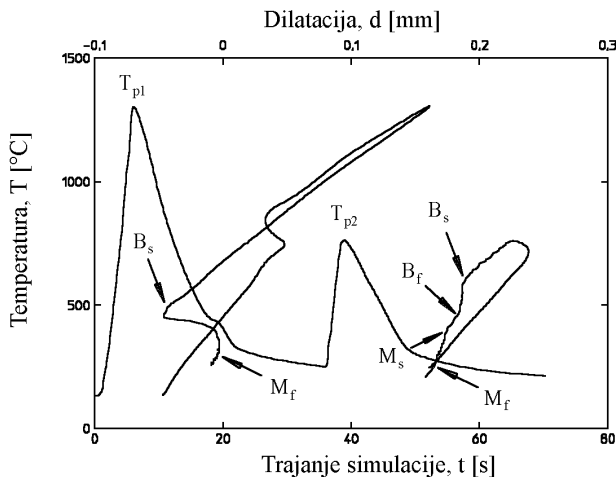
Mejna debelina $d_{2/3}$ je torej odvisna od začetne temperature varjenja in od lastnosti materiala ter od

specifičnega vnosa toplote. Pri varjenju jekel je $d_{2/3}$ velikostnega reda 20-30 mm.

Pri večvarkovnih zvarnih spojih je celotni termični vpliv izdelave zvarnega spoja v neki točki zaporedje več posameznih vplivov. Vrstni red teh vplivov pri simulaciji mora biti takšen, kot pri dejanski izdelavi zvarnih spojev. Termičnih vplivov, ki na lastnosti materiala TVP ne delujejo, sploh ne izvedemo. Prvi je zmeraj vpliv varjenja najbližjega varka, pri katerem se material tik ob črti taljenja segreje skoraj do tališča. Nato sledijo vplivi varjenja naslednjih, bolj oddaljenih varkov, katerih intenzivnost oziroma najvišja dosežena temperatura je nižja od prvega varka. **Slika 2** ilustrira simulacijo termičnega vpliva tik ob črti taljenja pri varjenju dveh zaporednih varkov z enakima specifičnima vnosoma toplote, ki je narejena na simulatorju termičnega cikla.

2.2 Osnovni material in material TVP

Pri eksperimentalnem delu smo uporabili 30 mm debelo poboljšano visoko trdno konstrukcijsko jeklo nionicral 70. Njegova kemična sestava je: 0,09 C, 0,27 Si, 0,30 Mn, 0,015 P, 0,010 S, 1,05 Cr, 0,27 Mo, 2,63 Ni, 0,07 V, 0,045 Al, 0,026 Ti, mehanske lastnosti pa: $R_{p0,2}=713$ MPa, $R_m=764$ MPa, $C_{v-50^\circ\text{C}}=170$ J. Mikrostruktura je iz popuščene martenzita z majhnim deležem bainita. Velikost zrn je približno 22 μm .



Slika 2: Simulacija termičnih pogojev tik ob črti taljenja pri izdelavi večvarkovnega zvarnega spoja, ko so lastnosti TVP odvisne od dveh varkov. Pri prvem termičnem ciklu je T_{p1} presegla temperaturo 1350 °C, pri drugem pa je temperatura T_{p2} dosegla 780 °C. Oba varka sta varjena z enakima specifičnima vnosoma toplote, zato je hitrost ohlajanja obakrat enaka ($\Delta t_{8/5}=25$ s). Med simulacijo sta ugotovljeni dilatatski krivulji, katerih analiza omogoča konstrukcijo CCT-diagrama materiala TVP (slika 5)

Figure 2: Simulation of thermal conditions adjacent to the fusion line during multi-pass weld joint execution when properties of HAZ depend on two weld passes. During the first thermal cycle temperature T_{p1} exceeded 1350 °C, while during the second one T_{p2} attained 780 °C. Specific heat input of both weld passes is the same and so the cooling time ($\Delta t_{8/5}=25$ s). During the simulation the dilatometric curves are detected. Their analysis enables to design CCT diagram of HAZ material (see figure 5)

S simulacijo termičnih razmer med varjenjem smo pripravili tri tipe materiala TVP, ki bi jih bilo mogoče pri soležnih zvarnih spojih najti na prehodu temena vara. To so grobozrnato TVP, ki nastane pod vplivom varjenja enega samega varka in dve dvovarkovni TVP, ki nastane pod vplivom dveh varkov. Prvi od obeh dvovarkovnih TVP je posledica varjenja obeh varkov z enakima, drugi pa z različnima vnosoma toplote. Bolj produktivno je variti z velikimi specifičnimi vnosi toplote, ker so izdelovalni časi zvarnih spojev tako krajši. Pri dvovarkovnem TVP z različnima vnosoma je bil pri prvem varku vnos toplote zelo velik, pri drugem pa majhen.

1. Grobozrnato TVP

Tak material nastane na prehodu pod vplivom varjenja enega samega varka. Za njegovo pripravo smo vzorec jekla v dobavljenem stanju segreli s hitrostjo 200 K/s skoraj do tališča ($T_p>1350$ °C), nato pa takoj ohladili v skladu z enačbo 4. Izbrani časi $\Delta t_{8/5}$ so bili 5, 9, 25 in 100 s. Tak termični vpliv na varjeni material je prikazan na **sliki 2** kot prvi od obeh termičnih ciklov.

2. Dvovarkovno TVP, ko sta vnosa toplote enaka

Vzorec jekla v dobavljenem stanju smo najprej hitro segreli skoraj do tališča ($T_p>1350$ °C) in nato ohladili. Takšni so termični pogoji na prehodu temena vara pri varjenju prvega varka, ko se izoblikuje mikrostruktura grobozrnatega TVP. Nato smo simulirali termične razmere na istem mestu pri varjenju naslednjega varka. Najvišja temperatura tega termičnega cikla je odvisna od oddaljenosti (enačba 2). Pri varjenju z enakima vnosoma toplote sta tudi časa $\Delta t_{8/5}$ enaka. Simulirali smo razmere, ki ustrezajo ohlajanju s časi $\Delta t_{8/5}=9$ in 25 s. Najvišja temperatura drugega termičnega cikla T_{p2} je bila 780 °C (med temperaturo jekla Ac_1 in Ac_3) in pa 960 °C (nekoliko nad Ac_3). Ena od teh simulacij ($\Delta t_{8/5}=25$ s, $T_{p2}=780$ °C) je prikazana na **sliki 2**.

3. Dvovarkovno TVP, ko sta vnosa toplote različna

Vzorec jekla v dobavljenem stanju smo najprej segreli skoraj do tališča ($T_p>1350$ °C) in nato ohladili tako, da je bil $\Delta t_{8/5}=100$ s. Pri tem se je izoblikovala mikrostruktura grobozrnatega TVP pri zelo produktivnem varjenju. Nato smo simulirali termične razmere na istem mestu pri varjenju naslednjega varka z mnogo manjšim specifičnim vnosom toplote kot pri prvem. Zaradi tega termičnega vpliva se material poprej grobozrnatega TVP ohladi bistveno hitreje kot prvič (enačba 6). Najboljše rezultate smo pričakovali pri $\Delta t_{8/5}=9$ s⁴. Najvišja temperatura termičnega cikla, ki je posledica varjenja drugega varka z relativno majhnim vnosom toplote, je bila 780 °C (med Ac_1 in Ac_3) in 1100 °C (veliko nad Ac_3).

2.3 Preizkušanci in preizkusi

Iz vzorcev materiala TVP, ki smo ga pripravili s simulacijo termičnih razmer med varjenjem, smo izdelali

metalografske obruse ter natezne trgalne preizkušance za merjenje osnovnih mehanskih lastnosti in upogibne preizkušance za merjenje trajne dinamične trdnosti v razmerah koncentriranih napetosti. Na simulatorju termičnega cikla se vzorce materiala segreva elektro-uporovno, kontrolirano ohlaja pa z vodno hlajenimi čeljustmi. Zato se da doseči varjenju ustrezne termične razmere le na sredini vzorca. To smo morali pri obliki preizkušancev upoštevati:

Metalografski obrusi

Rabili so nam za oceno mikrostrukture ter za meritev trdote in velikosti primarnega zrna.

Trgalni preizkušanci

Izdelali smo jih v obliki peščene ure. Takšna oblika ima za posledico največje napetosti prav na mestu, kjer je s simulacijo pripravljen material TVP. Med računalniško vodenim kvazistatičnim obremenjevanjem preizkušancev do porušitve pri sobni temperaturi smo poleg obremenitve merili na najožjem mestu tudi obseg preizkušancev. Spremembo obsega smo sproti preračunavali v ustrezno velikost deformacije. Tako smo eksperimentalno pripravili diagrame σ - ϵ , ki so nam rabili za določitev mehanskih lastnosti⁵.

Upogibni dinamični preizkušanci

Trajno dinamično trdnost materiala TVP smo eksperimentalno določili na tritočkovno upogibno obremenjevanih preizkušancih z žlebom (slika 3). Preizkušance smo obremenjevali pri sobni temperaturi utripno (razpon obremenitve ΔF je bil $2F_0$) s frekvenco 115 Hz. Zaradi upogibne obremenitve, predvsem pa zaradi koncentracije napetosti, ki jo povzroča žleb, so napetosti največje na dnu žleba, kjer je bil s simulacijo pripravljen material TVP. Posamezne preizkušance smo obremenili 2×10^6 -krat. Če nastanka makroskopske razpoke v tem času

nismo ugotovili, smo pri naslednjem preizkušancu obremenitev povečali. Ker se je material na dnu žleba v začetku obremenjevanja nekoliko plastično deformiral, značaj napetosti na mestu, kjer so nastale razpoke, ni bil utripen. Nominalno upogibno trajno dinamično trdnost materiala TVP ($\Delta\sigma_N|_{R<0}$) smo izračunali iz največjega razpona obremenitve ΔF_{max} , pri katerem se po 2×10^6 obremenitvah makroskopska razpoka še ni pojavila. R je pri tem razmerje med najmanjšo in največjo napetostjo:

$$\Delta\sigma_N|_{R<0} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\Delta F_{max} \cdot s}{B \cdot (W - a)^2} \tag{8}$$

Dimenzije preizkušancev (B , W , s) in žleba (a , ρ) so izbrane tako (slika 3), da je bil faktor koncentracije napetosti $K_t=1,74$ ^{6,7}. Toliko smo namreč z metodo replike izmerili na prehodih temena vara v osnovni material pri soležnih zvarnih spojih⁸. Površino materiala na dnu žleba smo dobro spolirali, tako da se dobljeni rezultati v zvezi z lastnostmi materiala brez površinskih mikronapak.

Pri izračunu trajne dinamične trdnosti materiala TVP na dnu žleba smo morali upoštevati velikost zareznega faktorja materiala pri utrujanju K_f .

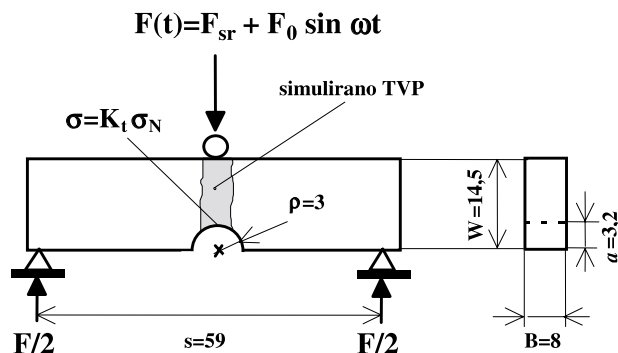
$$\Delta\sigma_d|_{R<0} = K_f \cdot \Delta\sigma_N|_{R<0} \tag{9}$$

K_f je odvisen od trdnosti materiala na mestu, kjer nastane zaradi utrujenosti materiala razpoke, in od ostrine žleba⁶. Zaradi vpliva lastnosti materiala je bil K_f za vsak preizkušanec drugačen.

Ker nominalna trajna dinamična trdnost materiala, ki je izračunana po enačbi 9, ni ustrezala utripnemu značaju napetosti, smo dobljene rezultate morali poenotiti. Uporabili smo Goodmanov model odvisnosti dinamične trdnosti kovin od srednje vrednosti napetosti in rezultate preračunali na $R=0$ ⁹.

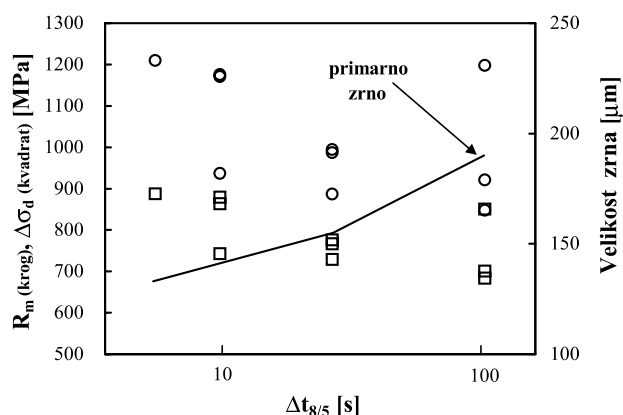
3 REZULTATI IN KOMENTAR

Na sliki 4 so prikazani rezultati merjenja statične trdnosti⁸, trajne dinamične trdnosti in velikosti primarnega zrna vseh obravnavanih materialov TVP, ki so nanoseni glede na velikost časa $\Delta t_{8/5}$ pri varjenju najbližjega, termično torej najbolj vplivnega varka. Ta je pri ohlajanju 2D kvadratna, pri 3D pa linearna funkcija specifičnega vnosa toplote q (enačbi 5 in 6). Če bi na absciso nanosili q namesto $\Delta t_{8/5}$, bi bila ta slika pri ohlajanju 3D enaka, pri 2D pa le malo drugačna. Velikost primarnega zrna po pričakovanju monotono narašča z naraščajočo količino vnesene toplote tistega varka, pri katerem se material na prehodu nabolj segreje. Korelacija $\Delta t_{8/5}$ z merskimi točkami ene in druge trdnosti pa ni dobra. Podrobnejša analiza pokaže, da so za to krivi dvovarkovni TVP, ko oba vnosa toplote nista enaka in/ali, ko pri varjenju drugega varka predhodni enovarkovni grobozrnati TVP ni segret nad Ac_3 , temveč med temperaturo Ac_1 in Ac_3 .



Slika 3: Preizkušanec za eksperimentalno določevanje trajne dinamične trdnosti materiala na prehodu temena vara v osnovni material. Žleb povzroča koncentracijo napetosti v materialu TVP, ki je približno tako velika kot na prehodu temena vara v osnovni material soležnih zvarnih spojev.

Figure 3: Specimen for the experimental determination of the endurance limit of material at the toe of weld. The groove causes stress concentration in the HAZ material that is approximately as high as at the toe of butt-weld joints.



Slika 4: Rezultati meritev statične (R_m) in trajne dinamične trdnosti ($\Delta\sigma_d$) ter velikosti primarnega zrna z ozirom na čas $\Delta t_{8/5}$. Ta se nanaša na varek, ki je material na prehodu najbolj segrel. Primarno zrno materiala TVP je tu tem bolj grobo, čim večji je $\Delta t_{8/5}$. Korelacija $\Delta t_{8/5}$ s trdnostjo je slaba

Figure 4: The results of static strength (R_m), endurance limit ($\Delta\sigma_d$) and primary gamma grain size measurement in relation to cooling time $\Delta t_{8/5}$. It is related to the weld pass that reheat the material at the weld toe to the highest temperature. Primary gamma grain of HAZ is as coarser as higher $\Delta t_{8/5}$. The correlation of $\Delta t_{8/5}$ with strength is bad

Stopnja povečanja primarnega zrna tik ob črti taljenja je torej odvisna od termično najvplivnejšega (najbližjega) varka, ko se material med izdelavo zvarnega spoja najbolj segreje. To je zmeraj prvi varek, pa naj je varjen z večjim ali pa z enakim vnosom toplote kot drugi. Kadar najvišja temperatura drugega termičnega cikla preseže temperaturo Ac_3 materiala, se to manifestira v popolni prekrystalizaciji prejšnjega grobozrnatega TVP. Na velikost primarnega zrna pa ta termični cikel navadno ne vpliva, saj je zaradi večje oddaljenosti najvišja dosežena temperatura precej nižja od tališča materiala.

Zaradi spremenjene mikrostrukture prekrystaliziranega materiala nastalega TVP sta tako statična kot dinamična trdnost spremenjeni. To se izraža tudi pri rezultatih, ki so prikazani na **sliki 5**.

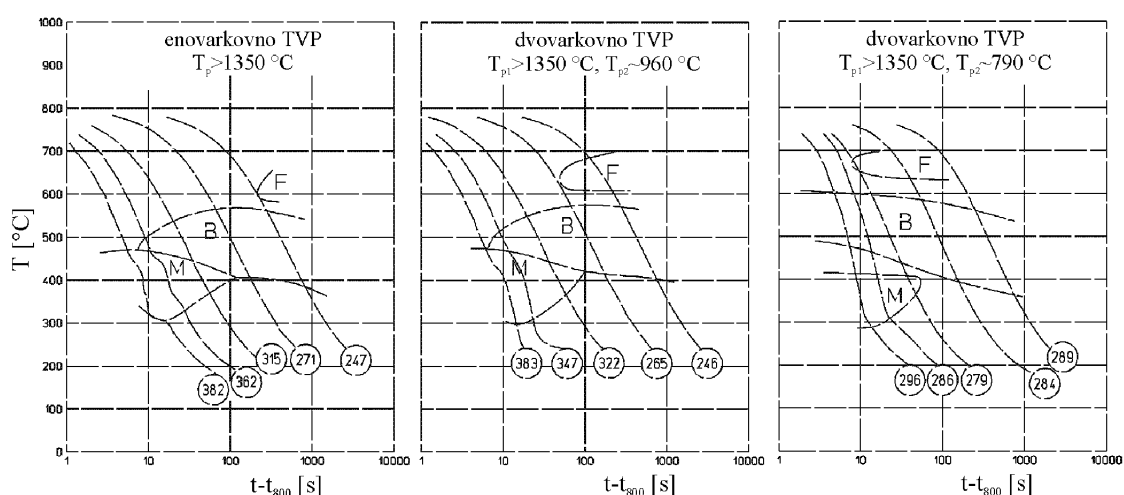
Vsi trije CCT-diagrami na tej sliki ustrezajo varilnim razmeram. Konstruirani so na osnovi podatkov, dobljenih pri analizi dilatacijskih krivulj, ki smo jih ugotovili med simulacijo termičnih razmer pri varjenju. Za vsako krivuljo ohlajanja so podane trdote nastalega materiala. Vrisane krivulje ohlajanja in trdote ustrezajo enakim časom ohlajanja, in sicer $\Delta t_{8/5}=5, 9, 25, 100$ in 400 s.

Pri nastanku enovarkovnega grobozrnatega TVP (prvi CCT-diagram) se osnovni material zaradi varjenja najprej transformira v avstenit in nato segreje skoraj do tališča. Izoblikovana mikrostruktura po ohladitvi je odvisna od hitrosti ohlajanja. Najtrši je martenzit. Njegova trdota je odvisna samo od ogljika. Trdota materiala enovarkovnega grobozrnatega TVP se s večanjem deleža bainita nato zmanjšuje. Pri še počasnejšem ohlajanju pa se na račun bainita prične povečevati delež še mehkejšega ferita, pri čemer pa je preostali bainit še nekoliko trši.

Pri varjenju drugega varka se izhodni material grobozrnatega TVP lahko segreje nad Ac_3 , med Ac_1 in Ac_3 ali pa celo pod temperaturo Ac_1 .

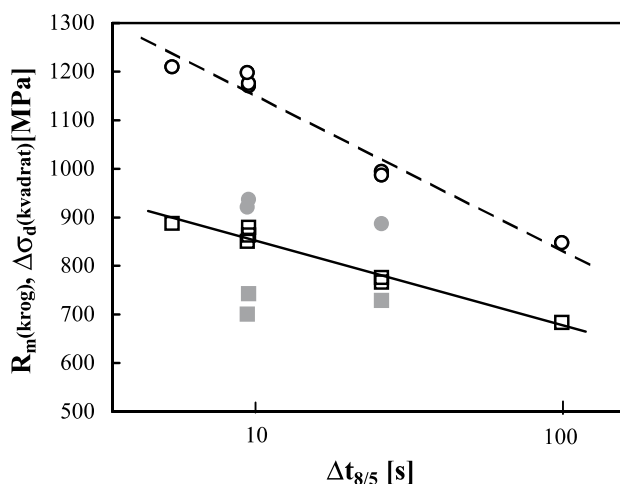
1. $T_{p2} > Ac_3$

Avstenitizacija izhodnega grobozrnatega materiala TVP je popolna in novo nastali TVP je popolnoma prekrystaliziran. V primerjavi z enovarkovnim grobozrnatim TVP je začetek izoblikovanja mehkejših mikrostrukturnih sestavin pomaknjen k malo krajšim časom ohlajanja, vendar pa pri ohlajanju s temperature $T_{p2}=960$ °C razlike še niso velike (drugi CCT-diagram).



Slika 5: Z analizo dilatacijskih krivulj pri simulaciji termičnih razmer pri varjenju dobimo CCT-diagrame za material TVP ob črti taljenja, ki je segret in ohlajan pod varilnimi pogoji. Posledica segretja nad temperaturo Ac_3 je popolna, med Ac_3 in Ac_1 pa delna prekrystalizacija izhodnega materiala. Podatki o trdoti so v HV10

Figure 5: Analysis of dilatometric curves during the simulation of thermal conditions by welding gives CCT diagrams of HAZ material adjacent to the weld fusion line that is heated and cooled under welding conditions. The result of heating over Ac_3 temperature is complete recrystallization while between Ac_1 and Ac_3 partial recrystallization of former material. Hardness is measured in HV10



Slika 6: Rezultati meritev statične (R_m) in trajne dinamične trdnosti ($\Delta\sigma_d$) z ozirom na čas $\Delta t_{8/5}$. Ta se nanaša na varek, ki zadnji vpliva na mikrostrukturo TVP (prazni simboli). Polni simboli pripadajo dvovarkovnim TVP, pri katerih je najvišja temperatura drugega termičnega cikla med Ac_1 in Ac_3 . Obe linearni regresiji teh točk ne upoštevata

Figure 6: The results of static strength (R_m) and endurance limit ($\Delta\sigma_d$) measurement in relation to cooling time $\Delta t_{8/5}$. It is related to the last weld pass that affects the microstructure (empty marks). Filled marks belong to the double cycle HAZ of peak temperature between Ac_1 and Ac_3 . Both linear regressions do not take into account these data

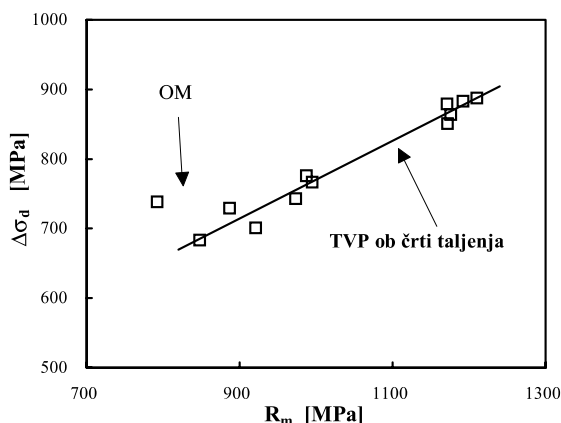
2. $Ac_1 < T_{p2} < Ac_3$

Avstenitizacija izhodnega grobozrnatega materiala TVP ni popolna in novo nastali TVP je tako le delno prekrizaliziran. Njegove lastnosti so odvisne od prekrizaliziranega in od neprekrizaliziranega dela materiala. Trdota v tem primeru velja za kombinacijo obeh, saj je eksperimentalno določena pri vzorcih materiala delno prekrizaliziranega TVP. Konstruiran CCT-diagram ustreza prekrizaliziranemu delu materiala (tretji CCT-diagram), ker se spremembe dimenzij, ugotovljene na dilatometrijskih krivuljah, nanašajo le nanj. Pri $T_{p2}=780$ °C se mehkejše mikrostrukturne sestavine pojavijo na CCT-diagramu pri še krajših časih ohlajanja kot pri $T_{p2}=960$ °C. To valja tako za bainit kot za ferit.

1. $T_{p2} < Ac_1$

Izhodni grobozrnati TVP se sploh ne avstenitizira, zato ni bistvenih sprememb v mikrostrukturi. Lastnosti se tudi ne spremenijo. S tem delom TVP se nismo ukvarjali.

Na **sliki 6** so prikazani rezultati merjenja statične in trajne dinamične trdnosti, ki so naneseni s slike 4 glede na $\Delta t_{8/5}$ varka, ki zadnji vpliva na mikrostrukturo TVP. Za obojne sta izračunani linearni regresiji, pri čemer pa podatki o materialih TVP, ki pri zadnjem termičnem ciklu niso bili popolnoma prekrizalizirani ($Ac_1 < T_{p2} < Ac_3$), niso upoštevani (polni simboli). Vidi se, da je korelacija med trajno dinamično in statično trdnostjo obravnavanih materialov TVP na prehodu ter



Slika 7: Trajna dinamična trdnost materiala TVP tik ob črti taljenja in osnovnega materiala (OM) v razmerah koncentriranih napetosti ($K_t=1,74$) v odvisnosti od statične trdnosti

Figure 7: Endurance limit of HAZ material adjacent to the fusion line and base metal (OM) in the concentrated stress state ($K_t=1,74$) in relation to static strength

$\Delta t_{8/5}$ zadnjega vplivnega varka, ki ima za posledico popolno prekrizalizacijo, velika. Zato je smiselno primerjati statično in trajno dinamično trdnost, saj v praksi pri varjenju hitrosti ohlajanja ne poznamo posebno natančno. Statična trdnost polikristalnih kovin pa je v linearni zvezi s trdoto, ki jo je na obrusih zvarnih spojev, pa tudi sicer, zelo enostavno meriti.

Medsebojni odnos obeh trdnosti TVP na mestu, kjer nastanejo zaradi utrujenosti materiala razpoke je prikazan na **sliki 7**. Vključeni so tudi tisti rezultati, ki se nanašajo na dvovarkovne TVP, pri katerih je najvišja temperatura zadnjega vplivnega varka med temperaturo Ac_1 in Ac_3 . Za primerjavo je podatek za nevplivani osnovni material. Takšen material na prehodu temena vara v varjeni material ne more obstajati, saj se zaradi termičnega vpliva varjenja transformira v TVP. Je pa zanimivo, da se ta točka v preostale ne vklaplja. Osnovni material je narejen s poboljšanjem, TVP pa z nekakšnim kaljenjem. Osnovni material je tudi bistveno bolj drobnozrnat kot materialu TVP. Izračun linearne regresije za material TVP na prehodu temena vara v osnovni material, ki je bil pri zadnjem vplivnem termičnem ciklu popolnoma ali le delno prekrizaliziran, je takšen:

$$\Delta\sigma_d = 0,56 \cdot R_m + 210 \text{ MPa} \quad (10)$$

Statična in dinamična trdnost sta merjeni v MPa. Ugotavljamo, da se da učinkovito ocenjevati ali primerjati dinamično nosilnost na različne načine izdelanih kakovostnih soležnih zvarnih spojev ali pa vrednotiti učinkovitost ukrepov za povečanje njihove dinamične nosilnosti kar na osnovi trdote materiala na prehodu temena vara v osnovni material.

4 SKLEP

Velikost primarnega zrna materiala TVP na prehodu temena vara v osnovni material, kjer pri kakovostnih soležnih zvarnih spojih, ki so brez makroskopskih napak, nastanejo razpoke zaradi utrujenosti materiala, je odvisna od termično najvplivnejšega varka. Pri tem je pomembna velikost vnesene toplote. Pri večjih vnosih toplote traja ogretost materiala na najvišje temperature dalj časa kot pri manjših. Zrno pa raste le pri temperaturah, ki so blizu tališča materiala.

Za trajno dinamično trdnost materiala na prehodu ni tako pomemben termično najvplivnejši varek, ampak zadnji varek, ki še vpliva na končno mikrostrukturo TVP. Trajna dinamična trdnost tega materiala je namreč pri manjših $\Delta t_{8/5}$ večja kot pri večjih. Čas $\Delta t_{8/5}$, ki je v odvisnosti od debeline varjenega materiala linearna ali pa kvadratna funkcija specifičnega vnosa toplote, pa je merilo produktivnosti varjenja. Zato je pri produktivno izdelanih tako enovarkovnih kot večvarkovnih zvarnih spojih na prehodu temena vara v osnovni material material z manjšo trajno dinamično trdnostjo, kot bi lahko bil v optimalnih termičnih razmerah. Posledica tega je, da najbolj kakovostni soležni zvarni spoji, ki so narejeni produktivno, nimajo posebno velike dinamične nosilnosti.

Trajno dinamično trdnost materiala na prehodu temena vara v varjeni material, ko ni vpliva mikronapak, je v razmerah koncentriranih napetosti mogoče oceniti na osnovi njegove trdnosti oziroma trdote. To ima veliko praktično uporabnost, saj je trdoto relativno enostavno meriti. Trdota na prehodu je odvisna od kemične sestave in stanja osnovnega materiala ter od parametrov varjenja in načina gradnje vara. Na trdoto pa ima največji vpliv tisti varek, pri katerem je bil material nazadnje popolnoma avstenitiziran ter zato prekrizaliziran. To je mogoče koristno uporabiti za povečanje dinamične nosilnosti produktivno izdelanih zvarnih spojev, kar dokazujejo izmerjene lastnosti materiala TVP, ki je

izdelan z različnima vnosoma toplote pri prvem in pri drugem varku.

Pri realnih zvarnih spojih ni mogoče računati, da bi bil material na prehodu popolnoma brez mikronapak. Zato je treba ugotovitve iz tega eksperimentalnega dela dopolniti še z vplivom mikronapak na trajno dinamično trdnost materiala TVP na prehodu temena vara v osnovni material. Da bodo rezultati primerljivi med različnimi materiali TVP, morajo biti mikronapake enake oblike, njihova velikost pa merljiva in ponovljiva.

5 LITERATURA

- ¹ K. Easterling: Introduction to the Physical Metallurgy of Welding, Butterworths, 1983
- ² L. Karlsson: Thermal Stresses in Welding, Thermal Stresses I, Edited by R. B. Hetnarski, Elsevier Science Publisher, 1986
- ³ N. N. Rykalin, Berechnung der Wärmevorgänge beim Schweißen, VEB Verlag Technik, 1957
- ⁴ V. Gliha, M. Taučer: Effects of Welding Parameters on Brittle Fracture Resistance, The International Journal for the Joining of Materiala, 6(1994)3, 116-120
- ⁵ V. Gliha: Determination of Basic Properties of HAZ Material Using Thermal Cycle Simulator, Proceedings of the International Conference MATEST '97 - Material Testing, Rovinj, 1997, 169-270, Hrvaška
- ⁶ R. E. Peterson: Stress Concentration Factors, John Wiley & Sons, 1974
- ⁷ N-A. Noda, M. Nisitani: Stress Concentration of a Strip with a Single Edge Notch, Engineering Fracture Mechanics, 2(1987), 223-238
- ⁸ V. Gliha, D. Toplak: Fatigue Strength of a Butt Welded HSLA Structural Steel with Backing, 5th International Fracture Mechanics Summer School - The Application of Fracture Mechanics to Life Estimation of Power Plant Components, Dubrovnik 1989, 255-270, Jugoslavija
- ⁹ V. Gliha: Fatigue Strength Determination of HAZ Material Using Thermal Cycle Simulator, Proceedings of the International Conference MATEST '98 - Life Extension, Brioni 1998, 263-272 Hrvaška
- ¹⁰ V. Gliha, I. Rak, A. Pristavec: Mechanical and Fracture Properties of Brittle Parts of Multipass Weld Joint Heat Affected Zone, 30(1996)1-2, 25-28