

VPLIV UMETNIH POVRŠINSKIH NAPAK NA DINAMIČNO TRDNOST MATERIALA NA PREHODU TEMENA VARA

THE INFLUENCE OF ARTIFICIAL SURFACE DEFECTS ON THE FATIGUE STRENGTH OF MATERIAL AT THE WELD TOE

Vladimir Gliha

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

Prejem rokopisa - received: 2000-10-10; sprejem za objavo - accepted for publication: 2000-11-24

Dinamično obremenjeni kakovostni soležni zvarni spoji se porušijo zaradi utrujenosti materiala na prehodu temena vara v osnovni material. Pri tem je pomembna tudi prisotnost inicialnih mikronapak. Vzorce materiala TVP smo pripravili na simulatorju termičnega cikla. Iz njih smo izdelali preizkušance z žlebom in umetnimi površinskimi inicialnimi mikronapakami. Na dnu žleba je bila koncentracija napetosti približno takšna kot pri zvarnih spojih. Inicialne mikronapake so bili posamični odtisi in nizi odtisov Vickersove piramide. Pri analizi rezultatov smo upoštevali termične parametre pri varjenju in mehanske lastnosti. Rezultate smo primerjali z dinamičnimi lastnostmi, ko ni vpliva inicialnih mikronapak. Z manjšanjem hitrosti ohlajanja, ki je posledica večjega vnosa toplote pri varjenju, dinamična trdnost materiala z inicialnimi mikronapakami pada, ob tem pa linearno raste s statično trdnostjo.

Ključne besede: soležni zvarni spoj, prehod temena vara, utrujenost materiala, inicialna mikronapaka, odtis Vickersove piramide, produktivno varjenje

Dynamically loaded high-quality butt-weld joints fail due to fatigue of the material at the weld toe. Initial micro-defects present in that material are important too. Samples of HAZ materials were prepared on the thermal cycle simulator. Specimens with a groove and an artificial surface of initial micro-defects were made from these samples. Stress concentration at the bottom of the groove was approximately the same as at the actual welded joints. Initial micro-defects were single and series indentations of the Vickers pyramid. In the analysis of results, parameters of the welding and mechanical properties were taken into account. Results were compared with those from samples without any influence of initial micro-defects. The decreasing cooling rate that is the consequence of the higher heat input by welding fatigue strength of material with initial micro-defects is decreasing while the fatigue strength is linearly increasing with ultimate tensile strength.

Key words: butt-welded joint, weld toe, material fatigue, micro-defects, Vickers pyramid indentation, productive welding

1 UVOD

Porušitev kakovostnih dinamično obremenjenih soležnih zvarnih spojev se praviloma začne z nastankom utrujenostnih razpok na prehodu temena vara v osnovni material. Zaradi potrebne konveksne oblike temena vara so napetosti na prehodu zmeraj nekoliko koncentrirane. Zaradi specifičnosti varjenja so v zvarnih spojih pogosto napake, zaradi oviranega raztezanja/krčenja pri segrevanju/ohlajanju pa so spoji po varjenju še statično prednapeti (zostale napetosti). Po definiciji so kakovostni zvarni spoji brez makronapak, vendar so pri tem mikronapake izvzete.

Material na prehodu temena vara v osnovni material je TVP (toplotno vplivano področje) zvara, kjer je mikrostruktura materiala zaradi termičnega vpliva varjenja spremenjena. Zato so lastnosti TVP drugačne od lastnosti vgrajenega materiala. Zaradi najintenzivnejšega termičnega vpliva tik ob varu je ta del TVP grobozrnat, torej GZTVP. Ker so lastnosti kovinskih materialov funkcija njihove mikrostrukture, se pričakuje, da bo od nje odvisna tudi dinamična trdnost TVP na prehodu temena vara, tudi takrat, ko razpoke nastanejo zaradi interakcije med napetostmi in obstoječimi inicialnimi mikronapakami.

Ali se bodo iz obstoječih inicialnih mikronapak razvile makrorazpoke, je odvisno od intenzitete interakcije med napetostmi in mikronapakami ter od prisotnosti ovir za širjenje mikrorazpok. Kristalne meje polikristalnih kovinskih materialov so mikrostrukturne ovire za širjenje mikrorazpok pri utrujanju. Zato bi bila lahko bolj groba zrna v TVP tik ob črti taljenja merodajna za nastanek razpok zaradi utrujenosti materiala.

Ta prispevek se navezuje na rezultate predhodnega prispevka¹. V njem so bile obravnavane lastnosti materiala TVP na prehodu temena vara v osnovni material, ko je vpliv inicialnih mikronapak zanemarljiv. Tokratni eksperimentalni rezultati se nanašajo na razmere, ko je vzrok za nastanek razpoke zaradi utrujenosti materiala inicialna mikronapaka, katere velikost je primerljiva z dimenzijami kristalnih zrn na prehodu temena vara v osnovni material.

2 EKSPERIMENTALNO DELO

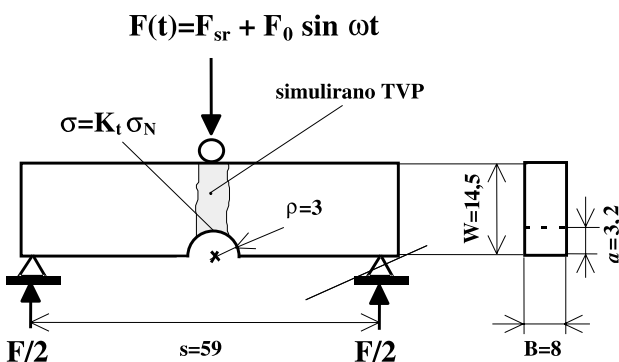
Uporabili smo poboljšano visoko trdno konstrukcijsko jeklo Nionical 70. To jeklo je med drugim namenjeno tudi za gradnjo dinamično obremenjenih varjenih konstrukcij². Vzorce materiala z mikrostrukuro

TVP smo v laboratorijskih razmerah pripravili s simulacijo termičnega vpliva varjenja na računalniško vodenem simulatorju termičnega cikla Smitweld. Naredili smo dovolj velike vzorce, da smo iz njih lahko izdelali preizkušance za nadaljnje eksperimentalno delo.

Obravnavali smo material, ki ga je pri soležnih zvarnih spojih pri tem jeklu možno najti na prehodu temena vara. Pri tem smo upoštevali, da je bolj produktivno variti z velikimi vnosi toplote kot z manjšimi. Pri večjih vnosi toplote so izdelovalni časi zvarnih spojev namreč krajši. Zato smo pripravili naslednje tri tipe materiala TVP:

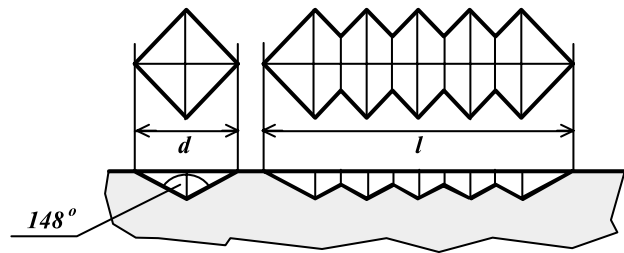
- GZTVP, ki nastane pri termičnem vplivu enega samega varka
- dovarkovno TVP_{Q1=Q2}, ki nastane pri termičnem vplivu dveh varkov, varjenih z enakima specifičnima vnosa toplote Q₁ in Q₂
- dovarkovno TVP_{Q1>Q2}, ki nastane pri termičnem vplivu dveh varkov, varjenih z različnima specifičnima vnosa toplote Q₁ in Q₂ (pri simulaciji termičnega vpliva prvega, polnilnega varka smo predvideli velik vnos toplote, pri drugem, korekcijskem pa za lastnosti najugodnejši, precej manjši vnos toplote)

Na simulatorju termičnega cikla se vzorce materiala kontrolirano segreva elektroporovno, ohlaja pa v kombinaciji z vodno hlajenimi čeljustmi. Na ta način se da doseči za varjenje ustrezne termične razmere le na sredini vzorca. Za nadaljnje eksperimentalno delo smo zato predvideli tritočkovno upogibne preizkušance z žlebom. Pri preizkusih so bile največje napetosti tam, kjer se nahaja material z mikrostrukturo TVP. Dimenzije preizkušanca in žleba (slika 1) smo izbrali tako, da je koncentracija napetosti približno tolikšna kot pri soležnih zvarnih spojih na prehodu temena vara v osnovni material, to je 1,74^{3,4,5}. Na dnu žleba smo z odtiskovanjem Vickersove piramide, s kakršno se meri



Slika 1: Tritočkovno upogibni preizkušavec za določitev trajne dinamične trdnosti materiala na prehodu temena vara v osnovni material. Zaradi žleba je v materialu z mikrostrukturo TVP koncentracija napetosti približno tolikšna kot pri soležnih zvarnih spojih

Figure 1: Three-point bend specimen for the determination of the endurance limit of material at the toe of the weld. Stress concentration in the material with HAZ microstructure, caused by the groove, is approximately the same as for the butt-weld joints



Slika 2: Umetne inicialne mikronapake so narejene z odtiskovanjem Vickersove piramide. Uporabili smo posamične odtise (velikost diagonale d) in nize petih odtisov (skupna dolžina niza l)

Figure 2: Artificial initial micro-defects are made by indenting with the Vickers pyramid. Single indentations (diagonal d) and a series of five indentations (total length l) were used

trdoto, naredili umetne inicialne mikronapake v naprej predvidenih velikostih. Pri prav vseh vrstah materialov so to bili posamični odtisi z diagonalo $d \approx 0,11$ in $\approx 0,22$ mm in nizi petih odtisov z diagonalo $d \approx 0,22$ mm v skupni dolžini $l \approx 0,675$ mm. Takšne mikronapake so prikazane na sliki 2. Razen tega smo na nekaterih materialih naredili tudi odtise z diagonalo $d \approx 0,165$ mm in nize petih odtisov z diagonalo $d \approx 0,11$ mm v skupni dolžini $l \approx 0,37$ mm.

Preizkušance smo pri sobni temperaturi utripno obremenjevali (razpon obremenitve ΔF je bil $2F_0$) s frekvenco 115 Hz. Posamezne preizkušance smo obremenili $2 \cdot 10^6$ -krat. Če v tem času nismo opazili makroskopsko razpoko, 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 povsem utripen. Razmerje R med najnižjo in najvišjo napetostjo na dnu žleba zato ni bilo nič, ampak manj ($R < 0$). Nominalno upogibno trajno dinamično trdnost materiala TVP v takšnih razmerah ($\Delta\sigma_{d-nom|R<0}$) smo izračunali iz največjega razpona obremenitve ΔF_{max} , pri katerem se po $2 \cdot 10^6$ obremenitvah makroskopska razpoka še ni pojavila:

$$\Delta\sigma_{d-nom|R<0} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\Delta F_{max} \cdot s}{B \cdot (W - a)^2} \quad (1)$$

Lokalno trajno dinamično trdnost materiala TVP z inicialnimi mikronapakami na dnu žleba ($\Delta\sigma_{d|R<0}$) smo izračunali na osnovi velikosti teoretičnega faktorja koncentracije napetosti K_t .

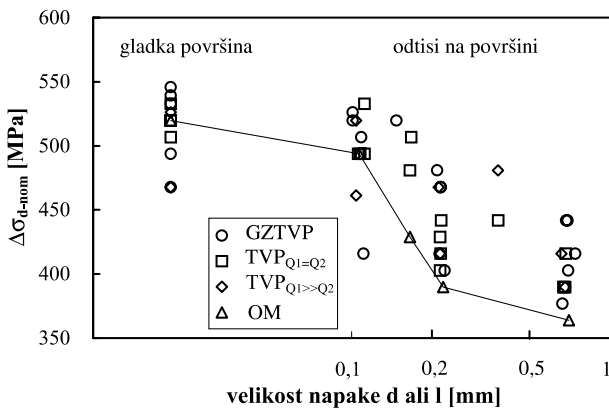
$$\Delta\sigma_{d|R<0} = K_t \cdot \Delta\sigma_{d-nom|R<0} \quad (2)$$

Ker nominalna trajna dinamična trdnost materiala, ki je izračunana po enačbi 2, 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 $R=0$. To bomo predstavili v enem naših naslednjih prispevkov. Na ta način smo dobili vrednosti trajne dinamične trdnosti $\Delta\sigma_d$.

3 REZULTATI IN KOMENTAR

Na sliki 3 so prikazani rezultati merjenja nominalne upogibne trajne dinamične trdnosti $\Delta\sigma_{d-nom}$ na preizkušancih z vsemi obravnavanimi TVP in z OM (osnovni material) v odvisnosti od vsakokratne velikosti umetne inicialne mikronapake. Izračunani so po enačbi 1. Kot merilo velikosti mikronapake na tej sliki smo uporabili velikost diagonale posamičnih odtisov oziroma dolžino nizov odtisov. Rezultate lahko primerjamo s trajno dinamično trdnostjo istih TVP, ko vpliva inicialnih mikronapak na dinamično trdnost ni. Ugotavljamo, da se trajna dinamična trdnost vseh teh, glede na nastanek, zelo različnih materialov v specifičnih napetostnih razmerah (koncentracija napetosti) z velikostjo mikronapak zmanjšuje, o sami velikosti vpliva pa ne moremo reči še ničesar. Trajna dinamična trdnost termično nevplivanega OM brez površinskih mikronapak in tistega z najmanjšimi uporabljenimi umetnimi mikronapakami ($d \leq 0,11$ mm) je v povprečju obravnavanih TVP, pri nekoliko večjih umetnih mikronapakah pa je manjša od vseh obravnavanih TVP. Vendar pa moramo vedeti, da je trdnost TVP praviloma večja od OM.

Na sliki 4 smo rezultate meritev trajne dinamične trdnosti $\Delta\sigma_{d-nom}$ primerjali z mejo tečenja materiala R_p . Ugotavljamo, da s tem razsipa eksperimentalnih rezultatov nismo zmanjšali. Vendar pa je nasprotno od rezultatov na **sliki 3** relativna velikost trajne dinamične trdnosti ($\Delta\sigma_{d-nom}/R_p$) termično nevplivanega OM z večjimi umetnimi inicialnimi mikronapakami v povprečju obravnavanih TVP. To pa ne velja za primer, ko ni inicialnih mikronapak ali pa so te zelo majhne.

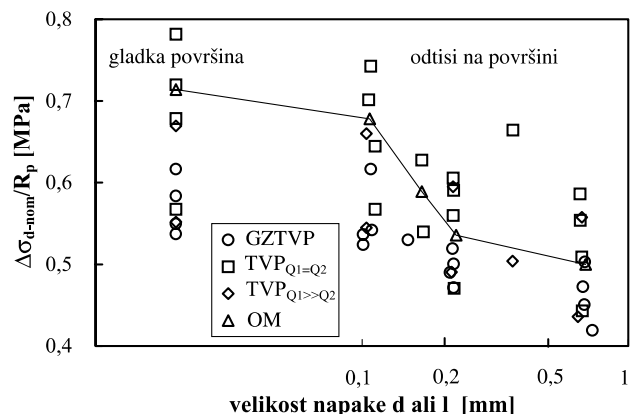


Slika 3: Nominalna upogibna trajna dinamična trdnost treh vrst TVP na prehodu temena vara (GZTVP, $TVP_{Q1=Q2}$, $TVP_{Q1>Q2}$) in osnovnega materiala (OM) z umetnimi inicialnimi mikronapakami (odtisi na površini) v odvisnosti od velikosti mikronapak. Primerjamo jih s trajno dinamično trdnostjo istih materialov brez umetnih inicialnih mikronapak (gladka površina). Črta povezuje rezultate za OM

Figure 3: Nominal bending endurance limit of three types of HAZ at the weld toe (GZTVP, $TVP_{Q1=Q2}$, $TVP_{Q1>Q2}$) and the base metal (OM) with artificial initial micro-defects in relation to the size of the micro-defects. They are compared with the endurance limit of the same materials without artificial initial micro-defects. Base-metal results (OM) are connected with the line

Termično nevplivano jeklo (OM) ima zelo drobno mikrostrukturo bainita in popuščenege martenzita, dočim je zrnatost TVP, vsaj njegovo primarno zrno, bistveno bolj groba ($100-180 \mu$)¹. Da velikost primarnega zrna materiala TVP brez mikrorazpok na prehodu temena vara v osnovni material, ki je odvisna od parametrov termično najvplivnejšega varka, ni v zvezi s trajno dinamično trdnostjo, smo dokazali že v predhodnem prispevku¹. Velikost primarnega zrna je odvisna od termično najvplivnejšega varka, ki je temu področju najbližji. Pri enovarkovnih GZTVP vemo, kateri je to, pri dvovarkovnih TVP na prehodu pa je termično najvplivnejši varek zmeraj prvi varek. Varjenje drugega varka, katerega termični vpliv je tako velik, da prekristalizira predhodno GZTVP ($T_{p2} > A_{c3}$), je merodajno le za mikrostrukturne sestavine, ki se izoblikujejo v TVP. Do neke mere velja to tudi za dvovarkovne TVP na prehodu, ki so le delno prekristalizirani ($A_{c1} < T_{p2} < A_{c3}$). Vendar pa mikrostrukturne sestavine materiala TVP na prehodu v tem primeru niso odvisne samo od zadnjega termičnega vpliva, ampak tudi od prejšnjega. So pa obstoječe mikrostrukturne sestavine v vsakem primeru merodajne za mehanske lastnosti materiala TVP, kakorkoli je nastal.

Na **sliki 5** so prikazani podatki o lokalni trajni dinamični trdnosti, izračunani po enačbi 2 in preračunani na $R=0$, prikazani v odvisnosti od časa $\Delta t_{8/5}$ pri dveh velikostih posamičnih odtisov in eni velikosti nizov odtisov. Ta čas ustreza hitrosti ohlajanja pri varjenju varka, ki zadnji vpliva na mikrostrukturo TVP. Za vse tri primere smo izračunali linearno regresijo rezultatov. Rezultatov tistih dvovarkovnih TVP, ki pri drugem termičnem ciklu niso popolnoma prekristalizirani ($A_{c1} < T_{p2} < A_{c3}$), pri izračunu regresije nismo upoštevali.



Slika 4: Relativna velikost nominalne upogibne trajne dinamične trdnosti s slike 3 glede na mejo tečenja R_p v odvisnosti od velikosti umetnih inicialnih mikronapak (odtisi na površini). Primerjamo jih s trajno dinamično trdnostjo istih materialov brez umetnih inicialnih mikronapak (gladka površina). Črta povezuje rezultate za OM.

Figure 4: Relative nominal bending endurance limit from figure 3 as regards yield stress R_p in relation to the size of the artificial initial micro-defects. They are compared with the endurance limit of the same materials without artificial initial micro-defects. Base-metal results (OM) are connected with the line.

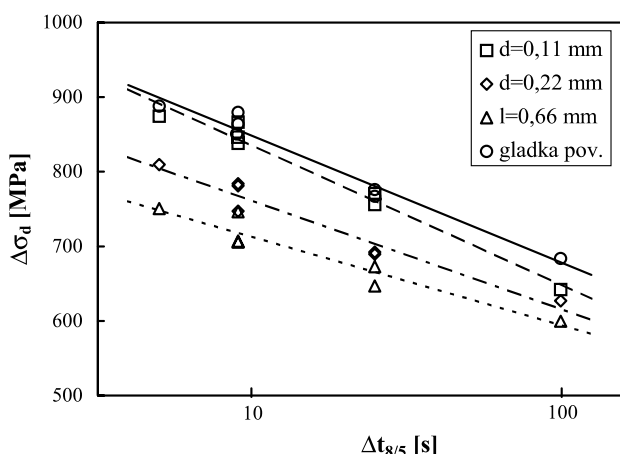
Tri regresije lahko primerjamo s tisto, kjer vpliva inicialnih mikronapak na dinamično trdnost ni¹. Kot vidimo, z rastočim $\Delta t_{8/5}$ trajna dinamična trdnost TVP na prehodu pada tako kot statična trdnost TVP¹. Zato smo podatke o trajni dinamični trdnosti primerjali tudi s statično trdnostjo R_m obravnavanih materialov TVP in OM.

Medsebojni odnos obeh trdnosti materialov TVP na mestu, kjer nastanejo zaradi utrujenosti materiala razpoke, je prikazan na **sliki 6**. Vključeni so tudi rezultati tistih dvovarkovnih TVP, ko je bila najvišja temperatura zadnjega vplivnega varka med Ac_1 in Ac_3 . Za primerjavo so prikazani tudi podatki za nevplivani osnovni material. Takšen material na prehodu temena vara v varjeni material sicer ne more obstajati, saj se zaradi termičnega vpliva varjenja transformira v TVP, je pa zanimivo, da se te točke v preostale ne vklaplajo. Nekaj podobnega smo ugotovili že na rezultatih, ki so prikazani na **slikah 3 in 4**. Osnovni material je narejen s poboljšanjem, TVP pa z nekakšnim kaljenjem. Osnovni material je tudi bistveno bolj drobnozrnat kot materiali TVP. Linearna regresija med trajno dinamično trdnostjo in statično trdnostjo TVP na prehodu za tri vrste približno enako velikih površinskih umetnih inicialnih mikronapak je:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_d &= 0,58 \cdot R_m + 177 \text{ MPa} \Rightarrow \text{pos. odtisi z } d \leq 0,11 \text{ mm} \\ \Delta\sigma_d &= 0,50 \cdot R_m + 191 \text{ MPa} \Rightarrow \text{pos. odtisi z } d \leq 0,22 \text{ mm} \\ \Delta\sigma_d &= 0,38 \cdot R_m + 278 \text{ MPa} \Rightarrow \text{nizi odtisov z } d \leq 0,675 \text{ mm} \end{aligned} \quad (3)$$

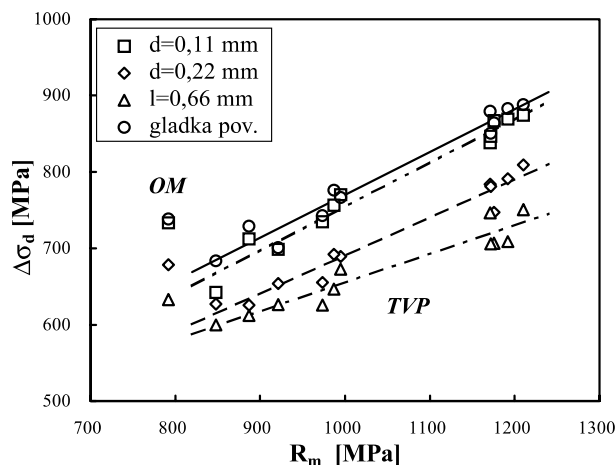
Statična in dinamična trdnost sta merjeni v MPa.

Če imamo opravka z inicialnimi mikronapakami tega tipa z $d \leq 0,11$ ali $0,22$ mm oziroma $l \leq 0,675$ mm, se da s temi tremi relacijami zelo enostavno oceniti trajno



Slika 5: Lokalna trajna dinamična trdnost ($\Delta\sigma_d$) z ozirom na čas ohlajanja $\Delta t_{8/5}$. Ta se nanaša na izdelavo varka, ki je zadnji imel vpliv na material na prehodu. Dvovarkovni TVP, ki pri tem termičnem vplivu niso v celoti prekrystalizirani, so izvezeti

Figure 5: Local endurance limit ($\Delta\sigma_d$) in relation to the cooling time $\Delta t_{8/5}$. It is related to the weld pass execution which influences the material at the weld toe the least. Double-cycle HAZ with incompletely recrystalized former micro-structure are not included



Slika 6: Lokalna trajna dinamična trdnost materiala vseh TVP in osnovnega materiala (OM) v razmerah koncentriranih napetosti ($K_t=1,74$) v odvisnosti od statične trdnosti

Figure 6: Endurance limit of all HAZ materials and base metal (OM) in the concentrated stress condition ($K_t=1,74$) in relation to static strength

dinamično trdnost materiala na prehodu temena vara v osnovni material. Poznati moramo njegovo statično trdnost. Statična trdnost polikristalnih kovin je v linearni zvezi s trdoto, ki jo je na obrusih zvarnih spojev, pa tudi sicer, zelo enostavno meriti. Ker trajna dinamična trdnost materiala na prehodu posredno definira dinamično nosilnost kakovostnih soležnih zvarnih spojev, bi se tako dalo primerjati in celo ovrednotiti učinkovitost različnih ukrepov za povečanje dinamične nosilnosti zvarnih spojev kar na osnovi trdote materiala TVP na prehodu temena vara.

Vendar pa inicialne mikronapake na prehodu temena vara v osnovni material pri dejanskih zvarnih spojih niso posamični odtisi ali nizi odtisov. Zato bo treba v nadaljevanju ovrednotiti vpliv v tem prispevku uporabljenih umetnih mikronapak in jih primerjati z vplivom inicialnih mikronapak drugačne oblike. To bo omogočilo konstrukcijo medsebojne zveze med statično trdnostjo (trdoto) materiala TVP na prehodu, velikostjo inicialnih mikronapak in trajno dinamično trdnostjo.

4 SKLEP

Za dinamično nosilnost kakovostnih soležnih zvarnih spojev je pomembna trajna dinamična trdnost materiala na prehodu temena vara v varjeni material, pri čemer igrajo pomembno vlogo morebitne inicialne mikronapake. Za mehanske lastnosti materiala na prehodu temena vara je pomemben zadnji varek, ki še vpliva na končno mikrostrukturo TVP. Trajna dinamična trdnost TVP na prehodu je pri manjših $\Delta t_{8/5}$ namreč večja kot pri večjih. Čas $\Delta t_{8/5}$ je v odvisnosti od debeline varjenega materiala linearna ali pa kvadratna funkcija specifičnega vnosa toplote, ki je kvocient moči vira energije za taljenje materiala in hitrosti varjenja¹. Merilo produktivnosti varjenja je količina pretaljenega materiala v enoti časa,

to je pa odvisna od moči vira. Zato je $\Delta t_{8/5}$ večji pri zvarnih spojih, ki so izdelani bolj produktivno. Pri njih je, ne glede na to ali so enovarkovni ali večvarkovni, na prehodu temena vara 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 je in ko ni vpliva inicialnih 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 ima največji vpliv varjenje varka, pri katerem je 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 dvovarkovnih TVP, ki so izdelani z različnima vnosoma toplote pri prvem in drugem varku ($TVP_{Q1>Q2}$). Ti niso nič manjši od tistih, ki so izdelani z enakima

vnosoma toplote ($TVP_{Q1=Q2}$), je pa njihova izdelava mnogo manj produktivna.

Pri realnih zvarnih spojih so na prehodu mikronapake različnih tipov in velikosti. Zato je treba vpliv inicialnih mikronapak na raven trajne dinamične trdnosti še kvantitativno oceniti.

5 LITERATURA

- ¹ V. GLIHA: Fatigue strength of a material at the weld toe of the weld joint on a high-strength structural steel, Kovine, zlitine, tehnologije, 34 (2000) 5, 231-237
- ² SŽ ŽJ ACRONI: High Strength Low Alloy Structural Steels, Heavy and Middle Quenched and Tempered Steel Plates with High Yield Point; prospectus
- ³ R. E. PETERSON: Stress Concentration Factors, John Wiley & Sons, 1974
- ⁴ N-A. Noda. M. Nisitani: Stress Concentration of a Strip with a Single Edge Notch, Engineering Fracture Mechanics, 2 (1987), 223-238
- ⁵ V. GLIHA, D. Toplak: Fatigue Strength of a Butt Welded HSLA Structural Steel with Backing, 5th International Fracture Mechanics Summer - The Application of Fracture to Life Estimation of Power Plant Components, Dubrovnik 1989, Jugoslavija
- ⁶ V. GLIHA: Fatigue Strength Determination of HAZ Material Using Thermal Cycle Simulator, Proceedings of the International Conference MATEST '98 - Life Extension, Brioni 1998, Hrvaška