

PRIMERJAVA LOMNE ŽILAVOSTI TVP, IZMERJENE PRI DVEH VRSTAH MAJHNIH PREIZKUŠANČEV

COMPARISON OF HAZ FRACTURE TOUGHNESS MEASURED BY TWO TYPES OF SMALL SCALE SPECIMENS

Vladimir Gliha¹, Tomaž Vuherer¹, Boris Ule², Jelena Vojvodič-Tuma²

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

²Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, 1000 Ljubljana, Slovenija
vladimir.gliha@uni-mb.si

Prejem rokopisa - received: 2000-10-10; sprejem za objavo - accepted for publication: 2000-11-16

Na simulatorju Gleeble smo pripravili vzorce materiala z mikrostrukturo štirih različnih TVP ob črti taljenja. Iz njih smo izdelali preizkušance za merjenje udarne in lomne žilavosti. Lomno žilavost smo izmerili pri dveh vrstah majhnih preizkušancev z razpoko: pri okroglih nateznih in upogibnih SENB-preizkušancih. Pri prvih smo lahko določili K_{Ic} , pri drugih pa δ_c . Ko primerjamo vrednosti δ_c s K_{Ic} , dobimo preoptimistične rezultate. Debelina SENB-preizkušancev je tudi pri zelo nizki lomni žilavosti še premajhna.

Ključne besede: zvarni spoj, konstrukcijsko jeklo, toplotno vplivano področje (TVP), črta taljenja, termični vpliv, lomna žilavost

Samples of material with microstructures of four different HAZ situated at the fusion line were prepared on a Gleeble simulator. Specimens for the experimental determination of impact and fracture toughness were machined from samples. The fracture toughness was measured on two types of small pre-cracked specimens. The K_{Ic} was determined on round tensile specimens while the δ_c was obtained from SENB specimens. The results obtained from the SENB specimens are too optimistic in comparison with the K_{Ic} . The SENB specimens are not thick enough, even at very low fracture toughness.

Key words: weld joint, constructional steel, heat-affected zone (HAZ), fusion line, thermal influence, fracture toughness

1 UVOD

Na toplotno vplivanem področju (TVP) zvara se termični vpliv varjenja opazi že pri mikrostrukturi. Spremenjena mikrostruktura se kaže pri lastnostih TVP. Te so drugačne kot lastnosti vgrajenega osnovnega materiala. Za zanesljivo in varno uporabo zvarjenih konstrukcij je zelo pomembna žilavost TVP.

Pri naši raziskavi smo analizirali žilavost TVP zvarnega spoja na poboljšanem visoko trdnem konstrukcijskem jeklu Niomol 490K. To jeklo so razvili, da bi bilo odporno proti koroziji v kislih medijih, zato je zelo čisto. Pri takšnih konstrukcijskih jeklih so poglavitni problem varivostni manjša ali večja krhka področja TVP. Le-ta so posebno nevarna, kadar pri obremenitvi zvarnih spojev pride do interakcije med napetostmi in obstoječimi ravninskimi napakami, še posebno, če so to razpoke. Nastajanje razpok pri varjenju konstrukcijskih jekel pa je zelo očiten znak slabe varivostni. V industriji uporabljajo za kontrolo kakovosti izdelovanja zvarnih spojev že od nekdanje različne metode neporušnih preiskav zvarov.

Povečana verjetnost, da se pri uporabi varjene konstrukcije s krhkimi področji v zvarih zlomi obremenjeni spoj delavniške kakovosti, je resna grožnja celovitosti varjene konstrukcije. Zato je razumljivo, da skušamo pri varjenju priti do čim bolj žilavega TVP. Lomna žilavost je tista lastnost materiala, od katere je odvisna raven

največje možne interakcije med napetostmi in razpokami brez škodljivih posledic.

Lomna žilavost je tako kot vse druge lastnosti TVP funkcija kemične sestave varjenega jekla in termične zgodovine. Termična zgodovina TVP pa je funkcija parametrov varjenja in načina gradnje vara, torej uporabljene tehnologije izdelave zvarnih spojev.

2 EKSPERIMENTALNO DELO

Kemična sestava obravnavanega jekla je navedena v tabeli 1.

Tabela 1: Kemična sestava jekla (mas. %)

Table 1: Chemical composition of steel (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	V	Nb	N	Al
0,07	0,54	0,56	0,008	0,002	0,35	0,67	0,01	0,062	0,007	0,025

Na simulatorju Gleeble smo pri vzorcih jekla debeline $\phi 17$ mm simulirali termične razmere tik ob črti taljenja pri varjenju z dvema vnosoma toplote. Tako se je mikrostruktura izoblikovala pri dveh različnih hitrostih ohlajanja. Pri transformabilnih jeklih je merilo za hitrost ohlajanja čas $\Delta t_{8/5}$, ko se TVP ohladi z 800 na 500 °C. Tu se avstenit transformira v fazo, ki je stabilna pri temperaturi, kjer se varjeno konstrukcijo pozneje uporablja. Področje tik ob črti taljenja je značilno po najbolj

grobem zrnju. Ponavadi je zelo trdo in manj žilavo kot preostanek TVP.

Simulirali smo enovarkovni in dvovarkovni termični vpliv izdelave zvarnega spoja:

- Vzorci jekla smo s hitrostjo 200 K/s segreti do $T_p=1350$ °C. To temperaturo smo držali tri sekunde. Vzorci smo nato ohladili s hitrostjo, ki ji ustreza čas $\Delta t_{8/5}$. Pri takšnih termičnih razmerah (slika 1) se pri varjenju izoblikuje ob črti taljenja grobozrnato TVP.
- Vzorci smo dvakrat segreti s hitrostjo 200 K/s, prvič do $T_{p1}=1350$ °C in drugič do $T_{p2}=780$ °C. Obe temperaturi smo držali po tri sekunde. Pri takšnih termičnih razmerah (slika 2) se pri varjenju izoblikuje ob črti taljenja dvovarkovno TVP, ki je bilo po varjenju prvega, najbližjega varka grobozrnato.

Pri reprezentativnih vzorcih s simulirano mikrostrukturo TVP smo izmerili trdoto. Iz drugih vzorcev smo izdelali preizkušance Charpy za meritev udarne žilavosti in dve vrsti majhnih preizkušancev z razpoko za meritev lomne žilavosti (slika 3). Za obravnavane štiri vrste TVP ob črti taljenja so podatki o termičnem vplivu pri simulaciji v tabeli 2.

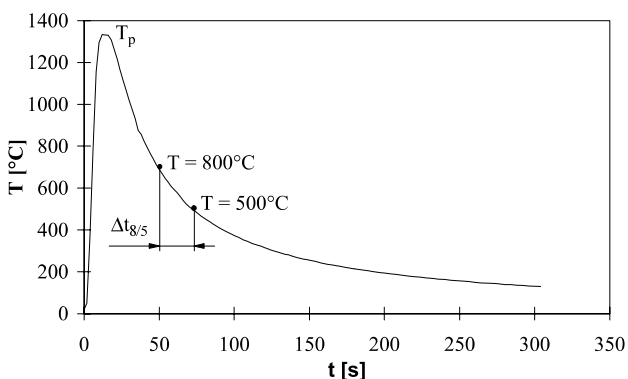
Tabela 2: Termične razmere pri simulaciji TVP in trdota
Table 2: Thermal condition during HAZ simulation and hardness

oznaka	$T_{p/p1}$ °C	t/t_1 s	$\Delta t_{8/5}$ s	T_{p2} °C	t_2 s	$\Delta t_{5/3}$ s	trdota HV _{300g}
OM	-	-	-	-	-	-	150
TVP ₁₋₁₀	1350	3	10	-	-	-	215
TVP ₁₋₃₀	1350	3	30	-	-	-	197
TVP ₂₋₁₀	1350	3	10	780	3	20	219
TVP ₂₋₃₀	1350	3	30	780	3	60	220

Temperaturno območje, ki je zanimivo za uporabo obravnavanega jekla, je od sobne temperature pa do -40 °C, kar je najnižja možna temperatura, ki so jo ugotovili v našem podnebno območju.

3 REZULTATI MERITEV IN RAZPRAVA

Rezultati meritev udarne in lomne žilavosti analiziranih TVP ob črti taljenja so v odvisnosti od



Slika 1: Simulacija enovarkovnega grobozrnatega TVP pri $\Delta t_{8/5}=30$ s
Figure 1: Single-cycle coarse-grain HAZ simulation at $\Delta t_{8/5}=30$ s

temperature prikazani na slikah 4 in 5, njihova trdota pa v tabeli 2.

Že rezultati meritev udarne žilavosti CVN kažejo pri obravnavanem jeklu na slabo žilavost TVP ob črti taljenja. Prehodna temperatura iz krhkega v žilavi lom je namreč dokaj visoka.

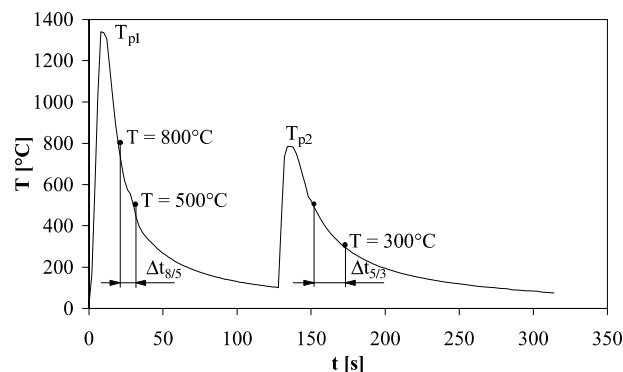
Pri preizkusih pri okroglih natezih preizkušancih z razpoko (dimenzije so na sliki 3) smo določili lomno žilavost materiala K_{Ic} , saj so te vrednosti ustrezale naslednji zahtevi:

$$D \geq 1,5 \cdot \left(\frac{K_{Ic}}{R_p} \right)^2 \quad (1)$$

D je premer preizkušanca (10 mm). Mejo tečenja R_p posameznih TVP smo ocenili iz znane meja tečenja z varjenjem termično nevplivanega jekla (>490 MPa) in iz razmerja med trdotami jekla in TVP, ki jih izračunamo iz podatkov v tabeli 2. V temperaturnem območju od -40 do 0 °C je K_{Ic} analiziranih štirih TVP med 40 in 50 MPam^{1/2}. Pri enovarkovnih TVP smo ugotovili nekoliko višje vrednosti kot pri dvovarkovnih.

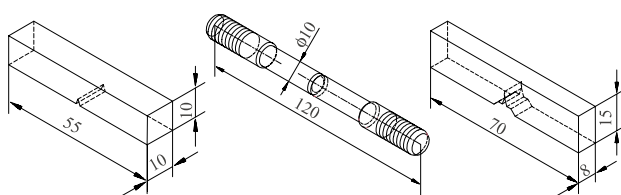
Pri preizkusih pri SENB-preizkušancih z razpoko (dimenzije so na sliki 3) ni bilo mogoče določiti lomne žilavosti K_{Ic} , niti vrednosti K_c v skladu s standardom ¹. Sicer trenutni zlom je vsakokrat nastal pri preveč nelinearnem preizkusu. Vsi preizkušanci so se zlomili brez najmanjšega predhodnega stabilnega naraščanja razpoke. Tako smo kot lomno žilavost materiala določili parameter δ_c ². Izmerjene vrednosti δ_c pri -40 °C so majhne. Pri -20 °C so izmerjene vrednosti δ_c pri obeh enovarkovnih TVP opazno večje, pri dvovarkovnih pa le neznatno večje.

Iz rezultatov meritev (sliki 4 in 5) lahko sklenemo, da je lomna žilavost enovarkovnega grobozrnatega TVP (TVP₁₋₁₀ in TVP₁₋₃₀) večja od dvovarkovnega ob črti taljenja, ki je bilo po prvem varku grobozrnato (TVP₂₋₁₀ in TVP₂₋₃₀). Med lomno žilavostjo TVP pri $\Delta t_{8/5}=10$ s (TVP₁₋₁₀ in TVP₂₋₁₀) in tisto pri $\Delta t_{8/5}=30$ s (TVP₁₋₃₀ in TVP₂₋₃₀) pa ni opaziti prav velikih razlik. Isto potrjujejo



Slika 2: Simulacija dvovarkovnega TVP ob črti taljenja, ko je $\Delta t_{8/5}=10$ s ($\Delta t_{5/3}=20$ s) in $T_{p2}=780$ °C

Figure 2: Simulation of double-cycle HAZ at the fusion line when $\Delta t_{8/5}=10$ s ($\Delta t_{5/3}=20$ s) and $T_{p2}=780$ °C

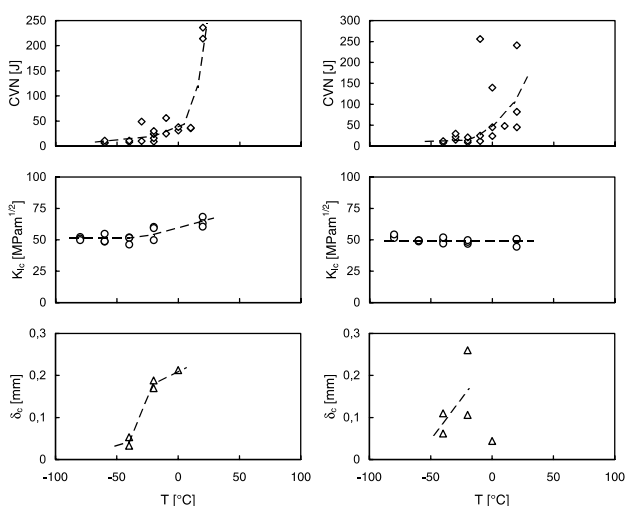


Slika 3: Preizkušanci za merjenje udarne žilavosti (levo) ter lomne žilavosti K_{Ic} (sredina) in CTOD (desno)

Figure 3: Specimens for measurement of impact toughness (left), fracture toughness K_{Ic} (middle) and CTOD (right)

tudi rezultati meritev udarne žilavosti CVN. Prehodna temperatura iz krhkega v žilavi lom je pri obeh enovarkovnih TVP nižja kot pri dvovarkovnih, pri čemer pa razlike v trdnosti (trdoti) niso posebno velike. Trdota TVP ob črti taljenja je glede na izhodiščno stanje obravnavanega jekla zvečana za 30 do 50 %. Niti pri simulaciji varjenja z najmanjšim vnosom toplote, ki ustreza hitrosti ohlajanja $\Delta t_{8/5}=10$ s, trdota TVP ne doseže trdote martenzita s $C=0,07$ %³. Prekaljivost tega jekla je, tako kot velja za vsa nizkoogljčna konstrukcijska jekla, dokaj nizka.

Jeklo Niomol 490K ima v poboljšanim stanju drobnozrnato feritno-bainitno mikrostrukturo. Ker je jeklo zelo čisto, ni odporno proti rasti zrn. Zrna najbolj rastejo tam, kjer je med varjenjem temperatura najvišja. To je tik ob črti taljenja. Kar se tiče žilavosti TVP pri konstrukcijskih jeklih, je zaželeno, da so zrna čim bolj fina. Tudi otočki konstituentov M/A, ki jih lahko najdemo v TVP tik ob črti taljenja, za žilavost niso ugodni⁴. Te mikrostrukturne sestavine so posledica obogatitve avstenita s C v času izločanja predevtektoidnega ferita po mejah avstenitnih zrn. Zaradi povečane koncentracije C in hitrega ohlajanja pride ponekod do



Slika 4: Temperaturna odvisnost udarne žilavosti CVN (zgoraj) ter lomne žilavosti K_{Ic} (sredina) oziroma δ_c (spodaj) materiala enovarkovnih grobozrnatih TVP z oznako TVP₁₋₁₀ (levo) in TVP₁₋₃₀ (desno)

Figure 4: Temperature dependance of impact toughness CVN (top), fracture toughness K_{Ic} (center) and δ_c (bottom) of single-cycle coarse-grain HAZ designated as TVP₁₋₁₀ (left) and TVP₁₋₃₀ (right)

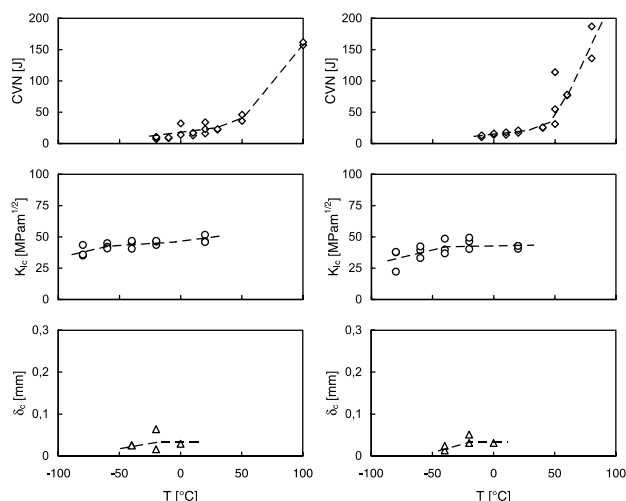
transformacije avstenita šele pri zelo nizkih temperaturah, zato je takrat izoblikovana faza trda in krhka. Pri grobozrnatem avstenitnem zrnju ob črti taljenja so razmere za izločanje predevtektoidnega ferita bolj ugodne, zato je tu mogoče pogosteje najti konstituente M/A.

Napetostne razmere pri eksperimentalnem določevanju lomne žilavosti so definirane z vpetostjo. Če bi bile te na obeh vrstah uporabljenih preizkušancev pri zlomu enake, bi morali dobiti identične rezultate. Rezultati meritev dokazujejo, da pri enaki temperaturi vpetost pri obeh vrstah preizkušancev ni bila enaka. Vpetost, ki zagotovi ob konici razpoke ravninsko stanje napetosti, je odvisna od lastnosti materiala in geometrije preizkušanca. Ta pogoj je za okrogle natezne preizkušance podan z (ne)enačbo 1, za SENB-preizkušance pa z (ne)enačbo 2:

$$B \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_{Ic}}{R_p} \right)^2 \quad (2)$$

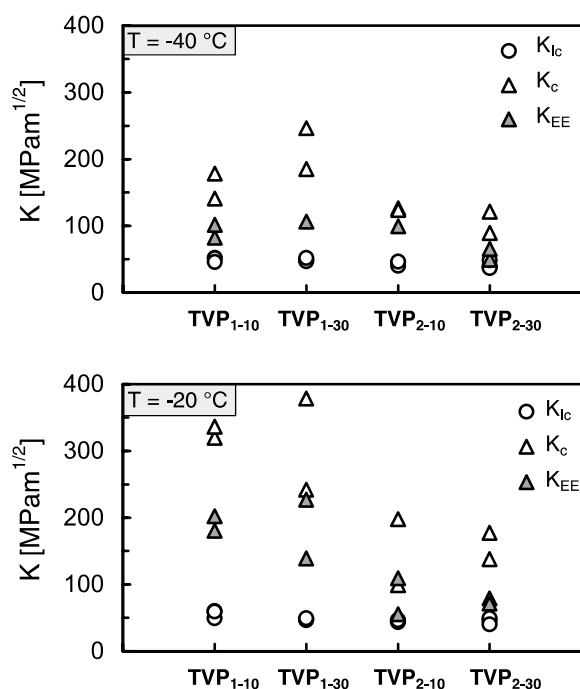
B je debelina SENB-preizkušanca, ki je v našem primeru 8 mm (slika 3). Čeprav rezultati meritev lomne žilavosti pri okroglih nateznih preizkušancih zadostijo pogoju v (ne)enačbi 1 (zato označimo izmerjene vrednosti s K_{Ic}), pa pogoj v (ne)enačbi 2 za enake vrednosti ni izpolnjen. Pri SENB-preizkušancih zaradi tega sploh nismo mogli izmeriti lomne žilavosti K_{Ic} . Kljub kvazikrhkemu lomu pri vseh preizkusih smo lahko določili samo δ_c .

V nadaljevanju je poskus primerjave eksperimentalno določenih vrednosti lomne žilavosti δ_c in K_{Ic} , ki sta izmerjena pri različnih majhnih preizkušancih iz enakega materiala:



Slika 5: Temperaturna odvisnost udarne žilavosti CVN (zgoraj) ter lomne žilavosti K_{Ic} (sredina) oziroma δ_c (spodaj) materiala dvovarkovnega TVP ob črti taljenja z oznako TVP₂₋₁₀ (levo) in TVP₂₋₃₀ (desno)

Figure 5: Temperature dependance of impact toughness CVN (top) and fracture toughness K_{Ic} (center) and δ_c (bottom) of double-cycle coarse-grain HAZ at the fusion line designated as TVP₂₋₁₀ (left) and TVP₂₋₃₀ (right)



Slika 6: Primerjava eksperimentalno določene lomne žilavosti K_{Ic} pri -40 in -20 °C z ustreznimi vrednostmi parametrov K_c in K_{EE} , ki so preračunani iz izmerjenih vrednosti δ_c .

Figure 6: Comparison of experimentally determined fracture toughness K_{Ic} at -40 and -20 °C with relevant values of parameters K_c and K_{EE} calculated from measured values of δ_c .

1. Najprej uporabimo predpostavko, da sta oba parametra v naslednji zvezi ²:

$$K_c = \sqrt{\frac{2 \cdot R_p \cdot E \cdot \delta_c}{1 - \mu^2}} \quad (3)$$

R_p , E in μ so meja tečenja, elastični modul in Poissonovo število materiala. R_p smo ocenili iz trdot, za E oz. μ pa smo vzeli 210 GPa oz. 0,3. Gornja enakost gotovo drži pri popolnoma linearnih preizkusih. Ko se nelinearnost, ki je posledica plastične deformacije ob konici razpoke, povečuje, so razlike med K_{Ic} in δ_c vse večje. Za štiri analizirane TVP so pri temperaturah -40 in -20 °C rezultati preračuna δ_c v K_c (enačba 3) prikazani na **sliki 6**.

2. Nato uporabimo metodo, pri kateri se potek preizkusa linearizira s predpostavko o enaki energiji za zlom ⁵. Pri tej predpostavki lahko iz izmerjene energije A pri ne dovolj linearnem preizkusu izračunamo fiktivno obremenitev P_E , ki omogoča izračun faktorja K_{EE} :

$$P_E = \sqrt{2 \cdot k \cdot A}; \quad K_{EE} = \frac{Y \cdot P_E}{B \cdot \sqrt{W}} \quad (4)$$

k je začetna linearna odvisnost diagrama obremenitev-pomik. Y je oblikovni faktor, ki je funkcija relativne velikosti razpoke a/W , B in W pa sta debelina in širina SENB-preizkušanca. Da smo lahko pri preizkusu ocenili energijo A , smo predpostavili,

da je upogib SENB-preizkušanca sorazmeren z merjenim razmikom CMOD. To velja le, dokler ni stabilnega naraščanja razpoke. Tega pa nismo registrirali niti v enem primeru. Za štiri analizirane TVP so pri temperaturah -40 in -20 °C rezultati te pretvorbe (enačba 4) prikazani na **sliki 6**. Primerjamo jih lahko z vrednostmi K_{Ic} , ki smo jih izmerili pri okroglih nateznih preizkušancih z razpoko, in z vrednostmi K_c , ki so preračunane iz δ_c z uporabo enačbe 3.

Ugotavljamo, da so vrednosti K_{EE} bližje dejanski lomni žilavosti materiala analiziranih TVP kot vrednosti K_c . Pri nizki žilavosti sta K_{EE} in K_{Ic} skoraj enaka. Ker debelina SENB-preizkušancev niti v teh primerih ne zadovolji pogoja v enačbi 2, to še ni K_{Ic} . Metoda ekvivalentne energije je torej kar primerna za približno ocenitev lomne žilavosti materiala K_{Ic} , posebno če nelinearnost pri preizkusu ni prevelika.

4 SKLEP

Obe vrsti uporabljenih majhnih preizkušancev (okrogli natezni in upogibni SENB) so primerni za eksperimentalno določitev lomne žilavosti vzorcev s simulirano mikrostrukturo TVP, ki so tako majhni, da jih je mogoče pripraviti na simulatorju Gleeble. Pri rezultatih preizkusov pri obeh vrstah preizkušancev gre za približno enak nivo izmerjene lomne žilavosti. Ker je pri SENB-preizkušancih vpetost manjša kot pri okroglih nateznih preizkušancih, so prvi manj primerni za določitev K_{Ic} . Zakaj pa bi potem sploh uporabljali SENB-preizkušance?

Obe vrsti majhnih preizkušancev lahko izdelamo iz vzorcev, ki so pripravljene na simulatorju Gleeble. Vendar pa tudi okrogli natezni preizkušanci z razpoko ne omogočajo določitve lomne žilavosti K_{Ic} , ko merila v (ne)enačbi 1 ni mogoče več izpolniti. Ker geometrija okroglih nateznih preizkušancev, nasprotno od upogibnih SENB-preizkušancev, ni primerna za enostaven način določitve ustreznih parametrov lomne žilavosti CTOD, kot so δ_c , δ_i , $\delta_{0,2}$, δ_u ali pa δ_m , je prav to bistvena glavna prednost uporabe SENB-preizkušancev.

5 LITERATURA

- ¹ ASTM E 399-90: Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials
- ² ASTM E 1290-93: Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement
- ³ K. Lorenz, C. Dueren, Evaluation of Large Diameter Pipe Steel Weldability by Means of the Carbon Equivalent; IIW doc. IX-1356-85
- ⁴ D. Rojko, Fracture Toughness Determination on Large Scale Specimens and Comparison with Standard Ones, Master's degree, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, 2000
- ⁵ ASTM E 992-84: Standard Practice for Determination of Fracture Toughness of Steels Using Equivalent Energy Methodology (Reapproved 1989)