

# MODIFICIRANO NUMERIČNO MODELIRANJE LOMNEGA VEDENJA ZVARNEGA SPOJA V PREHODNEM PODROČJU IZ DUKTILNEGA H KRHKEMU LOMU

## MODIFIED NUMERICAL MODELLING OF FRACTURE BEHAVIOUR OF WELD JOINT IN DUCTILE-TO-BRITTLE TEMPERATURE TRANSITION REGION

DRAŽAN KOZAK<sup>1</sup>, N. GUBELJAK<sup>2</sup>, I. RAK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Strojarski fakultet, Trg Ivane Brlić-Mažuranić 18, 35000 Slavonski Brod, Hrvatska

<sup>2</sup>Fakulteta za strojništvo, Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenija

*Prejem rokopisa - received: 1997-10-01; sprejem za objavo - accepted for publication: 1997-12-19*

Varno obratovanje varjene konstrukcije je odvisno od lomno mehanskih lastnosti zvarnih spojev. Največje spremembe teh lastnosti nastopajo v prehodnem področju iz duktilnega v krhki lom. Namen tega raziskovalnega dela je z metodo končnih elementov definirati primeren numerični postopek za izračun napetostno-deformacijskega stanja v trenutku nestabilnega loma. Uporabljen modificirani postopek numeričnega modeliranja mora omogočiti vedenje materiala zvara na konici razpoke v skladu s teorijo nastanka in širjenja duktilne oziroma cepilne razpoke ter zagotoviti verifikacijo z eksperimentalnimi rezultati. Uporaba ravninskega deformacijskega stanja na konici razpoke ob ravninsko napetostnem stanju preostalega preizkušanca med sukcesivnim obremenjevanjem omogoča dobro korelacijo med eksperimentalnimi in numeričnimi rezultati. Na osnovi tega je možno definirati pogoje sprožanja nestabilnega loma v poljubno oblikovanem modelu, kakor tudi določiti prag za varno obratovanje dejanske varjene konstrukcije v prehodnem področju iz duktilnega v krhki lom.

Ključne besede: zvarni spoj, metoda končnih elementov, lomna žilavost CTOD, krhki cepilni lom, omejitve

Safe use of welded structure depends on fracture mechanics properties of weld joints. These properties are change significantly in the ductile-to-brittle temperature transition region. The aim of this research was to determine an appropriate numerical modelling procedure to define stress-strain conditions at the moment of instability. The modified procedure enables to the fracture behavior of weld metal at the crack tip in accordance with the theory of fracture mechanics and ensures the verification with experimental results. The use of modified plain stress state at the crack tip during successive increasing of loading enables to obtain acceptable agreement between experimental and numerical results. By FE calculated stress-strain situation at the moment of instability corresponds to the local condition at the initiation of cleavage fracture on testing specimens. It is possible to use this results on different models for threshold determination of safe load for real welded structures in the ductile-to-brittle temperature transition region.

Key words: weld joint, finite element method, CTOD fracture toughness, brittle cleavage fracture, constraint

### 1 UVOD

Nestabilna porušitev materiala pod vplivom nateznega obremenjevanja preizkušanca z razpoko nastopa v področju, kjer prihaja poleg napetosti v ravnini obremenjevanja ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ) do oblikovanja nateznih napetosti, pravokotnih na ravnino obremenjevanja ( $\sigma_z$ ). Oblikovanje teh napetosti je reakcija materiala na visoke gradiente prečnih deformacij ob konici razpoke. To pomeni, da napetostno stanje ob konici razpoke v trenutku nestabilnega cepilnega loma ne ustreza ravninsko napetostnem stanju (RNS), temveč troosnem napetostnem stanju. Raziskave Duddera in R. Oregana<sup>1</sup> so pokazale, da je troosno napetostno stanje v območju jedra prereza preizkušanca mogoče nadomestiti z idealiziranim ravninskim deformacijskim stanjem (RDS). Za RDS je modul elastičnosti  $E^* = E/(1-\nu^2)$ , pri čemer se za Poissonovo število upošteva  $\nu = 0.5$ . Eksperimentalna merjenja faktorja intenzivnosti napetosti na optično anizotropnih materialih<sup>2,3,4</sup> so pokazala, da v območju ob konici razpoke prevladuje RDS, med tem ko z oddaljevanjem od konice

razpoke in od sredine preizkušanca pa postaja prevladojoče RNS, kot je shematsko prikazano na **sliki 1**.

Primerjalna analiza<sup>5</sup> med numeričnimi in eksperimentalnimi rezultati je pokazala, da je lomno vedenje preizkušanca med vrednostmi, ki bi jih dobili za RDS (konzervativno nizke) in RNS (optimistično visoke). Na osnovi Irwinovih<sup>6</sup> enačb je podana porazdelitev in oblika plastične cone skozi debelino preizkušanca, ni pa znana



**Slika 1:** Shematski prikaz porazdelitve RDS in RNS skozi debelino preizkušanca okrog konice razpoke v optično anizotropnih materialih<sup>2,3</sup>

**Figure 1:** Schematic distribution of plane strain/plane stress state through thickness around of crack tip of optical anisotropy materials<sup>2,3</sup>

porazdelitev RDS skozi debelino neprozornega preizkušanca. Raziskave<sup>7</sup> so pokazale, da je porazdelitev RDS odvisna od debeline in oblike preizkušanca, vrste materiala, načina in hitrosti obremenjevanja ter je v korelaciji z velikostjo cone tečenja in deformacijskega utrjevanja.

Pri zvarnih spojih problematika postaja zahtevnejša, kajti poleg navedenih dejavnikov vplivajo na lom trdnostna neenakost zvarnega spoja, mikrostruktura ob konici razpoke in širina zvarnega spoja. Ugotovitev lomnega vedenja zvarnega spoja in uporaba modificiranega numeričnega postopka za varjeno konstrukcijo je pomemben prispevek k zagotovitvi njene celovitosti. S tem namenom je na osnovi primerjave med eksperimentalnimi in numeričnimi rezultati ocenjen delež RDS ob konici razpoke v trenutku nestabilnega loma.

## 2 MATERIAL, EKSPERIMENTI IN NUMERIČNI IZRAČUNI

Iz zvarnega spoja visokotrdnostnega jekla nionical 70A je bil izdelan tritočkovni upogibni preizkušavec. Na **sliki 2** sta prikazana položaj mehanske zarezne in konica utrujenostne razpoke v zvarnem spoju z "X" obliko varilnega žleba. Mehanske lastnosti osnovnega materiala in zvarnega spoja so podane v **tabeli 1**.

Lomnomehanski preizkusi so se izvajali pri  $-10^{\circ}\text{C}$  s konstantno hitrostjo pomika trna  $1\text{ mm/min}$ . Med preizkušanjem je bilo neposredno merjeno odpiranje na konici razpoke (CTOD( $\delta_s$ )), odpiranje na ustju razpoke (CMOD) in pomik trna med upogibanjem ( $v_{LLD}$ ). Položaj mernih točk na preizkušancu je prikazan na **sliki 2**. Za meritev stabilne rasti razpoke med preizkusom je bila uporabljena metoda padca<sup>8</sup>. Pri vseh preizkušancih zvarnega spoja se je pojavila nestabilna porušitev neposredno po odklonu od linearne odvisnosti F-CTOD. Tako lomno vedenje materiala je značilno za temperaturno prehodno področje od duktilnega h krhkemu lomu. Dolžina stabilnega prirastka razpoke pred nestabilno porušitvijo v nobenem primeru ni presegala  $\Delta a = 0,6\text{ mm}$ . Dosežene vrednosti med eksperimentalnim preizkušanjem so podane v **tabeli 1**. Lomnomehanski preizkušavec je bil modeliran z mrežo končnih elementov v več ravninah. Pri tem so merne točke za značilne pomike (CTOD( $\delta_s$ ), CMOD in  $v_{LLD}$ ) na modelu sovpadale s položajem teh točk na preizkušancu. Zaradi



**Slika 2:** Modeliranje upogibnega lomnomehanskega preizkušanca z modificiranimi mrežami končnih elementov skozi debelino

**Figure 2:** Modelling of the point bend specimen by modified finite elements mesh through the thickness of specimens

poenostavitve je bila modelirana le polovica preizkušanca.

Zaradi nepoznanja porazdelitve RDS ob konici razpoke je bilo uporabljeno več mrežnih modelov z različnim deležem elementov v RDS. Na **sliki 3** je prikazan primer mrežnega modela, ki ima 0,1% elementov z RDS ob konici razpoke. Mrežni model brez elementov v RDS, (v skladu z<sup>2,3,4,5</sup>) predstavlja površino lomnomehanskega preizkušanca (ravnina A), medtem ko modeli z 0,1%, 0,25%, 0,4% in 1% RDS-elementov v RDS ponazarjajo prerezne ravnine (B, C, D in E) v notranjosti preizkušanca. Razmerje med deleži elementov RDS v posameznih ravninah je prikazano na **sliki 4**.

Natančnih položajev prereznih ravnin oziroma mrežnih modelov skozi debelino preizkušanca ni mogoče določiti zaradi nepoznanja porazdelitve RDS skozi debelino zvarnega spoja. Potrebno je pripomniti, da nikoli ne pride do iniciacije nestabilnega loma na površini preizkušanca, temveč izključno v notranjosti preizkušanca, kot je razvidno s **slike 5**. Zaradi tega je bil namen raziskave ugotoviti, kateri delež RDS ob konici razpoke za določen zvarni spoj in tritočkovni upogibni način obremenjevanja je merodajen za lomno vedenje na varjeni konstrukciji. Predpostavljamo, da ima tudi majhen delež RDS ob konici razpoke odločilen vpliv na lomno vedenje celotnega preizkušanca.

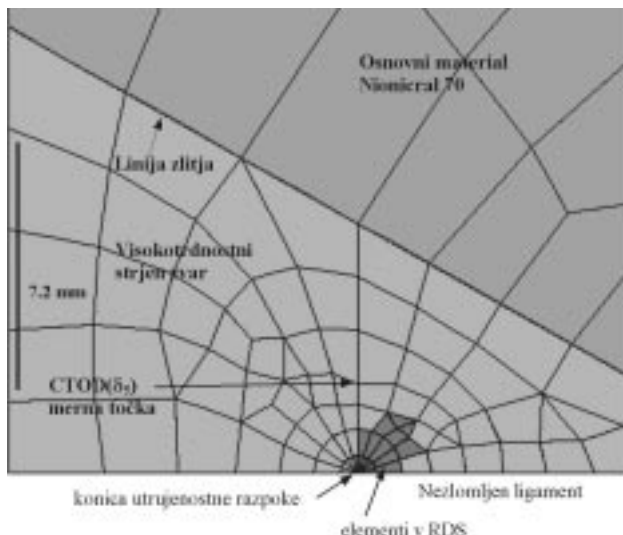
Za konstitutivni model numeričnega izračuna je uporabljena Ramberg-Osgoodova potenčna enačba, ki opisuje enoaksialno napetostno-deformacijsko vedenje:

**Tabela 1:** Mehanske lastnosti, udarna žilavost in lomna žilavost CTOD za osnovni material in visokotrdnostni zvarni spoj  
**Table 1:** Mechanical properties, impact toughness and CTOD fracture toughness of base metal and overmatch weld metal

Material	E MPa	R <sub>P0,2</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	$\alpha$ -	$\sigma_0$ MPa	n -	A <sub>t</sub> %	vE <sup>+</sup> J	CTOD( $\delta_s$ ) <sup>*</sup> mm
Nionical 70 (NN70)	208986	712	846	0,94	676	0.095	19	54-54°C	$\delta_{5m} = 0,594; 0,773; 0,786$
Korenski del zvara	212554	824	902	0,92	801	0,064	16,5	50-40°C	$\delta_{5c} = 0,019$
Polnilni del zvara	211409	873	1041	0,89	833	0,107	10,8	33-40°C	$\delta_{5u} = 0,158; 0,178$

<sup>+</sup> - povprečna vrednost treh preizkušancev Charpy V

<sup>\*</sup> - kritične vrednosti lomne žilavosti v skladu z ASTM 1290-92



**Slika 3:** Modificiran mrežni model z 0,1% elementov v RDS okrog konice razpoke (ravnina B)

**Figure 3:** Modified mesh model with 0,1% finite elements in plane strain around crack tip (plane B)

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^n \quad (1)$$

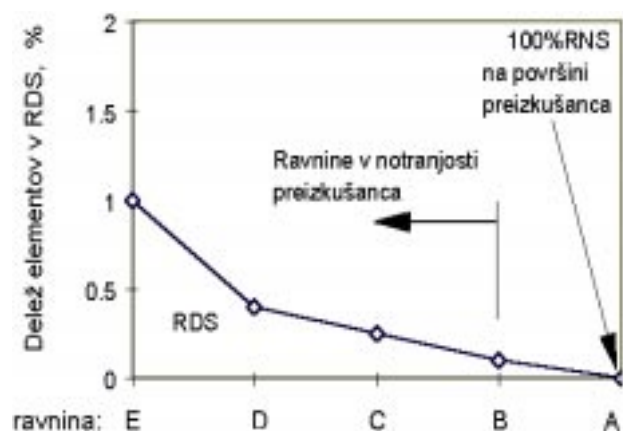
Parametri Ramberg-Osgoodove enačbe so ugotovljeni na osnovi enoosnih nateznih preizkušancev (Φ5 mm, po DIN 50125), ki so bili izdelani iz zvarnega spoja v smeri varkov. Tudi ti preizkusi so bili opravljeni pri -10°C. Vrednosti za σ<sub>0</sub>, α, in n so podane v tabeli 1. n je eksponent deformacijskega utrjevanja in je določen v skladu s standardom ASTM E 646-91.

Na osnovi Snedonovih enačb za σ<sub>x</sub>, σ<sub>y</sub> in τ<sub>xy</sub> so izračunane glavne napetosti σ<sub>1</sub>, σ<sub>2</sub>, in σ<sub>3</sub> iz enačb:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2)$$

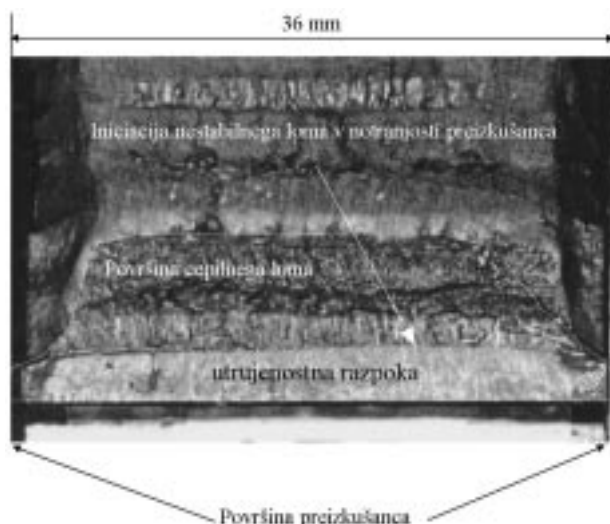
σ<sub>3</sub> = 0                      RNS

σ<sub>3</sub> = ν(σ<sub>1</sub> + σ<sub>2</sub>)        RDS



**Slika 4:** Porazdelitev deležev končnih elementov v RDS v numerično modeliranih ravninah

**Figure 4:** Distribution of percent of RDS finite elements in numerical modified planes



**Slika 5:** Prelomna površina preizkušanca, ki se je prelomil v prehodnem področju iz duktilnega h krhkemu lomu

**Figure 5:** Fractography of specimens broken in ductile-to-brittle temperature transition region

Ekvivalentne napetosti σ<sub>eq</sub> so izračunane kot von Misesova meja tečenja po enačbi:

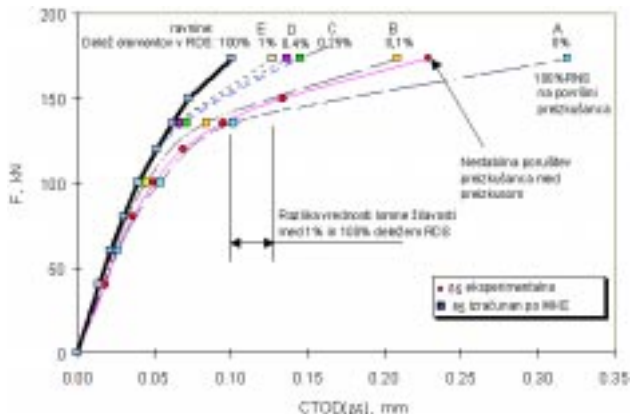
$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (3)$$

Konvencionalna teorija majhnih plastičnih deformacij je uporabljena pri izračunih MKE z uporabo programskega paketa ANSYS 5.0<sup>9</sup>.

### 3 REZULTATI IN RAZPRAVA

Izračuni MKE so bili opravljeni s postopnim naraščanjem sile, pri čemer je bilo simulirano lomno vedenje preizkušanca med eksperimentom. Tako so bili pri enaki vrednosti sile opravljeni izračuni na vseh mrežnih modelih (A, B, C, D, E in 100% RDS) z različnimi deleži elementov ob konici razpoke v RDS. Prav tako so bile za vsak mrežni model odčitane vrednosti značilnih pomikov CTOD(δ<sub>5</sub>), CMOD, v<sub>LLD</sub>. Vrednosti CMOD nam omogočajo izračun CTOD po standardiziranih postopkih BS 5762 in ASTM E 1290-93, medtem ko se vrednosti v<sub>LLD</sub> uporabljajo za izračun energijskega J-integrala kot parametra lomne žilavosti po ASTM E 813-88.

Zaradi preglednosti ponazoritve bomo uporabili le kritično odpiranje konice razpoke CTOD(δ<sub>5</sub>) kot merodajni parameter lomne žilavosti. Pri zvarnih spojih se je za določitev vrednosti kritičnega odpiranja ob konici razpoke kot primerna metoda izkazala neposredna meritev CTOD(δ<sub>5</sub>). S tem postopkom se je mogoče izogniti pomikom, ki se pojavljajo zaradi trdnostne neenakosti med osnovnim materialom, toplotno vplivanim področjem (TVP) in strjenim zvarnim spojem. Na sliki 6 so podane izračunane krivulje F-CTOD(δ<sub>5</sub>) za posamezno ravnino oziroma mrežni model z različnim deležem



Slika 6: Primerjava med eksperimentalno izmerjeno in numerično izračunanimi krivuljami F-CTOD( $\delta_5$ )

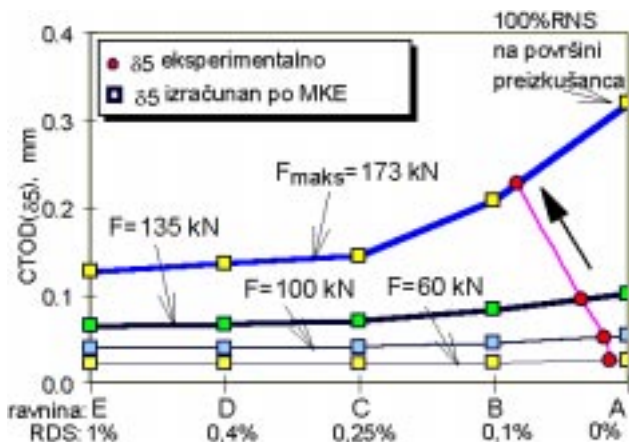
Figure 6: Comparison between experimental and numerical obtained F-CTOD( $\delta_5$ ) curves

RDS. S slike 6 je razvidno, da se eksperimentalno izmerjene vrednosti CTOD( $\delta_5$ ) z naraščanjem sile oddaljujejo iz ravnine, ki ustreza 100% RNS (ravnine A) proti modificirani ravnini B z 0,1% RDS.

Prav tako je s slike 6 razvidno, da se z večanjem deleža elementov v RDS ob konici razpoke (za enako vrednost sile) razlike med modificiranimi ravninami zmanjšujejo. Na primer, razlika med vrednostmi lomne žilavosti za ravnino z 1% RDS (ravnina E) in za ravnino s 100% RDS je manjša, kot razlika med ravninama z 0,1% RDS (ravnina B) in 0,25% RDS (ravnina C).

Na sliki 7 je nazorno prikazano odstopanje vrednosti CTOD( $\delta_5$ ) med posameznimi ravninami (A-E) v primerjavi z eksperimentalno izmerjenimi vrednostmi.

Ravnina A (100% RNS), ki ponazarja prosto površino preizkušanca, bo precenjevala odpornost materiala proti stabilnemu lomu, medtem ko bo naraščajoči delež RDS z nižjimi vrednostmi lomne žilavosti predstavljal odpornost materiala v notranjosti preizkušanca. Iz slike



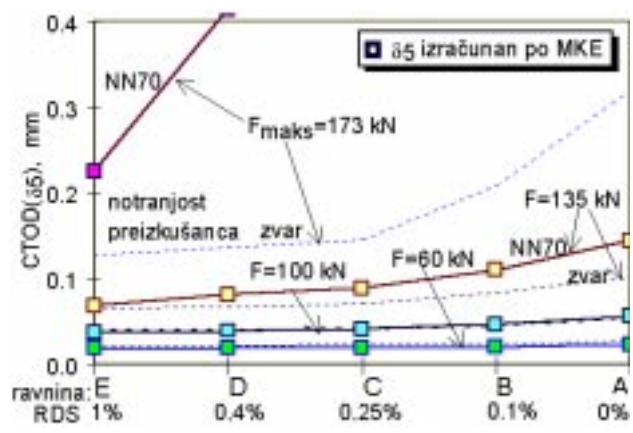
Slika 7: Odstopanje vrednosti CTOD( $\delta_5$ ) med posameznimi numerično modificiranimi ravninami (A-E)

Figure 7: Deviation of fracture toughness values CTOD( $\delta_5$ ) between numerical modified planes (A-E)

7 je opazno, da eksperimentalno lomno vedenje z naraščanjem obremenitve prične odstopati iz nadvladovanja RNS proti naraščajočem deležu RDS. Tako se eksperimentalno izmerjena odpornost zvara proti lomu najbolj približa modificiranemu modelu z manj kot 0,1% RDS elementov - ravnini B. To pomeni, da se lahko lomno vedenje zvarnega spoja na varjeni konstrukciji obravnava z enakim deležem RDS mrežnih elementov ob konici razpoke, kot ga je imel upogibni preizkušavec z 0,1% RDS področjem. Tako se tudi lahko določi nosilna obremenitev modificiranega numeričnega modela zvara za element na varjeni konstrukciji. Nosilna obremenitev je takrat enaka obremenitvi, pri kateri dosežemo enako vrednost kritičnega odpiranja konice razpoke, kot pri eksperimentu.

Za razliko od zvarnega spoja so lomnomehanska preizkušanja osnovnega materiala Nionicrala 70 (pod enakimi preizkuševalnimi pogoji) izkazala žilavo lomno vedenje in bistveno višje vrednosti kritičnega odpiranja konice razpoke v povprečju  $CTOD(\delta_5)_m = 0,6$  mm, pri  $\Delta a \approx 0,8$  mm. Z namenom, da se z numerično obdelavo zazna razlika med lomnim vedenjem žilavega osnovnega materiala in h krhkemu lomu nagnjenega zvarnega spoja, so bili izdelani numerični modeli iz osnovnega materiala z enakimi deleži končnih elementov v RDS, dolžino razpoke in pri enakih silah. Na sliki 8 so prikazane izračunane vrednosti CTOD za osnovni material v primerjavi z numeričnimi rezultati za zvarni spoj. Pri osnovnem materialu vrednosti odpiranja na konici razpoke hitreje naraščajo kot pri zvarnem spoju.

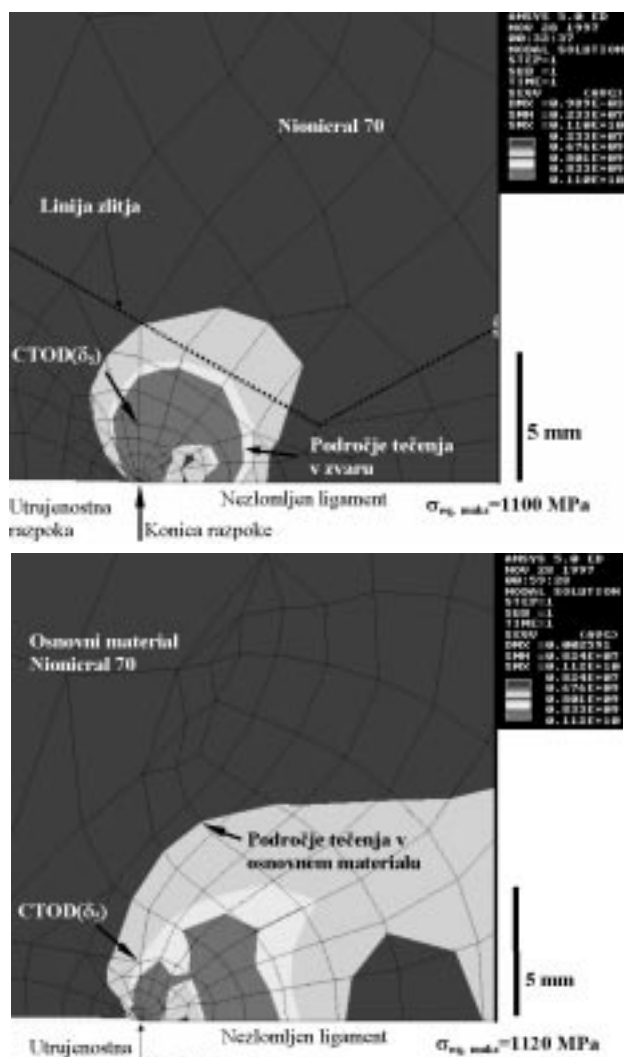
Tako so vrednosti CTOD pri osnovnem materialu za enako silo (zunaj linearne področja F-CTOD krivulje) bistveno večje od vrednosti CTOD za zvarni spoj. Višje trdnostne lastnosti zvarnega spoja (ang. "overmatching") proti osnovnemu materialu so eden od razlogov, ki prispevajo nižjim vrednostim CTOD( $\delta_5$ ) pri zvarnih spojih za enako vrednost sile. Drugi razlog je možno razbrati na osnovi primerjave med conama tečenja in deformacij-



Slika 8: Primerjava med izračunanimi vrednostmi CTOD( $\delta_5$ ) za nionicral 70 in visokotrnostni strjeni zvar

Figure 8: Comparison of numerical calculated values CTOD( $\delta_5$ ) between Nionicral 70 and overmatch weld metal

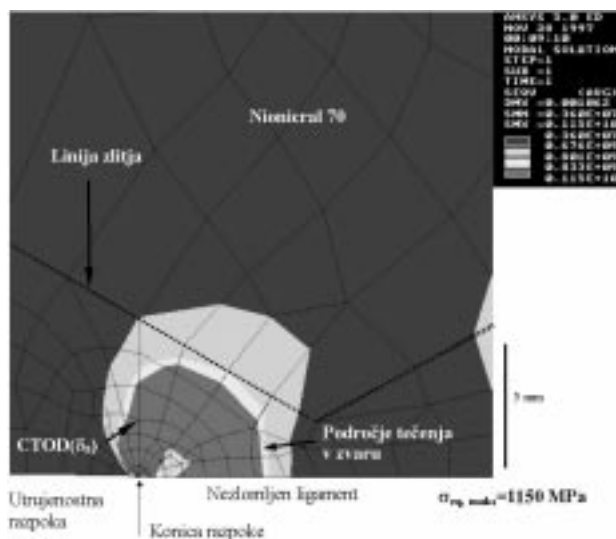




**Slika 9:** Primerjava med področji tečenja in deformacijskega utrjevanja a) strjenega zvarnega spoja in b) osnovnega materiala pri modelu z 0,25% deležu RDS in sili 173 kN

**Figure 9:** Comparison between flow and strain hardening zones of a) weld metal and b) base metal at modified model with 0,25% of plane strain and load of 173 kN

skega utrjevanja med zvarnim spojem in osnovnim materialom. Na **sliki 9** sta prikazani coni tečenja osnovnega materiala in zvarnega spoja za primer, ko je delež RDS enak 0,25% pri enotni sili  $F_{max} = 173$  kN. Opazno je, da je cona tečenja osnovnega materiala za enako vrednost von Misesove napetosti ( $\sigma_{eq} = 801$  MPa) bistveno večja od cone tečenja zvarnega spoja. S **slike 9a** (za delež RDS elementov 0,25%) in **slike 10**, ki je izračunana za merodajni delež 0,1% RDS, je opazno, da cona tečenja zvarnega spoja v trenutku porušitve v nobenem primeru ne seže zunaj območja strjenega zvara. Lahko sklepamo, da se TVP (zaradi višje meje plastičnosti in natezne trdnosti) vede kot ovira nadaljnjemu tečenju in deformacijskemu utrjevanju materiala. Ta omejitev povzroča, da pri zvarnem spoju pride do nestabilne porušitve pri nižjih vrtnostih lomne žilavosti kot pri osnovnem materialu. To



**Slika 10:** Prikaz področij tečenja in deformacijskega utrjevanja v trenutku nestabilnosti za modificiran model z 0,1% RDS elementov pri sili 173 kN

**Figure 10:** Flow and strain hardening zone at the moment of instability failure for modified model by 0,1% plane strain finite elements on the load 173 kN

pomeni, da imata položaj konice razpoke v strjenem zvaru proti TVP in s tem oblika zvara pomembno vlogo na stopnjo omejitve pri lomnem vedenju zvarnega spoja.

#### 4 SKLEPI

V raziskavi je bilo ugotovljeno, da je lomno vedenje zvarnega spoja odvisno od napetostnega in deformacijskega stanja na konici razpoke, pri čemer ima relativno majhen delež RDS (0,1%) odločilen vpliv na natančnost primerjave eksperimentalnih in numeričnih rezultatov. Pri zvarnih spojih na stopnjo omejitve poleg globine razpoke ( $a/W$ ), debeline  $B$ , temperature preizkušanja in načina obremenjevanja preizkušanca na lomno vedenje vpliva še trenutni položaj konice razpoke v strjenem zvaru glede na rob zvara oziroma TVP.

Na osnovi modificiranega numeričnega modela z 0,1% RDS in ob znanih povprečnih mehanskih lastnosti zvarnega spoja je mogoče s spremljanjem porazdelitve ekvivalentnih napetostnih polj napovedati porušitev zvarnega spoja v varjeni konstrukciji. Obravnavani visokotrdnostni zvarni spoj se bo nestabilno porušil pri obremenitvi, pri kateri je cona tečenja prišla na linijo zlitja oziroma na TVP.

**Zahvala:** Avtorji se iskreno zahvaljujejo Slovenskim železarnam - ACRONI Jesenice, d.o.o., za jeklo nionicral 70 in za izdelavo zvarnih spojev ter GKSS raziskovalnem centru, Inštitutu za raziskave materialov iz Geesthachta (pri Hamburgu) za izvedbo lomnomehanskih preizkusov.

## 5 LITERATURA

- <sup>1</sup> Dudderar T. D., Oregon R.: *Experimental Mechanics*, 11 (1971) 2, 49-56
- <sup>2</sup> Shimizu S., Takahaschi S., Shimada H.: *Experimental Mechanics*, 25 (1985) 3, 154-160
- <sup>3</sup> Kalthoff J. F.: *Handbook of Experimental Mechanics* (edited by Kobayashi A. S.) Prentice-Hall, Engelwood Cliffs-New York 1987, 430-500
- <sup>4</sup> Jecić S., Semenski D.: *Strojarstvo*, 34 (1992) 6, 215-233
- <sup>5</sup> Schwalbe K.-H., The Prediction of Failure Situations Using the CTOD Concept Based on the Engineering Treatment Model (ETM), *The Crack Tip Opening Displacement in Elastic-Plastic Fracture Mechanics Workshop on CTOD Methodology*, Geesthacht, Germany, April 23-25, 1985
- <sup>6</sup> Irwin G. R.: *Journal of Applied Mechanics*, 24 (1957) 3, 316-364
- <sup>7</sup> Konsta-Gdoutos M., Meletis E. I.: *Int. Journal of Fracture* 82: (1996) R11-R17
- <sup>8</sup> Johnson H. H.: *Materials Research and Standards*, 5 (1965) 442-445
- <sup>9</sup> ANSYS/ED 5.0, *Manual Guide*, 1995
- <sup>10</sup> GKSS Research Center, Displacement Gauge System for Application in Fracture Mechanics, *Patent Publication*, Geesthacht, 1991