

# VPLIV MEJE TEČENJA IN TEMPERATURE NA ODPORNOSTNE KRIVULJE J-R JEKEL S POVIŠANO TRDNOSTJO

## INFLUENCE OF YIELD STRENGTH AND TEMPERATURE ON J-R RESISTANCE CURVES OF HSLA STEELS

JANKO LEGAT<sup>1</sup>, N. GUBELJAK<sup>1</sup>, J. VOJVODIČ TUMA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fakulteta za strojništvo, Smetanova 17, 2000 Maribor

<sup>2</sup>Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, 1000 Ljubljana

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

Namen tega dela in eksperimentalnih raziskav je ugotavljanje vpliva meje tečenja in temperature preizkušnja na odpornost materiala proti stabilnemu širjenju razpoke (krivulje odpornosti J-R) za konstrukcijsko jeklo in dva mikrolegirana jekla s povišano trdnostjo. Vsi trije materiali so bili preizkušani v treh različnih stanjih: dobavljeno (normalizirano ali poboljšano), deformirano in deformacijsko starano stanje. Preizkusi so bili opravljeni na standardnih preizkušancih CT pri sobni temperaturi in pri temperaturi neduktilnega loma. Za določitev prirastka razpoke med preizkusom je bila uporabljena metoda elastične popustljivosti. Dobljeni rezultati kažejo, da pride pri jeklih z višjo mejo plastičnosti s spremembo stanja materiala in temperature do večjega padca odpornosti materiala proti stabilnemu širjenju razpoke kot pri jeklih z nižjo trdnostjo.

Ključne besede: integral J, odpornostne krivulje J-R, lomna žilavost

The aim of this research program was to study the influence of yield strength and temperature on the ductile crack growth resistance (J-R resistance curves) of a common construction steel and three HSLA (high strength low alloy) steels. Three different material conditions were observed: normalized condition (as-delivered), deformed state and aged state. The experiments were carried out on standard CT specimens at room temperature and at the temperature of nonductile tearing. The unloading compliance technique to determine the stable crack growth during the test was used. The results obtained show that HSLA steels with higher yield strength are more sensitive to the condition of the steel and to low temperature influence than lower-strength steels are.

Key words: integral J, resistance J-R curves, fracture toughness

### 1 UVOD

Mikrolegirana visokotrdnostna jekla in jekla s povišano trdnostjo so namenjena za izdelavo delov konstrukcij ali strojev, ki so izpostavljeni nateznim obremenitvam. Z manjšimi debelinami pri visokotrdnostnih jeklih je mogoče zagotoviti enako nosilnost konstrukcije (nižje troosno napetostno stanje), kot pa s splošnimi konstrukcijskimi jekli, ki se uporabljajo za tlačno obremenjene dele konstrukcij. S širjenjem uporabe teh jekel na različna področja konstrukcijske gradnje je posebna pozornost posvečena parametrom, ki zagotavljajo duktilnost, žilavost, sposobnost preoblikovanja in varivost teh jekel. Med izdelavo in obratovanjem jeklene konstrukcije so jekla lahko izpostavljena toplotnim vplivom, vplivom okolice in procesom staranja. Prav tako se tudi posamezni deli konstrukcije trajno preoblikujejo. S temi postopki se vpliva na spremembo mehanskih lastnosti in s

tem na nosilnost jeklene konstrukcije med obratovanjem. Zaradi tega je bil namen raziskovalnega dela podati primerjalno oceno odpornosti proti stabilnemu lomu med jekli z različnimi mejami plastičnosti in z različnimi stanji materiala. Lomnomehanski preizkusi so se izvajali na jeklih v treh različnih stanjih: A - dobavljeno stanje (normalizirano ali poboljšano), B - deformacijsko starano stanje (10% hladno deformirano + segrevanje na 250°C 30 minut), C - deformirano stanje (10% deformacije v hladnem na jeklih v dobavljenem stanju).

### 2 MATERIALI IN PREIZKUŠANJE

Lomnomehanske meritve so bile opravljene na dveh mikrolegiranih jeklih s povišano trdnostjo: NIOVAL 47, NIONICRAL 70A in na konstrukcijskem jeklu Fe 510 D (po ISO 1052-1982) (po JUS: "Č.0562" ali po DIN: "St 52-3 N"). Kemična sestava teh jekel je podana v **tabeli 1**.

**Tabela 1:** Kemična sestava mikrolegiranih jekel v masnih procentih

**Table 1:** Chemical compositions (weight %) of steels

Jeklo	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %	Cu %	Nb %	V %	Al %
NIOVAL 47	0,19	0,42	1,49	0,013	0,005	0,13	0,1	0,04	-	0,05	0,07	0,087
NIONICRAL 70	0,09	0,27	0,25	0,015	0,004	1,12	2,63	0,25	-	-	-	0,020
Fe510D(Č.0562)	0,17	0,32	1,28	0,02	0,009	0,21	0,23	0,05	0,35	0,03	-	0,045

**Tabela 2:** Oznake preizkušancev in mehanske lastnosti mikrolegiranih jekel, določene z nateznimi preizkusi (DIN 50125)**Table 2:** Marks of specimens and mechanical properties of HSLA steels obtained by round tensile testing (DIN 50125)

Jeklo	Oznake preizkušanca	R <sub>p0,2</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	e <sub>n</sub> %	n
NIOVAL 47	VA	442	610	13,7	0,131
	VB	647	726	4,7	0,073
	VC	627	684	4,5	0,035
NIONICRAL 70	NA	737	787	7,5	0,054
	NB	838	895	2,0	0,029
	NC	836	886	2,0	0,039
Fe 510D	CA	366	553	14,3	0,153
	CB	586	656	4,8	0,070
	CC	595	624	4,1	0,041

V **tabeli 2** so poleg mehanskih lastnosti (R<sub>p0,2</sub> - meja plastičnosti, R<sub>m</sub> - natezna trdnost, e<sub>n</sub> - inženirski raztezek pri maksimalni sili, n - eksponent deformacijskega utrjevanja) tudi razvidne oznake preizkušancev, kjer prva črka v oznaki (V, N ali C) pomeni vrsto jekla, druga pa stanje materiala (A, B ali C).

Preizkušanci so bili izrezani iz plošč 500x200x20 mm (NIOVAL 47, NIONICRAL 70), oziroma 500x200x25 mm (Fe 510D). Lomno mehanski preizkusi so bili izvedeni na standardnih<sup>1</sup> preizkušancih CT (ang. "Compact Tension") pri sobni temperaturi za vsa tri jekla in pri temperaturah neduktilnega loma za jekla NIOVAL 47 (T<sub>NDT</sub> = -72°C) in Fe 510D (T<sub>NDT</sub> = -92°C). Jeklo NIONICRAL 70 v dobavljenem stanju ima temperaturo neduktilnega loma T<sub>NDT</sub> = -115°C, za katero nismo imeli na razpolago primerne hladilne opreme. Za določitev odpornostne krivulje J-R sta bili v skladu s priporočili<sup>2,3</sup> uporabljeni metoda prekinjene obremenitve na seriji enakih preizkušancev (ang. "Multispecimen method") in metoda elastične popustljivosti pri delnih razbremenitvah enega preizkušanca (ang. "Single specimen method").

### 3 REZULTATI IN RAZPRAVA

Inženirske vrednosti J-integrala J<sub>0,2BL</sub> so kot rezultat lomnomehanskih preizkusov na sobni temperaturi zbrani v **tabeli 3**. Povprečni potek odpornostnih krivulj J-R na sobni temperaturi je podan na **sliki 1**. Opazno je, da imata obe poboljšani mikrolegirani jekli (NIOVAL 47 in NIONICRAL 70) višjo začetno odpornost proti stabilnemu lomu kot konstrukcijsko jeklo Fe 520D. Razmerje med J-R krivuljami jekel NIOVAL 47 in NIONICRAL 70 je značilno glede na razmere med mejami plastičnosti R<sub>p0,2</sub> in inženirskim raztežkom e<sub>n</sub>. NIONICRAL 70 bo zaradi višje stopnje izločilnega utrjevanja s karbonitridi in nitridi izkazal višje vrednosti R<sub>p0,2</sub> in e<sub>n</sub>, obenem pa bo izkazal manjšo odpornost proti stabilnemu širjenju razpoke glede na NIOVAL 47. Jeklo Fe 510D, v normaliziranem stanju, izkazuje kljub najnižjim vrednostim R<sub>p0,2</sub> in višjim e<sub>n</sub> najnižjo začetno odpornost proti stabilnemu lomu. Pri tem jeklu zaradi višjega eksponenta de-

formacijskega utrjevanja n lomna odpornost materiala z rastjo razpoke narašča in bo v končni točki odpiranja v povprečju dosegla enako vrednost J integrala J<sub>k</sub> kot pri poboljšanih jeklih.

Pri jeklih, ki so bila po deformaciji starana, pa prihaja do nadaljnega povišanja meje plastičnosti R<sub>p0,2</sub> ob hkrati skoraj nespremenjenem rastezku. To je posledica procesa umetnega staranja (T = 250°C za 30'), ker po hladni deformaciji prihaja do tvorbe nasičene Cottrelove atmosfere intersticijskih atomov (ogljika in dušika) okrog dislokacij, katerih gibanje zato postane ovirano. Posledica tega je povišana napetost tečenja in premik krivulje prehoda iz žilavega v krhko stanje k višjim temperaturam. Zaradi tega vsa tri jekla izkazujejo najnižjo odpornost proti iniciaciji in stabilnem širjenju razpoke z nižjo stopnjo nadaljnega deformacijskega utrjevanja, kot je prikazano na **sliki 2** in podano v **tabeli 3**.

V deformacijskem stanju, za razliko od dobavljenega stanja, kot je prikazano na **sliki 3**, pa vsa tri jekla izkazujejo nižjo odpornost proti iniciaciji in stabilnemu širjenju razpoke z nižjo stopnjo nadaljnega deformacijskega utrjevanja.

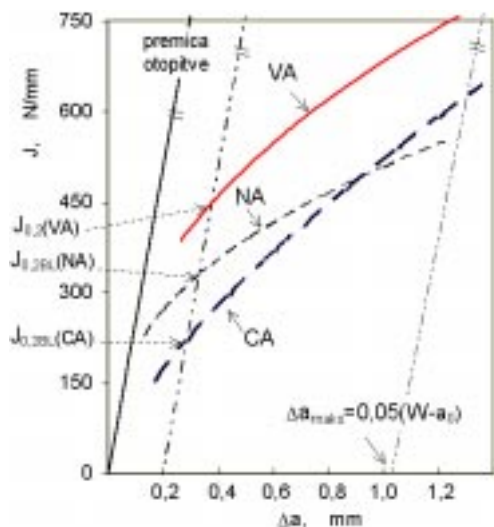
Vendar so inženirske vrednosti J<sub>0,2BL</sub> kot rezultati lomnomehanskih preizkusov nekoliko višje glede na jekla v staranem stanju. Na osnovi primerjave odpornostnimi krivuljami J-R med iz **slik 1, 2 in 3** je opazno, da sta poboljšani jekli najbolj občutljivi na stanje materiala.

Konstrukcijsko jeklo, ki v dobavnem stanju izkazuje najnižjo vrednost iniciacije, bo v staranem in deformiranem stanju izkazalo najmanjši padec vrednosti J<sub>0,2BL</sub> kot parametra lomne žilavosti. Prav tako na osnovi primerjav med odpornostnimi krivuljami J-R je opazno, da se vpliv deformacijskega stanja najbolj izraža pri nižanju eksponenta deformacijskega utrjevanja n, medtem ko starano stanje vpliva bolj izrazito na višino dosežene vrednosti J<sub>k</sub>-integrala v končni točki odpiranja.

Med lomnomehanskimi preizkusi na jeklih NIOVAL 47 in Fe 510D pri nizkih temperaturah so se vsi preizkušanci krhko zlomili. Tako so krivulje v diagramu F-CMOD sedaj bistveno krajše, saj je npr. pri jeklu NIOVAL 47 kritična sila (zlom) dosežena za dobavljeno stanje že pri ≈0,5 mm odpiranja CMOD oziroma pri ≈0,35 mm za deformirano in pri ≈0,27 mm za starano stanje. S **slike 4** je razviden zelo majhen raztros poteka eksperimentalnih krivulj F-CMOD, tako da krivulje, dobljene pri sobni temperaturi in pri -84°C za različna stanja (A, B, C), praktično sovpadajo, le da so krivulje pri nizkih temperaturah bistveno krajše. Ker so se vsi preizkušanci krhko zlomili, je sedaj poleg začetne relativne dolžine razpoke a<sub>0</sub>/W, sile F in J-integrala pri zlomu v **tabeli 4** podan še kritični faktor intezivnosti napetosti, izračunan iz vrednosti J<sub>c</sub> z izrazom<sup>1</sup>:

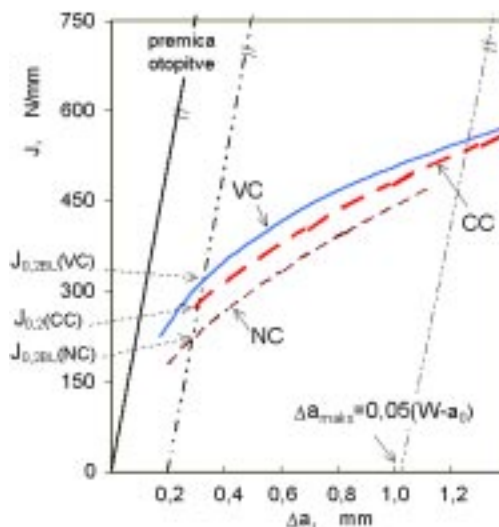
$$K_{Jc} = \sqrt{\frac{J_c E}{1-\nu^2}} \quad (1)$$

kjer je Poissonovo število  $\nu = 0,3$ .



Slika 1: Povprečni primeri odpornostne krivulje J-R mikrolegiranih jekel na sobni temperaturi v dobavljenem stanju

Figure 1: Average examples of J-R resistance curves of HSLA steels at room temperature and normalized condition



Slika 3: Povprečni primeri odpornostne krivulje J-R za deformirano stanje mikrolegiranih jekel pri sobni temperaturi

Figure 3: Average examples of J-R resistance curves of HSLA steels at room temperature and deformed state

Tabela 3: Povprečne vrednosti lomnomehanskih preizkusov pri sobni temperaturi

Table 3: Average values of the fracture toughness testing at room temperature

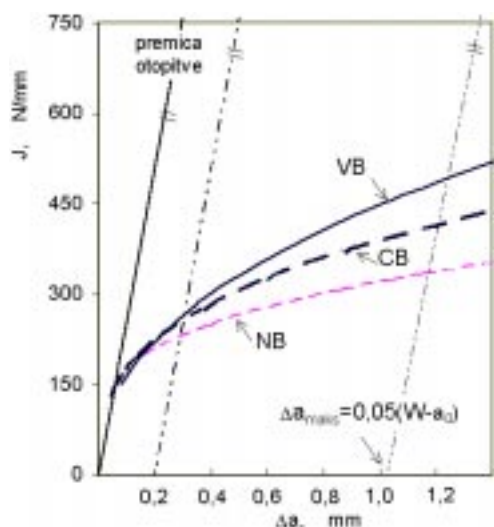
Oznaka	$a_0/W$	$\Delta a$ mm	$J_{0,2BL}$ N/mm	$\Delta a_{0,2BL}$ mm	$J_k$ N/mm
VA	0,549	1,659	440	0,381	821
VB	0,566	1,445	265	0,307	592
VC	0,556	2,975	320	0,326	550
NA	0,562	1,129	327	0,325	556
NB	0,563	1,516	230	0,280	332
NC	0,560	1,156	231	0,279	457
CA	0,575	1,554	220	0,280	320
CB	0,552	1,430	254	0,298	410
CC	0,559	1,591	273	0,304	530

Tabela 4: Povprečni vrednosti lomne žilavosti izmerjene pri temperaturah  $T_{NDT}$

Table 4: Average values of fracture toughness measured at  $T_{NDT}$  temperatures

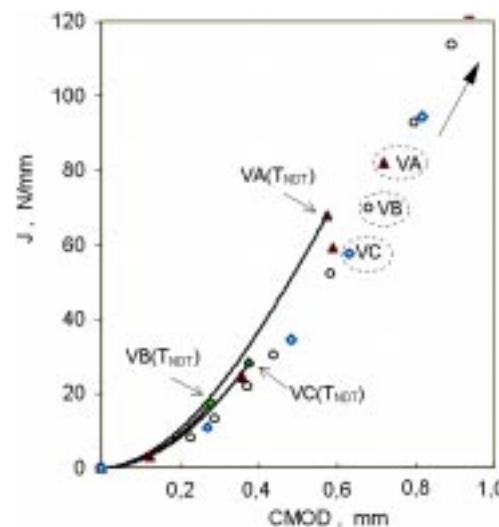
$T_{NDT}$ °C	Oznaka	$a_0/W$	$F_c$ kN	$J_c$ N/mm	$K_{Jc}$ MPa.m <sup>0,5</sup>
-84°C	VA	0,554	31,9	53,6	109
	VB	0,559	19,3	19,5	66
	VC	0,553	22,7	26,5	77
-72°C	CA	0,543	39,3	33,1	258
	CB	0,562	27,6	65,1	116
	CC	0,565	26,6	46,7	100

Povprečni rezultati preizkusov pri nizkih temperaturah, ki so zbrani v tabeli 4, kažejo na zmanjšanje od-



Slika 2: Povprečni primeri odpornostne krivulje J-R za starano stanje mikrolegiranih jekel pri sobni temperaturi

Figure 2: Average examples of J-R resistance curves of HSLA steels at room temperature and aged state



Slika 4: Primerjava krivulj J-CMOD za jeklo niocal 47 pri sobni temperaturi in pri -84°C

Figure 4: Comparison of J-CMOD curves of niocal 47 steel between room temperature and  $T_{NDT} = -84^\circ\text{C}$

pornosti materiala proti stabilnemu širjenju razpoke, saj so vrednosti kritičnega J-integrala  $J_c$  tudi do 90% nižje, kot pri sobni temperaturi.

Nadalje je razvidno še dodatno znižanje žilavosti  $J_c$  (oziroma  $K_{Jc}$ ) pri deformiranem stanju (za  $\approx 50\%$ ) in še bolj pri staranem stanju (za  $\approx 70\%$ ). Prav tako je opazno, da se rastros žilavosti z deformacijo, predvsem pa s staranjem in z nižanjem temperature, znižuje. To pomeni, da stanje jekla z nižanjem temperature postaja odločilno za lomno vedenje konstrukcije.

#### 4 SKLEPI

Mikrolegirana jekla s povišano trdnostjo imajo v primerjavi s konstrukcijskimi jekli v dobavljenem stanju pri sobni temperaturi višjo odpornost proti iniciaciji stabilne rasti razpoke. Pri hladni deformaciji ali staranju jekla pa prihaja do nižanja žilavosti, ki je tudi nižja od žilavosti (normaliziranega) konstrukcijskega jekla z nižjo mejo plastičnosti.

Učinek nižanja odpornosti materiala proti stabilnemu širjenju razpoke postaja bolj izrazit z nižanjem temperature, pri čemer je stanje jekla odločilno za lomno vedenje konstrukcije. Zaradi tega je treba pri snovanju jeklene konstrukcije predvideti spremembo lomne odpornosti jeklene konstrukcije med obratovanjem.

#### ZAHVALA

Avtorji se zahvaljujejo Železarni Jesenice - ACRONI, d.o.o., za dobavo in pripravo jekel za lomnomehanska preizkušanja.

#### 5 LITERATURA

- <sup>1</sup> ASTM E 813-88: *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03.01, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990
- <sup>2</sup> Schwalbe, K.-H., Neale, B. K. and Heerens, J.: EFAM GTP 94, Geestacht 1994
- <sup>3</sup> European Structural Integrity Society.: ESIS P2-1992