

# Izbira lomnih testnih metod za karakterizacijo drobnozrnatega mikrolegiranega jekla Nioval 47

## Selection of Fracture Test Methods for the Characterization of Fine Grained Micro Alloyed Steel Nioval 47

Vojvodič Gvardjančič J.<sup>1</sup>, IMT Ljubljana

V prispevku so opisane lomno mehanske preiskave za določitev nizkotemperaturne meje uporabnosti jekla Nioval 47. Lomne žilavosti, izračunane po korelacijskih izrazih za različna temperaturna območja, se zelo dobro ujemajo z ASME  $K_{IC}$  oziroma  $K_{IR}$  krivuljami po Marstonu<sup>3</sup>.

**Ključne besede:** mikrolegirana jekla, nizkotemperaturna žilavost, mehanika loma

*In this article fracture test methods for determination of low-temperature range for the steel Nioval 47 are presented. The values of fracture toughness which are calculated by means of correlation expressions for various temperature ranges are in good correspondance to ASME  $K_{IC}$  or  $K_{IR}$  curves of Marston<sup>3</sup>.*

**Key words:** micro - alloyed steels, low temperature toughness, fracture mechanics

### 1. Uvod

Drobnozrnata mikrolegirana jekla uporabljamo za izdelavo zahtevnih jeklenih konstrukcij, ki obratujejo tudi pri nizkih temperaturah od -20 do -60°C. Čeprav tovrstne konstrukcije dimenzioniramo z računalniško podprtimi numeričnimi metodami kot je metoda končnih elementov, ob upoštevanju tako geometrijskih nelinearnosti, nehomogenosti materiala in začetnih geometrijskih nepopolnosti, zaostalih napetosti itd., pa moramo prav zaradi nevarnosti krhkega loma kontrolirati konstrukcije tudi s stališča mehanike loma.

Vzporedno z razvojem lomne mehanike kot znanstvene discipline, so se razvijale tudi preizkusne metode za določevanje nizkotemperaturne meje, do katere je uporaba jekel s pretežno feritno mikrostrukturo, še varna.

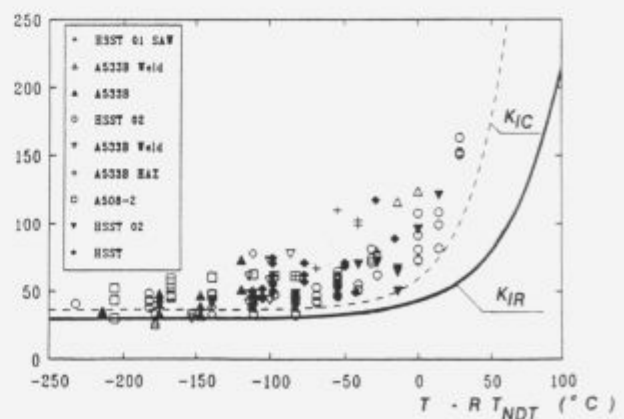
Razvoj mehanike loma lahko delimo v tri faze, ki jih po Tysonu<sup>1</sup> poimenujemo kot empirično, linearno elastično ter elasto - plastično. Vsaka od teh faz karakterizira razvoj specifičnih preizkusnih metod za ocenjevanje kovinskih materialov. Standardizirane preizkusne metode so navedene v tabeli 1.

### 2. Teoretični del

Razvoj varnega projektiranja zahtevnih konstrukcij izdelanih iz jekel s feritno mikrostrukturo, je privedel do vrste postop-

kov za določevanje žilavosti, ki jih ni mogoče kar enostavno povezati.

Odvisnost referenčnega faktorja intenzitete napetosti  $K_{IR}$  od temperature razlike ( $T - RT_{NDT}$ ) je prikazana na sliki 1.  $K_{IR}$  predstavlja spodnjo ovojnico vse izmerjenih vrednosti lomnih žilavosti ( $K_{IC}$ ,  $K_{IC}$ ,  $K_{Ia}$ ). Diagram je povzet po Marstonu<sup>2,3</sup>. referenčna temperatura ničelne duktilnosti  $RT_{NDT}$  pa je odvisna tako od temperature ničelne duktilnosti  $T_{NDT}$ , kot tudi od temperature, ki ustreza določeni referenčni vrednosti udarne žilavosti po Charpyju oziroma določeni prečni razširitvi preizkušanca<sup>2</sup>.



Slika 1: ASME  $K_{IC}$  oz.  $K_{IR}$  krivulji po Marstonu<sup>2,3</sup>  
Figure 1: ASME  $K_{IC}$  or  $K_{IR}$  curves of Marston<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> dr. Jelena VOJVODIČ GWARDJANČIČ, dipl. inž. gradb.  
Inštitut za kovinske materiale in tehnologije  
Lepsi pot 11, 61000 Ljubljana

**Tabela 1:** Standardizirane lomno mehanske preizkusne metode<sup>1</sup>

Standard	Preizkusna metoda	Opomba
ASTM E 23	Udarne žilavost po Charpyju (J)	Udarne; majhni preizkušanci; topa zarez; merimo absorbirano energijo.
ASTM E 436	Drop-weight tear	Udarne; plošča debeline 3,2 do 19,1 mm; plitva vtisnjena zarez; merimo delež strižne deformacije (videz preloma).
ASTM E 604	Dynamic tear	Udarne; plošča debeline 4,8 do 15,9 mm; globoka vtisnjena zarez; merimo absorbirano energijo.
ASTM E 208	Drop-weight NDT	Udarne; plošča debeline 15,9 do 25,4 mm; ostra zarez; merimo prehodno temperaturo.
ASTM E 399	Lomna žilavost pri ravninskem deformacijskem stanju (Plain-strain fracture toughness)	Poljubna hitrost obremenjevanja; spremenljiva debelina preizkušancev; ostra utrujenostna razpoka; merimo $K_{IC}$ .
ASTM E 813	Elastoplastična žilavost J-integral (Elastic-plastic toughness (J))	Poljubna hitrost obremenjevanja; spremenljiva debelina preizkušancev; ostra utrujenostna razpoka; merimo $J_{IC}$ .
BS 5762	COD	Počasno obremenjevanje; velika debelina preizkušancev (full section); ostra utrujenostna razpoka; merimo odpiranje razpoke, ko ta začne napredovati.

Obe krivulji, prikazani na **sliki 1**, lahko matematično zapišemo v naslednji obliki:

$$K_{IK} = 29.5 + 1.344 \exp(0.0261(T - RT_{NDT} + 89)) \quad (1)$$

$$K_{IC} = 36.5 + 3.084 \exp(0.036(T - RT_{NDT} + 56)) \quad (2)$$

kjer je enota za lomno žilavost  $MPa m^{1/2}$ , temperatura pa je merjena v  $^{\circ}C$ .

V literaturi so navedeni številne empirične korelacije med lomno žilavostjo  $K_{IC}$  in udarno žilavostjo po Charpyju (CVN) oziroma napetostjo tečenja ( $\sigma_{YS}$ ). Uporabili smo naslednje:

**Barsom - Rolfe**<sup>5</sup>:

$$K_{IC} = 0.22 E (CVN)^{3/2} \quad (3)$$

Enačba (3) velja za nizkotemperaturno območje, modul elastičnosti  $E$  je izražen v GPa, lomna žilavost  $K_{IC}$  v  $MPa m^{1/2}$  in udarna žilavost CVN v J.

**Barsom - Rolfe - Novak**<sup>6,7</sup>:

$$K_{IC} = \sigma_{YS} ((0.646 CVN/\sigma_{YS}) - 0.00635)^{3/2} \quad (4)$$

Enačba (4) velja za zgornji nivo žilavosti, lomna žilavost  $K_{IC}$  je izražena v  $MPa m^{1/2}$ , udarna žilavost CVN v J in napetost tečenja v MPa.

**Shakeshaft**<sup>8</sup>:

$$K_{IC} = 0.717 \sigma_{YS} \quad (5)$$

Enačba (5) velja za nizkotemperaturno območje, enota za lomno žilavost je  $MPa m^{1/2}$ , napetost tečenja pa je izražena v MPa.

**Langford**<sup>9</sup>:

$$K_{IC} = 14.63 (CVN)^{1/2} \quad (6)$$

Enačba (6) velja za nizkotemperaturno območje, enota za lomno žilavost je  $MPa m^{1/2}$ , udarna žilavost CVN je izražena v J.

### 3. Eksperimentalni del

Za preiskave smo izbrali drobnozrnato mikrolegirano jeklo Nioval 47 debeline 20 in 65 mm. Kemijska sestava jekla je zbrana v **tabeli 2**.

**Tabela 2:** Kemijska sestava jekla v ut. - %

Vrsta jekla (debelina)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	V	Al	N
NIOVAL 47 (20 mm)	0.19	0.42	1.49	0.013	0.005	0.13	0.10	0.04	-	0.050	0.07	0.087	0.006
NIOVAL 47 (65 mm)	0.14	0.33	1.53	0.014	0.005	0.016	0.015	0.01	-	0.042	0.07	0.026	0.006

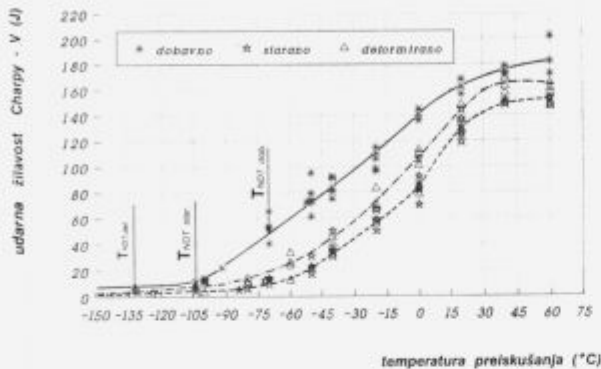
Jeklo smo preiskali v dobavnem, deformiranem in staranem stanju. Z dobavnim stanjem označujemo jeklo, ki je bilo dobavljeno v normaliziranem izhodnem stanju. S staranim stanjem označujemo jeklo, kjer smo preizkušance starali z valjanjem v hladnem z 10 % stopnjo deformacije ter 1/2 urnim ogrevanjem pri temperaturi 250 $^{\circ}C$ . Jeklo debeline 20 mm smo preiskali tudi v deformiranem stanju (10 % deformacija v hladnem).

Iz pločevine smo izdelali Charpyjeve preizkušance z V zarezom za merjenje udarne žilavosti, ploščate upogibne preizkušance tipa P3 po ASTM E 208 dimenzij 15,9 × 127 mm s krhkim navarom na površini za merjenje temperature ničelne duktilnosti. Izdelali smo tudi večje število cilindričnih nateznih preizkušancev premera 10 mm za določevanje konvencionalnih mehanskih lastnosti jekla pri nizkih temperaturah ter večje število cilindričnih nateznih preizkušancev z zarezom po obodu za merjenje lomne žilavosti pri nizkih temperaturah. Merjenje lomne žilavosti smo opravili s CT preizkušanci z modificirano zarezom po ASTM E 399-83.

Vsi preizkušanci so bili orientirani prečno, torej tako, da je bila vzdolžna os preizkušancev pravokotna na smer valjanja. Zareze na drop weight preizkušancih pa niso mogle biti orientirane od stranskih ploskev pločevine navznoter, torej z boka pločevine tako, kot pri žilavostnih preizkušancih, pač pa le z zgornje oziroma spodnje površine pločevine, torej z glavnih površin ploščatih preizkušancev proti notranjosti.

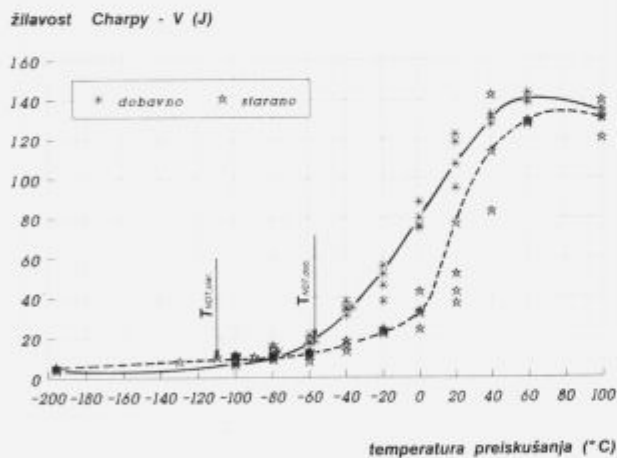
#### 4. Rezultati preiskav

V diagramih na slikah 2 in 3 so prikazane udarne žilavosti po Charpyju v odvisnosti od temperature testiranja. V diagrame smo vnesli tudi izmerjene temperature ničelne duktilnosti  $T_{NDT}$  določene z Drop Weight testom. Izmerjene vrednosti lomne žilavosti  $K_{IC}$  so zbrane v tabeli 3.



Slika 2: Odvisnost udarne žilavosti po Charpyju od temperature preizkušanja za jeklo Nioval 47 debeline 20 mm. Vrisane so tudi  $T_{NDT}$  temperature za vsa tri stanja

Figure 2: Relation between Charpy - V notch toughness and testing temperatures for steel Nioval 47 thickness 20 mm. The arrows indicate the nil ductility temperatures



Slika 3: Odvisnost udarne žilavosti po Charpyju od temperature preizkušanja za jeklo Nioval 47 debeline 65 mm. Vrisani sta tudi  $T_{NDT}$  temperaturi za obe stanji

Figure 3: Relation between Charpy - V notch toughness and testing temperatures for steel Nioval 47 thickness 65 mm. The arrows indicate the nil ductility temperatures

Tabela 3: Izmerjene vrednosti lomne žilavosti  $K_{IC}$

Vrsta materiala in debelina	$K_{IC}$ izmerjeni [MPa√m]			Udarne žilavost po Charpyju [J]			Stanje materiala
	$T_{NDT-20}$	$T_{NDT}$	$T_{NDT+20}$	$T_{NDT-20}$	$T_{NDT}$	$T_{NDT+20}$	
Nioval 47 (20 mm)	78,0	107,8	146,0	22	50	72	dobavno
Nioval 47 (65 mm)	69,5	85,5	107,0	13	18	35	dobavno
Nioval 47 (20 mm)	53,0	63,0	73,0	3	4	5	starano
Nioval 47 (65 mm)	56,5	58,2	65,5	8	10	10	starano
Nioval 47 (20 mm)	55,0	59,5	74,0	1	2	3	deformirano

Pri naših raziskavah<sup>10,11</sup> smo našli dve korelaciji med lomno žilavostjo  $K_{IC}$  in zarezno Charpyjevo žilavostjo CVN in sicer za jekla v dobavnem stanju v obliki:

$$K_{IC} = 15,11 CVN^{0,616} \quad (7)$$

in za starano stanje:

$$K_{IC} = 35,10 CVN^{0,321} \quad (8)$$

Enačbi (7) in (8) sta veljavni v območju temperature ničelne duktilnosti, to je v območju udarne žilavosti po Charpyju do 40J.

Rezultati meritev J integrala<sup>10,12,13</sup> so zbrani v tabelah 4 in 5.

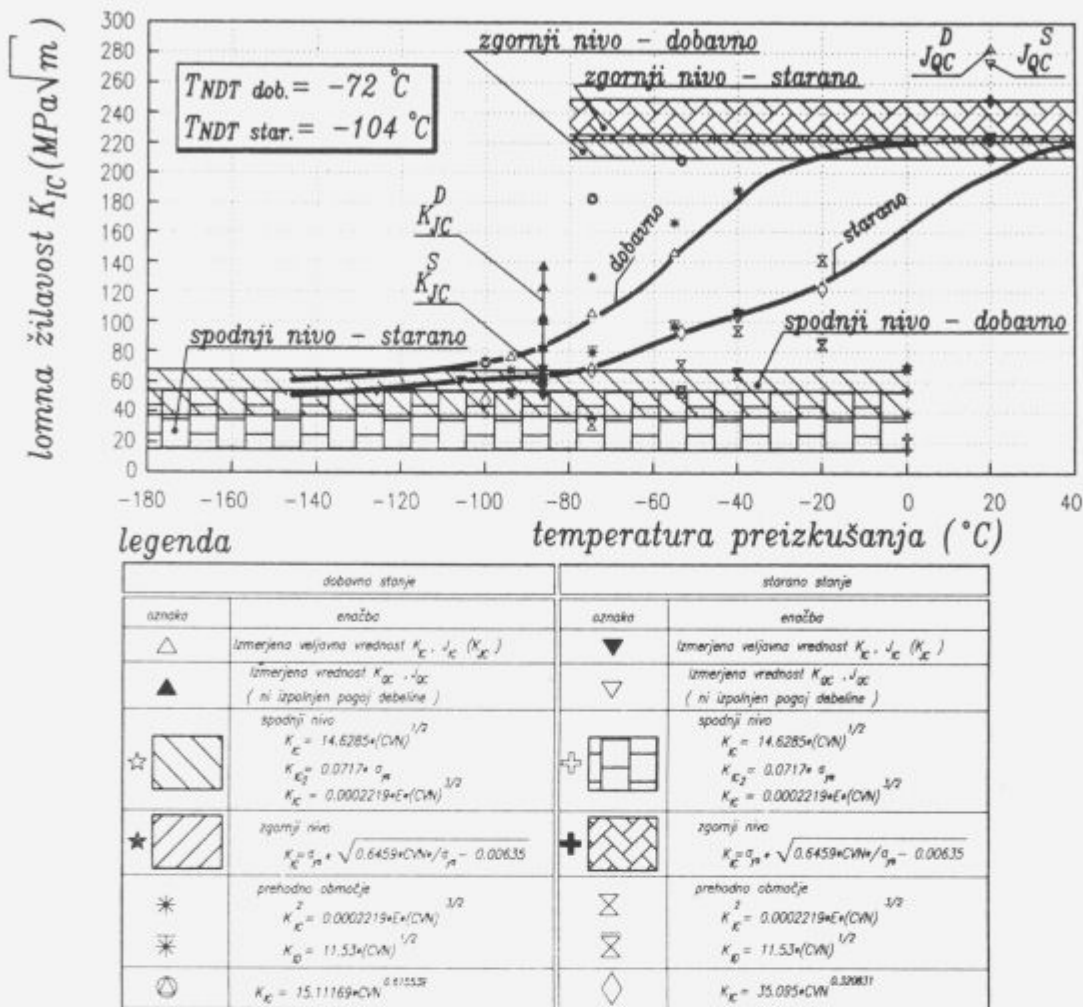
Tabela 4: J integral pri sobni temperaturi

Vrsta materiala	Stanje	Oznaka preiskovalca	$a_0$ (mm)	$a_0/W$	$\Delta a$ (mm)	$J_0$ (N/mm)	$J_k$ (N/mm)	CTOD <sub>0</sub> (mm)
DOBAVNO		VA1	27,449	0,549	1,659	516,3	821,4	0,795
		VA2	28,052	0,561	2,038	484,6	873,3	0,699
		VA3	28,089	0,562	1,142	445,6	611,9	0,659
		VA4	27,388	0,548	0,418	-	450,2	-
NIOVAL 47	STARANO	VB1	27,931	0,559	1,547	229,3	345,0	0,223
	(10% hl. def.)	VB2	28,299	0,566	1,445	242,7	364,3	0,255
	+	VB3	27,797	0,556	1,531	228,7	453,0	0,233
	250°C/30'	VB4	31,881	0,638	1,511	218,6	323,9	0,221
		VC1	28,358	0,567	3,029	338,2	749,2	0,379
DEFORMIRANO	(10% hl. def.)	VC2	28,564	0,571	3,166	346,6	750,3	0,380
		VC3	27,823	0,556	3,377	323,2	858,5	0,332
		VC4	29,766	0,595	1,989	302,7	540,3	0,314

Tabela 5: J integral pri nizkih temperaturah

Vrsta materiala	Stanje	Temp. preisk. (°C)	Oznaka preiskus.	$A_0$ (mm)	$A_0/W$	$F_c$ (kN)	CTOD <sub>c</sub> (mm)	$J_c$ (N/mm)	$K_{IC_c}$ (MPa√m)
DOBAVNO			VA7	26,820	0,537	39,025	0,095	80,1	136,0
			VA8	27,412	0,545	35,638	0,081	67,8	125,1
		-84	VA9	28,600	0,571	25,127	0,033	30,1	83,3
			VA10	27,800	0,553	31,710	0,055	46,9	104,0
			VA11	28,050	0,566	28,050	0,055	43,1	99,7
	NIOVAL 47	STARANO		VB7	27,756	0,556	23,910	0,025	29,2
(10% hl. def.)			VB8	27,591	0,552	14,910	0,007	9,8	47,5
+		-84	VB9	27,845	0,559	19,020	0,014	17,4	63,4
250°C/30'			VB10	28,075	0,564	17,300	0,012	15,2	59,2
			VB11	28,344	0,566	16,380	0,009	13,7	56,2
			VC7	27,753	0,556	22,771	0,021	26,2	77,7
DEFORMIRANO	(10% hl. def.)	-84	VC8	27,753	0,555	23,126	0,021	28,3	80,8
			VC9	27,276	0,547	27,330	0,030	36,9	92,3
			VC10	27,327	0,548	16,540	0,008	12,3	53,2
			VC11	27,832	0,558	23,632	0,022	28,9	81,6

Rezultati merjenja lomne žilavosti  $K_{IC}$ ,  $J_{IC}$  in izračunanih vrednosti po korelacijskih enačbah (3-8) so za jeklo Nioval 47 debeline 20 in 65 mm prikazani na slikah 4 in 5.



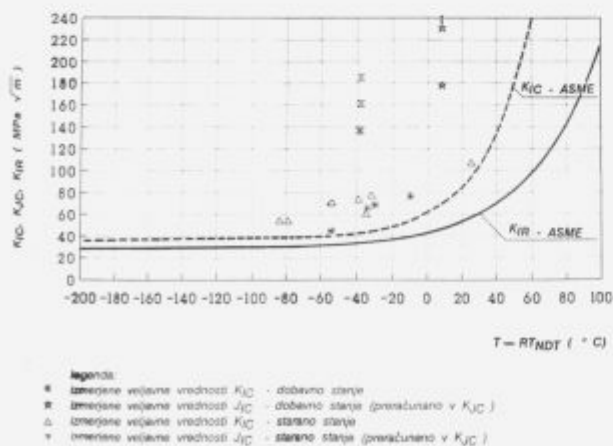
Slika 4: Primerjava izmerjenih vrednosti lomnih žilavosti z izračunanimi po korelacijskih enačbah za jeklo Nioval 47 debeline 20 mm v dobavnem in staranem stanju v odvisnosti od temperature

Figure 4: The comparison of the valid measured fracture toughness with the values calculated with correlation equations for steel Nioval 47 thickness 20 mm in as received and aged condition vs. temperatures

### 5. Diskusija

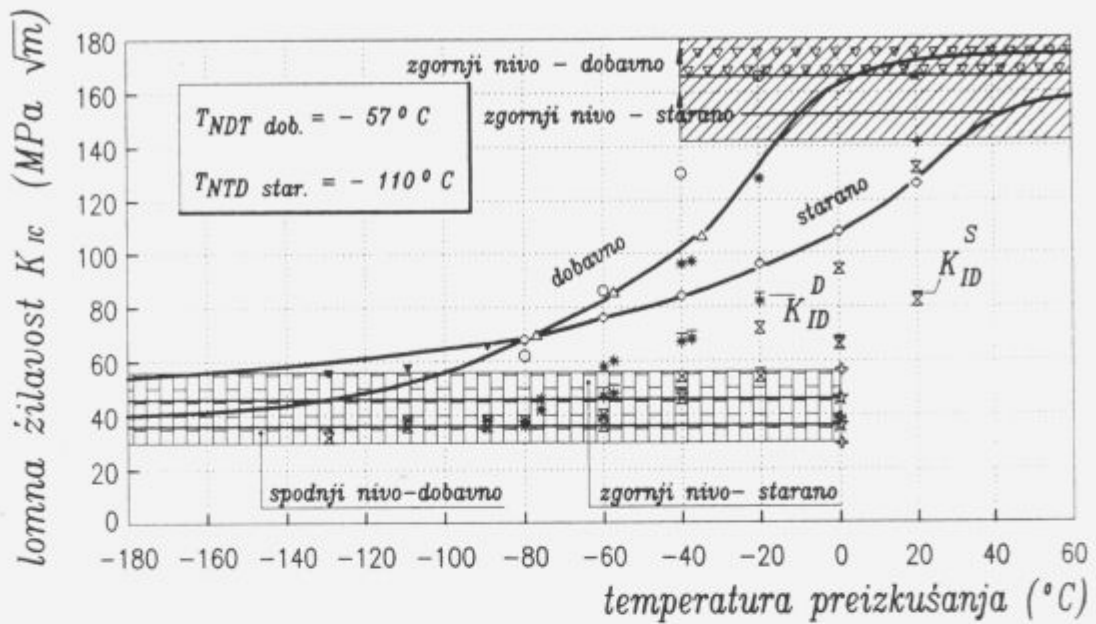
Deformacijsko staranje drobnozrnatega mikrolegiranega jekla Nioval 47 povzroči zamik temperature prehoda udarne žilavosti po Charpyju k višjim temperaturam ob sočasnem znižanju temperature ničelne duktilnosti  $T_{NDT}$  obravnavanega jekla.

Ugotovljeno je bilo, da ima jeklo v staranem stanju pri temperaturi ničelne duktilnosti višjo lomno žilavost  $K_{IC}$  kot pa jeklo v dobavnem stanju sicer enako Charpyjevo žilavostjo (enačbi 7.8). Staranje jekla namreč močno zniža energijo potrebno za iniciranje razpoke v zrezu Charpyjevega preizkušanca, medtem ko ostane energija propagacije skoraj nespremenjena. Pri enaki lomni žilavosti  $K_{IC}$  mora biti zato Charpyjeva žilavost jekla v dobavnem stanju večja od Charpyjeve žilavosti staranega jekla prav za energijo iniciacije. Čeprav je naša korelacija (enačba 7) podobna korelaciji Barsom-Rolfe<sup>3</sup> (potenčna, z eksponentom 0,5) pa dejstvo, da za nizkotemperaturno območje najdemo v literaturi<sup>8</sup> tudi korelacije, ki povezujejo  $K_{IC}$  z napetostjo tečenja, govori v prid naših dveh enačb. Jeklo v staranem stanju bi imelo zaradi povišane napetosti tečenja tudi po korelaciji (5) izračunano višjo lomno žilavost, kot jeklo v dobavnem stanju, do enakega zaključka pa pripelje tudi uporaba enačb (7) in (8).



Slika 6: Odvisnost referenčnega faktorja intenzitete napetosti  $K_{IR}$  od referenčne temperature ničelne duktilnosti  $RT_{NDT}$

Figure 6: The dependence of the reference stress intensity factor  $K_{IR}$  on the nil ductility reference temperature  $RT_{NDT}$



legenda

dobavno stanje		starano stanje	
oznaka	enačba	oznaka	enačba
△	izmerjena veljavna vrednost $K_{IC} \downarrow K_{IC} (K_{IC})$	▽	izmerjena veljavna vrednost $K_{IC} \downarrow K_{IC} (K_{IC})$
▲	izmerjena vrednost $K_{IC} \downarrow K_{IC}$ (ni izpolnjevale pogoji debeline)	▽	izmerjena vrednost $K_{IC} \downarrow K_{IC}$ (ni izpolnjevale pogoji debeline)
☆	spodnji nivo $K_{IC} = 14,6285 \cdot (CWN)^{1/2}$ $K_{IC2} = 0,0717 \cdot \sigma_m$ $K_{IC} = 0,0002219 \cdot E \cdot (CWN)^{1/2}$	+	spodnji nivo $K_{IC} = 14,6285 \cdot (CWN)^{1/2}$ $K_{IC2} = 0,0717 \cdot \sigma_m$ $K_{IC} = 0,0002219 \cdot E \cdot (CWN)^{1/2}$
★	zgornji nivo $K_{IC} = \sigma_m \cdot \sqrt{0,6459 \cdot CWN} / \sigma_m - 0,00635$	+	zgornji nivo $K_{IC} = \sigma_m \cdot \sqrt{0,6459 \cdot CWN} / \sigma_m - 0,00635$
✱	predhodno območje $K_{IC}^2 = 0,0002219 \cdot E \cdot (CWN)^{1/2}$ $K_{IC} = 11,53 \cdot (CWN)^{1/2}$	✱	predhodno območje $K_{IC}^2 = 0,0002219 \cdot E \cdot (CWN)^{1/2}$ $K_{IC} = 11,53 \cdot (CWN)^{1/2}$
○	$K_{IC} = 15,11169 \cdot CWN^{0,67858}$	◇	$K_{IC} = 15,095 \cdot CWN^{0,67858}$

Slika 5: Primerjava izmerjenih vrednosti lomnih žilavosti z izračunanimi po korelacijskih enačbah za jeklo Nioval 47 debeline 65 mm v dobavnem in staranem stanju v odvisnosti od temperature  
 Figure 5: The comparison of the valid measured fracture toughness with the values calculated with correlation equations for steel Nioval 47 thickness 65 mm in as received and aged condition vs. temperatures

Starano jeklo ima torej pri nizkih temperaturah (Charpyjeve žilavosti pod 25 J) višjo lomno žilavost od jekla v dobavnem stanju, pri teh temperaturah pa ima verjetno tudi višjo Karrest vrednost, kar pojasnjuje znižanje temperature ničelne duktilnosti zaradi staranja. Starano jeklo ima precej višjo napetost tečenja. Zato, da pri staranem jeklu dosežemo enako  $K_{IR}$  (Karrest) vrednost, ga moramo še nekoliko podhladiti, kar pomeni, da bo imelo jeklo nižjo  $T_{NDT}$  temperaturo.

Ugotovili smo tudi, da se izmerjene lomne žilavosti deformacijsko staranega jekla  $K_{IC}$  ( $K_{IC}$ ) v odvisnosti od temperaturne diference ( $T-T_{NDT}$ ) ujemajo z ASME krivuljo le, če namesto temperature ničelne duktilnosti  $T_{NDT}$  uvedemo referenčno temperaturo ničelne duktilnosti  $RT_{NDT}$ . Če vrednosti lomne žilavosti vrišemo v diagram  $K_{IC}$  vs.  $(T-RT_{NDT})$ , kar je prikazano na sliki 6, ugotovimo, da so vse naše veljavne izmerjene  $K_{IC}$  vrednosti (tudi za deformacijsko starana jekla) nad ASME -  $K_{IC}$  krivuljo. Zato lahko zaključimo, da običajne izmerjene temperature ničelne duktilnosti deformacijsko staranih jekel niso dovolj konservativen kriterij za uporabo tovrstnih jekel pri nizkih temperaturah, temveč moramo uporabiti referenčno temperaturo ničelne duktilnosti  $RT_{NDT}$ .

6. Sklep

Različni testi (statični, dinamični, različne vrste preizkušancev ...) dajejo rezultate, ki se medsebojno dopolnjujejo. Na osnovi njihove kritične presoje lahko dobimo dokaj dobro globalno oceno uporabnosti materiala za eksploatacijo pri nizkih temperaturah. Lomne žilavosti preiskanega drobnozrnatega mikrolegiranega jekla Nioval 47 izračunane po empiričnih enačbah veljavnih za različna temperaturna območja se zelo dobro ujemajo z ASME  $K_{IC}$  oz.  $K_{IR}$  krivuljami po Marstonu.

Literatura

- W. R. Tyson, Fracture Control - Current Issues, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 22, 1983, 219-224
- I. Auen Stienstra, Stochastic Micromechanical Modeling of Cleavage Fracture in the Ductile Brittle Transition region, the dissertation, 1990, Texas A&M University, Texas
- T. U. Marston, Flaw Evaluation Procedures, Background and Applications of ASME Section XI, Appendix A, EPRI NP 719-SR, Electric Power Research Institute, 1986
- NB-2330 Test Requirements and Acceptance Standards, NB -2331 Materials for Vessels, ASME III., 1983

- <sup>1</sup> J. M. Barsom, S. T. Rolfe, Correlations between  $K_{IC}$  and Charpy V Notch Test Results in the Transition Temperature range in Impact Testing of Metals ASTM STP 466, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1970, 281-302
- <sup>2</sup> S. T. Rolfe, J. M. Barsom, Fracture and Fatigue Control in Structures, Prentice Hall, New Jersey, 1977
- <sup>3</sup> S. T. Rolfe, S. R. Novak, Slow Bend  $K_{IC}$  Testing of Medium Strength High Toughness Steels, ASTM, STP 436, 1970, 124-159
- <sup>4</sup> R. B. Scarlin, M. Shakeshaft, Limitations of Some Methods of Establishing Fracture - Toughness Data, *Metals Technology*, 20, 1981, 1-9
- <sup>5</sup> W. J. Langford, Selection and Interpretation of Fracture Test Methods for Fracture Control, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 19, 1980, 13-22
- <sup>6</sup> J. Vojvodič Gvardjančič, Pogoji za prehod v krhki lom pri drobnnozrnatih mikrolegiranih jeklih, doktorska disertacija, Ljubljana, 1994
- <sup>7</sup> J. Vojvodič Gvardjančič, B. Ule, S. Ažman, Fracture Toughness of Fine Grained Micro Alloyed Steels at Nil Ductility Temperature at Transition Range, *Journal de Physique*, 3, 1993, 105-108
- <sup>8</sup> N. Gubelj, J. Legat, A. Alujevič, Assessing the Effects of Materials Condition on the Fracture behaviour of HSLA Steel, 1. Kongres Hrvatskega društva za mehaniko, zbornik, 1994, 251-258
- <sup>9</sup> H. Primec, J. Legat, J. Vojvodič Gvardjančič, Elastic-plastic Fracture Mechanics Analyses of Bend Specimens with Shallow and Deep Cracks, 10. European Conference on Fracture, Berlin, zbornik 2, 1994, 867-877