

Razvoj in uvajanje visokotrdnih drobnozrnatih mikrolegiranih jekel za uporabo v procesni industriji in gradbeništvu

Development and Introduction of High Strength Microalloyed Steels for Applications in Process Industry and Civil Engineering

J. Vojvodič Gvardjančič, *Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Ljubljana*

B. Ule, *Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Ljubljana*

S. Ažman, *Slovenske Železarne, ACRONI d.o.o., Jesenice*

Raziskave mikrolegiranih jekel so pokazale, da staranje takšnih jekel premakne temperaturo prehoda Charpyjeve žilavosti k višjim vrednostim, da pa se temperatura ničelne duktilnosti določena z Drop Weight Testom, zniža. Zato je pojasnjeno obnašanje takšnih jekel v pogojih nizkotemperaturne eksploatacije.

Ključne besede: mikrolegirana jekla, nizkotemperaturna žilavost, temperatura ničelne duktilnosti, mehanika loma

The tests on microalloyed steels have shown that the aging of these steels shifts the Charpy-V transition temperature towards higher values, while the nil ductility temperature determined with Drop Weight Test is reduced. So the behaviour of these steels will be described in the conditions of low temperature exploitation.

Key words: microalloyed steels, low temperature toughness, nil ductility temperature, fracture mechanics

1 Uvod

Raziskave obnašanja drobnozrnatih mikrolegiranih jekel pri nizkih temperaturah so pokazale, da se Charpyjeve krivulje prehoda iz žilavega v krhko stanje, zaradi staranja jekla premaknejo k višjim temperaturam. Povsem nepričakovano pa je ugotovitev, da so temperature ničelne duktilnosti T_{NDT} jekel v staranem stanju določene z Drop Weight Testom nižje od T_{NDT} temperatur jekel v dobavnem stanju.

2 Eksperimentalni del

Kemične sestave jekel so zbrane v tabeli 1. Iz naštetih jekel smo izdelali Charpyjeve preizkušance z V zarezo za merjenje udarne žilavosti, ploščate upogibne preizkušance tipa P-3 po ASTM E 208 dimenzij 15,9×127 mm s krhkim navarom na površini za merjenje temperature ničelne duktilnosti T_{NDT} z Drop Weight testom, večje število cilindričnih nateznih preizkušancev premera 10 mm za določanje konvencionalnih mehanskih lastnosti jekel pri nizkih temperaturah ter večje število cilindričnih nateznih preizkušancev z zarezo po obodu za merjenje lomne žilavosti pri nizkih temperaturah. Merjenje lomne žilavosti

smo opravili s CT preizkušanci z modificirano zarezo 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.

3 Rezultati

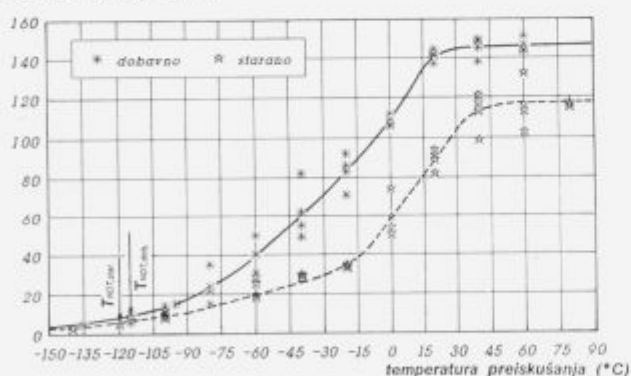
V diagramih na slikah 1 in 2 so prikazane udarne zarezne žilavosti po Charpyju v odvisnosti od temperature testiranja in to za dobavno in starano stanje (10 % def. v hladnem + 250°C/30 min.) jekel. V diagrame smo vnesli tudi izmerjene temperature ničelne duktilnosti T_{NDT} določene z Drop Weight testom.

Pri naših raziskavah smo našli dve korelaciji med lomno žilavostjo K_{IC} in zarezno Charpyjevo žilavostjo CVN in sicer za jekla v dobavnem stanju v obliki:

Tabela 1 : Kemična sestava jekel v ut. - %
Table 1 : Chemical composition of the steel (weight %)

Vrsta jekla	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	V	Al
NIOVAL 47 (20mm)	0,19	0,42	1,49	0,013	0,005	0,13	0,10	0,04		0,050	0,07	0,087
NIOVAL 47 (65mm)	0,14	0,33	1,53	0,014	0,005	0,16	0,15	0,01		0,042	0,07	0,026
NIONICRAL 70 (20mm)	0,11	0,28	0,27	0,009	0,007	1,07	2,80	0,26	0,20		0,06	0,043
NIONICRAL 70 (50mm)	0,11	0,37	0,34	0,009	0,003	1,03	2,63	0,27	0,17		0,08	0,050
NIONICRAL 96 (20mm)	0,14	0,29	0,51	0,017	0,009	1,64	2,76	0,42	0,21		0,01	0,054
NIOMOL 490 K (25mm)	0,08	0,34	0,36	0,011	0,004	0,54	0,17	0,27	0,36	0,058		0,052
NIOMOL 490 K (60mm)	0,05	0,35	0,42	0,011	0,004	0,75	0,29	0,33	0,40	0,058		0,057
Č.0562 (25mm)	0,17	0,32	1,28	0,020	0,009	0,21	0,23	0,05	0,35	0,003		0,045
Č.0562 (80mm)	0,18	0,46	1,29	0,036	0,004	0,30	0,15	0,03	0,22	0,001		0,043
Č.1204 (30mm)	0,21	0,25	0,51	0,011	0,025	0,02	0,04	0,01	0,009	0,050		0,027

Žilavost Charpy - V (J)



Slika 1 Odvisnost udarne žilavosti po Charpyju od temperature preizkušanja za jeklo Č. 0562, debeline 25 mm. Vrisani sta tudi TNDT temperaturi za obe stanji.

Figure 1 Relation between Charpy - V notch toughness and testing temperatures for steel Č. 0562 thickness 25 mm. The arrows indicate the nil ductility temperatures.

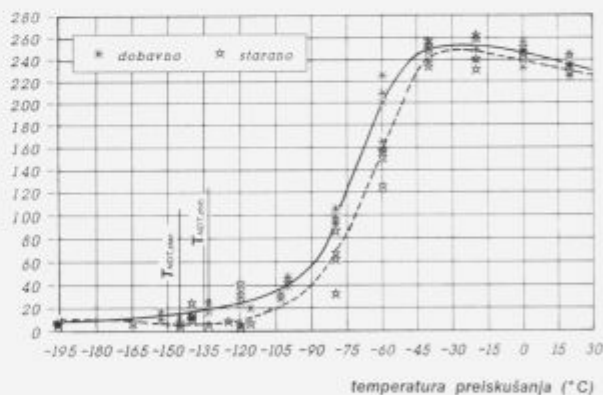
$$K_{IC} = 15,11.CVN^{0.616}$$

in za starano stanje:

$$K_{IC} = 35,10.CVN^{0.321}$$

Višje vrednosti lomne žilavosti K_{IC} za starano stanje ne presenečajo, ker staranje materiala porabi vso nukleacijsko

Žilavost Charpy - V (J)

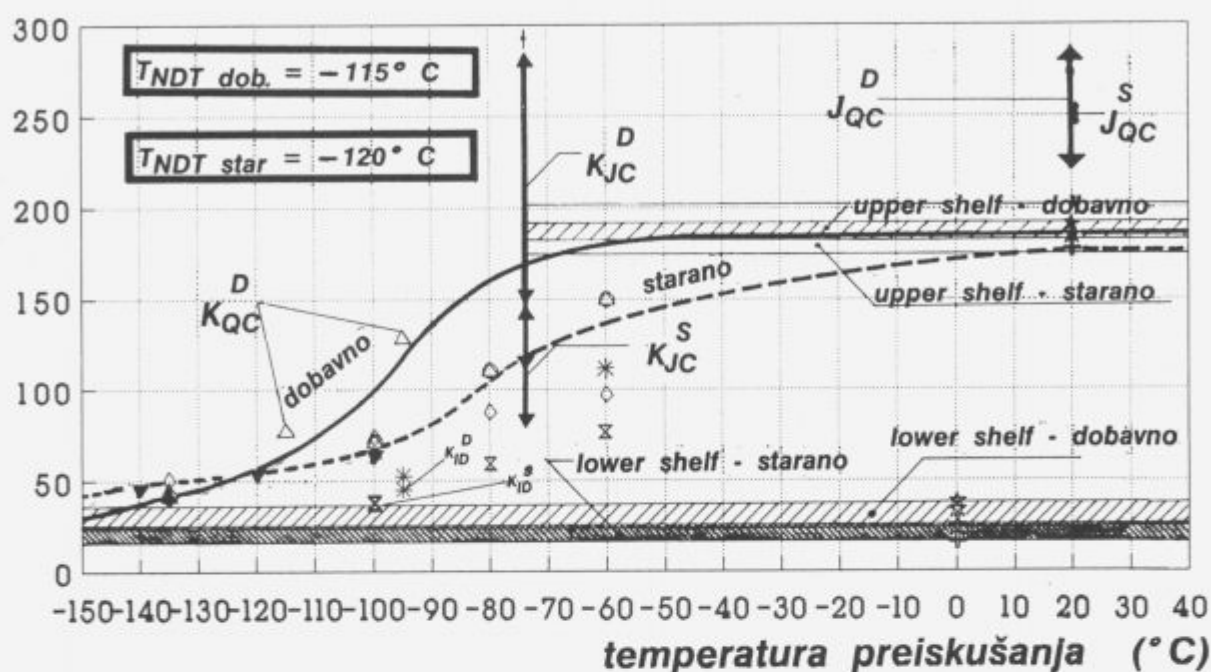


Slika 2 Odvisnost udarne žilavosti po Charpyju od temperature preizkušanja za jeklo Niomol 490 K, debeline 25 mm. Vrisani sta tudi TNDT temperaturi za obe stanji.

Figure 2 Relation between Charpy - V notch toughness and testing temperatures for Niomol 490 K thickness 25 mm. The arrows indicate the nil ductility temperatures.

energijo, zato mora biti pri določenih vrednostih udarne žilavosti po Charpyju lomna žilavost K_{IC} večja za starano in manjša za dobavno stanje. Rezultati merjenja lomne žilavosti K_{IC} , J_{IC} in izračunanih vrednosti po korelacijskih enačbah so za jeklo Č. 0562 debeline 25 mm prikazani na sliki 3.

lomna žilavost K_{JC} ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)



legenda

dobavno stanje		starano stanje	
oznaka	enačba	oznaka	enačba
$\triangle$	Izmerjena veljavna vrednost K_{JC} , J_{IC} (K_{JC})	∇	Izmerjena veljavna vrednost K_{JC} , J_{IC} (K_{JC})
$\blacktriangle$	Izmerjena vrednost K_{QC} , J_{QC} (ni izpolnjen pogoj debeline)	$\triangledown$	Izmerjena vrednost K_{QC} , J_{QC} (ni izpolnjen pogoj debeline)
$\star$	lower shelf $K_{JC} = 14,6285 \cdot (\text{CVN})^{1/2}$ $K_{JC}^2 = 0,0717 \cdot \sigma_{ys}$ $K_{JC}^2 = 0,0002219 \cdot E \cdot (\text{CVN})^{3/2}$	$\star$	lower shelf $K_{JC} = 14,6285 \cdot (\text{CVN})^{1/2}$ $K_{JC}^2 = 0,0717 \cdot \sigma_{ys}$ $K_{JC}^2 = 0,0002219 \cdot E \cdot (\text{CVN})^{3/2}$
$\star$	upper shelf $K_{JC} = \sigma_{ys} \cdot \sqrt{0,6459 \cdot \text{CVN} / \sigma_{ys}} - 0,00635$	$\star$	upper shelf $K_{JC} = \sigma_{ys} \cdot \sqrt{0,6459 \cdot \text{CVN} / \sigma_{ys}} - 0,00635$
$\ast$	prehodno območje $K_{JC}^2 = 0,0002219 \cdot E \cdot (\text{CVN})^{3/2}$ $K_{ID} = 11,53 \cdot (\text{CVN})^{1/2}$	$\ast$	prehodno območje $K_{JC}^2 = 0,0002219 \cdot E \cdot (\text{CVN})^{3/2}$ $K_{ID} = 11,53 \cdot (\text{CVN})^{1/2}$
$\circ$	$K_{JC} = 15,1169 \cdot \text{CVN}^{0,615539}$	$\diamond$	$K_{JC} = 35,095 \cdot \text{CVN}^{0,320831}$

Slika 3 Primerjava izmerjenih lomnih žilavosti izračunanimi po korelacijskih enačbah za jeklo Č. 0562, $d=25$ mm v dobavnem in staranem stanju v odvisnosti od temperature

4 Diskusija

1. Naše meritve dokazujejo, da je merjenje temperature ničelne duktilnosti pravilno tudi za starano stanje, saj bi sicer kakšna od izmerjenih vrednosti lomne žilavosti K_{JC} ali K_{JC} pri bistveno drugačni referenčni T_{NDT} padla tudi pod referenčno krivuljo K_{IR} vs. $T - R T_{NDT}$, prikazano na sliki 4, kar pa se ni zgodilo.

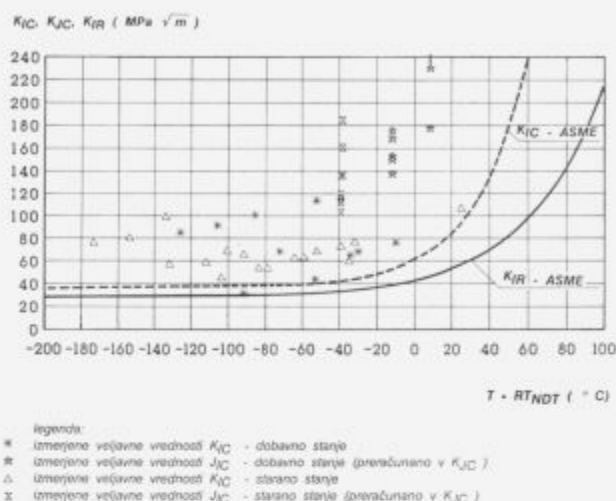
2. Temperature ničelne duktilnosti T_{NDT} za jeklo v staranem stanju lahko napovemo tako, da povežemo odvisnosti CVN vs. T in CVN vs. K tako, da imajo diagrami skupno ordinato, kot je to prikazano na sliki 5. Na desnem delu te sestavljene slike je vsakokrat nanešena poleg naše korelacije CVN vs. K_{JC} za dobavno in starano stanje še

odvisnost CVN vs. K_{IR} upošteva krivulje po ASME na sliki 4. Na sliki 5 prikazana procedura temelji na hipotezi, da T_{NDT} temperatura za jekla v različnem stanju ustreza odgovarjajoči K_{IR} vrednosti za dano geometrijo preizkušanca in pogoje testiranja.

Dobro ujemanje izmerjenih vrednosti z napovedanimi, je razvidno iz tabele 2.

5 Zaključek

1. Odvisnost med lomno žilavostjo K_{JC} in udarno zarezno žilavostjo CVN po Charpyju v območju temperatur ničelne duktilnosti je za starana jekla drugačna kot za nestarana jekla. Starana jekla imajo pri določeni vrednosti udarne



Slika 4 Odvisnost referenčnega faktorja intenzitete napetosti K_{IR} od referenčne temperature ničelne duktilnosti.

Figure 4 The dependence of the reference stress intensity factor K_{IR} on the nil ductility reference temperature RT_{NDT} .

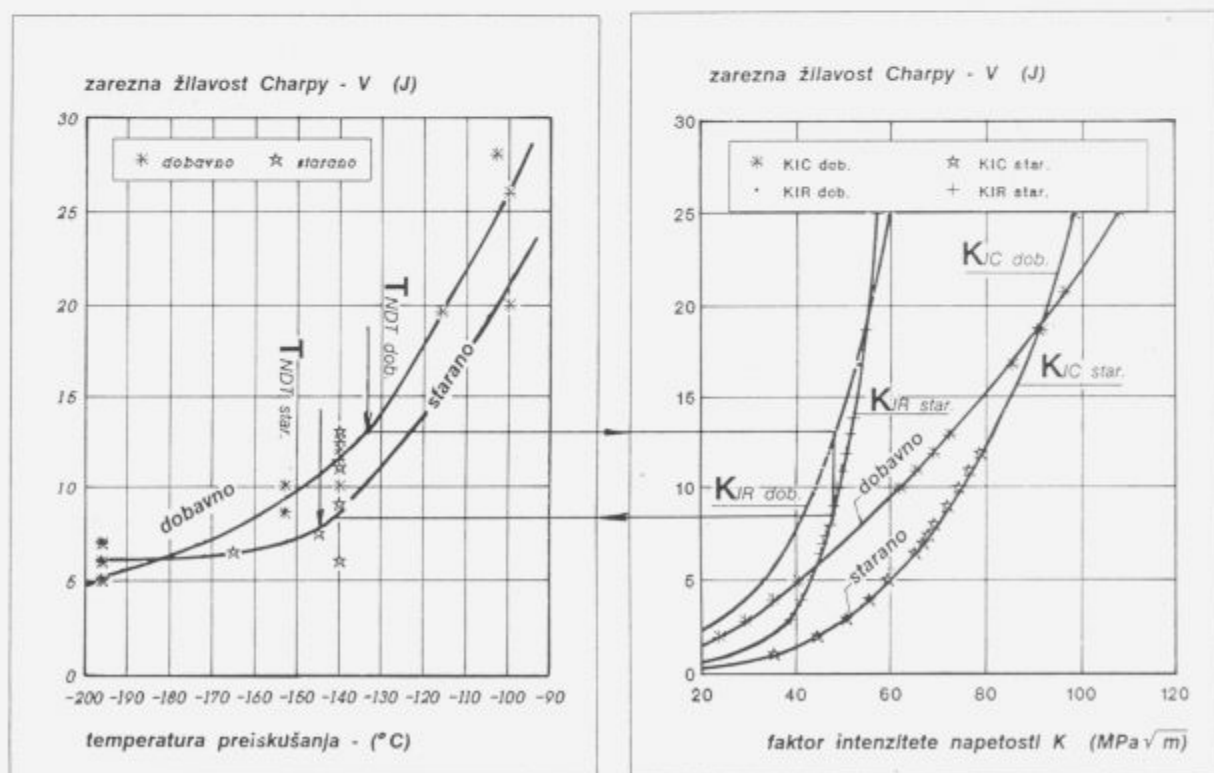
Tabela 2 : Primerjava izmerjenih in nomogramsko določenih temperatur ničelne duktilnosti za starana jekla

Table 2 : The comparison of the measured and by nomogram determined nil ductility temperatures for aged steels

Vrsta materiala	Izmerjena temperatura ničelne duktilnosti T_{NDT} (°C)	Nomogramsko določena temperatura T_{NDT} (°C)	ujemanje
Č. 0562 (d = 25 mm)	-120	-130	dobro
Č. 1204 (d = 30 mm)	-101	-100	odlično
Niomol 490 K (d = 25 mm)	-145	-142	odlično
Nionicral 96 (d = 50 mm)	-125	-120	odlično
Nionicral 70 (d = 50 mm)	-117	-102	dobro

žilavosti po Charpyju v splošnem nekoliko višjo lomno žilavost.

2. Starana jekla imajo pri temperaturi ničelne duktilnosti viško K_{IR} oziroma K_{arrest} vrednost, kot pa jo imajo nestarana jekla pri isti temperaturi, to je pri T_{NDT} temperaturi staranih jekel. Starana jekla imajo namreč precej višjo napetost tečenja. Zato, da pri staranih jeklih dosežemo



Slika 5 Nomogram za določanje temperature ničelne duktilnosti jekla Niomol 490 K d = 25 mm.

Figure 5 The nomogram for the determination of the nil ductility temperature of the steel Niomol 490 K 25 mm thickness.

enako K_{IR} (K_{arrest}) vrednost, jih moramo še nekoliko bolj podhladiti, kar pomeni, da bodo imela starana jekla nižjo T_{NDT} temperaturo.

6 Literatura

- ¹ B. Ule, A. Rodič, J. Vojvodič Gvardjančič, I. Kovše, S. Ažman, Lomna žilavost drobnozrnatih mikrolegiranih jekel pri temperaturi ničelne duktilnosti, Rudarsko Metalurški zbornik, 39, 1- 2, 1992, 21-38
- ² J. Vojvodič Gvardjančič, B. Ule, S. Ažman, Fracture Toughness of Fine Grained Microalloyed Steels at Nil Ductility Temperature, The 3rd European Conference on Advanced Materials and Processes, Pariz, C. 364, 1993
- ³ J. Vojvodič Gvardjančič, Pogoji za prehod v krhki lom pri drobnozrnatih mikrolegiranih jeklih, Doktorska disertacija, 1994