

Nizkotemperaturna meja uporabnosti mikrolegiranih jekel s stališča lomne mehanike

J. Vojvodič-Gvardjančič, Inštitut za metalne konstrukcije, Mencingerjeva 7, Ljubljana

V prispevku so obravnavane lomne značilnosti fino zrnatega mikrolegiranega jekla NIOMOL 490. To jeklo ima feritno bainitno mikrostrukturo ter mejo plastičnosti minimalno 490 MPa, dobro žilavost pa ima tudi še pri temperaturi -60°C . Eksperimentalno je bila določena soodvisnost med lomno žilavostjo in temperaturo ničelne duktilnosti ter na ta način opredeljena nizkotemperaturna meja uporabnosti takega jekla.

The article presents fracture characteristics of the fine grained microalloyed NIOMOL steel. This steel's microstructure is ferritic-bainitic and its minimal yield strength 490 MPa. It is good at ductility even at -60°C . The relation between fracture toughness and nil ductility temperature has been experimentally determined and the temperature boundary for the use of this steel has been established.

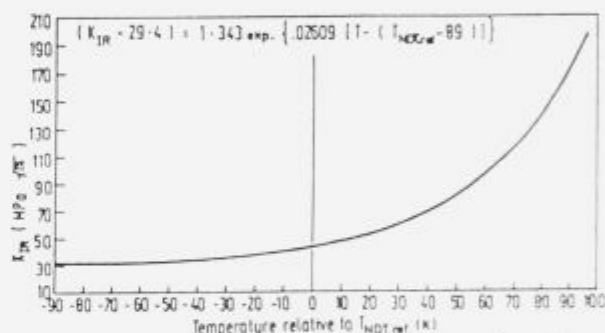
1 Uvod

Jeklene konstrukcije dimenzioniramo s postopkom dopustnih napetosti. Ta postopek pa zlasti pri statično nedoločenih konstrukcijah, pri vplivu lastnih napetosti, nestabilnosti, pri koncentracijah napetosti, ne omogoča vpogleda v dejansko varnost konstrukcij. Ta postopek tudi ni povsem zadosten, ker ne pove nič o temperaturni meji uporabnosti konstrukcije. Z znižanjem temperature se namreč trdnost jekla skoraj ne spreminja, močno pa pade žilavost, zato je smiselno dimenzioniranje tudi na osnovi lomne mehanike ob predpostavljeni velikosti napake.

2 Teoretični del

Za žilava jekla z izrazitim elasto-plastičnim obnašanjem, kakršno je tudi obravnavano jeklo NIOMOL 490, je s stališča nizkotemperaturne meje uporabnosti, zelo pomembna soodvisnost med lomno žilavostjo K_{IC} in temperaturo neduktilnega loma NDT . Za ilustracijo tega si oglejmo diagram na sliki 1, ki je bil objavljen v PVRC Recommendations on Toughness Requirements for Ferritic Materials, Welding Research Council Bulletin 175, August 1972¹ in v katerem so prikazane vrednosti spodnjega pasu lomne žilavosti v odvisnosti od referenčne NDT temperature. Kot referenčna NDT temperatura je v tem primeru razumljena temperaturna diferenca med temperaturo preizkušanja T in temperaturo neduktilnega loma določeno z Drop Weight Testom. Prikazani diagram velja za jekla, ki se v ZDA uporabljajo za nuklearne reaktorske posode. Uporabnost tega diagrama nam postane popolnoma jasna, ko na osnovi tega diagrama primerjamo dve jekli podobne vrste, ki pa imata različni NDT temperaturi. V tem primeru se zdi logičen privzetek, da je pri dani temperaturi eksploatacije njuna odpornost proti lomu (običajno definirana s K_{IC}), različna. Eno od teh dveh jekel bi bilo namreč uporabno do višjih temperatur kot drugo, a bi pri tem še vedno imelo enako stopnjo zaščite pred lomom.

Iz povedanega sledi, da moramo eksperimentalno določiti temperaturo neduktilnega loma ter temperaturno odvisnost lomne žilavosti zato, da lahko za obravnavano



Slika 1. Spodnja meja pasu referenčnih K_{IC} vrednosti lomne žilavosti glede na referenčno prehodno temperaturo ničelne žilavosti ($T - T_{NDT,ref}$).

Figure 1. Lower bound K_{IC} reference values as a function of the relative test temperature ($T - T_{NDT,ref}$).

jeklo ugotovimo veljavnost v diagramu prikazane odvisnosti. Ker je merjenje K_{IC} vrednosti pri nizkih temperaturah težavno, še zlasti za elasto-plastično obnašanje, kjer moramo meriti lomno žilavost preko J integrala, bomo uporabili naslednje empirijske korelacijske izraze:

2.1 Merjenje lomne žilavosti z gladkimi cilindričnimi preizkušanci

Če potrebujemo le okvirne vrednosti K_{IC} , lahko za določanje lomne žilavosti uporabimo kar natezni preizkus, saj sta G.T. Hahn ter A.R. Rosenfield² prav na modelu nateznega preizkusa zasnovala svojo polempirično koncepcijo določanja lomne žilavosti:

$$K_{IC} = \sqrt{0.05 \varepsilon_f n^2 E R p / 3}, \quad (1)$$

kjer je n označen eksponent deformacijskega utrjevanja in je določen z izrazom $n = \ln(1 + \varepsilon_u)$, ε_u je maksimalni enakomerni inženirski raztezek izražen kot $\varepsilon_u / 100$ (v

Tabela 1. Mehanske lastnosti pločevine NIOMOL 490

Pločevina NIOMOL 490 $t = 12 \text{ mm}$	Mehanske lastnosti pločevine				
	R_p MPa	R_m MPa	A5 %	Z %	Smer preizkušanja
Potrdilo o kvaliteti železarne Jesenice štev. 11759	488	614	26	-	prečno na smer valjanja
Podatki iz prospekta Železarne Jesenice	490	560- -740	19	-	

Tabela 2. Kemijska sestava pločevine NIOMOL 490, $t = 12 \text{ mm}$.

Oznaka	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	Nb
	%										
1	0.11	0.26	1.20	0.018	0.006	0.24	0.30	0.18	0.26	0.031	0.054
2	0.09	0.24	1.21	0.018	0.006	-	-	-	-	-	-

1. Dejanska analiza pločevine

2. Podatki iz atesta Železarne Jesenice št. 11759

Tabela 3. Žilavost pločevine NIOMOL 490

Smer valjanja	Žilavost ISO—v (J) nestarano stanje						Žilavost DVM (J) Starano stanje					
	Temperatura preizkušanja											
	+20	0	-20	-40	-50	-60	+20	+5	-20	-40	-60	
vzdolžno	63	63	63	55	47	39	47	41	41	31	27	
prečno	55	55	47	39	34	31	35	31	31	27	-	

%), R_p je meja plastičnosti, E modul elastičnosti jekla, ε_f je lomna duktilnost določena iz kontrakcije pri nateznem preizkusu, $\varepsilon_f = \ln S_0/S_f$, kjer je S_0 začetni, S_f pa lomni presek cilindričnega nateznega preizkušanca. Če mejo plastičnosti in modul elastičnosti izrazimo v MNm^{-2} , dobimo K_{IC} v $\text{MNm}^{-3/2}$ ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$).

2.2 Merjenje lomne žilavosti s Charpy preizkušanci

Za območje prehodnih temperatur lahko izračunamo lomno žilavost K_{IC} s korelacijo Barsom-Rolfe³:

$$K_{IC}^2 = 0.22 ECVN^{1.5}, \quad (2)$$

kjer smo s CVN označili absorbirano energijo pri Charpyjevem udarnem merjenju žilavosti z V zarezo v joulih, modul elastičnosti v GPa, enota za lomno žilavost pa je $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$. Za "upper shelf" območje na krivulji temperature odvisnosti prehoda žilavosti iz duktilnega v krhko stanje uporabljamo korelacijo Rolfe-Novak^{4,5}:

$$K_{IC} = R_p \sqrt{\frac{0.646 CVN}{R_p - 0.00635}}. \quad (3)$$

Pri nizkih temperaturah, kjer je obnašanje jekla že izrazito krhko, pa lahko uporabimo naslednjo korelacijo:

$$K_{IC} = 0.0717 R_p. \quad (4)$$

3 Eksperimentalni del

3.1 Vrsta preiskav

Za določanje lomnih značilnosti finoizdelanega mikrolegiranega jekla NIOMOL 490 smo uporabili statične in dinamične mehanske preizkuse. Iz skupine statičnih mehanskih testov smo izbrali konvencionalni natezni preizkus, natezni preizkus cilindričnih preizkušancev z obodno zarezo ter merjenje lomne žilavosti z metodo J integrala ter korekcijo po Schwalbeju. Iz skupine udarnih mehanskih preiskav smo izbrali metodo merjenja žilavosti Charpy-V in metodo določanja temperature neduktilnega loma (drop weight test).

Na osnovi poznanih konvencionalnih mehanskih lastnosti pa smo določili tudi lomne žilavosti z empiričnimi korelacijskimi izrazi.

3.2 Rezultati preiskav

Za preiskave smo uporabili jeklo NIOMOL 490, ki spada med mikrolegirana jekla, legirana z Mn, Mo, Nb s feritno bainitno mikrostrukturo. Železarna Jesenice ga je dobavila v normaliziranem stanju. Mehanske lastnosti in kemična analiza so razvidne iz tabel 1, 2, 3.

Mehanske lastnosti jekla NIOMOL 490 izmerjene pri statičnem preizkušanju so razvidne iz tabele 4 in grafično iz diagrama na sliki 2.

Merjenje žilavosti Charpy-V v odvisnosti od temperature je prikazano na sliki 3.

Tabela 4. Mehanske lastnosti NIOMOLA 490 izmerjene pri statičnem preizkušanju.

Temper. preizk. °C	R_p N/mm ²	R_m N/mm ²	Razmerje R_p/R_m N/mm ²	Največji enakomerni raztezek %	Trdnost zarezanega preizkuš. N/mm ²	Zarezo trdnostno razmerje NSR
NIOMOL 490—dobavno stanje						
+ 20	482	602	0.80	14.9	867	1.440
- 40	553	694	0.79	15.5	1073	1.546
-100	548	686	0.80	17.5	1116	1.626
-150	657	791	0.83	15.6	1182	1.494
-196	683	783	0.87	8.9	1393	1.779
NIOMOL 490—10% deformiran in staran 30' / 250°C						
+ 20	655	672	0.97	3.6	1010	1.503
- 40	772	788	0.98	4.3	1306	1.657
-100	741	770	0.96	6.1	1252	1.626
-150	806	817	0.98	2.4	1436	1.757
-196	1006	1006	1.00	0.7	1432 + 1319	1.432 + 1.311

Tabela 5. Prehodne temperature določene z merjenjem Charpy-V žilavosti ter NDT temperatura z Drop Weight Testom.

Oznaka krivulje	Staranje jekla	Tip zareze na vzorcu	Izmerjena temperat. prehoda T54 (°C)	Vrednosti drop weight testa (°C)
A	izhodno stanje (normalizirano s feritno-bainitno mikrostrukturo)	CHARPY V	- 93	- 85
B	izhodno stanje + staranje 250°C/20 ur	CHARPY V	- 78	-
C	izhodno stanje+ 10% hladna deformacija	CHARPY V	- 38	-
D	izhodno stanje + 10% deformacija v hladnem + staranje 250°C/30 minut	CHARPY V	- 10	-
E	izhodno stanje + 10% deformacija v hladnem + staranje 250°C/30 minut	CHARPY U (ρ_3^-)	- 50	-

Iz rezultatov je razvidno, da že manjša deformacija v hladnem povzroči zamik prehodne temperature k višjim vrednostim ($\Delta T = 55^\circ\text{C}$), da pa je zaradi procesov staranja ta zamik še veliko intenzivnejši ($\Delta T = 83^\circ\text{C}$).

Po standardu ASTM E 208 smo določili tudi temperaturo neduktilnega loma.

Rezultati vseh meritev so zbrani v tabeli 5.

3.3 Uporaba lomne mehanike pri analizi rezultatov

Za analizo smo izbrali preiskovano jeklo v dobavnem stanju. Pri temperaturi -20°C (253K) je bila žilavost Charpy-V tega jekla enaka 145 J.

Lomno žilavost K_{IC} izračunajmo najprej s korelacijo Rolfe-Novak, ki velja za "upper shelf" območje na krivulji temperaturne odvisnosti prehoda žilavosti iz duktilnega v

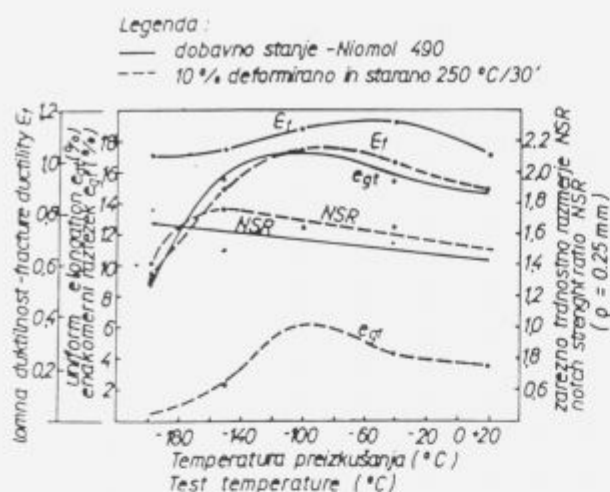
krhko stanje (enačba 3):

$$\begin{aligned}
 K_{IC} &= R_p \sqrt{0.646 C V N / R_p - 0.00635} \\
 K_{IC} &= 472 \sqrt{0.646 \cdot 145 / 472 - 0.00635} \\
 K_{IC} &= 206.876 \text{ MPa}/\sqrt{\text{m}}
 \end{aligned}$$

Izračunajmo lomno žilavost K_{IC} še s pomočjo Hahn-Rosenfeldove korelacije (enačba 1). Dobimo:

$$\begin{aligned}
 K_{IC} &= \sqrt{0.05 \epsilon_f n^2 E R_p / 3} \\
 K_{IC} &= \sqrt{0.05 \cdot 1.20 \cdot 0.149^2 \cdot 2.05 \cdot 10^5 \cdot 472 / 3} \\
 K_{IC} &= 207.276 \text{ MPa}/\sqrt{\text{m}}
 \end{aligned}$$

Pri tem smo za ϵ_f , n in R_p vstavili povprečne vrednosti, dobljene z nateznim preizkusom pri temperaturi -20°C .



Slika 2. Enakomerni raztezek e_{gt} , lomna duktilnost e_f in zarezno trdnostno razmerje NSR v odvisnosti od temperature preizkušanja za NIOMOL 490 v dobavnem stanju in 10% deformiranem ter staranem stanju (30 minut pri 250°C).

Figure 2. Uniform elongation e_{gt} , fracture ductility e_f , and the notch strength ratio NSR as a function of test temperature for NIOMOL 490 in the as delivered condition and for 10% deformed and aged condition (30 minutes at 250°C).

Iz rezultatov je razvidno, da smo dobili skoraj enako vrednost za lomno žilavost K_{IC} , čeprav smo jo izračunali na dva med seboj neodvisna načina, korelacija Hahn-Rosenfield temelji na nateznem preizkusu, korelacija Rolfe-Novak pa na merjenju udarne žilavosti Charpy z V zarezo. Takšno ujemanje je nedvomno le naključno in ga v splošnem ne smemo pričakovati. Sprejemljive bi bile celo vrednosti, ki bi se medsebojno razlikovale tudi za 10% in več.

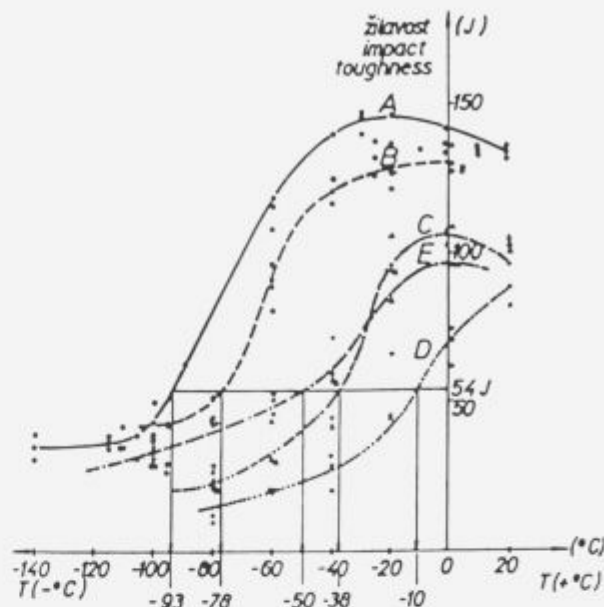
3.4 Povezava med kvantitativnimi in kvalitativnimi preizkusi (K_{IC} in NDT temperaturo)

Rezultati soodvisnosti med lomno žilavostjo K_{IC} , izračunano na osnovi korelacije Rolfe-Novak (enačba 3), in sicer za "upper shelf" območje ter temperaturo referenčne ničelne duktilnosti $T_{NDT,ref}$ pri temperaturi testiranja -20°C so prikazani v tabeli 6.

Tabela 6. Soodvisnost med lomno žilavostjo K_{IC} in $T_{NDT,ref}$ za jeklo NIOMOL 490 v dobavnem stanju ($T_{NDT} = -85^{\circ}\text{C}$).

Temperatura testiranja (°C)	$T_{NDT,ref}$ (K)	Žilavost Charpy-V (J)	Izračunana lomna žilavost K_{IC} ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)
-20	65	145	207.0
-60	25	117	92.2
-75	10	91	76.3
-85	0	70	62.7

Za nižje temperature (-60°C , -75°C , -85°C) pa so bile uporabljene korelacije, ki veljajo za prehodno območje



A — NIOMOL 490 - dobavno stanje - zarez Charpy-V
B — NIOMOL 490 - staran 250°C/20h - zarez Charpy-V
C — NIOMOL 490 - 10% hladno deformiran - zarez Charpy-V
D — NIOMOL 490 - 10% hladno deformiran in staran 250°C/30' - zarez Charpy-V
E — NIOMOL 490 - 10% hladno deformiran in staran 250°C/30' - zarez p_3

Slika 3. Žilavost v odvisnosti od temperature za jeklo NIOMOL 490.

Figure 3. Impact toughness as a function of temperature for the NIOMOL 490.

(enačba 2). Pri tem smo za modul elastičnosti E vsstavili vrednost $2.05 \cdot 10^2 \text{ GPa}$, Charpy-jeva žilavost pa je izražena v Joulih.

4 Analiza rezultatov

Primerjava rezultatov iz tabele 6 s podatki iz diagrama na sliki 1 kaže, da je pri jeklu NIOMOL 490 lomna žilavost npr. $207 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ dosežena pri temperaturi eksploatacije takšnega jekla, ki je za 65°C višja od temperature neduktilnega loma, medtem, ko je iz diagrama moč razbrati, da je takšna lomna žilavost kot minimalna referenčna vrednost dosežena še pri temperaturi eksploatacije, ki je kar za 100°C višja od temperature neduktilnega loma. To pomeni, da ima jeklo NIOMOL 490 pri temperaturi eksploatacije, ki je npr. za 65°C višja od T_{NDT} skoraj še enkrat višjo žilavost od tiste, ki jo kot minimalno navaja diagram na sliki 1.

Na problem pa lahko gledamo še z druge strani. Če predpišemo temperaturo eksploatacije npr. -40°C , kar je 45 K nad temperaturo neduktilnega loma, potem ima pri teh pogojih eksploatacije NIOMOL 490 lomna žilavost, ki je vsekakor višja od $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (glej tabelo 6), vrednost iz diagrama na sliki 1 pa je nekje pri $70 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Jeklo NIOMOL 490 je torej tudi s tega stališča varnejše v eksploataciji, saj ima pri temperaturi, ki je še dovolj varno oddaljena od temperature neduktilnega loma, lomna žilavost, ki je vsaj 30% višja od minimalne referenčne vrednosti, nanašajoče se na izbrano referenčno T_{NDT} .

5 Zaključek

Na osnovi opravljenih raziskav ugotavljamo, da soodvisnost med lomno žilavostjo in referenčno temperaturo ničelne duktilnosti pove skoraj vse o varni uporabi jekla pri nizkih temperaturah. Na tej osnovi je namreč možna primerjava med dvema različnima jeklima podobne vrste, ki pa imata različno *NDT* temperaturo. Takšna primerjava bo namreč odgovorila na vprašanje, katero od obeh jekel bo imelo boljše varnost proti krhkemu lomu.

6 Literatura

- ¹ PVRC Recommendations on Toughness Requirements for Ferritic Materials, Welding Research Council Bulletin 175, August 1972.
- ² G.T. Hahn, A.R. Rosenfield: Sources of Fracture Toughness—the Relation between K_{IC} and the Ordinary Tensile Properties of Metals, Applications Related Phenomena in Titanium Alloys, ASTM STP 432, 1986, 5–32, Philadelphia.
- ³ Barsom J.M., Rolfe S.T. "Correlations between K_{IC} and Charpy V-Notch, Test Results in the Transition-Temperature Range"—Impact testing Metals ASTM 466, American Society for Testing and Materials, 281–302, 1970.
- ⁴ Rolfe S.T., Novak S.R. "Slow-bend K_{IC} testing of medium-strength high-toughness steels"—STP 463, Philadelphia, American Society for Testing and Materials, 124–159, 1970.
- ⁵ Scarlin R.B., Shakeshaft M. "Limitations of some methods of establishing fracture-toughness data"—Metals Technology, January 1981, 1–9.
- ⁶ ASTM E 208: Standard Method for Conducting Drop-Weight Test to determine Nil-Ductility Transition Temperature of Ferritic Steelseels.
- ⁷ J. Vojvodič-Gvardjančič: Lomne značilnosti drobnozrnatega mikrolegiranega jekla NIOMOL 490 (magistrska naloga, 1990).
- ⁸ Eberhard Ross, Thomas Demler, Ulrich Eisele and Rainer Gillog: Fracture mechanics safety assessment based on mechanics of materials—Steel Research 61, 1990, No. 4.
- ⁹ B. Faucher and B. Dogan: Evaluation of the Fracture Toughness of Hot-Rolled Low-Alloy Ti-V Plate Steel, Metallurgical transactions, 19A, March 1988, 505–516.
- ¹⁰ ASTM E 185: Standard Practice for Conducting Surveillance Tests for Light-Water Cooled Nuclear Power Reactor Vessels, E 706.
- ¹¹ Putatunda S.K. "A comparison of various fracture toughness testing methods"—Engineering Fracture Mechanics (Great Britain), 25, 1986, 4, 429–439.