

# Novi konstrukcijski mikrolegirani jekli Niomol 390 in Niomol 490

ŽELEZARNA JESENICE

S. Ažman, D. Sikošek, A. Šteblaj, J. Triplat, J. Arh

### UVOD

Dolga leta je za konstrukcijska jekla veljalo, da je predstavljal mejo plastičnosti glavno karakteristiko trdnostnih lastnosti. Za kriterij žilavosti pa je veljala temperatura prehoda iz žilavega v krhki lom. Zahteve v zvezi z obema lastnostma niso bile preveč ostre, zato so jih lahko zadovoljili z C-Mn jekli, ki so bila toplo valjana in normalizirana. V 60. letih pa so se pojavile povečane zahteve po višjih mejah plastičnosti in po dobrih žilavostih pri nizkih temperaturah, obenem pa so morala biti jekla dobro variva. Tega ni bilo mogoče več doseči s poviševanjem C in Mn, ker se je preveč znižala žilavost in zmanjšala varivost, zato so jeklom začeli dodajati manjše količine karbidotvornih elementov (Ti, Nb, V, Mo), pa tudi Al. Ti elementi z izločevalnim utrjevanjem in zmanjševanjem kristalnega zrna zagotovijo višje trdnostne lastnosti jekla brez poslabšanja žilavosti ali varivosti. Z vpeljavo termomehanskega valjanja se je zmanjšanje kristalnega zrna, in s tem povezano izboljšanje žilavosti, še stopnjevalo. Pri tem je bilo možno precejšnje znižanje ogljika, kar je pomenilo izboljšanje žilavosti in varivosti pri enakih trdnostnih lastnostih.

Tako so nastala mikrolegirana konstrukcijska jekla, ki doživljajo svoj razcvet z razvojem tehnologije izdelave jekla. Z uvedbo ponovne metalurgije, vakuumiranja in možnosti zelo visoke stopnje odžveplanja in z uvedbo termomehanske obdelave je metalurgija sposobna obvladati nove zahteve potrošnikov. Nekatere posebne lastnosti, ki iz teh novitet izhajajo, npr.: visoke meje plastičnosti, dobre žilavosti, dobra odpornost proti napetostni koroziji, enakomernost lastnosti preko preseka izdelka, in predvsem dobra varivost, uvrščajo mikrolegirana jekla med najprimernejši, množično uporaben konstrukcijski kovinski material.

Mikrolegirana jekla uporabljamo predvsem za izdelavo pločevine ter trakov za izgradnjo plinovodov, posod pod tlakom, transportnih sredstev ter raznih drugih varjenih konstrukcij, kjer je važna čimmanjša teža ali pa so ostre zahteve po dobri žilavosti do nizkih temperatur ca.  $-60^{\circ}\text{C}$ . Po trdnostnih lastnostih (meja plastičnosti) ta jekla pokrivajo območje od 290 do ca. 700 MPa. Vsebnost ogljika pri najnovejših jeklih varira od ca. 0,03 % do 0,12 % in je višja pri jeklih, ki so termično obdelana z normalizacijo, kot pri termomehansko obdelanih jeklih, medtem ko so starejša jekla vsebovala okrog 0,20 % C.

Mikrolegirana jekla s približno 0,20 % C in 1,5 % Mn imajo že precej visok C-ekvivalent, zato zahtevajo predgrevanje pri varjenju in plamenskem rezanju. Pri debelinah nad 15 mm jih lahko preoblikujemo le v vročem, kar predstavlja še dodatne tehnološke težave in zahteva strogo izvajanje posebne tehnologije preoblikovanja in eventualne naknadne toplotne obdelave.

Pri varjenju teh jekel je potrebno upoštevati tehnologijo varjenja, sicer lahko pride do hudih napak na objektihi, predvsem do razpok v zvarnih spojih ali toplotno vplivani coni.

Na podlagi navedenih zahtev in spoznanj za izdelavo modernih mikrolegiranih jekel smo v železarni Jesenice razvili dve vrsti mikrolegiranih konstrukcijskih jekel z mejo plastičnosti  $R_p = \text{min. } 390 \text{ MPa}$  in min. 490 MPa.

To sta kvaliteti NIOMOL 390 in NIOMOL 490. Z zmožnostjo termomehanske obdelave bomo v bodočnosti lahko izdelali tudi kvalitetna jekla z mejo plastičnosti do 1000 MPa ob istočasni dobri žilavosti in varivosti.

### IZDELAVA JEKLA VRSTE NIOMOL

Ta jekla spadajo med feritno bainitna z Mn in Mo legirana in z Nb mikrolegirana finožrnata jekla z visoko mejo plastičnosti. Zaradi zahtev po visoki žilavosti tudi pri nizkih temperaturah (do  $-60^{\circ}\text{C}$ ) in sposobnosti upogibanja uporabljamo pri izdelavi teh in podobnih jekel najsodobnejšo tehnologijo za obdelavo jekla v ponovci.

Jeklo izdelamo v električni obločni peči po dvožilndrnem postopku zato, da dosežemo dovolj nizko vsebnost žvepla pred sekundarno obdelavo v ponovci in da je rafinacijska žilindra bela (z majhno vsebnostjo oksidov FeO in MnO).

Sledi sekundarna obdelava jekla v ponovci z vpihovanjem CaSi ali kombinacijo taljene sintetične žilindre in CaSi.

Rezultat takšne obdelave je nadaljnja dezoksidacija in odžveplanje taline z modifikacijo nekovinskih vključkov, sulfidov in aluminatov v kalcijeve aluminat, v glavnem drobne okrogle vključke, ki med valjanjem ohranijo svojo obliko in s tem vplivajo na mehanske in plastične lastnosti jekla, kot so: raztezek, kontrakcija in žilavost, ki se močno izboljšajo.

**Osnovne lastnosti novih jekel so naslednje:**

**Kemična sestava — smerne vrednosti**

Vrsta jekla	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al
NIOMOL 390	maks. 0,10	0,35	1,00 maks.	0,020	maks. 0,020	—	—	min. 0,020
NIOMOL 490	maks. 0,10	0,35	1,20 maks.	0,020	maks. 0,020	—	—	min. 0,020

Jekli sta legirani z Nb in Mo posamezno ali v kombinaciji.

**Mehanske lastnosti**

Vrsta jekla	Meja plastičnosti Rp MPa pri debelini (mm)				Trdnost RM MPa	Raztezek A <sub>5</sub> % min	Upogib za 180° preko radiusa D	
	≤ 10	11–15	16–25	> 25			vzdolž.	prečno
NIOMOL 390	390	390	380	370	460–640	20	2.5 a	3 a
NIOMOL 490	490	490	480	470	560–740	19	2.5 a	3 a

Trdnostne lastnosti veljajo pravokotno na smer valjanja.

**Žilavost (J)**

V tabeli so garantirane minimalne vrednosti žilavosti. Dejanske žilavosti, ki so bile dosežene na pločevini, so mnogo višje.

Vrsta jekla	Smer valjanja	Žilavost ISO-V (J) Nestarano stanje Temperatura preiz. (°C)						Žilavost DVM (J) Starano stanje Temp. preizkušanja (°C)				
		+20	0	-20	-40	-50	-60	+20	+5	-20	-40	-60
		NIOMOL 390	vzdolž.	63	63	63	55	47	39	47	41	41
	prečno	55	55	47	39	34	31	35	31	31	27	27
NIOMOL 490	vzdolž.	63	63	63	55	47	39	47	41	41	31	27
	prečno	55	55	47	39	34	31	35	31	31	27	—

Preizkus staranja je bil izveden na 10 % deformiranih vzorcih, žarjenih pol ure pri temperaturi T = 250 °C.

**Preoblikovalna sposobnost**

Jekli NIOMOL 390 in NIOMOL 490 lahko preoblikujemo v hladnem do debeline najmanj 25 mm.

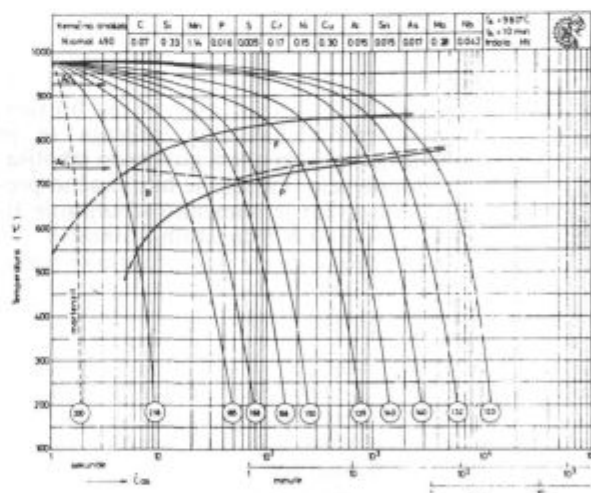
Vroče preoblikovanje uporabimo le izjemoma za pločevine, ki so debelejšje od 25 mm, in za zelo visoke stopnje deformacije. Temperature vročega preoblikovanja so med 900 in 1000 °C! Po vročem oblikovanju izdelke poboljšamo.

**Termična obdelava**

Jekli NIOMOL 390 in 490 dobavljamo v poboljšanem stanju (kaljeno in popuščeno).

**TTT diagram:**

Iz TTT diagrama na sliki št. 1 je razvidno, da v jeklu pri kakršnikoli hitrosti ohlajanja oz. termični obdelavi ne more nastati martenzitna mikrostruktura. To pomeni, da tudi pri varjenju v prehodni coni ni martenzita, zato so tudi izmerjene trdote preko zvarnega spoja enakomernejše in na diagramih trdot ni opaziti izrazitejših konic. Zaradi teh lastnosti jekla pripravo zvarnih robov lahko izvajamo brez predgrevanja. To pomeni, da pločevino lahko obrezujemo plamensko, naknadna mehanska obdelava zvarnih robov ni potrebna. Prav tako tudi pri varjenju predgrevanje ni potrebno. Izračuni C-ekvivalentov in temperature predgrevanja po različnih avtorjih to tudi potrjujejo.



Slika 1  
TTT diagram

V praksi je konstrukcijsko jeklo uporabno toliko, kolikor obvladamo tehnologijo varjenja, kajti končni izdelek je vedno varjena konstrukcija.

Ker sta jekli NIOMOL 390 in NIOMOL 490 bistveno drugačni od dosedanjih domačih mikrolegiranih jekel, smo v železarni Jesenice razvili tudi ustrezen dodajni material, in sicer:

- za ročno obločno varjenje oplašeno elektrodo EVB NiMo,
- za varjenje v zaščitnih plinih žico MIG 65,

— za avtomatsko varjenje pod praškom žico EPP 2 NiMo 2 in aglomerirani varilni prašek OP 40 TT.

V nadaljevanju so prikazani rezultati preiskav zvarnih spojev, izdelanih z omenjenimi dodatnimi materiali.

V preiskave je vključena tudi preiskava zvarnih spojev, zavarjenih s polnjeno žico Fluxofil 41.

Oglejmo si primere:

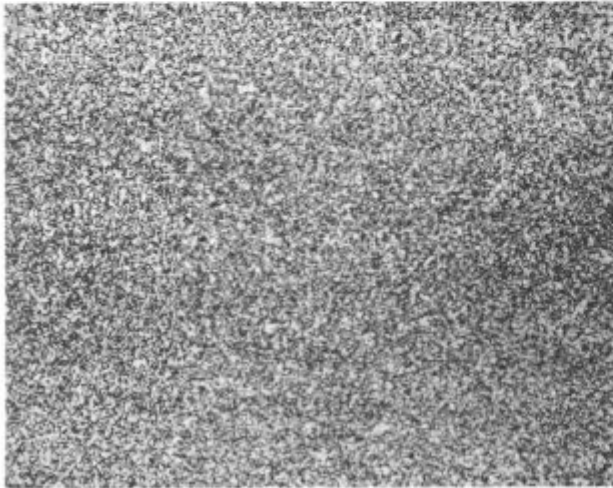
**VARJENJE SOČELNEGA ZVARNEGA SPOJA NA PLOČEVINI DEBELINE D = 12 mm**  
**OSNOVNI MATERIAL: NIOMOL 490 šarža 18 1303**

**Kemična sestava jekla:**

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Sn	As	Mo	Nb
0,07	0,33	1,14	0,016	0,005	0,17	0,15	0,30	0,015	0,015	0,017	0,28	0,042

**Termična obdelava jekla:**

Poboljšano (kaljeno in popuščeno)



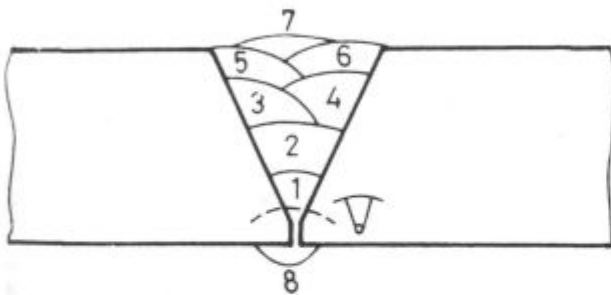
Slika 2

Mikrostruktura osnovnega materiala (pov. 100 ×) Ferit + bainit

**Mehanske lastnosti jekla:**

R <sub>p</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	A <sub>5</sub> %	Z %	Žilavost ISO-V (J)				
				Temperatura preizkušanja (°C)				
				+20	0	-20	-40	-60
510	590	22	70	185	180	190	190	180

Vrednosti veljajo za smer prečno na smer valjanja.



Slika 3

**Položaj varjenja:** vodoravno  
**Dimenzija žice:** Ø = 1,2 mm  
**Zaščitni plin:** CO<sub>2</sub>, pretok 12 l/min  
**Ohlajanje vmesnih slojev:** pod temperaturo T = 120 °C  
**Varilni parametri:**  
 Var 2—7 I = 165A, U = 21 V  
 Hitrost varjenja v = 40 cm/min Q = 5,2 KJ/cm  
 Var 1—8 I = 140A, U = 20 V  
 Hitrost varjenja v = 40 cm/min Q = 4,2 KJ/cm  
 Povprečen vnos energije je 4,7 KJ/cm.

**DODAJNI MATERIAL ZA VARJENJE**

1. Polnjena žica Fluxofil 41
2. Oplaščena bazična elektroda na bazi Ni in Mo — EVB NiMo
3. Dodatni material za varjenje v mešanici plinov MIG 65

**1. Polnjena žica Fluxofil 41**

**Preiskave čistega vara:**

**Kemična sestava:**

C	Si	Mn	Ni	Mo
0,05	0,35	1,4	1,2	0,40

**Mehanske lastnosti čistega vara:**

R <sub>p</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	A <sub>5</sub> %	Žilavost ISO-V (J)			
			Temperatura preizkušanja (°C)			
			0	-20	-40	-60
560	650—750	20	110	80	50	30

**Izvedba spoja:**

Sočelni V — spoj, priprava robov plamensko, ni potrebna naknadna meh. obdelava. Gradnja posameznih varkov je razvidna iz skice na sl. 3.

**Mehanske lastnosti spoja:**

**Natezni preizkus (epruveta s paralelnimi boki)**

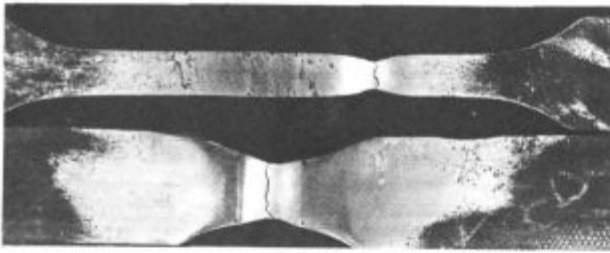
R <sub>p</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	A <sub>5</sub> %	Mesto pretrga
490	582	22,5	v osnovnem materialu

**Natezni preizkus (epruveta z vdrtimi boki)**

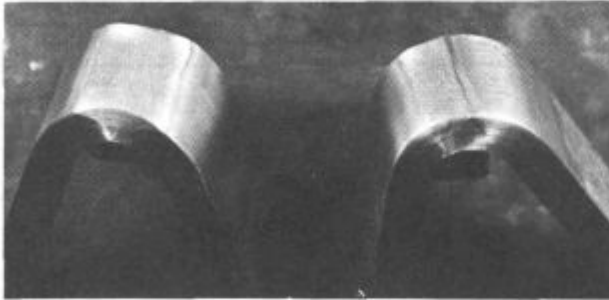
R <sub>p</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	A <sub>5</sub> %	Mesto pretrga
—	615	—	v zvaru

**Upogibni preizkus**

a = 2 d  
 koren zvara = 180°  
 teme zvara = 180°



Slika 4  
Natezni preizkus

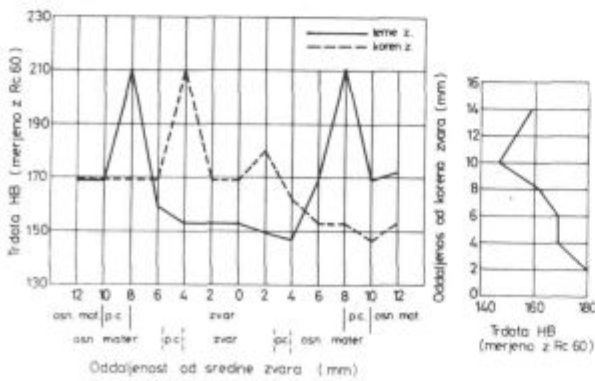


Slika 5  
Upogibni preizkus

**Žilavost zvarnega spoja ISO-V (J)**

T preizk.	Mesto zarez	Vrednost	
-20	O	190	O = osnovni material S = sredina zvara P = prehodna cona
	S	90	
	P	136	
-40	O	180	
	S	85	
	P	115	
-60	O	180	
	S	47	
	P	84	

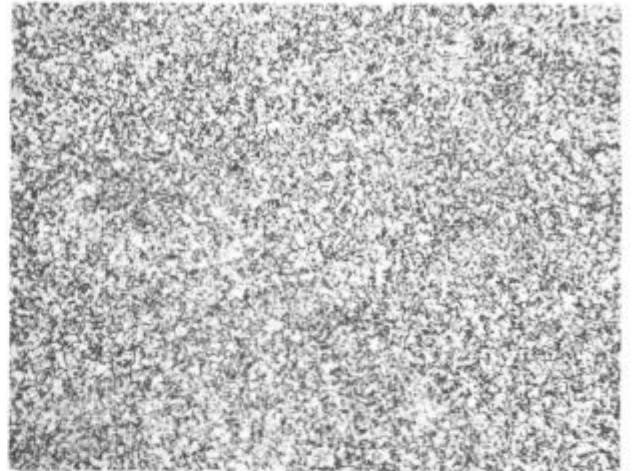
**Metalografske preiskave:  
Makrostruktura in trdote**



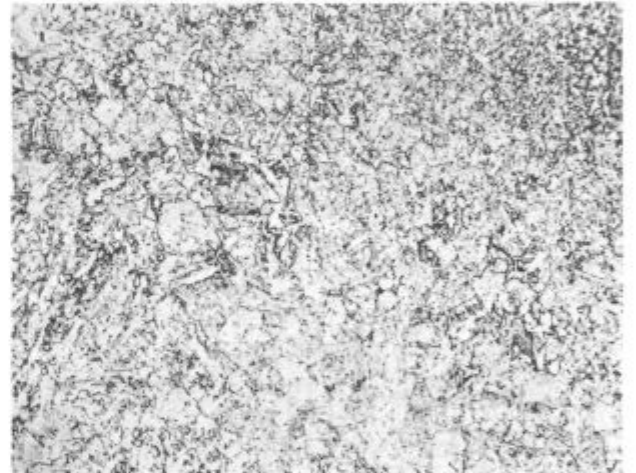
Slika 6

Diagram trdot preko zvarnega spoja in makrostruktura

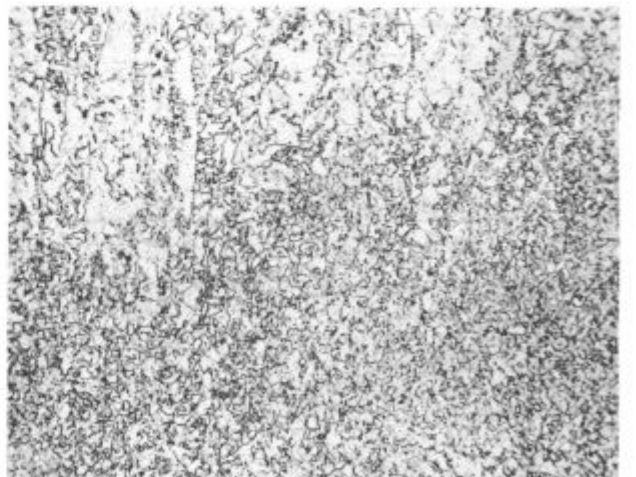
Mikrostrukture sredine zvara, prehodne cone in toplotno vplivane cone ter osnovnega materiala kažejo slike od 7 do 9.



Slika 7  
Osnovni material pov. 100x



Slika 8  
Prehodna in TVC pov. 100x



Slika 9  
Sredina zvara pov. 100x

## 2. Oplaščena bazična elektroda na bazi Ni in Mo EVB NiMo

Preiskave čistega vara:

Kemična sestava:

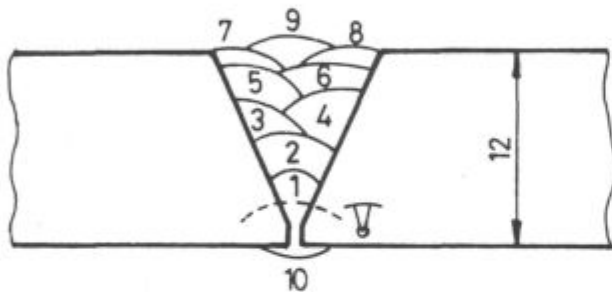
C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Cr	Cu
0,05	0,44	0,85	0,010	0,012	1,15	0,33	0,06	0,22

Mehanske lastnosti čistega vara:

$R_p$ MPa	$R_m$ MPa	$A_5$ %	Z %	Žilavost ISO-V (J)			
				Temperature preizkušanja (°C)			
				0	-20	-40	-60
548	601	24	73	140	130	100	80

Izvedba spoja:

Sočelni V-spoj, priprava robov plamensko, ni potrebna naknadna meh. obdelava. Gradnja posameznih varkov je razvidna s skice na sliki 10.



Slika 10

Položaj varjenja: vodoravno

Dimenzije elektrode:  $\varnothing$  3,25 mm in  $\varnothing$  4 mm

Ohlajanje vmesnih slojev: pod temperaturo  $T = 120^\circ\text{C}$

Varilni parametri:

Var 1  $\varnothing$  3,25 mm  $I = 110$  A  $U = 22$  V  
 $v = 14,6$  cm/min  $Q = 9,9$  KJ/cm

Var 2-6  $\varnothing$  4 mm  $I = 160$  A  $U = 22$  V  
 $v = 22,5$  cm/min  $Q = 9,4$  KJ/cm

Var 7-10  $\varnothing$  3,25 mm  $I = 110$  A  $U = 22$  V  
 $v = 20,0$  cm/min  $Q = 7,2$  KJ/cm

Povprečni vnos energije 7,85 KJ/cm.

Mehanske lastnosti spoja:

Natezni preizkus (eproveta s paralelnimi boki)

$R_p$ MPa	$R_m$ MPa	$A_5$ %	Mesto pretrga
487	570	19	v osnovnem materialu

Natezni preizkus (eproveta z vrtimi boki)

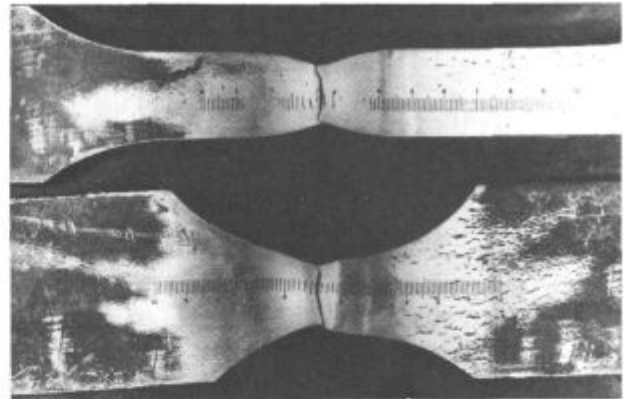
$R_p$ MPa	$R_m$ MPa	$A_5$ %	Mesto pretrga
—	611	—	v zvaru

Upogibni preizkus

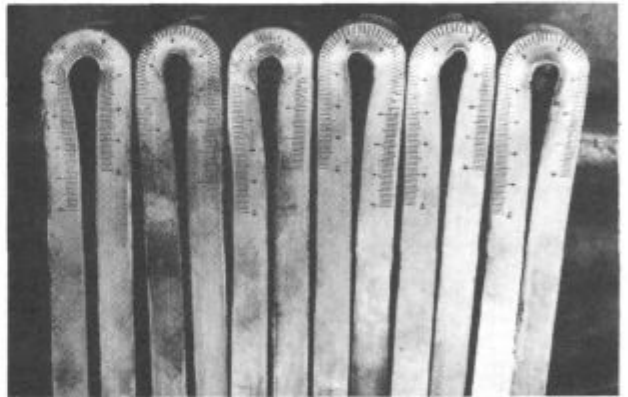
$a = 2d$

teme zvara =  $180^\circ$

koren zvara =  $180^\circ$



Slika 11  
Natezni preizkus



Slika 12  
Upogibni preizkus

Žilavost zvarnega spoja ISO-V (J)

T preizk.	Mesto zarez	Vrednost
-20 °C	O	190
	S	60
	P	160
-40 °C	O	190
	S	46
	P	62
-60 °C	O	180
	S	40
	P	47

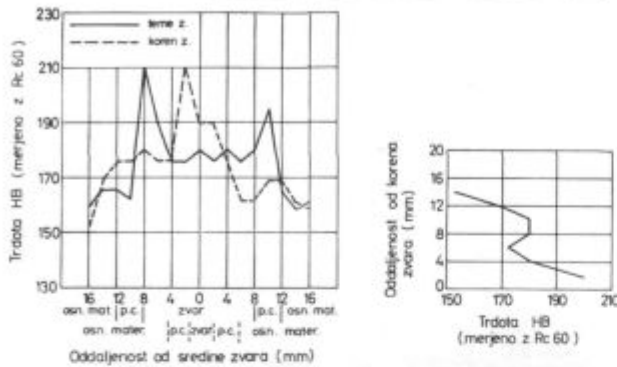
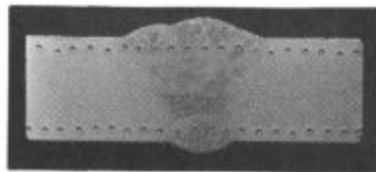
O = osnovni material

S = sredina zvara

P = prehodna cona

Metalografske preiskave:

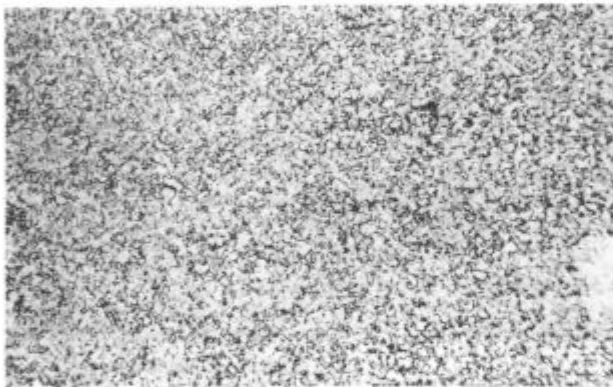
Makrostruktura in trdote



Slika 13

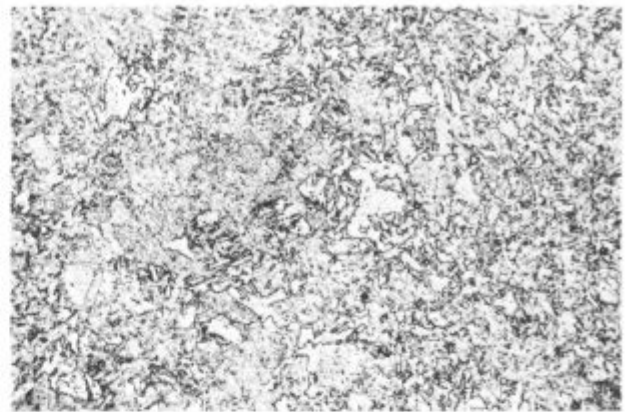
Diagram trdot preko zvarnega spoja in makrostruktura

Mikrostrukture sredine zvara, prehodne cone in toplotno vplivane cone ter osnovnega materiala kažejo slike od 14–16.

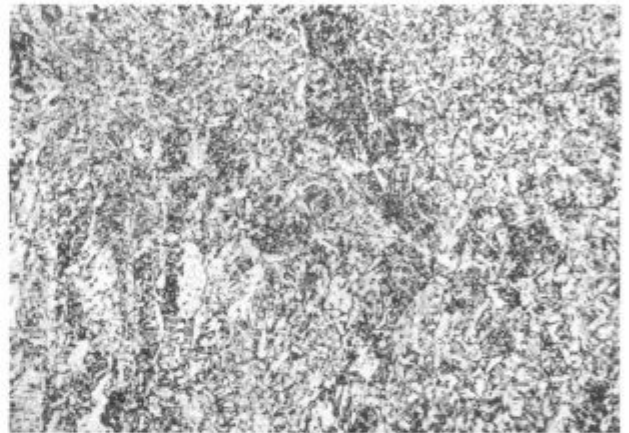


Slika 14

Osnovni material pov. 100 ×



Slika 15  
Prehodna in TVC pov. 100 ×



Slika 16  
Sredina zvara pov. 100 ×

**Zvarni spoj:**

Osn. material: Niomol 490 d = 12 mm  
 Dodajni material: MIG 65 chg.: 14 4448  
 Zaščitni plin: Ar + CO<sub>2</sub> (80 : 20)  
 Oblika spoja: V spoj

**3. Dodajni material za varjenje v mešanici plinov MIG 65**

Kvaliteta MIG 65

Štev. chg.: 14 4448 Dimenzija: Ø 1.2 mm  
 Zaščitni plin: Ar + CO<sub>2</sub> (80 : 20)

**Kemična analiza:**

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al
0,09	0,60	1,16	0,013	0,003	0,22	1,06	0,19	0,28	0,014

**Mehanske lastnosti čistega vara:**

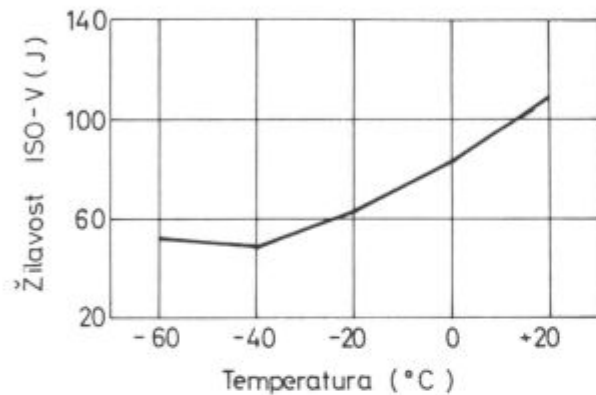
R <sub>p</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	A <sub>5</sub> %	Z %	Žilavost ISO-V (J)				Topl. obdel.	
				T preizk. (°C)		T preizk. (°C)			
				+20	0	-20	-40	-60	
647	732	18	59	128	116	70	35	35	varjeno stanje
				110	86	72	32	45	
552	640	23	68,5	125	112	62	35	30	napetostno odžarjeno
				120	100	95	59	51	

**Mehanske lastnosti zvarnega spoja**

	R <sub>p2</sub> MPa	R <sub>m2</sub> MPa	A <sub>5</sub> %	Z %
s paralelnimi boki	470	506	18	
z vdrtimi boki	—	644	—	

**Žilavost ISO-V (J) sredine zv. spoja**

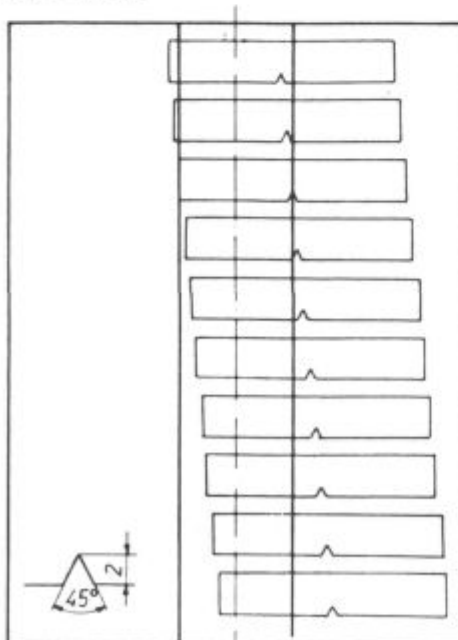
	T preizk. (°C)				
	+20	0	-20	-40	-60
120	85	60	39	30	
114	73	74	47	39	
98	86	58	58	90	



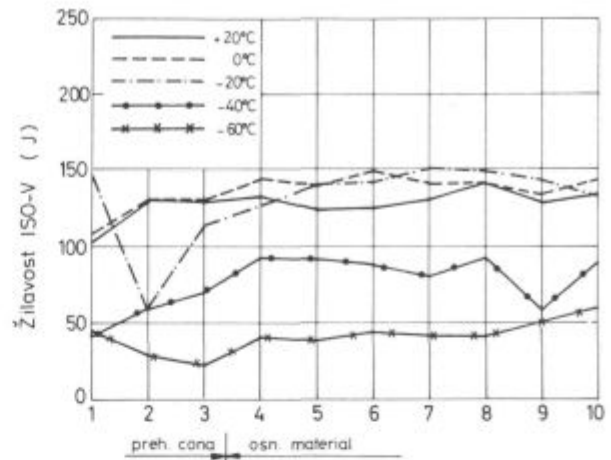
Slika 17  
Žilavost sredine zvarnega spoja

**Upogib (d = 4 a):**  
na teme : ocena 5 α = 180°  
na koren : ocena 5 α = 180°

Izdelane so žilavosti pri T = +20° do -60° v prehodnih conah, in sicer tako, da je prvi žil. preizkušaneec oddaljen od zvarnega robu 2 mm in prehaja v osnovni material (po skici).

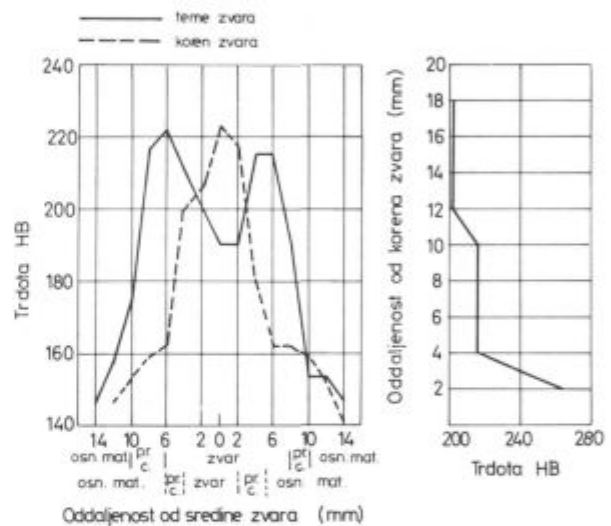


10 vzorcev čez prehodno cono



Zaporedna št. žilavostnega vzorca

Slika 18  
Žilavost preko prehodne cone



Slika 19  
Diagram trdot preko zvarnega spoja

Vse trdote se nahajajo v območju med 146 do 222 HB.

Poleg navedenih varilno-tehničnih preiskav so izdelane še številne druge preiskave, tako v laboratorijskem kot v industrijskem merilu. Tako npr. je bila izoblikovana podnica varjene izvedbe v hladnem na preši in na izoblikovalnem stroju Boldrini.

**ZAKLJUČKI**

Preiskave na novem mikrolegiranem jeklu z mejo plastičnosti 490 MPa so pokazale naslednje:

- Jeklo ima odlične mehanske lastnosti, predvsem žilavost pri nizkih temperaturah.
- Jeklo je sposobno preoblikovanja v hladnem.
- Zaradi nizkega C-ekvivalenta ga je mogoče plamensko rezati brez predgrevanja.
- Jeklo je zelo dobro varivo. Z uporabo omenjenih dodatnih materialov ima zvarni spoj dobro žilavost do -60°C.
- Potrebno je strogo upoštevati prikazano tehnologijo varjenja od parametrov do števila varkov in vnosa energije, če hočemo dobiti dobro žilavost.

- Dodajni material mora vsebovati Mo.
- Predgrevanje ni potrebno.
- Trdote v prehodnih conah ne presegajo 220 HB.
- Jeklo ni občutljivo na nastanek razpok v hladnem, ker v nobenem primeru ne pride do nastanka martenzita.
- Jeklo je vsesplošno uporabno, predvsem je namenjeno za zahtevnejše konstrukcije.
- Vse ugotovitve veljajo tudi za jeklo z mejo plastičnosti 390 MPa.

Literatura:

1. INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING COMMISSION IX.  
Behavior of Metals Subjected to Welding — Recommendations for Welding of High strength Steel. May 1984.
2. SUZUKI HARUYOSHI  
NEW HT 50 STEEL FOR MARINE AND OFFSHORE CONSTRUCTIONS WITH SUPERIOR WELDABILITY
3. SUMITOMO TECHNICAL BULLETIN  
NORIIHIKO NOZAKY: KIYOSHI BESSEYO, TAMOTSU HASHIMOTO  
Julij 1979, Vol. 11, str. 7
4. METAL CONSTRUCTION  
Avgust 1985  
High Strength and tempered Steels — Production, Properties and applications.  
B. Müsgen
5. STAHL UND EISEN  
Julij 1985, št. 13  
Thermomechanische gewalzte bainitische Stähle mit Streckgrenzen von 500 bis 700 N/mm<sup>2</sup> für Grobblech und Warmbreitband. Heinpich, Baumgardt, Harold de Boer, Bruno Müsgen, Udo Schriever.
6. METALS TECHNOLOGY  
Julij 1979  
Effect of Cooling Rate on Mechanical Properties and Microstructure of Controlled — Rolled — C — Mn — Nb Steels. E. A. Almond, D. S. Mitchell, R. S. Irani.
7. JOURNAL OF METALS  
Januar 1972  
Microduplex Processing of Low Alloy Steels. F. Snape, N. L. Church.
8. SCANDINAVIAN JOURNAL OF METALLURGY  
1980, št. 9  
Controlled Rolling of Mn-Mo HSLA-Steel Plate. Tony Nilsson, M. T. Crooks, J. M. Chilton.
9. H. B. Cary, Troy, Fülldrahtelektroden neue Entwicklungen und Anwendungen in den USA und in Europa, DVS Berichte 7, Essen 1969.
10. A. Werner, H. Baach, Oerlikon Fluxofil Flux — cored Wiers, Bulletin of the Oerlikon Welding Organisation 1985.
11. B. Bertolaso, Flux Cored Wire, Schweissindustrie Oerlikon-Buehrle AG, Zürich 1986.
12. G. Bommel, Fülldrähte und ihr praktischer Einsatz Zeitschrift für Schweißtechnik Nr. 9/1972.
13. Metalllichtbogenschweissen mit Fülldrahtenelektrode Der Praktiker 4/1976.