

TOPLINSKA OBRADA ZAVARENIH SPOJEVA ČELIKA NIOMOL 490

HEAT TREATMENT OF WELDED JOINTS OF STEEL NIOMOL 490

**Tonči SARDELIĆ¹⁾, Nedjeljko MIŠINA²⁾, Ivan POLAJNAR²⁾,
Branimir LELA²⁾, Željko BILIĆ⁴⁾**

Ključne riječi: mikrolegirani čelik, zavareni spoj, toplinska obrada, mehanička svojstva

Key words: microalloyed steel, welded joint, heat treatment, mechanical properties

Sažetak: Ovaj rad bavi se istraživanjem utjecaja žarenja radi redukcije zaostalih naprezanja na svojstva zavarenih spojeva mikrolegiranih čelika. Eksperimenti su provedeni zavarivanjem ploča debljine 13 mm od mikrolegiranog čelika NIOMOL 490 koristeći MAG postupak. Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja provedeno je pri tri različite temperature 450, 550 i 650 °C u trajanju od četiri sata. Nakon žarenja izrađene su epruvete na kojima su se provela ispitivanja mehaničkih svojstava i metalografska analiza.

Abstract: This work deals with the research of influence of the stress relief annealing on the properties of welded joints of microalloyed steels. Welding the plates of 13 mm thickness made of microalloyed steel NIOMOL 490 using MAG procedure has performed the experiments. The stress relief annealing has been conducted at three different temperatures 450, 550 and 650 °C in the duration of 4 hours. After the annealing, specimens were taken out of welded joints, on which mechanical and microstructural properties have been examined.

¹⁾ Tonči Sardelić, dipl. ing., Brodotrogir, Put brodograditelja 16, 21240 Trogir

²⁾ Dr. sc. Nedjeljko Mišina, FESB, R. Bošković b.b, 21000 Split

³⁾ Dr. sc. Ivan Polajnar, Fakultet za strojništvo, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana

²⁾ Branimir Lela dipl. ing., FESB, R. Boškovića b.b, 21000 Split

⁴⁾ Mr. sc. Željko Bilić, PIS-INŽENJERING d.o.o., Sedam Kaštela b.b., 21000 Split

1. UVOD

Čelik trgovačkog naziva NIOMOL 490 je proizvod tvrtke ACRONI d.o.o. iz Jesenica, Slovenija. Spada u grupu mikrolegiranih poboljšanih čelika. Primjenjuje se najčešće za izradu: mostova, proizvodnih hala, naftnih postrojenja, rezervoara, tlačnih cjevovoda velikih promjera, silosa, te prikolica za prijevoz teških tereta [2]. Kemijski sastav i mehanička svojstva čelika dani su u tablicama 1 i 2. Kemijski sastav je ispitana u "Željezari- Split" u Kaštel Sućurcu.

Tablica 1. Kemijski sastav čelika NIOMOL 490

KEMIJSKI SASTAV U %																
C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Sn	Al	Mo	V	W	Ti	Ni	Nb	Fe	
0.113	0.42 9	0.51	0.00 7	0.000 9	0.36	0.59	0.02	0.04	0.31	0.00 3	0.01 2	0.01 7	0.25	0.03	97.2 9	

Tablica 2. Mehanička svojstva mikrolegiranog čelika NIOMOL 490 [4]

OZNAKA	Granica tečenja R_e [N/mm ²], za debjinu lima [mm]				Rastezna čvrstoća R_m [N/mm ²]	Izduženje A_5 [%]	Savijanje $\alpha=180^\circ$		Udarna radnja loma [J], temp. -20°C	
	≤ 10	11-15	16-25	>25			uzdužno	poprečno	uzdužno	poprečno
NIOMOL 490	≤10	11-15	16-25	>25	560-740	19	2.5a	3a	118	78
	490	490	480	470						

Cilj ovog rada je utvrditi mehanička svojstva zavarenih spojeva i mikrostrukturne promjene u zoni utjecaja topline i metalu zavara prije i nakon provedenog žarenja radi redukcije zaostalih naprezanja.

2. EKSPERIMENTALNI RAD

2.1. Odabir postupka zavarivanja i dodatnog materijala

Za zavarivanje mikrolegiranih čelika najviše se koristi elektrolučno zavarivanje u zaštiti ugljičnog dioksida (MAG postupak). Ovim se postupkom mogu postići vrlo kvalitetni zavareni spojevi, a pogodan je i za visoku automatizaciju i robotizaciju. To su i bili razlozi odabira ovog postupka zavarivanja u ovom radu. Kao dodatni materijal za zavarivanje ispitivanog čelika NIOMOL 490 izabrana je praškom punjena žica FILTUB 28B promjera 1.2 mm, proizvod tvrtke Železarna Jesenice d.o.o. Prašak kojim je punjena žica je bazičnog karaktera. Kemijski sastav i mehanička svojstva žice dani su u tablicama 3 i 4.

Tablica 3. Kemijski sastav praškom punjene žice FILTUB 28B [4]

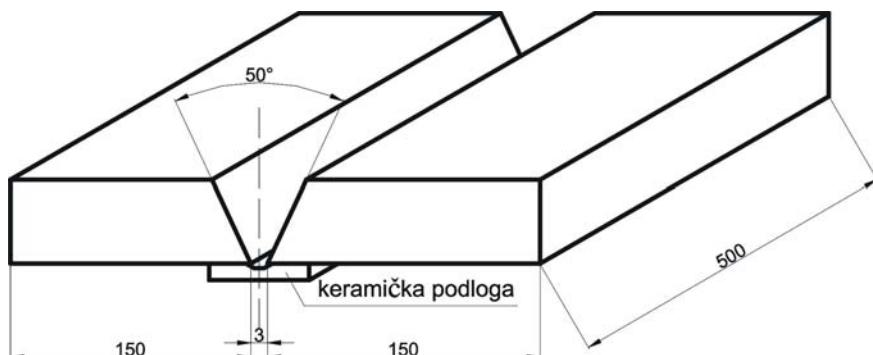
Dodatni materijal	KEMIJSKI SASTAV U %				
	C	Si	Mn	Ni	Mo
FILTUB 28B	0.05	0.35	1.4	1.2	0.40

Tablica 4. Mehanička svojstva praškom punjene žice FILTUB 28B [4]

Dodatni materijal	Granica tečenja R_e [N/mm ²]	Rastezna čvrstoća R_m [N/mm ²]	Izduženje A_5 [%]	Udarna radnja loma [J], temperatura [°C]				
				-60	-40	-20	0	20
FILTUB 28B	>560	650-750	>20	>47	>60	>80	>110	>120

2.3. Priprema i zavarivanje ploča

Plinski su izrezane dvije ploče dimenzija 500x150x13 mm. Da bi se izbjegao utjecaj plinskog rezanja, blanjanjem je sa ploča na strani zavarivanja, skinut sloj debljine 10 mm. Obje ploče pripremljene su za zavarivanje na način prikazan na slici 1.



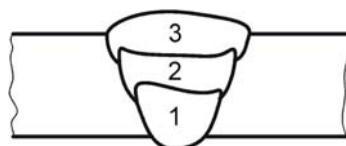
Slika 1. Priprema ploče za zavarivanje

Za zavarivanje je korišten aparat PRO 5200 EVOLUTION proizvođača KEMPPİ. Poluautomat se sastojao od ispravljača model BUG 5100, pogonskog mehanizma za dovod žice i pištolja za zavarivanje. Da bi se eliminirao utjecaj zavarivača korištena su kolica s mogućnošću regulacije brzine kretanja koja su nosila pištolj za zavarivanje.

Tablica 5. Parametri zavarivanja pri provedbi pokusa

Vrsta čelika	Redni broj sloja	Brzina zavarivanja [cm/min]	Jakost struje zavarivanja [A]	Napon zavarivanja [V]	Srednja unesena energija [kJ/cm]
NIOMOL 490	1	16.85	155	20.1	10.31
	2		161	22.3	
	3		160	22	

Protok zaštitnog plina (92 % Ar + 8 % CO₂) bio je konstantan tijekom zavarivanja i iznosio je 16 l/min. Zavarivanje je izvedeno u tri sloja (slika 2) i prije polaganja svakog sloja ploča se hladila na zraku do početne temperature. Kontrola temperature zavarene ploče vršila se digitalnim termometrom.

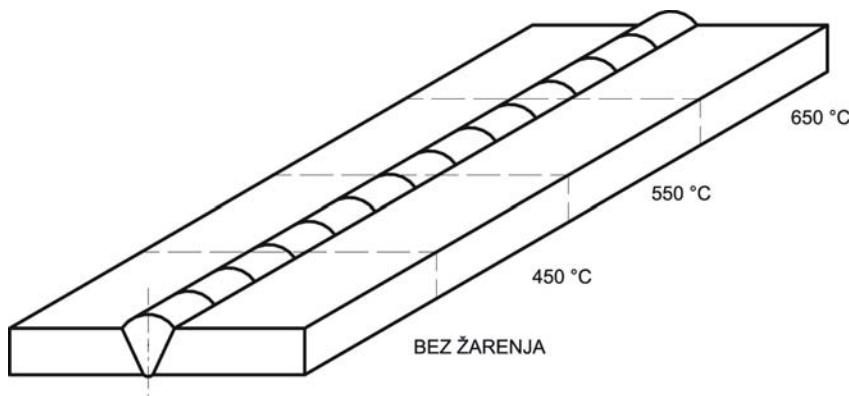


Slika 2. Način slaganja slojeva kod višeslojnog zavarivanja

Ispod zavarivanih ploča postavljena je keramička podloga zbog provarivanja korijenskog zavara, a do sada su s ovakvim podlogama postignuti dobri rezultati pri zavarivanju s povećanim unosom topline. Napon zavarivanja mjerjen je voltmetrom koji je bio na aparatu za zavarivanje, a struja zavarivanja ampermetrom spojenim serijski na električni kabel mase za zavarivanje. Zavareni spoj ploče je snimljen rendgenom i nije uočeno postojanje signifikantnih grešaka.

2.4. Toplinska obrada zavarene ploče

Prije toplinske obrade zavarena ploča izrezana je na četiri jednakaka dijela. Jedan dio ploče nije toplinski obrađen dok su preostala tri žarena u elektrotopornoj peći radi redukcije zaostalih naprezanja i to pri temperaturama 450, 550 i 650 °C u trajanju od četiri sata, slika 3. Nakon žarenja ploče su hlađene u zatvorenoj i isključenoj peći.

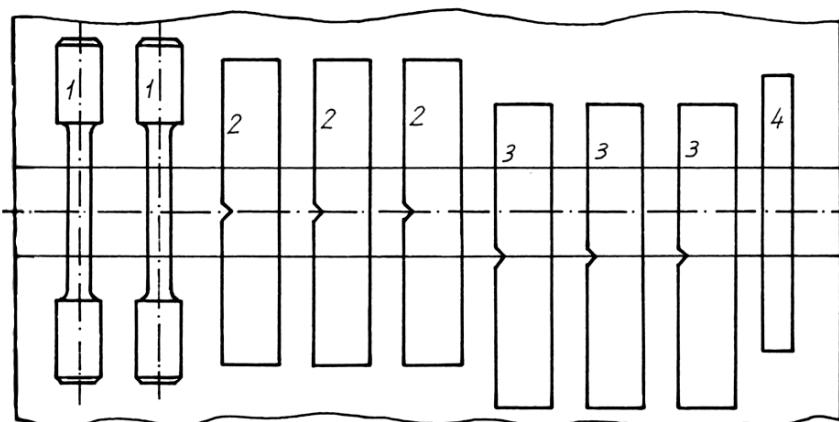


Slika 3. Plan žarenja zavarenih ploča

2.5. Izrada epruveta za ispitivanje

Za potrebe ispitivanja, iz svake od četiri ploče, izrađene su sljedeće epruvete (slika 4):

- dvije epruvete za ispitivanje rastezne čvrstoće i istezljivosti (1),
- šest epruveta za ispitivanje radnje loma Charpy-evom metodom, od kojih tri sa zarezom V2 u sredini zavara (2) i tri sa zarezom V2 u zoni utjecaja topline (3),
- jedna epruveta za ispitivanje tvrdoće i metalografski pregled mikrostrukture (4).



Slika 4. Raspored i broj epruveta iz svake ploče

3. REZULTATI ISPITIVANJA

Granica tečenja, rastezna čvrstoća i istezljivost ispitivani su na kidalici INSTRON 8801 čije je maksimalno opterećenje 50 kN. Rezultati ispitivanja dati su u tablicama 6, 7 i 8, odnosno grafički na slikama 5, 6 i 7. Ispitivanje radnje loma Charpy-evom metodom izvršeno je pri temperaturi od -20 °C. Rezultati ispitivanja dati su u tablici 9, odnosno grafički na slikama 8 i 9.

Tablica 6. Rezultati ispitivanja granice tečenja zavarenih spojeva čelika NIOMOL 490

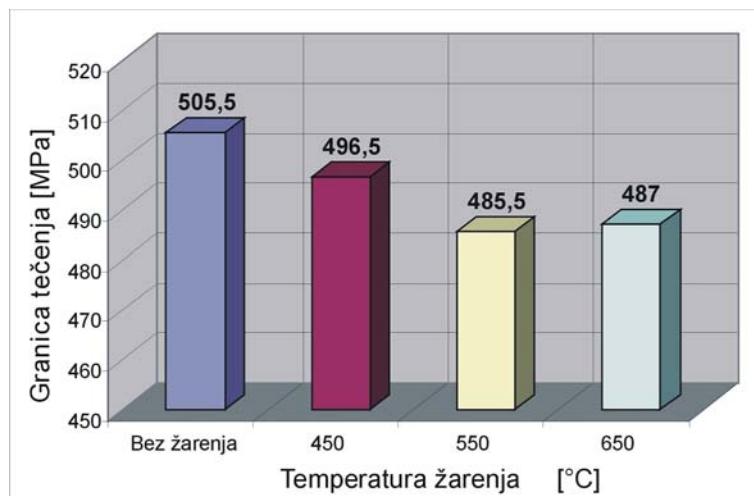
Srednja unesena energija [kJ/cm]	Temperatura žarenja [°C]	Granica tečenja [MPa]		Srednja vrijednost
		Izmjereno		
10.31	Bez žarenja	516	495	505.5
	450	500	493	496.5
	550	490	481	485.5
	650	498	476	487

Tablica 7. Rezultati ispitivanja rastezne čvrstoće zavarenih spojeva čelika NIOMOL 490

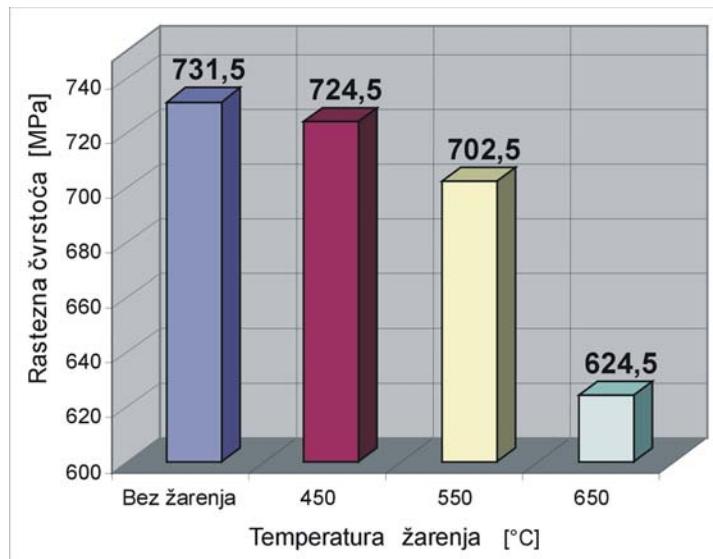
Srednja unesena energija [kJ/cm]	Temperatura žarenja [°C]	Rastezna čvrstoća [MPa]		Srednja vrijednost
		Izmjereno		
10.31	Bez žarenja	746	717	731.5
	450	708	741	724.5
	550	694	711	702.5
	650	546	703	624.5

Tablica 8. Rezultati ispitivanja istezljivosti zavarenih spojeva čelika NIOMOL 490

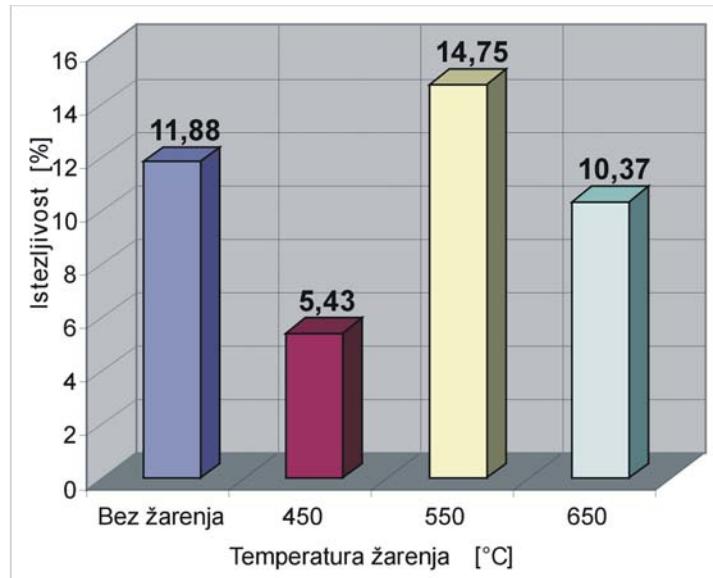
Srednja unesena energija [kJ/cm]	Temperatura žarenja [°C]	Istezljivost [%]		Srednja vrijednost
		Izmjereno		
10.31	Bez žarenja	15.64	8.13	11.88
	450	4.18	6.68	5.43
	550	13.67	15.84	14.75
	650	4.82	15.93	10.37



Slika 5. Utjecaj temperature žarenja na granicu tečenja zavarenog spoja čelika NIOMOL 490



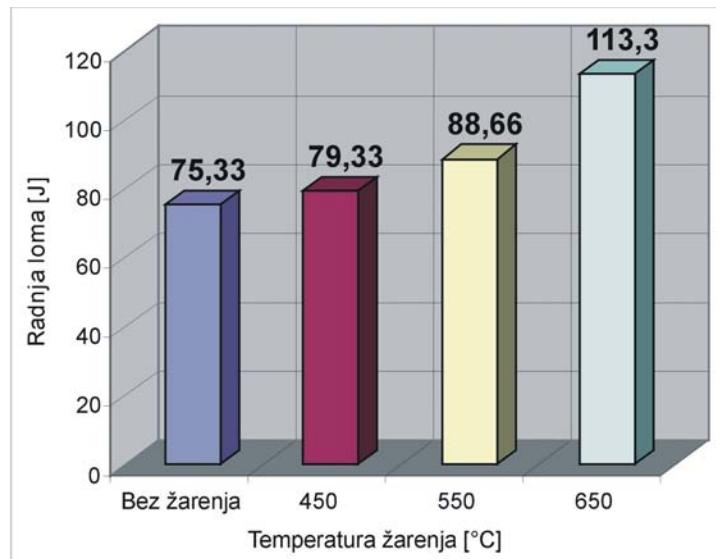
Slika 6. Utjecaj temperature žarenja na rasteznu čvrstoću zavarenog spoja čelika NIOMOL 490



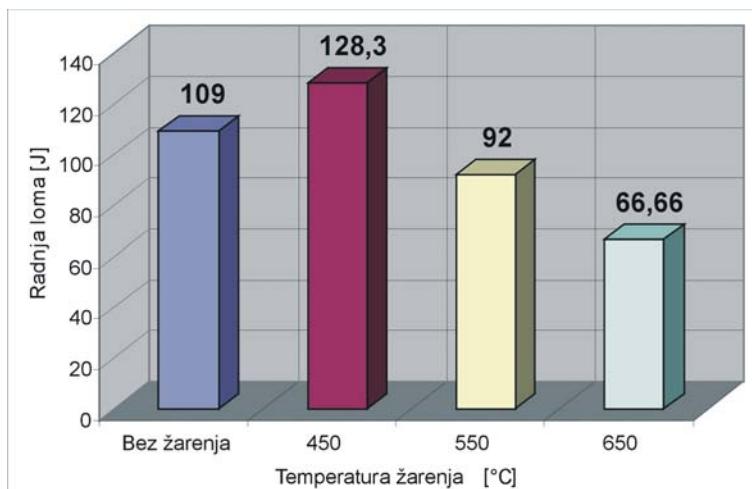
Slika 7. Utjecaj temperature žarenja na istezljivost zavarenog spoja čelika NIOMOL 490

Tablica 9. Rezultati ispitivanja radnje loma zavarenih spojeva čelika NIOMOL 490 sa zarezom V2 u sredini zavara i u ZUT-u ispitane pri -20°C

Srednja unesena energija [kJ/cm]	Temperatura žarenja [°C]	Radnja loma [J]							
		Zavar			Zona utjecaja topline				
		Izmjereno		Srednja vrijednost	Izmjereno		Srednja vrijednost		
10.31	Bez žarenja	80	61	85	75.33	99	113	115	109
	450	90	83	65	79.33	90	100	195	128.33
	550	86	90	90	88.66	85	96	95	92
	650	115	90	135	113.33	75	65	60	66.66

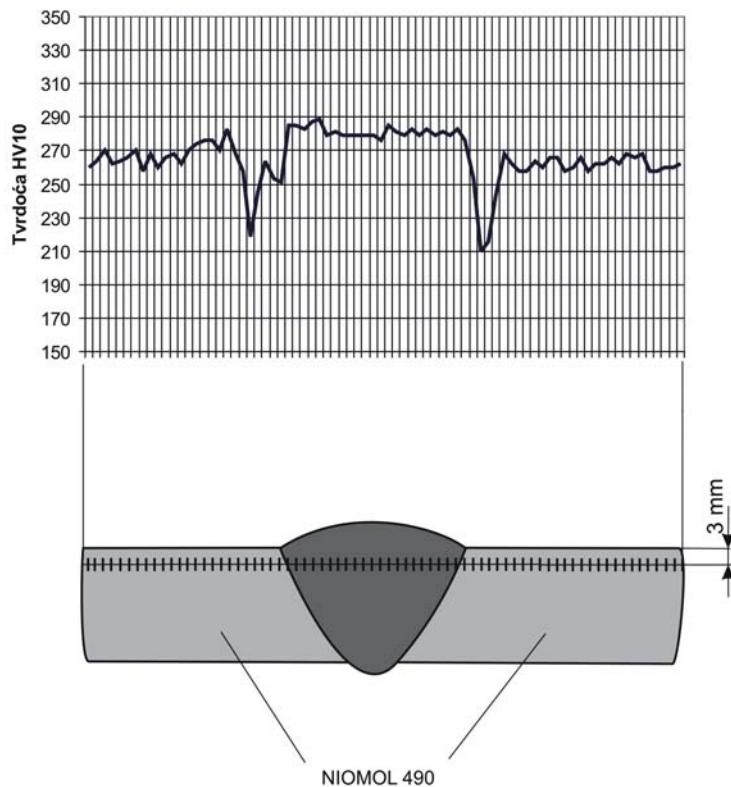


Slika 8. Utjecaj temperature žarenja na radnju loma zavarenog spoja čelika NIOMOL 490 sa zarezom V2 u sredini zavara

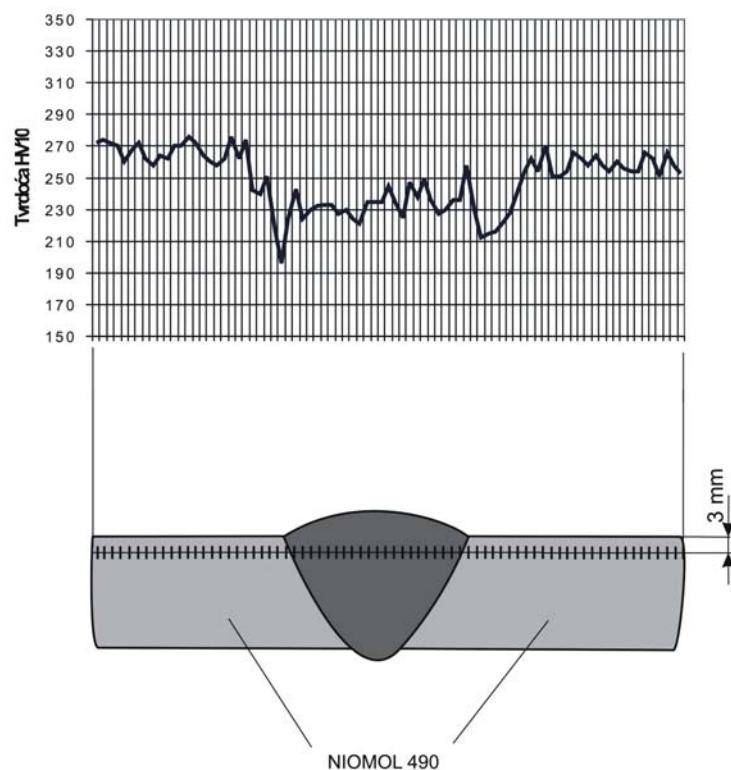


Slika 9. Utjecaj temperature žarenja na radnju loma zavarenog spoja čelika NIOMOL 490 sa zarezom V2 u ZUT-u

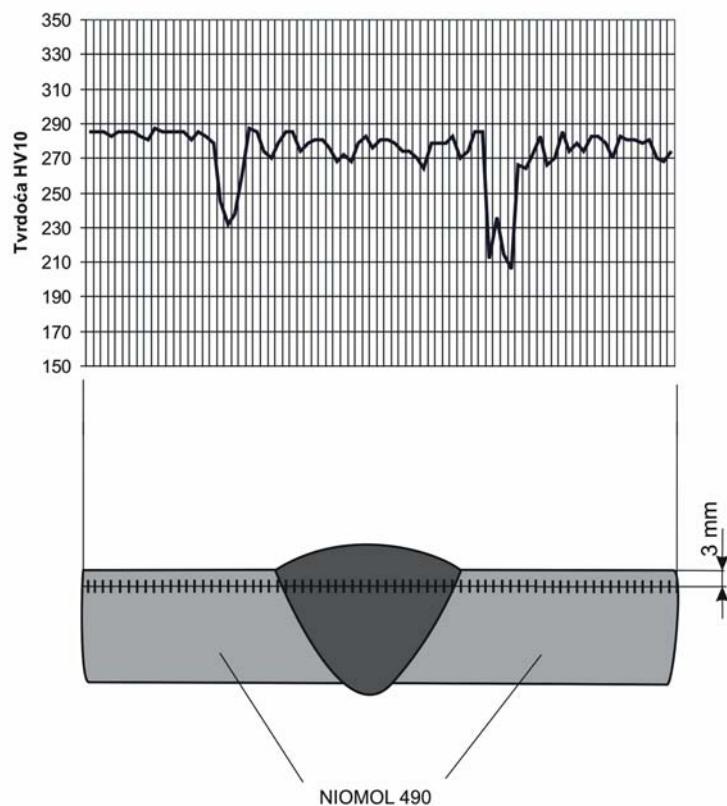
Na zavarenim spojevima čelika NIOMOL 490 žarenim na različitim temperaturama ispitana je tvrdoća metodom Vickers-a poprečno na zavareni spoj s opterećenjem 10×9.81 N (HV10). Promjena tvrdoće po presjeku zavarenih spojeva prikazana je na slikama 10-13. Mjerena su izvršena s lijeva na desno, svakih 0,5 mm.



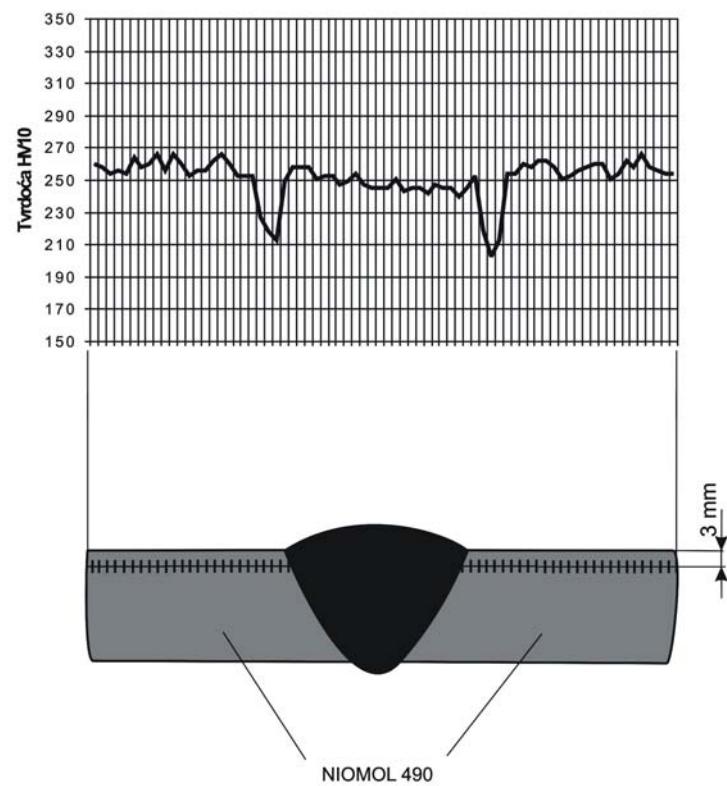
Slika 10. Raspored tvrdoće po presjeku nežarenog zavarenog spoja čelika NIOMOL 490



Slika 11. Raspored tvrdoće po presjeku zavarenog spoja čelika NIOMOL 490 žarenog na 450 °C



Slika 12. Raspored tvrdoće po presjeku zavarenog spoja čelika NIOMOL 490 žarenog na 550 °C



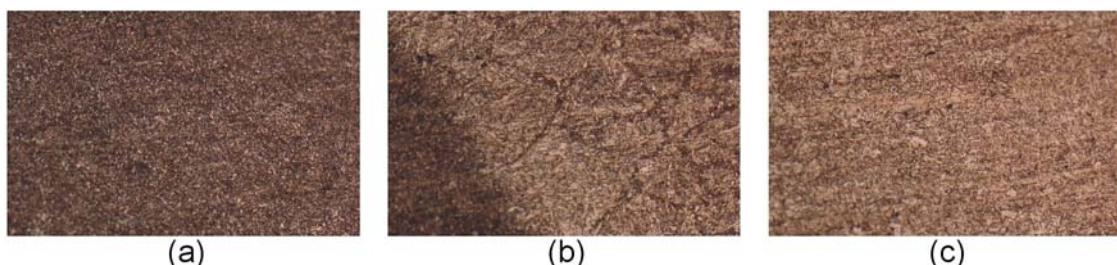
Slika 13. Raspored tvrdoće po presjeku zavarenog spoja čelika NIOMOL 490 žarenog na 650 °C

Iz dijagrama na slikama 10-13 vidljiv je raspored tvrdoće po presjeku zavarenih spojeva, koji je karakterističan za poboljšane čelike. Naime, kod tih čelika u ZUT-u dolazi do pada tvrdoće. Taj pad nastaje u onom dijelu ZUT-a, koji je zagrijan toplinom unesenom zavarivanjem, u temperaturnom intervalu između temperature popuštanja čelika prilikom njegova dobivanja i temperature A_1 [6]. Iz prikazanih dijagrama vidi se da toplina unesena žarenjem nije značajno utjecala na promjenu tvrdoće u ZUT-u i zavaru.

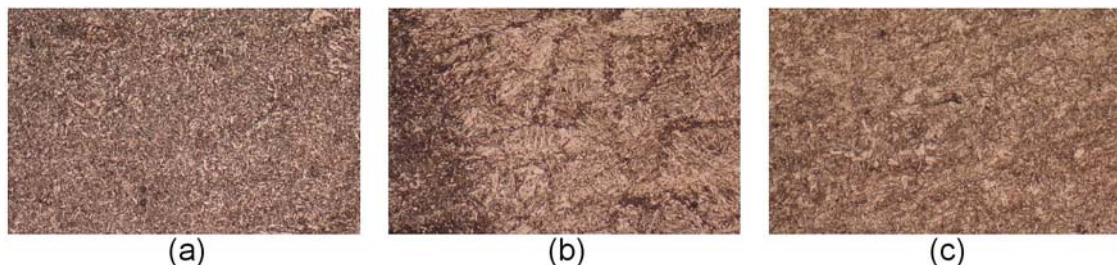
Metalografski pregled mikrostrukture izведен je u svrhu utvrđivanja utjecaja temperature žarenja na promjenu strukture zavara, ZUT-a i osnovnog materijala.

Uzorci na kojima se vršio pregled brušeni su na uređaju za brušenje "HANDIMET GRINDER". Nakon brušenja uzorci su polirani i nagriženi nitalom (3 % HNO_3). Snimanje mikrostrukture izvršeno je mikroskopom "OPTON, Axioskop", a izgled mikrostrukture prikazan je na slikama 14-17.

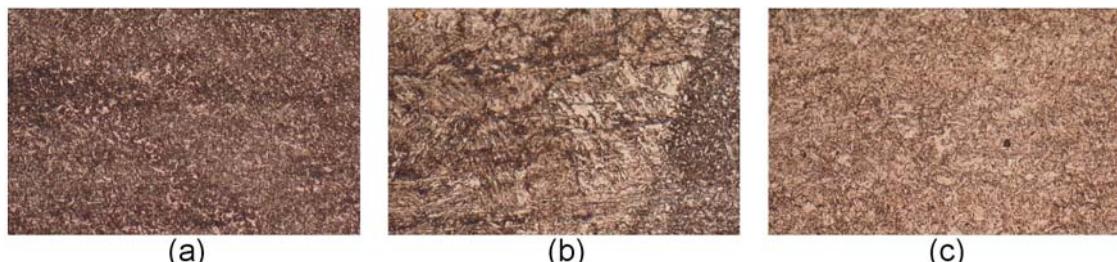
Metalografskim pregledom uočene su značajne strukturne promjene samo u zoni utjecaja topline, ali ne i u osnovnom materijalu i zavaru. U ZUT-u je došlo do porasta zrna i izlučivanja faza po granicama zrna, za čije je detaljnije promatranje potreban elektronski mikroskop.



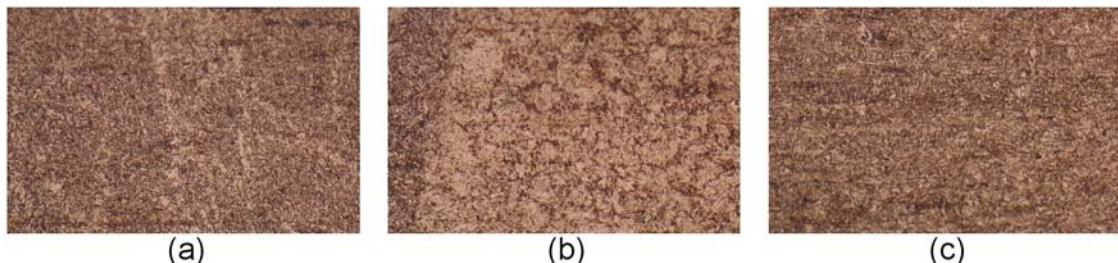
Slika 14. Mikrostruktura zavara (a), ZUT-a (b) i osnovnog materijala (c) čelika NIOMOL 490, bez žarenja, uvećano 200x



Slika 15. Mikrostruktura zavara (a), ZUT-a (b) i osnovnog materijala (c) čelika NIOMOL 490, žareno na $450\text{ }^{\circ}\text{C}$, uvećano 200x



Slika 16. Mikrostruktura zavara (a), ZUT-a (b) i osnovnog materijala (c) čelika NIOMOL 490, žareno na $550\text{ }^{\circ}\text{C}$, uvećano 200x



Slika 17. Mikrostruktura zavara (a), ZUT-a (b) i osnovnog materijala (c) čelika NIOMOL 490, žareno na 650 °C, uvećano 200x

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu provedenih ispitivanja može se zaključiti sljedeće:

Žarenjem zavarenih spojeva mikrolegiranog čelika NIOMOL 490 nije došlo do poboljšanja mehaničkih svojstava. Naprotiv, žarenjem pri temperaturi od 650 °C, došlo je do značajnog pada granice tečenja i rastezne čvrstoće, čime se zapravo gubi prednost primjene mikrolegiranih čelika. Međutim, ako je zbog zakonske regulative žarenje obvezno provesti, onda ga je poželjno provesti do temperature od 550 °C.

5. LITERATURA

- [1] Ito, Y.; Nakaniski, M.: Study on stress relief cracking in welded low alloy steel, IIW Doc X -668-72
- [2] Mišina, N.: Istraživanje utjecaja toplinske obrade na svojstva zavarenih spojeva mikrolegiranih čelika, doktorski rad, FSB, 1991.
- [3] Mišina, N.: Utjecaj parametara zavarivanja i toplinske obrade zavarenih spojeva čelika N-A-XTRA 70 na neka mehanička svojstva, Strojarstvo 32 (1990) 4, str. 291-299
- [4] Prospekti materijal Slovenske železarne ACRONI d.o.o., Jesenice, 2006.
- [5] Rak, I.: Problematika zavarivanja poboljšanog konstrukcionog čelika tipa N-A-XTRA u teškim konstrukcijama, Zavarivanje 16 (1973), 10, str. 325-338.
- [6] Strassburger, C.: Entwicklungen zur fesigkeitssteigerung der stähle, Verlag Stahllisen MBH, Düsseldorf, 1976.