



PROIZVODNJA I ZAVARLJIVOST MIKROLEGIRANIH ČELIKA PRODUCTION AND WELDABILITY OF MICROALLOYED STEELS

Nedjeljko MIŠINA¹⁾, Ivan POLAJNAR²⁾, Željko BILIĆ³⁾

Ključne riječi: mikrolegirani čelici, zavareni spoj, predgrijavanje, toplinska obrada, mehanička svojstva, unesena toplota

Key words: microalloyed steels, welded joint, preheating, heat treatment, mechanical properties, heat input

Sažetak: U radu su izneseni rezultati istraživanja provedenih na normaliziranim i poboljšanim mikrolegiranim čelicima. Zavarivanje je izvedeno bez i sa predgrijavanjem, MAG postupkom zavarivanja, uz različite unose topline. Žarenje radi popuštanja zaostalih naprezanja izvedeno je pri tri različite temperature 450, 550 i 650 °C u trajanju od četiri sata. Analiziran je utjecaj predgrijavanja i unesene topline za vrijeme i nakon zavarivanja na mehanička svojstva zavarenih spojeva.

Abstract: This paper deals with the results of research conducted on normalised and quenched and tempered microalloyed steels. The welding process applied without and with preheating, the MAG procedure with various heat inputs. The stress relief annealing has been conducted at three different temperatures 450, 550 and 650 °C in the duration of 4 hours. The influence of preheating, heat input and stress relieving heat treatment has been researched by testing mechanical properties.

¹⁾ Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Ruđera Boškovića 32, 21000 Split, Hrvatska, nedjeljko.misina@fesb.hr

²⁾ Univerza v Ljubljani, Fakultet za strojništvo, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenija, ivan.polajnar@fs.uni-lj

³⁾ PIS-INŽENJERING d.o.o., Sedam Kaštela bb., 21000 Split, Hrvatska, zelko.bilic@pis.hr



1. UVOD

Povišena granica tečenja mikrolegiranih čelika omogućava izradu lakših konstrukcija, tako da se ovi čelici upotrebljavaju za izradu: mostova, građevinskih strojeva, cjevovoda za hidrocentrale, dvorana u građevinarstvu, tlačnih spremnika, auto i vagon cisterni. U eksploataciji ovih konstrukcija najčešće se javljaju pogreške tipa pukotina. Najveći broj pukotina otkriven je na mjestima najvećih naprezanja, a najčešće u zoni utjecaja topline zavarenih spojeva.

Popravci se izvode izbrusivanjem, ukoliko dubina pukotine ne prelazi debljinu dodatka za koroziju. Ukoliko je pukotina dublja, popravak se obavlja vađenjem pukotine i navarivanjem. Bilo je i objekata koji su i trajno isključeni iz uporabe zbog ozbiljnih oštećenja, od kojih su neka išla kroz cijelu debljinu materijala.

Rezultati istraživanja ukazuju da je teško jednoznačno definirati uzroke oštećenja. Označena su globalna područja i pojave unutar njih kao potencijalni uzročnici oštećenja, s tim da ni jedno od tih područja, odnosno pojava unutar njih, nije isključivi uzročnik oštećenja, već se međusobno superponiraju.

Ta područja i pojave unutar njih su:

- projekti i konstrukcije
- tehnologija i način izrade
- kontrola pri izgradnji
- uvjeti i način eksploatacije
- tlačna proba.

1.1. Dobivanje mikrolegiranih čelika

Mikrolegirani čelici ili čelici povišene čvrstoće, odnosno sitnozrnati čelici, kako se još u literaturi nazivaju, slitine su Fe-C s Mo, Nb, V, Zr, Cr, Al, Ti, Ta i drugih elemenata, u malim količinama. Zbog zavarivanja ugljik je rijetko zastupljen s više od 0,26 %, s tim da se u posljednje vrijeme teži izradi čelika s manje od 0,1 % ugljika.

Ovisno o postignutoj granici tečenja, razlikuju se tri grupe mikrolegiranih čelika:

- čelici povišene čvrstoće s granicom tečenja do 550 MPa, koja se postiže nakon valjanja i normalizacije,
- čelici visoke čvrstoće s granicom tečenja do 1500 MPa, koja se postiže nakon poboljšanja,
- ultračvrsti čelici s granicom tečenja iznad 1500 MPa, koja se postiže termomehaničkim kontroliranim valjanjem.

Postoje dva načina za povećanje granice tečenja metala:

a) Dobivanje materijala s idealnom strukturom: Ukoliko se žele veće dimenzije ovakvih materijala, u trenutnom stadiju tehnološkog razvoja, nemoguće ih je proizvesti. Do sada su se uspjele dobiti niti promjera do 5 μ m. Primjerice, tako dobiveno vlakno željeza promjera 1,6 μ m ima čvrstoću 13400 MPa.

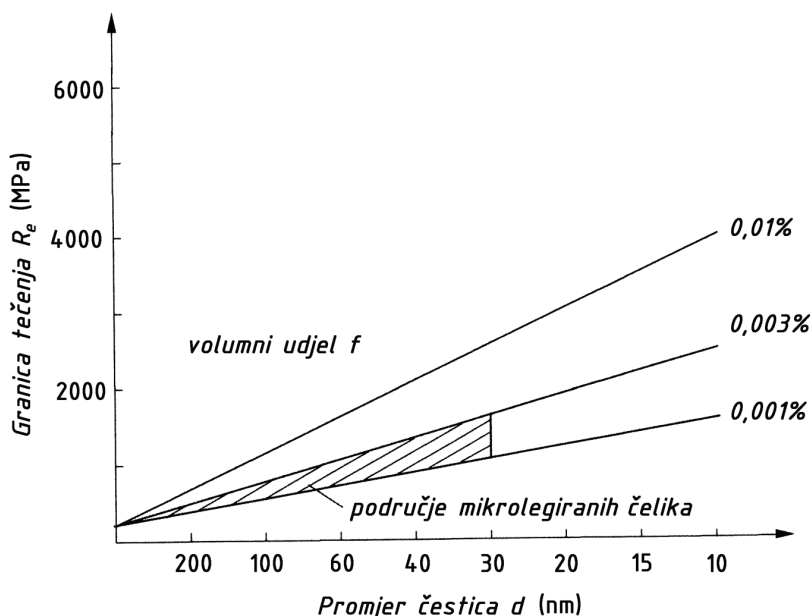
b) Ometanje kretanja dislokacija: Premda daje manje vrijednosti povećanja nego prvi, ovaj način povećanja naprezanja predstavlja osnovu razvoja visokočvrstih čelika. Kemijski sastav i strukturu čelika treba podesiti tako da se oteža gibanje dislokacija, ali ne i potpuno onemogućiti jer bi se tada izgubila sposobnost materijala za promjenu oblika (udarni rad loma, istezanje, kontrakcija).

Postoji više različitih mehanizama koji mogu ometati kretanje dislokacija i na taj način omogućiti postizanje visoke čvrstoće kod ovakvih čelika. Neki od njih su:

- precipitacijsko povećanje granice tečenja,
- očvršnuće putem sitnog zrna,
- očvršnuće kaljenjem i naknadnim popuštanjem,
- očvršnuće usljed deformacije u hladnom stanju,
- promjena u veličini i redosljedu karbidnih faza,
- očvršnuće legiranjem,
- formiranje Cottrellovog dislokacijskog oblaka.

Najdjelotvorniji mehanizmi očvršnuća su usitnjenje zrna i precipitiranje.

Očvršnuće usitnjenjem zrna zasniva se na činjenici da sitnija kristalna struktura ima veći broj granica zrna. Utjecaj granica zrna na gibanje dislokacija očituje se u povišenju napreznja koje treba nariniti izvana da se izazove plastična deformacija. U praksi se teži sitnom austenitnom zrnu, jer ono predodređuje veličinu feritnog zrna. Reguliranje veličine austenitnih zrna je moguće precipitacijom finih čestica u austenitnoj strukturi, čime se sprječava porast zrna. U tom smislu djeluje aluminij preko Al-nitrida i V, Nb i Ti preko svojih karbida, nitrida i karbonitrida. Daljnja je mogućnost da se austenitno zrno usitni većim stupnjem deformacije i nižom temperaturom završnog valjanja. Konačno, postoji mogućnost da se spriječi rekristalizacija austenita pri valjanju prisutnošću TiN po granicama zrna. Mehanizam očvršnuća putem usitnjenja zrna povećava istodobno čvrstoću i rad loma, odnosno snižuje prijelaznu temperaturu.



Slika 1. Povišenje granice tečenja zbog mehanizma obilaska čestica različitih promjera i volumnih udjela [1]

Precipitacijsko povećanje granice tečenja zavisi o veličini, broju i tvrdoći čestica precipitata. U slučaju da su čestice tvrde, dislokacija ne može prodrijeti u njih (odrez) nego se savija između čestica i obilazi ih. Najdjelotvornije su čestice precipitata veličine 30 – 50 nm, slika 1. Eventualna njihova koagulacija u precipitate većih dimenzija djelovat će manje intenzivno na povećanje granice tečenja. Uz veličinu i razmak između precipitata važan je i volumenski udjel

čestica. Najjače je očvršnuće onda kada su veličine čestica i razmak među njima upravo takvi da ne nastupa odrez. Povoljno djelovanje u smislu precipitiranja dovoljno čvrstih, dovoljno sitnih i dovoljno dispergiranih čestica (precipitata) imaju posebno elementi: Ti, V i Nb, koji s ugljikom i dušikom tvore svoje karbide, nitride i karbonitrde.

1. 2. Zavarljivost mikrolegiranih čelika

Osim izračunavanja ekvivalenta ugljika, kod mikrolegiranih čelika je potrebno dodatnim ispitivanjima donijeti ocjenu o njihovoj zavarljivosti, jer uz jednaki ekvivalent ugljika, kod različitih debljina i sadržaja vodika u zavaru, pokazuju različitu osjetljivost prema hladnim pukotinama. Zato je kod mikrolegiranih čelika potrebno ispitati, između ostalih, i sljedeće utjecajne čimbenike: sklonost nastajanju toplih pukotina, sklonost nastajanju hladnih pukotina, osjetljivost zavora i zone utjecaja topline prema krhkom lomu, lamelarno trganje i sklonost nastajanju pukotina od žarenja za redukciju zaostalih naprezanja.

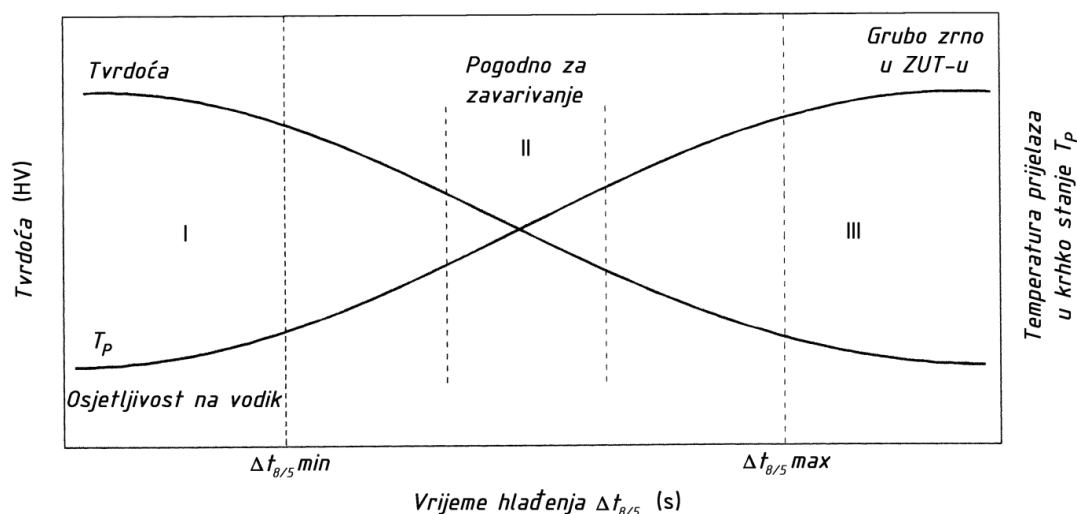
Prilikom zavarivanja mikrolegiranih čelika potrebno je zadovoljiti osnovni zahtjev visoke tehnološke discipline pri zavarivanju kao i točno definirati unos topline prije i tijekom zavarivanja.

Prevelik unos topline uzrokuje krhkost prijelazne zone uz granicu taljenja. Pri visokim temperaturama (od 1100 do 1500 °C) usljed dugog zadržavanja, u spomenutoj zoni može doći do rasta zrna i koagulacije precipitata. To može uzrokovati pad žilavosti, osobito na niskim temperaturama.

Nasuprot tome, premali unos topline rezultira povećanom čvrstoćom i tvrdoćom zavarenog spoja, što uz krutost i prisustvo vodika u metalu zavora može uzrokovati nastanak hladnih pukotina. Sve spomenuto dovodi do smanjenja deformabilnosti i povećava sklonost krhkom lomu.

Na strukturu, a time i na svojstva zone utjecaja topline i metala zavora, presudan utjecaj ima vrijeme hlađenja između 800 i 500 °C ($t_{8/5}$). U tom se temperaturnom intervalu odvija većina pretvorbi u čeliku, koje bitno utječu na njegova svojstva.

Vrijeme hlađenja $t_{8/5}$ za mikrolegirane čelike iznosi 10-30 s, a za čelik N-A-XTRA 70 preporuča se 13-18 s. Ono se ograničava radi toga da bi se spriječio porast veličine zrna u zoni utjecaja topline i zavaru i time smanjila žilavost s jedne strane te, s druge strane, onemogućilo nastajanje zakaljene strukture u zavarenom spoju, slika 2.



Slika 2. Dijagram prijelazne temperature i tvrdoće, ovisno o vremenu hlađenja $\Delta t_{8/5}$

2. EKSPERIMENTALNI RAD

2.1. Osnovni i dodatni materijal

Istraživanja su provedena na čelicima pod nazivom NIOVAL 50, NIOBAL 43 i NIOVAL 47 dobivenim toplim valjanjem i normalizacijom, te na poboljšanim čelicima N-A-XTRA 70 i NIOMOL 490 [1, 2, 3]. Iako se neki od ovih čelika više ne proizvode, mnoge konstrukcije učinjene od njih su još u eksploataciji.

Ispitivanje kemijskog sastava navedenih čelika obavljeno je u Željezari Split u Kaštel Sućurcu, a rezultati su prikazani u tablici 1.

U tablici 2. su prikazani rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava čelika NIOVAL 50, NIOBAL 43, NIOVAL 47 i N-A-XTRA 70, dok su u tablici 3 rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava čelika NIOMOL 490 dati od strane proizvođača.

Tablica 1. Rezultati ispitivanja kemijskog sastava zavarivanih čelika

NAZIV ČELIKA	SADRŽAJ [%]														
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Sn	Al	Mo	V	W	Ti	Ni	Nb
NIOVAL 50	0,17	0,41	1,51	0,011	0,012	-	0,20	-	0,08	0,04	0,15	-	0,004	0,43	0,02
NIOBAL 43	0,15	0,32	1,36	0,014	0,007	-	0,11	-	0,043	0,03	0,003	-	0,003	0,17	0,06
NIOVAL 47	0,16	0,45	1,41	0,015	0,019	-	-	-	0,03	-	0,08	-	-	-	0,06
N-A- XTRA 70	0,23	0,67	0,90	0,013	0,013	-	0,70	-	0,043	0,23	-	i Zr = 0,1 %			
NIOMOL 490	0,11	0,42	0,51	0,007	0,0009	0,36	0,59	0,02	0,04	0,31	0,03	0,01	0,01	0,25	0,03

Tablica 2. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava čelika NIOVAL 50, NIOBAL 43, NIOVAL 47 i N-A-XTRA 70

Naziv Čelika	Smjer valjanja	Naprezanje tečenja [MPa]	Rastezna čvrstoća [MPa]	Istezanje [%]	Rad loma na -20 °C [J]			
					Izmjereno			Srednja vrijednost
NIOVAL 50	uzdužno	505	665	21,2	92	98	91	93,6
	poprečno	498	661	23,3	71	75	84	76,6
NIOBAL 43	uzdužno	440	571	25,0	82	87	86	85,0
	poprečno	448	578	27,3	77	83	80	80,0
NIOVAL 47	uzdužno	477	614	24,6	116	70,4	123	103,2
	poprečno	471	606	28,4	29,6	40,0	31,2	33,6
N-A-XTRA 70	uzdužno	760	828	16,5	138	130	125	131,0
	poprečno	764	829	16,3	66	68	78	70,6

Uspoređujući dobivene rezultate ispitivanja kemijskog sastava i mehaničkih svojstava s vrijednostima koje su navedene u katalogima proizvođača, može se zaključiti da ispitivani čelici spadaju u deklarirane grupe čelika.

Kao dodatni materijal za zavarivanje pokusnih ploča od mikrolegiranih čelika NIOVAL 50, NIOBAL 43, NIOVAL 47 i N-A-XTRA 70 izabrana je praškom punjena žica FLUXOFILCORD 42 promjera 1,2 mm. Prašak kojim je žica ispunjena bazičnog je karaktera, a

njezin kemijski sastav i mehanička svojstva garantirana od strane proizvođača dati su u tablicama 4 i 5. Za zavarivanje pokusnih ploča od mikrolegiranog čelika NIOMOL 490 korištena je praškom punjena žica FILTUB 28B bazičnog tipa, promjera 1,2 mm. Kemijski sastav i mehanička svojstva žice također su prikazani u tablicama 4 i 5.

Tablica 3. Mehanička svojstva mikrolegiranog čelika NIOMOL 490

Mehanička svojstva čelika NIOMOL 490												
Naprezanje tečenja <i>Re</i> , MPa		Čvrstoća <i>Rm</i> , MPa					Istezanje <i>A₅</i> , % (min)			Savijanje trn <i>2a</i>		
490		560 - 740					19			180°		
Žilavost čelika NIOMOL 490												
Smjer valjanja	Žilavost ISO-V [J], nestareno stanje Temperatura ispitivanja, °C						Žilavost ISO-V [J], stareno stanje Temperatura ispitivanja, °C					
	+20	0	-20	-40	-50	-60	+20	+5	-20	-40	-60	
uzdužno	118	118	118	102	102	94	47	41	31	27	27	
poprečno	78	78	78	60	60	47	35	35	27	27	-	

Tablica 4. Kemijski sastav dodatnih materijala

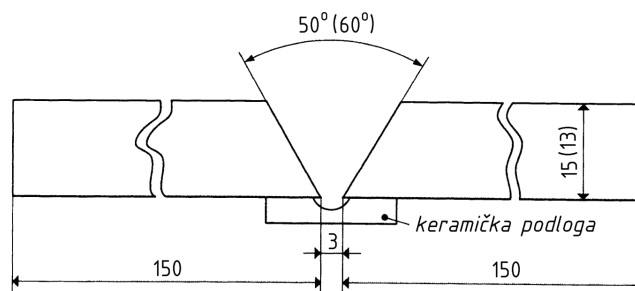
Dodatni materijal	Sadržaj [%]							
	C	Si	Mn	Mo	Cr	Ni	P	S
FLUXOFILCORD 42	0,10	0,60	1,3-1,8	0,25-0,5	0,4	1,25-2,5	0,03	0,03
FILTUB 28 B	0,05	0,35	1,4	0,40	-	1,2	-	-

Tablica 5. Mehanička svojstva dodatnih materijala

Dodatni materijal	Mehanička svojstva				
	<i>Re</i> , MPa	<i>Rm</i> , MPa	<i>A₅</i> , %	KV (-60 °C) J/cm ²	Udio vodika ml / 100 g vara
FLUXOFILCORD 42	713	756	19	34,4	-
FILTUB 28 B	>560	650-750	>20	>47	<5

2.2. Priprema i zavarivanje ploča

Iz tabla limova ploče su rezane plinski, a da bi se izbjegao utjecaj topline, blanjanjem je kod svih ploča skinut sloj debljine 10 mm na strani zavarivanja, a nakon toga izvedeno skošenje. Debljina svih ploča je bila 15 mm a skošenje 30°, osim kod čelika NIOMOL 490 kod kojeg je debljina bila 13 mm i skošenje 25°, slika 3.

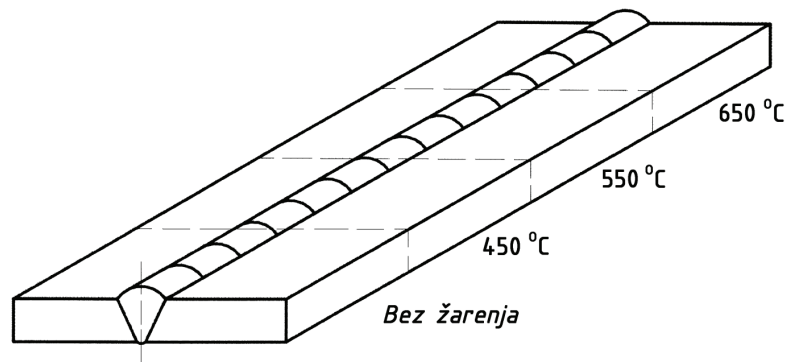


Slika 3. Priprema spoja za zavarivanje

Zavarivanje svih ploča izvedeno je automatski MAG postupkom zavarivanja, minimalnim, optimalnim i maksimalnim parametrima zavarivanja, sa ili bez predgrijavanja. Prije polaganja sljedećeg sloja ploče su se hladile na zraku na početnu temperaturu, što je čest slučaj kod zavarivanja dugih zavara.

2.3. Toplinska obrada zavarenih ploča

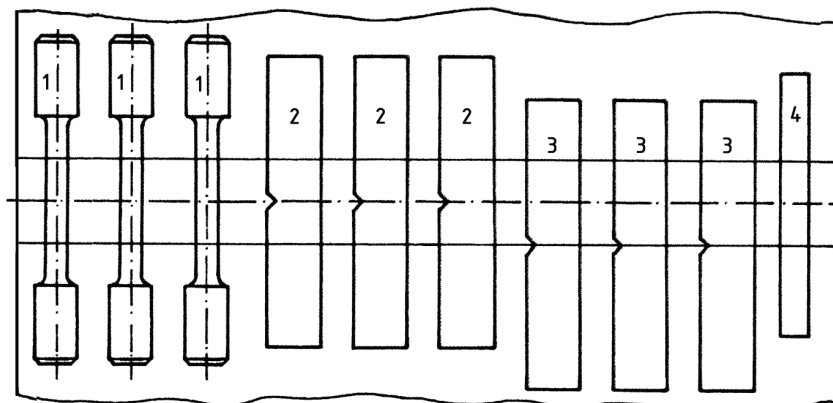
Prije toplinske obrade sve ploče su uz intenzivno hlađenje blanjanjem izrezane na četiri dijela. Tako dobiveni dijelovi ploča su se žarili u elektrootpornoj peći radi redukcije zaostalih napreznja i to pri temperaturama 450, 550 i 650 °C u trajanju od četiri sata, nakon čega su hladene u zatvorenoj i isključenoj peći. Jedan dio od svake ploče nije bio podvrgnut procesu žarenja, slika 4.



Slika 4. Plan žarenja zavarenih ploča

2.4. Izrada epruveta za ispitivanje

Iz svake od ukupno 72 ploče učinjene su po tri epruvete (kod čelika NIOMOL 490 po dvije) za ispitivanje rastezne čvrstoće i istežljivosti, po šest epruveta za ispitivanje rada loma po Charpy-ju i po jedna epruveta za ispitivanje tvrdoće te analizu mikrostrukture, slika 5.

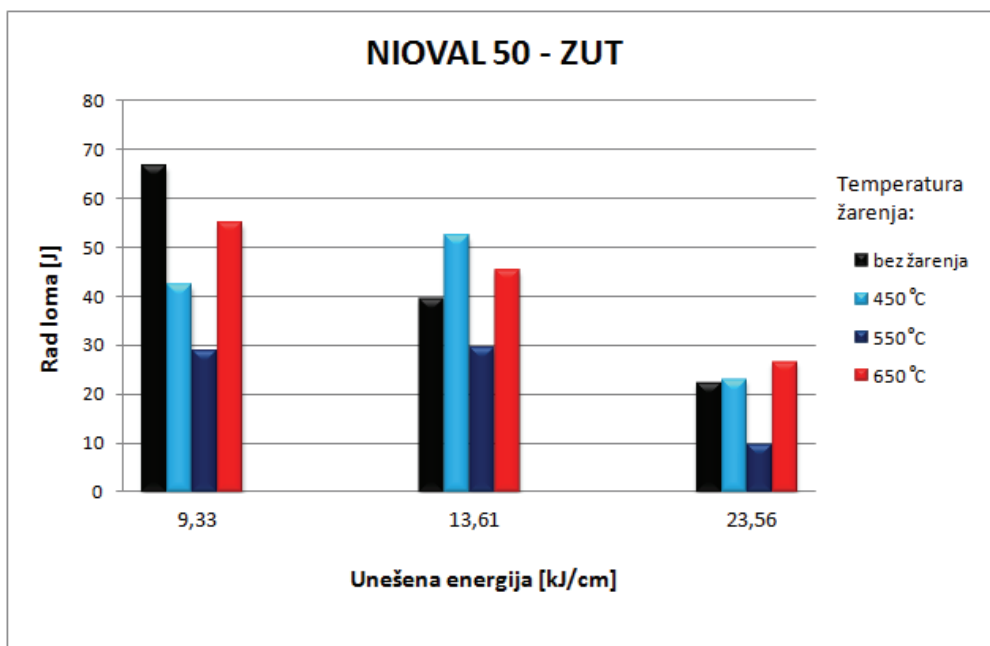


Slika 5. Raspored i broj epruveta iz svake ploče

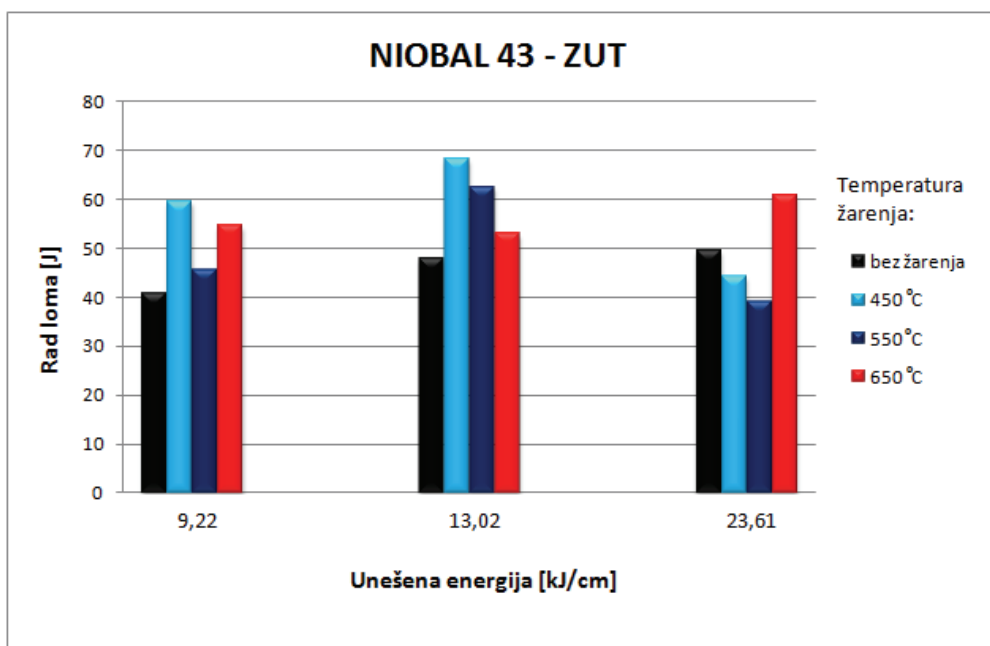
3. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

3.1. Analiza rezultata ispitivanja rada loma

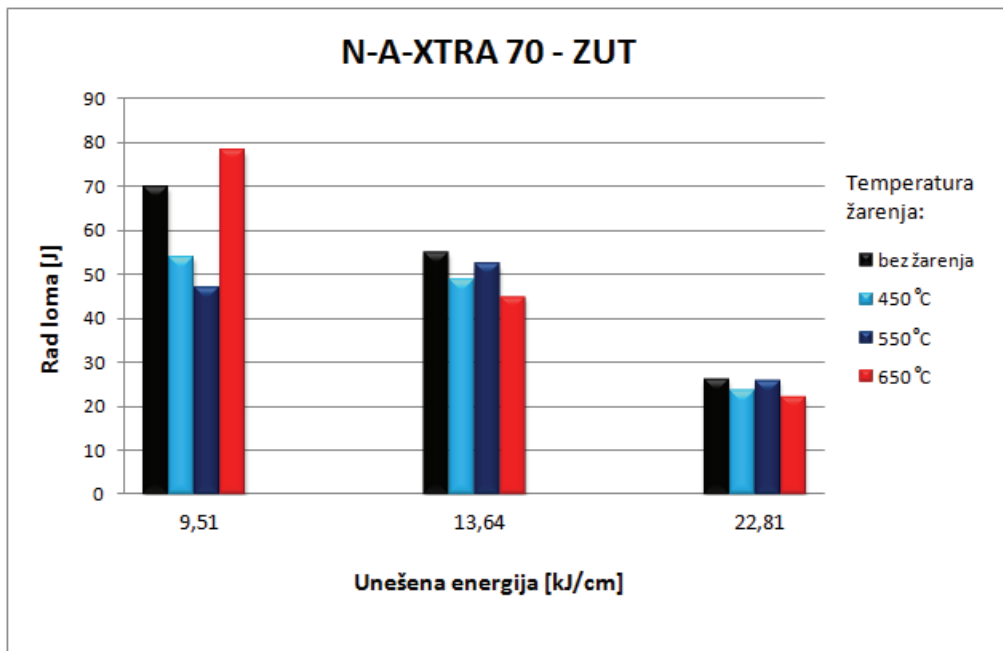
Rad loma po Charpyju je ispitivan pri temperaturi $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, a rezultati ispitivanja su prikazani na slikama 6-11.



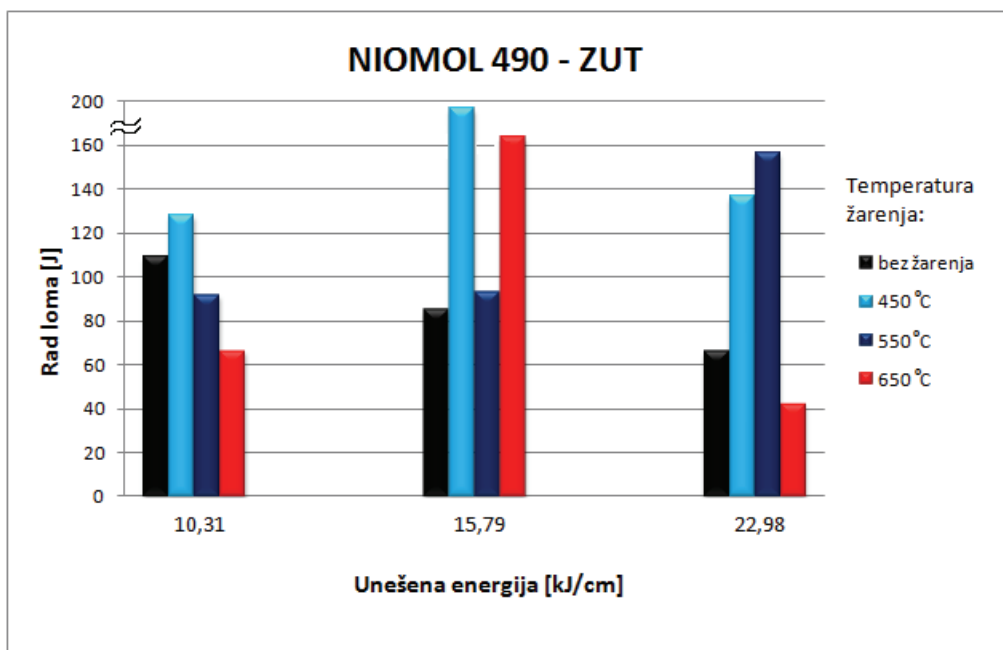
Slika 6. Prikaz utjecaja unesene energije pri zavarivanju i visine temperature žarenja na rad loma zavarenih spojeva čelika NIOVAL 50 sa zarezom V2 u zoni utjecaja topline



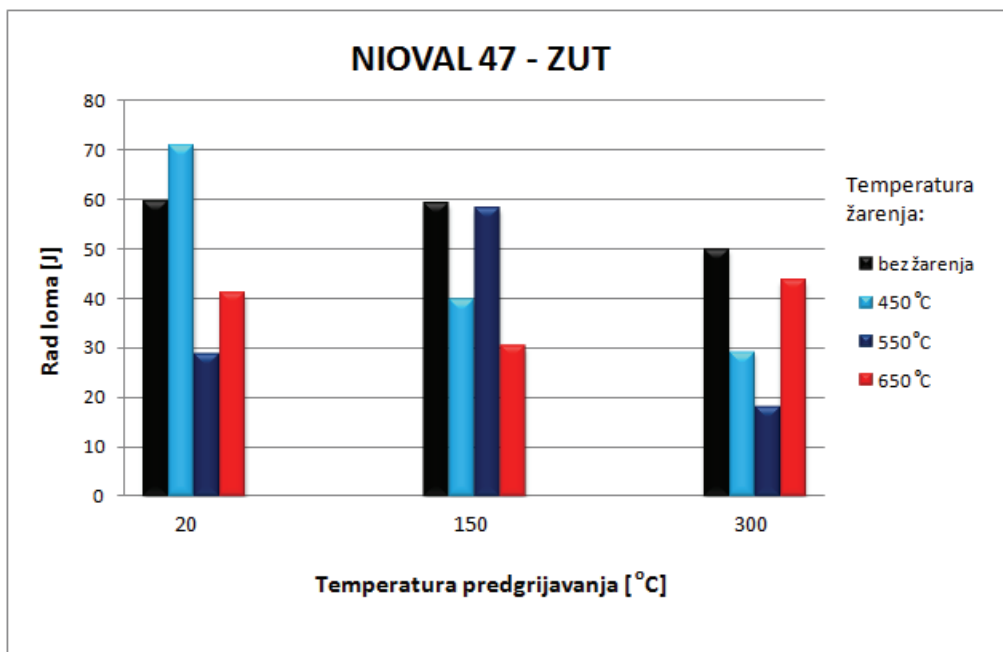
Slika 7. Prikaz utjecaja unesene energije pri zavarivanju i visine temperature žarenja na rad loma zavarenih spojeva čelika NIOBAL 43 sa zarezom V2 u zoni utjecaja topline



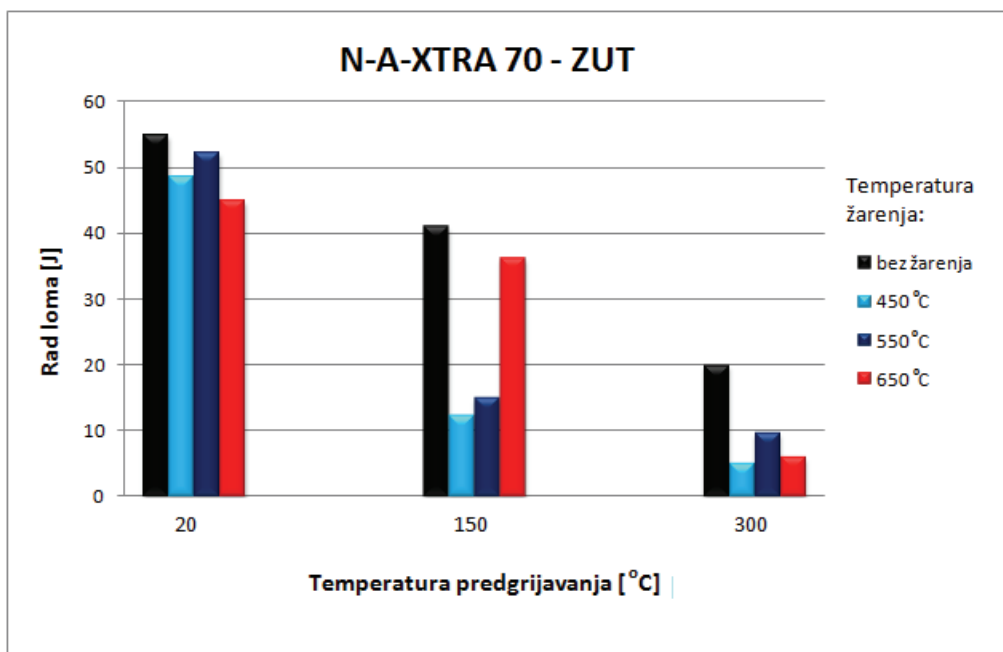
Slika 8. Prikaz utjecaja unesene energije pri zavarivanju i visine temperature žarenja na rad loma zavarenih spojeva čelika N-A-XTRA 70 sa zarezom V2 u zoni utjecaja topline



Slika 9. Prikaz utjecaja unesene energije pri zavarivanju i visine temperature žarenja na rad loma zavarenih spojeva čelika NIOMOL 490 sa zarezom V2 u zoni utjecaja topline



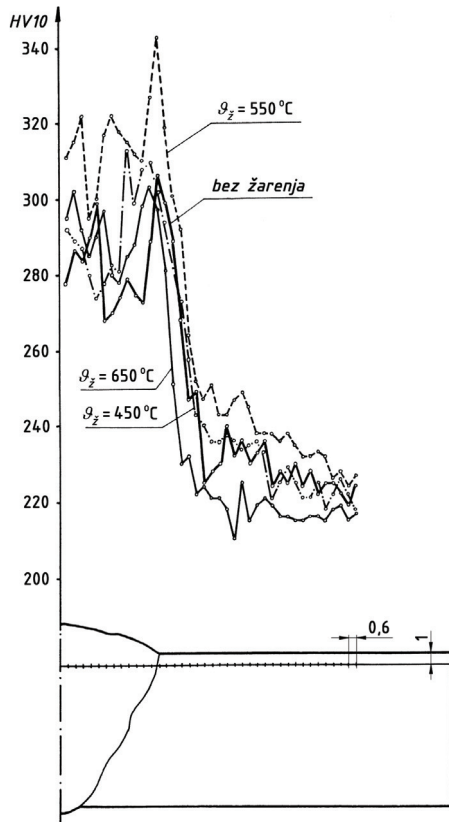
Slika 10. Prikaz utjecaja visine temperature predgrijavanja i visine temperature žarenja na rad loma zavarenih spojeva čelika NIOVAL 47 sa zarezom V2 u zoni utjecaja topline



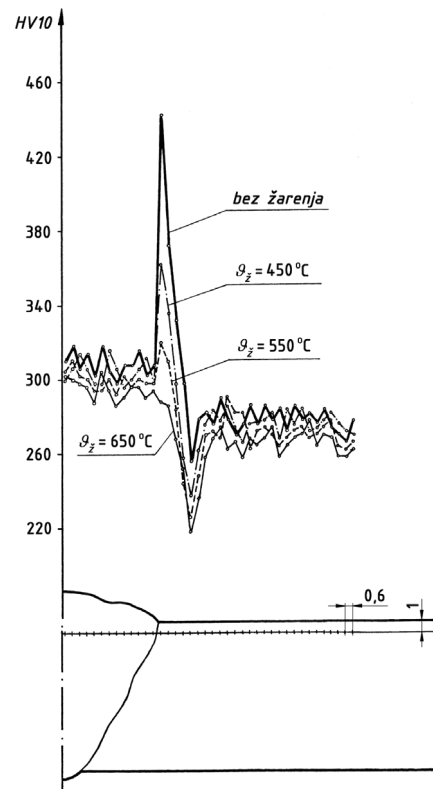
Slika 11. Prikaz utjecaja visine temperature predgrijavanja i visine temperature žarenja na rad loma zavarenih spojeva čelika N-A-XTRA 70 sa zarezom V2 u zoni utjecaja topline

3.2. Analiza rezultata ispitivanja tvrdoće

Tvrdoća je ispitana po metodi Vickersa s opterećenjem $10 \times 9,81$ N (HV10) poprijeko na zavareni spoj. Rezultati ispitivanja su prikazani na slikama 12 – 14.



Slika 12. Promjena tvrdoće po presjeku zavarenog spoja čelika NIOVAL 50, zavarenog optimalnim unosom topline i žarenog pri različitim temperaturama

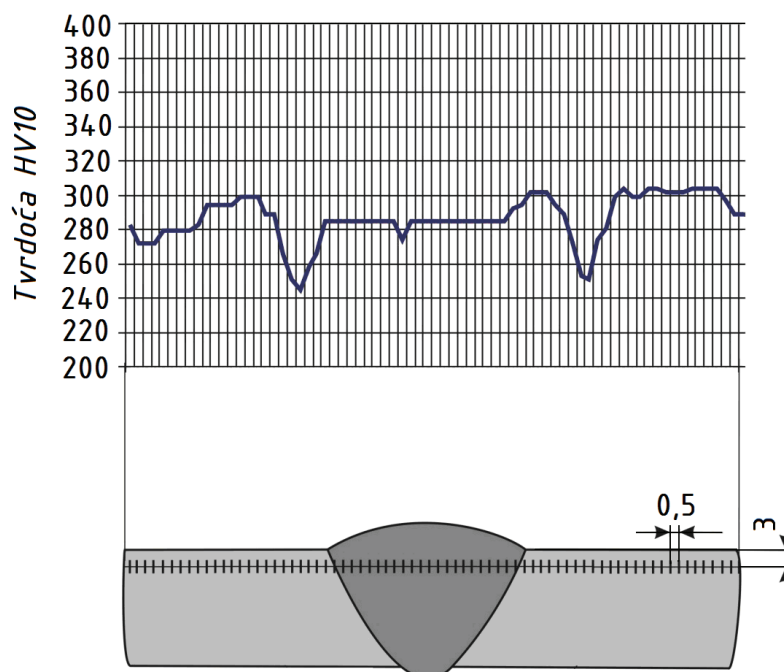


Slika 13. Promjena tvrdoće po presjeku zavarenog spoja čelika N-A-XTRA 70, zavarenog optimalnim unosom topline i žarenog pri različitim temperaturama

4. ZAKLJUČAK

Na temelju analize rezultata prethodno provedenih istraživanja te spoznaja o pojavama koje u mikrolegiranim čelicima nastaju kao posljedica predgrijavanja, zavarivanja i žarenja u cilju redukcije zaostalih naprezanja, proizlaze sljedeći zaključci:

- Unesena toplina pri zavarivanju, odnosno parametri zavarivanja imaju značajan utjecaj na svojstva zavarenih spojeva. Veća unesena toplina naročito je utjecala na smanjenje rada loma ZUT-a, koji se žarenjem radi redukcije zaostalih naprezanja do temperature 650 °C nije poboljšao.
- Najveća tvrdoća u ZUT-u dobiva se pri malom unosu topline prilikom zavarivanja. Žarenjem se smanjuje tvrdoća u ZUT-u zbog popuštanja nastalog martenzita, osim kod zavarenih spojeva čelika NIOVAL 50. Žarenjem zavarenih spojeva čelika NIOVAL 50 pri temperaturi 550 °C, neovisno o unesenoj toplini prilikom zavarivanja, u zavaru a naročito u ZUT-u, dolazi do otvrdnjavanja. Razlog je izlučivanje precipitata u feritu, koji su svojom veličinom i rasporedom izazvali povećanje tvrdoće ali i značajno smanjenje rada loma.



Slika 14. Promjena tvrdoće po presjeku zavarenog spoja čelika NIOMOL 490, zavarenog optimalnim unosom topline, a koji nije žaren

5. LITERATURA

- [1] Strassburger C.: *Entwicklungen zur Festigkeitssteigerung der Stähle*, Verlag Stahleisen MBH, Düsseldorf, 1976.
- [2] Mišina, N.: *Prilog istraživanju potrebe toplinske obrade zavarenih spojeva mikrolegiranih čelika*, Magistarski rad, FSB, Zagreb, 1983.
- [3] Sardelić, T.: *Prilog istraživanju zavarljivosti mikrolegiranih čelika*, Magistarski rad, FESB, Split, 2009.
- [4] Mišina, N.: *Istraživanje utjecaja toplinske obrade na svojstva zavarenih spojeva mikrolegiranih čelika*, Disertacija, FSB, Zagreb, 1991.