

**UTJECAJ ŽARENJA NA MEHANIČKA I MIKROSTRUKTURNΑ SVOJSTVA
ZAVARENIH CIJEVI IZ NISKOLEGIRANOG
CrMo ČELIKA**

**THE EFFECT OF ANNEALING ON MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL
PROPERTIES OF PIPE WELDED FROM LOW ALLOYED CrMo STEEL**

Mirko GOJIĆ¹, Borut KOSEC², Damir PINOTIĆ³

Ključne riječi: čelik, žarenje, zavarivanje, mikrostruktura

Key words: steel, annealing, welding, microstructure

Sažetak: U ovom radu prikazani su rezultati mehaničkih svojstava cijevi iz niskolegiranog CrMo čelika. Zavarivanje cijevi provedeno je TIG i REL postupcima. Nakon zavarivanja provedeno je žarenje cijevi kod 730°C uz hlađenje na zraku. U radu su prikazani i rezultati ispitivanja osnovnog materijala, zone utjecaja topline i zone taljenja prije i nakon žarenja. Utvrđeno je da se žarenjem zavarenih cijevi kod 730°C dobivaju odgovarajuća mehanička i mikrostrukturna svojstva cijevi za uporabu.

Abstract: In this work the results of mechanical properties for pipes made from low-alloyed CrMo steel are shown. Welding of pipes were carried out by TIG and REL techniques. After welding the pipes are annealing at 730°C, followed cooling on air. Microstructural results of base metal, heat affected zone and weld metal before and after annealing are shown. It was found that the pipes welded during annealing at 730°C suitable mechanical and microstructural properties are obtained.

¹ Metalurški fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Aleja narodnih heroja 3, 44103 Sisak, Hrvatska
e-mail: gojic@siscia.simet.hr

² Naravoslovnotehnička fakulta, Univerza v Ljubljani, Aškerčeva 12, 1000, Slovenija

³ Ina-industrija naftе d. d., Zagreb, STSI, Služba održavanja rafinerije naftе Sisak,
A. Kovačića 1, 44000 Sisak, Hrvatska

1. UVOD

Tijekom rada energetskih postrojenja s vremenom dolazi do oštećenja i zamora materijala. Razlozi za to su radni uvjeti u tim postrojenjima (visoka temperatura, povišeni tlak, neprekidni rad i često starost postrojenja). Povišene ili visoke temperature vladaju u termoenergetskim postrojenjima kao što su generatori pare (parni kotlovi), plinske i parne turbine, kemijska i procesna postrojenja, metalurška postrojenja, motori s unutarnjim izgaranjem, oprema u aeronaustičkoj industriji i slično. U većini se slučajeva pred te uređaje postavljuju zahtjevi neprekidnog rada koji mogu trajati i nekoliko godina, a ukupni radni vijek za ugrađene materijale često iznosi i više od 20 godina.

Pri izboru materijala za dijelove takvih uređaja najvažnija je mehanička otpornost, ali je isto tako bitna i kemijska postojanost na različite medije, na djelovanje plamena i vrućih plinova (intenzivna oksidacija).

Za primjenu u termoenergetici koriste se ugljični, niskolegirani, visokolegirani austenitni i visokolegirani martenzitni čelici. Niskolegirani Mo-čelici i Mo-Cr-čelici radi svoje zavarljivosti imaju relativno niski udio ugljika (< 0,25%). Molibden i krom stvaraju karbide (Mo_2C , Cr_7C_3) koji usporavaju puzanje, povećavaju prokaljivost i otpornost na popuštanje, dok molibden sprječava pojavu krhkosti kod popuštanja i povećava temperaturu rekristalizacije. Krom djeluje na povećanje mehaničke otpornosti, istezljivosti te oksidacijske postojanosti. Molibden i krom povećavaju i prokaljivost čelika pa posredno povećavaju i žilavost visokopopuštenog martenzita, ili još češće bainita, koji nastaje pod utjecajem molibdена. Temperaturno područje primjene niskolegiranih Cr-Mo čelika je od 450 do 580° C jer pri višim temperaturama dolazi do koagulacije karbida (Mo_2C koagulira i prelazi u Mo_6C) što osiromašuje željeznu matricu.

Nakon zavarivanja niskolegiranih Cr-Mo čelika obično se provodi toplinska obrada [1]. Osnovna zadaća toplinske obrade je smanjenje zaostalih naprezanja i tvrdoće, usitnjavanje zrna, povećanje otpornosti na koroziju (interkristalna korozija austenitnih CrNi čelika), rekristalizacija zrna, povećanje mehaničkih svojstava, smanjenje sadržaja difuzijskog vodika, te povećanje stabilnosti dimenzija zavarenih proizvoda.

Tamo gdje je moguće prioritet se daje toplinskoj obradi cijelih komada, a gdje nije moguće (montirane konstrukcije) primjenjuje se lokalna toplinska obrada površine zavarenog spoja. Cilj je ovog rada bio objasniti utjecaj toplinske obrade (žarenja) na mehanička svojstva cijevi iz niskolegiranog CrMo čelika uz analizu mikrostrukture zavarenog spoja.

2. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio rada proveden je u Laboratoriju za strukturalna ispitivanja i Laboratoriju za razvoj i primjenu materijala Metalurškog fakulteta u Sisku te u Laboratoriju za mehanička ispitivanja Željezare Sisak.

Cijevi iz niskolegiranog 2,25Cr – 1Mo čelika dobivene su prilikom zamjene cijevi iz eksploatacije s novim cijevima za konvekcijsku zonu radijacijske peći H-301 u INA-Rafineriji nafte Sisak. Dimenzije cijevi su Ø 114,3 mm sa debljinom stijenke od 11,1 mm. Uvjeti rada kojima su izložene cijevi su:

- proračunski tlak 48 bar
- ulazna temperatura 350° C
- izlazna temperatura 530° C

U Tablici 1. naveden je kemijski sastav novougrađenih cijevi nakon zavarivanja.

C	Mn	P	S	Si	Cu	V	Mo	Al	Cr	Ni
0,13	0,52	0,01	0,01	0,41	0,13	0,01	0,97	0,005	2,10	0,24

Tablica 1. Kemijski sastav čeličnih cijevi, mas. %

Zavarivanje cijevi provedeno je metaljivom elektrodom pod zaštitom plina (TIG – postupak) i ručnim elektrolučnim zavarivanjem obloženom elektrodom (REL – postupak). Postupak zavarivanja se provodio na uređaju tipa HOBART tip 350. Jakost struje kod zavarivanja je bila za TIG postupak od 110 do 150 A, a za REL postupak od 80 do 110 A. Postupak zavarivanja provodio se na sljedeći način:

1. Predgrijavanje na 250° C
2. Korijen zavara i prvi prolaz:

TIG – postupak:

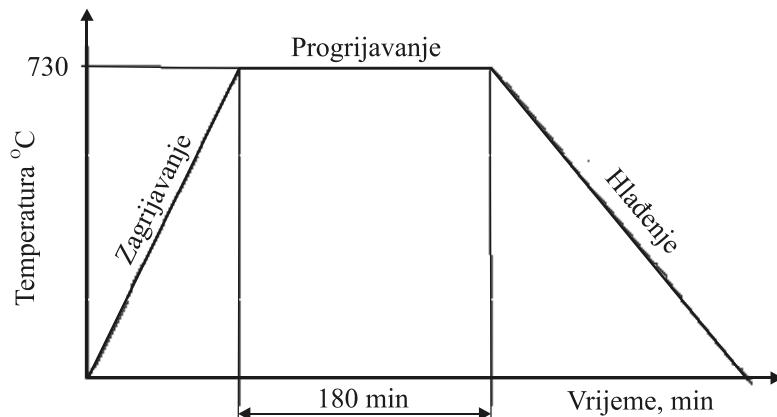
- korijen zavara: elektroda promjera 2,4 mm
 - prvi prolaz: elektroda promjera 3,0 mm
 - Böhlerova elektroda CM2 IG elektroda
3. Popuna zavara i završni prolaz:
 - REL postupak
 - Böhlerova CN2 Kb elektroda

Kao dodatni materijal korištene su bazične Böhlerove elektrode [2]. Kemijski sastav Böhlerovih elektroda naveden je u Tablici 2.

Vrsta elektrode	C	Si	Mn	Cr	Mo
CM2 IG	0,07	0,3	0,8	2,3	1,0
CM2 Kb	0,06	0,7	1,1	2,6	1,0

Tablica 2. Kemijski sastav Böhlerovih elektroda, mas. % [2]

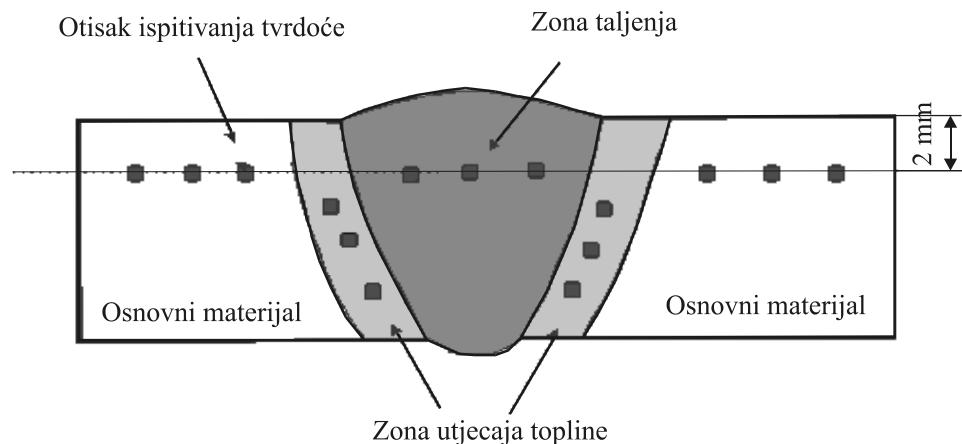
Toplinska obrada uzorka cijevi provodila se u elektrootpornoj komornoj peći. Sastojala se od visokotemperaturnog žarenja na 730° C u trajanju od 3 sata. Poslije žarenja uzorak je izvađen iz peći i hlađen na mirnom zraku do sobne temperature (Slika 1.).



Slika 1. Shematski prikaz dijagrama žarenja uzorka

Mehanička ispitivanja provedena su na INSTRON kidalici tipa 1196 pri sobnoj temperaturi. Uzorci su pripremljeni prema ASTM standardu (epruvete u obliku trake) [2].

Ispitivanje žilavosti provedeno je Charpyevom metodom na sobnoj temperaturi. Uzorci su imali dimenzije 10 x 7,5 x 55 mm s V- zarezom dubine 2 mm. Ispitivanje tvrdoće provedeno je Brinellovom (HB) ili Vickersovom metodom (HV) na očišćenoj i ravnoj površini (Slika 2.).



Slika 2. Način ispitivanja tvrdoće

Za potrebe metalografskih ispitivanja izrezani su uzorci veličine 20 x 10 mm iz cijevi. Uzorci su stavljeni u kalupe i zaliveni plastičnom smjesom radi lakše pripreme. Metalografska priprema uzorka sastojala se od brušenja i poliranja na uređaju PHOENIX BETA. Brušenje je provedeno brusnim papirima gradacije 120, 240, 400, 600 i 800 u trajanju po 10 minuta za svaku gradaciju. Poliranje se provodilo na istom uređaju, a poliralo se Texmet brusnim papirom gdje je kao sredstvo za podmazivanje korištena vodena otopina glinice Al_2O_3 (0,3 μm). Vrijeme poliranja iznosilo je 20 minuta. Nakon poliranja uzorci su nagrizani u nitalu. Određivanje mikrostrukture izvedeno je na optičkom mikroskopu Olympus GX 51. Promatrane su mikrostrukture uzorka prije i nakon žarenja kod povećanja od 200 x.

3. REZULTATI I RASPRAVA

Ispitivanje mehaničkih svojstava provedeno je na po dva uzorka koji su izrađeni od cijevi prije i nakon žarenja. Srednje vrijednosti dobivene ispitivanjem mehaničkih svojstava (R_e , R_m , A_5), prikazane su u Tablici 2., a srednje vrijednosti žilavosti i tvrdoće pokazane su u Tablicama 3. i 4.

Stanje cijevi	Granica razvlačenja R_e , MPa	Vlačna čvrstoća R_m , MPa	Istezanje A_5 , %
Cijev prije žarenja	330	534	17
Cijev poslije žarenja	320	513	23,4

Tablica 2. Srednje vrijednosti mehaničkih svojstva cijevi

Stanje cijevi	Energija udara, J	Žilavost J/cm ²
Cijevi prije žarenja	40	68
Cijevi poslije žarenja	Zona taljenja	93
	Osnovni materijal	27
		164
		47

Tablica 3. Srednje vrijednosti energije udara i žilavosti zone taljenja i osnovnog materijala

Stanje cijevi	Tvrdoća HV ili HB		
Cijevi prije žarenja	OM	ZUT	ZT
	170 HB	193 HB	325 HB
Cijevi poslije žarenja	OM	ZUT	ZT
	145 HV	167 HV	201 HV
		179 HV	

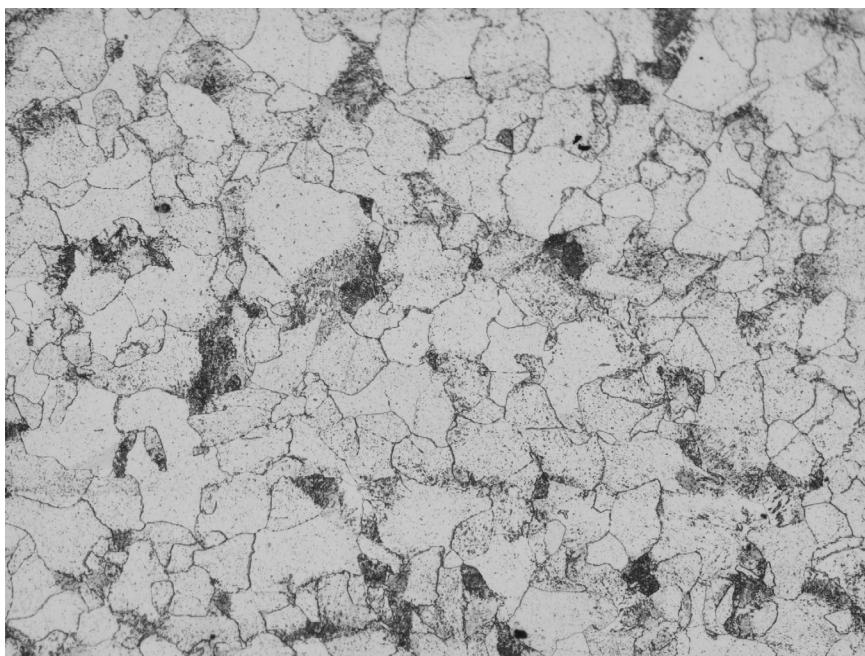
Tablica 4. Srednje vrijednosti tvrdoće

Iz Tablica 2.-4. se vidi razlika mehaničkih svojstava zavarenih cijevi prije i nakon žarenja. Granica razvlačenja (R_e) i vlačna čvrstoća (R_m) cijevi prije žarenja su nešto niže, dok je istezanje (A_5) povećano. Nakon žarenja dolazi do smanjenja napetosti u materijalu, što za posljedicu ima nešto niža mehanička svojstva.

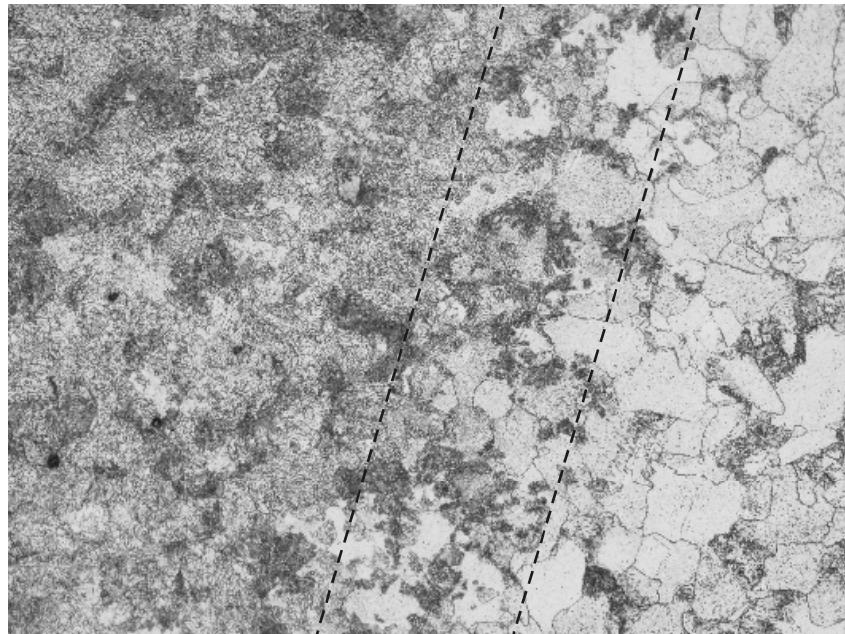
Žilavost zavarenih cijevi nakon žarenja znatno je viša od žilavosti prije žarenja. (Tablica 3.). Zapaženo je veliko odstupanje žilavosti između zone taljenja i osnovnog materijala.

Tvrdoća je također promjenjena žarenjem (Tablica 4.). Najveća tvrdoća prije žarenja pojavila se u zoni taljenja. Uzrok porasta tvrdoće je dotok topline koji uzrokuje taljenje metala koji potom kristalizira te ponovo skrućuje. Zbog toga nastaje nešto sitnije zrno koje je uzrok povećane tvrdoće. U zoni utjecaja topline (ZUT) zbog utjecaja topline nastaje nešto veće zrno (u odnosu na zonu taljenja), koje uvjetuje i manju tvrdoću od zone taljenja. Zapaženo je da su pojedinačne vrijednosti tvrdoće pojedinih dijelova zavarenog spoja nakon žarenja dosta ujednačene i da nema velikih odstupanja u tvrdoći kao u slučaju prije žarenja.

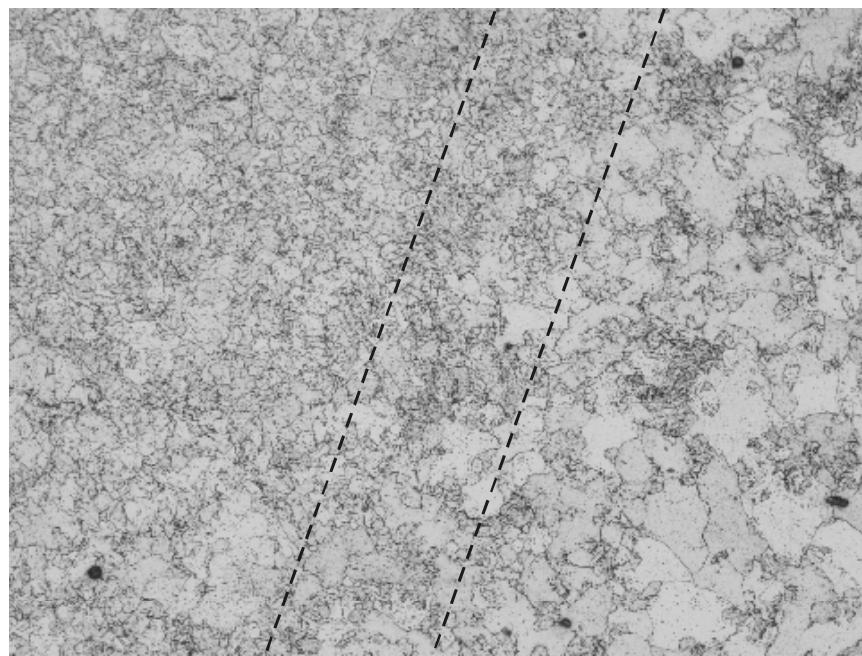
Dobivene rezultate mehaničkih svojstava (Tablice 2.-4.) potvrđuju i rezultati mikrostrukturnih snimaka (Slike 3.-7.). Uzorci su snimljeni na više pozicija, počevši od osnovnog materijala preko zone utjecaja topline i zone taljenja, uključujući i njihove prijelaze.



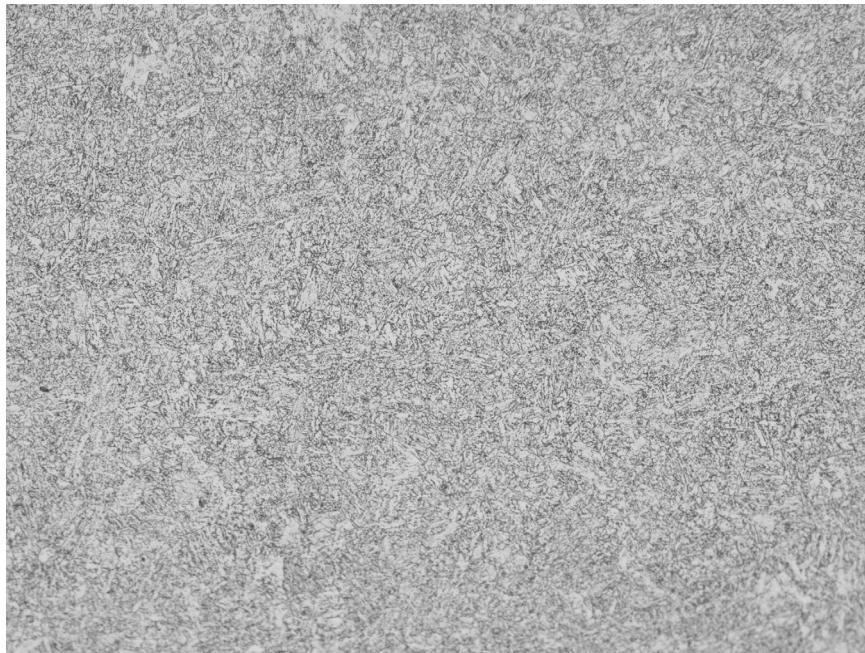
Slika 3. Mikrostruktura osnovnog materijala cijevi nakon zavarivanja,
prije žarenja, povećanje 200x



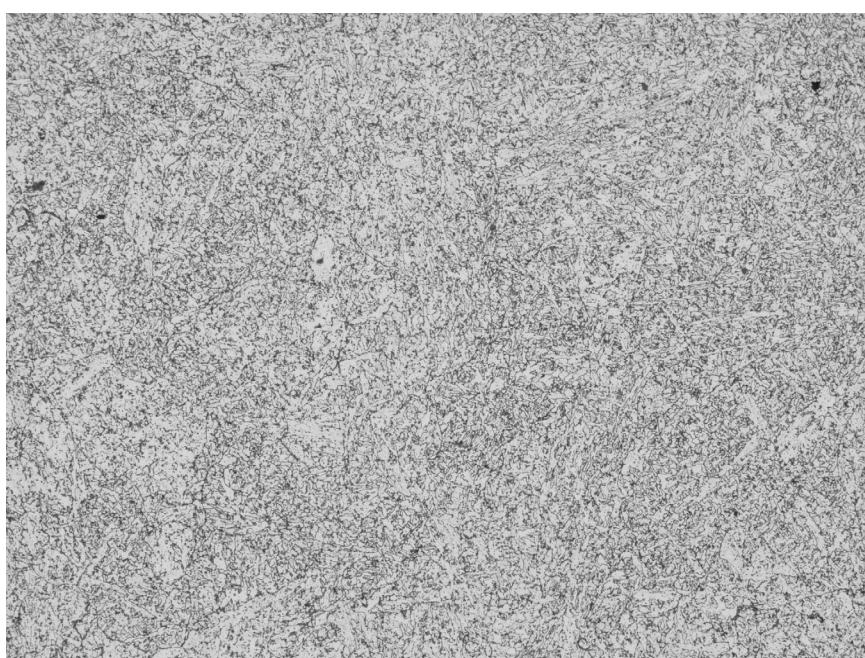
Slika 4. Mikrostruktura na granici osnovni materijal/zona utjecaja topline/zona taljenja prije žarenja, povećanje 200x



Slika 5. Mikrostruktura na granici osnovni materijal/zona utjecaja topline/zona taljenja nakon žarenja 730 °C/3h, povećanje 200x



Slika 6. Mikrostruktura zone taljenja prije žarenja,
II pozicija, povećanje 200x.



Slika 7. Mikrostruktura zone taljenja nakon žarenja 730 °C/3h,
II pozicija, povećanje 200x.

Iz mikrostrukturalnih snimaka dobivenih optičkom mikroskopijom vidi se da je mikrostruktura osnovnog materijala feritno-perlitna (Slika 3.). Svetla polja na snimci predstavljaju ferit, dok tamna polja predstavljaju perlit. Posljedica feritno-perlitne strukture su povoljna mehanička svojstva.

Slika 4. pokazuju mikrostrukturu prijelaza s osnovnog materijala na zonu taljenja. Zapaženo je da u zoni utjecaja topline dolazi do blagog porasta zrna, što dovodi i do promjene mehaničkih svojstava. Zbog velikog unosa topline zona taljenja može imati različitu mikrostrukturu. Međutim detaljnijim metalografskim pregledom nisu zapažena područja Widmannstättske strukture. U zoni taljenja zapažena je feritna mikrostruktura sa jako sitnim zrnom.

Nakon žarenja zavarenih cijevi kod 730°C nisu zapažena veća odstupanja od mikrostrukture. U svim osnovnim elementima zavarenog spoja (OM, ZUT, ZT) došlo je do smanjivanja veličine zrna i određenog ujednačavanja mikrostrukture.

4. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja uzoraka niskolegiranog CrMo čelika mogu se izvesti sljedeći zaključci:

1. Zavarivanje niskolegiranog CrMo čelika provedeno je kombinacijom TIG i REL postupaka. Žarenjem zavarenih cijevi na 730°C postižu zadovoljavajuća mehanička svojstva cijevi za uporabu. Osnovni materijal ima feritno – perlitu mikrostrukturu, dok zona utjecaja topline također ima feritno–perlitu mikrostrukturu, ali uz stanovito pogrubljenje zrna.
2. Vrijednosti tvrdoća osnovnog materijala i zone utjecaja topline prije i poslije žarenja imaju slične vrijednosti koje se razlikuju za najviše 25 HV. Najveća razlika u tvrdoći je u zonama taljenja i iznosi 124 HV.

5. LITERATURA

1. M. Gojić, *Tehnike spajanja i razdvajanja materijala*, Metalurški fakultet Sisak, Sveučilište u Zagrebu, Sisak, 2003.
2. Böhler Welding – welding guide, Bohler Schweißtechnik, Austria GmbH, 2001.
3. M. Franz, *Mehanička svojstva materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1998.