

ZNAČAJ NAKNADNE TOPLINSKE OBRADNE NAKON ZAVARIVANJA KOTLOVSKIH ČELIKA

SIGNIFICANCE OF POST WELD HEAT TREATMENT ON BOILER STEELS

Marko Zovko, Tihomir Marsenić, Krešimir Bojko, Božo Despotović

Đuro Đaković Termoelektrična postrojenja, Dr. Mile Budaka 1, Slavonski Brod, Hrvatska

Ključne riječi: toplinska obrada nakon zavarivanja, kotlovski čelici

Key words: post weld heat treatment, boiler steels

Sažetak:

U radu je opisana važnost toplinske obrade poslije zavarivanja u proizvodnji kotlovskih postrojenja. Nakon zavarivanja određenih tipova kotlovskih čelika toplinska obrada je neophodna zbog postizanja zadovoljavajućih mehaničkih svojstava. Opisane su metode provođenja toplinske obrade i korištena oprema, te osnovni zahtjevi EN i ASME standarda za provođenje toplinske obrade nakon zavarivanja pri izradi kotlovskih postrojenja. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava materijala sa i bez toplinske obrade pokazuju neophodnost iste za određene vrste materijala.

Abstract:

The paper describes importance of post weld heat treatment in production of boiler plants. After welding, for some types of boiler steels, heat treatment is necessary to achieve satisfactory mechanical properties. Methods of performing post weld heat treatment are described as well as used equipment and basic requirements of EN and ASME standards for performing post weld heat treatment during production of boiler plants. Mechanical testing results with and without heat treatment show necessity for heat treatment for specific types of boiler steels.

1. UVOD

Potreba za energijom danas je veća nego ikad, a inženjeri koji sudjeluju u projektiranju postrojenja za proizvodnju energije susreću se s velikim izazovima. Svaka ideja koja bi povećala iskoristivost postrojenja i za mali postotak rezultira velikim ekonomskim uštedama u cijelini, ali i različitim neekonomskim prednostima poput smanjenja emisije štetnih plinova.

Kod parnih kotlova, a prije svega zbog povišenih i visokih radnih temperatura, inženjeri su najčešće ograničeni materijalom koji koriste. Radne temperature [1] za određene vrste kotlovskih čelika su generalno poznate i iznose:

- | | |
|-------------------------------------|-----------|
| • ugljični (nelegirani) čelici | <450°C |
| • niskolegirani čelici | 450÷580°C |
| • visokolegirani martenzitni čelici | 580÷650°C |
| • visokolegirani austenitni čelici | 600÷750°C |

Trend razvoja materijala pokušava doći do još većih radnih temperatura koje prelaze 750°C, a pri takvim temperaturama nije više moguće koristiti čelike nego se koriste niklove legure.

S razvojem materijala javljaju se izazovi za proizvođače kotlovskih postrojenja koji veliku pažnju moraju posvetiti zavarivanju i eventualnoj toplinskoj obradi poslije zavarivanja. Veći dio niskolegiranih čelika pod određenim okolnostima zahtjeva toplinsku obradu nakon zavarivanja, a kod martenzitnih čelika toplinska obrada je obavezna.

Cilj toplinske obrade nakon zavarivanja u pravilu se veže uz zaostala naprezanja nakon zavarivanja, a provedbom procesa ista se smanjuju na minimum te se postižu povoljnija i ujednačena mehanička svojstva zavarenih spojeva po presjeku. Zone koje nakon zavarivanja ostaju tvrde, a najčešće se nalaze u zoni utjecaja topline, toplinskom obradom se vraćaju u stanje koje je bliže onome koji je materijal imao kao poluproizvod.

2. TEHNIČKI ZAHTJEVI ZA TOPLINSKOM OBRADOM NAKON ZAVARIVANJA

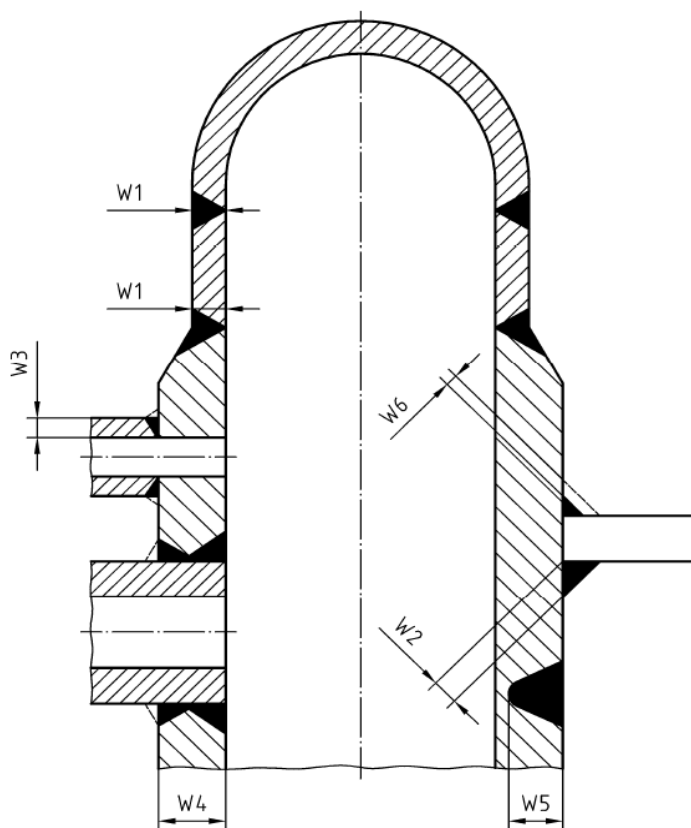
Potreba za provedbom toplinske obrade nakon zavarivanja definirana je u proizvodnim standardima, a izbor standarda ovisi o naručitelju i/ili mjestu instalacije kotla. Danas se kotlovi najčešće rade prema europskim (EN) ili američkim (ASME) standardima. Prema europskim standardima koristi se EN 12952 (Vodocijevni kotlovi i pomoćne instalacije), EN 13445 (Neložene tlačne posude) i EN 12953 (Dimnocijevni kotlovi). Prema američkim standardima koristi se ASME Section I (Rules for Construction of power Boilers) te Section VIII (Rules for Construction of Pressure Vessels).

Za izradu kotlovske postrojenja mogu se koristiti i standardi koji nisu ovdje navedeni (npr. AD 2000, PD 5500,...), a svima je zajedničko da se potreba za toplinskom obradom nakon zavarivanja veže prije svega uz primjenjeni materijal te debljinu zavarenog spoja. Ispod će biti naveden dio zahtjeva iz EN 12952-5 te ASME Sec. I.

Poglavlje 10 standarda EN 12952-5 [2] definira zahtjeve za toplinski tretman materijala uključujući i toplinsku obradu nakon savijanja te predgrijavanje prije zavarivanja. Tablica 1 daje sažetak zahtjeva na najčešćim materijalima korištenima u kotlogradnji koji su definirani u tablicama 10.4-2 i 10.4.3 standarda EN 12952-5: 2011. Prikazane su temperature toplinske obrade nakon zavarivanja samo za istorodne spojeve.

Tablica 1 Sažetak zahtjeva za toplinsku obradu prema EN 12952-5

Materijal	Minimalna debljina zavara ¹	Temperatura provedbe toplinske obrade
P235GH, P265GH, P355GH	e≥35 mm	550÷600°C
16Mo3	e≥35 mm	550÷630°C
15NiCuMoNb5-6-4	sve debljine	570÷620°C
13CrMo4-5	sve debljine ²	620÷680°C
10CrMo9-10	sve debljine ³	680÷730°C
X10CrMoVNb9-1, X10CrWMoVNb9-2	sve debljine	740÷780°C
Napomene:		
1) e - debljina zavara određuje se prema slici 10.4-2 iz EN 12952-5 (slika 1).		
2) nije potrebna toplinska obrada za sučeljene spojeve i spojeve priključaka pod uvjetom: d ₀ <120 mm i e≤13 mm		



Slika 1. Tipični primjeri za kontrolu debljine zavara (iz EN 12952-5)

Vrijeme držanja određuje se prema tablici 10.4-3 standarda, a kreće se između 1 min/mm debljine zavara za ugljične do 2,5 min/mm debljine zavara za visokolegirane materijale. Kod odžarivanja treba obratiti pozornost i na brzinu grijanja i hlađenja jer bi provedba procesa bez poštivanja svih bitnih parametara mogla narušiti svojstva zavarenog spoja, a i osnovnog materijala.

ASME Section I [3] u poglavlju PW-39 definira zahtjeve za toplinskom obradom nakon zavarivanja. Određivanje potrebe za toplinskom obradom prema ASME Section I nešto je složenije nego u europskim standardima, ali generalno zahtjevi su slični. Ne postoji mogućnost da se ne odžari zavareni spoj na visokolegiranim martenzitnim čelicima (poput X10CrMoVNb9-1 / P91), a i rijetko je moguće izbjeći odžarivanje na niskolegiranim čelicima. Da bi odredio potrebu za toplinskom obradom standard uzima u obzir sljedeće vrijednosti:

- debljinu osnovnog materijala / zavara,
- primjenjeno predgrijavanje uz definiranu minimalnu vrijednost predgrijavanja,
- sadržaj ugljika u osnovnom materijalu i/ili ugljikov ekvivalent (CE),
- oblik spoja, itd...

Navedeni zahtjevi iz standarda najvažniji su dio zahtjeva o kojima tehnolog toplinske obrade mora voditi računa. Međutim, ti zahtjevi svakako nisu jedini budući da se potreba za toplinskom obradom povećava s razvojem novih materijala, a tolerancije provedbe procesa postaju sve uže. Osim proizvodnog standarda tehnolog mora voditi računa o korištenom dodatnom materijalu i preporukama proizvođača, redoslijedu zavarivanja i toplinske obrade (naročito kod sklopova koji sadrže kombinacije dva ili više materijala) te korištenom procesu zavarivanja i tehnici zavarivanja. Uz sve navedeno proizvođač kotlovskeg postrojenja mora imati atest postupka zavarivanja prema odgovarajućem standardu koji je izrađen s toplinskom obradom i parametrima iz proizvodnog standarda.

Iako nije zahtjevano proizvodnim standardima u kotlogradnji postoje slučajevi kada se zavareni spoj tretira dogrijavanjem s ciljem eliminacije vodika iz zavarenog spoja. Takva toplinska obrada izvodi se na zavarenim spojevima većih debljina, a provodi se iznad 200°C uz vrijeme držanja od minimalno 2 sata. U kotlogradnji se ovaj slučaj najčešće može pojaviti kod izrade kotlovskih bubnjeva.

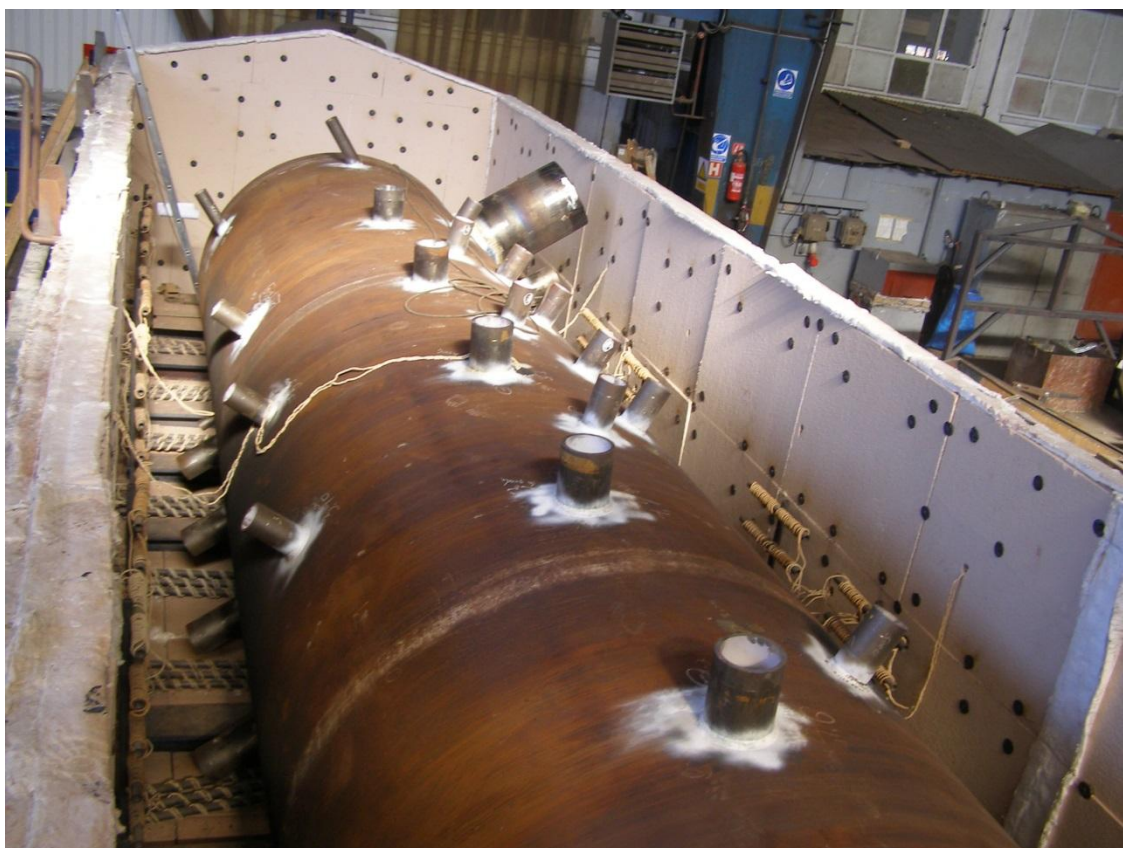
Osim odžarivanja zavarenih spojeva u kotlogradnji postoje slučajevi potrebe za normalizacijom koja se provodi nakon savijanja cijevnih zmija izrađenih iz visokolegiranih austenitnih čelika, a zahtjev za provedbom vezan je uz hladnu deformaciju i promjenu veličine i oblika zrna.

Za svaki oblik toplinske obrade operateri moraju dobiti jasne upute za toplinsku obradu, a uputa mora sadržavati minimalno sljedeće podatke:

- brzina grijanja,
- temperatura držanja (raspon),
- vrijeme držanja (minimalno vrijeme ili raspon),
- brzina hlađenja.

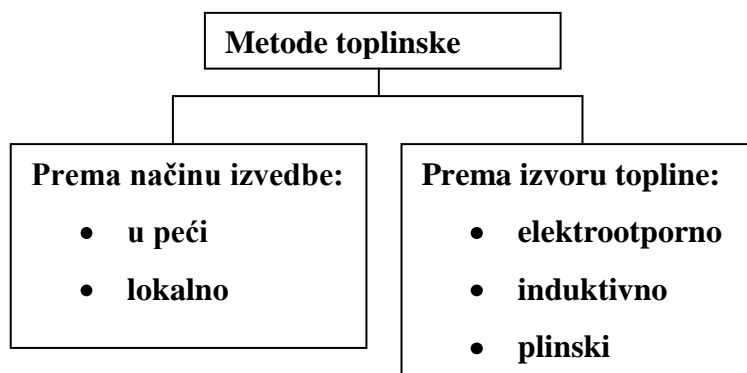
3. METODE PROVOĐENJA TOPLINSKE OBRADU

Proces toplinske obrade izvodi se, kada je god moguće, u peći (slika 2). Osim peći zavari se mogu toplinski tretirati lokalno tako da se zavari i područje oko njih obuhvati grijačima, a moguće je i dio sklopa staviti u peć.



Slika 2. Kotlovski bubanj pripremljen za toplinsku obradu u peći

Općenito, metode toplinske obrade možemo podijeliti prema načinu izvedbe te prema izvoru topline. Podjela je prikazana na slici 3.



Slika 3. Podjela metoda toplinske obrade

Prije početka izvođenja procesa potrebno je zadovoljiti sve zahtjeve kvalitete koji se vežu uz toplinsku obradu nakon zavarivanja. Norma koja definira zahtjeve za kvalitetu toplinske obrade nakon zavarivanja je EN ISO 17663 [4]. Između ostaloga, ona definira da osoblje koje planira, provodi i nadzire proces mora biti dovoljno obučeno da razumije i primjeni upute za toplinsku obradu. Oprema koja se koristi mora biti ispravna i prikladna za provedbu procesa toplinske obrade. Za potvrdu valjanosti opreme ista mora biti periodički provjeravana. Provjerava se:

- Izotermija peći - peć može biti klase I, II i III ovisno o temperaturnom rasipanju
 - provjerava se svakih 36 mjeseci (maksimalno)
 - nakon svakog popravka i/ili modifikacije peći
- Regulatori temperature
 - provjeravaju se svakih 12 mjeseci
- Pisači temperature
 - provjeravaju se svakih 6 mjeseci

Nakon ispunjenja svih preduvjeta predmet se može postaviti u peć te se pristupa toplinskoj obradi. Temperatura se mjeri termoparovima koji mogu biti unutar peći ili na predmetu. Raspored termoparova se radi tako da se pokrije što veći dio volumena peći, a minimalan broj termoparova definiran je normom i prikazan u tablici 2.

Tablica 2. Minimalan broj mjernih mjesta u peći

Volumen peći - V [m ³]	Broj mjernih mjesta
$V < 40$	2
$40 \leq V < 60$	3
$60 \leq V < 80$	4
$80 \leq V < 100$	5
$V \geq 100$	6

Ukoliko predmet nije moguće staviti u peć moguće je izvesti lokalnu toplinsku obradu. Pri tome se termopar postavlja na zavar, a minimalan broj termoparova ovisi o promjeru cijevi i može se vidjeti u tablici 3.

Tablica 3. Minimalni broj mjernih mjesta za lokalnu toplinsku obradu kružnih spojeva

Vanjski promjer cijevi – D [mm]	Broj mjernih mjesta	Kut postavljanja [°]
$D < 170$	1	-
$170 \leq D < 370$	2	180
$370 \leq D < 550$	3	120
$D \geq 550$	4	90

Kod lokalne toplinske obrade dopušteno je grijati zavar induktivnom ili elektrootpornom metodom pri čemu se mora voditi računa o minimalnoj zoni grijanja koja iznosi:

$$L \geq 2,5 \sqrt{D - 4t}$$

gdje je:

D – vanjski promjer cijevi, mm,

t – nominalna debljina zavara, mm.

U ovako definiranoj zoni zavar je lociran u sredini zone, a na krajevima zone grijanja tijekom procesa mora biti minimalno 50% vrijednosti temperature koja je izmjerena na zavaru. Cilj ovakvog zahtjeva je spriječiti eventualan štetni utjecaj prevelikog toplinskog gradijenta na cijevima. Zona grijanja ne smije biti veća niti od $12t$. Primjer lokalne toplinske obrade induktivnom metodom može se vidjeti na slici 4.



Slika 4. Lokalna toplinska obrada sučeljenog spoja na komori

Nakon završetka procesa potrebno je napraviti izvještaj o provedenoj toplinskoj obradi koju izrađuje operater toplinske obrade. Izvještaj u pravilu sadrži sljedeće podatke:

- oznaku proizvoda ili sklopa,
- informacije o materijalu (kvaliteta i dimenzije),
- korištenu opremu za toplinsku obradu,
- tip toplinske obrade (odžarivanje, normalizacija,...),
- metoda toplinske obrade (peć, elektrootporno, induktivno, plinski,...),
- brzina grijanja,

- temperatura držanja,
- vrijeme držanja,
- brzina hlađenja,
- medij hlađenja,
- temperatura izlaska predmeta iz peći,
- tip mjerenja temperatura i mjerna mjesta (poželjna skica rasporeda termoparova),
- datum i mjesto toplinske obrade.

U novije vrijeme od operatera se traži obučenosť za ovo specifično područje te je sve češći zahtjev da operateri budu obučeni prema smjernicama iz dokumenta EWF-628r1-10/SV-02. Za pretpostaviti je da će obuka prema ovome dokumentu ubuduće biti zahtjevana na isti način kao što danas zavarivači ne mogu raditi bez valjanog atesta.

4. REZULTATI MEHANIČKIH ISPITIVANJA

Jedan od novijih kotlovskih visokolegiranih čelika je P92 (ili X10CrWMoVNb9-2 (1.4901) prema EN 10216-2) na kojemu je provedena limitirana provjera svojstava odžarenih i neodžarenih uzoraka. Provjera utjecaja toplinske obrade na svojstva materijala napravljena je ispitivanjem savijanjem i ispitivanjem mikro tvrdoće. Za testne uzorke izabrane su četiri uzorka na komori dimenzija Ø168x16 mm. Uzorci su zavareni i toplinski tretirani kako je navedeno u tablici 4.

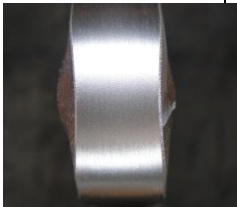



Tablica 4. Uzorci za ispitivanja svojstava materijala P92

Oznaka uzorka	Temperatura predgrijavanja [°C]	Temperatura toplinske obrade [°C]
TC1	>200	Bez TO
TC2	>200	Bez TO
TC3	>200	740÷770
TC4	>200	740÷770

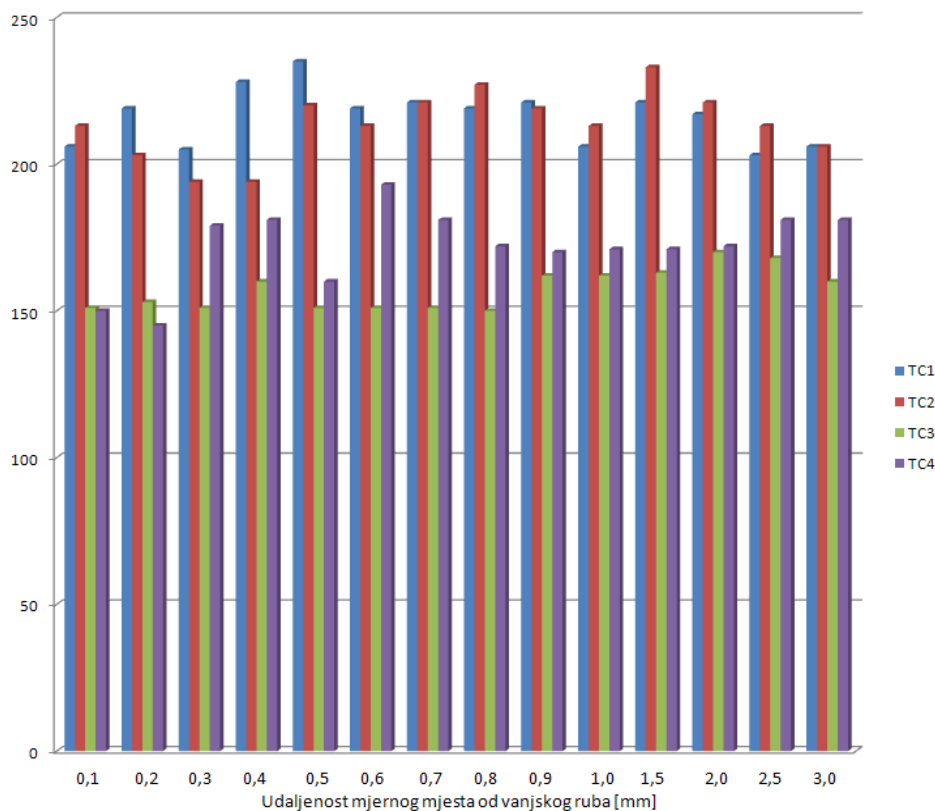
Komentar rezultata ispitivanja

Ispitivanje savijanjem provedeno je bočno, a izvedeno je na trnu promjera 15 mm. Nakon savijanja na ispitnim uzorcima pregledava se moguća pojava poroziteta te pukotina. Pukotine se traže povećanjem 10 puta da bi se uočile i mikro pukotine. Na niti jednom od ispitnih uzoraka nakon savijanja nije uočena nikakva poroznost ili pukotina. Uočeno ja da odžareni uzorci bolje naliježu na trn iz čega se može pretpostaviti da je površinski sloj mekši nego kod neodžarenih uzoraka. Savijeni uzorci prikazani su u tablici 5.

Tablica 5. Izgled ispitnih uzoraka nakon savijanja

TC1	TC2	TC3	TC4
			

Mikro tvrdoća mjerena je po Vickersu HV0,1. Prikazan je samo dijagramski prikaz rasporeda tvrdoća (slika 5) po presjeku koje su mjerene od vanjskog ruba prema unutrašnjem dijelu cijevi. Iz dijagrama je očito vidljivo da su tvrdoće manje na uzorcima TC3 i TC4 koji su odžareni.



Slika 5. Mikro tvrdoće testnih uzoraka

Kako tvrdoću možemo povezati s ostalim mehaničkim svojstvima za pretpostaviti je da su vrijednosti žilavosti na odžarenim uzorcima veće nego na neodžarenim kao što su vrijednosti čvrstoće veće na neodžarenim uzorcima. Dodatna mehanička ispitivanja bi potvrdila ove pretpostavke. Krhke zone (s povišenom čvrstoćom i tvrdoćom) posebno su naglašene u ZUT-u što je karakteristično za ovaj tip čelika. Kako je cilj zavarivanja i naknadne toplinske obrade nakon zavarivanja dobiti spoj koji ima zadovoljavajuća mehanička svojstva kod ovih čelika toplinsku obradu je nemoguće izbjeći.

5. LITERATURA

- [1] Filetin, Tomislav; Kovačićek, Franjo; Indof, Janez, „Svojstva i primjena materijala“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [2] EN 12952-5; Water-tube boilers and auxiliary installations – Part 5: Workmanship and construction of pressure parts of boiler; CEN, Bruxelles, 2011.
- [3] ASME Section I; Rules for construction of power boilers; The American Society of Mechanical Engineers, New York, 2011.
- [4] HRN EN ISO 17663; Zavarivanje – Zahtjevi za kvalitetu toplinske obrade u vezi sa zavarivanjem i srodnim postupcima; HZN, Zagreb, 2010.