

## **TOPLINSKE OBRADE ZAVARENIH SPOJEVA U KOTLOGRADNJI**

### **HEAT TREATMENT PROCEDURES OF WELD JOINTS IN STEAM BOILER PRODUCTION**

**Ivica KLADARIĆ, Miroslav DUSPARA, Ivan SAMARDŽIĆ<sup>1)</sup>**

**Ključne riječi:** zavareni spoj, toplinska obrada, kotlogradnja

**Key words:** weld joint, heat treatment, steam boiler production

**Sažetak:** U radu su predstavljeni čelici koji se najčešće upotrebljavaju u kotlogradnji, zahtjevi i problemi zavarljivosti istih. Dan je prikaz toplinske obrade zavarenih spojeva u kotlogradnji. U eksperimentalnom dijelu je prikazan postupak zavarivanja martenzitnog čelika X10CrWMoVNb9-2 (W.Nr.1.4901). Utvrđeni su parametri toplinske obrade prije i tijekom zavarivanja, te parametri toplinske obrade nakon zavarivanja. Definirani su temperaturno-vremenski dijagrami prije, tijekom i nakon zavarivanja. Uspješnost provedbe toplinske obrade utvrđena je usporednjom izmjerene tvrdoće Vickersovom metodom HV10 u zoni zavara s propisanim tvrdoćama.

**Abstract:** In this paper, the steel types usually used in steam boiler production and its and weldability problems are presented. Also, the heat treatment procedures usually used in steam boiler production are given. In experimental part of the paper the welding of martensite steel X10CrWMoVNb9-2 (W.Nr.1.4901) is shown. Heat treatment parameters are defined for preheating and heat treatment during and after welding process. The temperature-time diagrams are defined for heat treatments before, during and after welding process. The successfulness of heat treatment process is ascertained by hardness measurement (Vickers method HV10) in the weld zone and compare with the prescribed hardnesses.

---

<sup>1)</sup> Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Trg Ivane Brlić Mažuranić 2, 35000 Slavonski Brod

## 1. UVOD

Budući su energetski resursi sve manji, a sve veća potreba za energijom, od tržišta se traži da se proizvode sve jači i veći kotlovi za proizvodnju energije. Pošto su potrebna sve veća snaga potrebni su i bolji, jači i noviji materijali, bolji i suvremeniji postupci spajanja, educirano osoblje itd. Cijevi i zidovi elektrane sastoje se od nekoliko kilometara zavarenih cijevi. Iz toga razloga se može zaključiti da je velika uloga zavarenog spoja na pouzdanost konstrukcije. Zavarivanjem se unosi toplina u neko lokalno područje materijala što tom području mijenja početnu strukturu, a samim time i svojstva. Toplinska obrada se može provoditi prije i nakon postupka zavarivanja, a sastoji se od ugrijavanja na željenu temperaturu, određenog vremena držanja na zadanoj temperaturi, te od brzine hlađenja i to sve u ovisnosti o tipu toplinske obrade.

## 2. OPĆENITO O ČELICIMA KOJI SE KORISTE U KOTLOGRADNJI

### 2.1. Nelegirani čelici

Najvažniji prateći element kod nelegiranih konstrukcijskih čelika je ugljik. Njegov se sadržaj kreće u granicama 0,1 – 0,6 %. Sadržaj ostalih pratećih elemenata se kreće do: 0,5 % Si; 0,3 % Al; 0,8 % Mn; 0,1 % Ti; 0,05 % S; 0,25 % Cu i 0,05 % P.

Za dobro zavarljive čelike se smatraju oni koji sadrže  $C < 0,25 \%$ . Za čelike s  $C > 0,25 \%$  je zavarljivost uvjetna, pa je potrebno provoditi određene mjere da se smanji vjerojatnost pojave pukotina i da se postignu zadovoljavajuća svojstva.

Kao potrebne mjere za kvalitetno zavarivanje predviđa se:

- Predgrijavanje. Na temperaturu predgrijavanja utječu % C (tablica 1.) i sadržaj ostalih elemenata, debljina stijenke, upetost i sadržaj difuzijskog H.

Tablica 1. Temperatura predgrijavanja  $\vartheta_0$  pri zavarivanju nelegiranih čelika [1]

C %	$\vartheta_0$ (°C)
0,2÷0,3	100÷150
0,3÷0,45	150÷275
0,45÷0,8	275÷425

- Zavarivati s većim unošenjem topline. To se postiže manjom brzinom zavarivanja, jačom strujom, većim promjerom elektrode ili poprečnim osciliranjem.
- Primjena bazičnih elektroda, koje daju veću istezljivost i udarnu žilavost, pa time i manju mogućnost pojave pukotina.
- Oblikovanje konstrukcije treba smanjiti upetost, debljinu i diskontinuitete (koncentraciju naprezanja). Sadržaj S i P mora biti što manji.
- Popuštanje zaostalih naprezanja za deblje zavarene proizvode, kada se javljaju opasna zaostala troosna naprezanja i sklonost krikom lomu provodi se obično na  $550 \div 650 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 2.2. Mikrolegrirani i niskolegrirani finozrnati visokočvrsti čelici

Povećanje čvrstoće kod mikrolegriranih čelika postignuto je legiranjem malim količinama jednog elementa ili više njih: Al, Nb, V, Ti i Zr uz dovoljno niski sadržaj C (obično  $< 0,2 \text{ \% C}$ ), čime se zadržava dobra zavarljivost. Mikrolegrirni elementi sa C i N tvore i izlučuju karbide, nitride i karbonitride, pomažu stvaranju finozrnate strukture i doprinose površenju čvrstoće.

Mikrolegrirani čelici imaju pored visoke granice razvlačenja i čvrstoće i dobru udarnu

žilavost. Jači pad žilavosti se može očekivati u ZUT-u zbog pogrubljenja zrna i brzog hlađenja (Widmannstatenova mikrostruktura). Zato je potrebno smanjiti unos topline. Za ove čelike se zato propisuje temperatura predgrijavanja da se izbjegnu hladne pukotine.

Niskolegirani visokočvrsti finozrnati čelici isporučuju se iz željezare u poboljšanom stanju. Zavarljivost ovih poboljšanih čelika ne razlikuje se bitno od mikrolegiranih čelika. Jedina razlika je pojava omekšanja i pad čvrstoće ZUT-a na mjestu zagrijavanja pri temperaturi oko  $600^{\circ}\text{C}$ .

### 2.3. Legirani Mo, CrMo i CrMoV čelici

Ova grupa čelika je predviđena za rad na visokim temperaturama u parnim kotlovima, turbinama, rafinerijama nafte i drugim postrojenjima gdje se traži visoka čvrstoća na puzanje pri visokim temperaturama[2]. Najčešće se ovi čelici koriste za cijevi, komore i posude pod tlakom. Zavarljivost i prokaljivost čelika s više legiranih dodataka se povećava, pa se tvrdoća ZUT-a i ZT povećava. Sklonost hladnim pukotinama ovih čelika u ZUT-u i ZT povećava se porastom sadržaja legiranih elemenata, povećanjem čvrstoće i tvrdoće. Za sprječavanje hladnih pukotina potrebno je: korištenje elektroda s niskim sadržajem difuzijskog vodika, predgrijavanje ( $200\div300^{\circ}\text{C}$ ), pojačati mjere osiguranja kvalitete pri zavarivanju i naknadna toplinska obrada (poboljšavanje).

### 2.4. CrNi austenitni nerđajući čelici

Austenitni CrNi čelici sadrže  $12\div25\%$  Cr i  $8\div25\%$  Ni. Nikl je izrazito  $\gamma$ -geni element. Kod ovih čelika nema faznih transformacija prilikom hlađenja, pa takvu strukturu toplinskom obradom nije moguće zakaljivati, niti usitnjavati zrno npr. normalizacijom. Najpoznatiji predstavnik ove grupe čelika je 18 %; Cr 8 % Ni (18/8) čelik. Ostali austenitni čelici ove grupe imaju sličan sastav, a najviše do 25 % Cr i 20 % Ni. Imaju dobru istezljivost ( $30\div50\%$ ) i žilavost pri niskim temperaturama, dobro su zavarljivi.

Osnovni problem homogenosti zavarenih spojeva je pojava kristalizacijskih pukotina. Prisustvo 2 do 6 % ferita u CrNi austenitnim čelicima već ograničava pojavu pukotina ali smanjuje žilavost i povećava prijelazna svojstva. Sa gledišta strukture i utjecaja vodika, pri zavarivanju austenitnih čelika ne treba uvoditi predgrijavanje. U većini slučajeva dovoljno je ograničiti temperaturu između slojeva zavara radi smanjenja vremenskog gradijenta toplinskih naprezanja na visokim temperaturama [3].

### 2.5. Visoko legirani Cr čelici martenzitnog i feritnog tipa

Osnovni legirajući element kod ovih čelika je Cr i koristi se za čelike otporne na koroziju i za rad na visokim temperaturama npr. ( $\vartheta_g = 500\div1200^{\circ}\text{C}$ )[3]. Uz dobra mehanička i antikorozijska svojstva ovi čelici su slabo zavarljivi - skloni pukotinama i osjetljivi na toplinske operacije grijanja i hlađenja, koje mogu uzrokovati povećanje krhkosti.

Krom je alfageni element, koji stabilizira i širi područje ferita. Krom ima veliki afinitet prema ugljiku. Svojstva Cr čelika ovise o kemijskom sastavu, režimima toplinske obrade kao i o temperaturi i vijeku eksploatacije.

Krhkost  $475^{\circ}\text{C}$  javlja se pri zagrijavanju čelika s  $15\div70\%$  Cr na  $400\div540^{\circ}\text{C}$ , a posebice na  $475^{\circ}\text{C}$ . Pogrubljenje zrna je česta pojava za feritne čelike i javlja se pri većim toplinskim inputima i dugim zadržavanjem na visokim temperaturama, a posebno iznad  $1150^{\circ}\text{C}$ .

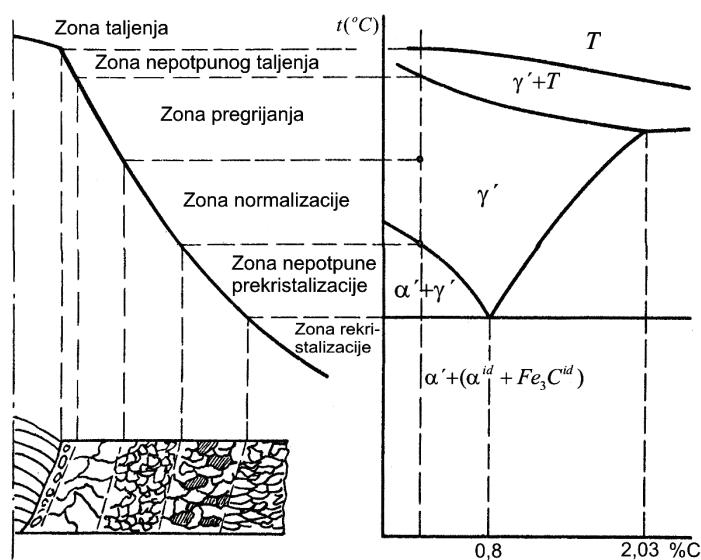
U ovisnosti o tipu legiranja mogu se razlikovati visokolegirani Cr čelici martenzitnog tipa i visokolegirani Cr čelici feritnog tipa.

### 3. TOPLINSKA OBRADA ZAVARENIH SPOJEVA U KOTLOGRADNJI

Toplinska je obrada potrebna da bi se metalu vratila ona osnovna svojstva, koja su snižena pod utjecajem topline zavarivanja, tj. da reducira naprezanja i proizvede željenu mikrostrukturu u osnovnom i dodatnom materijalu.

Izbor prikladne operacije toplinske obrade ovisi o veličini promjena, koje su se dogodile u osnovnom materijalu pri zavarivanju. Veličina tih promjena zavisi o temperaturi, kojoj je materijal bio izložen, o vremenu djelovanja, sastavu materijala i o brzini hlađenja. Prilikom zavarivanja u materijalu će postojati različite zone zagrijavanja i to počevši od temperature likvidus pa sve do temperature okoline (slika 1).

U zavarivanju se mogu primjenjivati toplinske obrade zavarenih spojeva prije, za vrijeme i nakon zavarivanja.



Slika 1. Temperaturna područja u čeliku pri zavarivanju [4]

#### 3.1. Toplinska obrada prije zavarivanja

##### *Normalacijsko žarenje*

Normalizacija se provodi na temperaturi 30....50 °C iznad  $Ac_3$ , kako bi austenitno zrno ostalo razmjerno sitno, a potom se ohlađuje na mirnom zraku kako ne bi nastale neželjene strukturne formacije i pojave zaostalih naprezanja[4].

Ovoj operaciji će se podvrgnuti nelegirani i niskolegirani čelični dijelovi, koji su prethodno hladno deformirani za više od 5%. Cilj normalizacije ovakvih dijelova jest da se izvrši prekristalizacija deformiranog zrna, kako bi se spriječila grubozrnata rekristalizacija i umjetno starenje u onim zonama koje se ugrijavaju pri zavarivanju. Učinak normalizacije ovisi i o vrsti čelika (stupnju legiranosti) i o dimenzijama normaliziranog proizvoda.

##### *Žarenje za redukciju naprezanja*

Žarenje za redukciju naprezanja provodi se na temperaturi 550–650 °C i trajanju od 2 do 4 sata, uz sporo ohlađivanje kako bi se održala što manja temperaturna razlika po presjeku jer bi inače mogla nastati nova vlastita toplinska naprezanja.

Ova operacija provodi se na dijelovima komplikiranih oblika i naglih promjena presjeka, u svrhu uklanjanja vlastitih prikrivenih naprezanja, koje su zaostale od procesa kovanja, valjanja, ravnjanja, pa i normalizacije.

### Predgrijavanje

Predgrijavanje podrazumijeva zagrijavanje područja zavarivanja iznad temperature okoline, na propisanu temperaturu  $\theta_0$  prije početka zavarivanja, te održavanje te temperature za vrijeme zavarivanja.

Predgrijavanje se najčešće (za nelegirane, niskolegirane i visokočvrste čelike) provodi u cilju izbjegavanja hladnih pukotina.

Predgrijavanjem se postiže:

a) Smanjenje brzine hlađenja ZUT-a i ZT u odnosu na veće brzine, ako se ne vrši predgrijavanje. Smanjenjem brzine hlađenja se smanjuje količina tvrdih faza (zakaljene martenzitne ili nekih manje tvrdih struktura).

b) Omogućavanje izlaska difuzijskog vodika. Atomarni difuzijski vodik lakše difundira kroz metalnu kristalnu rešetku pri višim temperaturama, jer je srednji razmak između atoma metala veći.

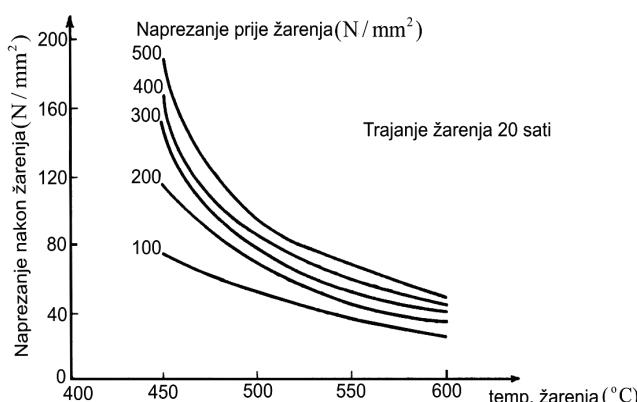
c) Manja su zaostala naprezanja. Budući da je područje zavarivanja na višoj temperaturi, stezanje sredine zavara nakon hlađenja će biti manje, nego ako nije bilo predgrijavanja, pa će i rezultirajuća zaostala naprezanja biti manja.

### 3.2 Toplinska obrada nakon zavarivanja

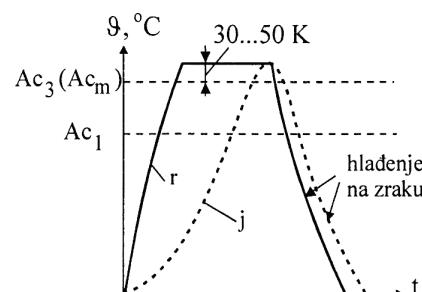
#### Žarenje za redukciju naprezanja

Operacija ovakvog žarenja općenito se provodi tako da se čelični predmet ugrije na neku temperaturu ispod temperature početka  $\alpha/\gamma$  transformacije, da se na toj temperaturi drži neko vrijeme, i nakon toga što sporije ohladi barem do ispod 200 °C.

Na slici 2 prikazana je efikasnost ove operacije u zavisnosti o zaostalim naprezanjima prije žarenja, i o temperaturi žarenja pri konstantnom vremenu žarenja. Efikasnost operacije raste s veličinom zaostalih naprezanja i s povišenjem temperature žarenja.



Slika 2. Efikasnost toplinske obrade "Žarenje za redukciju naprezanja" [4]



Slika 3. Dijagram postupka normalizacijskog žarenja [4]

Naprezanje za redukciju naprezanja se smatra najefikasnijom toplinskom obradom ne samo sa stajališta povišenja nosivosti i čvrstoće nego i smanjenja tvrdoće zone koja je bila na povišenoj temperaturi, isključenja trajnih deformacija konstrukcija u pogonu ili pri obradi i vraćanja metalu njegovih plastičnih svojstava.

Žarenje za redukciju naprezanja ne samo da reducira naprezanja, nego i djeluje povoljno na difuziju vodika, pa tako indirektno povisuje žilavost.

### **Normalizacijsko žarenje**

Zavar nakon završene operacije zavarivanja ima grubu, igličastu ljevačku strukturu. Čvrstoća zavara je relativno niska, istezljivost slaba, udarna žilavost jako snižena. Kako bi se ta loša svojstva zavara uklonila ili ublažila, provodi se normalizacijsko žarenje. Način izvodenja operacije normalizacije prikazan je na slici 3 (za podeutektoidne čelike).

Opći cilj normalizacije je da ukloni nehomogenosti u strukturi i da usitni kristalno zrno. Da se izvrši kvalitetna normalizacija potrebno je:

- a) prekoračiti temperaturu  $Ac_3$  za što manji iznos,
- b) što kraće zadržavanje na temperaturi austenitizacije,
- c) brzina grijanja u području pretvorbe treba da bude što veća i
- d) vrstu i brzinu hlađenja treba prilagoditi prema vrsti materijala i dimenzijama komada.

### **Kaljenje**

Ovdje se kombinira postupak kaljenja s postupkom zavarivanja, tako da se čelik (obično alatni) gasi s temperature kaljenja na oko  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  (u područje u kome je austenit vrlo trom prema transformacijama), pa se onda na toj temperaturi izvedi zavarivanje. Za vrijeme zavarivanja čelik je u austenitnom stanju, tj. plastičan, tako da se sva naprezanja odmah i poništavaju.

Tablica 2. Tehnologija provođenja postupka kaljenja [4]

Redni broj operacije	Jednostavno stepenasto zavarivanje (Način A)	Modificirano stepenasto zavarivanje i kaljenje (Način B)	Čisto stepenasto zavarivanje i kaljenje (Način C)
1	Ugrijavanje na temperaturu kaljenja	Ugrijavanje na temperaturu kaljenja	Ugrijavanje na temperaturu kaljenja
2	Hlađenje na oko $500\text{ }^{\circ}\text{C}$	Hlađenje na oko $500\text{ }^{\circ}\text{C}$	Hlađenje na oko $500\text{ }^{\circ}\text{C}$
3	Zavarivanje na oko $500\text{ }^{\circ}\text{C}$	Zavarivanje na oko $500\text{ }^{\circ}\text{C}$	Zavarivanje na oko $500\text{ }^{\circ}\text{C}$
4	Hlađenje na zraku	Ponovno ugrijavanje na temperaturu kaljenja	Gašenje na 80 do $150\text{ }^{\circ}\text{C}$
5	Kaljenje	Gašenje na 80 do $150\text{ }^{\circ}\text{C}$	Dvostruko popuštanje
6	Popuštanje	Dvostruko popuštanje	

**Jednostavno stepenasto zavarivanje** (Način A) primjenjuje se onda kada nije potrebna visoka tvrdoća osnovnog materijala, nego kada se traži sigurnost prema pojavi pukotina u austenitnom području. Ako se želi visoka tvrdoća, potrebno je kaliti nakon ohladijanja po zavarivanju.

**Modificirano stepenasto zavarivanje** (Način B) primjenjuje se kada nije primjenjivo čisto stepenasto zavarivanje radi prebrze transformacije austenita.

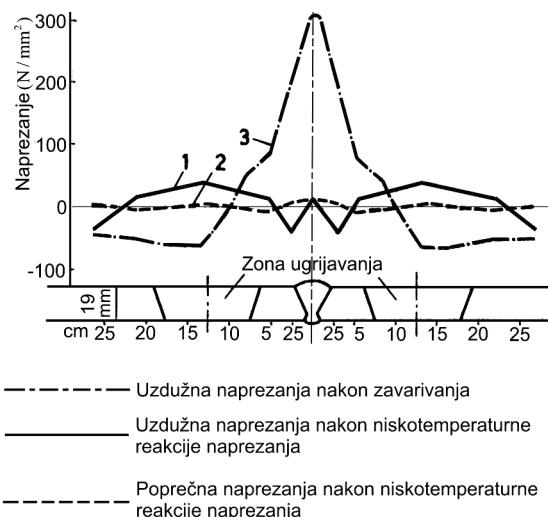
**Čisto stepenasto zavarivanje** (Način C) primjenjuje se kod čelika sa izrazitom tromošću prema pretvorbi u području nestabilnog austenita. U ovom postupku osnovni materijal se kali sa svoje temperature kaljenja, dok se dodatni materijal kali s temperature taljenja. Ako je taj dodani materijal visokolegiran, onda se takvo kaljenje s temperature taljenja može smatrati dovoljno kvalitetnim.

### **Niskotemperaturno poništavanje naprezanja (termoplastična obrada)**

Kratkotrajnim ugrijavanjem dva pojasa s obje strane zavara na temperature do  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , dobit će se novi sustav naprezanja, koji će se prekrivati s postojećim naprezanjima, i u zoni zavara doći će do trajne deformacije i tako će doći do poništavanja naprezanja. Nakon plamenika, koji ugrijavaju dvije zone, slijedi voden tuš, koji poništava polje naprezanja i izaziva efekt stezanja.

Temperatura ugrijane zone regulira se brzinom pomaka plamenika uzduž zavara, a njezina širina širinom plamenika. Porastom temperature ugrijavanja naprezanja u samom zavaru postaju sve manja (čak i mijenjaju predznak), ali rastu naprezanja u samoj zoni ugrijavanja.

Dijagram na slici 3 prikazuje stanje uzdužnih naprezanja prije njihove redukcije i stanje uzdužnih i poprečnih naprezanja nakon redukcije primjenom opisane termoplastične metode. Vidljivo se snižava naprezanja u zavaru, ali i naprezanja u susjednim zonama prelaze iz umjerenih tlačnih u umjereno vlačna naprezanja.



Slika 4. Naprezanja nakon zavarivanja i niskotemperaturne redukcije naprezanja [5]

#### 4. EKSPERIMENTALNI RAD

U eksperimentalnom dijelu definiran je i proveden postupak toplinske obrade komore u koju dolazi kondenzat vodene pare iz membranskih zidova. Komora je izrađena od materijala X10CrWMoVNb9-2 (W.Nr.1.4901; T/P92). Ovaj materijal je relativno novi martenzitni čelik koji je problematičan za zavarivanje, sklon je pojavi pukotina pa je potrebno provesti posebnu toplinsku obradu prije, tijekom i nakon provedbe zavarivanja [6].

Prema normi EN 1011 prije zavarivanja komore od materijala X10CrWMoVNb9-2 preporučeno je predgrijavanje na temperaturu od 200 do 220 °C (a za vrijeme zavarivanja dozvoljena temperatura je do 350 °C). Predgrijavanje je izvedeno elektrootpornim grijaćima. Temperatura predgrijavanja održavana je tijekom TIG zavarivanja, a nakon završetka zavarivanja provedeno je lagano hlađenje.

Nakon predgrijavanja i zavraivanja, provedena je toplinska obrada žarenje za redukciju naprezanja. S obzirom da se radi o visoko legiranom čeliku ugrijavanje je provedeno sporo (60 do 110 °C/h) na temperaturu oko 740–780 °C, ugrijavano je elektrootpornim grijaćima. Na temperaturi žarenja komora je držana 3,5–6 h. Da ne dođe do novih zaostalih naprezanja komora je lagano hlađena (60 do 110 °C/h) do 400 °C, a poslije toga hlađena je na mirnom zraku.

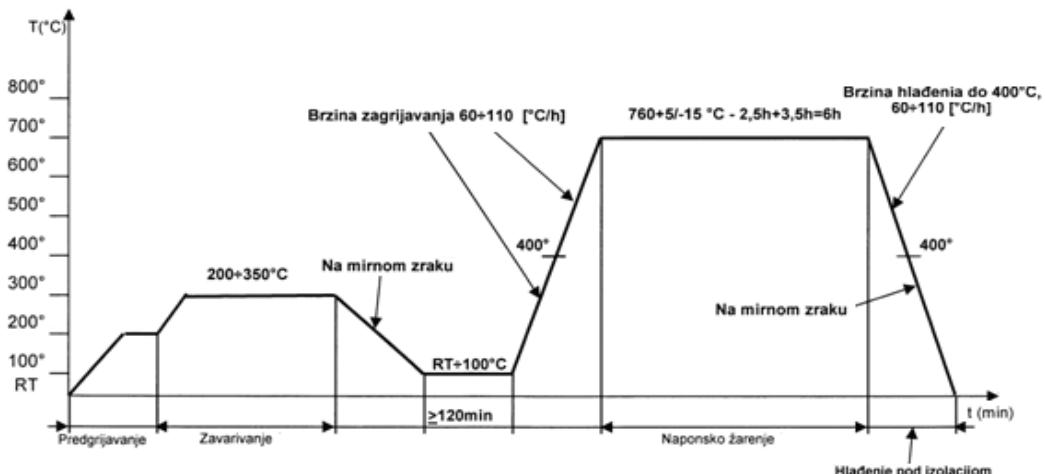
Na slici 5 prikazan je dijagram postupka toplinske obrade prije, za vrijeme i nakon zavarivanja komore izrađene od materijala X10CrWMoVNb9-2.

Na slici 6. prikazan je način postavljanja, grijaća pri predgrijavanju komore od materijala X10CrWMoVNb9-2.

Nakon zavarivanja i laganog hlađenja, komora je lagano zagrijana na temperaturu odžarivanja i to postupkom zagrijavanja cijelog komada u peći.

Na slici 7. prikazana je priprema peći za postupak toplinske obrade žarenja za redukciju

zaostalih naprezanja komore.



Slika 5. Dijagram postupka toplinske obrade prije, za i nakon zavarivanja komore



Slika 6. Postavljanje grijaca i toplinske izolacije pri predgrijavanju i sučesonom zavarivanju komore



Slika 7. Primjer zagrijavanja cijele komore

Tablica 3. Rezultati mjerenja tvrdoće HV10

Pozicija	Mjesto zavara	HV10	Propisane vrijednosti	Potvrda prihvatljivosti
100/1 / 100/2	OM – P100/1	222, 223, 234	200-260	DA
	ZT	239, 236, 240	≤ 300	DA
	OM – P100/1	233, 221, 222	200-260	DA
100/2 / 100/3	OM – P100/1	208, 218, 203	200-260	DA
	ZT	224, 212, 220	≤ 300	DA
	OM – P100/1	226, 228, 222	200-260	DA
100/3 / 100/4	OM – P100/1	229, 227, 231	200-260	DA
	ZT	235, 231, 241	≤ 300	DA
	OM – P100/1	221, 220, 221	200-260	DA
100/4 / 100/5	OM – P100/1	235, 234, 238	200-260	DA
	ZT	234, 219, 234	≤ 300	DA
	OM – P100/1	201, 195, 203	200-260	DA

OM – osnovni materijal, ZT – zona taljenja

Po završetku postupka zavarivanja i provedenih toplinskih obrada provedena je kontrola postupka toplinske obrade. Metoda koja se koristila za to je ispitivanje tvrdoće Vickersovom metodom HV10.

Postupak mjerjenja tvrdoće provenen je tako da je načinjeno po tri mjerjenja na osnovnom materijalu i na dodatnom materijalu na više pozicija. U Tablici 1 prikazane su vrijednosti izmjerene tvrdoća po pojedinim pozicijama i mjestima mjerjenja. Izmjerene vrijednosti uspoređujemo sa vrijednostima koje su propisane normom za materijala X10CrWMoVNb9-2.

Iz rezultata prikazanih u tablici 2 vidljivo je da su izmjerene vrijednosti tvrdoća u granicama propisanih vrijednosti tvrdoća, koje je norma propisala. Osnovni materijala treba biti u granicama tvrdoća od 200 do 260 HV10 dok su izmjerene vrijednosti oko 220÷230 HV10. Tvrdoća materijala zavara ne smije prelaziti 300 HV10, a izmjerene vrijednosti su oko 220 ÷ 240 HV10. Na temelju toga može se konstatirati da je toplinska obrada uspješno izvedena.

## 5. ZAKLJUČAK

Zahtjevi na kvalitetu zavarenih spojeva u kotlogradnji sve su veći, a i svaki materijal sa sobom povlači određena svojstva te se može zavarivati određenom tehnologijom. Toplinska obrada predstavlja važan čimbenik u postizanju što kvalitetnijih zavara pri proizvodnji kotlova.

U eksperimentalnom dijelu definirani i proveneni su postupci toplinske obrade martenzitnog čelika X10CrWMoVNb9-2 (W.Nr.1.4901 T/P92). Za ovaj čelik definirana je tehnologija toplinske obrade prije i poslije zavarivanja. Toplinska obrada prije zavarivanja tzv. predgrijavanje provodila se sa svrhom smanjenja opasnosti od pojave zaostalih naprezanja i pukotina u zavaru. Kod postupka predgrijavanja definirani su parametri toplinske obrade: temperatura i trajanje predgrijavanja.

Nakon predgrijavanja i provenenog postupka zavarivanja TIG metodom propisana je druga toplinska obrada žarenje za redukciju naprezanja. Ovom toplinskom obradom definirani su parametri žarenja za redukciju naprezanja: temperatura i trajanje žarenja, kao i brzina ohlađivanja.

Iz izmjerene vrijednosti tvrdoća zaključeno je da se toplinskom obradom zavarenog spoja žarenja za redukciju zaostalih naprezanja postiže zahtijevane kvalitete proizvoda. Svakako ovdje treba naglasiti da je potrebno voditi računa o pravilnom odabiru parametara toplinske obrade, kako u ovisnosti o vrsti osnovnog materijala tako i o izboru sredstva za zavarivanje.

## 6. LITERATURA

- [1] Despotović, B.; Marsenić, T. ; Samardžić, I.; Klarić, Š.: *Iskustva iz primjene čelika P92 u kotlogradnji*, 21. međunarodni kongres o procesnoj industriji *PROCESING 2008* - Proceedings, Subotica, 2008.
- [2] Falat, L.; Výrostková, A.; Homolová, V.; Svoboda, M.: *Creep deformation and failure of E911/E911 and P92/P92 similar weld-joints*, Engineering Failure Analysis, Volume 16, Issue 7, 2009, 2114-2120
- [3] Hrvnjak, I.: *Zavarljivost čelika*, IRO "Gradevinska knjiga", Beograd, 1982.
- [4] Krumes, D.: *Toplinska obradba*, Strojarski fakultet Slavonski Brod, Slavonski Brod, 2000.
- [5] Lukačević, Z.: *Zavarivanje*. Slavonski Brod; Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 1998.
- [6] Vaillant, J. C.; Vandenberghe, B.; Hahn, B., Heuser, H., Jochum, C.: *T/P23, 24, 911 and 92: New grades for advanced coal-fired power plants—Properties and experience*, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Volume 85, Issues 1-2, 2008, 38-46.
- [7] Výrostková, A.; Homolová, V; Pecha, J.; Svoboda, M.: *Phase evolution in P92 and E911 weld metals during ageing*, Materials Science and Engineering:, Volume 480, Issues 1-2, 2008, 289-298.