

Toplinska obrada zavarenih spojeva

Zgurić, Mislav

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:985046>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-05**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mislav Zgurić

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh

Student:

Mislav Zgurić

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se profesoru dr.sc. Zoranu Kožuhu i asistentici dr.sc. Tanji Tomić na pomoći i strpljenju u izradi ovog rada. Također se zahvaljujem svojim kolegama, prijateljima i obitelji koji su mi pružali podršku tijekom čitavog studija

Mislav Zgurić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i
mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MISLAV ZGURIĆ** Mat. br.: 0035178891

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **TOPLINSKA OBRADA ZAVARENIH SPOJEVA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **HEAT TREATMENT OF WELDED JOINTS**

Opis zadatka:

Shodno literaturnim podacima proučiti razloge i načine provedbe naknadne toplinske obrade zavarenih spojeva ovisno o vrsti materijala, debljini spoja i primjeni materijala u eksploataciji. Proučiti proizvodne norme te shodno tome definirati način određivanja parametara toplinske obrade za određene vrste čelika. Opisati način i opremu potrebnu za provedbu toplinske obrade zavarenih sekcija obzirom na veličinu i složenost konstrukcije.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je prema odabranom zavarenom spoju odrediti način toplinske obrade obzirom na debljinu i vrstu osnovnog materijala. Izraditi upute za provedbu toplinske obrade sa svim potrebnim parametrima. Donijeti zaključke o prikladnosti provedbe toplinske obrade.

Zadatak zadan:
17. studenog 2014.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Zoran Kožuh

Rok predaje rada:
1. rok: 26. veljače 2015.
2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.
2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
SAŽETAK.....	V
1. UVOD.....	1
2. UTJECAJ UNOSA TOPLINE ZAVARIVANJA NA SVOJSTVA ZAVAREN SPOJA.....	2
2.1 PROMJENA MIKROSTRUKTURE U ZONI UTJECAJA TOPLINE.....	3
2.2 ZAOSTALA NAPREZANJA	6
2.3 VODIKOVE PUKOTINE.....	7
3. PREDGRIJAVANJE	10
4. TOPLINSKA OBRADA NAKON ZAVARIVANJA.....	14
4.1 ŽARENJE ZA REDUKCIJU ZAOSTALIH NAPREZANJA.....	14
4.1.1 ODREĐIVANJE PARAMETRA ŽARENJA.....	15
4.2 DOGRIJAVANJE	22
4.3 NORMALIZACIJSKO ŽARENJE	22
4.4 POBOLJŠAVANJE.....	23
4.5 TOPLINSKA OBRADA SMANJENJA TVRDOĆE	24
4.6 PRECIPITACIJSKO OČVRŠČAVANJE.....	25
4.7 GAŠENJE.....	27
4.8 KALJENJE.....	28
5. OPREMA ZA PROVOĐENJE TOPLINSKE OBRADU	29
5.1 PEĆI ZA TOPLINSKU OBRADU	29
5.2 OPREMA ZA TOPLINSKU OBRADU PLINSKIM PLAMENOM	31
5.3 OPREMA ZA INDUKCIJSKO ZAGRIJAVANJE	32
5.5 OPREMA ZA ELEKTROTOPORNO ZAGRIJAVANJE	34

6. PROVEDBA TOPLINSKE OBRADÉ.....	36
7. EKSPERIMENTALNI DIO	40
7.1 OPIS MATERIJALA NAVARENIH SPOJEVA ZA ISPITIVANJE	40
7.1.1 AISI 410	40
7.1.2 AISI 309	42
7.1.3 SA-516 Gr 60	42
7.2 TOPLINSKA OBRADA	43
7.3 IZRADA UZORAKA ZA ISPITIVANJE	45
7.4 TEST NA BOČNO SAVIJANJE	48
7.5 GEOMETRIJSKA ANALIZA MAKROIZBRUSAKA	52
7.6 MJERENJE TVRDOĆE.....	54
8. ZAKLJUČAK.....	55
LITERATURA.....	56
PRILOZI.....	58

POPIS SLIKA

Slika 1 Distribucija temperature pri različitim postupcima zavarivanja [1]	3
Slika 2 ZUT zavarenog spoja nelegiranog niskougljičnog feritno - perlitnog čelika [2].....	4
Slika 3 Pravci skupljanja materijala kod zavarivanja [3]	7
Slika 4 Utjecajni čimbenici za nastanak hladnih pukotina [4]	8
Slika 5 TTT dijagram s krivuljama ohlađivanja zavara sa i bez predgrijavanja [2]	11
Slika 6 Dijagram toplinske obrade žarenja za redukciju zaostalih naprezanja [8].....	16
Slika 7 Primjeri kontrolnih debljina za različite vrste spojeva [11]	20
Slika 8 Normalizacija [1]	23
Slika 9 Dijagram toplinske obrade poboljšavanja [13]	24
Slika 10 Dijagram toplinske obrade sniženja tvrdoće [13]	25
Slika 11 Precipitacijsko očvršćavanje [14]	26
Slika 12 Dijagram toplinske obrade gašenja [13]	27
Slika 13 Peć na tekuća goriva [17].....	30
Slika 14 Toplinska obrada plinskim plamenom [18]	31
Slika 15 Princip zagrijavanja elektromagnetskom indukcijom [19]	32
Slika 16 Oprema za indukcijsko zagrijavanje [19]	33
Slika 17 Grijaća tijela za elektrootporno zagrijavanje [19].....	35
Slika 18 Temperaturna područja kod lokalnog zagrijavanja [21]	37
Slika 19. Minimalna širina zone zagrijavanja [11].....	39
Slika 20 Komorna peć za žarenje [23].	44
Slika 21 Dijagram prikaza tijeka toplinske obrade [23].....	44
Slika 22 Ploča navarena AISI 410 materijalom	45
Slika 23 Ploča navarena materijalima AISI 309 i AISI 410	45
Slika 24 Izrezivanje uzoraka na tračnoj pili	46
Slika 25 Epruvete izrezane iz ploča navarenih AISI 410 materijalom.....	47
Slika 26 Epruvete izrezane iz ploča navarenih AISI 410 materijalom.....	47
Slika 27 Provođenje ispitivanja na bočno savijanje	48
Slika 28 Pukotina na uzroku 1-3	51
Slika 29 Makroizbrusak 1	52
Slika 30 Makroizbrusak 2	53

POPIS TABLICA

Tablica 1 Temperaturni rasponi za toplinsku obradu nakon zavarivanja spojeva istih i različitih materijala [11]	17
Tablica 2 Kriterij izbora temperature žarenja [11]	17
Tablica 3 Vrijeme držanja na temperaturi žarenja [11].....	18
Tablica 4 Izbor kontrolne debljine za određivanje parametara žarenja [11].....	19
Tablica 5 Parametri toplinske obrade precipitacijskog očvršćavanja [14].....	26
Tablica 6 minimalan broj točaka mjerenja temperature u atmosferi peći [20].	37
Tablica 7 Minimalan broj točaka mjerenja temperature kod lokalnog zagrijavanja cilindričnih dijelova [20]	38
Tablica 8 Utjecaj naknadne toplinske obrade na mehanička svojstva martenzitnog nehrđajućeg čelika [22]	41
Tablica 9 Oznake uzoraka za ispitivanje	46
Tablica 10 Rezultati ispitivanja na bočno savijanje AISI 410+AISI 410	49
Tablica 11 Rezultati ispitivanja na bočno savijanje AISI 309+AISI 410	50
Tablica 12 Rezultati mjerenja tvrdoće.....	54

SAŽETAK

U ovom radu opisani su razlozi provođenja naknadne toplinske obrade nakon zavarivanja, a u manjoj mjeri opisan je i postupak predgrijavanja zavarenih spojeva. Definiran je način određivanja parametara toplinske obrade prema proizvodnim normama u ovisnosti o vrsti materijala i debljini spoja. Opisana je oprema i načini provođenja toplinske obrade. U eksperimentalnom dijelu rada određena je vrsta i parametri toplinske obrade za zadane navarene spojeve. Toplinski obrađeni spojevi podvrgnuti su ispitivanju na bočno savijanje, izvršena je geometrijska analiza izrađenih makroizbrusaka te je mjerena tvrdoća. Prema dobivenim rezultatima ispitivanja doneseni su zaključci o prikladnosti provedene toplinske obrade.

1. UVOD

Zavarivanje je način spajanja materijala koji se najčešće provodi taljenjem uz unos topline koji često negativno utječe na osnovni materijal i na ukupna svojstva zavarenog spoja. Ti negativni utjecaji mogu se djelomično ili u potpunosti ukloniti toplinskom obradom. Toplinska obrada zavarenih spojeva u osnovi se sastoji od zagrijavanja zavarenog spoja na propisanu temperaturu, držanje na toj temperaturi i naknadnog hlađenja. Provodi se prije, za vrijeme te nakon zavarivanja. Može se provesti zagrijavanjem cijele zavarene konstrukcije u pećima za toplinsku obradu ili se može provoditi lokalno zagrijavanje dijelova zavarene konstrukcije. Toplinsku obradu potrebno je provoditi u skladu s propisima te korištenjem odgovarajuće opreme za zagrijavanje i kontrolu temperature kako bi se provela na pravilan način. Nepravilan način provođenja toplinske obrade može uzrokovati i negativan utjecaj na svojstva zavarenog spoja, time ugroziti sigurnost spoja te povećati troškove proizvodnje.

2. UTJECAJ UNOSA TOPLINE ZAVARIVANJA NA SVOJSTVA ZAVARENOG SPOJA

Pri elektrolučnom zavarivanju taljenjem energija potrebna za taljenje dodatnog i osnovnog materijala dovodi se električnim lukom koji se uspostavlja između dviju elektroda. Unos topline predstavlja relativno unesenu energiju po jedinici duljine spoja a računa se prema izrazu:

$$Q = \frac{60 \times U \times I}{1000 \times v} \times \eta \text{ [J/mm]} \quad (1.1)$$

Gdje su:

U [V] - napon

I [A] - struja

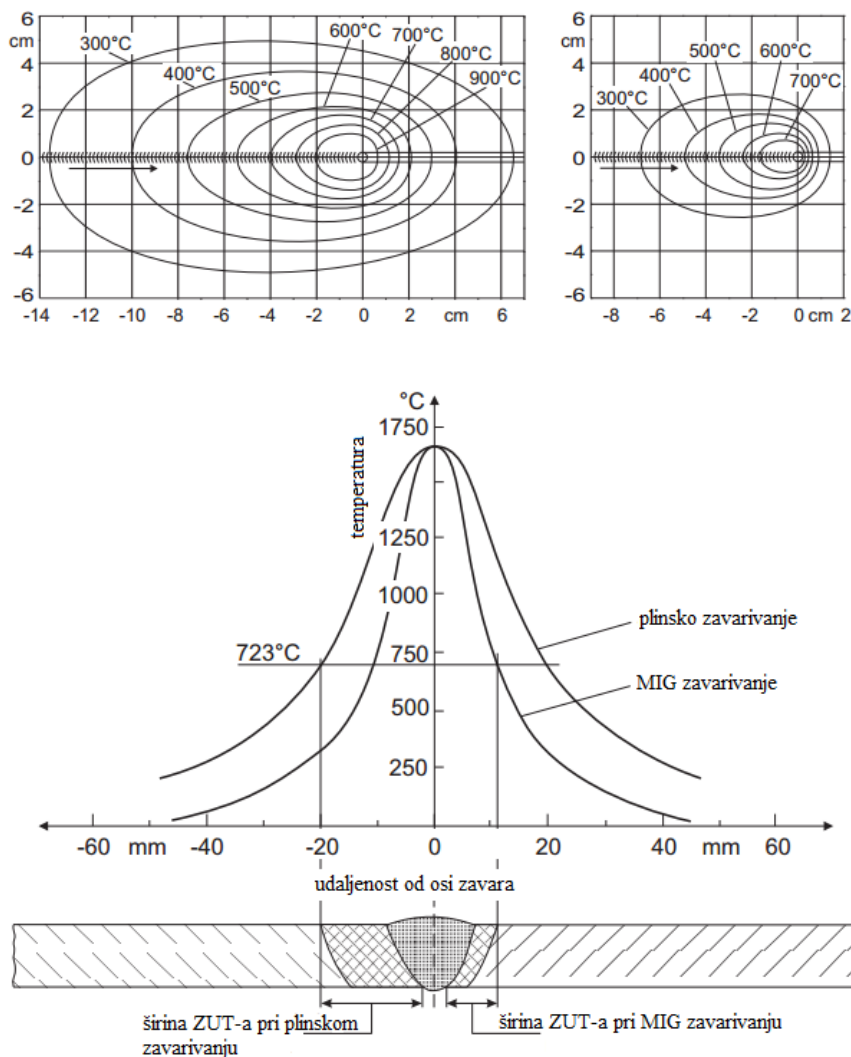
v [mm/min] - brzina zavarivanja

η - stupanj efikasnosti procesa zavarivanja

Dovedena toplina se širi od zone taljenja u osnovni materijal pa se oko zavara formira temperaturno polje. Prikaz temperaturnog polja može se vidjeti na slici 1. Zavareni zavara se prema utjecaju topline može podijeliti na tri područja:

1. Zona taljenja,
2. Zona utjecaja topline,
3. Osnovni materijal.

Zona taljenja predstavlja dio spoja koji je bio u rastaljenom stanju te čijim je skrućivanjem došlo do formiranja spoja. Zona utjecaja topline dio je osnovnog materijala koji se nalazi neposredno uz zonu taljenja a u kojem je došlo do značajnih strukturnih promjena uzrokovanih toplinskim ciklusima prilikom zavarivanja. Osnovni materijal predstavlja dio spoja u kojemu nije došlo do promjena u strukturi materijala niti do promjena mehaničkih svojstava.

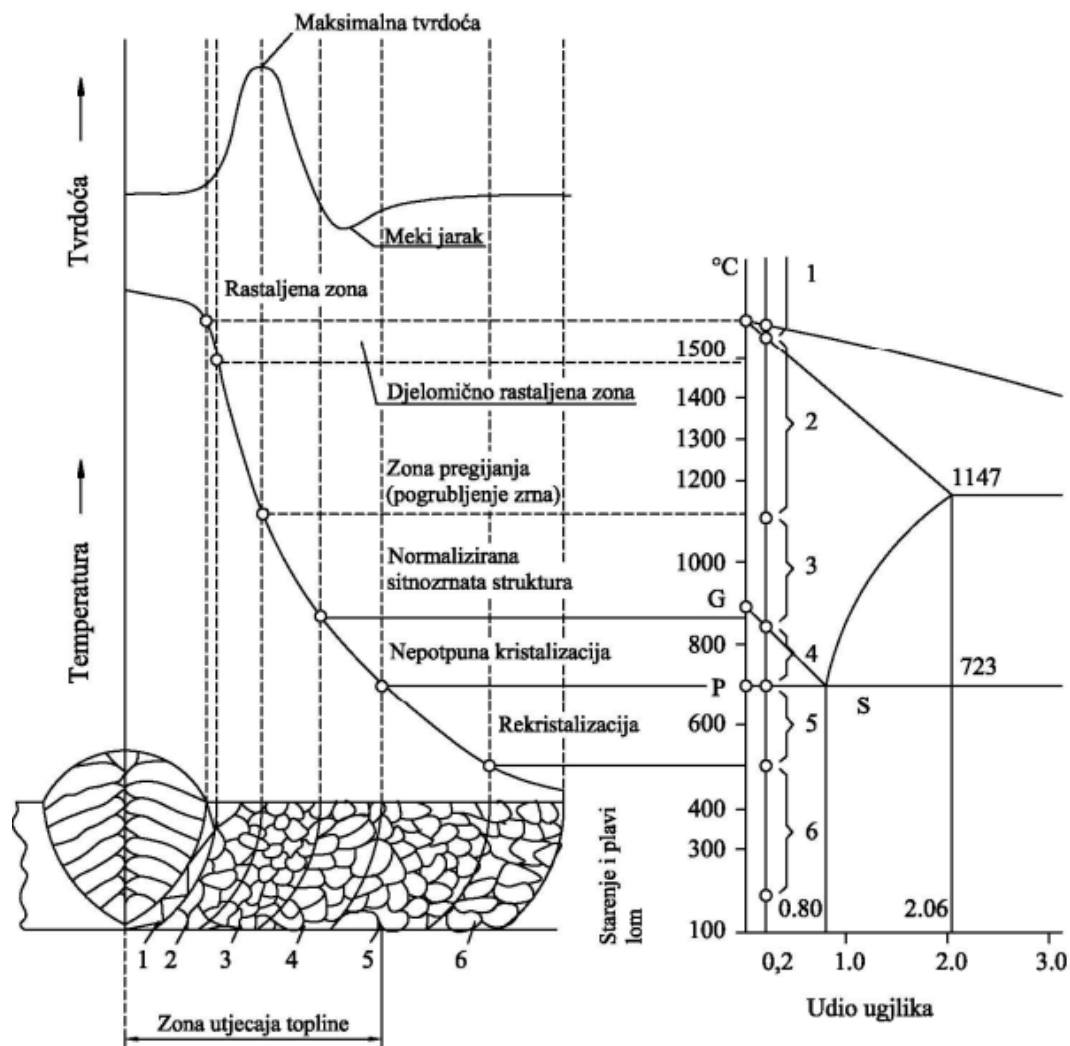


Slika 1 Distribucija temperature pri različitim postupcima zavarivanja [1]

2.1 PROMJENA MIKROSTRUKTURE U ZONI UTJECAJA TOPLINE

U kratkom vremenskom periodu neposredno iza zavarivanja usko područje osnovnog materijala uz metal zavariva zagrijano je u rasponu temperatura od temperature taljenja pa sve do temperature okoline. Širina zone utjecaja topline ovisiti će o unosu topline, kemijskom sastavu, te prethodnoj toplinskoj obradi. U slučaju nisko ugljičnih nelegiranih čelika područje ZUT-a obuhvaća dijelove metala zagrijane na temperaturu do 700 °C jer kod dijelova zagrijanih ispod te temperature ne dolazi do bitnijih promjena. U slučaju zavarivanja poboljšanih čelika ZUT obuhvaća sva područja zagrijana iznad temperature popuštanja, jer zagrijavanjem iznad te temperature dolazi do daljnjeg popuštanja te s time povezanog pada tvrdoće i čvrstoće. U slučaju precipitacijski očvrnutih legura ZUT obuhvaća sva područja iznad temperature

dozrijevanja. Širina ZUT-a najčešće iznosi 2 do 8 mm a vidljiva je i u odnosu na osnovni materijal jer u tom volumenu dolazi do promjene veličine zrna i usmjerenosti što utječe na refleksiju svjetlosti. Na slici 2 prikazane su mikrostrukturne promjene u ZUT-u zavarenog spoja nelegiranog niskougljičnog čelika s feritno-perlitnom stukturom i udjelom ugljika od 0,2 %.



Slika 2 ZUT zavarenog spoja nelegiranog niskougljičnog feritno - perlitnog čelika [2]

Zona taljena - obuhvaća dio zavarenog spoja koji je bio iznad likvidus linije, tj. koji je pri zavarivanju bio potpuno rastaljen. Pri ohlađivanju dolazi do kristalizacije pri čemu nastaje struktura različita od strukture osnovnog materijala. Pojava klica i rast kristala ovisit će o ohlađivanju rastaljenog metala. Kristali najčešće rastu okomito na rubove spoja, a dodiruju se u sredini, stvarajući zonu segregacija nečistoća s nižim talištem, koja može uzrokovati nastanak vrućih pukotina ili biti koncentrador naprezanja pri opterećenju [2].

Djelomično rastaljena zona - (između likvidus i solidus linije) predstavlja dvofazno područje (talina+krutina), bogata je legirnim elementima, nečistoćama koje imaju nižu temperaturu taljenja, a sadrži i plinove. Lokalno povišen udio nečistoća kod brzog hlađenja nakon zavarivanja ne može se difuzijom izjednačiti s okolinom pa u strukturi ostaje mreža otvrdnutih segregiranih nečistoća. Pri ovako visokim temperaturama dolazi i do taljenja ostalih nemetalnih faza (sulfidi, fosfidi i oksidi), čime dolazi do slabljenja metalnih veza u materijalu što omogućuje pojavu toplih pukotina [2].

Zona pregrijavanja - nalazi se ispod solidus linije, ali dosta iznad temperature A_{r3} . U ovoj zoni dolazi do porasta tj. pogrubljenja austenitnog zrna, koja pri brzom hlađenju prelazi u Widmannstaettenovu strukturu, koja je tvrđa i krhkija od poželjnog. U slučaju pojave Widmannstaettenove strukture sitnozrnata i žilava feritno-perlitna struktura može se ponovo postići normalizacijskim žarenjem [2].

Zona normalizacije - nalazi se neznatno iznad temperature A_3 . U toj zoni nastaje sitnozrnata, normalizirana struktura koja najčešće posjeduje bolja svojstva od osnovnog materijala. Ovdje je zagrijavanjem došlo do potpune transformacije ferita i perlita u austenit, a prilikom hlađenja do ponovne transformacije stvaranjem klica i njihovim rastom u vrlo finu feritno-perlitno mikrostrukturu. Ukoliko je čelik zakaljiv, tada u ovoj zoni kao i u ostalim zonama zagrijanim iznad temperature A_3 može doći do zakaljivanja, a u ekstremnim slučajevima i do pojave 100%-tne martenzitne mikrostrukture, što ovisi o brzini hlađenja i kemijskom sastavu čelika. Kod višeslojnog zavarivanja svaki naredni sloj žari tj. normalizira djelomično sloj ispod, što povoljno utječe na čvrstoću zavarenog spoja. Zbog toga zavari u jednom prolazu imaju relativno grubu kristalnu strukturu i lošija svojstva od višeslojnih [2].

Zona djelomične prekrystalizacije - nalazi se u temperaturnom području između temperatura A_1 i A_3 . Za vrijeme hlađenja u toj zoni dolazi do nastajanja klica ferita, na granicama ili unutar zrna austenita, koje zatim rastu, a kad temperatura padne ispod temperature A_1 zaostali austenit se pretvara u perlit. Naravno, u ovisnosti o vrsti čelika i brzini hlađenja, moguća je i pretvorba zaostalog austenita u tvrdi, krhki i nepoželjni martenzit.

Zona rekristalizacije - nalazi na temperatura ispod A_1 , do $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, gdje zaostali austenit prelazi u perlit [2].

Zona starenja i plavog loma - nalazi se u temperaturnom intervalu od 200 °C do 500 °C. U ovoj zoni ne dolazi do strukturnih promjena ni do promjena oblika zrna, ali uslijed starenja može doći do pojave krhkosti [2].

Kao što se vidi na slici 2 u ZUT-u se nalaze ekstremi tvrdoće. Najveće vrijednosti tvrdoće javljaju se na mjestima koja su bila zagrijana iznad temperature A_3 , a najmanje vrijednosti na mjestima koja su bila zagrijana na temperaturu oko A_1 . Velika nehomogenost čvrstoće zavarenog spoja je nepogodna, pa maksimalna tvrdoća ZUT-a ne bi smjela prijeći više od 20-30 % tvrdoće osnovnog materijala. Pojava tvrdih i krhkih martenzitnih struktura nepovoljna je iz razloga što se smanjuje duktilnost zavarenog spoja odnosno povećava se sklonost krhkom lomu te vodikovim pukotinama.

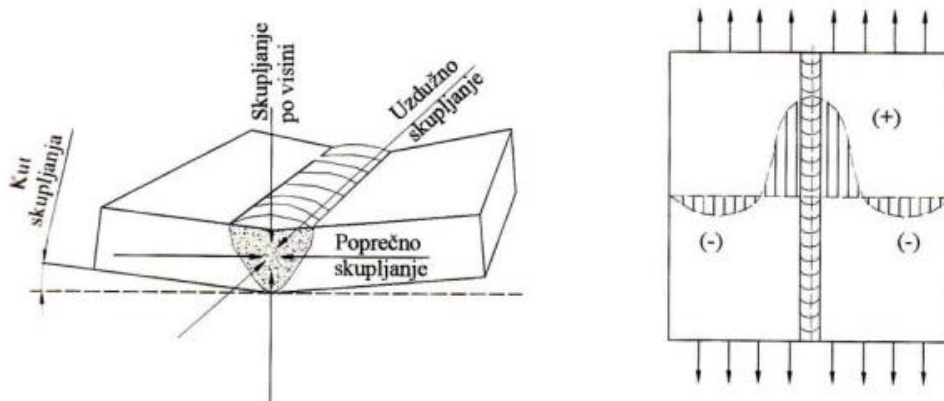
2.2 ZAOSTALA NAPREZANJA

Zaostala, toplinska naprezanja posljedica su nejednolike temperaturne raspodjele u materijalu koja se odnosi na zonu zavara. Naime, pri zavarivanju raspodjela toplinskih polja nije raspodijeljena jednoliko po radnom komadu. Tijekom hlađenja metal šava nastoji se skratiti te tlači okolni materijal, a pri tome je sam šav opterećen vlačnim naprezanjima. Vrijednost tih naprezanja može premašiti granicu tečenja. Zaostala naprezanja nepogodna su iz razloga što smanjuju nosivost konstrukcije, povećavaju sklonost vodikovim pukotinama, krhkom lomu, smanjuju otpornost na zamor, puzanje te napetosnu koroziju. Postoji nekoliko čimbenika koji utječu na pojavu zaostalih naprezanja [3]:

- 1) Nejednoliko zagrijavanje ili hlađenje kroz zone zavara;
- 2) Zaostala naprezanja ili krutost spoja uslijed konstrukcijske izvedbe;
- 3) Popravak na zavarenim spojevima;
- 4) Vanjska naprezanja;
- 5) Toplinska ekspanzija; i
- 6) Transformacija iz austenita (γ) u ferit (α).

Kod elektrolučnih postupaka zavarivanja pojavljuju se sljedeća skupljanja zavarenog spoja, kao što je prikazano na slici 3 [3]:

- Uzdužno skupljanje zavara,
- Poprečno skupljanje zavara,
- Skupljanje zavara po visini,
- Kutno skupljanje.



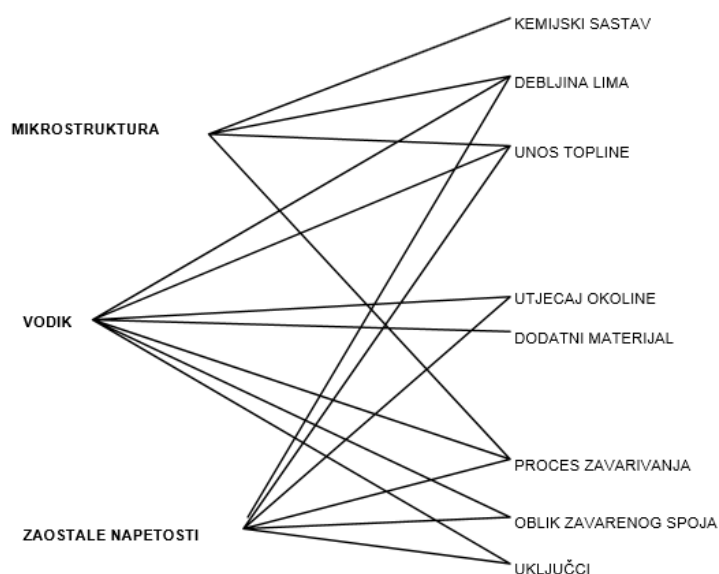
Slika 3 Pravci skupljanja materijala kod zavarivanja [3]

Ako su skupljanja raspoređena simetrično, a krutost i debljina konstrukcije velika bit će velika i vrijednost zaostalih naprezanja a deformacije će biti manje. U slučaju nesimetričnih skupljanja i manjih materijala dolazi do većih deformacija a zaostala naprezanja su pri tome manja.

2.3 VODIKOVE PUKOTINE

Hladne ili vodikove pukotine su greške koje nastaju kada temperatura zavarenog spoja padne ispod 250 do 200 °C. Mogu se pojaviti u ZUT-u i u metalu zavara. Pukotine se mogu prostirati uzdužno ili poprečno na zavar. Jedan od glavnih čimbenika koji djeluju na pojavu vodikovih pukotina je vodik. Vodik dopijeva u metal zavara iz obloge elektrode, praška, vlage iz okoline, plinova zaštitne atmosfere ili iz nedovoljno očišćenog dodatnog materijala te stranica spoja. Hlađenjem zavara te transformacijom iz γ u α naglo pada rastvorljivost vodika u metalu zavara

te vodik difundira prema ZUT-u i skuplja se u raznim porama i mikropukotinama. Pri temperaturama od oko 300 °C vodik prelazi iz atomarnog u molekularno stanje i dolazi do velikog rasta pritiska koji može uzrokovati lokalno razaranje materijala i širenje pukotina. Osim količine difundiranog vodika na pojavu vodikovih pukotina utječe i mikrostruktura te prisustvo zaostalih naprezanja. Za pojavu pukotina nužna su sva tri čimbenika a vjerojatnost pojave je tim veća što je veći utjecaj svakog od njih.



Slika 4 Utjecajni čimbenici za nastanak hladnih pukotina [4]

Na spomenuto razaranje najotpornija je austenitna mikrostruktura koja ima FCC rešetku zbog veće rastvorivosti vodika u FCC rešetci u usporedbi s BCC rešetkom kakvu ima ferit. Najosjetljiviji oblik mikrostrukture predstavlja martenzitna mikrostruktura pa je stoga najveća vjerojatnost pojave pukotina u ZUT-u i to kod čelika visoke zakaljivosti. Pukotine u metalu zavara nastaju u slučaju kad je temperatura transformacije osnovnog materijala u ZUT-u veća od temperature transformacije metala zavara, čime dolazi do zarobljavanja vodika u metalu zavara, što ima za posljedicu veću sklonost prema pojavi hladnih pukotina [3]. Sklonost hladnim pukotinama procjenjuje se analitički na osnovi različitih formula za ekvivalent ugljika (pokazuju sklonost zakaljivanju i nastajanju hladnih pukotina), a za eksperimentalno istraživanje postoji čitav niz laboratorijskih metoda.

Za sprečavanje pojave hladnih pukotina postoje sljedeće mogućnosti [5]:

- smanjenje ukupne krutosti zavarenog spoja ili konstrukcije. Ova mogućnost se obično teško realizira;
- smanjenje sadržaja difundiranog vodika precizno kontroliranom i optimalno izabranom tehnologijom zavarivanja;
- uporaba takve tehnologije i parametara zavarivanja koji isključuju pojavu krhkih struktura u području zavarenog spoja i omogućuju bolju difuziju vodika iz zavarenog spoja.

3. PREDGRIJAVANJE

Predgrijavanje je toplinska obrada kojom se zona zavarivanja zagrijava na temperaturu iznad temperature okoline a provodi se neposredno prije zavarivanja. Predgrijavati se može cijeli radni komad ili se predgrijavanje izvodi lokalno zagrijavanjem uske zone oko pripremljenog žlijeba. Predgrijavanje se ponekad vrši i tijekom zavarivanja kako temperatura okolnog materijala ne bi pala ispod tražene temperature predgrijavanja. Ako je toplina unesena zavarivanjem dovoljna za održavanje tražene temperature predgrijavanja dodatno dovodenje topline nije potrebno. Cilj predgrijavanja najčešće je smanjenje sklonosti pukotina kod zavarivanja čelika sklonih pukotinama, a ponekad je predgrijavanje potrebno da bi se zavarivanje uopće moglo provoditi, primjerice kod zavarivanja bakra. Predgrijavanje nije potrebno uvijek provoditi. Ako nema opravdanosti primjene u vidu poboljšanja mehaničkih svojstava zavarenog spoja potrebno ga je izbjegavati zbog povećanja troškova zavarivanja unosom nepotrebne topline i otežavanja izvođenja zavarivanja. Neispravnim izvođenjem moguće je postići i nepoželjne učinke.

Predgrijavanje se provodi iz sljedećih razloga [2]:

- Smanjenje brzine hlađenja zavara i osnovnog materijala s ciljem izbjegavanja tvrdih faza u mikrostrukturi;
- Lakše otplinjavanje vodika iz zavarenog spoja;
- Smanjenje naprezanja u zavaru i osnovnom materijalu uslijed stezanja materijala pri hlađenju;
- Postizanje određenih, željenih mehaničkih svojstava zavara koja ovise direktno o mikrostrukturi u zavaru i ZUT-u (udarni rad loma i duktilnost);
- Pojedine vrste čelika predgrijavaju se na temperaturu iznad kritične temperature pri kojoj se pojavljuje krhki lom.

Predgrijavanjem se smanjuje brzina hlađenja zavarenog spoja te se na taj način utječe na mikrostrukturu pa time i na sklonost pukotinama te na mehanička svojstva. Povećanjem temperature osnovnog materijala smanjuje se temperaturni gradijent i koeficijent prolaza topline. Pri temperaturi od 595 °C koeficijent prolaza topline željeza je upola manji nego pri sobnoj temperaturi, a u slučaju mnogih ugljičnih čelika na temperaturi od 800 °C koeficijent prolaza topline padne za 50 % [6]. Predgrijavanje smanjenjem brzine hlađenja pomaže u

Mjerenja su pokazala da se predgrijavanjem na 205 °C postiže 30 % manje skupljanje zavara u usporedbi sa sličnim zavarima koji su bili na sobnoj temperaturi [6]. Predgrijavanjem se olakšava i izlazak difuzijskog vodika. Atomarni difuzijski vodik lakše difundira kroz kristalnu rešetku pri višim temperaturama metala.

Predgrijavanje treba provoditi s oprezom jer se nekad mogu postići negativni efekti. Kod mnogih legiranih čelika dulje zagrijavanje iznad područja temperatura stvaranja martenzita može uzrokovati prolazak kroz feritnu strukturu prema perlitnoj strukturi manje čvrstoće, a to dovodi do pada vlačne čvrstoće i granice tečenja materijala.

Temperatura između prolaza odnosi se na temperaturu materijala u blizini spoja neposredno nakon prvog prolaza te nakon svakog sljedećeg prolaza u slučaju višeslojnih zavara. U praksi minimalna temperatura između prolaza često je jednaka minimalnoj propisanoj temperaturi predgrijavanja. Temperatura između prolaza je jednako važna kao i temperatura predgrijavanja jer utječe na mikrostrukturu i na mehanička svojstva zavara. Na primjer granica tečenja i vlačna čvrstoća su funkcije temperature između prolaza. Visoke među prolazne temperature smanjuju čvrstoću metala zavara. S druge strane smanjuju veličinu zrna i poboljšavaju zareznu žilavost [7]. Ipak, ako među prolazna temperatura poprimi previsoku vrijednost doći će do obrnutog efekta. Osim zbog pada udarne žilavosti i čvrstoće metala zavara visinu među prolazne temperature potrebno je ograničiti i zbog pada čvrstoće ZUT-a kod toplinski obrađenih čelika. Primjerice kod poboljšanih čelika među prolazna temperatura a naravno ni temperatura predgrijavanja u slučaju jednog prolaza ne smije biti viša od temperatura popuštanja jer bi time došlo do većeg smanjenja stupnja tetragonalnosti martenzita te zbog toga manje čvrstoće dijelova spoja koji su bili zagrijani iznad te temperature. Iz svega navedenog slijedi da temperatura predgrijavanja mora biti dovoljno visoka kako bi se onemogućio nastanak pukotina ali ne previsoka kako bi osigurali zadovoljavajuća mehanička svojstva spoja. Kako bi temperatura ostala u traženom rasponu potrebno je razmotriti: unos topline zavarivanjem, debljinu radnog komada, vrijeme između prolaza, visinu temperature predgrijavanja, okolišne uvjete, karakteristike prijenosa topline.

Iz svega do sada navedenoga može se zaključiti da temperatura predgrijavanja ovisi o:

- kemijskom sastavu materijala o kojem ovisi sklonost zakaljivanju tijekom hlađenja,
- brzini hlađenja koja ovisi o unosu topline, debljini radnih komada i vrsti spoja,
- količini unesenog vodika prilikom zavarivanja.

Postoji mnogo metoda za određivanje temperature predgrijavanja kao što su metoda Sefferian, BWRA, Itto i Bessyo. U metodama određivanja temperatura predgrijavanja utjecaj kemijskog sastava izražava se pomoću ekvivalenta ugljika koji se može izračunati prema više analitičkih izraza:

$$CE(IIW) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu + Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5} \quad (3.1)$$

$$Pcm = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (3.2)$$

$$CET = C + \frac{Mn}{10} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{10} \quad (3.3)$$

Na temelju ekvivalenta ugljika te drugih utjecajnih faktora temperatura predgrijavanja se određuje analitički ili se očitava iz odgovarajućih tablica i dijagrama. Treba napomenuti da se metode ne mogu koristiti bez ograničenja jer daju pouzdane rezultate samo za određene vrste čelika.

4. TOPLINSKA OBRADA NAKON ZAVARIVANJA

Toplinska obrada nakon zavarivanja često nije potrebna, ali u nekim slučajevima njeno provođenje je obvezno primjerice kod izrade posuda pod tlakom ili kod raznih konstrukcija velike debljine. Razlozi za provedbu toplinske obrade nakon zavarivanja su najčešće smanjenje zaostalih naprezanja ili poboljšanje mikrostrukture spoja. Na taj način se ostvaruje veća otpornost prema krhkom lomu, zamoru materijala i koroziji.

4.1 ŽARENJE ZA REDUKCIJU ZAOSTALIH NAPREZANJA

Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja toplinska je obrada koja se provodi primarno kako bi se smanjila sklonost krhkom lomu smanjenjem zaostalih naprezanja te popuštanjem tvrdih mikrostrukture nastalih pri procesu zavarivanja. Propisi o gradnji pojedinih proizvoda određuju u kojim slučajevima se provodi toplinska obrada žarenja. Najčešće se izvodi pri izgradnji razne opreme pod tlakom, u slučajevima kada postoji opasnost od napetosne korozije te nakon reparaturnog zavarivanja. To je skup proces pogotovo u slučajevima većih konstrukcija zbog dugog vremena držanja na temperaturama žarenja te sporih brzina zagrijavanja i hlađenja. Iz tog razloga žarenje za redukciju zaostalih naprezanja potrebno je izbjegavati kad je to moguće.

Potreba za izvođenjem toplinske obrade ovisi o traženoj žilavosti materijala na radnoj temperaturi konstrukcije, o visini naprezanja te eventualnoj prisutnosti grešaka materijala. Što je veći udio legirnih elemenata, te debljina radnog komada, veća je potreba za žarenjem. S porastom udjela legirnih elemenata u čeliku raste sklonost pojavi tvrdih i krhkih mikrostrukture a s porastom debljine radnog komada rastu iznosi zaostalih naprezanja a veća je i brzina hlađenja zavarenog spoja što također doprinosi otvrdnuću zavarenog spoja. U literaturi se navode i neki manje bitni faktori koji utječu na potrebu za žarenjem kao što su kompleksnost konstrukcije, vlačna čvrstoća uvjeti eksploatacije i drugo.

Do sniženja zaostalih naprezanja dolazi zbog smanjenja granice razvlačenja na povišenim temperaturama. Pošto su na temperaturi žarenja zaostala naprezanja manja od granice tečenja dolazi do plastične deformacije, pa dolazi do njihovog smanjenja. Zaostala naprezanja pri tome ne nestaju u potpunosti nego padaju na vrijednost granice razvlačenja materijala na temperaturi žarenja.

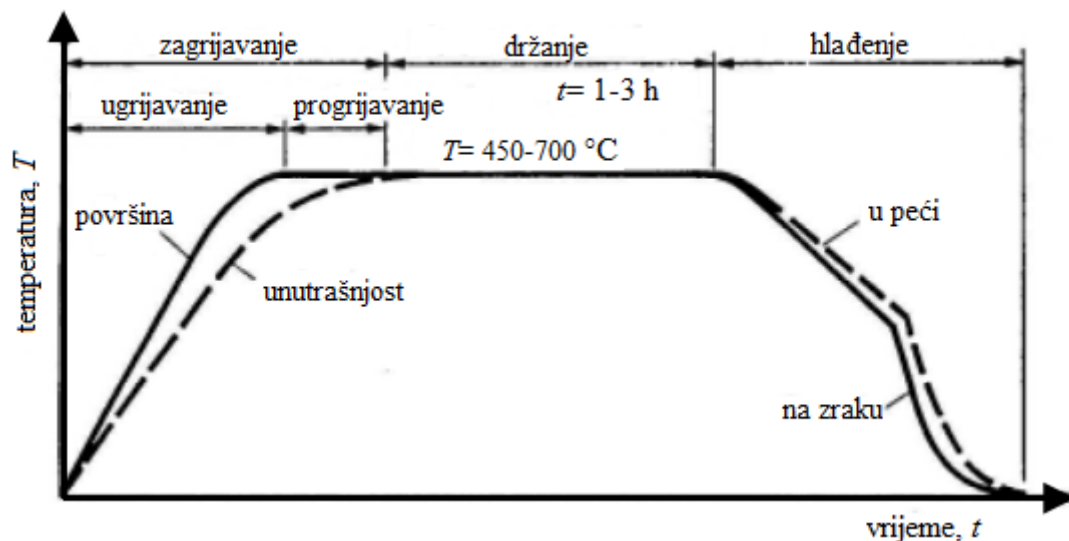
Smanjenje zaostalih naprezanja nije jedini efekt ovog žarenja . Također dolazi do [8]:

- difuzije vodika iz zavarenog spoja,
- smanjenja tvrdoće ZUT-a, poboljšanja žilavosti,
- poboljšanja dimenzijske stabilnosti prilikom strojne obrade,
- poboljšanja duktilnosti,
- smanjenja sklonosti napetosnoj koroziji,
- smanjenju efekta hladnog oblikovanja.

Iz nabrojanog slijedi da žarenje za redukciju zaostalih naprezanja smanjuje sklonost krhkom lomu, hladnim pukotinama, napetosnoj koroziji, povećava otpornost na zamor. Međutim moguća je i pojava negativnih efekata. Kod niskolegiranih V i Mo čelika može doći do sekundarnog povećanja tvrdoće izdvajanjem karbida te pada žilavosti. Pri zavarivanju srednje legiranih čelika žarenjem može doći do transformacije zaostalog austenita u martenzit. Također je moguće smanjenje čvrstoće osnovnog materijala, primjerice kod poboljšanih čelika ako temperatura žarenja premaši temperaturu popuštanja. Prilikom žarenja potrebno je razmotriti i dodatni materijal jer žarenje može uzrokovati popriličan pad čvrstoće metala zavara. Zbog toga je kod nekih elektroda koje sadrže Cr i Mo čvrstoća specificirana za stanje nakon žarenja pri propisanoj temperaturi i vremenu [7].

4.1.1 ODREĐIVANJE PARAMETRA ŽARENJA

Proces žarenja dijeli se u tri faze, kao što je prikazano na slici 6. Podizanja temperature (zagrijavanje, progrijavanje), držanje na temperaturi žarenja i hlađenje. U prvoj se fazi radni komad postupno, kontrolirano zagrijava do temperature žarenja, najčešće oko 550-650 °C. U drugoj fazi radni komad se određeno vrijeme zadržava na temperaturi žarenja i materijal se dovodi u stanje plastičnosti, gdje zaostala naprezanja dijelom nestaju. U trećoj fazi materijal radnog komada se polagano kontrolirano, hladi po cijelom presjeku materijala. Žarenje se izvodi nakon izvršenog zavarivanja kad temperatura padne na temperaturu okoline a nakon žarenja se zavarivanje više ne smije izvoditi kako ne bi u radni komad unijeli nova zaostala naprezanja.



Slika 6 Dijagram toplinske obrade žarenja za redukciju zaostalih naprezanja [8]

Ovo žarenje se uglavnom provodi za debljine materijala iznad 30 mm, ali i kod znatno tanjih kada se radi o čelicima sklonim otvrdnjavanju i pukotinama kod zavarivanja. Podatci o toplinskoj obradi se mogu naći u katalozima proizvođača limova i cijevi, u nacionalnim standardima i u propisima o gradnji pojedinih proizvoda [9]. Proizvodne norme propisuju da je žarenje potrebno ako debljina materijala prijeđe određenu vrijednost, a ta vrijednost obično ovisi o rezultatima mjerenja udarnog rada loma na najnižim radnim temperaturama. U članku [10] opisane su razlike u propisanim vrijednostima debljina između pojedinih normi, uglavnom britanskih i američkih. U slučaju C i C-Mn čelika zahtjevi su slični i žarenje se zahtijeva kad debljina materijala prijeđe 32 mm. Zaključuje se da je proizvodnja čelika od prvih normi napredovala što je za posljedicu imalo porast žilavosti materijala pa je vjerojatno moguće povećati propisane debljine kod kojih je potrebno žarenje i na taj način ga izbjeći u nekim slučajevima. Navodi se da predgrijavanje također smanjuje potrebu za žarenjem te da je primjenom predgrijavanja moguće izbjeći žarenje kod većih debljina. Tako na primjer norma BS EN 12952 povećava maksimalnu debljinu s 30 na 35 mm za C-Mn čelike u slučaju predgrijavanja na temperaturi od 100 °C.

U nastavku će biti prikazan način izbora parametara žarenja prema normi EN 12952-5 koja definira način izrade dijelova pod tlakom vodocijevnih kotlova. Izbor temperature žarenja u ovisnosti o vrsti materijala prikazan je u tablici 1:

Tablica 1 Temperaturni rasponi za toplinsku obradu nakon zavarivanja spojeva istih i različitih materijala [11]

Vrsta čelika	Grupa čelika	Raspon temperature, °C								
		1	1	2.1	2.1	4 ^a	5.1	5.2	6 ^b	6 ^b
C-Mn	1	550 - 600	550 - 600	550 - 600	550 - 600					
0,3 Mo	1	550 - 600	550 - 630	550 - 600	550 - 600		600 - 630			
Sitnozrnati	2.1	550 - 600	550 - 600	550 - 600	570 - 600					
1 NiMoCuNb	2.1	550 - 600	550 - 600	570 - 600	570 - 620		600 - 620			
	4 ^a									
1 Cr ¼ Mo	5.1		600 - 630		600 - 620		620 - 680	660 - 700		
2¼ Cr 1 Mo	5.2						660 - 700	680 - 730	730-760 710-730 ^c	730-760 710-730 ^c
9 Cr 1 Mo	6 ^b							710 - 730 ^c 730 - 760	740 - 780	740 - 770
12 Cr 1 MoV	6 ^b							730 - 760 710 - 730 ^c	740 - 770	730 - 770

a odrediti prema uputama proizvođača
b prije žarenja potrebna transformacija u martenzit
c samo za dodatni materijal vrste 2¼ Cr 1 Mo

NAPOMENA 1 Druge kombinacije materijala koje nisu pokrivene gornjom tablicom kao i druge kombinacije temperatura mogu biti prihvatljive ako proizvođač njihovom uporabom može osigurati da sigurnost kotlova neće biti umanjena

NAPOMENA 2 Kod žarenja feritno - austenitnih spojeva temperatura žarenja se odabire prema strani spoja načinjenoj od feritnog čelika.

Vrijednost temperature žarenja unutar raspona navedenih u tablici 1 određuje se prema tablici 2:

Tablica 2 Kriterij izbora temperature žarenja [11]

Metoda	Temperatura
korištenje peći za toplinsku obradu	odabrati srednju vrijednost raspona
elektrootporno, indukcijsko, zagrijavanje plamenom itd.	odabrati temperaturu iz gornjeg dijela raspona
dodatna toplinska obrada (srednja ili nakon reparaturnog zavarivanja)	odabrati temperaturu iz donjeg dijela raspona

Vrijeme držanja na temperaturi žarenja u ovisnosti o debljini spoja određuju se prema tablici 3:

Tablica 3 Vrijeme držanja na temperaturi žarenja [11]

Vrsta čelika	Grupa čelika	Zona I			Zona II			Zona III		
		minimalna specificirana debljina zavara e , mm	minimalno vrijeme držanja t_1 , u minutama	minimalna specificirana debljina zavara e , mm	minimalno vrijeme držanja t_2 , u minutama	minimalna specificirana debljina zavara e , mm	minimalno vrijeme držanja t_3 , u minutama			
C-Mn	1	$e < 35$	žarenje nije potrebno	$35 \leq e \leq 90$	$t_2 = 1 \times e$	$e > 90$	$t_3 = 90 + 0,5 \times (e - 90)$			
0,3 Mo	1	$e < 35$	žarenje nije potrebno	$35 \leq e \leq 90$	$t_2 = 1 \times e$	$e > 90$	$t_3 = 90 + 1 \times (e - 90)$			
Sitnozrnati	2.1	$e < 35$	žarenje nije potrebno	$35 \leq e \leq 60$	$t_2 = 2 \times e$	$e > 60$	$t_3 = 120 + 0,5 \times (e - 60)$			
1 NiMoCuNb	2.1	$e < 13$	$t_1 > 13$	$35 \leq e \leq 60$	$t_2 = 1 \times e$	$e > 60$	$t_3 = 60 + 0,5 \times (e - 60)$			
	4 ^a									
1 Cr 1/4 Mo	5.1	$e < 13^b$	$t_1 > 30$	$35 \leq e \leq 60$	$t_2 = 2 \times e$	$e > 60$	$t_3 = 120 + 1 \times (e - 60)$			
2/4 Cr 1 Mo	5.2	$e < 13^c$	$t_1 > 30$	$35 \leq e \leq 60$	$t_2 = 2 \times e$	$e > 60$	$t_3 = 120 + 1 \times (e - 60)$			
9 Cr 1 Mo	6	$e < 13$	$t_1 > 30$	$35 \leq e \leq 90$	$t_2 = 2,5 \times e$	$e > 90$	$t_3 = 225 + 1 \times (e - 90)$			
12 Cr 1 MoV	6	$e < 13$	$t_1 > 30$	$35 \leq e \leq 90$	$t_2 = 2,5 \times e$	$e > 90$	$t_3 = 225 + 0,5 \times (e - 90)$			

^a izabrati prema uputi proizvođača

^b žarenje nije potrebno u slučaju sučeljenih zavara cijevi (W1) i kutnih zavara ako su zadovoljeni sljedeći uvjeti:
- nazivni promjer < 120 mm i nazivna debljina < 13 mm

^c žarenje nije potrebno u slučaju sučeljenih zavara cijevi i kutnih zavara (W2), ako su zadovoljeni sljedeći uvjeti:
- srednja radna temperatura stijenke > 480 °C; nazivni promjer < 120 mm i nazivna debljina < 13 mm

NAPOMENA 1 Vremena držanja u slučaju spojeva različitih materijala potrebno je odabrati u skladu s provjerenom procedurom proizvođača, čijom uporabom kojom se osigurava da sigurnost kotla nije narušena.

NAPOMENA 2 Pogledati sliku 10.4-1 za primjer uporabe ove tablice

a minimalno vrijeme držanja t

b minimalna debljina zavara e

c pogledati stupac 4

d $t_2 = (1...2,5) \times e$ (pogledati stupac 6)

e $t_3 = t_2 + (0,5...1) \times (e - e_2)$ (pogledati stupac 8)

f Zona I

g Zona II

h Zona III

Kada se radni komadi razlikuju u debljini, potrebno je odabrati kontrolnu debljinu za izbor parametara žarenja prema tablici 4:

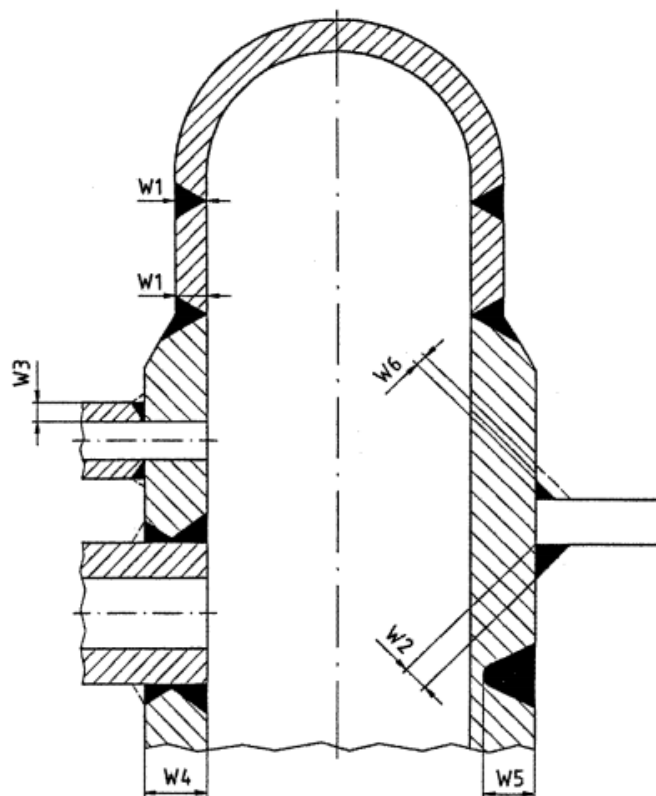
Tablica 4 Izbor kontrolne debljine za određivanje parametara žarenja [11]

Vrsta spoja	Kontrolna debljina
Sučeljeni spoj (W1)	Debljina tanjeg radnog komada
Kutni spoj (W2)	Specificirna debljina zavara
T spoj (W3)	Debljina cijevi na mjestu spoja
T spoj (W4)	Debljina stjenke na mjestu spoja
Pogledati sliku 7 za primjere W1, W2, W3 i W4	

Ako komponenta sadrži zavare s različitim individualnim kontrolnim debljinama, za izbor parametara žarenja potrebno je odabrati najveću kontrolnu debljinu.

Kad se izvode reparaturna zavarivanja ili modifikacije nakon završnog žarenja, naknadno žarenje potrebno je izvršiti prema prethodnim preporukama. Pri tome je kontrolna debljina potrebna za izbor vremena držanja sljedeća:

- a) debljina reparaturnog zavara (W5)
- b) debljina zavara kad se dodaju dodatni zavari za modifikacijske svrhe
- c) debljina dodanog zavara u slučaju pojačavanja (W6)



Slika 7 Primjeri kontrolnih debljina za različite vrste spojeva [11]

Brzinu zagrijavanja i hlađenja potrebno je kontrolirati jer previsoke brzine mogu uzrokovati nastanak novih zaostalih naprezanja i pukotina. Ovisi o vrsti materijala, dimenzijama te kompleksnosti zavarene sekcije. U pogledu vrijednosti brzina zagrijavanja i hlađenja nema bitnijih razlika između pojedinih proizvodnih normi. U slučaju zagrijavanja u pećima definira se sljedeće:

a) temperatura peći u trenutku kada se komponenta smjesti u peć mora biti:

- 1) 400 °C u slučaju posuda i komponenti jednostavne geometrije čija je debljina manja od 60 mm, 300 °C za posude i komponente čija debljina prelazi 60 mm ili su kompleksne geometrije.
- 2) U slučaju austenitnih materijala 300 °C

b) brzina zagrijavanja s temperature navedene pod a) ne smije premašiti:

- 1) 220 °C/h za posude i komponente debljine manje od 25 mm

- 2) $5500/e$ °C/h gdje je e debljina posude ili komponente u mm, vrijedi za debljine: $25 \text{ mm} < e \leq 100 \text{ mm}$
 - 3) 55 °C/h za posude i komponente čija debljina prelazi 100 mm
- c) brzina zagrijavanja austenitnih čelika s temperature od 300 °C ne smije premašiti:
- 1) 220 °C/h za posude i komponente debljine manje od 25 mm
 - 2) 200 °C/h za posude i komponente čija debljina prelazi 25 mm
- d) Posude i komponente potrebno je kontrolirano hladiti u peći do temperature 400 °C, a nakon toga hlađenje se može nastaviti na zraku. Brzine hlađenja su pri tome jednake brzinama zagrijavanja.

U slučaju provođenja lokalne toplinske obrade zagrijavanje s temperatura navedenih pod a) ne smije biti brže od brzina navedenih pod b) i c), također i brzine hlađenja ne smiju premašiti te vrijednosti.

U literaturi se mogu naći i sljedeće preporuke brzina zagrijavanja i hlađenju u slučaju različitih dimenzija radnih komada [6]:

1. Ako omjer maksimalne i minimalne debljine radnih komada ne prelazi 4:1 brzine zagrijavanja i hlađenja ne smiju biti veće od 200 °C/h podijeljene s vrijednošću $e/25$ gdje je e maksimalna debljina u milimetrima.
2. Ako omjer maksimalne i minimalne debljine radnih komada prelazi 4:1 brzine zagrijavanja i hlađenja ne bi smjele biti veće od:
 - za 25 mm debljine 95 °C/h
 - za 50 mm debljine 65 °C/h
 - za 75 mm debljine 38 °C/h
 - za 100 mm debljine 27 °C/h
 - za 125 mm debljine 16 °C/h
 - za 150 mm debljine 10 °C/h

4.2 DOGRIJAVANJE

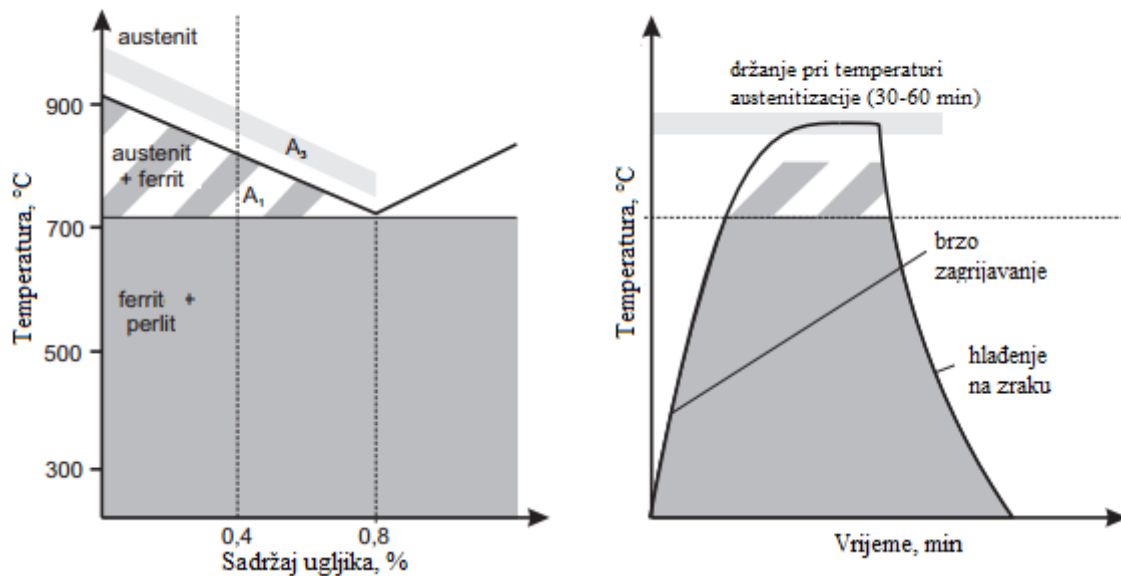
U nekim slučajevima u kojima postoji povećan rizik od pojave hladnih pukotina osim predgrijavanja provodi se i dogrijavanje. Pošto se hladne pukotine javljaju na niskim temperaturama moguće ih je spriječiti difuzijom vodika prije nego se zavar ohladi. U tu svrhu zavar se nastavlja držati na temperaturi predgrijavanja neko vrijeme nakon zavarivanja ili se zagrijava na neku temperaturu dogrijavanja tipično 200-300 °C u trajanju od nekoliko sati u ovisnosti o debljini radnih komada i o kemijskom sastavu čelika koji utječe na koeficijent difuzije vodika. Za obične konstrukcijske čelike dovoljno je vrijeme dogrijavanja od 2 do 4 h. Za niskolegirane čelike ovo vrijeme se može produljiti na 4 do 6 h, za debljine iznad 100 mm i na 8 do 12 h. Kod izrazito velikih debljina ni izrazito produljene vremena dogrijavanja ne garantira izlazak dovoljne količine vodika i zato se preporuča prekidanje zavarivanja. Pri zavarivanju debljine od 300 mm, na primjer, zavarivanje se prekida poslije zavarivanja 1/3 i 2/3 debljine i izvodi se dogrijavanje u trajanju 4-8 h na 200 do 300 °C, a zatim se nastavlja zavarivanje. Kod velikih debljina često se zahtjeva izvođenje žarenja za redukciju zaostalih naprezanja. U tom slučaju ne provodi se dogrijavanje nego se održava temperatura predgrijavanja do početka izvođenja žarenja [5].

4.3 NORMALIZACIJSKO ŽARENJE

U nekim slučajevima zavarenih spojeva, na primjer kod zavarivanja pod troskom, ne može se žarenjem na temperaturama ispod A_1 poboljšati plastičnost ZUT-a i metala zavara jer ne dolazi do usitnjavanja grubozrnate strukture u pregrijanom području ZUT-a. Iz tog razloga se koristi normalizacijsko žarenje kod kojeg dolazi do prekrystalizacije na cijelom području zavarenog spoja, a dobiva se sitnozrnata mikrostruktura i ostvaruje se homogenost čvrstoće zavarenog spoja.

Ovo žarenje se rijetko primjenjuje, uglavnom za posude pod pritiskom velikih debljina zidova. Ova toplinska obrada poboljšava zareznu žilavost, povećava otpornost na inicijaciju i propagaciju pukotina a smanjuje i zaostala naprezanja.

Normalizacijsko žarenje je postupak toplinske obrade koji se sastoji od zagrijavanja na temperaturu austenitizacije, 30-70 °C iznad A_{c3} temperature, kratkog držanja na temperaturi austenitizacije te sporog hlađenja na zraku.



Slika 8 Normalizacija [1]

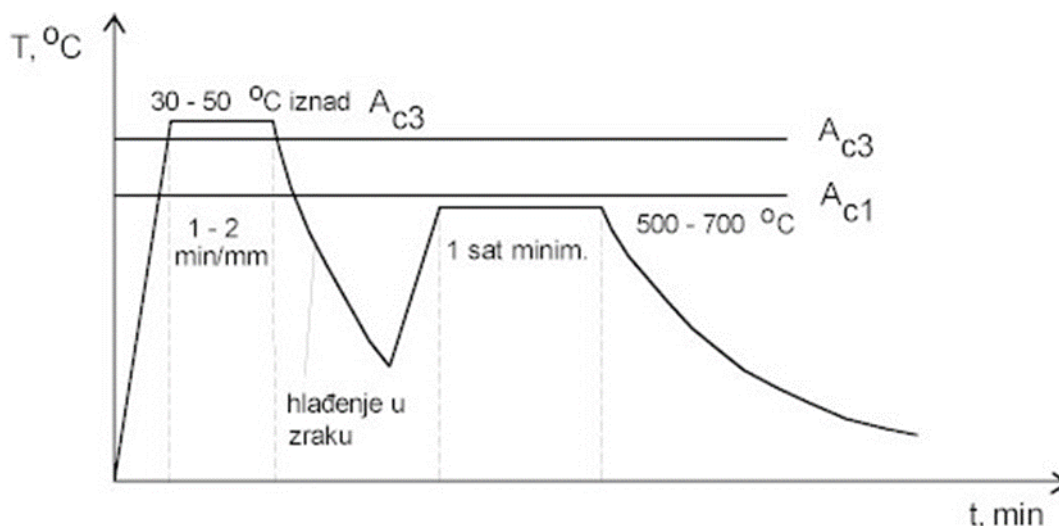
Ugrijavanje na temperaturu austenitizacije trebalo bi biti sporo do temperature A_1 zbog opasnosti od nastajanja toplinskih napreznja, a iznad temperature A_1 brzo, budući da se želi bar dio karbidnih čestica ostaviti neotopljenim da one još pridonose usitnjenju zrna. Temperatura normalizacijskog žarenja odabire se u odnosu prema kemijskom sastavu čelika koji se zavaruje. Metal zavarava ima manji sadržaj ugljika pa je temperatura odabrana prema njegovom kemijskom sastavu visoka za ZUT i osnovni materijal [5].

Ova toplinska obrada se izbjegava zbog neekonomičnosti i kompleksnosti provedbe. Pri visokim temperaturama normalizacije čvrstoća materijala može pasti do te mjere da konstrukcija uslijed vlastite težine promjeni svoj oblik. Učvršćivanje radi sprečavanja ovakvih deformacija također poskupljuje toplinsku obradu. U slučaju kompleksnije konstrukcije moguća je i pojava zaostalih napreznja. Još jedan od nedostataka je i mogući visoki pad čvrstoće metala zavarava.

4.4 POBOLJŠAVANJE

Toplinska obrada poboljšavanja primjenjuje se u slučajevima kada se pri zavarivanju promjene svojstva ranije poboljšanog čelika. Poboljšavanje je kombinacija toplinske obrade kaljenja i popuštanja. Najprije se provodi zagrijavanje na temperaturu nešto iznad A_{cr} , a potom naglo hlađenje, npr. u bazenima s vodom ili uljem. Nakon toga se ponovo zagrijava na temperaturu

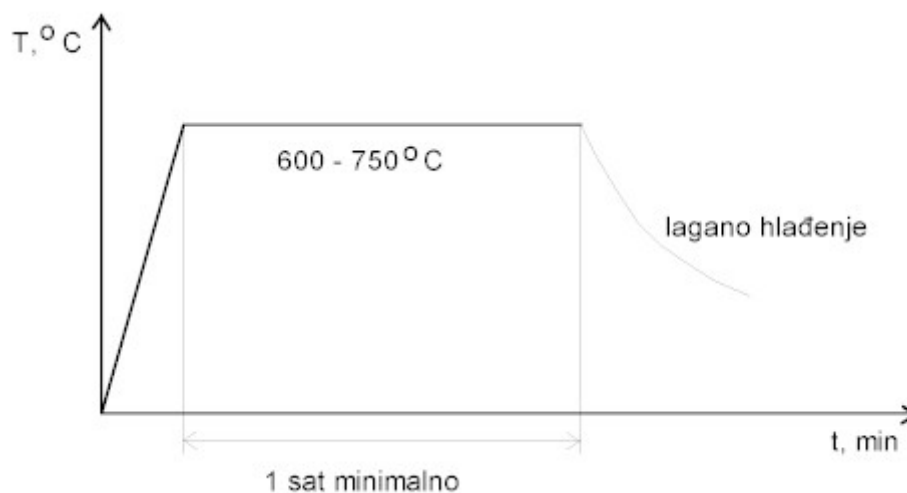
popuštanja, nešto ispod A_{c1} i sporo hladi da se ne unesu veća zaostala naprezanja. Sporo hlađenje nakon popuštanja dopušta se za nelegirane i čelike legirane s Mo. Kod ostalih čelika postoji opasnost od krhkosti popuštanja. Ova se toplinska obrada radi svoje složenosti manje primjenjuje [9].



Slika 9 Dijagram toplinske obrade poboljšavanja [13]

4.5 TOPLINSKA OBRADA SMANJENJA TVRDOĆE

Toplinska obrada smanjenja tvrdoće ili popuštanje primjenjuje se kod zavarivanja zakaljivih niskolegiranih čelika, npr. CrMo ili CrMoV čelika. Zagrijavanje za popuštanje izvodi se na temperaturi ispod A_{c1} u području $600 - 780 ^\circ\text{C}$, ovisno o vrsti čelika. Obično se izvodi u nastavku dogrijavanja i nakon završenog zavarivanja, bez među hlađenja. Zakaljene zone popuštanjem stvaraju strukturu raspadnutog martenzita, koja je žilavija, rastezljivija, ali ima manju čvrstoću i tvrdoću. Temperature u toplinskoj obradi za sniženje tvrdoće koje se preporučaju za ugljične čelike sa $1 \% \text{ Cr}$, $0.5 \% \text{ Mo}$ su $730 - 770 ^\circ\text{C}$, za ugljične čelike sastava $2.25 \% \text{ Cr}$, $1 \% \text{ Mo}$ $730 - 780 ^\circ\text{C}$. Vrijeme žarenja iznosi minimalno 60 minuta, i to nakon progrijavanja [9].



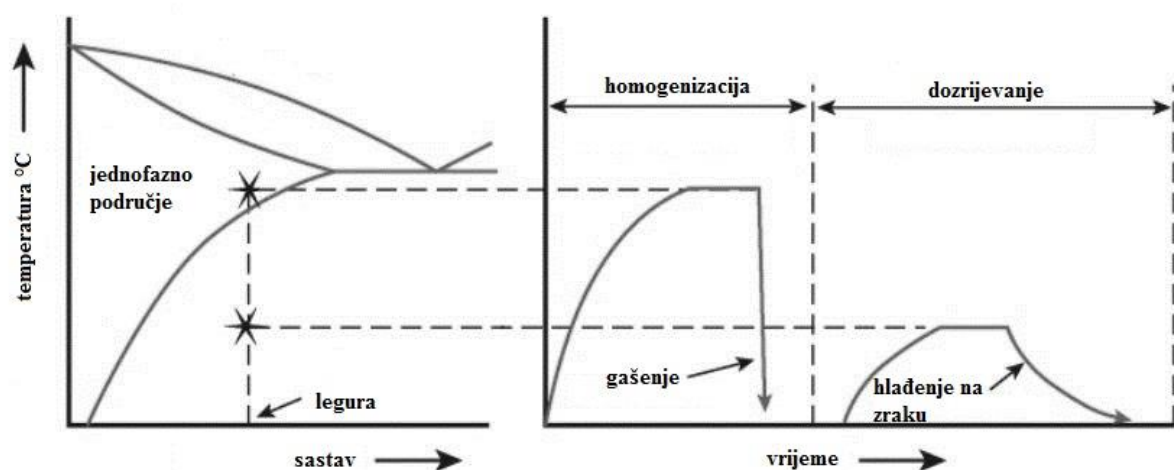
Slika 10 Dijagram toplinske obrade sniženja tvrdoće [13]

4.6 PRECIPITACIJSKO OČVRŠČAVANJE

Prilikom zavarivanja precipitacijski očvrnutih legura utjecaj topline zavarivanja može uzrokovati znatan pad čvrstoće u ZUT-u. U tom slučaju u ZUT-u se mogu razlikovati tri područja:

1. Područje koje je bilo tijekom zavarivanja zagrijano na temperaturu veću od temperature homogenizacije;
2. Područje zagrijano na temperaturu između temperature homogenizacije i temperature dozrijevanja;
3. Područje zagrijano ispod temperature dozrijevanja.

U prvom području dolazi do homogenizacije i nastajanja relativno mekane homogene faze. Ta zona se može očvrnuti ponovnim izvođenjem precipitacijskog očvršćavanja. U drugoj zoni dolazi do pada čvrstoće zbog pregrijavanja iznad temperature dozrijevanja. U trećoj zoni ne dolazi do veće promjene mehaničkih svojstava.



Slika 11 Precipitacijsko očvršćavanje [14]

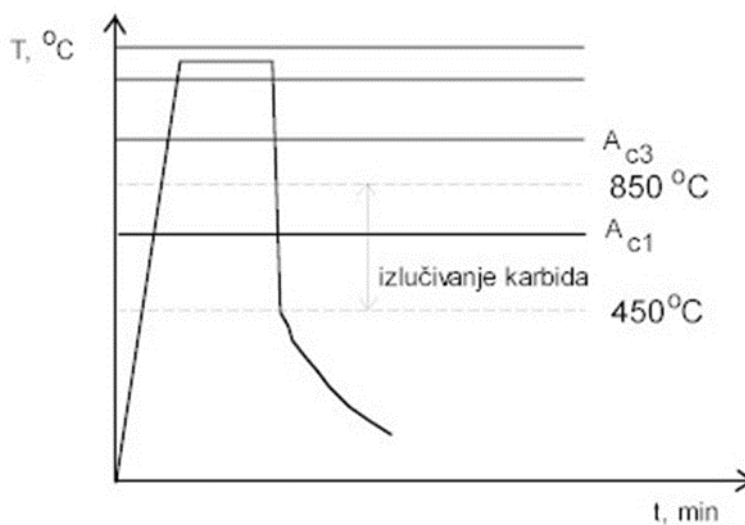
Postoje tri metode za povrat čvrstoće nakon zavarivanja. Prva metoda sastoji se od toga da se nakon zavarivanja cijeli spoj zagrijava na temperaturu homogenizacije, naglo hladi a zatim zagrijava na temperaturu dozrijevanja. Ova metoda je najefikasnija ali i najskuplja te najmanje praktična za provedbu. Prema drugoj metodi izvodi se zavarivanje osnovnog materijala u precipitacijski očvršnutom stanju, a nakon zavarivanja se izvodi dozrijevanje. Ovim pristupom povećat će se čvrstoća u području 1 zone utjecaja topline ali neće u području 2 koje je bilo zagrijano iznad temperature dozrijevanja. Treći pristup je izvođenje zavarivanja materijala na kojem je provedena homogenizacija a nakon toga provođenje dozrijevanja cijelog zavarenog spoja. I nakon ovakvog pristupa zona 2 je najslabije područje ali su dobiveni rezultati nešto bolji nego kod prethodno spomenute metode. Parametri toplinske obrade mogu se vidjeti u tablici 5.

Tablica 5 Parametri toplinske obrade precipitacijskog očvršćavanja [14]

Legura	Temperatura homogenizacije, °C	Način hlađenja	Parametri dozrijevanja, °C/h	Vlačna čvrstoća, N/mm ²	Istezljivost, %
A286	980	gašenje u ulju	720/15h	1150	26
17/4PH	1050	hlađenje na zraku	550/4h	1070	10
maraging čelik Fe/Ni/Co	820	hlađenje na zraku	480/4h	1965	8
718	1040	gašenje u ulju	790/7h	1020	20

4.7 GAŠENJE

Toplinska obrada gašenja primjenjuje se kod zavarivanja proizvoda od austenitnih CrNi i CrMn čelika koji nisu stabilizirani i kod kojih je zbog zavarivanja došlo do izlučivanja Cr-karbida na granicama zrna. Zagrijava se na temperaturu 1000 – 1100 °C, a zatim se izvodi naglo hlađenje u vodi ili zraku. Na visokoj temperaturi dolazi do raspada karbida i povratka Cr u zone u okolini granica zrna, pa je krom približno jednolično raspoređen u materijalu. Kada se na tako visokoj temperaturi postigne otapanje karbida, nužno je takvu strukturu brzo hladiti, posebno u području 850 – 450 °C, kada je izlučivanje karbida najintenzivnije. Postupak toplinske obrade gašenja u osnovi je isti kao postupak toplinske obrada kaljenja, ali se ne postižu isti učinci, jer se radi o drugačijem materijalu. Ova toplinska obrada je skupa pa se rijetko se primjenjuje u zavarivanju. Više se posvećuje pažnja načinu zavarivanja, tj. unosu topline kod zavarivanja CrNi čelika tako da dođe do što manjeg izlučivanja kromovih karbida ili se biraju stabilizirani CrNi čelici [9].



Slika 12 Dijagram toplinske obrade gašenja [13]

4.8 KALJENJE

Toplinska obrada kaljenja čelika sastoji se od:

- Zagrijavanja radnog komada od podeutektoidnog čelika na temperaturu iznad A_{c3} ;
- Držanja na toj temperaturi austenitizacije u svrhu otapanja ugljika i legirajućih elemenata u austenitu;
- Naglog hlađenja (gašenja) u svrhu postizanja martenzitne mikrostrukture.

Ova toplinska obrada primjenjuje se kod reparaturnog zavarivanja ili navarivanja alata. Svi alatni čelici nepovoljni su za zavarivanje. Skloni su pukotinama pa je i u najjednostavnijim slučajevima potrebno predgrijavanje na vrlo visoke temperature. Budući da su zakaljeni, znatno se smanjuje opasnost od nastajanja pukotina, ako ih se najprije meko odžari. Međutim u nekim slučajevima postoji mogućnost izvedbe navarivanja bez mekog žarenja, uz dovoljno visoke temperature predgrijavanja. Osnovni materijal se kali sa svoje temperature kaljenja, a dodatni materijal s temperature taljenja. Ako je dodatni materijal legiran, onda se takvo kaljenje s temperature taljenja može smatrati dovoljno kvalitetnim [9].

5. OPREMA ZA PROVOĐENJE TOPLINSKE OBRADU

Izbor opreme za toplinsku obradu ovisi o mnogo faktora: dostupnosti opreme, veličini i kompleksnosti zavarenih sekcija, potrebnoj visini temperature, potrebnoj brzini ugrijavanja te isplativosti. Obzirom na vrstu opreme postoji nekoliko vrsta provođenja toplinske obrade:

- predgrijavanje i žarenje plinskim plamenom;
- elektrootporno predgrijavanje i žarenje;
- indukcijsko predgrijavanje i žarenje;
- žarenje u pećima.

Pri tome oprema za toplinsku obradu mora zadovoljiti sljedeće zahtjeve [15]:

- mogućnost fine regulacije dovođenja topline u radni komad kao i postupnog hlađenja radnog komada;
- mogućnost mjerenja dostignute temperature zagrijanosti radnog komada u svako doba;
- mogućnost registriranja temperature zagrijanosti radnog komada u obliku dijagrama koji se prilaže kao dokument izvršene toplinske obrade;
- odgovarajući oblici i veličine uređaja i grijaćih tijela u odnosu na radne komade i mjesta zagrijavanja;
- ekonomičnost uređaja.

5.1 PEĆI ZA TOPLINSKU OBRADU

Kad god je moguće toplinska obrade izvodi se u stabilnim pećima. To je zatvoreni prostor u kojem se cijeli objekt ili radni komad kontrolirano grije i hladi, odnosno žari. Izvode se zidane, obložene šamotom ili od čelične konstrukcije obložene izolacijskim materijalom [15]. Veličina peći ovisi o veličini objekta koji će se žariti. Kao izvori topline može se koristiti električna energija u slučaju elektrootpornog ili indukcijskog zagrijavanja ili tekuća goriva. Tekuća goriva imaju prednost u slučaju zavarivanja velikih objekata. Kod korištenja fosilnih goriva potrebno je paziti da gorivo ne sadrži sumpor koji može uzrokovati pukotine kod nekih legura, na primjer kod austenitnih čelika. Također je potrebno kontrolirati sastav atmosfere unutar peći kako ne bi došlo do oksidacije i pougljičenja obrađivanih dijelova.

Najveća prednost peći za toplinsku obradu je mogućnost ostvarivanja jednolike raspodjele temperature po cijeloj konstrukciji čak i u slučaju velikih debljina i velike kompleksnosti tako da se izbjegne pojava zaostalih naprezanja. Još jedna prednost je i brza priprema te mogućnost automatizacije.



Slika 13 Peć na tekuća goriva [17]

Prilikom žarenja u peći temperatura komponente se ne smije kontrolirati temperaturom peći. Temperatura komponente se kontrolira termoparovima raspoređenim na propisanim mjestima komponente, a tako mjerene temperature se koriste za automatsko reguliranje brzine zagrijavanja kako bi se postigla jednolična temperatura po dijelu.

Primjena stabilnih peći nije uvijek moguća, na primjer ako je dio koji se zavaruje veći od peći ili se zavarivanje mora izvršiti na gradilištu što je čest slučaj kod izgradnje energetskih postrojenja. U takvim slučajevima se oko dijela koji se zavaruje može postaviti privremena, montažna peć. Još jedan od varijanta je i metoda otvorenog plamena koja se koristi kod velikih spremnika. Tada se spremnik izvana izolira a unutar njega se loži plinski ili uljni plamenik, tako da se može reći da sam spremnik predstavlja peć. Praktično ne postoje ograničenja veličina posuda koje se mogu žariti ovom metodom ali najbolji rezultati se postižu kod žarenja posuda bez pregrada jer je u ostalim slučajevima teže ostvariti jednoličnu temperaturu žarenja.

5.2 OPREMA ZA TOPLINSKU OBRADU PLINSKIM PLAMENOM

Zagrijavanje otvorenim plamenom plinskim plamenicima spada u stariji industrijski način zagrijavanja metala. Najčešće se primjenjuje za predgrijavanje kod zavarivanja, ali i za lokalno žarenje zavarenog spoja, npr. cijevima. Jednostavna je priprema i jeftina oprema. Plamen se dobiva izgaranjem gorivog plina npr. acetilena u kisiku, propana-butana u komprimiranom zraku ili zraku iz okoline, zemnog plina (etana) u zraku kao i drugih gorivih plinova. Za predgrijavanje se najčešće primjenjuje mješavina propan/butan+komprimirani zrak ili zemni plin+komprimirani zrak [15].



Slika 14 Toplinska obrada plinskim plamenom [18]

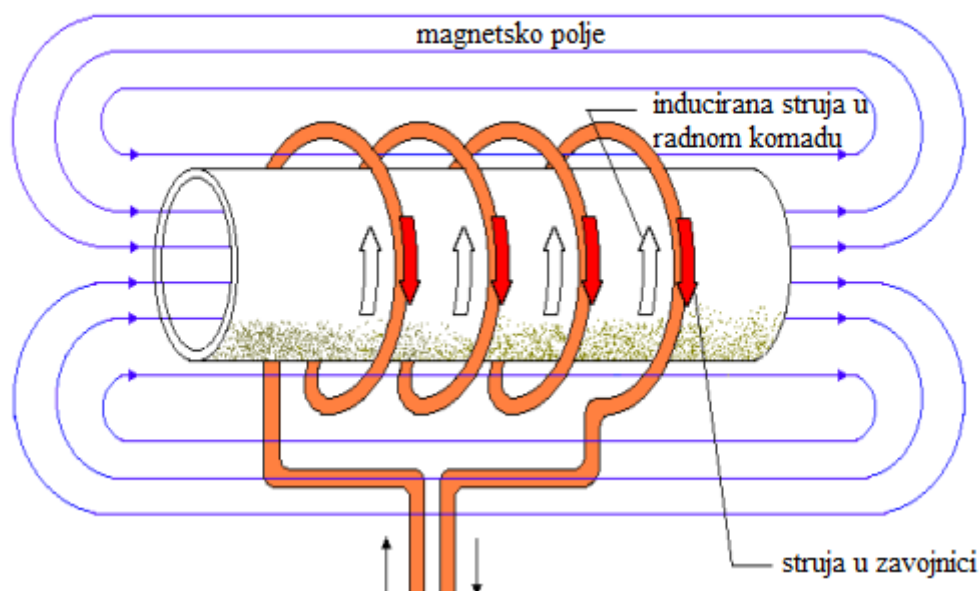
Plamenik se sastoji od kućišta, te barem jedne ili više sapnica. Toplinski učinak ovisi o broju i veličini sapnica, brzini izlaženja plina i toplinskoj vrijednosti gorivog plina. Plamenici se izrađuju prema potrebi u različitim oblicima, dužinski s jednim ili više redova sapnica, prstenasti koji mogu obuhvatiti radni komad, poluprstenastog oblika ili praktički svakog željenog oblika [15].

Predgrijavanje kod zavarivanja, osobito velikih radnih komada, vrlo je pogodno i ekonomično posebnim grijalicama u kojima izgara gorivi plin, a infracrvenim se zračenjem isijava toplina. Primjenjuje se naročito kod debelih materijala i velikih radnih komada, koji se otvorenim plamenom sporije zagrijavaju. Kao gorivi plin upotrebljava se propan/butan. Mogu se koristiti i plinovi manjih kaloričnih vrijednosti, kao zemni plin. Iskoristivost gorivog plina je maksimalna, izgaranje je potpuno, bez štetnih otpada za okolinu. Snaga grijalica je

7000-11000 kW. Grijalice su otporne na udarce, grijaće površine dugotrajne, pa se mogu koristiti i u nepovoljnim uvjetima terenskih radilišta [15].

5.3 OPREMA ZA INDUKCIJSKO ZAGRIJAVANJE

Indukcijsko zagrijavanje temelji se na principu elektromagnetske indukcije. Oko zavojnice kojom teče izmjenična struja stvara se promjenjivo magnetsko polje, a u električki vodljivim materijalima koji se nalaze u tom polju inducira se napon, a ako je strujni krug zatvoren u materijalu se javljaju vrtložne struje čija veličina ovisi o naponu indukcije. Prolaskom struje kroz radni komad stvara se Jouleova toplina.



Slika 15 Princip zagrijavanja elektromagnetskom indukcijom [19]

Ovaj način zagrijavanja koristi se kod velikih montaža, ali također i u radionicama kod izrade velikih spremnika, reaktorskih posuda, cjevovoda itd.

Uređaji za indukcijsku toplinsku obradu mogu biti konstruirani kao jedna cjelina ili od više dijelova, što je prikladnije za teren. Sastoje se od pretvarača za priključak na električnu mrežu, mjernih i regulacijskih instrumenata, višebojnih pisaca, signalizacijskih elemenata i dijelova za hlađenje kabela. Kabeli su napravljeni od bakrene pletenice, višestruko opletene izolirajućim omotačem, kroz sredinu hlađeni vodom, koju tjera pumpa tlakom 3-4 bar. Kabel se omota u

navojima jedan do drugog u potrebnoj širini, na izolirajućim platnom izolirani radni komad. Broj navoja ovog svitka je promjenjiv, te ovisi o promjeru cijevi i debljini stjenke [9].



Slika 16 Oprema za indukcijско zagrijavanje [19]

Snaga induktora ovisi o količini topline koju treba razviti u procesu, a proporcionalna je masi predmeta i temperaturi zagrijavanja. Za orijentaciju se može reći da snaga današnjih induktora iznosi od 5-200 kW.

Frekvencija je drugi važan parametar indukcijskog zagrijavanja. Kod induktora velike snage, kao i tamo gdje se želi brz proces zagrijavanja, radi se s visokim frekvencijama. S porastom visine frekvencije postignute temperature žarenja su više, jakost struje u induktoru je manja, presjek kabela je manji a time je kabel fleksibilniji i lakši. S visinom frekvencije ne smije se pretjerivati, jer s porastom frekvencije sve više dolazi do izražaja tzv. skin efekt. On se očituje u koncentraciji električnih silnica uz površinu predmeta, pa je zato progrijavanje nehomogeno. Prednosti indukcijskog zagrijavanja u odnosu na elektrootporno su brže zagrijavanje, brže postavljanje opreme, mogućnost višestrukog korištenja izolacije [16].

5.5 OPREMA ZA ELEKTROOTPORNO ZAGRIJAVANJE

Kod elektrootpornog zagrijavanja toplina se razvija u grijaćem tijelu koje se postavlja oko radnog komada ili zavarenog spoja i s grijaćeg tijela se prenosi na materijal radnog komada. Električna struja kojom se proizvodi toplina može biti istosmjerna ili izmjenična. Napon obično varira između 30 i 70 V. Jakost struje se kreće između nekoliko desetaka do nekoliko stotina ampera [15].

Učinak kod elektrootpornog zagrijavanja ovisi o visini zahtijevane temperature, dimenzijama radnog komada, vremenu zagrijavanja i kvaliteti izolacije. Kod toplinske obrade izvan peći za svaki pojedini slučaj posebno treba odrediti veličinu učinka. To se uglavnom provodi iskustveno, jer niz okolnosti utječe na učinak, kao što su: konfiguracija radnog komada, različita odebljanja, propuh u cijevi, kvaliteta izolacije i dr. U većini slučajeva bit će dovoljno 6 – 8 W/cm² zagrijane površine [15].

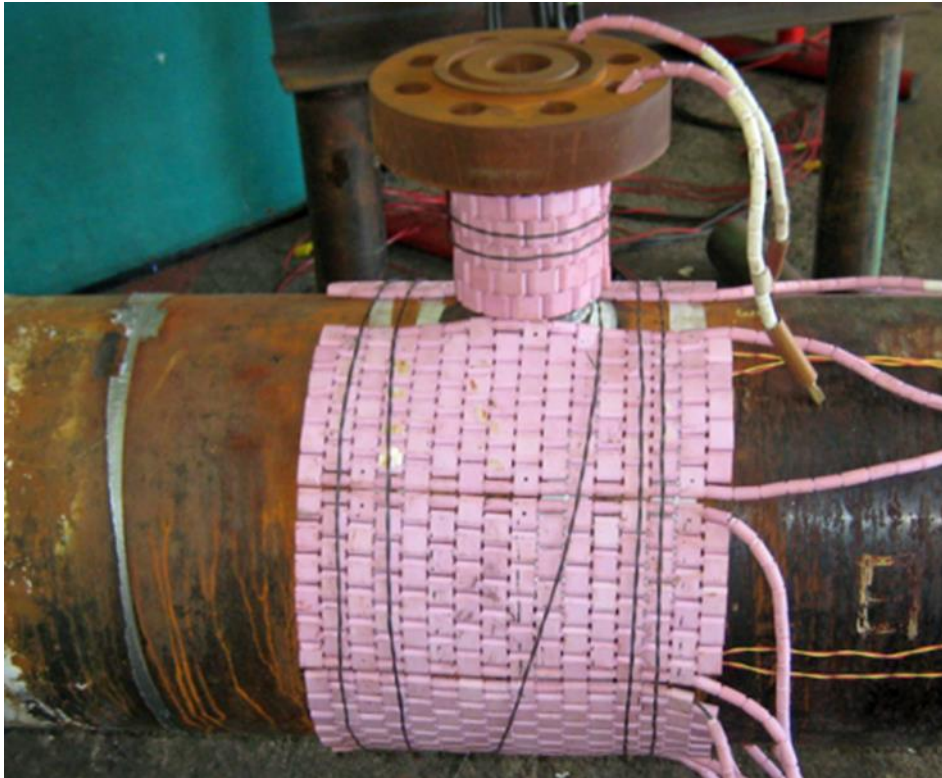
Izolacija se provodi oblaganjem radnog komada u nekoliko slojeva posebno prilagodljivim izolacijskim materijalima. Isplati se posvetiti posebna pažnja dobroj izolaciji jer se uštedi na energiji i vremenu zagrijavanja.

Od posebne važnosti je kontrola vođenja procesa zagrijavanja i hlađenja. Zbog toga uređaj mora imati odgovarajući termoregulator s termoparovima, dobro pričvršćenim na mjestima zagrijavanja, kao i pisačima dijagrama temperature toplinske obrade.

Elektrootpornim neizravnim zagrijavanjem, uz dobru opremu moguće je izvan peći za žarenje izvršiti kvalitetnu toplinsku obradu radnih komada gotovo svih dimenzija, a da se kod toga zadovolje i svi najteži kriteriji.

Oprema za elektrootpornu toplinsku obradu sastoji se od:

- izvora električne energije,
- upravljačkog uređaja (termoregulatora) s pisačima i termoparovima i
- grijaćih tijela različitih oblika.



Slika 17 Grijaća tijela za elektrootporno zagrijavanje [19]

Za manje složena predgrijavanja i zagrijavanja, oprema može biti jednostavna i jeftina, a sastoji se od izvora struje zavarivanja, dodatnog upravljačkog uređaja s pisačima i termoparovima i odgovarajućih grijaćih tijela kao i izolacijskog materijala. Proizvode se kompletni, potpuno automatizirani uređaji za toplinsku obradu snage 10 – 200 kW, za priključenje na mrežu ili posebni uređaji s agregatom, gdje nema električne struje, pa sve do kompletne kontejnerske stanice za toplinsku obradu. Radi ubrzavanja pripreme za toplinsku obradu radnog komada ili zavarenog spoja izrađuju se grijaća tijela različitih oblika. U svima je žica od vatrootpornog materijala koja se zagrijava i s koje se toplina prenosi na radni komad. Na žicu su navedeni izolacijski elementi, perle ili pločice od vatrootpornog materijala [15].

6. PROVEDBA TOPLINSKE OBRADJE

Pri izradi specifikacije toplinske obrade potrebno je definirati [20]:

- a) vrstu toplinske obrade (predgrijavanje, žarenje za redukciju zaostalih naprezanja itd.);
- b) metodu toplinske obrade (u peći, indukcijski, elektrootporno itd.);
- c) lokaciju i broj točki mjerenja temperature;
- d) potrebu za zaštitnim plinom;
- e) parametre toplinske obrade;
- f) opterećenje proizvoda i potporne strukture;
- g) vrstu hlađenja;
- h) identifikaciju proizvoda ili komponente;
- i) okolišne uvjete (zaštitu od vjetrova i kiše);
- j) veličinu zagrijane zone i izolirane zone.

Grijanje cijele zavarene komponente najbolji je način izvođenja toplinske obrade, ali zbog veličine komponente nije ga uvijek moguće provesti. U takvim slučajevima proizvodne norme dopuštaju zagrijavanje dijelova završene komponente u peći. Pri tome je potrebno napraviti određeni preklop preko prethodno žarenog dijela komponente. Širina preklopa mora iznositi 1500 mm ili biti jednaka duljini L prema jednadžbi [11]:

$$L = 5\sqrt{r_u e_s} \text{ [mm]} \quad (6.1)$$

gdje su

r_u [mm] - unutarnji polumjer komponente,

e_s [mm] - nominalna debljina zavora.

Između vrijednosti od 1500 mm i vrijednosti dobivene jednadžbom 6.1 uzima se veća [11]. Dio komponente koji se nalazi izvan peći potrebno je izolirati tako da udaljenost između točke maksimalne temperature zagrijavanja i točke na kojoj temperatura iznosi polovicu maksimalne vrijednosti bude veća od $2,5\sqrt{r_u e_s}$ [19].

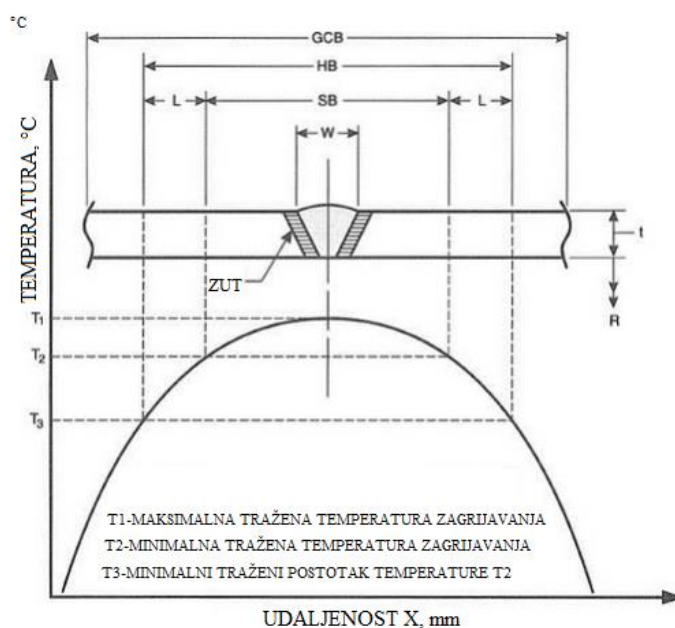
Prilikom provođenja toplinske obrade u peći potrebno je pratiti temperaturu na određenom broju točaka prema tablicama 6 i 7. Ako metoda mjerenja to zahtijeva, potrebno je izolirati termoparove od direktnog zagrijavanja.

Tablica 6 minimalan broj točaka mjerenja temperature u atmosferi peći [20].

Volumen peći m^3	Broj točaka mjerenja
$V < 40$	2
$40 \leq V < 60$	3
$60 \leq V < 80$	4
$80 < V < 100$	5

Ako je peć podijeljena u grijaće sekcije preporučuje se barem jedna točka mjerenja po sekciji. Točke mjerenja se mogu nalaziti i na radnom komadu. Termoparovi se moraju učvrstiti na način koji neće štetno djelovati na radni komad [20].

U slučaju lokalnog provođenja toplinske obrade može se razlikovati nekoliko područja kao što je prikazano na slici 18:



Slika 18 Temperaturna područja kod lokalnog zagrijavanja [21]

Pri tome je: W - najveća širina zavora;

SB - zona zagrijana na propisanu temperaturu žarenja;

HB - zona zagrijavanja;

OCB - zona kontrole temperaturnog gradijenta;

t [mm] - nominalna debljina;

r [mm] - vanjski promjer cijevi ili spremnika.

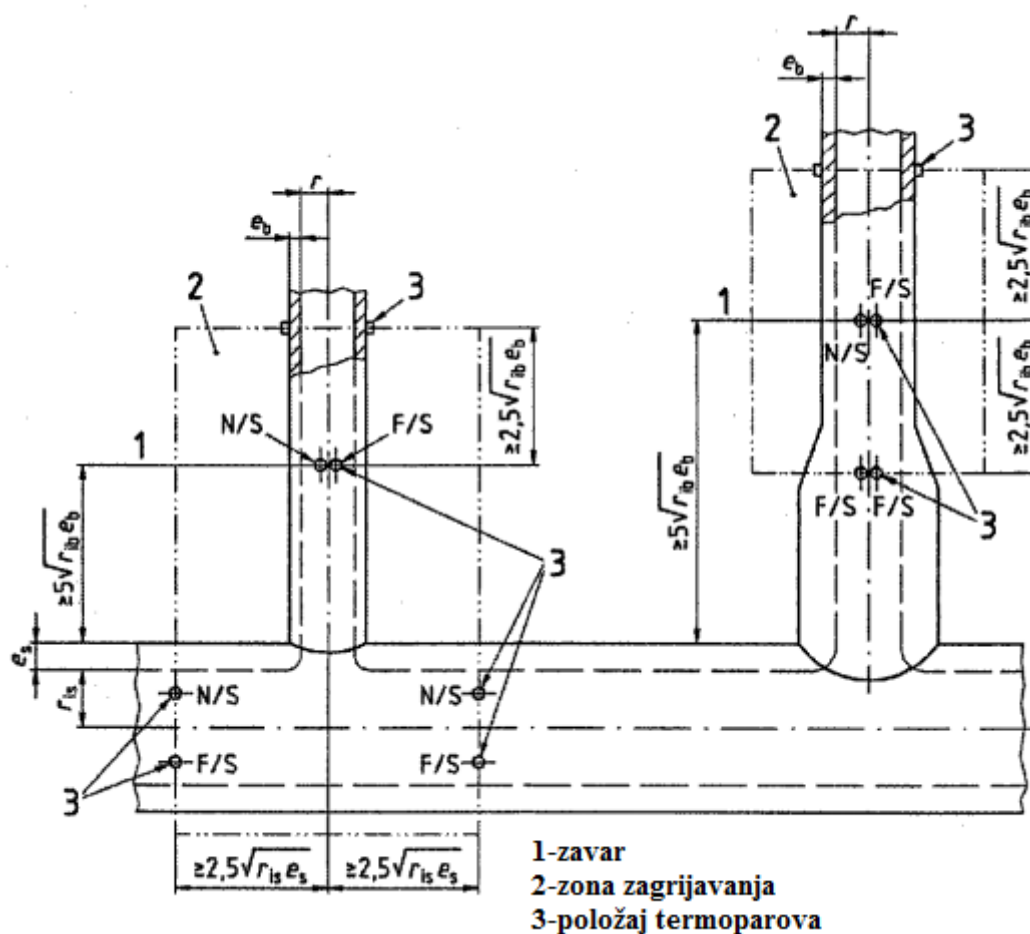
Zona zagrijana na propisanu temperaturu žarenja sastoji se od metala zavara, ZUT-a te dijela osnovnog materijala. Na tom području potrebno je održavati propisanu temperaturu žarenja u traženom vremenskom intervalu. Zona zagrijavanja dio je koji je prekriven grijaćim elementima. Obično se zahtjeva da temperatura na rubovima ovog područja iznosi barem polovicu vrijednosti propisane temperature žarenja. Norma BS EN 13445 propisuje samo širinu zone zagrijavanja a ona mora iznositi najmanje $2,5\sqrt{r_u e_s}$ mjereno od osi zavara.

Zona kontrole temperaturnog gradijenta je zona koja je prekrivena izolacijskim materijalom, kako bi se osigurali prihvatljivi aksijalni temperaturni gradijenti. Norma EN 12952-5 propisuje da kod žarenja na temperaturama iznad 500 °C razlika temperature na duljini od 4500 mm ne smije iznositi više od 150°C. Kod žarenja na temperaturama iznad 500 °C ta razlika ne smije iznositi više od 100 °C. Norma BS EN 13445 preporučuje da širina izolacije iznosi najmanje $10\sqrt{r_u e_s}$ sa zavarom smještenim u sredini.

Kontrola i bilježenje temperature može se vršiti pomoću termoparova. Termoparove je potrebno smjestiti na os zavara te na rubove područja zagrijavanja a njihov smještaj potrebno je naznačiti na crtežu. Tablica 7 prikazuje razmještaj i broj točaka mjerenja kod žarenja cijevi. Idealno bi bilo postaviti termoparove i sa suprotne strane grijača kako bi se osiguralo da je postignuta potrebna temperatura žarenja kroz cijelu debljinu materijala. Kod žarenja cijevi to je rijetko moguće ostvariti.

Tablica 7 Minimalan broj točaka mjerenja temperature kod lokalnog zagrijavanja cilindričnih dijelova [20]

Vanjski promjer cijevi, D , mm	Broj točaka mjerenja	Kut, °
$D < 170$	1	-
$170 \leq D < 370$	2	180
$370 \leq D < 550$	3	120
$D \geq 550$	4	90



Slika 19. Minimalna širina zone zagrijavanja [11]

Slika 19 Prikazuje minimalnu širinu zone zagrijavanja te položaj termoparova. Može se vidjeti različite načine zagrijavanja u ovisnosti o udaljenosti zavara 1 od stjenke spremnika. Ukoliko je udaljenost od spremnika do zavara veća od $5\sqrt{re}$ provodi se samostalno žarenje zavara kao što je prikazano na desnoj strani slike. Ukoliko je udaljenost manja od $5\sqrt{re}$ zona zagrijavanja obuhvaća zavar 1 te zavar koji spaja cijev i spremnik kako je prikazano na desnoj strani slike.

7. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada bilo je potrebno prema zadanom zavarenom spoju odrediti način toplinske obrade obzirom na debljinu i vrstu osnovnog materijala, izraditi upute za provedbu toplinske obrade sa svim potrebnim parametrima te donijeti zaključke o prikladnosti provedene toplinske obrade. Eksperimentalni dio rada proveden je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, u Laboratoriju za zavarene konstrukcije.

Eksperimentalni rad proveden je na navarenim spojevima od SA 516 Gr 60 osnovnog materijala na kojemu su navareni slojevi nehrđajućeg čelika. Na jednom spoju navarena su dva sloja martenzitnog AISI 410 čelika, a na drugom prvo je navaren sloj austenitnog Cr-Ni AISI 309 čelika, a zatim sloj AISI 410 čelika. Navedeni uzorci nisu zadovoljili zahtjeve sukladno normi HRN EN ISO 15614-7 prilikom izvođenja bočnog savijanja jer je došlo do pucanja martenzitnog sloja pri kutevima savijanja manjima od 120°. Rezultati ispitivanja pokazali su da je potrebno provesti naknadnu toplinsku obradu. Nakon provedene toplinske obrade izvršeno je ispitivanje na bočno savijanje, geometrijska analiza makroizbrusaka te mjerenje tvrdoće.

7.1 OPIS MATERIJALA NAVARENIH SPOJEVA ZA ISPITIVANJE

7.1.1 AISI 410

Čelik AISI 410 spada u skupinu martenzitnih nehrđajućih čelika koji se temeljne na Fe-Cr-C ternarnom sustavu. Ti čelici prolaze alotropsku modifikaciju iz austenita u martenzit kod većine termomehaničkih obrada, osim kod vrlo sporog hlađenja u pećima. Normalne brzine hlađenja nakon zavarivanja su dovoljne da se u metalu zavora i u ZUT-u dobije dominantno martenzitna mikrostruktura [22].

Kod martenzitnih nehrđajućih čelika moguće je postići široke raspone čvrstoće. Granica tečenja varira od 275 N/mm² u odžarenom stanju pa do 1900 N/mm² u poboljšanom stanju. Da bi se postigla zadovoljavajuća žilavost i duktilnost za većinu primjena potrebno je provesti popuštanje zakaljenog čelika [22].

Korozijska otpornost martenzitnih čelika je slabija nego kod ostalih vrsta zbog relativno niskog sadržaja kroma (12 - 14%) i nešto višeg sadržaja ugljika. Ovi čelici se koriste kad se traži visoka čvrstoća pri povišenim temperaturama uz korozijsku postojanost [22].

Zbog prisutnosti nepopuštenog martenzita nakon zavarivanja ovi čelici su podložni hladnim pukotinama pa se preporučuje primjene predgrijavanja te žarenja nakon zavarivanja. Nepopušteni martnezit ima nisku žilavost i duktilnost pa je stoga sklon krhkom lomu. Povećanje otpornosti krhkom lomu moguće je ostvariti provođenjem toplinske obrade nakon zavarivanja kojom će doći do popuštanja martenzita. te smanjenja zaostalih napreznja. Popuštanjem martenzita dolazi do transformacije martenzita u ferit i do nastajanja sitnih karbida. Povećanje žilavosti i duktilnosti prati i određeni pad čvrstoće i tvrdoće. Utjecaj naknadne toplinske obrade na svojstva AISI 410 čelika sastava 0,08 % C, 0,8 % Mn, 0,4 % Si i 12,5 % Cr može se vidjeti u tablici 8 [22]:

Tablica 8 Utjecaj naknadne toplinske obrade na mehanička svojstva martenzitnog nehrđajućeg čelika [22]

	Tvrdoća HRC	Vlačna čvrstoća, MPa	Granica tečenja, MPa	Istezljivost, %
Nakon zavarivanja	26	-	-	-
2 h na 425 °C	25	1100	890	3
2 h na 480 °C	25	1130	835	6
2 h na 535 °C	21	815	670	16
2 h na 600 °C	13	765	650	17
2 h na 650 °C	10	720	595	20

Toplinska obrada nakon zavarivanja se obično provodi pri temperaturama između 480 i 750 °C, pri čemu držanje na temperaturi žarenja ovisi o debljini radnih komada, a najčešće je do 2 sata dovoljno.

Kemijski sastav dodatnog materijala je 0,06 % C, 0,7 % Si, 0,6 % Mn i 13,6 % Cr. Granica tečenja iznosi najmanje 450 N/mm², vlačna čvrstoća najmanje N/mm² MPa, a istezljivost najmanje 15 % [23].

7.1.2 AISI 309

Čelik AISI 309 spada u austenitne nehrđajuće čelike. Austenitni nehrđajući čelici predstavljaju najveću grupu nehrđajućih čelika. Ovi čelici nisu zakaljivi, imaju dobru žilavost i istezljivost te kao takvi nisu skloni vodikovim pukotinama niti krhkom lomu. Odlikuje ih i dobra korozijska postojanost u većini uvjeta.

Toplinska obrada nakon zavarivanja najčešće nije potrebna, a primjenjuje se uglavnom kod velikih debljina sa svrhom eliminacije zaostalih naprezanja.

U uzorcima 2 navaren je prijelazni sloj od austenitnog čelika AISI 309 čelika kako bi se spriječilo pucanje martenzitnog sloja. Ovaj čelik posjeduje visoku plastičnost te na sebe može preuzeti tlačna i vlačna naprezanja koja nastaju navarivanjem martenzitnog čelika. Granica razvlačenja navarenog čelika iznosi 420 N/mm^2 , vlačna čvrstoća 570 N/mm^2 , a istezljivost 32 % što je duplo više nego kod martenzitnog navarenog materijala [23].

7.1.3 SA-516 Gr 60

Za osnovni materijal korištene su ploče od SA-516 Gr 60. Ovaj čelik spada u opće konstrukcijske čelike, podskupinu nelegiranih kotlovskih limova za rad pri povišenim temperaturama ($180\text{-}450^\circ\text{C}$). Dakle, mora izdržati posljedice tlaka pri povišenoj temperaturi. Čelik SA-516, ovisno od šarže do šarže, ima udio ugljika od 0,15-0,16 %, 0,18-0,21 % silicija, mangana 0,87-0,90 %, fosfora 0,009-0,012 %, sumpora 0,002-0,008 %, dušika 0,004%, aluminijska 0,029-0,040 %, bakra 0,04-0,09 %, kroma 0,04-0,06%, nikla 0,04-0,05 %, molibdena 0,004-0,01 %, niobija 0,001-0,002 %, titana 0,002-0,003 % te 0,002-0,01% vanadija. Postotak ugljika iznosi manje od 0,2 % radi potrebne zavarljivosti, a aluminijska mora biti više od 0,02% radi dezoksidacije taljevine. Granica razvlačenja kreće se u rasponu od 308 do 331 N/mm^2 , vlačna čvrstoća u rasponu od 436 do 466 N/mm^2 , a istezljivost u rasponu od 46 do 51 %. Udarne radnje loma na temperaturi -51°C kreće se u rasponu od 10 do 22 J [23].

7.2 TOPLINSKA OBRADA

Navareni uzorci bez toplinske obrade nisu zadovoljili zahtjeve norme HRN EN ISO 15614-7 u pogledu ispitivanja na bočno savijanje pa se iz tog razloga provodi toplinska obrada. Provela se toplinska obrada žarenja za redukciju zaostalih naprezanja od koje se očekuje da smanji zaostala naprezanja, popusti martenzit u navaru te na taj način poveća žilavost i otpornost na nastanak pukotina.

Kako se uzorci sastoje od tri različita materijala potrebno je odrediti parametre toplinske obrade za svakoga od njih. Parametri toplinske obrade određeni su sukladno normi ASME (American Society of Mechanical Engineers) Sec.VIII. Osnovni materijal uzoraka spada u grupu nelegiranih ugljičnih čelika za koje norma propisuje temperaturu žarenja od 650 °C. Za metal navara od martenzitnih nehrđajućih čelika tražena temperatura žarenja iznosi 675 °C, a za austenitne nehrđajuće čelike toplinska obrada niti je potrebna niti je zabranjena. Prema normi u slučaju zavarenih spojeva različitih materijala odabire se viša od dvije tražene temperature žarenja. Unatoč tome odabrana je temperatura žarenja od 650 °C kako bi se smanjila vjerojatnost razugljčavanja osnovnog materijala. Ostali parametri žarenja isti su za obje skupine čelika. Vrijeme žarenja ovisi o debljini spoja, traži se 1h/25 mm debljine.

Prema normi ASME Sec.VIII. odabrani su sljedeći parametri žarenja:

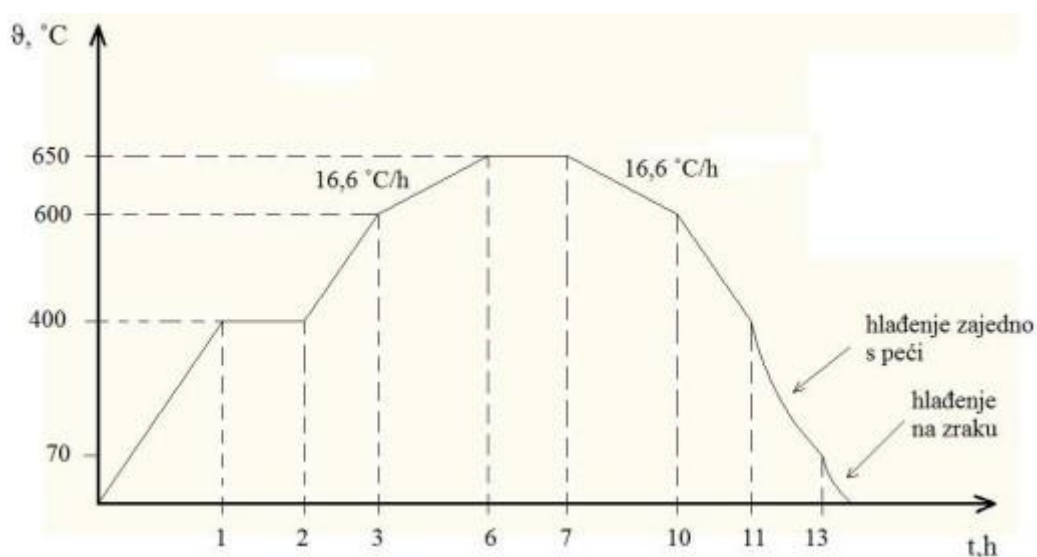
- temperatura žarenja: 650 °C
- trajanje držanja na temperaturi žarenja: 1h
- brzina zagrijavanja: $\leq 10,5$ °C/h
- brzina hlađenja: ≤ 13 °C/h.

Žarenje je provedeno u Laboratoriju za toplinsku obradu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, u komornoj peći prikazanoj na slici 20.



Slika 20 Komorna peč za žarenje [23].

Žarenje je provedeno u aktivnoj zaštitnoj atmosferi s granulatom za pougljičavanje HEFF KG6. Granulat postaje aktivan tek iznad 800°C , a upotrebljavao se jer sprječava dovoz zraka te usporava grijanje/hlađenje. Prema parametrima iz ASME-a žarenje bi trajalo preko 30 sati pa su brzine zagrijavanja i hlađenja povećane da se postupak ubrza [23].



Slika 21 Dijagram prikaza tijeka toplinske obrade [23].

7.3 IZRADA UZORAKA ZA ISPITIVANJE

Iz toplinski obrađenih navarenih spojeva prikazanih na slikama 22 i 23 izrezane su po četiri epruvete za ispitivanje na bočno savijanje te po jedan makroizbrusak.



Slika 22 Ploča navarena AISI 410 materijalom



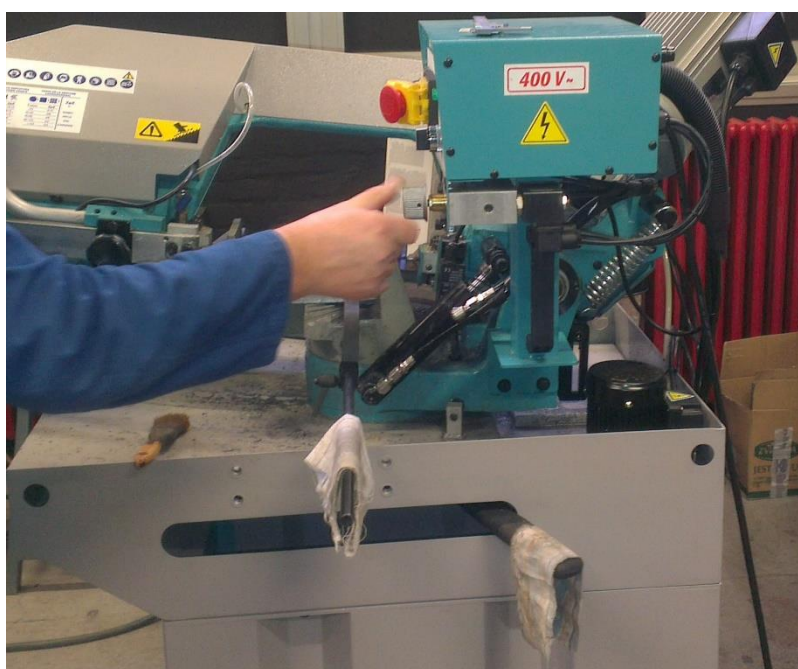
Slika 23 Ploča navarena materijalima AISI 309 i AISI 410

Izrađeni uzorci su označeni kako je naznačeno u tablici:

Tablica 9 Oznake uzoraka za ispitivanje

MATERIJAL NAVARA	2X AISI 410	AISI 309+AISI 410
EPRUVETE ZA BOČNO SAVIJANJE	1-1	2-1
	1-2	2-2
	1-3	2-3
	1-4	2-4
MAKROIZBRUSCI	1	2

Epruvete za bočno savijanje i makroizbrusci izrezani su na tračnoj pili.



Slika 24 Izrezivanje uzoraka na tračnoj pili

Izrezane epruvete za ispitivanje na bočno savijanje mogu se vidjeti na slikama 25 i 26:



Slika 25 Epruvete izrezane iz ploča navarenih AISI 410 materijalom



Slika 26 Epruvete izrezane iz ploča navarenih AISI 410 materijalom

Izrezani makroizbrusci prvo su grubo izbrušeni na rotirajućoj ploči. Nakon toga provedeno je brušenje na staklenoj podlozi s brusnim papirom finoće P150, P320 i P500. Sljedeći korak bio je strojno poliranje makrouzoraka gradijentnim nizom brusnih papira sve do P4000. Nagrizanje osnovnog materijala provdno je u 3% otopini NITAL, a za nagrizanje navara provedeno je elektrokemijsko nagrizanje u 10% oksalnoj kiselini u trajanju od 5 minuta, pri naponu 14 V i struji 1 A.

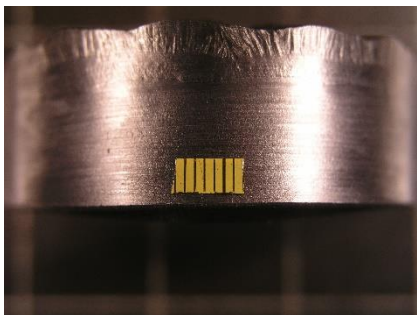



7.4 TEST NA BOČNO SAVIJANJE

Prema normi HRN EN ISO 15614-7 proveden je test na bočno savijanje na osam uzoraka, po četiri izrađenih iz zavarenog spoja s marteniztnm navarom, te po četiri iz spojeva s navarima austenitnog i martenzitnog čelika. Uzorci su savijeni na kut od 180°. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablicama 10 i 11.

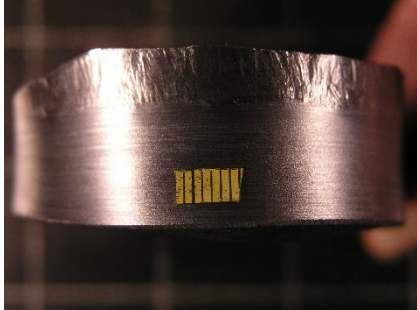

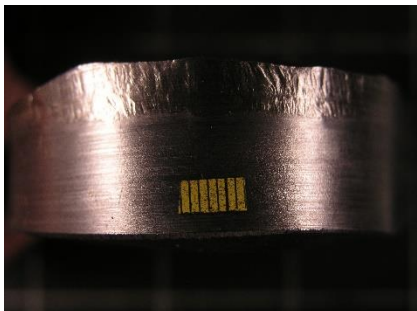
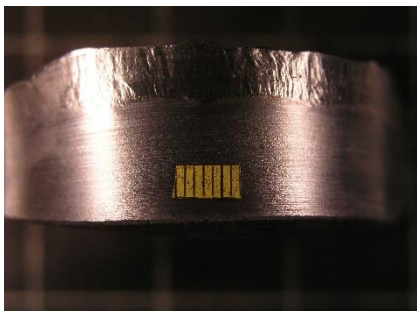


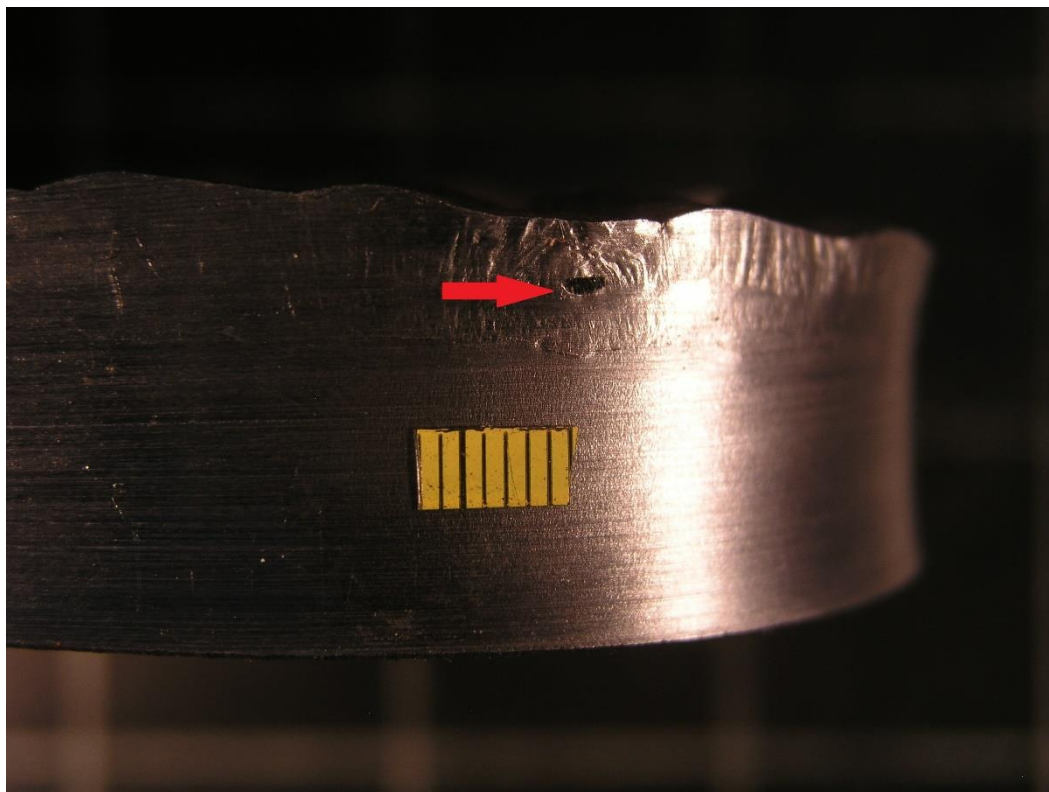
Slika 27 Provođenje ispitivanja na bočno savijanje

Tablica 10 Rezultati ispitivanja na bočno savijanje AISI 410+AISI 410

OZNAKA UZORKA	SLIKA	KOMENTAR
1-1		Uzorak je zadovoljio ispitivanje na bočno savijanje. Pukotine na uzorku nisu uočene.
1-2		Uzorak je zadovoljio ispitivanje na bočno savijanje. Pukotine na uzorku nisu uočene.
1-3		Na ovom uzorku uočena je pukotina duljine 1,5 mm na martenzitnom navaru koja se bolje može vidjeti na slici 28. Uzorak je zadovoljio jer je pukotina nastala na kutu većem od 120°
1-4		Uzorak je zadovoljio ispitivanje na bočno savijanje. Pukotine na uzorku nisu uočene.

Tablica 11 Rezultati ispitivanja na bočno savijanje AISI 309+AISI 410

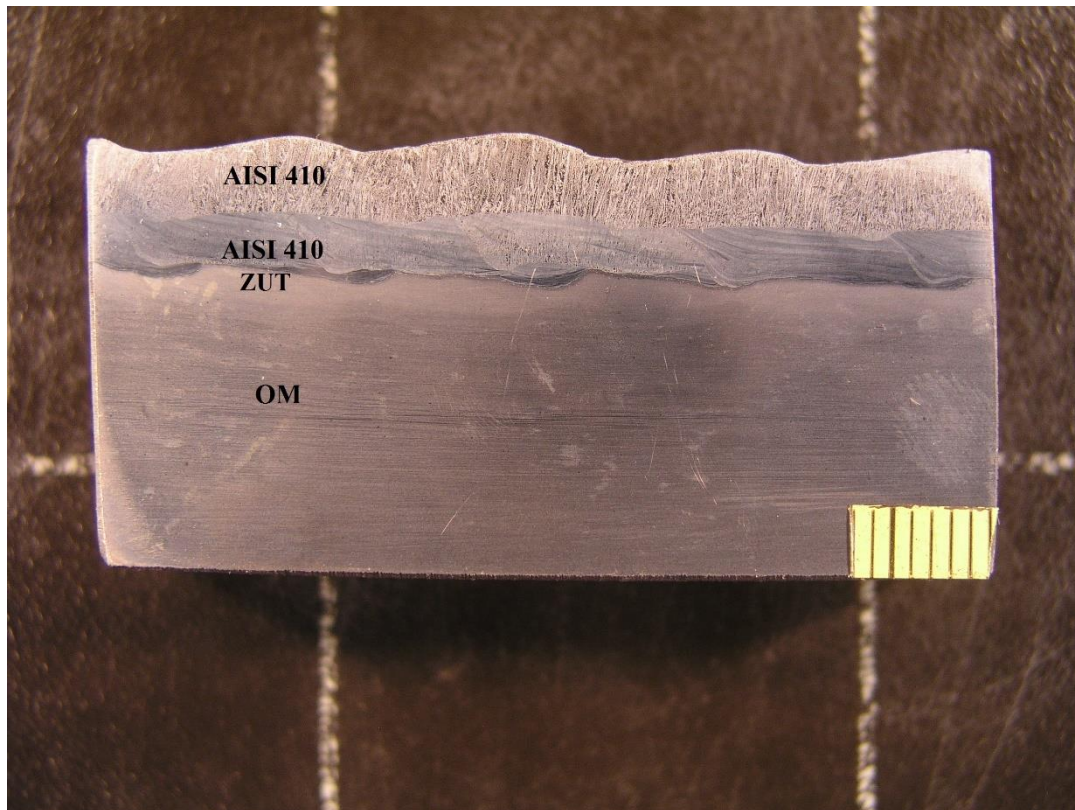
OZNAKA UZORKA	SLIKA	KOMENTAR
2-1		Uzorak je zadovoljio ispitivanje na bočno savijanje. Pukotine na uzorku nisu uočene.
2-2		Uzorak je zadovoljio ispitivanje na bočno savijanje. Pukotine na uzorku nisu uočene.
2-3		Uzorak je zadovoljio ispitivanje na bočno savijanje. Pukotine na uzorku nisu uočene
2-4		Uzorak je zadovoljio ispitivanje na bočno savijanje. Pukotine na uzorku nisu uočene.



Slika 28 Pukotina na uzroku 1-3

7.5 GEOMETRIJSKA ANALIZA MAKROIZBRUSAKA

Geometrijska analiza makroizbrusaka izvršena je u računalnom programu ImageJ.

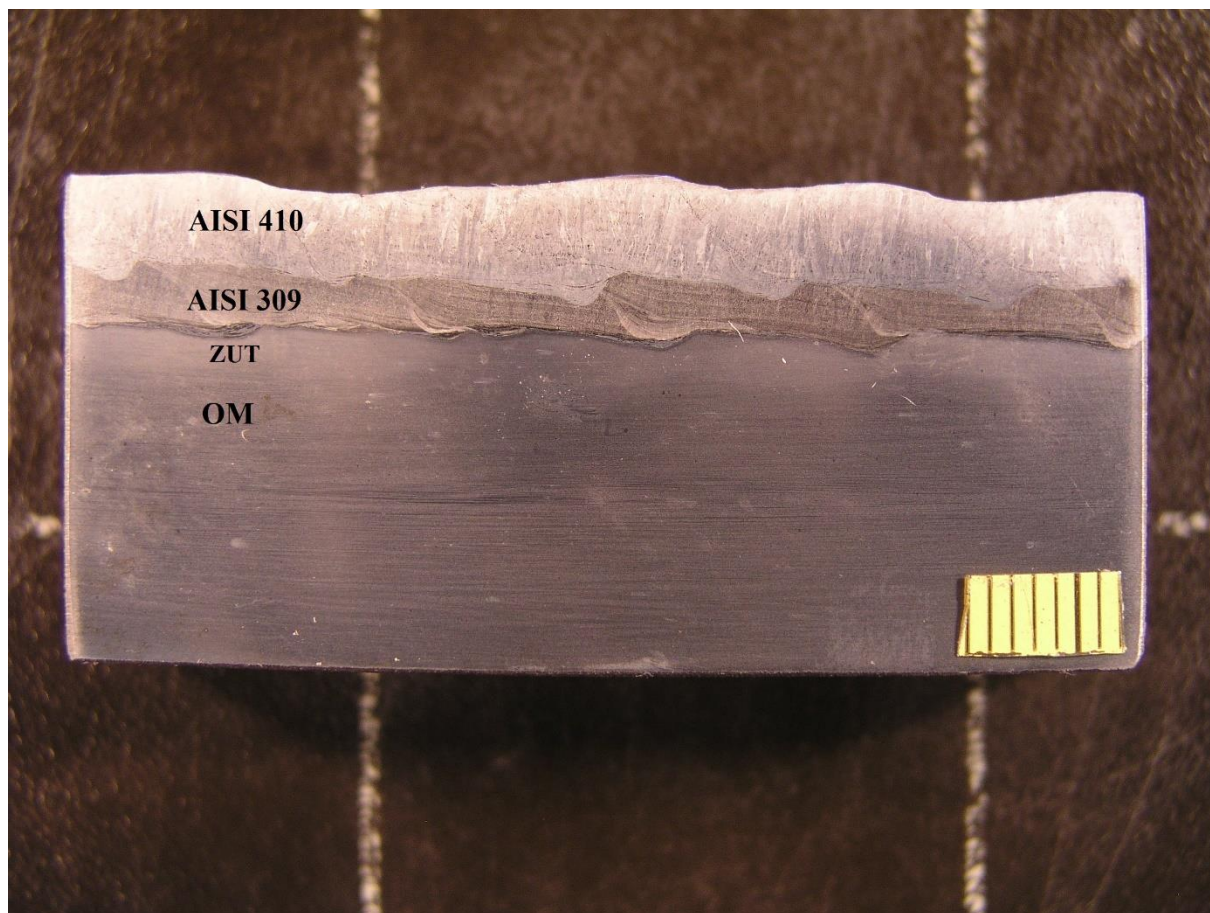


Slika 29 Makroizbrusak 1

Kod makroizbruska 1 izmjerene su sljedeće veličine:

- maksimalno nadvišenje dvaju slojeva $h_{\max} = 7,63$ mm
- minimalno nadvišenje dvaju sojeva $h_{\min} = 5,83$ mm
- maksimalna penetracija $p_{\max} = 0,88$ mm
- minimalna penetracija $p_{\min} = 0,51$ mm
- širina ZUT-a: 1-2 mm

Na slici se može jasno uočiti razlika između prvog i drugog navara te ZUT u osnovnom materijalu. Vidi je penetracija a time i stupanj miješanja osnovnog i dodatnog materijala vrlo mali.



Slika 30 Makroizbrusak 2

Kod makroizbruska 1 izmjerene su sljedeće veličine:

- maksimalno nadvišenje dvaju slojeva $h_{\max} = 7,61$ mm
- minimalno nadvišenje dvaju sojeva $h_{\min} = 5,97$ mm
- maksimalna penetracija $p_{\max} = 1,26$ mm
- minimalna penetracija $p_{\min} = 0,63$ mm
- širina ZUT-a: 1-2 mm

Na slici 30 jasno se vidi razlika u izgledu prvog i drugog navara zbog primjene različitih vrsta dodatnih materijala. Može se uočiti i ZUT u osnovnom materijalu koji je nešto svjetlije boje. Vidi se da je penetracija a time i stupanj miješanja osnovnog i dodatnih materijala vro mali.

7.6 MJERENJE TVRDOĆE

Tvrdoća je mjerena Vickers metodom (HV10) sa silom utiskivanja od 98,04 N. Provedena su po tri mjerenja na svakom navaru, ZUT-u i osnovnom materijalu, ukupno dvanaest mjerenja po makroizbrusku. Rezultati mjerenja s izračunatim prosječnim tvrdoćama prikazani su u tablici 12:

Tablica 12 Rezultati mjerenja tvrdoće

	Tvrdoća (HV 10)			
Makroizbrusak 1	Osnovni materijal	ZUT	Navar 1 (AISI 410)	Navar 2 (AISI 410)
	138,7	155,5	268,6	234,3
Makroizbrusak 2	Osnovni materijal	ZUT	Navar 1 (AISI 309)	Navar 2 (AISI 410)
	139,4	158,3	181,3	312,3

Kod makroizbruska 1 može se uočiti lagani porast tvrdoće u ZUT-u, a najveća tvrdoća izmjerena je u prvom navaru martenzitnog čelika. U drugom navaru izmjerene su nešto niže vrijednosti.

Kod makroizbruska 2 također dolazi do laganog porasta tvrdoće u ZUT-u. Najveća tvrdoća izmjerena je u navaru 2 što je i logično zbog veće tvrdoće martenzitnog čelika u odnosu na austenitni.

Kada se ovi rezultati mjerenja tvrdoće usporede s rezultatima izmjerenima na uzorcima bez toplinske obrade u radu [23] može se uočiti mali pad tvrdoće nakon toplinske obrade u osnovnom materijalu i ZUT-u. Tvrdoća u navaru austenitnog čelika ostala je vrlo slična i nakon toplinske obrade, a najveći pad tvrdoće uočen je u navarima martenzitnog čelika. Toplinskom obradom došlo je do popuštanja martenzita te posljedično i do većeg pada tvrdoće.

8. ZAKLJUČAK

Često se događa da zavareni spojevi ne mogu zadovoljiti konstrukcijske zahtjeve koji se uglavnom temelje na svojstvima osnovnog materijala. Kako bi se poboljšala zavarljivost materijala te osigurao integritet zavarenih spojeva provodi se toplinska obrada prije i nakon zavarivanja. Toplinskom obradom smanjuje se sklonost nastanka pukotina i u nekim slučajevima povećava se korozijska postojanost. Parametri i potreba za toplinskom obradom slično su definirani među različitim proizvodnim normama ali postoje i određene razlike. Iz toga se može zaključiti da je potrebno provesti još istraživanja u pogledu toplinske obrade kako bi se jasno mogli definirati zahtjevi za njeno izvođenje. Primjena toplinske obrade poskupljuje proizvodnju zavarenih konstrukcija zbog potrebe za opremom za njeno provođenje i zbog dodatnog utroška energije. Također dolazi i do produljenja vremena izrade, a u slučaju nestručnog provođenja može doći do pogoršanja svojstva zavarenih spojeva ili do deformacija i pucanja konstrukcije tijekom provođenja. Prema tome izvođenju toplinske obrade zavarenih spojeva potrebno je pristupiti stručno i odgovorno kako bi se ostvarila tražena svojstva.

U eksperimentalnom dijelu rada za zadane navarene spojeve određena je toplinska obrada žarenja za redukciju zaostalih naprezanja te su propisani potrebni parametri. Na toplinski obrađenim uzorcima izvedeno je ispitivanje na bočno savijanje i mjerenje tvrdoće. Niti kod jednog ispitnog uzorka nisu uočene pukotine kod savijanja pri kutu od 120° kod kojih je prethodno dolazilo do pucanja u krhkom martenzitnom navaru. Zaključuje se da je provedena toplinska obrada uzrokovala smanjenje zaostalih naprezanja i povećanje žilavosti. Time su zadovoljeni zahtjevi za kvalitetu sukladno normi HRN EN ISO 15614-7. Rezultati mjerenja tvrdoće pokazali su da provedena toplinska obrada nije bitno utjecala na tvrdoću osnovnog materijala a prema očekivanjima došlo je do određenog pada tvrdoće martenzitnog navara. Zaključuje se da je provedena prikladna toplinska obrada koja je poboljšala svojstva navarenog spoja.

LITERATURA

- [1]: <http://mercury.kau.ac.kr/welding/Welding%20Technology%20II%20%20Welding%20Metallurgy/Chapter%208%20%20Technical%20Heat%20Treatment.pdf>
04.01.2014.
- [2] Kolednjak, D.: Utjecaj parametara zavarivanja na strukturu i svojstva čelika API 5L X80, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2014.
- [3] Tomić, T.: Utjecaj sadržaja vodika na zavarljivost čelika API 5L X80, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2012.
- [4]: <https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/greske.pdf> 11.01.2015
- [5] Hrivnjak, I.: Zavarljivost čelika, Iro „Građevinska knjiga“, Beograd, 1982.
- [6] Linnert, E.; G.: Welding metalurgy, vol 2., Third edition, American Welding Society, New York
- [7]: <https://www.aisc.org/bookstore/itemRedirector.aspx?id=14870> 13.01.2015.
- [8] Sterjovki, Z.: Investigation of postweld heat treatment of quenched and tempered pressure vessel steels, Thesis collection, University of Wollongong, 2003.
- [9] Šisl, V.; Kovačević, B.: Toplinska obrada u zavarivanju (prvi dio), Zavarivanje 45 (5/6), 2002.
- [10] Abson, D.J.; Thach, Y.; Hadley, I.; Wright, V.S.; Burdekin F.M.: Post weld heat treatment code exemptions, Welding Journal, vol. 85, no.3, 2006.
- [11]: Norma EN ISO 12952-5
- [12]: Norma EN ISO 13445-4
- [13]: http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/tii/to_obr.html 10.01.2015.
- [14]: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/heat-treatment-of-welded-joints-part-4-117> 11.01.2015.
- [15] Šisl, V.; Kovačević, B.: Toplinska obrada u zavarivanju (drugi dio); Zavarivanje 45 (3/4), 2002
- [16] Jug, B.: Toplinska obrada metala električnom indukcijom, Zavarivanje 15 (4/5), 1976.

- [17]: <http://www.indiamart.com/raysonic/heat-treatment-service.html> 13.01.2015.
- [18]: <http://wiki.iploca.com/display/rtswiki/9.7+Field+construction+equipment>
13.01.2015.
- [19]: <http://www.rapidheatsystems.com/a/RHS%20Brochure%202013.pdf> 13.01.2015.
- [20]: Norma BS EN ISO 17663
- [21]: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/heat-treatment-of-welded-joints-part-3-116/> 13.01.2015.
- [22] Lippold, J. C.; Kotecki, D. J.: *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steel*, Wiley-interscience, SAD, 2005.
- [23] Komin, M.: *Navarivanje izmjenjivača topline visokolegiranim čelikom AISI 410*, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2014.
- [24]: HRN EN ISO 15614-7

PRILOZI

I. CD-R disc