



SPECIFIČNOSTI PRI ZAVARIVANJU I TOPLINSKOM TRETMANU ČELIKA P 91

SPECIFICS OF THE WELDING AND HEAT TREATMENT STEEL P 91

Tihomir MARSENIĆ¹⁾, Božo DESPOTOVIĆ¹⁾, Marko ZOVKO¹⁾

Ključne riječi: čelik s 9 % Cr, P91, zavarljivost, toplinski tretman

Key words: steel with 9 % Cr, P91, weldability, heat treatment

Sažetak: U radu se navode specifičnosti pri zavarivanju i toplinskom tretmanu čelika s 9 % Cr. Pojava kraterskih pukotina može se smatrati karakterističnom za ovaj proces. Dopunskim vježbama kvalificirani zavarivači trebaju ovladati posebnom tehnikom rada. Navodi se primjer zavarivanja i praćenja procesa izrade segmenta cijevnih sistema – "harfi", HRSG (high recovery steam generator) kotla u smislu sljedivosti.

Abstract: The paper presents the specifics of the welding and heat treatment of steel with 9 % Cr. The appearance of crater cracks can be considered as characteristic of this process. With additional exercises skilled welders have to learn the special techniques. Traceability and monitoring of welding process and production of segment of pipe system – "harp" of HRSG boiler are given.

¹⁾ ĐĐ TEP, Dr. Mile Budaka 1, Slavonski Brod, Hrvatska



1. OPĆENITO O HRSG KOTLOVIMA

ĐĐ TEP je u zadnjem kvartalu 2010. i prvom kvartalu 2011. godine proizveo dio HRSG (Heat recovery steam generator) kotla koji je dio CCTG (Combined cycle turbine gas and steam power plant – Kombinacija plinske i parne elektrane). CCTG će biti instalirana u Republici Austriji, mjesto Mellach. Kapacitet CCTG Mellach je 5000 GWh godišnje električne energije i 800 GWh energije koja će se koristiti za grijanje. CCTG će koristiti prirodni plin koji je najmanje štetan za okolinu. Koeficijent pretvorbe energije je 58,8 % što je najveći stupanj iskorištenja energije za takvu vrstu elektrana. Taj postotak ne uključuje energiju proizvedenu za grijanje, čiji je stupanj iskorištenja 72,9 %.

HRSG kotao koristi otpadne produkte izgaranja, tj. dimne plinove koji su prošli plinsku turbinu za zagrijavanje pare, koja se onda upotrebljava za proizvodnju električne energije i za grijanje.

HRSG se sastoji od 6 Modula. U ĐĐ TEP su proizvedeni 1, 2, 4 i dio 6 modula. Svaki modul sastojao se od tri pod modula – lijevi, desni i centralni. Modul 1 je interesantan jer je izrađen od martenzitnih X10CrMoVNb9-1 (P91) i bainitnih čelika koji su specifični s aspekta zavarljivosti i obradljivosti. Modul 1 (slika 1.1) se sastoji od 4 mini modula (IPRH1, HPSH2, IPRH2, HPSH3). Svaki mini modul ima lijevi, srednji i desni dio, tako da je ukupni broj dijelova 12.

2. PRIPREMA ZA IZRADU HRSG

Prije početka izrade ĐĐ TEP je poduzeo sljedeće aktivnosti:

- pripremio svu tehnološku dokumentaciju i radne instrukcije za izradu te iste uskladio sa zahtjevima kupca,
- kvalificirao 9 postupaka zavarivanja,
- definirao potrebe za toplinskom obradom, unajmio potrebnu opremu za toplinsku obradu, te provjerio istu,
- definirao radni prostor izrade,
- provjerio vještinu zavarivača na probnim uzorcima (skill test).

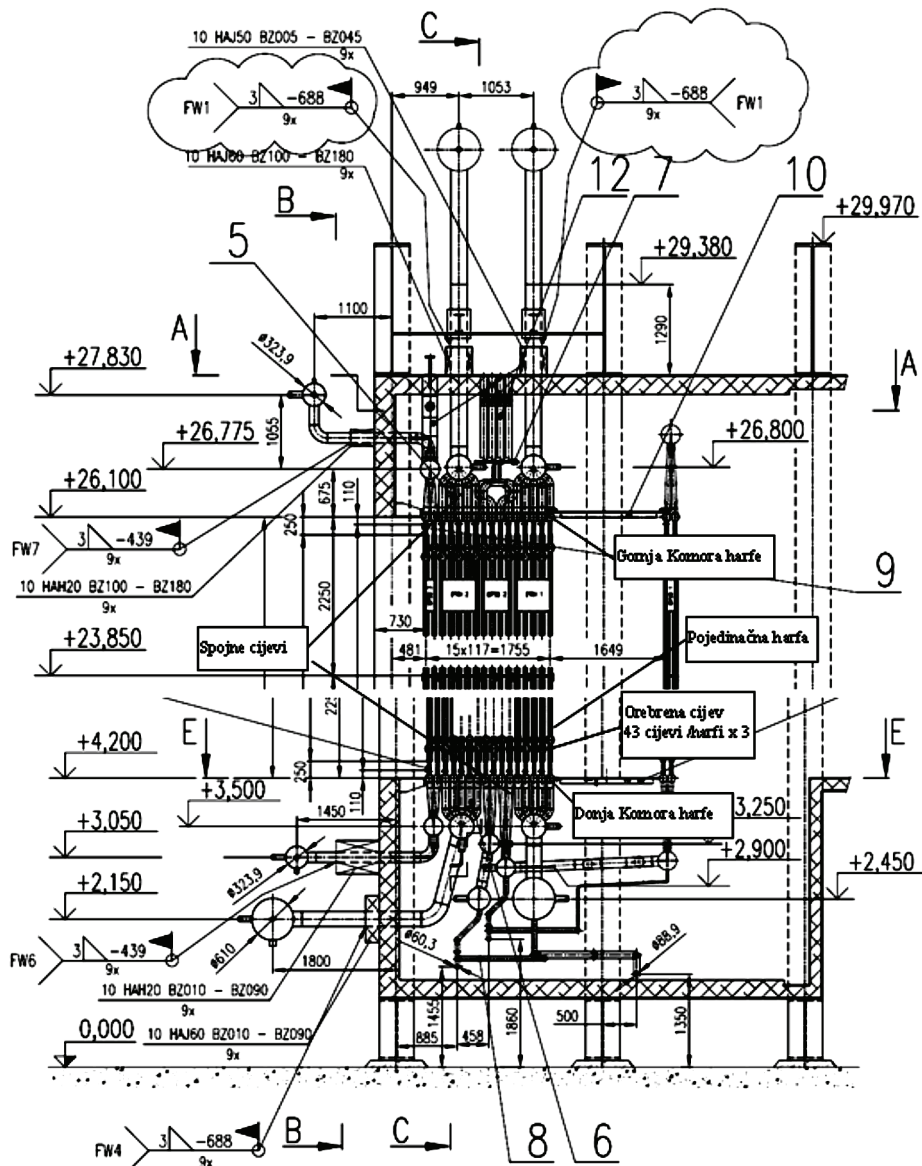
Proces pripreme trajao je 20 dana.

3. REDOSLIJED IZRADE HARFI OD P91 OSNOVNOG MATERIJALA

Osnovni materijal i dio strojno obrađenog osnovnog materijala isporučen je iz tvrtke Greens, Kina, tako da se redoslijed izrade harfi od X10CrMoVNb9-1 (P91) materijala sastojao od:

- ulazne kontrole isporučenih dijelova, neobrađenih osnovnih materijala, obrađenih i zavarenih dijelova,
- pregleda i kontrole obrađenih i zavarenih dijelova, te odbacivanja neprihvatljivih,
- strojne obrade ostalih dijelova prema crtežu,
- zavarivanja spojeva priključaka i nosivih limova odnosno zavješnja na komore,
- toplinske obrade za popuštanje napetosti nakon zavarivanja komora u peći,
- zavarivanja sučeljenih spojeva pripadajućih priključaka od komora sa orebrenim cijevima,
- 100 % RT (radiografsko ispitivanje), tehnološko ispitivanje sučeljenih spojeva,
- popravaka i RT popravljenih spojeva,
- lokalne toplinske obrade za popuštanje napetosti zavarenih sučeljenih spojeva priključci – orebrene cijevi,
- 10 % RT sučeljenih spojeva nakon toplinske obrade,

- zavarivanja danaca na komore,
- lokalne toplinske obrade za popuštanje napetosti nakon zavarivanja spojeva danca-komore,
- sučeljenog zavarivanja spojnih cijevi između komora,
- lokalne toplinske obrada zavara spojnih cijevi.



Slika 1.1: Sastavni dijelovi Modula 1, projekt Mellach

4. Predgrijavanje

a) Spojevi komora – priključci

Predgrijavanje komora prije zavarivanja priključaka izvodilo se na način da se unutar komore ($\varnothing 114,3$ mm) postave elektrootporna grijača tijela namotana na štap. Temperatura se kontrolira termoparovima na tri mjesta na komori (približno jednak razmak između termoparova, sredina i krajevi komore). Priključci su se predgrijavali u malim pećima. Ukoliko

je temperatura predgrijavanja nakon pripajanja pala ispod minimalne temperature predgrijavanja priključak se dogrijavao plinskim plamenom kako bi se temperatura podigla iznad minimalne propisane.

b) Sučeljeni spojevi priključci – cijevi harfe

Predgrijavanje sučeljenih spojeva na cijevima P91 (X10CrMoVNb9-1, promjera 38 mm izvedeno je elektrootpornom i induktivnom metodom, zavisno o raspoloživim kapacitetima. Temperatura predgrijavanja svakog spoja se kontrolirala termoparom. Elektrootporni grijači su se postavljali kao što je prikazano na slici 4.1, dok se induktivnom metodom predgrijavalo tek nekoliko spojeva odjednom zbog bržeg vremena zagrijavanja. Tada su se isti grijači prebacivali na druge cijevi.

c) Sučeljeni spojevi danca - komore

Sučeljeni spojevi danca s komorom predgrijavani su induktivnom metodom. Takvim načinom predgrijavanja temperatura se brzo i ravnomjerno postiže kroz cijelu debljinu stijenke, a grijači se mogu postaviti na takav način da ostaju postavljeni za vrijeme zavarivanja. Temperatura se regulirala automatski te nije postojala opasnost da se spoj ohladi ispod minimalne temperature predgrijavanja.



Slika 4.1: Predgrijavanje elektrootpornom metodom sučeljenih spojeva priključak – cijev harfi

d) Sučeljeni spojevi spojnih cijevi

Sučeljeni spojevi spojnih cijevi predgrijavani su induktivnom i elektrootpornom metodom. Prednost je imala induktivna metoda zbog kraćeg pripremnog vremena kao i zbog bržeg postizanja željene temperature. Ukoliko se radilo o predgrijavanju elektrootpornim grijačima to se izvodilo grijačima smještenim u kasetama koje su se koristile i za odžarivanje, slika 6.2.



Svaki spoj se kontrolirao termoparom te je proces vođen automatski u oba slučaja.

5. ZAVARIVANJE

5.1 Općenito o čeliku P91 [1]

P91 čelik ima martenzitnu mikrostrukturu i počeo se koristiti u proizvodnji kotlova 80ih godina prošlog stoljeća. Primjenjuje se za radne temperature od 550 do 650 °C. Odlikuje se većom vremenskom čvrstoćom u odnosu na materijale T22 i X20, tako da ima 60 % manju masu u odnosu na T22 (10CrMo9-10) za iste radne režime [1]. Također P91 ima i veću korozivnu postojanost od bainitnih čelika. Što se tiče otpornosti na toplinski zamor superiorniji je i od austenitnih čelika. Prijenos topline i koeficijent istezanja čelika P91 povoljniji su u odnosu na austenitne čelike, a koji su i skuplji.

Osnovni mehanizmi očvršćenja P91 čelika su:

- sama martenzina mikrostruktura, postiže se legiranjem Cr i Mo,
- precipitacijsko očvršćenje karbidima Cr_7C_3 , Mo_2C , V_4C_3 , NbC,
- očvršćenje dislokacijama, veća gustoća dislokacija u odnosu na bainitne čelike.

5.2 Zavarljivost čelika P91

Čelik P91 spada u teško zavarljive čelike. Međutim, danas se uspješno zavaruje uz poštovanje bitnih varijabli kao što su temperatura predgrijavanja i unos topline.

Kako je već rečeno operativna zavarljivost čelika P91 loša je zbog:

- sklonosti oksidaciji metala zavara, posebno korijenog zavara, a što uzrokuje loš oblik korijena zavara i greške vezivanja,
- pojave kraterskih pukotina,
- pojave hladnih pukotina zbog nedovoljnog predgrijavanja i neodgovarajućeg rukovanja dodatnim materijalom,
- narušavanja mehaničkih svojstava zavarenog spoja, posebno radnje loma, nastalih zbog odstupanja od zadanih vrijednosti unosa topline.

5.3 Specifičnosti zavarivanja čelika P91 u ĐĐ TEP-u

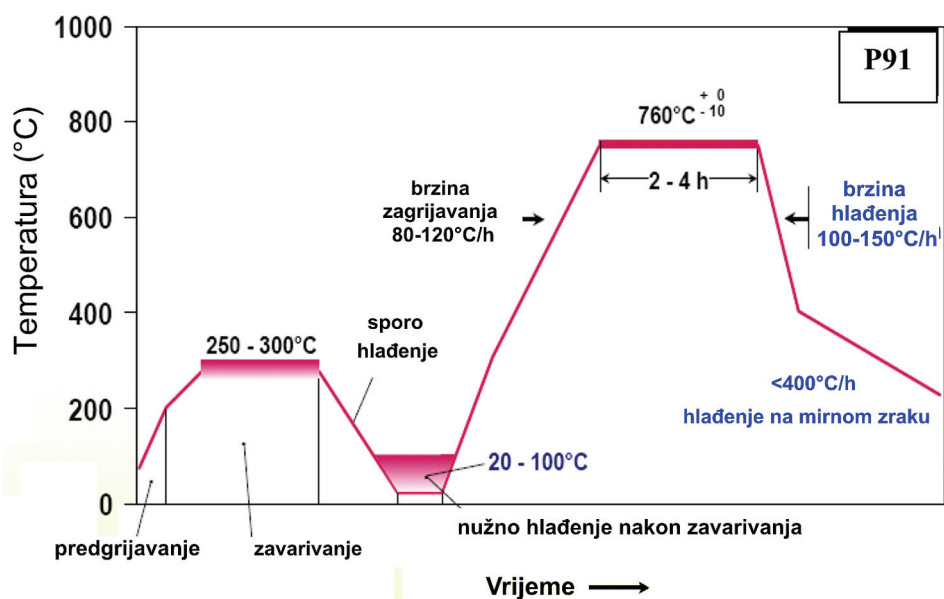
Kod izrade harfi od materijala P91, postojala su četiri tipična spoja koja su se zavarivala, a to su:

- spojevi priključci – komore, dimenzija:
 - priključci: $\varnothing 38 \times 7,1 / \varnothing 44,5 \times 3,6$ mm,
 - komore: $\varnothing 114,3 \times 12,5 / 14,2 / 17,5$ mm,
- sučeljeni spojevi između priključaka komora i orebrenih cijevi, dimenzija $\varnothing 38 \times 4$, $\varnothing 38 \times 5$, $\varnothing 44,5 \times 3,4$ mm,
- sučeljeni spojevi danaca sa komorama, dimenzija $\varnothing 114,3 \times 12,5 / 14,2 / 17,5$ mm,
- sučeljeni spojevi između spojnih cijevi komora $\varnothing 88,9 \times 8 / 10 / 12,5 / 14,2 / 17,5$ mm.

Zavarivanje gore navedenih spojeva se izvodilo TIG i kombinacijom TIG + REL procesa zavarivanja. Toplinski ciklus zavarivanja i PWHT izvodio se prema dijagramu prikazanom na slici 5.1. Zavarivanje je izvedeno prema točno definiranom redoslijedu tako da se zavarivao svaki četvrti spoj, kako bi se smanjile deformacije pojedinih komponenti, komora ili harfi.

Da bi se izbjegla oksidacija korijena zavara korišten je argon kao zaštitni korijeni plin koji se pomoću naprava za formiranje dovodio na mjesto zavarivanja korijenog prolaza. Brtveni

diskovi naprava za zaštitu korijena otporni su na temperature do 300 °C. Također, vrlo bitno je da se plin jednoliko raspršuje tokom zavarivanja, kako bi se osigurala ravnomjerna zaštita korijena zavara, posebno kod zavarivanja priključaka sa komorama gdje je korišten samo jedan brtveni disk. Protok zaštitnog plina kod zavarivanja korijenog zavara iznosio je od 6 do 12 l/min. Čistoća argona je 99,999 %. Na slici 5.2 može se vidjeti greška oksidacije korijena zavara, zbog nedovoljne zaštite korijena zavara. Slika 5.3 prikazuje grešku vezivanja u korijenu zavara i grešku oblika zavara priključak-komora, nastalih zbog neprimjerene tehnike rada zavarivača i nedovoljne zaštite korijena zavara. Greške su otkrivene tokom endoskopske kontrole.



Slika 5.1: Toplinski ciklus zavarivanja čelika P91 [2]



Slika 5.2: Oksidacija korijena zavara, spoj priključak-komora, materijal P91, projekt Mellach



Slika 5.3: Greška vezivanja u korijenu zavora, spoj priključak komora, materijal P91, projekt Mellach

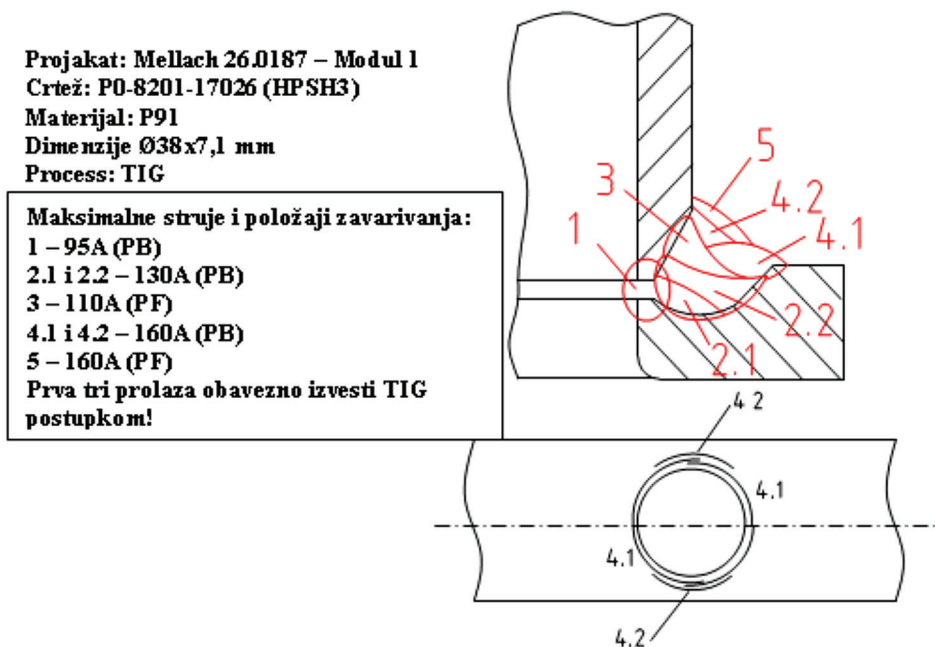
Kraterske pukotine pojavljuju se najčešće kod nepravilne tehnike rada zavarivača i neodgovarajućih parametara zavarivanja, slika 5.4. Da bi se izbjegle ovakve greške potrebno je osigurati da nema brzog i naglog gašenja luka, posebno kod zavarivanja korijenog zavora TIG postupkom. Također potrebno je zavarivati sa manjim jakostima struja, slika 5.5. Gašenje luka kod TIG procesa treba biti najmanje 7 sekundi, kako bi se izbjegla velika napreznja i mogućnost pojave pukotina u korijenom prolazu. Također kod REL zavarivanja moguća je pojava kraterskih pukotina koje je potrebno izbrusiti prije nastavljanja zavarivanja. One najviše ovise o kvaliteti dodatnog materijala, pravilnom rukovanju dodatnim materijalom, odnosno režimima sušenja i držanja dodatnog materijala, te tehnici rada zavarivača. Prilikom zavarivanja treba osigurati zaštitu korijena zavora bar 2 do 3 prolaza nakon zavarivanja korijena zavora i spriječiti propaljevanje korijenog prolaza što uzrokuje greške oblika zavora i moguće pojavljivanje pukotina na propaljenim mjestima u korijenu zavora.



Slika 5.4. Pukotine u završnom krateru korijena zavora, spoj priključak-komora, materijal P91, projekt Mellach

Vrijednosti radnje loma čelika P91 i zavarenog spoja prema EN 10216-2 trebaju biti minimalno 40 J. Da bi se te vrijednosti dostigle, bilo je potrebno osigurati sljedeće:

- zavarivanje u što tanjim prolazima, s maks. debljinom prolaza 2,5 mm, slika 5.5,
- pridržavanje temperature predgrijavanja i međuprolazne temperature, maks. 300 °C,
- kontrolirani unos topline, slijediti parametre iz WPS-a, I(A), U(V), v (cm/min.), širinu prolaza,
- brušenje nakon svakog sloja, posebno u prinudnim položajima, npr. 5G (PF) kako bi se uklonio višak depozita pojedinog sloja i na taj način omogućilo popuštanja istog od sljedećeg prolaza,
- što veću primjenu TIG procesa kako bi se postigla najveća radnja loma zbog toga jer se TIG procesom dobije najmanji sadržaja kisika u metalu zavara ≤ 100 ppm O₂
- provođenje toplinske obrade nakon zavarivanja u području 760+0/-10 °C od 2 do 4 sata ovisno o procesu zavarivanja i debljini zavarenog spoja.



Slika 5.5: Redosljed polaganja gusjenica sa definiranim parametrima zavarivanja, spoj priključak-komora

6. PWHT [3]

Visokolegirani martenzitni čelik P91 (X10CrMoVNb9-1) prema EN, kao i ASME, standardima nakon zavarivanja zahtjeva toplinsku obradu zbog popuštanja zaostalih naprezanja bez iznimke. Za materijal kvalitete 10CrMo9-10 postoje slučajevi kada se može odustati od toplinske obrade, ali većina spojeva istog materijala se odžarivala. Izbor temperature odžarivanja ovisi o osnovnom i dodatnom materijalu te o nominalnoj debljini zavara. Uobičajene temperature za P91 čelike su 760+0/-10 °C, slika 5.1, a za 10CrMo9-10 700±20 °C. Ukoliko se radi o kombinaciji navedenih materijala temperatura se kreće od 710÷760 °C ovisno o odabranom dodatnom materijalu.

Bitno je napomenuti da se čelik P91 nakon zavarivanja, a prije toplinske obrade, mora ohladiti na temperaturu ispod 100 °C i na toj temperaturi biti minimalno 2 sata, kako bi se osiguralo da se sva austenitna mikrostruktura pretvori u martenzitnu.

Sva oprema koje se koristi u procesu toplinske obrade podvrgava se redovitom umjeravanju kao npr. pisači temperature, peći i termoparovi.

a) komora nakon zavarivanja priključaka

Nakon zavarivanja priključaka na komoru ista se odžarivala u pećima za odžarivanje. Unutrašnje dimenzije peći su $10900 \times 2500 \times 2500$ mm u koju se postavljalo 6÷10 komora u pripremljena postolja. Peć se zagrijavala elektrootpornom metodom, a pokreću je dva 100 kW izvora. Termoparovi su se raspoređivali ovisno o broju komora, a na komori mora biti minimalno jedan termopar. Taj termopar se postavlja uz zavar najveće debljine.



Slika 6.1: Odžarivanje komora nakon zavarivanja priključaka u peći

b) sučeljeni spojevi priključci – cijevi harfe

Nakon odžarivanja spojeva priključaka i komore, komora odlazi na sačmarenje čime se ujedno priprema za zavarivanje spojeva priključka i orebrene cijevi harfe. Nakon zavarivanja iste je potrebno odžariti. Za sučeljene zavare konstruirana je posebna montažna mini peć koja je obuhvaćala 15 zavora. U njoj su postavljeni elektrootporni grijači, te su po tri takve peći postavljane na sučeljene zavare i na taj način su odžarivani. Također, moguće je odžarivanje s elektrootpornim grijačima kao na slici 4.1 uz dodatno postavljanje izolacije.

c) sučeljeni spojevi danca – komore

Sučeljeni spojevi između danca i komore odžarivani su isključivo elektrootpornom metodom te postavljanjem elektrootpornog grijača na zavar. Preko grijača se postavljala izolacija, a minimalna širina grijača i izolacije sa svake strane zavora određena je standardnom kod lokalnog odžarivanja.

d) sučeljeni spojevi spojnih cijevi

Sučeljeni spojevi spojnih cijevi odžarivani su isključivo kasetama u kojima se nalazi

keramički elektorooporni grijač s izolacijom. Na svaki zavareni spoj postavljena je jedna kasetna koju kontrolira jedan termopar po cijevi. Primjer takvog odžarivanja vidi se na slici 6.2.



Slika 6.2: Odžarivanje elektrotopnom metodom sučeljenih spojeva spojnih cijevi

7. SLJEDIVOST IZRADE I ZAPISI KVALITETE

Pri proizvodnji kotlovskih postrojenja izuzetno je bitno osigurati sljedivost. Sljedivost se može definirati kao alat za postizanje brojnih željenih ciljeva, a naglasak je na kvaliteti. Sljedivost je bitna zbog eventualne analize i pronalaženja rješenja u trenutku kada se pojavljuju greške, bile one u procesu, materijalu ili negdje dalje. Zavari kao jedan od najdelikatnijih dijelova kotlovskog postrojenja trebaju biti izvedeni pouzdano, a sljedivost kao alat povećava istu.

Neovisno o veličini kotlovskog postrojenja u ĐĐ TEP provodi se označavanje svih zavarenih spojeva. Svaki spoj u postrojenju može se identificirati jedinstvenom oznakom, a uz njega stoji oznaka žiga zavarivača, kako na proizvodu tako i u pratećoj tehnološkoj dokumentaciji ili zapisima kvalitete. U dokumentaciji, osim žiga zavarivača, jasno su vidljivi procesi koji su korišteni pri izradi zavarenog spoja, a posebna pozornost se posvećuje samom procesu zavarivanja te toplinskoj obradi. Takav način praćenja omogućuje detaljan uvid kroz sve tehnološke procese koje je zavareni spoj prošao prilikom proizvodnje te, ukoliko dođe do odstupanja od minimalnih zahtjeva kvalitete, vrlo je lako pronaći mjesta odstupanja koja su uzrokovala isto.

8. ZAKLJUČAK

Zavarivanju čelika P91 i ostalih modernih martenzitnih i baintnih čelika uvijek treba pristupiti sa posebnom pažnjom od aktivnosti ugovaranja do zavarivanja i na kraju toplinske obrade u proizvodnji. Mnogi faktori mogu utjecati na kvalitetu zavarenog spoja: od dizajna konstrukcije, položaja, pristupnosti i mjesta zavarivanja, do vremena izrade, odnosno roka isporuke konstrukcije. U svakom slučaju zavarivanje i toplinsku obradu čelika P91 treba provoditi s:

- primjenom provjerene tehnologije zavarivanja,
- kvalificiranim postupcima zavarivanja,
- odobrenim tehnološkim uputama od kupca ili NoBo (Notified Body),



- osposobljenim zavarivačkim kadrom u radionici (EWT, EWP ili EWS), kako bi se osigurala ispravna interpretacija i primjena tehnoloških dokumenata zavarivanja u radionici, sljedivost procesa izrade, zavarivanja i ispitivanja,
- kvalificiranim i dodatno osposobljenim zavarivačima,
- svakodnevnom analizom rada zavarivača,
- dodatnim materijalom certificiranim od NoBo i isporučenim sa dokumentom 3.1, prema EN10204,
- obučanim i iskusnim operaterima toplinske obrade,
- provjerenom opremom za zavarivanje i toplinsku obradu,
- rokovima izrade koji omogućuju dovoljno vremena za izvršenje svih aktivnosti izrade i "kontrole", te analize tih aktivnosti i primjene korektivnih akcija po potrebi.

9. LITERATURA

- [1] Welding filler metals for power plant engineering, Phoenix Union Thermanit, Boehler Group, Book 2008.
- [2] The P91 book, Vallourec Industry, 1992, France.
- [3] Marsenić, T.; Zovko M. ADS 06.000.104, ĐĐ TEP, 2011, Slavonski Brod.