



## NEKA ISKUSTVA PRI ZAVARIVANJU MARTENZITNOG ČELIKA T/P 92 SOME ASPECTS OF WELDABILITY OF T/P 92 STEEL

Božo DESPOTOVIĆ, Tihomir MARSENIĆ, Branimir BRECHELMACHER, Dalibor BIRAČ<sup>1)</sup>

**Ključne riječi:** kotlovski čelici, zavarivanje čelika T/P 92, toplinska obrada čelika T/P 92

**Key words:** boiler steels, welding of T/P 92 steel, heat treatment of T/P 02 steel

**Sažetak:** U radu se navode specifičnosti pri zavarivanju čelika T/P 92 koji se sve češće susreće u kotlogradnji. Navode se iskustva po pitanju toplinske obrade ovog čelika, izbora dodatnog materijala za zavarivanje, tehnike zavarivanja itd. Prikazani su i neki rezultati pri kvalifikaciji postupka zavarivanja.

**Abstract:** This paper gives various aspects of welding T/P 92 steel which is mostly used in boiler fabrication. Some experiences of post welding heat treatment, choosing of filler metal, welding technique are also given. Some results for welding procedure qualification are also presented.

---

<sup>1)</sup> Austrian Energy & Environment, ĐURO ĐAKOVIĆ Termoenergetska postrojenja d.o.o. Slavonski Brod, e-mail: bozo.despotovic@aee-dd.hr

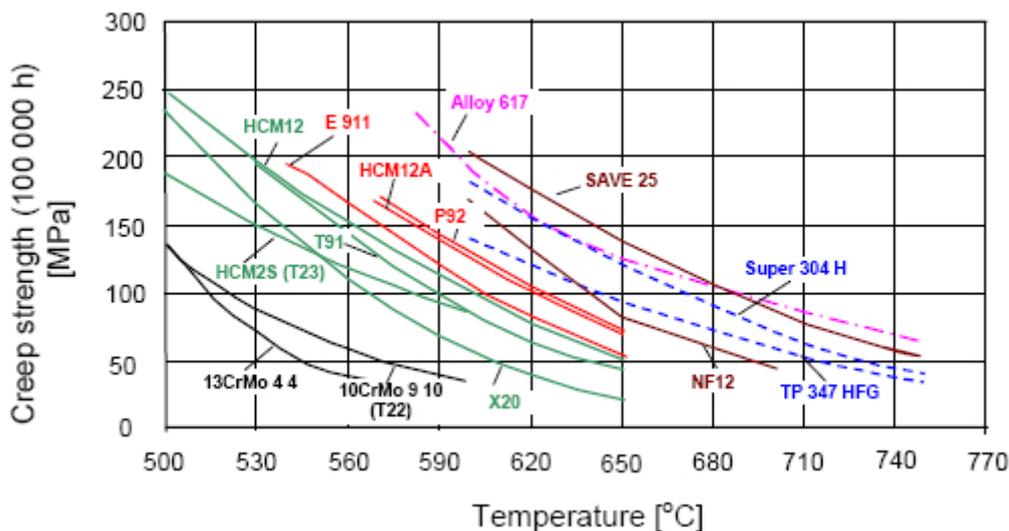
## 1. UVOD

Kotlovskim postrojenjima, a zbog sve očitije krize s energentima, te poznatim problema s prirodnim resursima, danas se posvećuje izuzetna pažnja. Kako su prirodna goriva poznatih-konačnih vrijednosti sve više se razmišlja i o alternativnim izvorima energije različitih oblika kao što su: sunčeva energija, energija vjetrova, valova, plima-oseka itd. Prema nekim izvorima rezerve ugljena su vrlo male (vremenski gledano čak ne više od 200 - 300 godina), a tekućih derivata i znatno manje (50-60 godina). Nuklearna energija ostaje kao trajna alternativa ali s dobro poznatim problemima sigurnosti postrojenja, odlaganja nuklearnog otpada, mogućih oštećenja zbog nenadanih sve češćih katastrofa u prirodi itd.

Budući da se i čovjekovoj okolini konačno počela posvećivati dužna pažnja, tako ideja da se svaki gorivi otpad spaljuje unutar energetskih postrojenja saživljava u praksi sve više i više. Novi koncepti kotlovskih postrojenja baziraju se između ostalog i na tome da se kao goriva tvar koristi na poseban način pripremljeni kućni otpad u kombinaciji s klasičnim, prirodnim gorivima.

Kao rezultat ovog novog koncepta s aspekta goriva, unutar kotlovskog postrojenja pojavljuju se dimni plinovi koji toplinsku energiju prenose na metalne ogrjevne površine pri čemu je kemijski sastav dimnih plinova promjenjiv i često nepoznat.

S druge strane trend pri razvoju kotlovskih postrojenja je takav da se eksploatacija kotla izvodi s "nadkritičnim parametrima" ili parametrima kod kojih će iskoristivost postrojenja biti iznad 50 %. Tako se i jedan i drugi trend, i po pitanju vrste goriva i po pitanju radnih parametara postrojenja mora uobziriti prije svega pri izboru osnovnog materijala za tlačne dijelove kotlova.



Slika 1. Orijentacijske vrijednosti čvrstoće puzanja u odnosu na radne temperature za različite vrste materijala koji se ugrađuju u kotlovska postrojenja [1]

Iz slike 1 je vidljivo da su za danas poznate čelike najviše radne temperature do 650 °C te da se za više vrijednosti predviđaju uglavnom legure na bazi Ni.

## 2. MATERIJALI ZA KOTLOVSKA POSTROJENJA

Sve donedavno u kotlovska postrojenja se ugrađivao uglavnom niskolegirani ugljični čelik svojstava primjerenih radu na povišenim ili visokim temperaturama. Zaštita od direktnog kontakta s plamenom i agresivnim plinovima izvodila se pomoću obloga koje su uglavnom iz materijala na bazi vatrootpornih čelika, vatrootpornog šamota ili keramičkih vatrootpornih materijala.

Danas je sve češći slučaj da se u područja s najvišim temperaturama ugrađuju ili austenitni visokotemperaturni čelici ili legure s velikim sadržajem nikla, dok se u ostale dijelove kotlova ugrađuju feritni ili martenzitni čelici pogodni na visoke temperature.

Poznato je da su cijene čelika jedan od važnijih ulaznih parametara pri kalkulaciji cijene izrade postrojenja, a kreću se u slijedećim relacijama:

- feritni čelici: 1,5 €/kg,
- martenzitni čelici za rad do temperature od 540 °C: 3 €/kg,
- austenitni čelici za rad na temperaturama 540 – 650 °C: 10 – 25 €/kg, te
- čelici na bazi Ni za rad na temperaturama iznad 650 °C: 50 – 60 €/kg,

tada nije jednostavna i ekonomična odluka za izbor kvalitetnog ali skupog osnovnog materijala.

Pri tome treba uobziriti i dodatni materijal koji je u pravilu za 20-30 % skuplji od osnovnog materijala, te posebne uvjete i odobrenja za izradu: WPAR-ovi, zavarivači/operateri, oprema za toplinsku obradu, oprema za obradu deformiranjem, itd.

Temeljem navedenog, izbor osnovnog materijala za pojedine dijelove kotlovskih postrojenja predstavlja jedan od najvažnijih koraka u fazi projektiranja, a obrada deformiranjem, odvajanjem čestica, te zavarivanje izabranog materijala, u fazi proizvodnje.

Pri tome toplinski tretman izabranog materijala za vrijeme obrade predstavlja svojevrsnu specifičnost s još uvijek otvorenim dilemama oko utjecaja pojedinih parametara toplinske obrade na konačna svojstva obrađenog materijala.

Tablica 1. Pregled vrsta, oznaka, kemijskih sastava, te radnih temperatura kotlovskih čelika

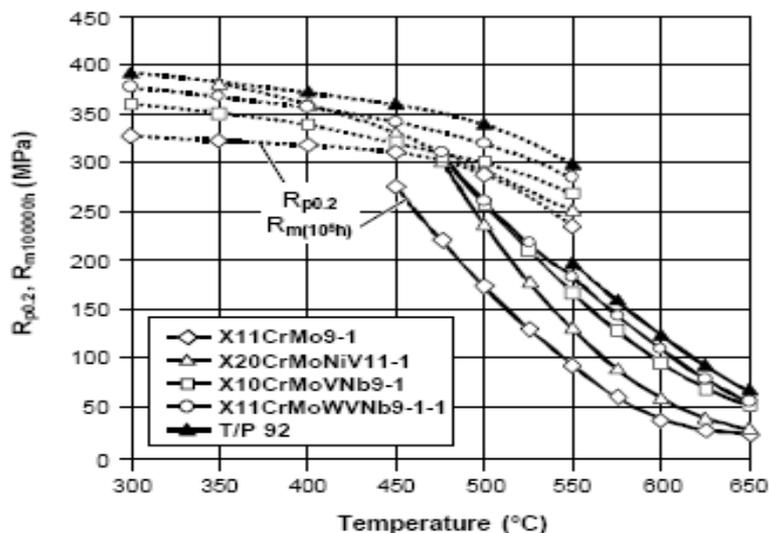
Grade	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	W	Nb	and	Service temp. °C <sup>1)</sup>
<b>BAINITIC FERRITIC STEELS</b>											
10CrMo9-10 (P22)	≤0,15	≤0,50	0,30-0,60	1,90-2,60	-	0,87-1,13					
HCM2S (T/P23)	0,04-0,10	≤0,50	0,30-0,60	1,90-2,60	-	≤0,30	0,20-0,30	1,45-1,75	0,02-0,08	N≤ 0,010	≤550
7CrMoVTiB10-10 (T/P24) W.Nr.1.7378	0,05-0,095	0,15-0,45	0,30-0,70	2,20-2,60	-	0,90-1,10	0,20-0,30	-		N≤ 0,010 B 0,0015-0,0070 Ti 0,05-0,10	≤550
<b>MARTENSITIC STEELS (9-12 % Cr)</b>											
X20CrMoV12-1 W.Nr.1.4922	0,17-0,23	<0,50	<1,0	10,0-12,5	0,30-0,80	0,80-1,20	0,25-0,35	-	-	-	≤575
X10CrMoVNb9-1 (P91) W.Nr.1.4903	0,08-0,12	0,20-0,50	0,30-0,60	8,0-9,5	<0,40	0,85-1,05	0,18-0,25	-	0,06-0,10	N0,03-0,07	≤585
X11CrMoWVNb9-1-1 (E911) W.Nr.1.4905	0,09-0,13	0,10-0,50	0,30-0,60	8,50-9,50	0,10-0,40	0,90-1,10	0,18-0,25	0,90-1,10	0,06-0,10	N0,05-0,09	≤630
X10CrWMoVNb9-2 P92 (Nf616) W.Nr.1.4901	0,07-0,13	<0,5	0,30-0,60	8,5-9,5	<0,40	0,30-0,60	0,15-0,25	1,5-2,0	0,04-0,09	N0,03-0,07 B0,001-0,006	≤630
X12 CrCoWVNb 12-2-2 (VM12) (values of a real heat [7])	0,11	0,45	0,2	11,5	0,23	0,28	0,24	1,40	0,06	Co1,6 N0,056 B0,003	≤650

Za razliku od dobro poznatih feritnih niskolegiranih visokotemperaturnih materijala koji su uglavnom legirani V, Nb, B ili Al kod čelika novije generacije pojavljuju se prije svih W, N ili Co kao legirni dodaci.

Svaki od ovih elemenata ima značajnu ulogu u poboljšanju postojanosti čelika na visokim temperaturama (tablice 1 i 2), ali isto tako je značajno zajedničko djelovanje svih elemenata pri toplinskoj obradi. Slika 2 prikazuje orijentacijske vrijednosti granice razvlačenja te trajne/vremenske čvrstoće za kotlovske čelike novije generacije.

Tablica 2. Preporuke dodatnog materijala, režima toplinske obrade, te prosječna mehanička svojstva čelika iz tablice 1.

	Base material	Filler metal acc. DIN EN 1599/1600	Filler metal composition											Mech. properties all weld at RT			
			C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Nb	V	W	Co	N	PWHT	YS	TS	toughness
			°C/h*	MPa	MPa	J											
Fertic-bainitic	10CrMo910	E CrMo2B42	0,07	0,25	0,70	2,20	0,90	-	-	-	-	-	-	690≥2	510	620	180
	HCM2S (T23)	EZ C2WVB42	0,06	0,26	0,52	2,1	0,08	0,05	0,03	0,21	1,65	-	-	740/2	880	1000	16
	7CrMoVTiB10-10 (T24)	EZ CrMo2VNbB42	0,09	0,3	0,5	2,7	1,0	-	-	0,25	-	-	-	740/2	>500	>800	45
Martensitic	X20CrMoWV12-1	E CrMoWV12B42	0,18	0,25	0,5	11,5	1,0	0,6	-	0,3	0,5	-	-	760≥4	600	750	40
	X10CrMoVNb9-1 (P91)	E CrMo9B42	0,09	0,22	0,65	9,0	1,1	0,80	0,05	0,20	-	0,04	-	760≥2	600	750	50
	E911	EZ CrMoWV911B42	0,09	0,20	0,57	8,85	0,92	0,83	0,047	0,21	1,01	-	0,05	760≥2	600	750	50
	P92 (Ni616)	EZCrMoWV90,52B42	0,098	0,23	0,66	9,23	0,53	0,66	0,037	0,20	1,62	-	0,06	760≥2	600	750	45
	VM12	EZCrMoWV90,52B42	0,11	0,5	0,6	11,2	0,3	0,7	0,06	0,25	1,5	1,6	0,05	770≥2	600	750	>27



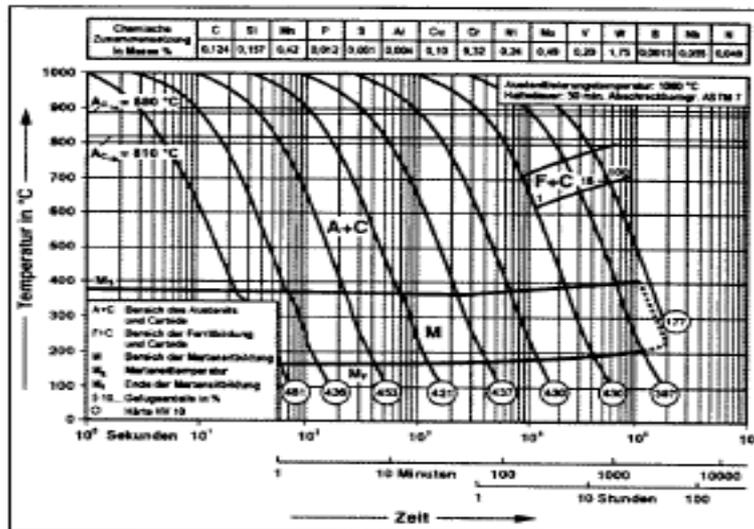
Slika 2. Orijetacijske vrijednosti granice razvlačenja, te trajne/vremenske čvrstoće za kotlovske čelike novije generacije

### 3. MARTENZITNI MATERIJALI TIP A T/P91 I T/P92

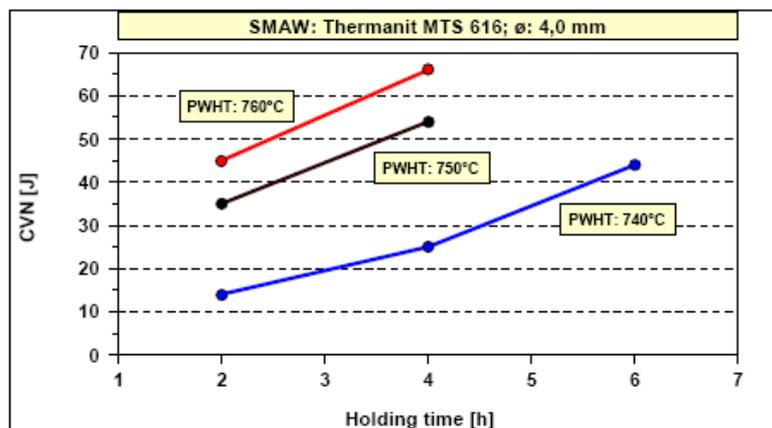
Za kotlovska postrojenja predviđena za rad s parametrima koji su na gornjoj granici izdržljivosti, skraćenog naziva USC (ultra super critical), najčešće se primjenjuju čelici oznaka T/P91 i T/P92 i to prije svega za cijevne sustave. Pri tome čelik T/P92 u osnovi predstavlja modifikaciju čelika 9Cr-1Mo-V-Nb (T/P91) i ima skraćenu oznaku 9Cr-1.8W- 0.5Mo-V-Nb tj. dodan je volfram, te mikrolegirajući element bor, a smanjen je sadržaj molibdena.

Na taj način usporen je proces transformacije karbida od M<sub>2</sub>C ka M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, a povećana je i sloboda difuzije Fe.

Ovaj čelik je razvijen u Japanu od strane firme Nippon Steel kao NF 616 čelik. Prednost u odnosu na ostale slične čelike je veća vrijednost granice puzanja unatoč višoj cijeni. U usporedbi s čelikom T/P91 pri istim radnim parametrima na jednom od kotlovskih postrojenja, debljina stjenke cijevnog sistema iz čelika T/P92 bila je za oko 30 % manja. Na slici 3 prikazan je TTT dijagram za čelik T/P 92, a slika 4 daje ovisnost svojstva žilavosti o režimima toplinske obrade za EPP postupak zavarivanja čelika T/P 92.



Slika 3. TTT dijagram za čelik T/P 92



Slika 4. Ovisnost svojstva žilavosti o režimima toplinske obrade za EPP postupak zavarivanja čelika T/P 92.

Kako su vrijednosti žilavosti za čelike namijenjene za izradu dijelova pod tlakom propisanih minimalnih vrijednost od 27 J iz tablice 4. je vidljivo da su režimi toplinske obrade nakon zavarivanja najutjecajni na vrijednosti žilavosti.

#### 4. ZAVARIVANJE I TOPLINSKA OBRADA

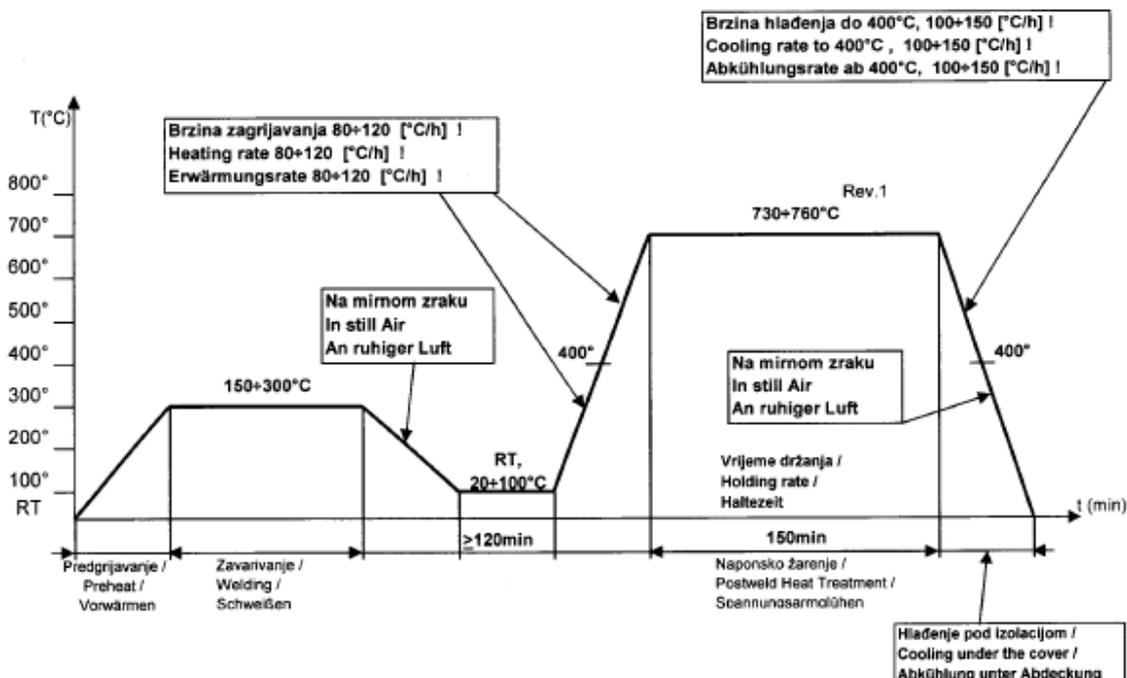
Za zavarivanje navedenog čelika ili istog u kombinaciji sa čelicima iste grupe moguće je primijeniti sve raspoložive postupke zavarivanja. Jedini limitirajući faktor može biti dodatni materijal koji još uvijek nije dostupan pri uobičajenom načinu naručivanja kod većine proizvođača dodatnih materijala.

U ovom slučaju pri zavarivanju ispitnog uzorka dimenzija  $\varnothing$  323,9x39,3 mm iz materijala oznake X10CrWMoVNb 9 2, WNr 1. 4724 (po nekim izvorima WNr 1. 4901) primijenjena je kombinacija postupaka TIG + EPP.

U tablici 3 navedeni su osnovni parametri zavarivanja i toplinske obrade. Slika 5 prikazuje teoretski dijagram odžarivanja čelika T/P 92.

Tablica 3. Osnovni parametri zavarivanja i toplinske obrade

Prol. broj	Postupak	Dodatni materijal		Struja zav. (A)	Napon (V)	Brzina zav. (cm/min)	Prim. plin	Sek. plin	To /Tm (°C)
		Žica + Prašak	Ø (mm)						
1-5	141	Thermanit MTS 616	2,4	100-140	-	-	Ar / 9 l/min	Ar / 8 l/min	232-240
5-55	121	Thermanit MTS 616 + Marathon 543	2,4	320-333	29-30	40-65	-	-	200-350



Slika 5. Teoretski dijagram odžarivanja čelika T/P 92

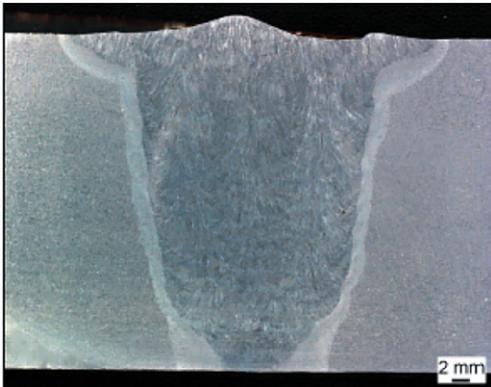
## 5. REZULTATI ISPITIVANJA SVOJSTAVA ZAVARENOG SPOJA

Sva ispitivanja su provedena prema važećim EN u za to akreditiranom laboratoriju i uz prisustvo ovlaštene inspeksijske kuće. Makro uzorci i izmjerene dubine prolaza prikazane sa na slikama 6,7 i 8. Karakteristične vrijednosti ispitivanog zavarenog spoja navode se u tablici 4.

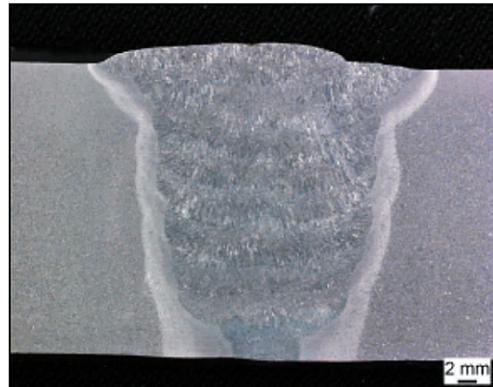
Tablica 4. Rezultati ispitivanja

Uzorak br:	Gr. razvlačenja N/mm <sup>2</sup>	Vlačna čvrstoća N/mm <sup>2</sup>	Radnja loma (J)		Vrijednosti tvrdoća (HV 10)
			Zavar	ZUT	
1	537	698	75,71,70	173,170,168	OM: 210-230 ZUT: 219-240 Z: 225-258

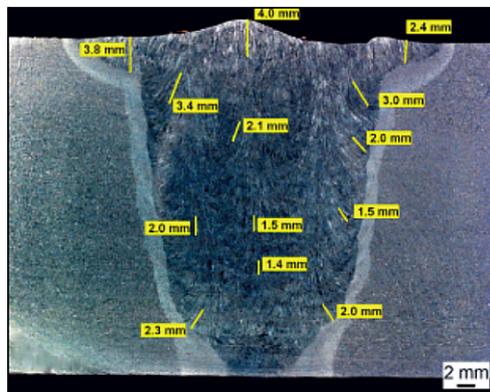
Dobiveni rezultati pokazuju da je najvažniji utjecajni faktor/radna operacija na svojstva zavarenih spojeva toplinska obrada zavarenih spojeva. Ako bi se komentiralo dobivene rezultate pri ispitivanjima, te ako bi se željelo naglasiti najvažnije utjecajne faktore/radne operacije onda je to u svakom slučaju toplinska obrada zavarenih spojeva. Pri tome je potvrđena teza prikazana slikom 4 gdje nivo temperature toplinske obrade, kao i vrijeme držanja (pri toplinskoj obradi) direktno utječe na vrijednosti svojstava žilavosti čelika T/P 92. Treba naglasiti da se sve navedeno odnosi uglavnom na svojstva žilavosti zavarenog spoja – depozita, i da nije utvrđeno da su vrijednosti žilavosti za osnovni materijal kao i ZUT u direktnoj vezi s režimima toplinske obrade.



Slika 6. Makro uzorak za TIG + EPP



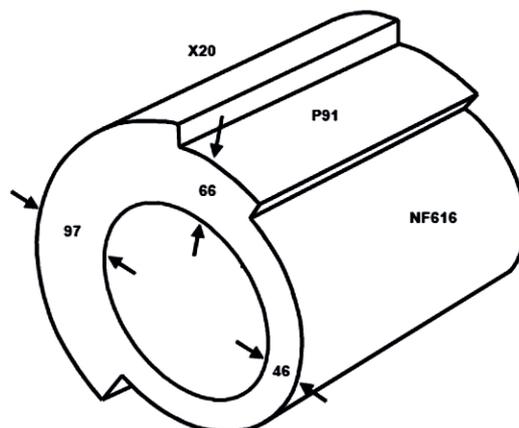
Slika 7. Makro uzorak za TIG + REL



Slika 8. Izmjerene debljine prolaza za pojedine slojeve pri EPP postupku zavarivanja

Pokazano je isto tako da je debljina prolaza–slojeva pri zavarivanju vrlo utjecajna na strukturu ostvarenog depozita, što znači da se toplinski input mora držati u strogim granicama.

Posebnu važnost treba posvetiti temperaturi predgrijavanja, međuprolaznoj temperaturi, te režimima hlađenja za vrijeme zavarivanja. Slika 9 prikazuje primjer utjecaja izbora osnovnog materijala na debljinu stjenke tlačne posude za iste radne parametre - usporedba čelika X20, P 91 i T/P 92 (NF 616).



Slika 9. Primjer utjecaja izbora osnovnog materijala na debljinu stjenke tlačne posude za iste radne parametre. Daje se usporedba čelika X20, P 91 i T/P 92 ( NF 616).

## 6. ZAKLJUČAK

Budući da se radi o čeliku koji još nema široku primjenu u Europi gore navedene spoznaje treba prihvatiti kao informativne. Posebno stoga što provedeni opseg i metode ispitivanja nisu dovoljni za kvalitetnu valorizaciju obradivosti – zavarljivosti čelika.

Ipak je za naglasiti da se tehničari zavarivanja te toplinskom tretmanu nakon zavarivanja treba posvetiti posebna pažnja.

## 7. LITERATURA

- [1] "Welding filler metals for power plant engineering" Phoenix Union Trhermanit, Boehler - Uddeholm Group, Book , 2006.
- [2] Hagen, I.; Benedic, W.: "Creep resistant ferritic steels for power plants", Mannesmann, 2006.
- [3] Hahn B, "Rohrstaehle fuer moderne Hochleistungskraftwerke" DVS, 239,
- [4] AEE ĐĐ TEP Tehnološke upute, zapisi i protokoli, projekt "Neurath" 2007 god.