



EPP ZAVARIVANJE OTKOVANE KONSTRUKCIJE DEBELOSTJENOG PLAŠTA IZMJENJIVAČA TOPLINE

SAW OF FORGED STRUCTURE OF THICK-WALL MANTLE BY HEAT EXCHANGER

Ivica MUSTAPIĆ ¹⁾

Ključne riječi: otkivci, posuda pod tlakom, EPP zavarivanje

Key words: forgings, pressure vessel, SAW

Sažetak: U članku je opisana primjena kovanih dijelova posuda pod tlakom izrađenih od poboljšanih vakuumski tretiranih čelika. Primjenom visokokvalitetnih debelostijenih otkivaka u zavarenoj konstrukciji utječe se na vrijeme i troškove izrade, kvalitetu, sigurnost i pouzdanost gotovog proizvoda.

Abstract: Application of pressure vessel forged parts that are made of quenched and tempered vacuum treated steel are described in the article. The application of high duty, heavy tick wall in welded construction affects on time and expenses of production, quality, safety and reliability of the product.

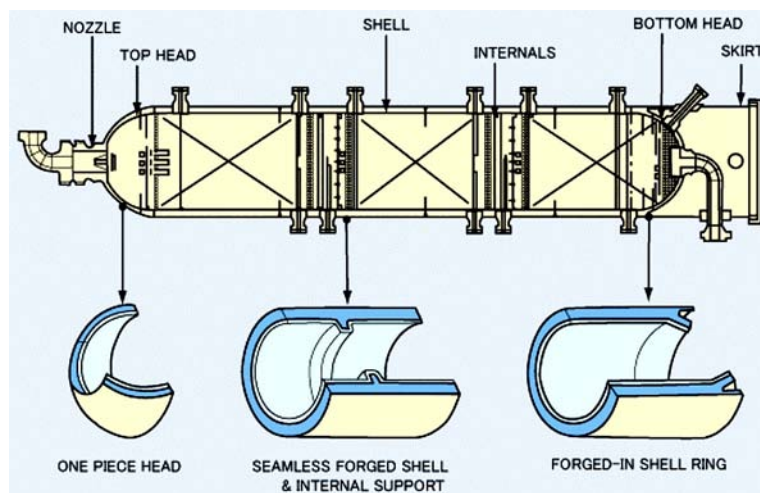
¹⁾ Đuro Đaković, Proizvodnja opreme d.o.o., Dr. Mile Budaka 1, 35000 Slavonski Brod

1. UVOD

Plast izmjenjivača topline $\varnothing 1270 \times 75$ mm izrađen je u kovanoj izvedbi kvalitete materijala A 508 Gr.3 Cl.1 iz grupe poboljšanih i popuštenih vakuumski tretiranih čeličnih otkivaka za posude pod tlakom.

Primjenom visokokvalitetnih debelostjenih otkivaka (slika 1) u proizvodnji posuda pod tlakom ostvaruju se sljedeće prednosti:

- Izbjegava se zavarivanje podužnih zavora koji su izloženi visokim naprezanjima zbog unutrašnjeg tlaka što rezultira višim stupnjem integriteta posude.
- Postižu se homogenija i bolja svojstva (mehanička i metalurgijska) kroz cijelu debljinu za razliku od debelostjenih limova koji se savijaju na hladno.
- Postiže se visoka dimenzionalna točnost (unutrašnji promjer, debljina stjenke, ...) što poboljšava učinkovitost u proizvodnji, sigurnost i pouzdanost posude.
- Smanjuje se vrijeme proizvodnje i ispitivanja zbog manje dužine zavora.



Slika 1. Dijelovi posude pod tlakom izrađeni u otkovanoj izvedbi (plast s unutrašnjim ojačanjima, donja podnica s nastavkom za suknjicu, priključci, ...) u skladu s ASME Sec. VIII Div.1 i ASME B16.5

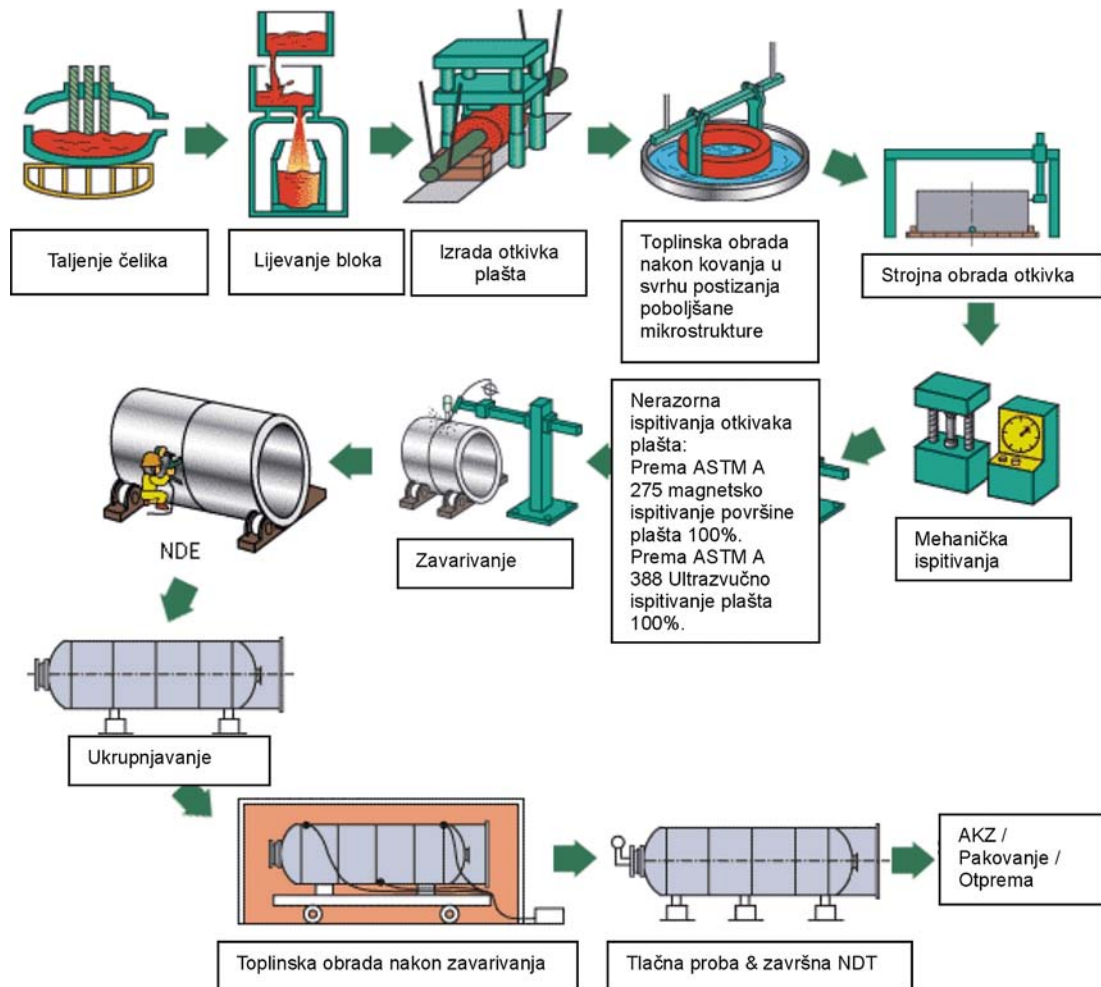
Zavarljivost poboljšanih čelika ovisi o sljedećim značajkama koje bitno utječu na pouzdanost zavarenih posuda pod tlakom:

- materijal,
- konstrukcija i
- izrada.

2. SLIJED TEHNOLOŠKIH OPERACIJA

Prema zahtjevima norme ASTM A 508 posebna se pozornost posvećuje postupku pretaljivanja, lijevanja blokova (slika 2) te kovanju (slika 3 i 4) u svrhu postizanja što više čistoće čelika, odsutnosti segregacija i mikropukotina, te jednoličnosti mikrostrukture i svojstava po presjeku (izotropija).

Čelik se otplinjuje u vakuumu (proces je opisan u ASTM A 788) prvenstveno radi odstranjivanja vodika. Slijedi operacija prekivanja bloka s uklanjanjem centralne metalurške osi i kovanja debelostjenog prstena. Nakon toplinske obrade provode se mehanička i nerazorna ispitivanja uz izdavanje certifikata prema EN 10204: 3.2.



Slika2. Slijed tehnoloških operacija od procesa taljenja do gotovog zavarenog proizvoda



Slika 3. Operacija slobodnog prekrivanja debelostjenih prstenova plašta u svrhu prekrizacije primarne lijevane u kovanu strukturu



Slika 4. Toplo valjanje prstena (1200 °C do 800 °C) na željeni unutrašnji promjer (100 – 8000 mm) i visinu do max. 1500 mm. Težina radnog komada do 10 t.

Firma Đuro Đaković Proizvodnja opreme posjeduje karusel (slika 5) na kojemu je moguće obraditi vanjske i unutrašnje promjere ($D_{max.} = 8000$ mm, visine max. 4000 mm), kao i pripreme za zavarivanje kružnih zavara prikazane na slici 7 (detalj A).



Slika 5. Strojna obrada vanjskog i unutrašnjeg promjera plašta i izrada priprema za zavarivanje kružnih zavara. Tolerancija unutrašnjeg promjera je ± 1 mm prema ISO 2768-mK

Strojna obrada otvora za priključke izvodi se na bušilici i glodalici (Bohrwerk) u smjeru osi plašta (radijalno), tangencijalno ili izvan središnje osi.

3. OSNOVNI I DODATNI MATERIJAL

Za projekt odabran je materijal koji prema ASME Sec. II Ed. 2004, Add. 2006. ima oznaku **SA-508 Gr.3 Cl.1**. Osnovni materijal je iz grupe poboljšanih čelika (QT – Quenched and tempered steel) za otkovane dijelove posuda pod tlakom (plašt, cijevna stijena, prirubnice, podnice, prstenovi i slični dijelovi). U tablici 1 prikazana su zahtijevana mehanička svojstva i kemijski sastav čelika prema pripadajućem ASTM standardu. Opći zahtjevi za čelične otkivke specificirani su u standardu ASTM A788.

Tablica 1. Kemijska i mehanička svojstva čelika SA 508 Gr.3 Cl.1

Vrsta čelika	Kemijski sastav u masenim %								
	C max.	Si	Mn	P max.	S max.	Ni	Cr max.	Mo	V max.
SA-508Gr.3Cl.1	0,25	0,15-0,4	1,2 do 1,5	0,025	0,025	0,4 do 1	0,25	0,45-0,6	0,05
	Mehanička svojstva kod sobne temperature								
	Debljina, mm	Gornje naprezanje tečenja N / mm ²	Vlačna čvrstoća N / mm ²	Prekidno istezanje A ₅₀ %		Suženje poprečnog presjeka Z, %			
	max. 205	min. 345	550 do 725	min. 18		min. 38			
Najmanje vrijednosti udarne radnje loma, KV u J kod									
					4,4 °C (+ 40 °F)				
Minimalna srednja vrijednost:					41 J				
Minimalna vrijednost jednog uzorka: (Prema standardu ASTM A 370)					34 J				

Otkivci se toplinski obrađuju, ovisno o zahtijevanim mehaničkim svojstvima, gašenjem s temperature austenitizacije (~ 930° - 890 °C), a drže se na toj temperaturi prema omjeru: 1h / 35 mm debljine stjenke ,gase se u vodi u cilju postizanja martenzitne (i/ili bainitne) strukture nakon čega slijedi visoko popuštanje (eng.: tempering, njem.: anlassen) na temperaturi 650°C u trajanju min. 1sat na 25 mm maksimalne debljine otkovka uz hlađenje na mirnom zraku.

Proizvođač mora voditi računa o sadržaju legirajućih elemenata (pored ostaloga) koji utječu na prokaljivost, Ms temperaturu (temperatura početka stvaranja martenzita pri gašenju) prema TTT dijagramu i konačnu mikrostrukturu čelika, kao i na zavarljivost.

Otkivci dobiveni na ovaj način imaju dobar odnos svojstava čvrstoće i duktilnosti.

Za EPP zavarivanje kružnih zavara plašta odabrana je kombinacija **OE-S3NiMo1 / OP 121 TT** od proizvođača Oerlikon.

Osnovna svojstva zavara klasificirana prema ASME Sec. II Part C, SFA- 5.23: F9P8-EF1-F3 prikazana su u tablici 2. Sadržaj difuzijskog vodika u zavarenom spoju prema EN ISO 3690 je HD = 4,2 ml/100 g.

Tablica 2. Kemijski sastav i mehanička svojstva metala zavara u odžarenom stanju

Naziv dodatnog materijala	Kemijski sastav u mas. %						R _{eH} N / mm ²	R _m N / mm ²	KV, J		
	C	Si	Mn	Mo	Ni	-20°C			-40°C	-60°C	
OE – S3NiMo1 Φ 4mm / OP 121 TT	0,05-0,08	0,2-0,4	1,3-1,6	0,6	1	>540	630-730	120	90	70	

4. ATESTIRANJE POSTUPKA ZAVARIVANJA

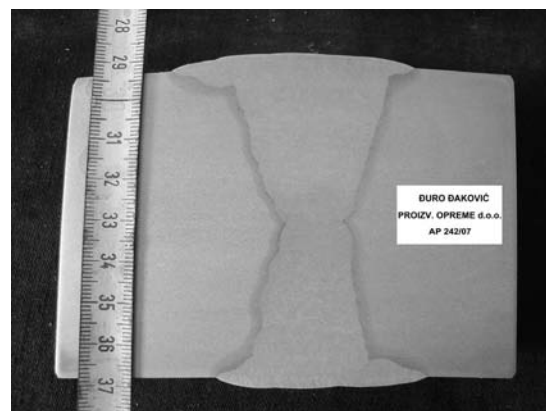
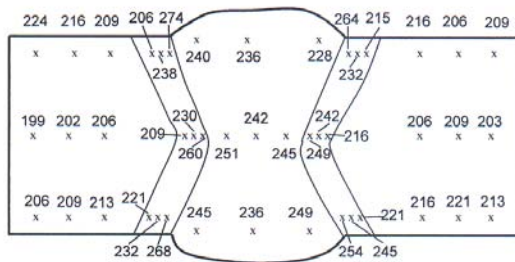
Prije početka zavarivanja provedeno je atestiranje EPP postupka u skladu s ASME Sec. IX. Zavarivanje atestne ploče izvedeno je prema parametrima zavarivanja prikazanim u tablici 4. Zahtijevani opseg ispitivanja atestne ploče sadrži:

1. Vizualna kontrola, 100 % prema QW-190
2. Radiografska kontrola, 100 % prema ASME VIII Div.1, UW-51, ASME Sec. V, Art.2.
3. Kontrola površinskih pukotina, 100 % MK prema ASME VIII Div.1, App.6, ASME Sec. V, Art.7
4. Zatezna čvrstoća poprečno na zavar,
5. Savijanje na bok, 4 kom.
6. Žilavost na +4,4 °C: (seta i to u sredini zavara i 2 mm od linije staljivanja u ZUT-u).
7. Tvrdća zavara i ZUT-a, 1 kom.
8. Makro izbrusak, 2 kom (vidi sliku 6).

Rezultati ispitivanja zavarenog uzorka provedenih u ĐĐ Centar za istraživanje i razvoj d.o.o. prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. Rezultati provedenog ispitivanja atestnog uzorka zavarenog EPP postupkom

VLAČNA PROBA POPREČNO NA ZAVAR QW-150					
broj probe	Uzorak prema	R _{eH} N / mm ²	R _m N / mm ²	A ₅₀ %	mjesto loma (napomena)
1.1	QW-462.1(a)	481	623	35,6	OM – osnovni materijal (kriterij prihvatljivosti prema QW153-1)
1.2		479	613	37,4	
1.3		483	621	35,4	
2.1		482	618	35,4	
2.2		478	613	36,2	
2.3		476	624	34	
PROBA SAVIJANJA QW-160					
broj probe	Uzorak prema	Tip	kut savijanja °	promjer trna	Kriteriji prihvatljivosti QW-463
1-4	QW 462.2	Bočno savijanje – Side bend	180	d = 4t	bez vidljivih indikacija
ISPITIVANJE UDARNE RADNJE LOMA QW -170					
proba broj	ispitna temp. °C	položaj zarez Charpy V	udarna žilavost J	prosječna vrijednost J	
1.1	+4,4	VWT 0/1 u sredini zavara	171	169	
1.2			170		
1.3			168		
2.1	+4,4	VHT 0/2 u ZUT-u	211	203	
2.2			184		
2.3			214		
ISPITIVANJE TVRDOĆE HV 10					
zavar		prelazna zona		osnovni materijal	
228-249		206-270		199-220	



Slika 6. Makro zavarenog spoja atestnog uzorka s izmjerama tvrdoća HV 10.

5. ZAVARIVANJE

5.1 Zavarljivost poboljšanih čelika

Osnovni materijal je iz grupe poboljšanih čelika koji se zavaruju uz kontrolu unosa topline. Prema ASME Sec. IX ; QW 422 čelik je klasificiran kao P3 Gr.3 (0,75Ni-0,5Mo-Cr-V).

Zavarivanje poboljšanih čelika je vrlo osjetljiva operacija kako sa stajališta strogog unosa topline, optimalnog izbora dodatnog materijala, tako i sa zahtjevima za dogrijavanjem i naknadnom toplinskom obradom.

S obzirom na vrstu čelika odstupanja od kvalificirane tehnologije zavarivanja ili pogrešne primjene mogu dovesti do slijedećih nepogodnosti:

- Osjetljivost na pojavu krhkosti u ZUT-u i rastaljenom metalu u obliku postojanja krhkih faza (vrijeme $t_{8/5}$ ne smije biti premaleno da se ne formira krhki igličasti martenzit).
- Osjetljivost zavarenog spoja na pukotine utjecane vodikom.
- Osjetljivost zavarenog spoja na stvaranje poligonalnog ferita kao potencijalnog mjesta na kojemu nastaju inicijalne pukotine (vrijeme $t_{8/5}$ ne smije biti preveliko).
- Osjetljivost čelika na pojavu likvacijskih pukotina u ZUT-u i toplih pukotina rastaljenog metala.
- Osjetljivost čelika na omekšavanje dijela zavarenog spoja koji je bio između temperature popuštanja (u čeličani) i temperature A_{c1} .
- Osjetljivost čelika na sniženje žilavosti ili pojavu pukotina za vrijeme napetosnog odžarivanja.
- Osjetljivost zavarenog spoja na napetosnu koroziju i pojavu oštećenja u kontaktu s različitim medijima.

Na svojstva zavarenog spoja utječe vrijeme hlađenja $t_{8/5}$ između temperatura 800 °C i 500 °C. U ovom temperaturnom intervalu događaju se pretvorbe u strukturi metala koje bitno utječu na njegova svojstva. Pri kratkim vremenima hlađenja dobija se sitno zrno velike tvrdoće i niske prijelazne temperature. Kod suviše dugih vremena hlađenja dobiva se krupnozrnata struktura niže tvrdoće i visoke prijelazne temperature.

Prema tablici 4 preporučene vrijednosti su $t_{8/5} = 7 - 25$ s, a optimalni toplinski input definira parametre zavarivanja prema jednadžbi:

$$E = (U I \eta) / v, \text{ kJ / cm}$$

U – napon električnog luka, V

I – jakost struje zavarivanja, A

v – brzina zavarivanja, cm / min

η – faktor iskorištenja unesene topline (za EPP zavarivanje $\eta = 0,9$)

Tablica 4. Parametri EPP zavarivanja i preporuke za zavarivanje materijala

Broj slojeva	Jakost struje A	Napon luka V	Vrsta i polaritet struje	Brzina zavarivanja cm / min	Unos topline kJ / cm
1-62	500-550	27-28	DC (+)	40-50	15-22
Temperatura predgrijavanja: 200°C			Max. međuslojna temperatura: 230°C		
Debljina lima mm	Temp. predgrijavanja T_p °C		Najniža radna temp., T_m °C		Vrijeme hlađenja $t_{8/5}$ s
s > 15	150 do 250		150		7-25

Zavarljivost čelika nastoji se ocijeniti na temelju ekvivalenta ugljika koji se računa prema formuli Međunarodnog instituta za zavarivanje :

$$C_{ekv.} = C + Mn / 6 + (Cr + Mo + V) / 5 + (Ni + Cu) / 15.$$

Prema vrijednostima kemijskog sastava iz atesta šarže osnovnog materijala, izračunata vrijednost $C_{ekv} = 0,57$. Za $CE > 0,4$ traže se posebni uvjeti zavarivanja.

Da bi se smanjila sklonost zakaljivanju (otvrdnjavanje u ZUT-u) provodi se predgrijavanje (preporuke vidi u tablici 4).

Za debljine preko 50 mm preporučuje se dogrijavanje u svrhu efuzije vodika iz zavarenog spoja (uobičajeno 250-280 °C u trajanju 2 do 4 sata).

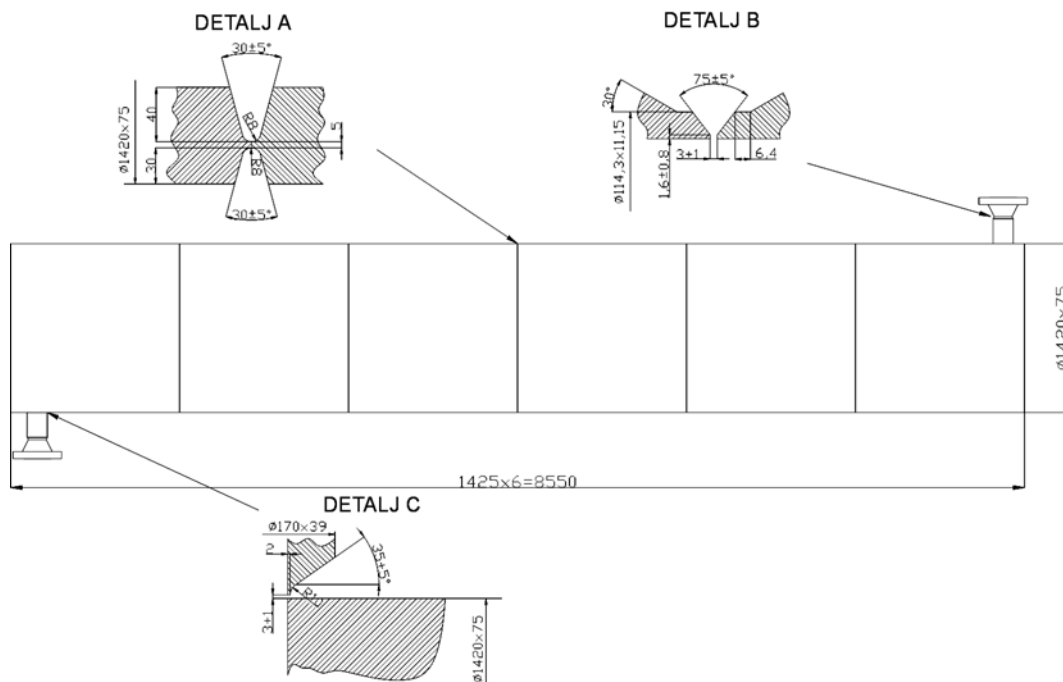
Reparaturno zavarivanje nakon toplinske obrade moguće je jedino uz primjenu tehnike pola gusjenice i polaganjem pokrovne gusjenice za popuštanje tvrdoće u ZUT-u (temper bead welding) prema ASME Sec. IX ; QW-290.

Minimalna temperatura predgrijavanja i temperatura tokom zavarivanja je 175 °C, a maksimalna međuslojna temperatura ne smije prelaziti 230°C.

Prvi slojevi se zavaruju elektrodom maksimalnog promjera 3 mm. Približno pola debljine prvog sloja se uklanja brušenjem, a slijedeći slojevi se polažu uz korištenje elektrode maksimalnog promjera 4 mm. Završni prolazi za odžarivanje ne smiju dodirivati osnovni materijal (~ 1-3 mm od ruba osnovnog materijala).

Nakon završetka zavarivanja slijedi dogrijavanje na temperaturi 205-260 °C min. 4 sata i hlađenje na mirnom zraku do sobne temperature.

Nakon 48 sati popravak se ispituje 100 % MK, a za dubine popravka veće od 10 mm zahtijeva se i radiografsko ispitivanje.



Slika 7. Oblici priprema za zavarene spojeve plašta i priključaka

5.2 Zavarivanje EPP postupkom

Zavarivanje je izvedeno konzolnim automatom s okretajkama koje imaju mogućnost okretanja radnog komada kontinuiranom daljinskom regulacijom.

Zavarivanje kružnih zavara izvodi se EPP postupkom višeslojnom tehnikom zavarivanja, tako da svaki slijedeći sloj normalizira strukturu prethodnog sloja. Visina slojeva ograničava se na debljinu od ~ 3 mm.

Postupak zavarivanja sadrži slijedeće operacije:

- sušenje praška prema preporukama proizvođača,
- plinsko predgrijavanje kružnim plamenicima,
- kontrola temperature predgrijavanja,

- zavarivanje 1/3 debljine zavarenog spoja s unutrašnje strane plašta uz strogu kontrolu parametara zavarivanja,
- vađenje korijena zavara arc-air postupkom odmah nakon prestanka zavarivanja dok je radni komad ugrijan na temperaturi predgrijavanja i brušenje s vanjske strane,
- kontrola korijena zavara PK 100 %,
- predgrijavanje i kontrola temperature predgrijavanja,
- zavarivanje s vanjske strane,
- dogrijavanje
- kontrola nakon 24 sata RK 100 %.

Zavarivanje je bilo potrebno organizirati kroz tri smjene kako se ne bi prekidallo s procesom uz odgovarajući nadzor.

Zavarivanje priključaka na plašt izvodi se TIG+ REL postupkom uz strojno obrađenu pripremu za zavarivanje prema detalju C na slici 7.



Slika 8. Primjer otkovanih i strojno obrađenih priključaka s ojačanjem i prijelazom na zadani radijus plašta posude

Na tržištu se mogu kupiti već otkovani i strojno obrađeni priključci prema zahtjevima standarda ASME Sec. VIII Div. 1 i ASME B 16.5 (slika 8) s prijelazom na sučelni spoj plašt-priključak, s kosim (tangencijalnim) prijelazom,...

Takav sučelni spoj ima manju koncentraciju naprezanja, kvalitetnije se može zavariti i ispitati nerazornim metodama obzirom na bolju pristupačnost. Pri tome su izostavljeni zavareni spojevi: prirubnica-cijev, cijev-ojačanje.

6. TOPLINSKA OBRADA NAKON ZAVARIVANJA

Zahtjevi za toplinskom obradom nakon zavarivanja definirani su u ASME Sec. VIII, Div. 1, UCS-56. Prema navedenom standardu toplinska obrada popuštanja zaostalih napetosti provodi se na min. temperaturi držanja 595 °C, a za debljine preko 50 mm vrijeme držanja je 2 sata plus 15 minuta za svakih dodatnih 25,4 mm.

Prema A STM 508 ukoliko se provodi naknadna toplinska obrada (ili višestruko popuštanje napetosti) minimalna temperatura popuštanja nakon kaljenja je 635 °C.

Temperatura toplinske obrade nakon zavarivanja ne smije prelaziti temperaturu zadnje toplinske obrade otkivka i svakako mora biti niža za ~30 °C.

Toplinska obrada popuštanja napetosti provedena je u plinskoj peći dimenzija 6x6x21 m uz ispis u obliku dijagrama odžarivanja.



7. KONTROLA KVALITETE

Kontrola kvalitete provedena je prema zahtjevima kupca i standarda ASME Sec. VIII.

Prije početka zavarivanja provedene su mjere koje obuhvaćaju provjeru podobnosti za zavarivanje i osigurani su potrebni certifikati - potvrde:

- atest osnovnog materijala s mehaničkim svojstvima i kemijskim sastavom, ispitivanje homogenosti ultrazvukom,
- atest dodatnog materijala,
- podobnost opreme za zavarivanje,
- kvalifikacija zavarivača,
- atestiranje postupaka zavarivanja.
- kontrola geometrijske točnosti i čistoće pripreme rubova,
- ispitivanje priprema za zavarivanje 100% MK
- identifikacija oznaka osnovnog i dodatnog materijala i zavarivača,
- rukovanje dodatnim materijalom u / iz skladišta.

Za vrijeme zavarivanja provedene su slijedeće mjere osiguranja kvalitete:

- kontrola temperature predgrijavanja,
- stroga kontrola parametara zavarivanja (kontrola unosa topline),
- kontrola procesa dogrijavanja.

Poslije zavarivanja provedene su sljedeće aktivnosti:

- vizualna i dimenzijska kontrola svih zavara,
- magnetska kontrola svih kružnih zavara plašta 100% (prije i poslije toplinske obrade),
- radiografska (prije TO) ili ultrazvučna kontrola (poslije TO) u opsegu 100% svih kružnih zavara plašta minimalno 24 sata nakon zavarivanja,
- penetrantska i ultrazvučna kontrola zavara priključak-plašt,
- kontrola tvrdoće nakon toplinske obrade,
- mehanička ispitivanja tehnološke ploče.

8. ZAKLJUČAK

Postrojenja pod tlakom rade na visokim tlakovima i/ili temperaturama pa su zahtjevi za kvalitetu i pouzdanost zavarenih spojeva tlačnih dijelova visoki.

Primjenom kvalitetnih materijala otkivaka, novih konstrukcijskih rješenja u oblikovanju proizvoda i zavarenog spoja i odgovarajuće tehnologije izrade bitno se utječe na tehnoložnost zavarene konstrukcije.

Opće je pravilo kod zavarenih konstrukcija što manje zavarenih spojeva u cilju smanjenja vremena izrade. Tehnoložnost zavarene konstrukcije postiže se, između ostalog, korištenjem kombiniranih konstrukcija, npr. ugradnjom gotove pozicije oblikovane kovanjem i naknadnom strojnom obradom, pa je za očekivati i manje problema kako u izradi tako i u eksploataciji posude pod tlakom.

9. LITERATURA

- [1] Lukačević, Z.: *Zavarivanje*, Slavonski Brod, Sveučilište J. J Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, 1998.
- [2] ASME Sec, IX,, The American Society of Mechanical Engineers New York, New York, 2004
- [3] ASME Sec. VIII