



Mića Đorđević^{1,a}, Dragan Đorđević^{1,a}, Vladimir Đorđević^{1,a}, Nenad Gačić²

IZRADA REAKTORA ZA PROIZVODNJU HLOR-DIOKSIDA OD DVSLOJNIH PLOČA TITAN - ČELIK

MANUFACTURE OF THE REACTOR FOR CHLORINE-DIOXIDE PRODUCTION FROM DOUBLE-LAYER TITANIUM-STEEL PLATES

Stručni rad / Professional paper

Rad primljen / Paper received:

Novembar 2023.

Rad prihvaćen / Paper accepted:

Mart 2024.

Ključne reči: titan, eksplozija, plakatura Č/Ti, zavarivanje plakature Č/Ti, termička obrada plakature.

Rezime

Titan ima najširu primenu od svih reaktivnih metala. Osnovne osobine titana su: dobra otpornost na koroziju i odličan odnos težine i čvrstoće. Primenjuje se u: hemijskoj industriji, avijaciji, raketnoj tehnologiji, medicini itd. Razvojem metalurgije dobijanja titana njegova cena je postala znatno pristupačnija, ali je i dalje visoka, pa je reparatura zavarivanjem zastupljena gde god je to moguće. Zavarivanje je u znatnoj meri zastupljeno i pri izradi mašinskih delova. U ovom radu dat je detaljan postupak izrade reaktorske posude za dobijanje hlora-dioksida (ClO_2) u hemijskoj industriji CELULOZA – Viskoza. Reaktor je izrađen od dvoslojnog kompozita titan-čelik. Prikazan je način izrade kompozita eksplozijom i princip zavarivanja (spajanje elemenata). Pre početka izrade reaktora izvršene su probe spajanja čelika i titana eksplozijom radi definisanja potrebnih parametara. Od probnog kompozita su izrezane ploče koje su ispitane ultrazvukom i penetrantima nakon čega se izvršilo probno zavarivanje koje je dalo konačan odabir parametara zavarivanja. Relaksacija kompozita od zaostalih napona izvršena je u peći bez odstranjivanja vazduha da bi se ustanovilo u kakvom stanju će biti titan posle termičke obrade.

Adresa autora / Author's address:

¹Tehweld d.o.o. Loznica, Italijanskih dobrovoljaca 7
15300 Loznica, Srbija

²Eniko d.o.o. Loznica, Srbija

Keywords: titanium, explosion, steel / titanium cladding, welding of steel / titanium claddings, heat treatment of cladding

Abstract

Titanium has the widest application of all reactive metals. The basic properties of titanium are good corrosion resistance and an excellent strength-to-weight ratio. It is applied in: chemical industry, aviation, rocket technology, medicine, etc. With development of metallurgy of titanium production, its price became much more accessible, but it is still very high, the welding repair is therefore applied wherever possible. Welding is also significantly used for the production of machine parts. This paper presents a detailed procedure of reactor vessel production for obtaining chlorine-dioxide (ClO_2) in the chemical industry PULP-Viskoza. The reactor is made from a titanium-clad steel plate. Explosive cladding and the principle of clad welding (bonding of elements) are described. Prior to the onset of the reactor production, the tests of titanium/steel bonding by explosive cladding were made for defining the required parameters. The plates were cut from the trial cladding, and inspected by ultrasound and penetrant testing followed by trial welding, resulting in the final selection of welding parameters. Relaxation of cladding from the residual tension was made in the furnace without air removal in order to determine the condition in which the titanium will be after heat treatment.

Rad je u originalnom obliku objavljen u Zborniku radova sa Međunarodnog naučnog i stručnog skupa: Zavarivanje spaja – „Zavarivanje i zavarene konstrukcije 2023“ održanog u Sarajevu, BiH, od 25. do 27. oktobra 2023. godine.



1. Uvod

Reaktorska posuda se sastoji od plašta sa donjom kalotom i poklopca u obliku kalote na kome je urađen tehnološki otvor za mogućnost ulaska u reaktor, a ima i zaštitno-sigurnosnu ulogu da se otvori prilikom iznenednih eksplozija koje se povremeno javljaju pri reakciji u procesu proizvodnje. Na poklopcu i telu reaktora nalaze se razni priključci za dopremu sirovina i merni uređaji za temperaturu i pritisak. Zapremina reaktora je 5 m³. Dimenzije Ø1600x2500 mm. Hlor-dioksid se dobija od razblažene sumporne kiseline (H₂SO₄), natrijum-hlorata (NaClO) i sumpor-dioksida (SO₂). Unutar posude nalazi se raspršivač vode, spirala – cevna “zmija” od titana koja služi za stabilizaciju procesa u reaktoru.

Zbog izuzetno agresivnog medija unutrašnjost posude mora da bude od čistog titana (VT1-tehnički čist titan). Bilo je pokušaja da se titan zameni olovom (Pb), ali je ono vrlo brzo prelazilo u testasto stanje. Pokušavalo se i sa ugradnjom plastike. Plastični materijali su postajali kruti i ubrzo su se javljale pukotine i procurivanja.

Stara posuda je izrađena u Japanu i bila je u upotrebi 20 godina. Urađena je na principu uvlačenja Ti posude u čeličnu posudu, a obezbeđenje titanijumske posude od usisavanja zbog povremenog vakuuma izvršeno je

mestimičnim vezivanjem šrafova za čelični plašt. Zbog procurivanja na plaštu trebalo je da se uradi nova posuda.

Debljina čeličnog plašta je 6 mm, a titan lima 1,5 mm. Dno i poklopac imaju oblik kalote. Titanska posuda je završena u komori ispunjenoj inertnim gasom. Zbog povremenih eksplozija u toku reakcije u posudi vlada varirajući pritisak, a i vacuum (350 – 400mm Hg). U našem slučaju obezbeđenje od vakuumske usisavanja, tj. gužvanja titana ostvareno je plakiranjem čelika titanom. Plakiranje je izvršeno energijom eksplozije. Nova posuda je urađena od bimetala Čelik/Titan. Umesto kalota, dance i poklopac su izrađeni u obliku zarubljenih kupa. Izrada reaktorske posude izvršena je 1995. godine i bila je u upotrebi 5 godina, sve do raspada fabrike Celuloze (Viskoza).

1.1 Izbor osnovnog materijala

a) Čelik

Odabran je čelik kvaliteta Č.0362 (S235JO – EN10025), debljine od 7mm. Ovaj čelik je odabran zbog odgovarajućih mehaničkih osobina koje treba da zadovolje uslove prilikom izrade dvoslojnog kompozita eksplozijom. Osnovni uslov je žilavost materijala kako ne bi došlo do pojave prslina prilikom dejstva eksplozije. Dimenzije čeličnog lima bile su: 1000x7x2000 mm.

Tabela 1. Hemijski sastav čelika Č.0362 (SRPS C.BO.500)

Table 1. Chemical composition of the steel Č.0362 (SRPS C.BO.500)

Element mas. %	Cmax	Si max	Mn max	P max	S max	Fe
	0,17	0,40	0,50	0,045	0,045	ostatak

Tabela 2. Mehaničke osobine čelika Č.0362 (SRPS C.BO.500)

Table 2. Mechanical properties of steel Č.0362 (SRPS C.BO.500)

Oznaka	Granica razvlačenja	Zatezna čvrstoća	Izduženje	Savijanje	Žilavost	
C.BO.500 (JUS)	Rp (N/mm ²)za debljinu do 16mm	Rm (N/mm ²)	A ₅ , (%)	A, 180°	A _v min (j)	T (°C)
Č.0362	235	360-440	25	d = a	27	0

b) Titan

Odabir titana: Hemijska analiza titana od koje je napravljena posuda u Japanu pokazuje da se radi o titanu čistoće Ti>99%. Na tržištu je pronađen

titanski lim poreklom iz Ukrajine, dimenzija 1030 x 2 x 2040 mm čistoće 97-98% Ti. Po ruskom standard on spada u klasu VT1 – tehnički čist titan.



Tabela 3. Hemijski sastav titana

Table 3. Chemical composition of titanium

Elementi	Mo	Sn	V	Cu	Fe	Mn	Ni	Cd	Al	Pb	Ti
mas. %	0,0077	0,002	0,002	0,0043	0,072	0,0066	0,0396	0,0043	1,11	0,96	ostalo

Mehaničke i fizičke veličine titana

- specifična masa (δ) 4,5 (g/cm³)
- temperatura topljenja (T) 1668 (°C)
- zatezna čvrstoća (σ_m) 250 (N/mm²)
- granica Rp_{0,2} 140 (N/mm²)
- izduženje (A₅) 55%
- modul elastičnosti (E) 10,8x10⁴ (N/mm²)
za ugljenične čelike je duplo veći E
- koeficijent linearnog širenja (0-100°C) 8,5 (10⁻⁶K⁻¹)
za Č. 10,8x10⁻⁶
- specifična toplota (C) 523 (J/kgK)
- toplotna provodljivost (λ) za Ti 22 (W/mK)
- toplotna provodljivost (λ) za Č 50-58 (W/mK)
- brzina zvuka na 20°C 4140 (m/s)
- fazna transformacija $\beta \leftrightarrow \alpha$ 882 (°C)

1.2 Izbor dodatnog materijala

Pošto nije bilo moguće naći odgovarajuće šipke (žice) kao dodatni materijal za Ti, problem je rešen izrezivanjem uzanih traka od titanovog lima d=2mm. Širina žice bila je 2 - 3mm. Pre rezanja titan je očišćen brušenjem (uklonjena je zaštitna oksidirajuća patina). Tako izrezane šipke dužine oko 400 mm čuvane su u kartonskim kutijama. Vodilo se računa da se ne dodiruju golim rukama.

2. Izrada dvoslojnog kompozita čelik - titan

Spoj titana i čelika praktično je jedino moguće ostvariti velikim pritiskom, primenom energije eksplozije. I primenom eksplozije postoje znatni problemi. Treba uspostaviti i kontrolisati više parametara da bi se ostvario spoj bez ili sa malo tačkastih grešaka tipa titan karbida koji čine velike smetnje pri mehaničkoj obradi kompozita, naročito pri bušenju zbog velike tvrdoće Ti karbida.

2.1 Priprema lima titana i čelika za spajanje eksplozijom

Osnovno je da treba postići čistoću površina koja se ostvaruje brušenjem.

2.2 Izračunavanje parametara

Treba odrediti brzinu detonacionog talasa koja ne sme da bude veća od brzine zvuka u metalu koji se tretira eksplozivom. Za titan je potrebna brzina od 2200 m/s. Raspolagano je eksplozivom: amonex 1 čija je brzina 4100 – 4300 m/s. Zbog toga je bila potrebna flegmatizacija amonexa 1 koja je obavljena mešanjem sa kuhinjskom soli. Odnos amonexa 1 i kuhinjske soli se određuje ekperimentalno. Izvršena su merenja brzine i napravljen je dijagram po kome smo mogli da odredimo odnose amonexa 1 i kuhinjske soli za brzinu V=2200 m/s.



2.3 Postupak merenja brzine eksplozivne smeše amonexa 1 i kuhinjske soli

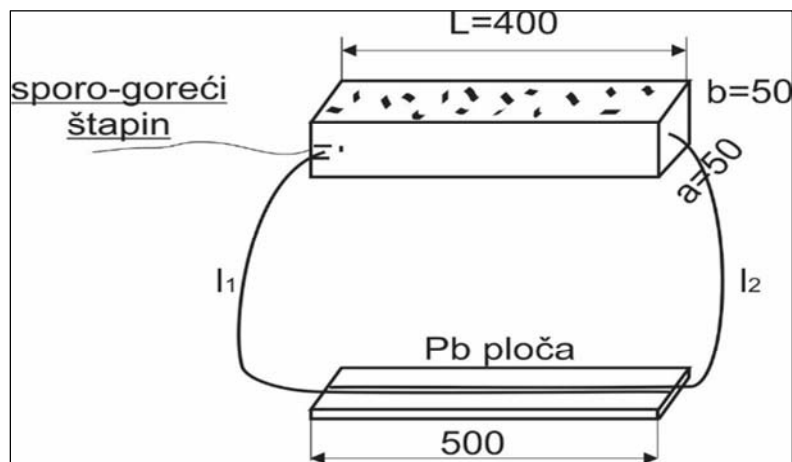
Za merenje brzine eksplozivne smeše potrebno je:

- kartonska kutija
- olovna ploča
- eksploziv
- kuhinjska so
- sprogoreći štapin i rudarska kapisla br. 8
- brzogoreći – detonirajući štapin

Prvo se napravi kutija od dasaka ili kartona, dimenzija: $L \cdot a \cdot b$. Iz praktičnih (iskustvenih) razloga naše mere su bile: 400 x 50 x 50 mm. Izmeša se amonex 1 i kuhinjska so: 950 gr amonex 1 (toliko je pakovanje) i 900 gr NaCl (51,35% amonex 1 i 48,65% NaCl). Pretpostavka je da će tražena brzina eksplozivne smeše biti $V_x = 1700-1800$ m/s. Ako ta pretpostavka nije tačna, onda neće doći do sudara eksplozije detonirajućih štapina na olovnoj ploči i ceo eksperiment mora da se ponovi. Brzina detonirajućeg štapina, prema deklaraciji bila je 7000 m/s. Karakteristike primenjenog amonexa 1 su sledeće:

- gustina	1,05-1,10 (kg/dm ³)
- brzina detonacije	4100-4300 (m/s)
- gasna zapremina	.955 (l/kg)
- radna sposobnost, proba po trauzl-u (ne bi trebalo da je manja od 300 cm ³)	380 -390 (cm ³)

Sa skice se vidi da su u kutiji dužine L pobodeni detonirajući štapini dužine l_1 i l_2 . Oni su zalepljeni (selotejpom) za olovnu ploču jedan uz drugoga. Dimenzija olovne ploče je 500 x 5 x 100 mm. Na levoj strani kutije postavljena je rudarska kapisla br. 8 povezana sa sprogorećim štapinom.



Slika 1. Šema postavljanja eksploziva za merenje brzine eksplozije

Figure 1. Scheme of installation for explosives measuring of the explosion speed

Detoniranje rudarske kapisle br. 8 inicira eksploziju smeše u kutiji i istovremeno se inicira eksplozija u detonirajućem-brzogorućem štapinu l_1 . Kad detonacija eksplozivne smeše pređe put L , aktivira se i brzogoreći štapin l_2 . Negde na olovnoj ploči doći će do sudara eksplozija od detonirajućih štapina l_1 i l_2 i na tom mestu će se pojaviti mali krater na olovnoj ploči.

Merenjem dužine i primenom navedenih odnosa kroz datu formulu dobija se tražena nepoznata

brzina eksplozivne smeše u kutiji, V_x . Izmere se dužine detonirajućih štapina od kutije do mesta sudara na Pb ploči, l_1 i l_2 .

Iz jednakosti vremena t slede odnosi:

$$t = \frac{l_1}{V_1} = \frac{L}{V_x} + \frac{l_2}{V_1} \quad (1)$$



Određivanje početnih dužina l_1 i l_2 , detonirajućih štapina

Uz pretpostavku da je brzina eksplozivne smeše $V=1700-1800$ m/s izabrana je minimalna dužina štapina $l_2=1$ m.

Izračunavanje dužine l_1 kako bi se sudar desio na Pb ploči

U slučaju da se sudar eksplozije detonirajućih štapina ne desi na Pb ploči, ceo postupak se ponavlja sa drugom pretpostavkom brzine V_x .

$$V_1 = V_2 = 7000 \text{ m/s}$$

$$V_x = 1750 \text{ m/s (pretpostavka za odnos amonexa 1 = 0,95kg i kuhinjske soli = 0,9kg)}$$

$$l_2 = 1 \text{ m}$$

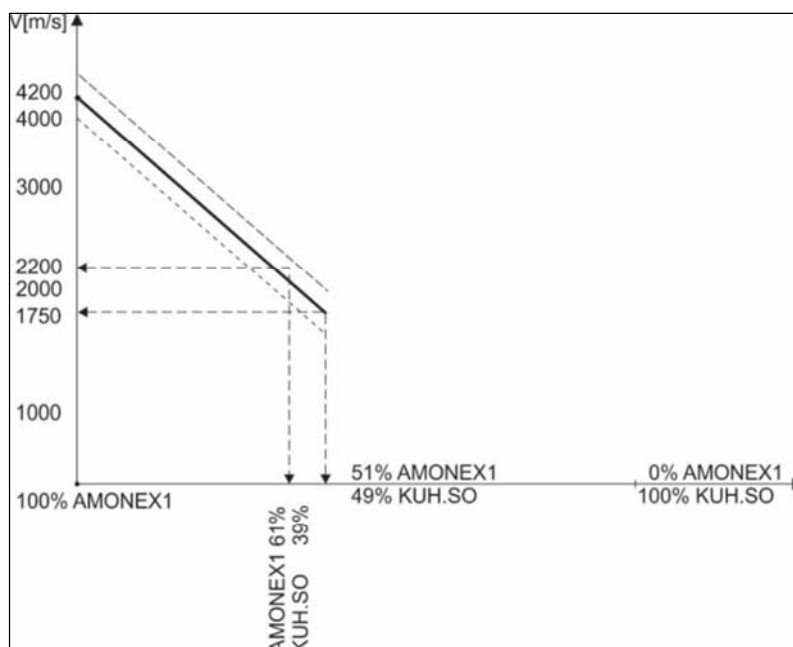
$$L = 0,4 \text{ m}$$

$$l_1 = \frac{LV_1}{V_x} + l_2 = 1,6 + 1 \text{ (m)} \quad (2)$$

Prema proračunu je $l_1 = 2,6$ m, a brzina V_x je:

$$V_x = \frac{LV_1}{l_1 - l_2} = \frac{0,4 \text{ m} \cdot 7000 \text{ m/s}}{2,6 \text{ m} - 1 \text{ m}} = 1750 \text{ m/s} \quad (3)$$

Nakon merenja brzine detonacije eksplozivne smeše (V_x) moguće je nacrtati dijagram iz kojeg se može odrediti brzina, tj. odnos amonexa 1 i kuhinjske soli za bilo koji metal. Potrebna brzina za titan je 2200 m/s. Prema dijagramu bilo je potrebno 61% amonexa 1 i 39% NaCl.



Slika 2. Dijagram za određivanje brzine mešavine amonexa 1 i kuhinjske soli

Figure 2. Diagram for determining the speed of a mixture of ammonia 1 and salt

3. Način izrade dvoslojnog kompozita Ti/Č

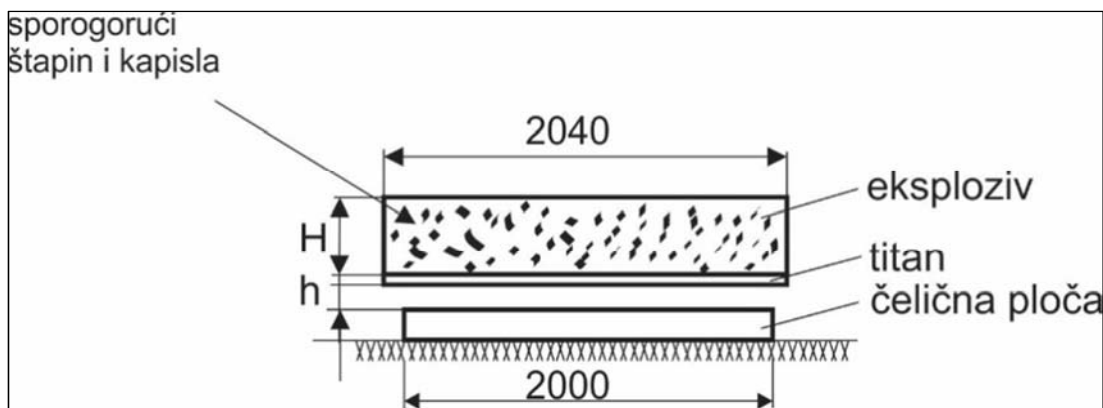
Za taj spoj bilo je potrebno 50 kg eksplozivne smeše. Ta količina je u funkciji težine titanove ploče. Težina titana $Q_{Ti} = ab\gamma_{Ti} = 103 \text{ cm} \times 204 \text{ cm} \times 0,2 \text{ cm} \times 4,5 \text{ g/cm}^3 = 18,9 \text{ kg}$.

Faktor r kojim se množi težina titanove ploče je: $r = 2,65$. Ovaj odnos je određen na bazi iskustva. Težina Q eksplozivne smeše je: $Q = r \times Q_{Ti} = 2,65 \times 18,9 = 50 \text{ kg}$. Određivanje količine amonexa 1 i kuhinjske soli je: Amonex1: $50 \text{ kg} \times 0,61 = 30,5 \text{ kg}$, Kuh.soli: $50 \text{ kg} \times 0,39 = 19,5 \text{ kg}$.

Na pripremljeno mesto stavlja se donja ploča od čelika, a na nekom rastojanju h iznad čelika

postavlja se lim od titana. To rastojanje h treba da je dovoljno malo kako bi se postiglo potrebno ubrzanje do sudara ploča, a i dovoljno veliko da se ostvari kvalitetan spoj sa karakterističnim talasima na spoju. Mi smo odredili na bazi iskustva h (2,5-4.5) d_{Ti} , odnosno: $h = (5-9) \text{ mm}$.

Visina eksploziva u nasipnoj gustini H je: $H = Q_{ex}/P \times \gamma = 25 \text{ mm}$ – srednja visina, zbog inertnosti brzine eksplozije početna visina eksploziva je veća a krajnja manja. Kapisla se zaranja u buster (pojačivač eksplozije, na jednom uglu), gde je Q_{ex} – težina eksplozivne smeše, P – površina titana, γ - specifična težina eksplozivne smeše.



Slika 3. Postavljanje ploča za spajanje eksplozijom

Figure 3. Installation of plates for joining by explosion

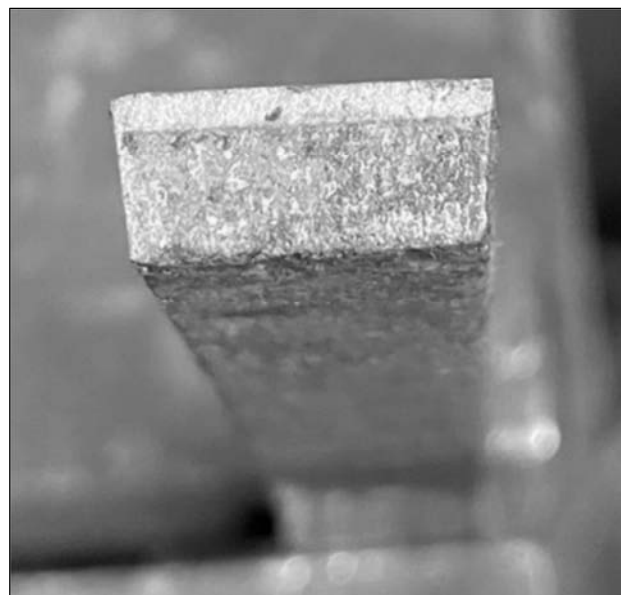
Posebnu pažnju treba posvetiti mešanju amonexa1 i kuhinjske soli. To se radi u drvenim koritima, drvenim lopatama, ne sme da se pojavi nikakva iskra jer bi došlo do detonacije. Poznato je da titan intenzivno iskri. Mi smo mešali eksploziv ručno, direktno na titanski lim koristeći gumene

rukavice. Nije preporučljivo ni Al lopatama da se meša jer u aluminijumu može da bude železa koje bi izazvalo varnicu. Nisu korišćene ni plastične lopate zbog moguće pojave statičnog naelektrisanja.



Slika 4. Postavljanje detonirajućeg štapina i trenutak eksplozije

Figure 4. Installation of the detonating rod and the moment of the explosion



Slika 5. Spoj titan - čelik

Figure 5. Titanium - steel joint

Nakon spajanja eksplozijom elementi kompozita titan i čelik otvrdnjavaju i poželjno je da se izvrši relaksacija zaostalih napona i smanjenje tvrdoća. To se radi zagrevanjem u vakuumu ili u atmosferi argona. Moguće je i zagrevanjem na vazduhu na 600°C u trajanju do jednog sata. Nakon toga je obavezno brušenje površine titana kako bi se uklonio film, taman sloj koji je apsorbirao iz vazduha gasove (O_2 i N_2). Termička obrada je radjena na probnom uzorku dimenzija 450 x 600 mm, kako bi se dokazalo da je moguće vršiti

odžarivanje kompozita u običnim pećima i da površina titana oksidiše po logaritamskom principu, a i da nema razaranja spoja Ti/Č. Žarenje je vršeno na 600°C u trajanju od 60 minuta. Nakon hlađenja izvršeno je uklanjanje filma, stvorenog oksida, brušenjem. Na taj način se vraćaju mehaničke osobine čistog titana. Takođe je moguće vršiti lokalnu termičku obradu. Nije radjena nikakva termička obrada, jer nisu uslovi dozvoljavali, pa je bilo poteškoća prilikom rolovanja plakiranih limova, bušenja, a i zavarivanja.



4. Zavarivanje titana VT-1

Titan je reaktivan metal, ima visoku hemijsku aktivnost na povišenim temperaturama, sa gasovima iz vazduha (O_2 , N_2). Na $882^\circ C$ javlja se alotropska modifikacija kristalne rešetke $\alpha \leftrightarrow \beta$. Tehnički čist titan, VT1, ima α strukturu ispod temperature $882^\circ C$ i dobro je zavarljiv. Primenom odgovarajućih tehnoloških uslova postižu se varovi visokog kvaliteta. Osnovni uslovi koje treba zadovoljiti za kvalitetno zavarivanje su:

- dobra zaštita od uticaja atmosferskih gasova na temperaturi iznad $350^\circ C$,
- čistoća i stanje površine pripremljenog žleba za zavarivanje i dodatnog materijala,
- obezbeđenje termičkog dejstva za regulisanje mehaničkih svojstava i strukturu

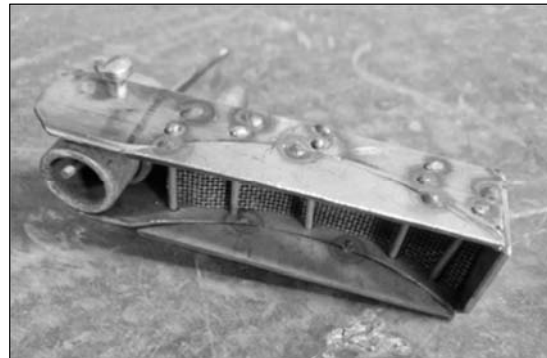
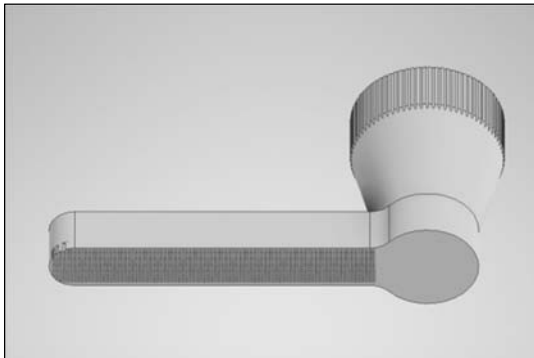
šava potrebno je odrediti odgovarajuće parametre u tehnologiji zavarivanja: struja i brzina zavarivanja, protok argona, brzina pothlađivanja.

a) Zaštita

Zaštita može biti opšta (u komorama sa inertnim gasom ili vakuumom) i lokalna sa specijalnim izduženim mlaznicama (šobama) i tada se razlikuju:

- primarna zaštita kupke,
- sekundarna zaštita ostvarenog vara iza šobe
- tercijalna zaštita korena vara.

Primenjena je lokalna zaštita koja je u upotrebi u najvećem broju slučajeva, slika 6.

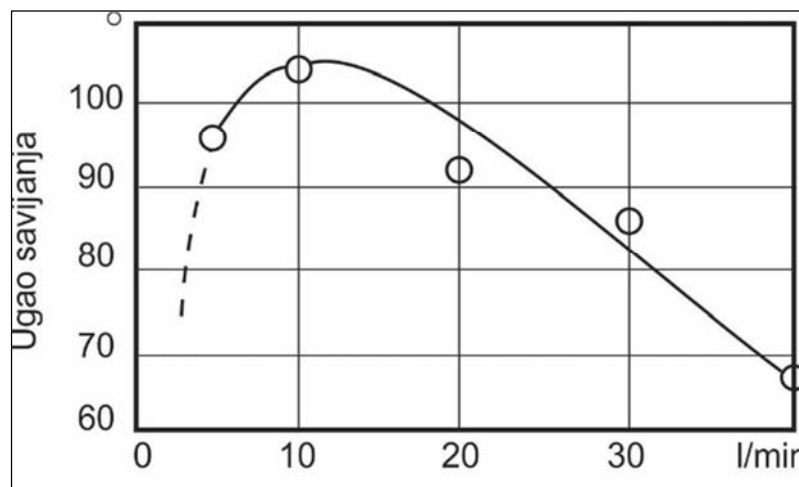


Slika 6. Izdužena mlaznica

Figure 6. Elongated nozzle

Na žilavost titana veoma utiče količina, tj. protok argona. Na početku je primarna zaštita argonom vršena sa 18-20 l/min. Nakon par minuta dolazilo je

do pucanja vara. Tek kada je protok sveden na 10-12 l/min., varovi nisu pucali.



Slika 7. Uticaj potrošnje argona na savijanje šava (debljina Ti lima 2 mm)

Figure 7. Effect of argon consumption on seam bending (Ti sheet thickness 2 mm)



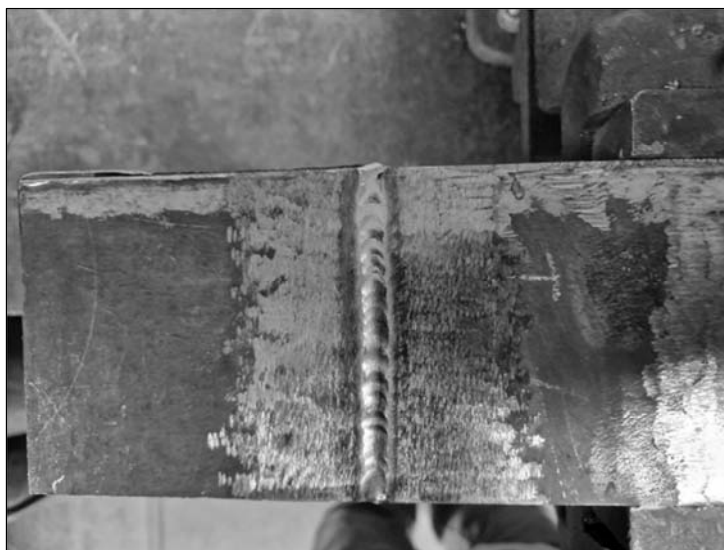
Protok gasa za sekundarnu zaštitu je bila 8 l/min, a za tercijalnu, tj. zaštita korena iznosila je 6 l/min.

b) Čistoća i stanje površine stranica žleba

Površine koje ulaze u sastav vara i zone pod uticajem toplote (ZUT) potrebno je očistiti mehanički i hemijski. Mehaničko čišćenje površina od oksida i nitrida iz vazduha vrena je brušenjem, četkanjem četkama od titana ili od prohroma. Za hemijsko čišćenje upotrebljen je rastvor: HF – 2%, HNO₃ – 30%, H₂O – 68%.

c) Obezbeđenje termičkog dejstva

Titan je osetljiv na termički ciklus zavarivanja. Pojava krtosti usled termofizičkog dejstva odnosi se na pregrevanje, zadržavanje na temperaturama iznad temperature preobražaja (882°C) i od brzine hlađenja. Zadržavanje na visokim temperaturama utiče na stvaranje krupnozrnaste strukture, a brzina pothlađivanja omogućava stvaranje igličaste strukture (Widmanštetenove strukture). Za kvalitetan šav potrebno je ostvariti optimalne parametre: vreme zadržavanja na visokim temperaturama i odgovarajuća brzina hlađenja. Tako se postižu najbolje mehaničke osobine (plastičnost, odnos tvrdoće i žilavosti). Rešenje je upotreba minimalne energije i velike brzine zavarivanja, što je svakako jedno drugom suprotno.



Slika 8. Segment zavarenog titana

Figure 8. Welded titanium segment

Tabela 4. Parametri zavarivanja Ti

Table 4. Welding parameters for Ti

Parametri	I _z [A]	U [V]	Brzina zavarivanja [mm/s]	Protok Ar primarna zaštita [l/min]	Sekundarna zaštita [l/min]	Zaštita korena [l/min]	Netopiva WTh elektroda [mm]
Vrsta struje Jednosmerna (-)	90	12,5	4,2	10-12	8	6	Ø2,4

Titan nije sklon toplim prslinama u toku zavarivanja, jer je vrlo mali interval između likvidus i solidus temperatura, ali je sklon hladnim, zakasnelim prslinama, koje su izazvane apsorpcijom vodonika u vrućem stanju, prisustvom

zaostalih napona izazvanih hladnom deformacijom ili od zavara. Odstranjivanjem nečistoća eliminiše se prisustvo vodonika, a odgovarajućom termičkom obradom, odžarivanjem, vrši se relaksacija zaostalih napona i tako se sprečava nastanak hladnih prslina.



4.1. Kontrola - ispitivanje kvaliteta šavova

4.1.1. Vizuelna kontrola

- sjajna, srebrna boja znači šav visokog kvaliteta, ugao savijanja $\alpha \geq 100^\circ$
- slamnato-žuta boja – dobar kvalitet, $\alpha = 90^\circ$ (srebrna boja se postiže četkanjem posle hlađenja)
- bledo-plava boja – uslovno zadovoljava, $\alpha < 90^\circ$ (obavezno je četkanje posle hlađenja)
- tamno-plava, ljubičasta je diskutabilna, $\alpha \ll 90^\circ$ (poboljšanje kvaliteta se postiže četkanjem ili brušenjem)
- mat-bela (boja krede koja se peruta) ili mat žuta, $\alpha = 0$, ne zadovoljava i ne može se popraviti nikakvim postupkom, jer je došlo do linearne oksidacije.

4.1.2. Penetrantska kontrola

Kontrola na pojavu prslinama se vrši penetrantima i to 48 h nakon zavarivanja (zakasnele hladne prsline).

4.1.3. Radiografska kontrola

Radiografska kontrola nije preporučljiva jer šav može da bude loš, a da na filmu pokazuje da je BN (bez nalaza).

4.1.4. Kontrola sa razaranjem

Najčešća kontrola sa razaranjem vrši se savijanjem epruvete, statički ili dinamički. Prihvatljiv kvalitet je ugao savijanja veći od 60° .

4.1.5. Termofizički procesi u toku zavarivanja

Za dobijanje povoljne strukture šava potrebno je da se odredi vreme hlađenja $t_{9/4}$. Termo-fizički procesi u toku zavarivanja su u funkciji brzine hlađenja. Pri velikoj brzini hlađenja struktura je igličasta i martenzitna pa je šav krt (Widmanštetenova struktura). Ako je vreme hlađenja dugo, struktura je krupnozrnasta, pa je šav opet krt. Potrebno je dovesti brzinu hlađenja u optimalne granice.

4.1.6. Način izračunavanja vremena hlađenja $t_{9/4}$

Vreme $t_{9/4}$ se odnosi na temperaturni interval od temperature fazne transformacije $\beta \leftrightarrow \alpha$ na $t = 882^\circ\text{C}$, pa do temperature kada reakcija apsorpcije gasova nije više intenzivna, odnosno kada se dešavaju samo površinski uplivi O_2 , N_2 , H_2 i C_2 koji se nakon potpunog ohlađenja (do $t \approx 60^\circ\text{C}$) uklanjaju obavezno četkanjem četkom od

nerđajućeg materijala. Tako se postižu dobre mehaničke osobine.

Da bi se odredilo vreme $t_{9/4}$ neophodno je prvo da se izračuna granična debljina prema formuli za d_{gr} . Ukoliko je stvarna debljina manja od izračunate granične vrednosti, za izračunavanje toplotnog imputa koristi se 2D model provođenja toplote. U suprotnom, primenjuje se 3D model provođenja toplote. U konkretnom slučaju je stvarna debljina titana $d = 2 \text{ mm}$, pa je:

$$d_{gr} = \sqrt{\frac{Q}{2\rho C} \left(\frac{1}{400 - T_o} + \frac{1}{882 - T_o} \right)} \quad (4)$$

gde su:

Q – unesena energija, $Q = UI\varepsilon$ [W], $\left[\frac{J}{s} \right]$

T_o – početna temperatura OM (20°C)

d – debljina koja se zavaruje (mm)

ε – koeficijent toplotne efikasnosti za TIG, $\varepsilon = 0,6 - 0,65$

V – brzina zavarivanja, $V = 4,2 \text{ mm/s}$ (eksperimentalno)

ρ – gustina, $\rho = 4,5 \text{ g/cm}^3$

C – specifična toplota za Ti, $C = 523 \text{ J/kgK}$

Sledi da je:

$$d_{gr} = \sqrt{\frac{900}{2 \cdot 4,5 \cdot 523} \left(\frac{1}{400 - 20} + \frac{1}{882 - 20} \right)}$$

$$d_{gr} = 15,5 \text{ mm}$$

odnosno, pošto je $d_{gr} > d$, dalje sledi primena 2D modela.

4.1.7. Izračunavanje vremena hlađenja $t_{9/4}$

Izračunavanje vremena hlađenja $t_{9/4}$ izvršeno je primenom analitičkog 2D modela za titan debljine 2mm prema jednačini:

$$t_{882/400} = \frac{Q^{x2}}{4\pi\lambda C\rho d^2} \left[\frac{1}{(400 - T_o)^2} - \frac{1}{(882 - T_o)^2} \right] \quad (5)$$

gde su:

$Q = \varepsilon \frac{UJ}{v} \left[\frac{J}{mm} \right]$ – količina unete energije (toplotne) ili unos toplote za određeno vreme hlađenja

$\varepsilon = 0,65$ – termička efikasnog TIG-zavarivanja



$I_z = 90 \text{ A}$ – jačina struje zavarivanja

$U = 12 + 0,004I_z = 12,36 \text{ V}$ – napon zagrevanja

$V = 4,2 \text{ mm/s}$ – brzina zavarivanja

$\lambda = 22 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}} \right] = \left[\frac{\text{J}}{\text{sm}^0\text{K}} \right]$ – toplotna provodljivost

$C = 523 \text{ [J/kg}^0\text{K]}$ – specifična toplota

$\rho = 4,5 \text{ [kg/dm}^3]$ – gustina

$d = 2 \text{ mm} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ – debljina titana

Zamenom vrednosti u jednačini (5)

$$t_{882/400} = \frac{\left(0,65 \frac{12,36 \cdot 90}{4,2}\right)^2}{4\pi \cdot 22 \cdot 523 \cdot 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot (2 \cdot 10^{-3})^2} \left[\frac{1}{(400 - 20)^2} - \frac{1}{(882 - 20)^2} \right]$$

dobijeno vreme hlađenja iznosi: $t_{882/400} = 63,7 \text{ s}$.

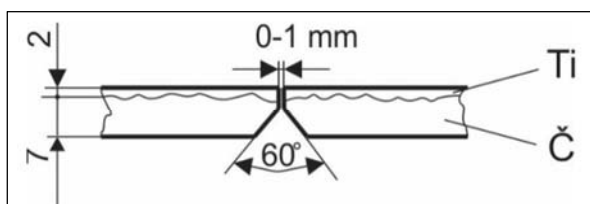


Slika 9. Ugao savijanja titana 83° , (kriterijum prihvatljivosti savijanja 60°)

Figure 9. Bending angle of titanium 83° , (bending acceptance criterion 60°)

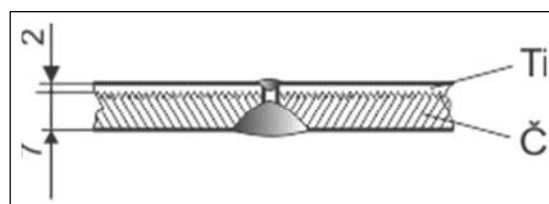
Nakon spajanja Ti i Č eksplozijom na poligonu, izvršeno je čišćenje površine titana, pranje deterđentom i vodom radi uklanjanja prljavštine i ostataka od eksplozije. Ravnanje deformisanih delova kompozita urađeno je na valjcima prilikom rolovanja na zadati radijus. Ukрупnjavanju

segmenata u plašt prethodila je priprema ivice za zavarivanje. Priprema je izvedena ručnim brušenjem i turpijanjem u smeru od titana prema čeliku kako se ne bi nanosili opiljci od čelika na titan. Polirkama, tj. brusnim papirom za INOX, očišćena je površina titana u širini do 30 mm od ivice koje se zavaruju.



Slika 10. Priprema sučeonog spoja dvoslojnog kompozita Ti/Č

Figure 10. Preparation of butt joint of two-layer composite Ti/Č



Slika 11. Prikaz načina zavarivanja dvoslojnog kompozita Ti/Č

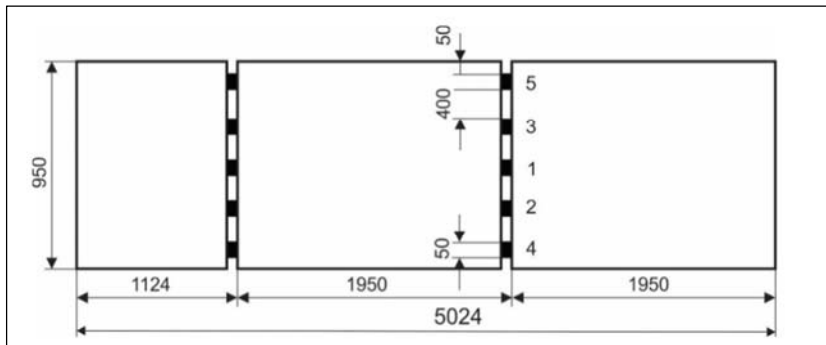
Figure 11. Presentation of the method for welding the two-layer Ti/Č composite



5.2. Pripajanje segmenata

Ukupnjavanje i centriranje za spajanje dvoslojnog kompozita Ti/Č zavarivanjem urađeno je upotrebom hidraulike u specijalnom alatu.

Privarivanje je rađeno na titanu od sredine segmenata levo i desno prema krajevima. Na tom principu su izvršena sva pripajanja sučeonih zavara.



Slika 12. Dužina privara i redosled izvođenja privara

Figure 12. The length of the temporary weld and the sequence of the temporary weld

5.3. Ukupljeni segmenti za rolovanje i izradu plašta Ø1600 mm

Dvoslojni kompozit Ti/Č bilo je potrebno opkrojiti posle eksplozije, odnosno ukloniti rubne efekte radi loše prionljivosti u širini 25 mm (efekat biča). Tako su se dobile plakirane ploče za ugradnju dimenzije 950 x 1950 mm.

Posle spajanja – ukupnjavanja ploča na potrebnu dužinu prišlo se zavarivanju plakature. Zavarivao se prvo titan od sredine prema krajevima levo i desno, a potom se zavarivala strana čelika, poluautomatskim postupkom, pri čemu je zaštitni gas bio argon. Vodilo se računa da ne dođe do kontakta titana i čelika u toku zavarivanja.

Tabela 5. Parametri MIG-zavarivanja čelika na dvoslojnoj kompozita Ti/Č

Table 5. Parameters of MIG-welding of steel on two-layer Ti/ Č composite

Struja zavarivanja I_z [A]	Napon zavarivanja U_z [V]	Dodatni materijal	Prečnik žice d [mm]	Zaštitni gas Ar [l/min]	Brzina dotoka žice [m/min]
100	19	VAC – 60 SG 2	1	16-18	3



Slika 13. Penetrantska kontrola potvrđuje da nije došlo do kontakta između Ti i čelika u toku zavarivanja

Figure 13. Penetrant control confirms that it did not occur contact between Ti and steel during welding



Po završenom zavarivanju kompletnog šava izvršeno je četkanje titana, pa su zavari po hlađenju imali srebrnu boju. Za vreme zavarivanja čelika titan se štiti argonom od temperaturnog uticaja i reakcije Ti sa gasovima iz vazduha. Ukrupnjeni i zavareni segmenti su rolovani na mašini sa pet valjaka.

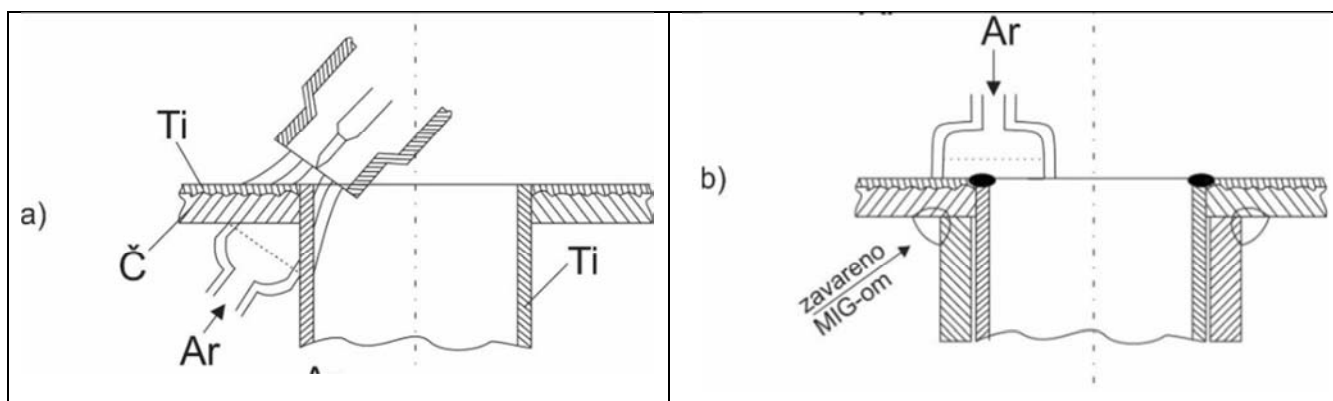
5.4. Zavarivanje priključaka i ugaonih varova

Zavarivanje priključaka i ugaonih varova vršeno je sa parametrima zavarivanja prikazanim u Tabeli 6 i pod uslovima prikazanim na slici 14.

Tabela 6. Parametri zavarivanja titana na dvoslojni kompozit

Table 6. Parameters for welding titanium on two-layer composite

Vrsta struje	Netopiva elektroda od WTh , [mm]	Jačina struje zavarivanja I_z , [A]	Napon zavarivanja U , [V]	Brzina zavarivanja, [mm/s]
Jednosmerna (-)	Ø2,4	150	16,5	3



Slika 14. Zavarivanje priključaka: a) zavarivanje priključaka Ti/Ti, b) zavarivanje priključaka Č/Č

Figure 14. Welding of connections: a) welding of Ti/Ti connections, b) welding of Č/Č connections

Ugaoni var Ti/Ti zavaren je bez dodatnog materijala. Posle zavarivanja titanove cevčice vrši se navlačenje cevčice od čelika i zavaruje se čelik od plakature sa čeličnom cevčicom MIG-postupkom.

5.5. Ispitivanje varova

Nakon zavarivanja izvršena su osnovna ispitivanja:

- a) Vizuelno – kontrolisana je boja šavova. Nakon četkanja u hladnom stanju boja svih varova bila je srebrno-bela.

- b) PT kontrola – Kontrola penetrantima vršena je 48 h nakon zavarivanja zbog mogućnosti pojave hladnih – zakasnelih prskotina. Svi varovi su zadovoljili penetrantsku kontrolu.
- c) Hladna proba – Posuda je napunjena vodom i držana na dogovoreni pritisak od 3 bara u vremenu od 30min. Nisu se javila mesta koja vlaže, niti pad pritska na manometru. Nakon svih kontrola i ispitivanja reaktor je pušten u proces. Reaktor je bio u pogonu 5 godina, sve dok nije došlo do gašenja pogona.



6. Zaključak

U radu je detaljno opisan način izrade dvoslojnog kompozita titan-čelik (Ti/Č). Detaljno je opisan i način meranja brzine eksplozivne smeše koja je bitna za izradu plakature titana i čelika. Prikazan je način izračunavanja kritičnog vremena hlađenja $t_{9/4}$ za titan debljine 2 mm. Poseban problem bio je određivanje vremena hlađenja kompozita pri zavarivanju Ti i to se rešilo eksperimentima, primenom predgrevanja kako bi se usporilo pothlađivanje.

Izvršena su ispitivanja uzoraka savijanjem i najbolji rezultati nakon predgrevanja uzeti su za osnovu daljeg rada. Ti rezultati važe za uslove koji su tada vladali, spoljna temperatura je bila -3 do 2°C.

Izvršena je analiza osnovnog i dodatnog materijala za titan.

Proračunati su i definisani parametri i uslovi zavarivanja. Izvršena je probna izrada dvoslojnog kompozita i zavarivanja titana i čelika. Na osnovu dobijenih dobrih rezultata izvršena je izrada reaktora.

Kvalitet izrade proveren je kontrolama bez razaranja: vizuelno i penetrantima. Kontrole su zadovoljile nivo kvaliteta prema standardu SPRS EN ISO 5817 „B“.

Po završetku reaktora izvršena je hladna proba na nepropusnost i na pritisak.

Reaktor je urađen u dogovorenom roku i kvalitetno, te je pušten u pogon. Radio je pet godina, sve dok nije došlo do zatvaranja pogona.

References / Literatura

[1] Aleksa Blagojević, (1982), „Zavarivanje“, Mašinski fakultet Banja Luka, Banja Luka

[2] Inženjersko Tehnički Priručnik (1979), „Zavarivanje“, knjiga 2, RAD Beograd

[3] Inženjersko Tehnički Priručnik (1980), „Zavarivanje“, knjiga 4, RAD Beograd

[4] Mića Đorđević, (2020), „Priručnik za zavarivače“, drugo dopunjeno izdanje, štampa DOART d.o.o. Loznica

6. Conclusion

The paper describes in detail the method of making a two-layer titanium-steel (Ti/Č) composite. The method of measuring the speed of the explosive mixture, which is essential for the production of titanium and steel plaques, is also described in detail. The method of calculating the critical cooling time $t_{9/4}$ for titanium with a thickness of 2 mm is shown. A special problem was the determination of the cooling time of the composite when welding Ti, and this was solved by experiments, using preheating to slow down the undercooling.

Bending tests of the samples were performed and the best results after preheating were taken as the basis for further work. Those results are valid for the conditions that existed at the time, the outside temperature was -3 to 2°C.

An analysis of the basic and additional material for titanium was performed.

The welding parameters and conditions were calculated and defined. Trial production of two-layer composite and welding of titanium and steel was performed. On the basis of the obtained good results, the construction of the reactor was carried out.

The quality of production was checked by non-destructive controls: visually and penetrants. The controls met the quality level according to the SPRS EN ISO 5817 "B" standard.

After the completion of the reactor, a cold leak and pressure test was performed.

The reactor was completed within the agreed time and with high quality, and was put into operation. He worked for five years, until the plant was closed.

[5] Obezbeđenje kvaliteta u zavarivanju, (2012), „Tehnologija zavarivanja prilog D“, izdavači: Institut za standardizaciju Srbije i Društvo za unapređenje zavarivanja u Srbiji, štampa Grafikon UNO, Beograd

[6] Vladimir Semjan, (1978), Izabrana poglavlja iz „Tehnike zavarivanja“, Mašinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, Sarajevo

[7] Vladimir Semjan, (1990), „Određivanje optimalnih parametara zavarivanja“, Energoinvest-Sa, Sarajevo.