

# Popravak zavarivanjem konstrukcija iz titanovih legura

**Dražen ŽIVKOVIĆ<sup>1)</sup>, Igor GABRIĆ<sup>2)</sup> i Slaven ŠITIĆ<sup>2)</sup>**

1) Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje (University of Split, Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture), Rudera Boškovića bb, HR-21000 Split, **Republic of Croatia**

2) Sveučilište u Splitu, Sveučilišni studijski centar za stručne studije (University of Split, Department of Professional Studies), Livanjska 5, HR-21000 Split, **Republic of Croatia**

drazen.zivkovic@fesb.hr

igor.gabric@oss.unist.hr

slaven.sitic@oss.unist.hr

## Ključne riječi

*Ispitivanje zavara  
Reparaturno zavarivanje  
Tehnologija zavarivanja  
Titan legure*

## Keywords

*Repair welding  
Titan alloy  
Welding technology  
Weld testing*

**Received (primljeno):** 2010-12-01

**Accepted (prihvaćeno):** 2011-04-30

## 1. Uvod

U tvornicama cementa unutrašnjost plašta rotacijske peći i hladnjaka vizualno se nadzire pomoću specijalnih TV kamera. Kamere su smještaju u posebna kućišta iz legure titana (Slika 1) sa dvostrukim stjenkama između kojih struji rashladni medij (voda - tretirana sredstvima za omekšavanje). Sam otvor za objektiv kamere dodatno je zaštićen konstantnom strujom hladnog komprimiranog zraka.

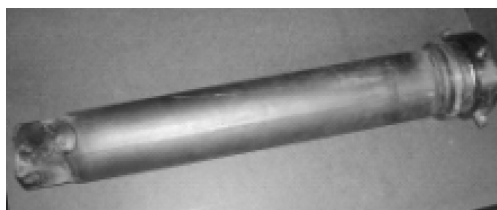
Prethodno priopćenje

Problematika zavarivanja titana i njegovih legura bez korištenja specijalnih komora sa vakuum ili inertnom atmosferom izražena je kod popravaka gdje zavarivani dijelovi mogu biti različitih dimenzija i oblika. Preskupo je za svaki pojedinačni slučaj konstruirati zaštitnu komoru. Najčešće su komore neugodne za zavarivača i ograničavaju uvođenje pištolja i dodatnog materijala. Rad se bavi analizom mogućnosti obavljanja kvalitetnog popravka bez korištenja komore. Praktični dio rada jest popravak zavarivanjem kućišta kamere za snimanje unutrašnjosti plašta peći klinkera u tvornici cementa. Zbog ekstremnih radnih uvjeta dolazi do intenzivnog trošenja dijela plašta, te isti otkazuje ovisno o položaju u peći ili hladnjaku nakon 6 - 12 mjeseci eksploatacije. Popravak se obavlja zavarivanjem TIG postupkom uz primjenu dvostruke sekundarne zaštite zavara (lica i korijena) argonom. Ispitana je mikrostruktura uzoraka, te izmjerena tvrdoća po izvodnici koja se proteže od osnovnog materijala, preko zone utjecaja topline, do samog zavara. Ispitivanje je pokazalo da nema značajnih promjena u mikrostrukturi zavara u odnosu na osnovni materijal, te da su tvrdoće mjerene po izvodnici prilično ujednačene. Nakon ispitivanja uzoraka izvršen je popravak zavarivanjem plašta kućišta. Popravljenom kućište ima vijek trajanja koji odgovara novom kućištu što ukazuje da je sanacija obavljena uspješno.

## Repair Welding of Titanium Alloy Construction

Preliminary note

Problems of welding titanium and titanium alloys, without the usage of special vacuum or inert atmosphere chambers, is expressed in welding repairs where parts may be different sizes and shapes. It would be too expensive to construct a protective atmosphere chamber for each individual case. Chambers usually are awkward for welders and also limit the process control. The purpose of this work is to find out the possibilities for performing quality repairs without the use of the special chamber. The practical part of our work deals with repair welding of clinker furnace camera case in a cement factory. The extreme working conditions lead to intensive wear of the camera case. Depending on the location in the clinker furnace it needs to be changed or repaired after 6-12 months of exploitation. Repair is done by TIG welding process using dual secondary weld protection (face and root) with argon. The microstructure of the samples was analysed, and also hardness tests were done on the base material, heat affected zone and the weld. The study showed no significant changes in the microstructure of welds in relation to the base material, and the results of hardness tests were fairly uniform. After acceptable testing results the repair of camera case was done. The repaired camera case had the same exploitation life as the new case. This indicates that the repairs were carried out successfully.



**Slika 1.** Kućište kamere iz titanove legure

**Figure. 1.** The camera Titan alloy case

**Oznake/Symbols**

*HV10* - tvrdoća po Vickers-u s primjenjenom silom utiskivanja 10 kp  
- hardness according to Vickers with applied force 10 kp

*I* - struja zavarivanja  
- welding current, A

*d<sub>e</sub>* - promjer elektrode  
- electrode diameter, mm

*d<sub>s</sub>* - promjer keramičke sapnice  
- ceramic nozzle diameter, mm

*Q<sub>p</sub>* - protok plina primarne zaštite  
- primary shielding gas flow, l/min

*Q<sub>s2</sub>* - protok plina sekundarne zaštite korijena zavara  
secondary weld root shielding gas flow, l/min

**Grčka slova/Greek letters**

*α* - heksagonska gusto pakirana rešetka titana stabilna na temperaturi okoline  
- hexagonal close packet titanium lattice stable at ambient temperature

*β* - prostorno centrirana kubna rešetka titana stabilna na povišenim temperaturama  
- body centered cubic titanium lattice stable at elevated temperature

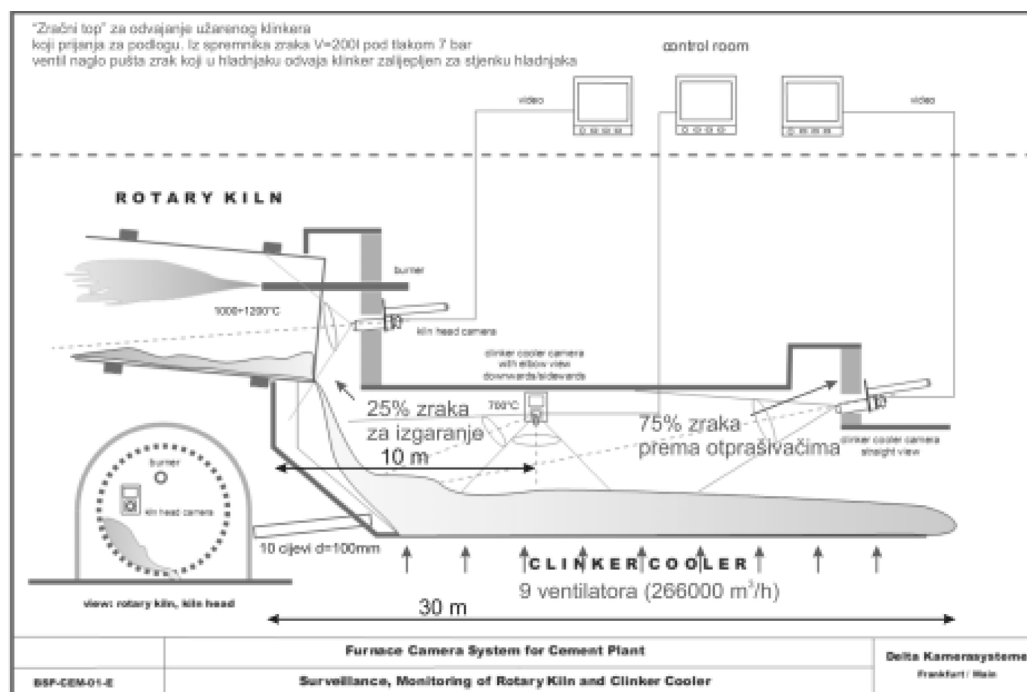
Shematski izgled rotacijske peći i hladnjaka s ucrtanim smještajem kamera prikazan je na Slikama 2 i 3. Temperature unutar rotacijske peći kreću se između 1000 i 1200 °C, a unutar hladnjaka oko 700 °C.

Površina titana na sobnoj temperaturi reagira sa kisikom iz zraka i vrlo brzo nastaje nepropusni sloj TiO<sub>2</sub> koji metalu daje visoku antikoroziivnost [2]. Iznad 400 °C titan postaje visoko reaktivan materijal. Površinski sloj rutila (TiO<sub>2</sub>) puca, te ne predstavlja više zaštitu metala koji se nalazi ispod ovog sloja.

Tada dolazi do difuzije kisika i dušika iz zraka u podpovršinske slojeve, stvarajući tako krte slojeve s

uključinskim mješancima. To slabi izvorna svojstva metala. Na mjestima najvećih koncentriranih naprezanja (mjesto nagle promjene oblika - zavar) dolazi do nastajanja pukotina. Oštećeni plašt kamere prikazan je na Slici 4.

Ako iz određenog razloga u eksploataciji (nastajanje taloga ili kamenca na unutarnjoj stjenki kućišta (Slika 5), dođe do prekida ili smanjenja intenziteta hlađenja, dolazi do prekomjernog zagrijavanja kućišta kamere. Osim visoke temperature dio vrha kućišta kamere, unutar hladnjaka klinkera, izložen je povremenoj struji vrućeg zraka koja u sebi sadrži abrazivne čestice. To uzrokuje

**Slika 2.**

Sustav nadzora postrojenja za proizvodnju cementa [1]

**Figure 2.** Furnace camera system for cement plant [1]



Slika 3. Kućište kamere prije uvlačenja u prostor hladnjaka klinkera

Figure 3. The camera case before placing in the clinker cooler



erozijsko trošenje izložene površine. Sanacija ovako oštećenog kućišta kamere izvodi se zamjenom oštećenog dijela plašta. Vijek trajanja novog kućišta iznosi 6 do 12 mjeseci, što ovisi o položaju kućišta (rotacijska peć ili hladnjak klinkera).



Slika 4. Oštećeno kućište kamere

Figure 4. Damaged camera case



Slika 5. Kamenac na unutarnjem dijelu plašta

Figure 5. The scale inside the camera case

## 2. Izbor tehnologije popravka

Zbog dostupnosti i cijene opreme odabran je TIG postupak zavarivanja uz dvostruku sekundarnu zaštitu inertnim plinom [3]. Izbor zamjenskog i dodatnog materijala napravljen je na temelju kemijske analize osnovnog materijala. Prije samog popravka napravljena su probna zavarivanja 3 uzorka, te je provedeno njihovo ispitivanje kako bi se utvrdila ispravnost predložene tehnologije zavarivanja.

### 2.1. Analiza kemijskog sastava materijala

Visoki intenziteti Ti, V i Cr i nešto manji spektri Al, Fe, i Cu ukazuju da se najvjerojatnije radi o leguri Ti-13V-11Cr-3Al (UNS R58010), Tablica 1. Ova legura spada u grupu dobro zavarljivih metastabilnih  $\beta$ -titanovih legura. Kod izbora zamjenskog i dodatnog materijala vodilo se računa da kemijski sastav bude što bliži osnovnom materijalu, te da se izabrani materijal može lako nabaviti. Odabrani materijal za popravak je Ti-6Al-4V (UNS R56400). Kemijski sastavi materijala dani su tabelarno [4]:

Tablica 1. Kemijski satav osnovnog i dodatnog materijala

Table 1. Chemical composition of the base and the filler material

	Legirni elementi / Alloying elements, %			Nečistoće – max. / Impurities - max, %				
	Al	V	Cr	N	C	H	Fe	O
Ti-13V-11Cr-3Al	2,5-3,5	12,5-14,5	10-12	0,05	0,05	0,025	0,35	0,17
Ti-6Al-4V	5,5-6,75	3,5-4,5	-	0,05	0,1	0,01	0,3	0,2

## 2.2. Probno zavarivanje uzoraka

Da bi se ocijenila prihvatljivost predložene tehnologije zavarivanja, izvršeno je probno zavarivanje uzoraka. Izrađene su 3 probne epruvete dimenzija 50x50x2 mm. Zbog nemogućnosti nabavke izvornog materijala plašta kućišta kamere, kao materijal za izradu epruveta koristio se lim iz legure Ti-6AL-4V. Ispitana je tvrdoća duž izvodnice (koja se proteže od osnovnog materijala preko zone utjecaja topline do zavara), zatim mikrostruktura kao i čvrstoća na savijanje. Temeljem rezultata ispitivanja usvojena je predložena tehnologija zavarivanja.

### 2.2.1. Opis postupka zavarivanja

Probni uzorci su zavareni TIG postupkom zavarivanja uz sekundarnu zaštitu zavara bez korištenja specijalne komore za zavarivanje (Slika 6). [5].

Lice zavara se dodatno sekundarno štiti pomoću posebnog dodatka na keramičkoj sapnici pištolja za distribuciju sekundarnog zaštitnog plina s produženim stražnjim dijelom (5 cm) koji štiti neohlađeni zavar (Slika 7) [6]. Dodatak za distribuciju plina je izrađen iz nehrđajućeg čelika.



**Slika 6.** Zavarivanje probnih uzoraka  
**Figure 6.** Welding of the specimens

Korijen zavara se štiti po cijeloj dužini zavara pomoću posebno pripremljene naprave [6], a koja se sastoji od bakrenog tijela (zbog intenzivnijeg odvođenja topline) s kanalom za distribuciju plina sekundarne zaštite korijena zavara. Pomoću dvije stezaljke epruveta se postavljala na poziciji za zavarivanje (Slika 8).



**Slika 7.** Naprava za sekundarnu zaštitu lica zavara  
**Figure 7.** Device for secondary protection of the weld face

Dovod sekundarnog zaštitnog plina (argona) odvojen je od primarne zaštite te se njegov protok posebno regulira. Neposredno prije zavarivanja uklanjaju se površinski oksidi sa uzoraka četkom iz nehrđajućeg čelika te se čiste acetonom. Zavarivanje se obavlja u jednom prolazu. Parametri zavarivanja su prikazani u Tablici 2. Protok

plina primarne i sekundarne zaštite namješten je tako da štiti zavar i njegovu okolinu dok temperatura ne padne ispod 400 °C (titan i titanove legure zbog velike sklonosti upijanja plinova na temperaturama iznad 400 °C moraju biti u potpunosti zaštićene od utjecaja atmosfere).



**Slika 8.** Naprava za zavarivanje uzoraka  
**Figure 8.** The specimen welding device

**Tablica 2.** Parametri zavarivanja

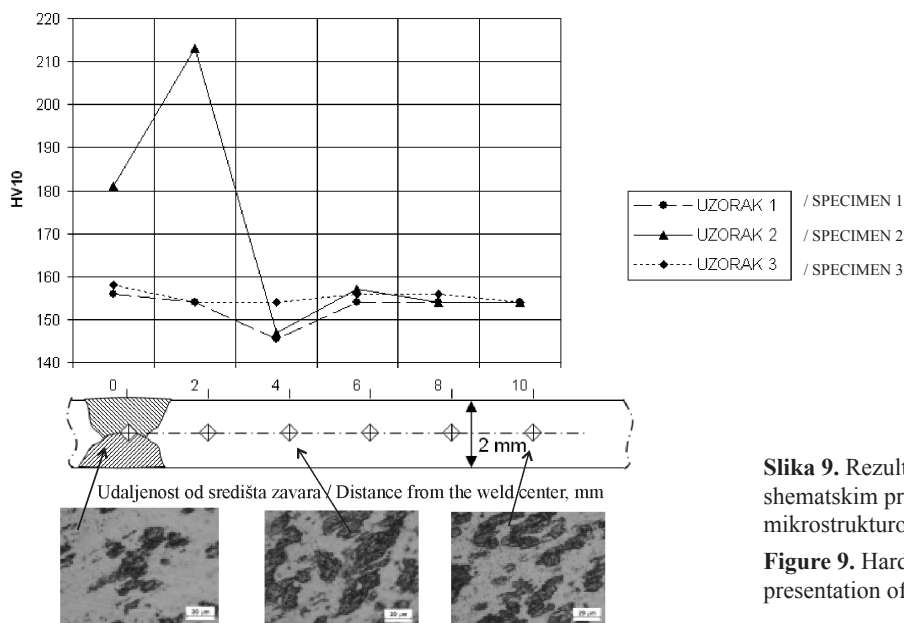
**Table 2.** Welding settings

Struja zavarivanja / Welding current, $I$	150A DC EN
Elektrode / Electrode, $d_e$	EW Th-1 Ø1,6 [mm]
Promjer plinske sapnice / Diameter of the gas nozzle $d_s$	Ø19, [mm]
Zaštitni plin / Shielding gas	99,996 % Ar
Protok zaštitnog plina / Shielding gas flow, $Q_p$ Primarna zaštita / Primary shield	12 [l/min]
Protok zaštitnog plina / Shielding gas flow $Q_{s1}$ Sekundarna zaštita lica zavara / Secondary protection of the weld face	5 [l/min]
Protok zaštitnog plina / Shielding gas flow $Q_{s2}$ Sekundarna zaštita korijena zavara / Secondary protection of the weld root	5 [l/min]

## 2.3. Analiza tvrdoće probnih uzoraka

Mjerenje tvrdoće na probnim uzorcima izvršeno je nakon zavarivanja uzduž izvodnice koja se proteže po središtu presjeka iz osnovnog materijala preko zone utjecaja topline pa do zavara (Slika 9). Mjerenje je izvršeno po Vickers-u HV10 uz primijenjenu silu 98,1[N]. Rezultati ispitivanja prikazani su u dijagramu na Slici 9. Izmjerene tvrdoće se podudaraju za uzorak 1 i 3. Uzorak br. 2 je pokazao veću tvrdoću zavara i zone utjecaja topline zbog loše zaštite prilikom zavarivanja (zavarivanje bez sekundarne zaštite sa lica zavara). Povećana tvrdoća ukazuje na kontaminaciju kisikom i dušikom koji povećavaju tvrdoću i krtost materijala.

Uzorci 1 i 3 koji su zavareni primjenom dvostruke sekundarne zaštite (lica i korijena zavara) imaju ujednačenu tvrdoću duž cijele izvodnice, što je jedan od pokazatelja ispravnog izbor postupka zavarivanja.

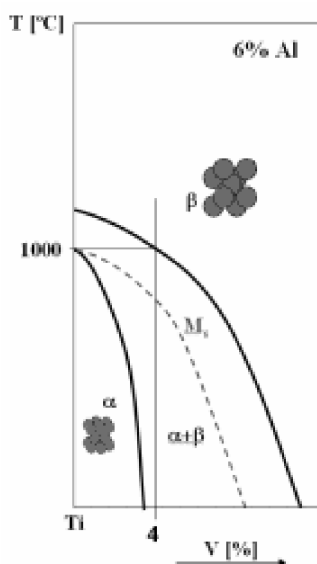


Slika 9. Rezultati mjerenja tvrdoće sa shematskim prikazom mjernih mjesta i mikrostrukturom

Figure 9. Hardness test results with schematic presentation of test positions and microstructure

2.4. Analiza mikrostrukture

Na Slici 10 prikazan je dio pseudobinarnog dijagrama slijevanja za legure (Ti6Al)-V i to za koncentraciju od 6 % Al. U dijagramu je istaknuta koncentracija 4 %V, te temperatura 1000 °C koja odgovara temperaturi pretvorbe u  $\beta$  fazu za odabranu leguru. Isto tako u dijagramu je i označena  $M_s$  linija koja, prilikom gašenja s temperatura oko 1000°C, predstavlja temperaturu modifikacije rešetke prostorno centriranog kuba u kompaktni heksagon bez difuzije [7].

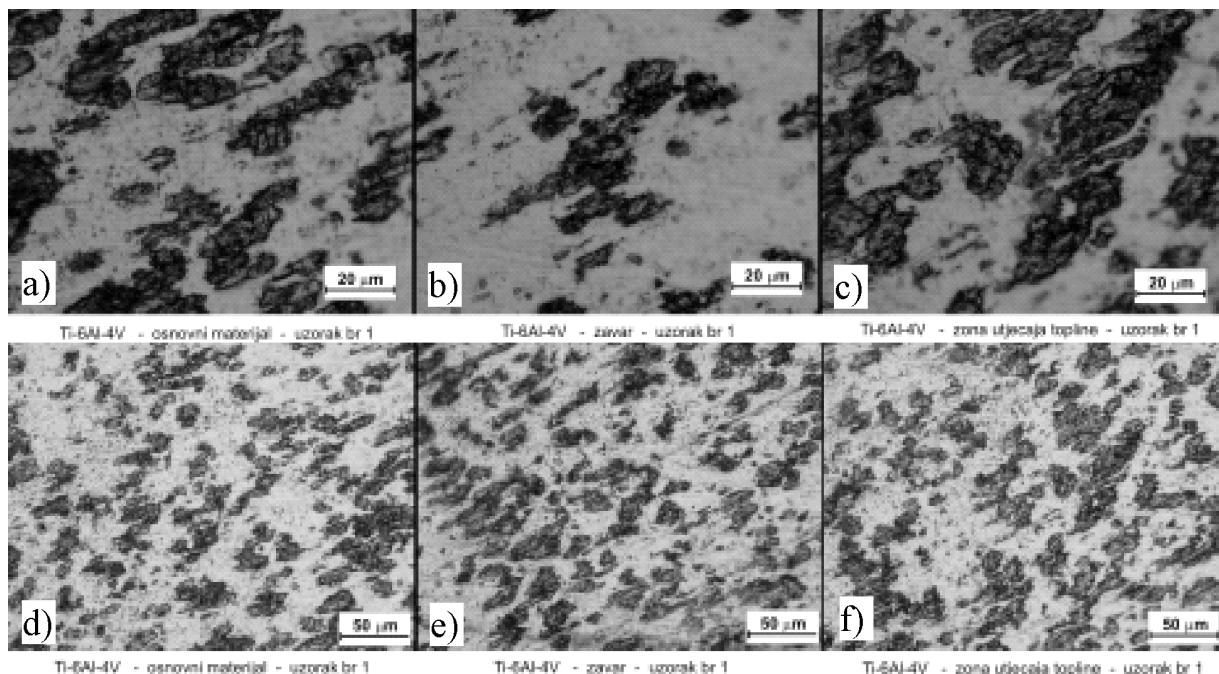


Slika 10. Pseudobinarni dijagram legura Ti6Al – V  
Figure 10. Pseudobinary dyagram of alloys Ti6Al-V

Zbog različitih temperatura zagrijavanja i brzina hlađenja duž poprečnog presjeka zavara, nastaju različite mikrostrukture i različita mehanička svojstva. Cilj probnih zavarivanja je da ove razlike budu što manje.

Vidimo da prilikom zavarivanja sam zavar prolazi kroz sva temperaturna područja od taline, preko homogenog  $\beta$  do heterogenog  $\alpha+\beta$  područja. Kako se radi o bržem hlađenju (hlađenje brzine reda veličine 30-50 °C/s), spuštaju se temperature pretvorbe. Dolazi do djelomične transformacije  $\beta$  faze ( $M_f$  je ispod sobne temperature), pa odabrana legura na sobnoj temperaturi sadrži kombinaciju prezasićene  $\alpha'$  faze i nepretvorene  $\beta$  faze. Zona utjecaja topline je ovisno o udaljenosti od zone taljenja bila zagrijana u rasponu od najviših temperatura iz visokog  $\beta$ . područja pa naniže. U dijelu presjeka koji je hlađen s temperatura iznad linije pretvorbe u  $\beta$  (iznad 1000°C) došlo je do potpunog rastvaranja  $\alpha$  faze, tako da je legura prije hlađenja imala izvornu koncentraciju legirnih elemenata u svojoj  $\beta$  rešetki. To je dovelo do konačne strukture sa nešto smanjenom količinom nepretvorene  $\beta$  faze nakon hlađenja (Slike 11b i 11e) u odnosu na osnovni materijal. Mikrostruktura osnovnog materijala je prikazana na Slikama 11a i 11d. Udaljeniji dio zone utjecaja topline, koji je zagrijan ispod linije pretvorbe u  $\beta$  fazu, sadržavao je prije hlađenja dio nepretvorene  $\alpha$  faze i ostatak  $\beta$  faze (koja je u ovom slučaju bila bogatija legirnim elementima), pa je nakon hlađenja na sobnu temperaturu struktura bila bogatija nepretvorenom  $\beta$  fazom od osnovnog materijala (Slike 11c i 11f).

Povećanjem udjela  $\beta$  faze tvrdoća se nešto smanjuje. Tvrdoća samog zavara je nešto veća zbog većeg udjela martenzitične  $\alpha'$  faze. Na prikazanim snimcima mikrostrukture nije moguće razlikovati  $\alpha$  i  $\alpha'$  fazu. U

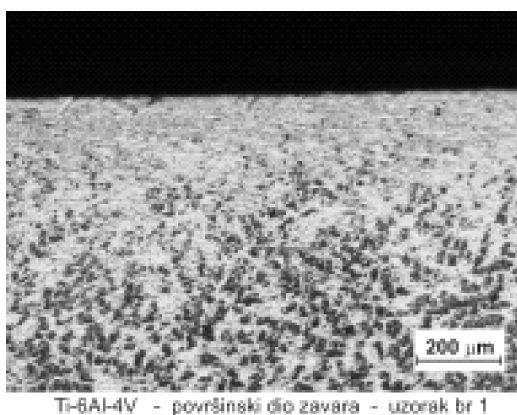


**Slika 11.** Metalografske slike legure Ti-6Al-4V (dva različita povećanja) - osnovni materijal – zavar – zona utjecaja topline  
Nagrizanje: Kroll-ov reagens 100 ml voda, 2 ml HF, 5 ml HNO<sub>3</sub> [8]

**Figure 11.** Metallographic photos of alloy Ti-6Al-4V (two different magnifications) – base material –weld-heat affected zone  
Etching: Kroll reagents 100 ml water, 2 ml HF, 5 ml HNO<sub>3</sub> [8]

slučaju potrebe dobivanja ravnomjernije strukture može se obaviti toplinska obradba žarenja na temperaturi nešto ispod 1000 °C u visoko heterogeno područje.

Slici 12 prikazana je mikrostruktura površinskog dijela zavara. Uočljivo je da sama površina do dubine cca 0,2 mm ima strukturu  $\alpha+\alpha'$ . Do ove pojave je došlo zbog kontaminacije same površine plinovima iz zraka (koji stabiliziraju  $\alpha$  fazu). Iako je zavar bio sekundarno zaštićen inertnim plinom turbulencije pri strujanju zaštitnog plina mogle su djelomično usisati i dio zraka iz okolne atmosfere. Radi se o blagoj kontaminaciji uskog površinskog sloja koju je dobro ukloniti mehaničkim putem, jer se radi o krtoj fazi sklonoj nastajanju pukotina.



**Slika 12.** Mikrostruktura površine zavara

**Figure 12.** The weld surface microstructure

## 2.5. Proba savijanja

Proba savijanja je obavljena na sva tri uzorka do kuta 180°. Savijanje je izvršeno u napravi sa 3 valjka od kojih je srednji bio promjera 12 mm (6x2mm) [9]. Na površini u vlačnoj zoni na uzorcima 1 i 3 nema nikakvih tragova pucanja, dok se na uzorku 2 uočava više površinskih prskotina (uzorak br.2 je zavaren bez sekundarne zaštite korijena zavara). Na Slici 13 prikazano je ispitivanje epruvete i uzorci nakon ispitivanja. Na Slici 14 vide se površine vlačnih zona epruvete nakon savijanja pod povećanjem 10X.

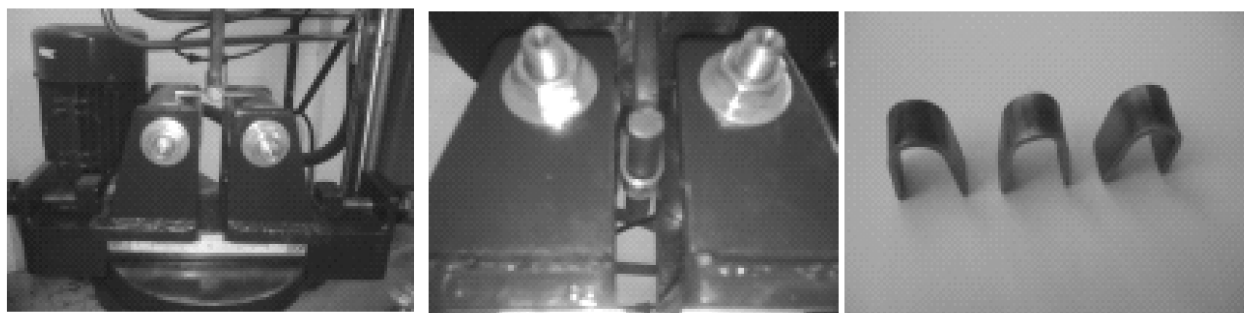
## 2.6. Ocjena tehnologije zavarivanja

Uzorci 1 i 3, zavareni predloženom tehnologijom, imali su ujednačenu tvrdoću duž centralne izvodnice, pokazali su neznatna odstupanja u mikrostrukturi, te zadovoljili probu savijanja.

Obavljena ispitivanja potvrđuju ispravnost odabrane tehnologije zavarivanja.

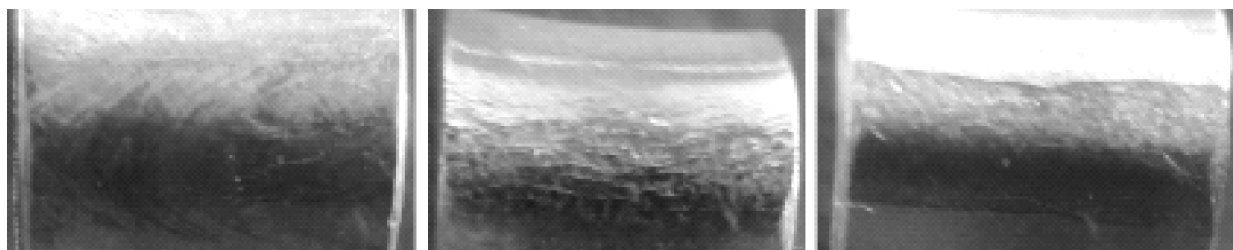
## 3. Tehnologija popravka

Popravak kućišta kamere obavlja se u više faza. Izvršena je detekcija oštećenja (može sadržavati pukotine, rupice, smanjenje debljine stjenke), te je piljenjem uz intenzivno hlađenje rashladnom emulzijom



**Slika 13.** Savijanje epruveta i epruvete nakon savijanja

**Figure 13.** Specimen bending and test results – bended specimens



**Slika 14.** Površina vlačne zone epruvete nakon savijanja

**Figure 14.** The specimen surface of the tensile zone after bending

izrezan oštećeni dio plašta. Ne smiju se koristiti brusilice s reznim pločama zbog kontaminacije rubova budućeg zavara vezivim sredstvom i brusnim zrcima. Unutrašnji dio između dva plašta obično sadrži nešto kamenca i taloga koji treba očistiti i isprati. Kućište treba osušiti zagrijavanjem na temperaturu oko 100 °C. Sušenje je najbolje obaviti neposredno prije zavarivanja. Četkanje se vrši isključivo četkama iz titana ili nehrđajućeg čelika. Odabran je TIG postupak zavarivanja uz dvostruku sekundarnu zaštitu inertnim plinom.

Izbor zamjenskog i dodatnog materijala napravljen je na temelju kemijske analize osnovnog materijala.

Iz odabranog materijala napravljen je zamjenski dio plašta i neposredno prije zavarivanja očetkan i očišćen pomoću acetona, te postavljen u poziciju na koju će biti zavaren na kućištu. Kako ne bi došlo do smicanja uslijed zavarivanja i povećanja zračnosti među spajanim dijelovima za vrijeme zavarivanja, prije zavarivanja izvršeno je njihovo pripajanje (Slika 15). Naravno, i pripajanje treba biti izvršeno uz adekvatnu zaštitu (primarnu i sekundarnu).

Sekundarna zaštita korijena zavara u našem slučaju je obavljena propuhivanjem unutrašnjosti kućišta inertnim plinom u trajanju od 15 [min] uz protok plina 10 [l/min]. Kućište je postavljeno na način da se mjesto zavarivanja nalazi u gornjoj zoni. Kako je argon teži od zraka, on ispunjava komoru kućišta odozdo na gore istiskujući zrak. Nakon određenog vremena propuhivanja atmosfera u kućištu postaje inertna. Osim primarne zaštite na pištolj

za zavarivanje je postavljena i produžena sapnica iz nehrđajućeg čelika sa sekundarnom zaštitom lica zavara. Pripajanje je obavljeno TIG postupkom. Za pripajanje i zavarivanje kao dodatni materijal korištena je žica za TIG zavarivanje promjera Ø2 mm iz legure Ti-6Al-4V.



**Slika 15.** Pripojeni dio plašta kućišta

**Figure 15.** Tack welded case parts

Zavarivanje je obavljeno u više faza kako ne bi došlo do pretjeranog zagrijavanja okolnog materijala. Zavarivani su segmenti u duljini cca 50 mm uz pauze dostatne da se komad ohladi na temperaturu ispod 50°C. Zavareni plašt, prije čišćenja oksida sa površine, prikazan je na Slici 16.

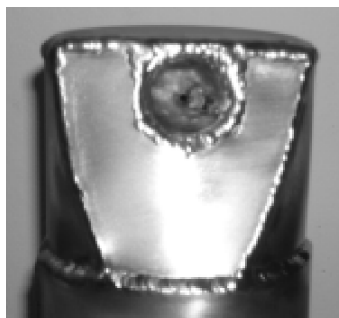
Boje oksida na površini zavara ukazuju na njegovu kvalitetu koja ovisi o zaštitnoj atmosferi (prema Tablici 3).

Nakon zavarivanja obavljen je vizualni pregled zavara, četkanje površinskih oksida (Slika 17) i provjera nepropusnosti tlačnom probom pri tlaku 5 bar u trajanju 60 min.



**Slika 16.** Završeni plašt kućišta kamere prije uklanjanja oksida

**Figure 16.** Welded camera case sheath before removing the oxide



**Slika 17.** Završeni plašt kućišta kamere nakon čišćenja oksida

**Figure 17.** Welded camera case sheath after removing the oxide

**Tablica 3.** Boje oksida zavara [9]

**Table 3.** The weld oxid colours [9]

Boja zavara / Weld number	Uzrok i tretman / Specimen and treatment
srebrna / silver	Uredan zavar / valid weld
žućkasta, svjetloplava / yellowish, light blue	Površinski oksid. Ukloniti četkanjem s četkom iz nehrđajućeg čelika. / Surface oxides. Removed by brushing with a stainless steel brush
tamnoplava, siva / dark blue, gray	Loše. Kontaminacija zavara. Zavar ukloniti i zavarivanje ponovno obaviti nakon korekcije zaštite. / Poor. Contamination of the weld. Remove the weld and repeat welding after correction of the gas shield protection
bijela / white	Ekstremno loše. Kontaminacija zavara i zone utjecaja topline. Zavar i zonu utjecaja topline treba ukloniti i zavarivanje ponovno obaviti nakon korekcije zaštite. / Extremely poor. Contamination of the weld and heat affected zone. Remove the weld and heat affected zone, repeat the welding after correction of the gas shield protection.

#### 4. Zaključak

Popravak kućišta titanove kamere može se uspješno obaviti gore opisanom tehnologijom. Kao potvrda rečenog koristi nam povratna informacija o vijeku trajanja popravljenog kućišta koji odgovara vijeku trajanja novonabavljenog. Zavarivanja bez korištenja skupih specijalnih vakuum komora ili komora sa inertnom atmosferom omogućuju bolju kontrolu procesa zavarivanja i bržu sanaciju, ali mora se posvetiti posebna pažnja za osiguranje sekundarne zaštite inertnim plinom svih dijelova koji se zagrijavaju na temperature iznad 400 °C. Također je važno pažljivo odstraniti površinske okside prije zavarivanja i osigurati čistoću kako osnovnog i dodatnog materijala tako i plina za zaštitu.

#### LITERATURA

- [1] DELTA KAMERASYSTEME: *Furnace Probe Camera System - Application and Scope of Supply*, Delta Kamerasysteme GmbH, Frankfurt, Germany
- [2] ASM INTERNATIONAL: *ASM Handbook Volume 2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Introduction to Titanium and Titanium Alloys*, 1992
- [3] CVETIČANIN, L.; ZLOKOLICA, M.; LISULOV, Z. i MEZEI, D.: *Utvrđivanje optimalnih uvjeta zavarivanja titana*, Strojarstvo 32(1990)
- [4] MATWEB: *Material property data*, <http://www.matweb.com>
- [5] ASM INTERNATIONAL: *ASM Handbook Volume 6 – Welding, brazing and soldering, Welding of Titanium Alloys*, 1993
- [6] LUKAČEVIĆ, Z.: *Zavarivanje*, Slavonski brod, 1998. poglavlje 16 str.1-5
- [7] MATTHEW, J.; DONACHIE, JR.: *Titanium - A technical guide, Understanding Ti's Metallurgy*, ASM international – Metal park – 1988, page 21-36
- [8] DANIELSON, P.; WILSON, R. and ALMAN, D.: *Microstructure of titanium welds*, U.S. Department of Energy, Struers Journal of Materialography, 3/2004
- [9] AWS: *Recommended practices for gas tungsten arc welding for titanium piping and tubing*, AMERICAN WELDING SOCIETY, Miami, Florida, 2/2000, page 10.