



Marko Maričić <sup>1,a</sup>, Marija Vukšić Popović <sup>2,b</sup>, Ivan Stojčić <sup>1,c</sup>, Milorad Kočić <sup>3,d</sup>, Stefan Dikić <sup>4,5,c</sup>

# ZAVARIVANJE TITANIJUMA I KVALIFIKACIJA TEHNOLOGIJE ZAVARIVANJA

## TITANIUM WELDING AND QUALIFICATION OF WELDING TECHNOLOGY

**Stručni rad / Professional paper**

**Rad primljen / Paper received:**

Septembar 2024.

**Rad prihvaćen / Paper accepted:**

Maj 2025.

**Adresa autora / Author's address:**

<sup>1</sup> TMS CEE d.o.o. Beograd, Rudnička 14, Beograd, Srbija

<sup>2</sup> Akademija tehničko-umetničkih strukovnih studija Beograd, Odsek Visoka železnička škola, Zdravka Čelara 14, Beograd, Srbija

<sup>3</sup> SIGMA LAB DOO, Solunska 8, Smederevska Palanka, Srbija

<sup>4</sup> Institut GOŠA DOO Beograd, Milana Rakića 35, Srbija

<sup>5</sup> Tehnološko-metalurški fakultet Univerzitet u Beogradu, Karnegijeva 4, Beograd, Srbija

*email / ORCID ID:*

<sup>a</sup> marko.maricic@tms.rs / 0009-0001-2887-4557

<sup>b</sup> marija.vuksic.popovic@vzs.edu.rs

<sup>c</sup> ivan.stojcic@tms.rs

<sup>d</sup> office@sigmalab.rs

<sup>e</sup> stefan.dikic@institutgosa.rs / 0000-0003-2700-0628

**Ključne reči:** materijali, titanijum, kvalifikacija, zavarivanje

**Keywords:** materials, titanium, qualification, welding

### Rezime

U radu je prikazan postupak izrade kvalifikacije tehnologije zavarivanja titanijuma, kao i metalurška, tehnološka, fizička i mehanička svojstva dobijenih zavarenih spojeva titanijuma. U radu su prikazani i problemi i izazovi sa kojima se susreću i koji se mogu javiti prilikom zavarivanja titanijuma i načini obezbeđenja kvaliteta zavarenog spoja, kao i rezultata ispitivanja relevantnih uzoraka u skladu sa standardom SRPS EN ISO 15614-5 [10]. Rezultati ispitivanja reprezentativnih uzoraka pokazuju da je odabrana adekvatna tehnologija zavarivanja i da kao takva omogućava uspešno zavarivanje titana u praksi.

### Abstract

The paper provides an overview of the qualification of titanium welding technology, as well as the metallurgical, technological, physical, and mechanical properties of titanium welded joints. Problems that may occur during the welding and methods of ensuring the quality of the welded joint, along with the results of the testing of relevant samples in accordance with SRPS EN ISO 15614-5 [10], are given in this paper. The test results of representative samples indicate that welding technology is adequately specified. In that manner, it could be expected that welding in practice could be done properly.

Rad je u originalnom obliku objavljen u Zborniku radova sa 33. Savetovanja sa međunarodnim učešćem „Zavarivanje 2024“ održanog u Vrnjačkoj Banji, Srbija od 2. do 5. oktobra 2024. godine.



## 1. Uvod

Titanijum i legure titanijuma nisu često zastupljene u komercijalnoj industriji i upotrebi, i ne nailaze se u svakodnevnoj upotrebi. Međutim, kako titanijum ima visoke vrednosti čvrstoće, koje su na nivou čvrstoće poboljšanih čelika i svoje specifične gustine koja ga čini dvostruko lakšim, primenu nalazi u vazduhoplovstvu, raznim vrstama letilica, vojnoj tehnici i industriji, aeronautici i lakim konstrukcijama [1-9].

Reputaciju teško zavarljivog materijala, titanijuma, najverovatnije leži u njegovim fizičkim i hemijskim svojstvima, višoj tački topljenja od drugih metala i legura, kao i zahtevanim merama opreza da se izbegne kontaminacija tokom zavarivanja i slojevima zaštite za sprečavanje oksidacije [1-9]. Zbog toga titanijum se smatra veoma teško zavarljivim dok nepoznavanje tehnologije zavarivanja i striktnih zahteva koje treba ispoštovati može dovesti do pojave niza grešaka usled čega se često karakteriše kao misteriozan metal za zavarivanje. Pored niza mera koje je potrebno ispoštovati pri zavarivanju titanijuma, i visoka cena ovog metala doprinosi razvoju stava da je primena titanijuma limitirana na industrije i proizvode sa zahtevima visokog kvaliteta na tržištu. Iskustvo u zavarivanju titanijuma ukazuje da su tehnike zavarivanja titanijuma i njegovih legura veoma slične onima koje se koriste za zavarivanje legura nikla i nerđajućih čelika što značajno poboljšava stav o njegovoj zavarljivosti.

Zbog svojih mehaničkih, fizičkih i hemijskih svojstva titanijum je veoma privlačan, a u prethodnom periodu, prema statističkim podacima, prodaja i upotreba titanijuma su značajno porasle. Prema najvećem svetskom snabdevaču titanijuma "Verkhaya Salda Metallurgical Production Association", očekuje se da će ukupna potražnja na tržištu porasti za 34% u periodu od 2025. do 2035. godine [1,2].

Kako postoji rastuća tendencija primene titanijuma i njegovih legura u proizvodnji i upotrebi, tako se javlja i potreba za osvajanjem tehnologija zavarivanja od strane proizvođača opreme i proizvoda od titanijuma. U cilju obezbeđenja kvaliteta proizvoda i zavarenih spojeva izrađenih od titanijuma, sve veći broj proizvođača teži osvajanju tehnologija zavarivanja i izradi kvalifikacija tehnologija zavarivanja (u daljem tekstu "WPQR").

Kriterijumi za kvalifikovanje tehnologije zavarivanja titanijuma i njegovih legura navedeni su u standardu SRPS EN ISO 15614-5 [10]. Sprovedenjem ispitivanja naznačenih u referentnom standardu [10] može se dokazati umešnost i zavarivački kapaciteti uporedo sa osvedočenjem ispravnosti izabrane tehnologije zavarivanja.

## 2. Metalurške, tehnološke i mehaničke karakteristike titanijuma

Najvažnija svojstva titanijuma su: temperatura topljenja  $T_{top}=1668^{\circ}\text{C}$ , gustina  $4,5\text{ g/cm}^3$  (na  $20^{\circ}\text{C}$ ), zatezna čvrstoća veća od  $315\text{ N/mm}^2$ , izduženje  $A=50\%$ , dobra koroziona otpornost prema morskoj vodi i azotnoj kiselini (bez obzira na koncentraciju kiseline), kao i sumpornoj kiselini male koncentracije i svim organskim kiselinama [1-3].

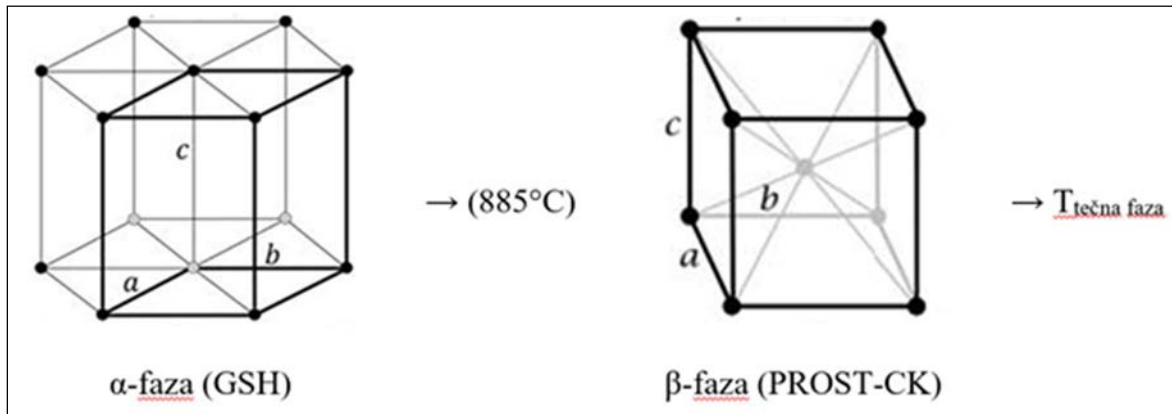
Kao takav, titanijum (Ti) može imati široku upotrebu, ali je ona ograničena njegovom znatno većom cenom na tržištu. Ova cena se znatno povećava ukoliko je neophodno i dobijanje konačnog proizvoda zavarivanjem, odnosno njegovom zahtevnošću pri zavarivanju zarad dobijanja kvalitetnog zavarenog spoja.

Titanijum je polimorfni materijal i kao takav, čist titanijum na sobnoj temperaturi ima gustosloženu heksagonalnu rešetku, i sa povećanjem temperature, na  $885^{\circ}\text{C}$  struktura prelazi u prostornu centriranu kristalnu rešetku (Slika 1) [9].

Legirajući elementi se dele na:

- neutralne, odnosno elementi koji ne utiču na temperaturu transformacije (cirkonijum),
- $\alpha$ -stabilizatori, odnosno elementi koji podižu temperaturu transformacije i koju stabilizuju  $\alpha$ -fazu (npr. aluminijum),
- $\beta$ -stabilizatori, odnosno elementi koji snižavaju temperaturu transformacije i koju stabilizuju  $\beta$ -fazu koja je u pojedinim slučajevima postojana ispod sobne temperature (vanadijum, molibden, hrom, mangan, niobijum) [9].

Podela legirajućih elemenata se osim na osnovu faze koju stabilizuju vrši i na osnovu mesta koje zauzimaju u rešetki titana, kako je prikazano u Tabeli 1.



**Slika 1:** Polimorfnost titanijuma [9]

**Figure 1:** Polymorphism of titanium [9]

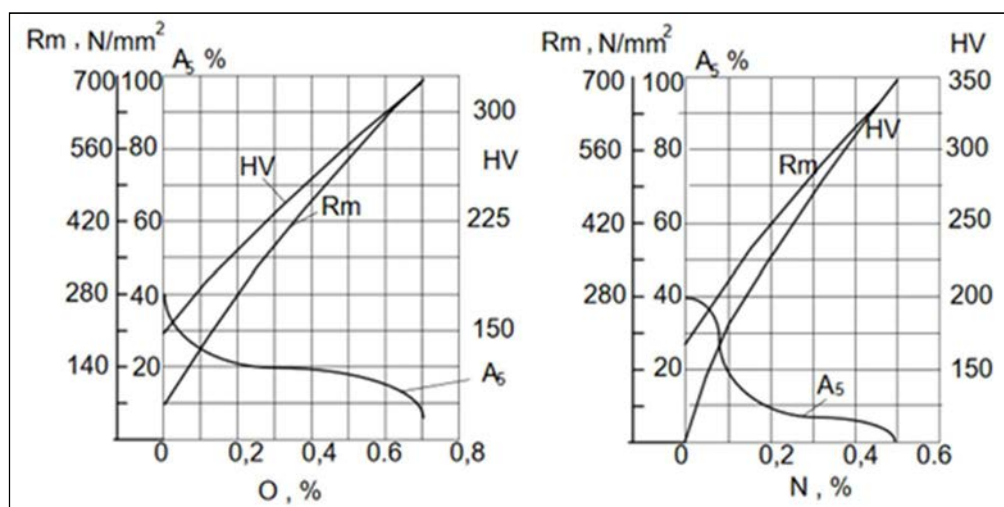
**Tabela 1:** Legirajući elementi u titanijumu

**Table 1:** Alloying elements in titanium

α-stabilizatori		β-stabilizatori	
Intersticijski	supstitucijski	Intersticijski	supstitucijski
O, N, C	Al, Pb	H	Ag, Au, Nb, Cr, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, W, V, Pd, Pt, Ta

Najveći problem pri zavarivanju Ti je pojava degradacije mehaničkih svojstva usled pojave nečistoća, najčešće usled reakcija sa gasovima ( $O_2$ ,  $N_2$  i  $H_2$ ), kao i zbog strukturnih transformacija u zoni uticaja toplote (u daljem tekstu "ZUT"). Tokom zavarivanja, potrebno je smanjiti sadržaje i uticaje navedenih gasova i to kiseonika ( $O_2$ ) do 0,15%, azota ( $N_2$ ) do 0,04% i vodonika ( $H_2$ ) do 0,1%, koji

se intersticijski rastvaraju u titanijumu i time povećavaju čvrstoću, ali i krtost. Titanijum ima veliki afinitet posebno prema kiseoniku na povišenim temperaturama (iznad  $400^\circ C$ ) što prouzrokuje velike probleme prilikom zavarivanja [1]. Uticaji sadržaja kiseonika i azota na mehanička svojstva čistog titanijuma su data na slici 2.



**Slika 2:** Uticaj sadržaja kiseonika i azota na mehanička svojstva čistog titanijuma [9]

**Figure 2:** Influence of oxygen and nitrogen content on the mechanical properties of pure titanium [9]



### 3. Podela i grupisanje titanijuma i njegovih legura

Titanijum i njegove legure su podeljene u 4 grupe prema SRPS CEN ISO/TR 15608 [11], prema njihovim hemijskim sastavima, odnosno fazama u kojima se mogu javiti i to:

- Grupa 51: U ovu grupu spadaju čist titanijum kao i titanijum sa primesama kiseonika i to:
  - Podgrupa 51.1, titanijum sa maksimalnim udelom kiseonika  $O_2 \leq 0,20\%$ ,
  - Podgrupa 51.2, titanijum sa maksimalnim udelom kiseonika  $0,20\% < O_2 \leq 0,25\%$ ,
  - Podgrupa 51.3, titanijum sa maksimalnim udelom kiseonika  $0,25\% < O_2 \leq 0,35\%$ ,
  - Podgrupa 51.4, titanijum sa maksimalnim udelom kiseonika  $0,35\% < O_2 \leq 0,40\%$ ,
- Grupa 52: legure titanijuma sa  $\alpha$ -fazom.

Legure ove podgrupe imaju dobru čvrstoću i žilavost i smatraju se lako zavarljivim, i najčešće su legirane aluminijumom (legiranje Al oko 5%). Legure koje podpadaju pod ovu grupu su: Ti-0,2Pd; Ti-2,5Cu; Ti-5Al-2,5Sn; Ti -8Al-1Mo-1V; Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo; Ti-6Al-2Nb-1Ta-0,8Mo.

- Grupa 53: legure titanijuma sa  $\alpha$ -fazom i  $\beta$ -fazom.

Legure ove podgrupe mogu ojačati termičkom obradom i čvrstoća im je između 1000 i 1300 MPa, a izduženje je  $A=16\%$  (legirajući elementi: Al, V, Mo, Cr). Legure koje podpadaju pod ovu grupu su: Ti-3Al-2,5V; Ti-6Al-4V; Ti-6Al-6V-2Sn; Ti-7Al-4Mo. Od svih legura iz ove grupe najviše se koristi Ti-6Al-4V.

- Grupa 54: legure titanijuma sa  $\beta$ -fazom.

Legure ove podgrupe se legiraju elementima: V, Nb, Cr i legure koje podpadaju pod ovu grupu su: Ti-10V-2Fe-3Al; Ti-13V-11Cr-3Al; Ti -11,5Mo-6Zr-4,5Sn; Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo.

### 4. Eksperimentalni deo – zavarivanje ispitnog uzorka

Zavarivanje je izvedeno na ispitnim uzorcima, cevima, prečnika  $\varnothing 48,26\text{mm}$  i debljine zida  $3,68\text{mm}$ . Cevi su izrađene od materijala koji pripada grupi 51.1 prema SRPS CEN ISO/TR 15608 [11], i kvaliteta prema normi ASTM B861-19 – Grade 1, čiji je hemijski sastav za navedenu šaržu br. 2022300145 dat u tabeli 2.

**Tabela 2: Hemijski sastavi osnovnog i dodatnog materijala**

**Table 2: Chemical compositions of basic and additional material**

Šarža br.	Kvalitet	Hemijski sastav						
		% C	% Fe	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni
2022300145	ASTM B861-19 – Grade 1	0,009	0,02	1,037	-	-	-	-
		% Mo	% Al	% Ti	% N	% V	% H	% O
		-	-	Ostalo	0,009	0,005	0,002	0,14
8981574	BÖHLER ER Ti 2-IG	0,01	0,02	-	-	-	-	-
		% Mo	% Al	% Ti	% N	% V	% H	% O
		-	-	Ostalo	0,005	-	0,002	0,01

Zavarivanja je urađeno TIG (tungsten inert gas) postupkom, odnosno zavarivanje netopljivom elektrodom u zaštiti inertnog gasa SRPS EN ISO 4063: 141 [15]. Kao dodatni materijal korišćena je žica za TIG zavarivanje komercijalne oznake „BÖHLER ER Ti 2-IG“, proizvođača „Voestalpine Böhler Welding Austria GmbH“, kvaliteta „EN ISO 24034-A: S Ti 0120 (Ti99,6)“, prečnika  $\varnothing 2,0\text{mm}$ , čiji je hemijski sastav za navedenu šaržu dat u tabeli 2. Zaštitni gas korišćen za zaštitu zavarenog

spoja sa strane lica i korena (uduvanjem u cevi) je argon, kvaliteta I1-Ar prema standardu SRPS EN ISO 14175 [13], nominalnog sastava 100% Ar, odnosno tehnički argon od 99,99% čistoće. Za zavarivanje je korišćen uređaj oznake „ESAB Orio Tig 3000i“, serijski br.: 802-808-5932.



#### 4.1 Tehnologija zavarivanja (pWPS)

Za potrebe zavarivanja ispitnih uzoraka, sačinjena je preliminarna specifikacija tehnologije zavarivanja, odnosno pWPS (Preliminary Welding

procedure specification), kojom su definisani svi parametri neophodni za potrebe zavarivanja predviđeni standardom SRPS EN ISO 15609-1 [14] (slika 3).

Location: _____	Inspector and inspection location: _____
WPQR: _____	Prep. and cleaning method: <b>Grinding</b>
Made by: _____	Base material specification: <b>ASTM B861-19, Gr.2</b>
Welders name & identification No.: <u>/</u>	Thickness "s"(mm): <b>3,68</b>
Welding process: <b>141</b>	Outside diameter (mm): <b>48,26</b>
Type of welded joint: <b>BW</b>	Welding position: <b>PC, PH</b>
Detail of groove design: <b>Piping</b>	

Joint design		Welding sequence	

Welding parameters								
Run	Process	Filler material (mm)	Current (A)	Voltage (V)	Type of current /polarity	Wire feed	Feed velocity cm/min	Heat input KJ/mm
1-2	141	Ø 2.0	60-90	9-11	DC/-	/	/	0,6-0,8

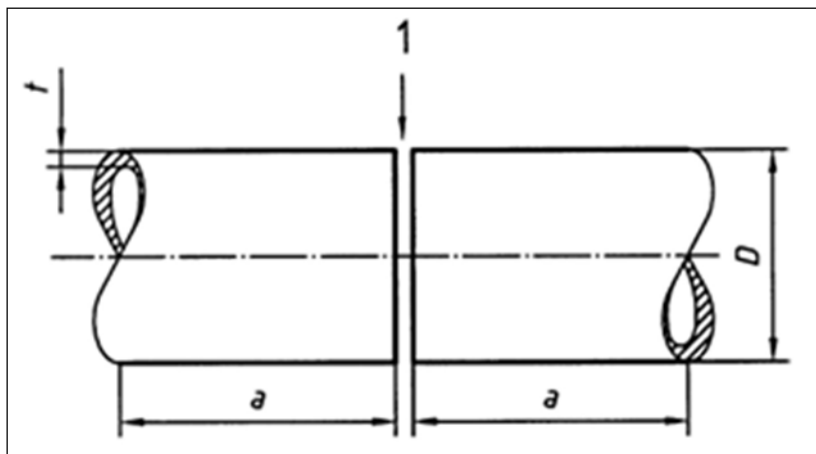
Filler material (class and designation): <b>EN ISO 24034 : S Ti 0120 (Ti99,6)</b>	Preheat temperature: <u>/</u>
Prescribed drying method: <u>/</u>	Interpass temperature: <b>130°C</b>
Shielding gas / flux	Heat treatment or annealing: <u>/</u>
- face: <b>II(Ar) ISO 14175</b>	Duration of heat treatment: <u>/</u>
- root: <b>II(Ar) ISO 14175</b>	Heating and cooling speed: <u>/</u>
Gas flow l/min	Other data: <u>/</u>
- face: <b>14-18 l/min</b>	e.g. Weaving (max. bead width): <u>max 3d</u>
- root: <b>20-30 l/min</b>	Oscillation: amplitude, frequency, holding time: <u>/</u>
Type of tungsten electrode/diameter: <b>WL 15, 2.4 mm</b>	Orifice or gas cup size: <u>/</u>
Gouging detail:	Details of plasma weld.: <u>/</u>
	Torch adjustment angle: <u>/</u>

**Slika 3:** Preliminarna specifikacija tehnologije zavarivanja pWPS

**Figure 3:** Preliminary specification of pWPS welding technology

Probni uzorak koji je zavarivan je cev prečnika Ø48,26mm, debljine zida 3,68mm. Dužina „a“ je pripremljena na 150mm na svim uzorcima. Spoj je pripremljen u „V“ žljebu, sa zatupljenjem od 2mm i zazorom od 2 do 4mm. Ugao pripreme kosina žljeba je od po 30° po strani, odnosno ukupno od

60°. Zavarivanje je izvođeno u PH i PC položajima prema standardu SRPS EN ISO 6947 [16], sa maksimalnim dopuštenim njihanjem od 3 debljine elektrode od ≈7,5mm. Uzorci su pripremljeni prema slici 4.



**Slika 4:** Skica pripreme cevi za zavarivanje

**Figure 4:** Sketch of pipe preparation for welding

Parametri zavarivanja i svi ostali zahtevani podaci koji su zahtevani preliminarnom Specifikacijom tehnologije zavarivanja su prikazani na slici 4, prema čijim podacima i smernicama su testni uzorci i zavareni.

U toku samog zavarivanja, vodilo se računa o vremenima uduvanja zaštitnog gasa sa korene strane i zaštite sa lica šava kako je prethodno i napisano. Nakon zavarivanja, i održavanja zaštite argonom od 25 sekundi i obezbeđenja da temperatura zavarenog uzorka spadne ispod

300°C, pristupilo se i pregledu spoja, čime je i potvrđena svetla i srebrna boja lica šava, kao i zone osnovnog materijala oko zavarenog spoja. Ova boja spoja ukazuje da je zaštita zavarenog spoja adekvatna i da nije došlo do oksidacije zavarenog spoja.

Ukupno je za potrebe svih ispitivanja zavareno 8 uzoraka, od toga 4 u PH položaju i 4 u PC položaju i pojednini od zavarenih uzoraka u PH i PC položaju prikazani na slici 5.



**Slika 5:** Fotografije zavarenog uzorka u PH (gornji uzorak) i PC položaju (donji uzorak)

**Figure 5:** Photographs of welded samples in PH (upper sample) and PC position (lower sample)



#### 4.2 Priprema pre zavarivanja, i aktivnosti u toku i nakon zavarivanja

Pored zahtevanih parametara zavarivanja kao što su definisanje jačine struje, napona, brzine zavarivanja, brzine protoka zaštitnog gasa, definisani su i dodatni zahtevi imajući u vidu materijal koji se zavaruje. Posebna se pažnja posvećuje pripremi pre zavarivanja, kao što su čišćenje žljeba i dela osnovnog materijala prohrmskom čeličnom četkom, nove i čiste zavarivačke rukavice i zaštitna oprema zavarivača. Proverena je oprema, polikabl i creva za protog gasa da nisu negde oštećena i kako se ne bi pojavila neželjena curenja i gubici gasa. Osnovni materijal je brušen sa leve i desne strane po 30mm rastojanja od pripremljenog žljeba kako bi se uklonili oksidi i druge kontaminacije sa površine osnovnog materijala. Osnovni materijal je očišćen i acetonom kako bi se otklonile bilo koje nečistoće i masti.

Pre zavarivanja, svaki put je odsecan vrh elektrodne žice pre utapanja dodatnog materijala u rastopljeno tečno kupatilo – kupku.

Kako je u prethodnom delu rada i navedeno, problem pri zavarivanju titanijuma i njegovih legura je pojava degradacije mehaničkih svojstva usled pojave nečistoća najčešće zbog reakcija sa gasovima ( $O_2$ ,  $N_2$  i  $H_2$ ), kao i zbog strukturnih transformacija u ZUT-u. Kako bi se smanjila reakcija sa ovim gasovima, posebno se obraća pažnja na zaštitu zone oko samog zavarenog spoja ne samo za vreme zavarivanja, već pre i posle zavarivanja. Ovo se postiže zaštitom zavarivačke

kupke (štiti se posebno i oblast korena) argonom, koju treba produžiti dok temperatura šava ne bude ispod  $300^\circ C$ .

Pre samog uspostavljanja električnog luka, podešen je uređaj za zavarivanje tako da se uduvavanje kroz gorionik započne 25 sekundi pre i nastavi 25 sekundi posle prekidanja električnog luka. Protok je podešen na 15 l/min.

Brušenje međuprolaza se obavlja umerenim pritiskom na radni komad kako se ne bi osnovni materijal previše zagrejao za vreme brušenja spoja. Takođe, međuprolazi su čišćeni i prohrmskom čeličnom četkom.

Zaštitni gas koji se koristio za zaštitu sa korene strane je istog kvaliteta kao i sa lica šava, odnosno SRPS EN ISO 14175 – I1-Ar [13], nominalnog sastava od 100% argona prema navedenom standardu, odnosno tehnički argon od 99,99% čistoće. Protok je podešen na 20 l/min., kako bi se obezbedila adekvatna zaštita i sa korene strane, a uzimajući u obzir dužinu pripremljenih pozicija za zavarivanje.

#### 5. Rezultati ispitivanja uzoraka

Nakon zavarivanja uzoraka, a za potrebe kvalifikacije tehnologije zavarivanja, primenjen je standard SRPS EN ISO 15614-5 [10]. Standard za potrebe kvalifikovanja tehnologije zavarivanja propisuje ispitivanje metodama bez razaranja i metode ispitivanja sa razaranjem, gde su vrste ispitivanja sa svojim obimima i definisani prema SRPS EN ISO 15614-5 [10]. U tabeli 3 su navedene metode sa svojim obimima ispitivanja.

**Tabela 3:** Ispitivanje metodama bez i sa razaranjem

**Table 3:** Examination by methods without and with destruction

Metodama bez razaranja		Metodama sa razaranjem	
Metoda	Obim ispitivanja	Metoda	Obim ispitivanja
Vizuelna metoda	100%	Transverzalno ispitivanje zatezanjem	2 epruvete
Ispitivanje tečnim penetrantima	100%	Transverzalno ispitivanje savijanjem	4 epruvete
Radiografsko ispitivanje	100%	Makroskopsko ispitivanje	1 epruveta
		Mikroskopsko ispitivanje	1 epruveta



Svaka od navedenih metoda je definisana svojim standardom i nakon zavarivanja reprezentativnih uzoraka, pristupilo se ispitivanju istih u skladu sa navedenim obimima ispitivanja za oba zavarena uzorka.

#### 5.1 Rezultati ispitivanja metodama bez razaranja

U skladu sa Tabelom 3, uzorci su ispitani vizuelnom metodom prema SRPS EN ISO 17637 [17], tečnim penetrantima prema SRPS EN ISO 3452-1 [18] kako bi se površinski proverio kvalitet spoja i radiografskom metodom prema SRPS EN ISO 17636-1 [19] kako bi se zavareni spojevi proverili i zapreminski. Rezultati ispitivanja nisu pokazali neprihvatljive neusaglašenosti i bili su bez

nalaza, odnosno indikacija. **5.2 Rezultati ispitivanja metodama sa razaranjem**

Kako je primenjenim standardom i predviđeno, nakon ispitivanja metodama bez razaranja i pozitivnim rezultatima ispitivanja, pristupilo se ispitivanjem metodama sa razaranjem.

Primenjeno je ispitivanje zatezanjem transverzalno u odnosu na zavareni spoj, prema SRPS EN ISO 4136 [20], pri čemu je zahtevano da zatezna čvrstoća bude  $\geq 345$  N/mm<sup>2</sup>. Vrednosti rezultata ispitivanja su u skladu sa zahtevima i isti su prikazani u Tabeli 4.

**Tabela 4: Rezultati ispitivanja zatezanjem**

**Table 4: Tensile test results**

Oznaka epruvete/ položaj	Dimenzija epruvete [mm]	Rm [N/mm <sup>2</sup> ]	Mesto loma
763.1 / PC	3,9 x 6,0	470	Osnovni materijal
763.2 / PC	3,9 x 5,95	494	Metal šava
763.1 / PH	4,0 x 5,9	486	Osnovni materijal
763.2 / PH	4,0 x 5,85	495	Metal šava

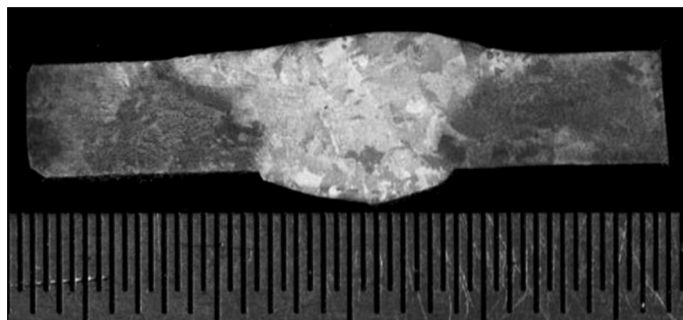
Naredna metoda je ispitivanje savijanjem prema SRPS EN ISO 5173 [21], i rezultati ispitivanja su u skladu sa zahtevima i isti su prikazani u Tabeli 5. Korišćena dimenzija trna je 14mm.

Metode koje su zahtevane standardom primene su i makroskopska i mikroskopska ispitivanja u skladu sa SRPS EN ISO 17639 [22]. Rezultati, odnosno makropreseki su prikazani na slikama 6 i 7.

**Tabela 5: Rezultati ispitivanja savijanjem**

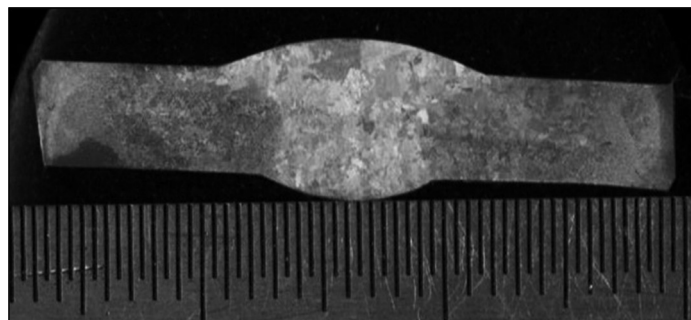
**Table 5: Bending test results**

Epruvete zavarene u PC položaju				Epruvete zavarene u PH položaju			
Oznaka epruvete/ položaj	Dimenzija epruvete [mm]	Ugao savijanja [°]	Vrsta savijanja	Oznaka epruvete/ položaj	Dimenzija epruvete [mm]	Ugao savijanja [°]	Vrsta savijanja
763.1l / PC	3,68 x 15,0	180	Lice	763.1l / PH	3,68 x 15,0	180	Lice
763.2k / PC	3,68 x 15,0	180	Koren	763.2k / PH	3,68 x 15,0	180	Koren
763.3l / PC	3,68 x 15,0	180	Lice	763.3l / PH	3,68 x 15,0	180	Lice
763.4k / PC	3,68 x 15,0	180	Koren	763.4k / PH	3,68 x 15,0	180	Koren



**Slika 6: Makropreseki PC zavarenog uzorka**

**Figure 6: Macro section of the PC welded sample**



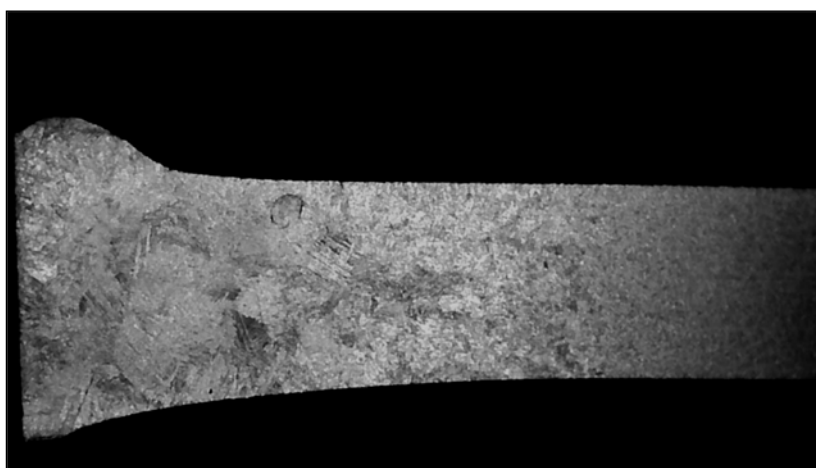
**Slika 7: Makropreseki PH zavarenog uzorka**

**Figure 7: Macro section of the PH welded sample**



Makroskopskim ispitivanjem nisu uočene nedozvoljene nepravilnosti i jasno se mogu uočiti linije stapanja, prolazi svakog šava, zone uticaja toplote i sami izgledi lica i naličja spojeva. Makroskopskom analizom uočena je velika širina zone uticaja toplote koja je prisutna na svim makro-uzorcima iako unos toplote na samim uzorcima nije prelazio 0,65 KJ/mm kako je tehnologijom zavarivanja i predviđeno. Usled limita dimenzija prese za toplo zatapanje uzoraka, na prvim uzorcima za analizu makrostrukture zavarenih spojeva (slike 6 i 7) nije bilo moguće videti čitavu

zonu uticaja toplote. Zbog toga su pripremljeni novi uzorci koji su isečeni po sredini metala šava i naknadno pripremani kao dve zasebne polovine i tako analizirani (slika 8). Obradom fotografija makrostrukture i merenjem širine zone uticaja toplote uočeno je da je u PH položaju 10-11mm (slika 8), dok je u PC položaju širina zone uticaja toplote nešto manja (9-10mm) usled razlike u unosu toplote pri zavarivanju u dva navedena položaja.

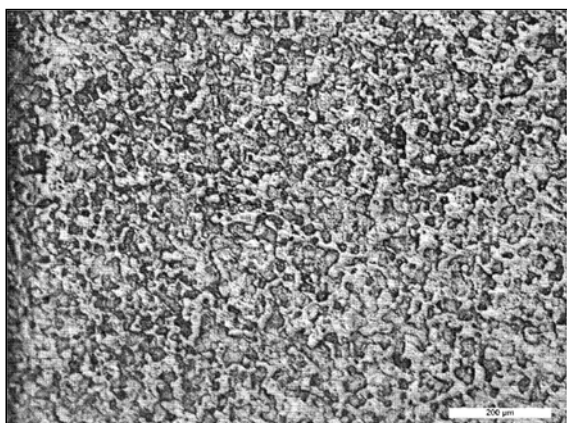


**Slika 8:** Makropresek PH zavarenog uzorka

**Figure 8:** Macro section of the PH welded sample

Nakon makroskopskog ispitivanja, pristupilo se mikroskopskim ispitivanjima na uzorcima koji su prethodno makro ispitani. Mikroskopskim ispitivanjem na uzorku zavarenom u PC položaju, utvrđeno je sledeće:

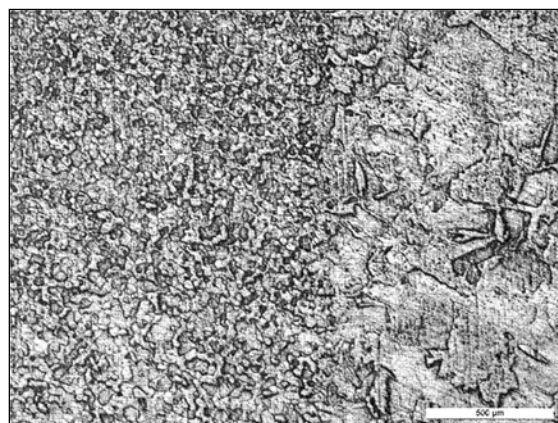
- Struktura osnovnog materijala je  $\alpha$ -čvrsti rastvor sa  $\beta$ -fazom (Slika 9),



**Slika 9:** Mikrostruktura PC uzorka (OM)

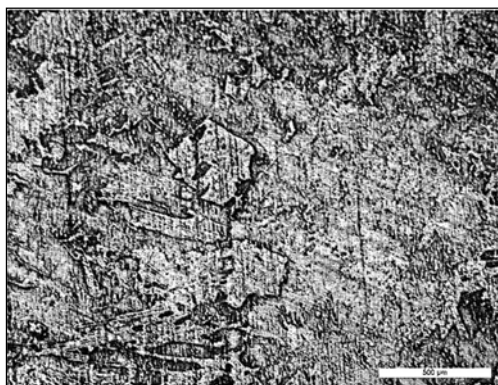
**Figure 9:** Microstructure of PC sample (BM)

- Mikrostrukturu zone uticaja toplote (ZUT) čini izrazito krupnozrna struktura  $\alpha$ -čvrstog rastvora sa  $\beta$ -fazom. Vidmanštetenove morfologije  $\alpha$ -čvrstog rastvora mogu se uočiti u zoni uticaja toplote (Slika 10),
- Mikrostrukturu metala šava čini krupnozrna struktura  $\alpha$ -čvrstog rastvora sa  $\beta$ -fazom. Vidmanštetenove morfologije  $\alpha$ -čvrstog rastvora se mogu uočiti (Slika 11).



**Slika 10:** Mikrostruktura PC uzorka (ZUT)

**Figure 10:** Microstructure of PC sample (HAZ)



**Slika 11:** Mikrostruktura PC uzorka (MŠ)

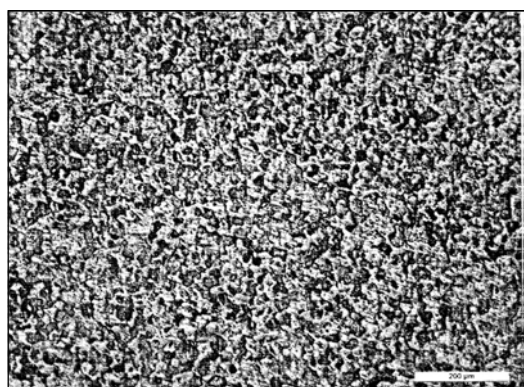
**Figure 11:** Microstructure of PC sample (WM)

Mikroskopskim ispitivanjem na uzorku u zavarenom u PH položaju, utvrđeno je sledeće:

- Struktura osnovnog materijala je  $\alpha$ -čvrsti rastvor sa  $\beta$ -fazom (Slika 12),
- Mikrostrukturu zone uticaja toplote (ZUT) čini krupnozrna struktura  $\alpha$ -čvrstog rastvora sa  $\beta$ -fazom.

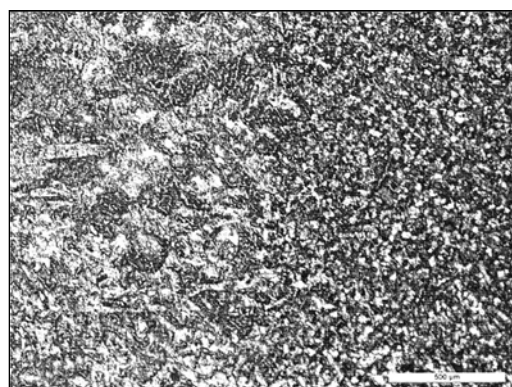
Vidmanštetenove morfologije  $\alpha$ -čvrstog rastvora mogu se uočiti u zoni uticaja toplote (Slika 13),

- Mikrostrukturu metala šava čini krupnozrna struktura  $\alpha$ -čvrstog rastvora sa  $\beta$ -fazom. Vidmanštetenove morfologije  $\alpha$ -čvrstog rastvora se mogu uočiti Slika (14).



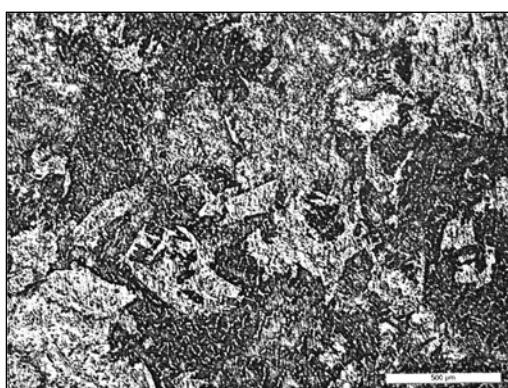
**Slika 12:** Mikrostruktura PH uzorka (OM)

**Figure 12:** Microstructure of PH sample (BM)



**Slika 13:** Mikrostruktura PH uzorka (ZUT)

**Figure 13:** Microstructure of PH sample (HAZ)



**Slika 14:** Mikrostruktura PH uzorka (MŠ)

**Figure 14:** Microstructure of PH sample (WM)

Rezultati ispitivanja mikrostrukture nisu pokazali nedozvoljene nepravilnosti. Kako je već uočeno makroskopskim ispitivanjem i navedeno, potvrđena

je velika širina zone uticaja toplote (ZUT-a). ZUT je po poprečnom preseku imao veću širinu u odnosu na debljinu materijala nego što je očekivano [4-8].



## 6. Zaključak

Nakon sprovedenih svih predviđenih ispitivanja u skladu sa standarda SRPS EN ISO 15614-5 [10], donet je zaključak da su svi rezultati ispitivanja bez nalaza ili u granicama dozvoljenih odstupanja ukoliko su konstatovana. Može se zaključiti da zavarivanje titanijuma ne mora predstavljati problem ukoliko se ispoštuju smernice i preporuke koje su neophodne u radu i primeni titanijuma i njegovih legura. Pri zavarivanju titanijuma zahtevaju se mere opreza kako bi se izbegla kontaminacija tokom zavarivanja i zaštite kako bi se sprečila pojava oksidacije.

Moraju se obezbediti adekvatni uslovi, oprema i dovoljno obučeno osoblje koji primenom zahtevanih mera pre, za vreme i nakon zavarivanja, odabirom odgovarajuće tehnologije zavarivanja, i tada se može dobiti kvalitetno zavarivanje titanijuma i njegovih legura.

Rezultati ispitivanja na reprezentativnom uzorku i primenom zahteva standarda SRPS EN ISO 15614-5 [10], pokazuju da proizvođači mogu uspešno ovladati zavarivanjem titanijuma grupe 51.1 primenom ove tehnologije.

Dobijene mikrostrukture u zavarenom spoju su bez mikrostrukturnih grešaka i uprkos velikim zrnima u metalu šava i zoni uticaja toplote dobijene mikrostrukture su zadovoljavajuće [3,5,6].

Kao interesantan zaključak se može izdvojiti povećana širina zone uticaja toplote kao i izrazit porast veličini zrna koji se uočavaju na svim uzorcima uprkos malom unos toplote koji na samim uzorcima nije prelazio 0,65 KJ/mm, kako je tehnologijom zavarivanja i predviđeno. Ova pojava utiče na pojavu širu oblast izmenjene mikrostrukture od očekivane, ili bolje reći uobičajne za druge metale i legure ali i sam titanijum i njegove legure. Na ovaj način nastaje degradacija osobina osnovnog materijala u većem delu poprečnog preseka zavarenog spoja, što u zavisnosti od same upotrebe ove legure može dovesti i do narušavanja integriteta i kvaliteta konstrukcije koja se zavaruje uprkos rezultatima koji su zadovoljavajući za kvalifikaciju tehnologije zavarivanja, imajući na umu da se zavarivanje u cilju kvalifikacije tehnologije zavarivanja izvodi u uslovima koji su najčešće bolji u odnosu na radne uslove.

Na kraju, kao rezultat sprovedenih ispitivanja i njihovih pozitivnih nalaza, kao izlazni dokument je i sačinjen Izveštaj kvalifikacije tehnologije zavarivanja ili „Welding Procedure Qualification Report (WPQR)“ u skladu sa SRPS EN ISO 15614-5 [10]. U narednom periodu će biti razmatrane izmene tehnologije zavarivanja koje mogu dovesti

## 6. Conclusion

After conducting all the planned tests in accordance with the SRPS EN ISO 15614-5 standard [10], it was concluded that all test results were without findings or within the limits of permissible deviations if they were noted. It can be concluded that welding titanium does not have to be a problem if the guidelines and recommendations that are necessary in the work and application of titanium and its alloys are followed. When welding titanium, precautions are required to avoid contamination during welding and protection to prevent oxidation.

Adequate conditions, equipment and sufficiently trained personnel must be provided, so that by applying the required measures before, during and after welding, by choosing the appropriate welding technology, quality welding of titanium and its alloys can be obtained.

The results of testing on a representative sample and applying the requirements of the SRPS EN ISO 15614-5 standard [10], show that manufacturers can successfully master the welding of group 51.1 titanium using this technology.

The obtained microstructures in the welded joint are without microstructural defects and despite the large grains in the weld metal and the heat-affected zone, the obtained microstructures are satisfactory [3, 5, 6].

An interesting conclusion is that the increased width of the heat-affected zone, as well as the marked increase in grain size, are observed on all samples, despite the low heat input, which did not exceed 0.65 KJ/mm on the samples themselves, as predicted by the welding technology. This phenomenon affects the appearance of a wider altered microstructure area than expected, or rather, usual for other metals and alloys, but also titanium itself and its alloys. In this way, a degradation of the properties of the basic material occurs in the greater part of the cross-section of the welded joint, which, depending on the use of this alloy itself, can lead to a violation of the integrity and quality of the structure being welded despite the results that are satisfactory for the qualification of the welding technology, bearing in mind that the welding for the purpose of the qualification of the welding technology is performed in conditions that are usually better than the working conditions.

Finally, as a result of the conducted tests and their positive findings, the welding technology qualification report or "Welding Procedure Qualification Report (WPQR)" was created as an output document in accordance with SRPS EN ISO 15614-5 [10]. In the following period, changes in



do smanjenja širine zone uricaja toplote, uz ispunjenje svih zahteva za kvalitet spoja.

welding technology will be considered, which can lead to a reduction in the width of the heat penetration zone, while meeting all the requirements for the quality of the joint.

## Literatura / References

[1] Rangappa, S. M., Doddamani, S. M., Siengchin, S., Doddamani, M. (Eds.). (2023). *Lightweight and sustainable composite materials: preparation, properties and applications*. Elsevier.

[2] Ian Polmear, David StJohn, Jian-Feng Nie, Ma Qian, (2017). *Titanium Alloys*, Butterworth-Heinemann, ISBN 9780080994314, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099431-4.00007-5>.

[3] Peters, M., Hemptenmacher, J., Kumpfert, J. Leyens, C. (2003), *Structure and Properties of Titanium and Titanium Alloys*, Wiley, <https://doi.org/10.1002/3527602119.ch1>

[4] Niagaj J. Peculiarities of A-TIG welding of titanium and its alloys. *Archives of metallurgy and materials*. 2012(1).

[5] W.A. Baeslack, D. Phillips, G.K. Scarr, *Characterization of the weld heat-affected zone in an alpha-two titanium aluminide*, *Materials Characterization*, 1992, vol. 28, ISSN 1044-5803, [https://doi.org/10.1016/1044-5803\(92\)90029-H](https://doi.org/10.1016/1044-5803(92)90029-H).

[6] Tolvanen S, Pederson R, Klement U. *Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Welds Produced with Different Processes*. *Materials*. 2024 Feb 6;17(4):782.

[7] Balasubramanian TS, Balakrishnan M, Balasubramanian V, Muthu Manickam MA. *Effect of welding processes on joint characteristics of Ti-6Al-4V alloy*. *Science and Technology of*

[8] Akhonin SV, Belous VY, Selin RV, Kostin VA., *Welding and Joining*. 2011 Nov;16(8):702-8. *Influence of TIG welding thermal cycle on temperature distribution and phase transformation in low-cost titanium alloy*. *InOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2021 Mar 1 (Vol. 688, No. 1, p. 012012)*. IOP Publishing.

[9] Prokić Cvetković, R., D. Popović, O.,: *Metalurgija zavarivanja*, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2019.

[10] SRPS EN ISO 15614-5:2008 – Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala - Kvalifikacija tehnologije zavarivanja - Deo 5: Elektrolučno zavarivanje titanijuma, cirkonijuma i njihovih legura.

[11] SRPS CEN ISO/TR 15608:2017 – Zavarivanje - Uputstvo za sistem grupisanja metalnih materijala.

[12] SRPS EN ISO 4063:2023 – Zavarivanje i srodni postupci - Lista postupka i njihovo označavanje.

[13] SRPS EN ISO 14175:2009 – Potrošni materijali za zavarivanje - Gasovi i gasne mešavine za zavarivanje topljenjem i srodne postupke.

[14] SRPS EN ISO 15609-1:2020 – Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala - Specifikacija tehnologije zavarivanja - Deo 1: Elektrolučno zavarivanje.

[15] SRPS EN ISO 6848:2017 – Elektrolučno zavarivanje i rezanje - Netopive volframove elektrode - Klasifikacija.

[16] SRPS EN ISO 6947:2020 – Zavarivanje i srodni postupci - Položaji pri zavarivanju.

[17] SRPS EN ISO 17637:2017 – Ispitivanje bez razaranja zavarenih spojeva – Vizuelno ispitivanje spojeva zavarenih topljenjem.

[18] SRPS EN ISO 3452-1:2021 – Ispitivanje bez razaranja – Penetrantsko ispitivanje – Deo 1: Opšti principi.

[19] SRPS EN ISO 17636-1:2022 – Ispitivanje bez razaranja zavarenih spojeva – Radiografsko ispitivanje – Deo 1: Tehnike sa X i gama zracima pomoću filma.

[20] SRPS EN ISO 4136:2022 – Ispitivanja sa razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala – Ispitivanje poprečnim zatezanjem.

[21] SRPS EN ISO 5173:2023 – Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala – Ispitivanje savijanjem.

[22] SRPS EN ISO 17639:2022 – Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala – Makroskopsko i mikroskopsko ispitivanje zavarenih spojeva.