

**VEZA IZMEĐU MIKROSTRUKTURE I OSOBINA ZAVARENIH  
SPOJEVA KOD ISPITIVANJA TVRDOĆE  
PO STANDARDU BAS EN 1043-1**

**THE RELATIONSHIP BETWEEN MICROSTRUCTURE AND  
PROPERTIES OF WELDED JOINTS AT HARDNESS TESTING  
ACCORDING TO STANDARD BAS EN 1043-1**

**Mr.sc. Belma Fakić, dipl.inž.met.  
Emina Kratina, dipl.inž.met.**

**Adisa Burić, dipl.inž.met.  
Mr.sc. Rimac Milenko, dipl.inž.met.**

**Univerzitet u Zenici, Metalurški institut „Kemal Kapetanović“ Zenica  
Travnička 7, 72 000 Zenica, Bosna i Hercegovina**

**REZIME**

*Povećani zahtjevi za kvalitet i sigurnost zavarenih spojeva u određenim uslovima eksploatacije, postavljaju stroge zahtjeve za ostvarivanje niza osobina zavarenog spoja. Ispitivanje tvrdoće zavarenog spoja po standardu BAS EN 1043-1 u mnogim slučajevima nije dovoljno da bi se utvrdio kvalitet zavarenog spoja. Iz tog razloga su često potrebna dodatna ispitivanja, a prije svega ispitivanje mikrostrukture. Na taj način se može uspostaviti veza između tvrdoće i mikrostrukturnih osobina zavarenog spoja. U ovom radu je dat pregled ispitivanja na zavarenom spoju jednog novijeg čelika oznake P91 koji se koristi u termoenergetskim postrojenjima.*

**Ključne riječi:** čelik, zavareni spoj, tvrdoća, mikrostruktura, standard

**SUMMARY**

*Increased requirements for quality and safety of welded joints in certain exploitation conditions set out strictly requirements for achieving a number of properties of welded joint. Hardness testing of welded joint according to standard BAS EN 1043-1 in many cases is not sufficient to determine the quality of the weld. For this reason, they often need additional testing, especially testing of microstructures. In this way, can be establish a relationship between the hardness and microstructural properties of welded joints. This paper presents an overview of the test weld a new steel designation P91 used in thermal power plants.*

**Keywords:** steel, weld joint, hardness, microstructure, standard

**1. UVOD**

Povećani zahtjevi za kvalitet i sigurnost zavarenih spojeva u određenim uslovima eksploatacije, postavljaju stroge zahtjeve za ostvarivanje niza osobina zavarenog spoja. Standard BAS EN ISO 15614-1: 2005 - Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale – Ispitivanje postupka zavarivanja – Dio 1: Elektrolučno i plinsko zavarivanje čelika te elektrolučno zavarivanje nikla i legura nikla [1], specificira uslove za

izvođenje ispitivanja zavarenih spojeva, među kojima je ispitivanje tvrdoće prema lokacijama datim u standardu BAS EN 1043-1:2009.

U ovom radu je predstavljeno ispitivanje tvrdoće zavarenog spoja po standardu BAS EN 1043-1 uz dodatna ispitivanja mikrostrukture. Na taj način je uspostavljena veza između tvrdoće i mikrostrukturnih osobina zavarenog spoja.

U novije vrijeme koristi se nova generacija materijala sa 9% Cr (P91, P92, E911) za zamjenu dijelova u sistemima za rad na visokim temperaturama, tj. u parnim kotlovima, turbinama, rafinerijama nafte i drugim postrojenjima gdje se traži visoka čvrstoća na puzanje i odgovarajuća zatezna čvrstoća pri visokim temperaturama. Najčešće se ovi čelici koriste za cijevi, komore i posude pod tlakom. [2]

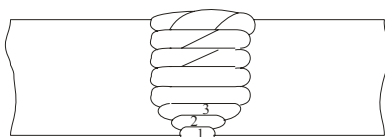
## 2. TEHNOLOGIJA ZAVARIVANJA

Osnovni materijal čelik sa 9% Cr oznake X10CrMoVNb 91 (P91) je martenzitni čelik mikrolegiriran sa vanadijem, niobijem i azotom. Hemijski sastav čelika dat je u tabeli 1.

Tabela 1. Hemijski sastav čelika X10CrMoVNb 9 1 [3]

Oznaka materijala	Sadržaj elemenata, %										
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	V	Nb	N
X10CrMoVNb9 1 EN 10216-2 (P 91)	0,08	0,20	0,30	8,00	max	0,85	max	max	0,18	0,06	0,03
	0,12	0,50	0,60	9,50	0,40	1,05	0,02	0,01	0,25	0,10	0,07

Zavarivanje cijevi  $\phi$  245x22,2 mm od materijala X10CrMoVNb 91 (P91), izvedeno je primjenom postupka zavarivanja TIG - 141 (korijen 1) i postupka REL -111 (2-n, ispuna). Zavarivanje ispitnih uzoraka izvedeno je u poziciji H-L 045, uz primjenu tehnike polaganja više zavara u jednom sloju. Pri izvođenju zavarivanja postupkom TIG-141, obezbijedena je zaštita protokom zaštitnog gasa argona. Postupak zavarivanja TIG omogućava dobro formiranje korjenog zavara uz minimalne površinske i unutrašnje defekte. Zavari ispune su zbog prostornih zahtjeva urađeni obloženom elektrodom (REL postupak). Oblik pripreme spoja prema WPS dat je na slici 1.



Slika 1. Oblik pripreme spoja

Kod klase materijala P91 u zavisnosti od hemijskog sastava temperatura  $Ac_1$  je oko 785°C,  $Ms$  - temperatura (početak martenzitne transformacije) je oko 400°C, a  $Mf$  - temperatura (kraj martenzitne transformacije) iznad 100°C (zavisno od veličine primarnog austenitnog zrna).

$Ms$  - temperatura utiče na temperaturu predgrijavanja i međuslojnu temperaturu, tako da se zavarivanje obavlja u martenzitnom području, na temperaturi 200-300°C. Poslije zavarivanja, da bi se obezbijedila potpuna transformacija zaostalog austenita u martenzit, sprovodi se hlađenje do temperature ispod 100°C (80-100°C) sa držanjem minimalno jedan sat na toj temperaturi. Termička obrada poslije zavarivanja od strane proizvođača dodatnih materijala je žarenje na 760°C, u periodu 2 do 10h. Brzina zagrijavanja i hlađenja ispod 550°C je najviše 150°C/h, iznad 550°C najviše 80°C/h [3].

Termički režimi pri izvođenju postupka zavarivanja cijevi  $\phi$  245x22,2 mm su: predgrijavanje na temperaturu 250 °C, a nakon zavarivanja provedena je termička obrada: 760°C u trajanju 3 sata.

Parametri zavarivanja cijevi  $\phi$  245x22,2 mm od materijala X10CrMoVNb91 dati su u tabeli 2.

Tabela 2. Parametri zavarivanja

Prolaz	Postupak	Elektroda	Struja (I) srednja vrijednost (A)
Korijen zavara	TIG – 141	2,4	115
Lice zavara	REL - 111	3,2	125

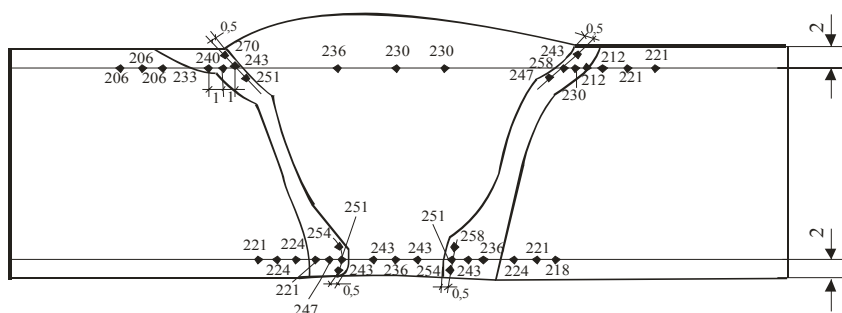
### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

U ovom radu dati su rezultati mjerenja tvrdoće po presjeku zavarenog spoja prema standardu BAS EN 1043-1, te analizirana mikrostruktura na mjestima ispitivanja tvrdoće u cilju dobivanja potpunije slike kvaliteta zavarenog spoja [5]. Površina za ispitivanje je brušena, polirana i nagrižena u odgovarajućem reaktivu – Zlatotopka/Aqua regia, prema standardu ASTM E 407.

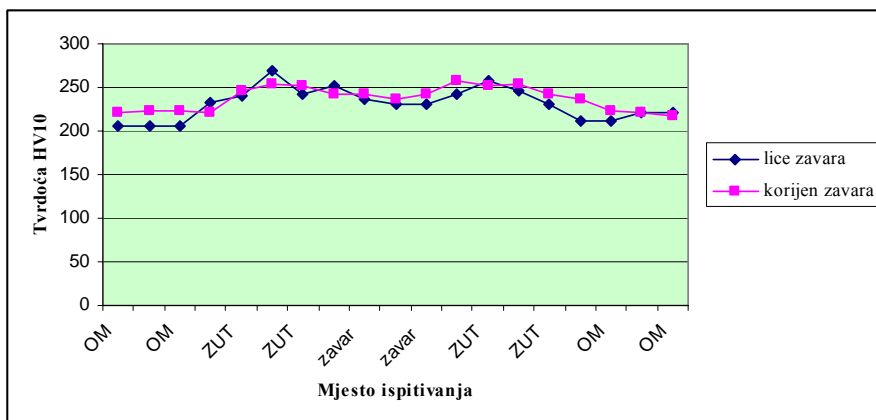
#### 3.1. Ispitivanje tvrdoće HV10

Standard BAS EN 1043-1 specificira ispitivanje tvrdoće na poprečnom presjeku elektrolučno zavarenog spoja metalnih materijala, po metodi Vickers u skladu sa standardom BAS EN ISO 6507-1, opterećenja HV10. Ispitivanje tvrdoće izvodi se u ambijentalnim uslovima, temperatura  $23 \pm 5$  °C.

Primjenjena metoda mjerenja tvrdoće je identifikacija u nizu, pri čemu je ispitivanjem obuhvaćen osnovni materijal (OM), zona uticaja toplote (ZUT) i metal zavara na udaljenosti  $\leq 2$  mm od površine i 0,5 mm od linije spajanja. Shematski prikaz sučeono zavarenog spoja sa lokacijama i vrijednostima ispitivanja tvrdoće dat je na slici 2. Dijagram rasporeda tvrdoće u sučeono zavarenom spoju, prema navedenom standardu dat je na slici 3.



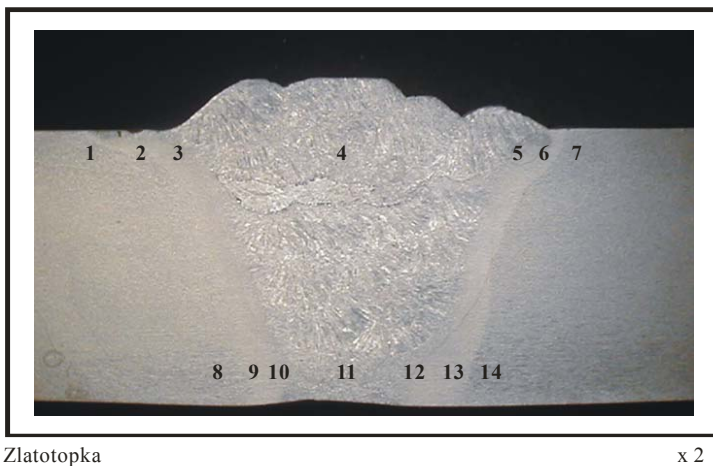
Slika 2. Shematski prikaz sučeono zavarenog spoja sa vrijednostima ispitivanja tvrdoće



Slika 3. Dijagram rasporeda tvrdoće u sučeono zavarenom spoju, prema BAS EN 1043-1

### 3.2. Ispitivanje makrostrukture

Makrostruktura presjeka sučeono zavarenog spoja pokazuje da je zavarivanje urađeno iz više prolaza, polaganjem više zavara u jednom sloju, slika 4. Metal zavara je bez prisustva poroznosti, pukotina i nemetalnih uključaka. Zona uticaja toplote je širine 2 do 3 mm.

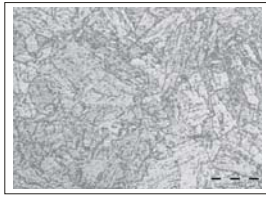


Slika 4. Makrostruktura sučeono zavarenog spoja sa lokacijama ispitivanja mikrostrukture

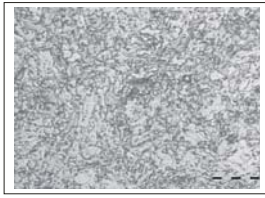
### 3.3. Ispitivanje mikrostrukture

Mikrostrukture osnovnog materijala (detalji 1, 7, 8 i 14), zone uticaja toplote (detalji 2, 3, 5, 6, 9, 10, 12, 13) i metala zavara (detalji 4 i 11) odgovaraju mikrostrukтури popuštenog martenzita, slika 5.

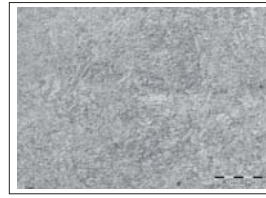
Mikrostrukture - lice zavara



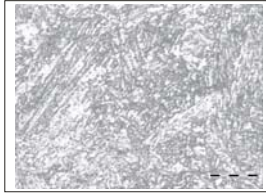
Detalj 1



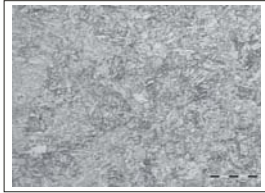
Detalj 2



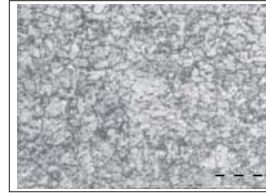
Detalj 3



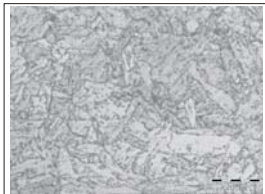
Detalj 4



Detalj 5

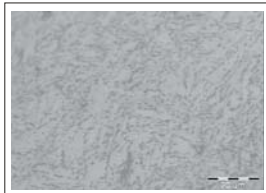


Detalj 6

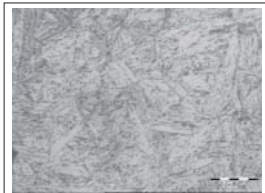


Detalj 7

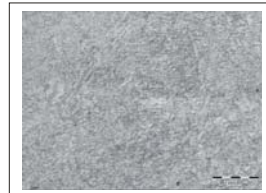
Mikrostrukture - korijen zavara



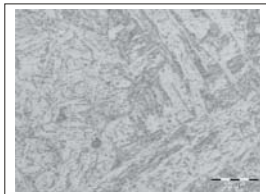
Detalj 8



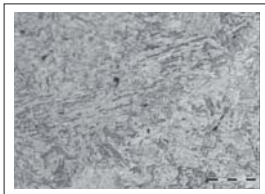
Detalj 9



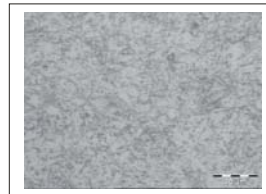
Detalj 10



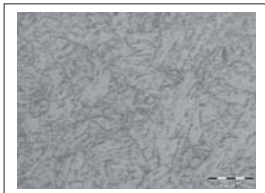
Detalj 11



Detalj 12



Detalj 13



Detalj 14

Slika 5. Mikrostrukture sučono zavarenog spoja,  
Povećanje x 725

#### 4. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

Rezultati ispitivanja tvrdoće zavarenog spoja pokazuju tvrdoću osnovnog materijala od 206 do 224 HV10, tvrdoća zone uticaja toplote je od 212 do 270 HV10, a tvrdoća metala zavara je od 230 do 243 HV10 (tabela 3.), što je u granicama propisanim prema WGB 508L za materijal cijevi oznake X10CrMoVNb 91 (osnovni materijal: 190-260HV; ZUT: max. 320HV; zavar: max. 300HV) [3], i prema standardu BAS EN ISO 15614-1 maksimalno 350HV10 – termički tretirani uzorak, za grupu 6 materijala - prema standardu BAS CR ISO 15608 [4,6].

Postoji lokalno povećanje tvrdoće u zoni uticaja toplote (270HV10), ali je ono u saglasnosti sa strukturnim promjenama.

Tabela 3. Vrijednosti tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće (HV 10)						
Prolaz	Osnovni materijal		Zona uticaja toplote ZUT		Metal zavara	
Lice zavara	206 do 221	Prosjek 212	212 do 270	Prosjek 243	230 do 236	Prosjek 232
Korijen zavara	218 do 224	Prosjek 222	221 do 258	Prosjek 246	236 do 243	Prosjek 241

Mikrostruktura osnovnog materijala, ZUT-a i zavara je popušteni martenzit, što je posljedica termičke obrade popuštanja na 750 °C u trajanju od 3 sata.

#### 5. ZAKLJUČAK

Izmjerene vrijednosti tvrdoće su u granicama propisanim prema WGB 508L za materijal cijevi oznake X10CrMoVNb 91. Uočava se neznatno povećanje tvrdoće u zoni uticaja toplote (mjerenje uz lice zavara). Ovo lokalno povećanje tvrdoće je u saglasnosti sa strukturnim promjenama, i dosta ispod maksimalno dozvoljene vrijednosti od 320 HV10 za područje zone uticaja toplote.

Izabrana tehnologija zavarivanja – kombinacija TIG i REL postupaka, temperatura predgrijavanja, termička obrada nakon zavarivanja visokolegiranog čelika X10CrMoVNb 91 (P91) dali su ujednačene i prihvatljive vrijednosti tvrdoće i mikrostrukture osnovnog materijala, zone uticaja toplote i zavara.

#### 6. LITERATURA

- [1] Standard BAS EN ISO 15614-1: 2005: Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale –Ispitivanje postupka zavarivanja – Dio 1: Elektrolučno i plinsko zavarivanje čelika te elektrolučno zavarivanje nikla i legura nikla
- [2] Ivan Hrivnjak: Teorija zavarivosti metala i legura, Slovačka akademija nauka, Bratislava, 1989.
- [3] Standard BAS EN 10216-2: 2003:Bešavne čelične cijevi za rad pod pritiskom – Tehnički uvjeti isporuke- Dio 2: Nelegirane i legirane čelične cijevi sa specificiranim osobinama na povišenoj temperaturi
- [4] [www.dusz.org.rs/casopis](http://www.dusz.org.rs/casopis) - Zavarivanje i zavarene konstrukcije (1/2007), str. 11-15
- [5] Standard BAS EN 1043-1:2009: Ispitivanje sa razaranjem metalnih materijala, Ispitivanje tvrdoće, Dio 1: Ispitivanje tvrdoće elektrolučno zavarenih spojeva
- [6] Standard BAS CR ISO 15608:2001 – Zavarivanje – Uputstvo za sistem grupisanja metalnih materijala