



ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE

WELDING & WELDED STRUCTURES

God. 62 Vol. 62	Br. 2 No. 2	2-96 2-96	Beograd Belgrade	Srbija Serbia	2017. 2017.
--------------------	----------------	--------------	---------------------	------------------	----------------

ČASOPIS DRUŠTVA ZA UNAPREĐIVANJE
ZAVARIVANJA U SRBIJI

SERBIAN WELDING SOCIETY
QUARTERLY REVIEW

IZLAZI TROMESEČNO

IZDAVAČ / PUBLISHER

**DUZS - Društvo za unapređivanje
zavarivanja u Srbiji**

Adresa: 11000 Beograd, Grčića Milenka 67

Za izdavača / For Publisher

Branislav Lukić, dipl.ing, predsednik DUZS

UREDNIŠTVO / EDITORIAL

Glavni i odgovorni urednik / Editor-in-Chief

Milica Antić, dipl.ing. EWE

duzs@eunet.rs, milicamantic@yahoo.com

Tehnički urednik / Technical Editor

Branislav Lukić, dipl.ing

Redakcijski odbor / Editorial Board

Dr Nenad Radović, dipl.ing.

Dr Bore Jegdić, dipl.ing.

Miloš Pavlović, dipl.ing.

UREĐIVAČKI ODBOR / PUBLISHING COUNCIL

Dr Vencislav Grabulov, dipl.ing, (predsednik)

Prof. dr Miroslav Đurđanović, dipl.ing.

Prof.dr Vukić Lazić, dipl.ing.

Doc.dr Ismar Hajro, dipl.ing. (BiH)

Prof.dr Darko Bajić, dipl.ing. (Crna Gora)

Prof. dr Aleksa Blagojević, dipl.ing. (BiH, Republika Srpska)

Prof. dr Sveto Cvetkovski, dipl.ing. (Makedonija)

Doc. dr Tomaž Vuherer, dipl.ing. (Slovenija)

Prof. dr Ivan Samardžić, dipl.ing. (Hrvatska)

Dr Horia Dascau, dipl.ing. (Rumunija)

REDAKCIJA I MARKETING / EDITORIAL OFFICE AND MARKETING



Vesna Jović
Grčića Milenka 67, I sprat
11000 Beograd



Tel / Fax + 381 (11) 2420-652
(10-16h)



duzs@eunet.rs
www.duzs.org.rs

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд
621.791

ZAVARIVANJE i zavarene konstrukcije :
časopis Društva za unapređivanje zavarivanja
u Srbiji = Welding & Welded Structures :
Serbian Welding Society quarterly review /
glavni i odgovorni urednik = editor-in-chief Milica Antić. –
Vol. 41, no. 1 (1996)- . - Beograd :
Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji,
1996-. (Beograd : VIS studio).-29 cm
Tromesečno.

ISSN 0354-7965 = Zavarivanje i zavarene konstrukcije
COBISS.SR-ID 105396743

CENE I NARUDŽBINA ZA 2017.

Cena pojedinačnog broja 825,00 dinara

Godišnja pretplata 2500,00 dinara

Tekući račun: 355-1025530-87

PRICE AND ORDER

Annual subscription: EUR 100

Account No. 000200073783

VBUBRS22 (Vojvođanska banka Novi Sad, Srbija)
IBAN CODE RS35 3550 0000 0200 0737 83

ŠTAMPA / PRINTED

“VIS STUDIO” d.o.o.

Bulevar Arsenija Čarnojevića 123, Beograd

Tiraž: 400 kom.

2/2017

SADRŽAJ

CONTENTS



NAUKA • ISTRAŽIVANJE • RAZVOJ

SCIENCE • RESEARCH • DEVELOPMENT

- 53 INVESTIGATION PROPERTIES OF HIGH FREQUENCY WELDED STEEL PIPES FOR NATURAL GAS TRANSPORTATION MADE OF X60 STEEL
Sveto Cvetkovski
- 53 ISTRAŽIVANJE OSOBINA VISOKOFREKVENTNO ZAVARENIH CEVI OD ČELIKA X60 ZA TRANSPORT PRIRODNOG GASA
- 65 VEZA IZMEĐU KOROZIONOG POTENCIJALA I RAZLIČITIH VIDOVA KOROZIJE METALA, LEGURA I NJIHOVIH ZAVARENIH SPOJEVA-DEO I
Bore V. Jegdić, Biljana M. Bobić i Milica Bošnjakov
- 65 RELATIONSHIP BETWEEN CORROSION POTENTIAL AND DIFERENT CORROSION FORMS OF METALS, ALLOYS AND THEIRS WELDED JOINTS-PART I



MIZ

IIW

- 91 METHOD TO CALCULATE ULTRASONIC WAVE VELOCITY BY USING CHEMICAL COMPOSITION OF AUSTENITIC STAINLESS STEELS
Tatsuya Yoshimoto, Hideki Horikawa, Takumi Sugioka, Yoji Wada, Tomiko Yamaguc and Kazumasa Nishio
- 91 METODE IZRAČUNAVANJA BRZINE ULTRAZVUČNIH TALASA KORIŠĆENJEM HEMIJSKOG SASTAVA AUSTENITNOG NERĐAJUĆEG ČELIKA



OBRAZOVANJE

EDUCATION

- 77 ISTRAŽIVANJE REPARATURE ZAVARENOG SPOJA BEZ NAKNADNE TERMIČKE OBRADNE NA ČELIKU P91
- 77 INVESTIGATION OF WELD REPAIR WITHOUT POST-HEAT TREATMENT FOR P91



VESTI

NEWS

- 52 SEMINAR SA TEMOM: TERMIČKA OBRADA ČELIKA I ZAVARENIH SPOJEVA
- 76 TAKMIČENJE: "ZAVARIVAČ 2017"
- 76 MIŠLJENJE (KOMENTAR) O KNJIZI TERMIČKO REZANJE METALA
- 90 INTERVIJU: PRIVREDNICI SRBIJE, OSTOJA MILOSAVIĆ
- 96 MARKETING

Poštovani čitaoci,

pre svega, izražavamo veliko zadovoljstvo zbog održanog seminara vezanog za termičku obradu zavarenih spojeva, o čemu se možete više informisati u rubrici Vesti.

Ovoga puta ćete imati priliku da pročitate radove iz različitih oblasti, od korozije do ispitivanja bez razaranja.

U narednom letnjem periodu očekuje nas redovna godišnja skupština našeg Društva, godišnja skupština Međunarodnog instituta za zavarivanje, organizovanje našeg tima za takmičenje mladih zavarivača u okviru sajma zavarivanja koji je ove godine u Dizeldorfu, Nemačka i naravno priprema novih događaja za naša jesenja druženja.

Do tada, želimo vam ugodan odmor, naravno uz „konzumiranje“ sadržaja ovog broja časopisa.

**Glavni i odgovorni urednik
Milica Antić, dipl.ing. EWE**

Obaveštavamo Vas da je DUZS-CertPers počeo sa izdavanjem IWE / IWT / IWI-C pečata



Pečati se izdaju na zahtev kandidata koji imaju IWE / IWT / IWI-C diplome koje je izdao DUZS-CertPers. Sve informacije i obrazac zahteva pogledajte na našem sajtu www.duzs.org.rs

U septembru 2017 u Dizeldorfu se održava međunarodni sajam:
SCHWEISSEN & SCHNEIDEN WELTMESSE 2017

Ponudu jedne od turističkih agencija koja je u svoj program uvrstila organizaciju putovanja na ovaj sajam možete pogledati na sledećem linku:

<http://www.tti.rs/wp-content/uploads/DusSchweissenSchneiden17.pdf>



Termička obrada čelika i zavarenih spojeva

U Institutu za standardizaciju Srbije 5. aprila, realizovan je seminar na temu termičke obrade zavarenih spojeva.

U okviru seminara održana su predavanja na sledeće teme:

Red. br.	Tema	Predavač
1.	Primena standarda iz oblasti zavarivanja	<i>Aleksandar Stefanović</i>
2.	Termička obrada čelika (vrste, ciljevi)	<i>Vladan Jeremić</i>
3.	Prikaz izveštaja SRPS CEN ISO/ TR 14745	<i>Milica Antić</i>
4.	Primeri iz prakse	<i>Dragan Mitić</i>

Svi polaznici seminara dobili su:

- štampani primerak tehničkog izveštaja: **SRPS CEN ISO/TR 14745:2016**
- materijal na CD-u
- uverenje o pohađanju

Na kraju seminara, učesnici su imali priliku da popune anonimnu anketu i da u njoj izraze svoje mišljenje o održanom seminaru.

Anketa se sastojala iz dva dela, u prvom delu su tabelarno prikazani kriterijumi za ocenu seminara i parametri za ocenjivanje predavača. U drugom delu učesnici su imali priliku da opisno navedu svoje pozitivne i negativne utiske, kao i da navedu teme iz ove i drugih oblasti koje ih posebno interesuju.

Predloge za nove teme seminara dalo je čak 57 % anketiranih, i to:

- Poseban seminar iz ove oblasti za materijale koji se primenjuju na termoelektranama
- Reparatura zavarivanja (8 x)
- Postupci zavarivanja
- Zavarivanje dupleks čelika
- Zavarivanje u procesnoj tehnici i standardi zahtevani u toj oblasti (u pitanju su farmaceutuska i prehrambena industrija / orbitalno zavarivanje)
- Kvalifikacija tehnologije zavarivanja (3 x)
- Izbor materijala za opremu pod pritiskom – odobreni materijali / PMA
- Savremena oprema za termičku obradu i izolacioni materijali
- Kako izbegavati termičku obradu
- Odabir dodatnog materijala pri zavarivanju raznorodnih visokolegiranih čelika
- Ostale oblasti vezane za zavarene spojeve
- Primeri iz prakse
- Ulazna kontrola
- Zavarivanje i ispitivanje Al i Al konstrukcija.



Izlaganje se pažljivo prati



Ponešto se i zapisivalo

Na pitanje da li je seminar ispunio njihova očekivanja, 32 učesnika (94 % anketiranih) zaokružilo je odgovor: „*Da, u potpunosti.*”

Sličan broj pozitivnih komentara kao i veliko interesovanje za nove seminare, potvrđuju da je seminar ispunio očekivanja učesnika.



Prof. Cvetkovski S. PhD

INVESTIGATION PROPERTIES OF HIGH FREQUENCY WELDED STEEL PIPES FOR NATURAL GAS TRANSPORTATION MADE OF X60 STEEL

ISTRAŽIVANJE OSOBINA VISOKOFREKVENTNO ZAVARENIH CEVI OD ČELIKA X60 ZA TRANSPORT PRIRODNOG GASA

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK / UDC: 621.791:621.643

Rad primljen / Paper received:

Jun 2017.

Ključne reči: visoka frekvencija, zavarivanje, kontaktori, čelik x60, mikrostruktura

Adresa autora / Author's address:

Faculty of Technology and Metallurgy – Ss Cyril and Methodius University Skopje, Republic of Macedonia¹

sveto@tmf.ukim.edu.mk

Key words: high frequency, welding, contactors, x60steel, pipes, microstructure

ABSTRACT

Basic idea in this research work is to check prescribed quality requirement of steel pipes welded by implementation of high frequency contact welding process (HFCW). These pipes are intended for natural gas transportation. As a raw material for pipes production was used X60M steel coils with thickness of 6.5 mm. Outer diameter of pipe is $\Phi 508$ and length 12000 mm. Preliminary welding procedure is given based on personal experience and technical knowledge. Special attention was paid to the most important welding parameters: current frequency, voltage and welding speed. After performing of welding additional heat treatment (normalization) of the welded pipes (joints) was performed at the temperature of 900°C.

In order to confirm proposed welding technology, complex investigations were performed. As first chemical analysis of base metal was performed. Nondestructive testing encompass visual inspection, and ultrasound testing of pipes, while destructive testing consists of tensile testing, bend testing and hardness measurement. Besides, for analysis of micro and macro structure of welded joint metallographic investigation was made. Hydrostatic test and flattening test as technological investigations were performed too. Carried investigations confirmed that produced pipes with predicted welding parameters completely fulfilled standard requirement, and serial production of ordered pipes for natural gas transportation was realized.

REZIME

Osnovna ideja u ovom istraživačkom radu je provera predviđenih zahteva kvaliteta čeličnih cevi zavarenih primenom postupka kontaktnog visokofrekventnog zavarivanja (HFCW)). Ove cevi su namenjene za transport prirodnog gasa. Kao sirovina za proizvodnju cevi korišćene su trake od čelika X60M debljine 6,5 mm. Spoljašnji prečnik cevi je $\Phi 508$ a dužina 12000 mm. Preliminarni postupak zavarivanja je odabran na osnovu ličnog iskustva i tehničkog znanja. Posebna pažnja je posvećena najvažnijim parametrima zavarivanja: frekvencija struje, napon i brzina zavarivanja. Nakon zavarivanja, sprovedena je dodatna termička obrada (normalizacija) zavarenih cevi (spojeva) na temperaturi od 900°C.

U cilju potvrđivanja predložene tehnologije zavarivanja, preduzeta su kompleksna istraživanja. Kao prvo, urađena je hemijska analiza osnovnog materijala. Ispitivanje bez razaranja obuhvata vizuelni pregled i ultrazvučno ispitivanje cevi, dok se ispitivanje sa razaranjem sastoji od ispitivanja zatezanjem, savijanjem i merenja tvrdoće. Osim toga, za analizu je sprovedeno mikro i makro strukturalno ispitivanje. Hidrostatičko ispitivanje i provera spljoštavanjem su takođe obavljena kao tehnološka istraživanja. Sprovedeno istraživanje je potvrdilo da su proizvedene cevi, predviđenim parametrima zavarivanja u potpunosti ispunjeni zahtevi standarda, a serijska proizvodnja naručenih cevi za transport prirodnog gasa je ostvarena.



1. Introduction

Over the past few decades severe demands were placed on the pipes manufacturer with respect to the development and processing of material for pipeline. Generally longitudinally welded steel pipes are used for gas and oil transportation because of high safety and economical solution. Welded pipes must possess high strength and toughness, because of high pressure of the a fluid inside the pipelines and outer pressure of the soil to the grounded pipelines [1].

More than eight million stons of steel pipes are produced in the world every year. Most of them are produced from standard steel grades. Bigger challenge for pipe producers is manufacturing of pipe from X60, and production of X70 and X80 need special efforts and measures [2,3]. High frequency tube welding is one of the most forgiving industrial processes nowadays and it is possible to produce acceptable tubing for most purposes. High frequency welding is a form of electrical resistance welding (ERW). A voltage is applied (HF contact) or induced (HF induction) across the edges of the open tube just prior to the point of closure. This voltage causes a current to flow along the edges to the point where they meet, causing rapid heating of the metal. Pressure is applied by the welding rolls, which forces the heated metal into contact, forming a hot diffusion bond. This pressure forces molten metal and any impurities out of the weldment [4]. The only real difference between high frequency contact and induction welding is that with contact welding, the voltage is applied directly to the strip edges by means of sliding contacts, whereas in the case of induction welding, the voltage is induced by the magnetic flux surrounding the coil. The reason for using a higher frequency is that in the case of induction welding, it is desirable to keep the size of the coil reasonably small. The higher the frequency, the less flux is required. The higher frequencies also affect the behavior of the current that flows in the "vee" wedge. As frequency is increased, the current tends to concentrate closer and closer to the edges of the strip. This is partly due to the "skin effect" which causes current to flow on the surface of conductors at high frequency, and partly due to the "proximity effect" which causes current on adjacent conductors to concentrate on the adjacent surfaces. Both of these effects are caused by distortion or interaction between the magnetic fields associated with the current flow [5,6]. Frequencies used for tube welding are in the range between roughly 100 kHz to 800 kHz, with lower frequencies being used for large, heavy wall tube, and the upperrange

1. Uvod

U proteklih nekoliko decenija, pred proizvođače cevi postavljeni su oštri zahtevi vezani za razvoj i izradu materijala za cevovode. Uglavnom se za transport nafte i gasa koriste uzdužno zavarene čelične cevi zbog visoke sigurnosti i kao ekonomično rešenje. Zavarene cevi moraju imati visoke vrednosti čvrstoće i žilavosti, zbog visokog pritiska fluida unutar cevovoda i spoljašnjeg pritiska tla na ukopane cevovode [1].

Više od osam miliona tona čeličnih cevi godišnje se proizvede u svetu. Većina se proizvodi od standardnog čelika. Veći izazov za proizvođače cevi je proizvodnja cevi od X60, a proizvodnja X70 i X80 zahteva posebne napore i mere [2,3].

Visokofrekventno zavarivanje cevi je jedan od najvažnijih industrijskih procesa danas, tako da je moguće proizvesti prihvatljive cevi za većinu namena. Visoko frekvenventno zavarivanje je oblik elektrootporskog zavarivanja (ERW). Napon se ostvaruje (HF kontaktom) ili indukovanjem (HF indukcija) preko ivica otvora cevi samo do mesta zatvaranja. Ovaj napon uzrokuje da struja prolazi duž ivice do tačke gde se susreću, što uzrokuje brzo zagrevanje metala. Pritisak se postiže valjcima za zavarivanje, koji guraju zagrejani metal u kontakt, formirajući vrući difuzioni sloj. Ove sile pritiska rastopljenog metala izbacuju sve nečistoće iz zavarenog elementa [4].

Jedina prava razlika između visokofrekvetnog zavarivanja kontaktom i indukcijom je da se kod kontaktnog zavarivanja, napon ostvaruje direktno na ivicama trake pomoću kliznih kontakata, dok u slučaju indukcijskog zavarivanja, napon se indukuje magnetnim fluksom koji okružuje zavojnicu. Razlog za korišćenje većih frekvenci je, da je u slučaju indukcijskog zavarivanja, poželjno zadržati veličinu zavojnica razumno malom. Što je veća frekvenca, potreban je manji fluks.

Veće frekvence takođe utiču na ponašanje struje koja teče u "V" klin. Kako se povećava frekvenca, struja teži da se koncentriše sve bliže i bliže ivicama trake. To je delom zbog "skin efekta", koji uzrokuje da struja prolazi po površini provodnika pri visokim frekvencama, a delom zbog "efekta blizine" koji izaziva struju na susednom provodniku da se koncentriše na susednim površinama. Oba ova efekti su uzrokovana izobličenjem ili interakcijom između magnetnih polja usled protoka struje [5,6]. otvorene cevi. Frekvence koje se koriste za zavarivanje cevi su u rasponu od otprilike 100 kHz do 800 kHz, niže frekvence se koriste za velike, tankozidne cevi, a gornji opseg koji se koristi za male, tankozidne proizvode, posebno od obojenih



being used for small, thin walled products, especially those using nonferrous material. The current that flows along the edges of the strip to the apex of the "vee" wedge the strip to welding temperature. Current will also tend to flow around the inside circumference of the open tube. This heats the entire tube, and does not contribute to the welding process.

Thermo-mechanical control process (TMCP) is one of microstructural control techniques, combining controlled rolling and controlled cooling, to obtain excellent properties of steel plates, such as high strength, excellent toughness and weldability, Controlled rolling and controlled cooling make it possible to satisfy high strength and high toughness requirements which could only be achieved conventionally by off-line heat treatment located close to the mill, to a practical operation type of process continuation also responds to the needs of higher productivity and shorter production time that are always demanded in industrial products[7]. The toughness of the line pipes is paramount in their suitability for application.

The joint resulting from contact welding is quite narrow, with a central 2 mm wide region, but it represents a source of weakness, so the welding process is immediately followed by induction heat treatment. The intention of the latter is to refine the microstructure by re-austenisation at a lower temperature [8-10].

One of the TMCR are the Alform series i.e. thermo mechanically rolled, weldable and bendable fine grain structural steels. Plates made of these steels combine the good toughness properties of the thermo-mechanically rolled fine-grain steels according to EN 10025-4 with the excellent cold forming properties of the cold forming steels according to EN 10149-2. The alloying concept provides very low carbon contents and low carbon equivalents, which aims in very good weldability [11]. In particular, the high-strength grades provide special advantages in areas, where weight savings are of great importance. Although the heat-treatment improves the toughness of the welded region, the increase is not as large as might be expected from the reduction in the scale of the microstructure [12-13].

Basing on the previously mentioned facts it is clear that basic idea in this research work is to verify proposed welding technology for production of steel pipe made of micro alloyed steel X60M intended for natural gas transportation using HFCW process through very complex mechanical, microstructural and technological investigations.

metala. Struja koja teče duž ivica trake do vrha "V" klina trake postiže temperaturu zavarivanja. Struja će takođe imati tendenciju da teče oko unutrašnje kružnice]. Ovo zagreva celu cev, i ne doprinosi procesu zavarivanja.

Kontrolisani termo-mehanički proces (TMCP) je jedna od tehnika kontrole mikrostrukture, kombinovanjem kontrolisanog valjanja i kontrolisanog hlađenja, da bi se dobila odlična svojstva čeličnih limova, kao što su visoka čvrstoća, odlična žilavost i zavarljivost. Kontrolisano valjanje i kontrolisano hlađenje omogućavaju da se zadovolje zahtevi visoke čvrstoće i visoke žilavosti što bi se moglo postići samo naknadnom konvencionalnom termičkom obradom u neposrednom nastavku valjanja, kao i praktičan tip rada kontinualnog procesa što odgovara većoj produktivnosti i kraćem vremenu proizvodnje, što se uvek traži kod industrijskih proizvoda [7]. Žilavost cevovoda je najvažnija u njihovoj podobnosti za primenu.

Spoj koji je rezultat kontaktnog zavarivanja je dosta uzak, sa centralnom regijom širine 2 mm, ali on predstavlja izvor oslabljenja, tako da je proces zavarivanja praćen indukcijom termičkom obradom. Namera je da se rafiniše mikrostruktura re-austenitizacijom na nižoj temperaturi [8-10].

Jedan od TMCR je Alform serija t.j. termo-mehanički valjani, zavarljiv i savitljiv fino-zrni konstrukcijski čelik. Ploče od ovih čelika kombinuju dobre žilavosti fino-zrni termo-mehanički valjanih čelika prema EN 10025-4 s dobrim svojstvima za hladno oblikovanje prema EN 10149-2. Koncept legiranja zasnovan je na vrlo niskom sadržaju ugljenika i niskom ugljenikovom ekvivalentu, koji obezbeđuje dobru zavarljivost [11]. Posebno, klase visoko-čvrstih čelika imaju prednosti u područjima gde je smanjenje težine od velikog značaja. Iako termička obrada poboljšava žilavost područja zavarivanja, povećanje nije toliko veliko kao što se moglo očekivati smanjenjem skale mikrostrukture [12-13].

Bazirajući se na prethodno navedenim činjenicama, jasna je osnovna ideja u ovom istraživanju, provera predložene tehnologije zavarivanja za proizvodnju čeličnih cevi od mikro-legiranih čelika X60M namenjenih za transport prirodnog gasa, postupkom HFCW, preko vrlo kompleksnih mehaničkih, mikrostrukturnih i tehnoloških ispitivanja.



2. Material and experimental

Raw material

Raw material used (steel coils) for production of pipes for natural gas transportation was micro alloyed steel with designation X60MPSL2. Designation of steel is according to API 5, 45th Edition / ISO3183. Explanation of designation is the following: X means steel for pipe production according API. Digits 60ksi concerns to yield strength of steel i.e. to 420 MPa. M means that steel is produced by thermo mechanical rolling process. PSL refers to the product specification level where PSL2 provides a more extensive chemical composition complete with a mandatory minimum. Chemical composition and mechanical properties of raw material are given in the tables 1-3.

2. Materijal i eksperiment

Materijal sirovine

Korišćena sirovina (čelična traka namotana) za proizvodnju cevi za transport prirodnog gasa je mikro-legirani čelik oznake X60M PSL2. Označavanje čelika je prema API 5, 45.izdanje / ISO3183. Objašnjenje oznaka je sledeće: X znači čelik za proizvodnju cevi po API. Cifre 60 KSI označavaju napon tečenja čelika t.j. do 420 MPa. M znači da se čelik proizvodi termo - mehaničkim postupkom valjanja. PSL se odnosi na nivo specifikacije proizvoda gde PSL2 daje opširniji hemijski sastav zajedno sa obaveznim minimumom. Hemijski sastav i mehanička svojstva sirovog materijala dati su u tabelama 1-3.

El. %	Measured Mereno	Standard
C	0.074	0.12
Si	0.184	0.45
Mn	1.17	0.16
P	0.012	0.025
S	0.004	0.015
Cu	0.0233	
Cr	0.024	
N	0.007	
V	0.0403	
Nb	0.0357	
Ti	0.0111	

Table 1 Chemical composition of the raw material measured and according API standard requirement
Tabela 1 Hemijski sastav materijala sirovine –izmereni i prema zahtevu API standarda

Tensile test Ispitivanje zatezanjem			
	Rp _{0.2}	Rm	A%
BM OM	527	588	32.7
WM MŠ	530	584	-

Table 2 Mechanical properties of the raw material and weldment
Tabela 2 Mehaničke osobine materijala sirovine i zavarenog elementa

	Charpy V-notch, 0 ^o C			
	1	2	3	Av
BM OM	210	208	207	205
WM MŠ	190	180	165	179
HAZ ZUT	203	200	185	196

Table 3 Impact toughness of raw material weld metal and HAZ
Tabela 3 Vrednosti udarne žilavosti metala šava i ZUT



Before to start with automatic HFWP preliminary welding technology, based on the technical knowledge and the former experience was proposed. The most important welding parameters are given in the table 4.

Pre nego što će se početi sa automatskim HFWP predložena je preliminarna tehnologija zavarivanja, na osnovu tehničkih znanja i prethodnog iskustva. Najvažniji parametri zavarivanja su dati u tabeli 4.

Welding parameters Parametri zavarivanja	Values Vrednosti
Welding speed (m/min) Brzina zavarivanja	22
Voltage (kV) Napon	14,3
Current intensity (A) Jačina struje	23-24
Current Frequency Hz Frekvenca struje	400
Generator power kW Snaga generatora	600
Voltage index Indeks napona	57-58

Table 4 Typical parameters used for welding of HFRW
Tabela 4 Tipične vrednosti korišćenih parametara za HFRW

Delivered raw material for steel pipe production was in the form coils. The coils have to be with the proper wildness in order to be obtaining a pipe with necessary diameter. The coils are bringing to the starting point in the technological line (Figure 2a) from the store, figure 1a. Uncoiled strip is involved in the technological/production line (Figure 1b) by cranes. Formation of pipes from the strip is attended by the pressure of welding rolls. The rolls are properly chosen in accordance with pipe diameter and thickness of material. Formed pipe by the system of rolls before welding is presented in figure 2b. After forming, the pipes were welded implementing electro resistance contact welding with the contactors, figure 1c and 3a. Starting point of pipe welding and V-wedge are given in figure 4b. Parameters of the wedge play very important role concerning the quality of the welded joint. After welding, pipes were cut in the length of 12 meters using circular mechanical saw as is presented in figure 1 (d and e).

Softened and melted edges of the pipes are connected by the pressure of squeezing rolls (Figure 3). Excesses material and impurities are squeezed out on the inner and outer pipe surface. (Figure 4). Removal of the material (slag) is performed with special knives located on the inner and outer side of pipe.

Isporučena sirovina za proizvodnju čeličnih cevi je u obliku namotaja. Namotaji moraju biti odgovarajuće širine kako bi se dobijale cevi potrebnih prečnika. Namotaji se donose na polazište u tehnološkoj liniji (slika 2a) iz magacina, slika 1a. Odmotana traka se uvodi u tehnološku/proizvodnu liniju (slika 1b) kranovima. Formiranje cevi iz trake postiže se pritiskom valjaka za zavarivanje. Valjci su odgovarajuće izabrani prema prečniku cevi i debljini materijala.

Oblikovana cev, sistemom valjaka, pre zavarivanja prikazana je na slici 2b. Nakon oblikovanja, cevi su zavarene primenom elektro-otpornog kontaktnog zavarivanja preko kontaktora, slika 1c i 3a. Početna tačka zavarivanja cevi i V-klin su dati na slici 4b. Parametri klina igraju vrlo važnu ulogu u pogledu kvaliteta zavarenog spoja.

Nakon zavarivanja, cevi se seku na tačno 12 metara dužine kružnom mehaničkom testerom kao što je prikazano na slici 1 (d i e).

Omekšale i istopljene ivice cevi se spajaju pritiskom valjaka za istiskivanje (Slika 3). Višak materijala i nečistoća su istisnuti na unutrašnje i spoljašnje površine cevi. (Slika 4). Uklanjanje materijala (šljake) se obavlja posebnim noževima koji se nalaze na unutrašnjoj i spoljašnjoj strani cevi.

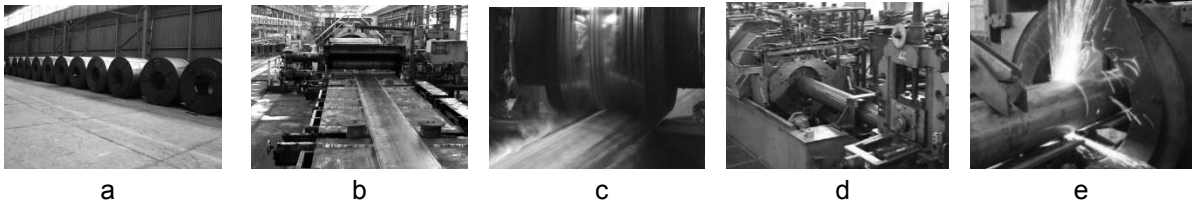


Figure 1 (a-d) Production of steel pipe from the raw material API X60 steel
 a. Store for raw material b. involving raw material in the production line c. welding of pipe d. welded pipe
 e. cutting of the pipe to the proper length

Slika 1 (a-d) Proizvodnja čeličnih cevi od sirovine –čelika API X 60

a. Magacin sirovina b. uvođenje sirovine u proizvodnu liniju c. zavarivanje cevi d. zavarena cev
 e. sečenje cevi na odgovaraju dužinu

As is shown in the figure 5, welded pipes are additionally subjected to heat treatment (normalization) in order to improve properties of welded joint (relaxation of stresses and microstructure). Normalization is performed at temperature of 900°C by six inductors. The width of normalized layer is about 20 mm.

Kao što je prikazano na slici 5, zavarene cevi se naknadno podvrgavaju termičkoj obradi (normalizacija) kako bi se poboljšala svojstva zavarenog spoja (relaksacija napona i mikrostrukture). Normalizacija se obavlja na temperaturi od 900°C sa šest induktora. Širina normalizovanog sloja je oko 20 mm.

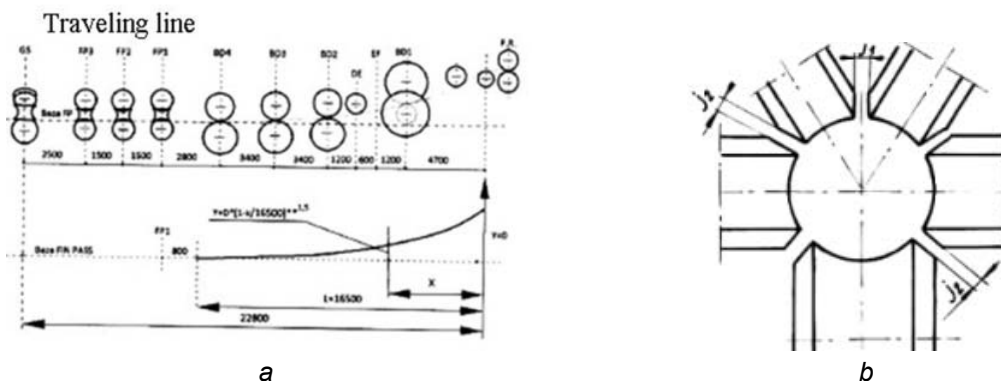


Figure 2a Technological line for contact welded pipes production b. final forming of pipe before welding b. formed pipe before HFCW

Slika 2a Tehnološka linija za proizvodnju kontaktno zavarenih cevi b. završno oblikovanje cevi pre zavarivanja c. oblikovana cev pre HFCW

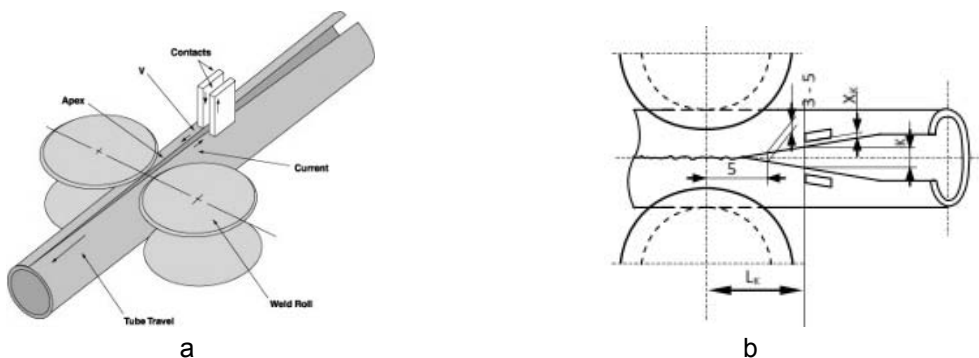


Figure 3 Electro resistance contact welding of pipes
 a. Contactors b. Welding start point and V-wedge

Slika 3 Elektrotoporsko kontaktno zavarivanje cevi
 a. kontaktori b. početna tačka zavarivanja i V klin

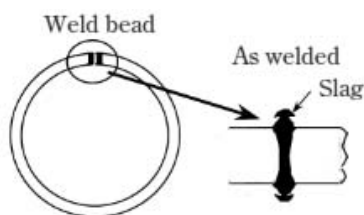


Figure 4 Pipe with excess material (slag)

Slika 4. Cev sa viškom materijala

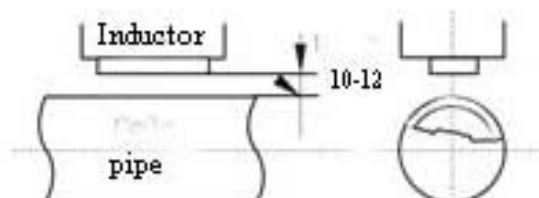


Figure 5 Induction heating of weld with 6 inductors

Slika 5 Indukciono zagrevanje zavarenog spoja sa 6 induktora

Investigation of preliminary welded pipes

Many complex investigations were performed in order to confirm quality of the welded joints. A welded pipe was subjected to hydrostatic testing under the pressure of 10 bars for period of 10 s. There was no leakage appearing during the testing. For flattening test two segments, 200 mm wide were cut and tested under pressure. Position of welds during the testing is shown at figure 6. Pressing of segment last until opposite sides of pipe touch each other. No defects i.e. cracks were detected during testing.

Istraživanje preliminarno zavarenih cevi

Mnoštvo složenih istraživanja je obavljeno kako bi se potvrdio kvalitet zavarenih spojeva. Zavarena cev je bila podvrgnuta hidrostatičkom ispitivanju pritiskom od 10 bara u periodu od 10 s. Nije bilo nikakvog curenja tokom ispitivanja. Za ispitivanje spljoštavanjem, isečena su dva segmenta, 200 mm širine i podvrgnuta su pritiskanju. Položaj zavarenog spoja tokom ispitivanja prikazan je na slici 6. Pritiskanje segmenta traje dok se suprotne strane cevi ne dodirnu. Nikakvi defekti t.j. prsline nisu otkrivene tokom ispitivanja.

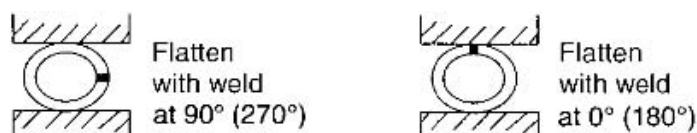


Figure 6 Flattening test of pipe segments

Slika 6 Ispitivanje spljoštavanjem segmenata cevi

Visual inspection was performed in order to detect surface defects or geometrical misalignment of the pipes edges. Testing was performed according BS EN ISO 17637:2011, and no defect was detected. From the investigated pipe were cut specimens for mechanical testing. Transferal tensile testing of welds was performed according EN ISO 4136. Three tensile testing specimens were prepared perpendicular to the welded joint, figure 7. The result is given in table 2. In all specimens breaking of specimens was out of the welded joint. Obtained values from testing are almost identical with base metal.

Vizuelna kontrola je obavljena u cilju otkrivanja oštećenja površine ili geometrijske nesaosnosti ivica cevi. Ispitivanje je obavljeno prema BS EN ISO 17637: 2011, a nijedan defekt nije otkriven. Od ispitivanih cevi su isečene epruvete za mehanička ispitivanja. Poprečno ispitivanje zatezanjem zavarenog spoja je izvedeno u skladu sa EN ISO 4136. Tri epruvete za ispitivanje zatezanjem su pripremljene upravno na zavareni spoj, slika 7. Rezultat je dat u tabeli 2. Na svim epruvetama, prekid epruvete je bio van zavarenog spoja. Dobijene vrednosti pri ispitivanju su gotovo identične sa osnovnim materijalom.

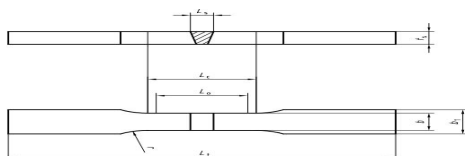


Figure 7 Longitudinal specimen
Slika 7 Podužna epruveta

Bend testing was made according to the EN ISO 5173:2010+A1:2011 standard. Sampling of the bending probes is according to schematic illustration in figure 8 (a-c). Bending angle was 180°C. Results of testing are given in the table 5. All tested probes fulfilled standard requirement.

Ispitivanje savijanjem je obavljeno u skladu sa EN ISO 5173: 2010 + A1: 2011. Uzorkovanje epruveta za savijanje je u skladu sa shematskom ilustracijom na slici 8 (a-c). Ugao savijanja je 180°C. Rezultati ispitivanja su dati u tabeli 5. Sve ispitane epruvete su ispunile zahteve standarda.

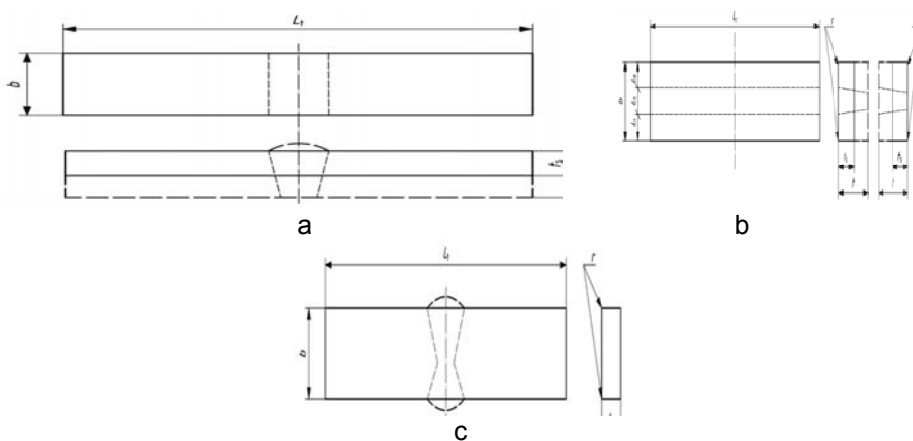


Figure 8 (a-c) a. Transverse root bend test specimen for a butt weld (TRBB) b. Longitudinal bend test specimen for a butt weld (LFBB and LRBB) c. Transverse side bend test specimen for a butt weld (SBB)

L – length of the specimen *b* – width of specimen, *t* – thickness of specimen

Slika 8 (a-c) a. Poprečna epruveta za ispitivanje savijanjem korena kod sučeonog spoja (TRBB) b. Podužna epruveta za sučeoni spoj (LFBB i LRBB) c. Poprečna epruveta za bočno savijanje sučeono spoja (SBB)
L-dužina epruvete *b*- širina epruvete *c*. debljina epruvete

Nr. Br.	Type of test Tip testa	Dimension of specimen Dimenzija epruvete	Bending angle Ugao savijanja	Results Rezultati
1	TFB	6.5x30	180 ⁰	good /dobro
2	TFB	6.5x30	180 ⁰	good
3	TFB	6.5x30	180 ⁰	good
4	TRB	6.5x30	180 ⁰	good
5	TRB	6.5x30	180 ⁰	good
6	TRB	6.5x30	180 ⁰	good
7	LRB	6.5x30	180 ⁰	good
8	LFB	6.5x30	180 ⁰	good
9	SB	6.5x6.5	180 ⁰	good
10	SB	6.5x6.5	180 ⁰	good

Table 5 Results of bend testing of the welded joint

Tabela 5 Rezultati ispitivanja savijanjem zavarenog spoja

Meaning of the abbreviations is the following:

TFB – transversal face bend, TRB – transversal root bend, LFB – longitudinal face bend, LRB – longitudinal root bend, SB – side bend.

Značenje skraćenica:

TFB- poprečno savijanje lica, TRB- poprečno savijanje korena, LFB- podužno savijanje lica, LRB-podužno savijanje lica, SB-bočno savijanje



Impact toughness testing was performed according EN ISO 9016:2012 and EN ISO 148-1:2010. Besides base metal, weld metal and HAZ were tested too. Results from testing are given in the table 3. Impact testing was done at temperature of 0°C. It has to be pointed out that approximation of obtained results was made in this case. The reason is that nonstandard Charpy specimens were used. Such specimens were prepared because the thickness of the pipe was 6,5 mm and for the standard Charpy specimens should be with thickness of 10 mm. By such reason, Charpy specimens were machined to the thickness of 5 mm from the bottom side. According standard determination obtained values from testing have to be one half of the values prescribed in standard for the specimen with thickness of 10 mm. Sampling of Charpy specimens for determination of impact toughness in the weldment and HAZ is given in the figure 9.

Ispitivanje udarne žilavosti je sprovedeno prema EN ISO 9016:2012 i EN ISO 148-1: 2010. Osim osnovnog materijala, metal šava i ZUT su takođe ispitani. Rezultati ispitivanja su dati u tabeli 3. Ispitivanje udarom je urađeno na temperaturi od 0°C. Mora se naglasiti da je napravljena aproksimacija dobijenih rezultata u ovom slučaju. Razlog je to što su se koristile nestandardne epruvete po Šarpiju. Takvi uzorci su pripremljeni, jer je debljina cevi 6,5 mm, a za standardnu Šarpi epruvetu treba da je debljine 10 mm. Iz tog razloga, Šarpi epruvete se mašinski obrađuju na debljinu od 5 mm sa donje strane. Prema standardnom određivanju, dobijene vrednosti pri ispitivanju moraju biti jedna polovina vrednosti propisanih u standardu za uzorak debljine 10 mm. Uzorkovanje Šarpi epruveta za određivanje udarne žilavosti u zavarenom elementu i ZUT dato je na slici 9.

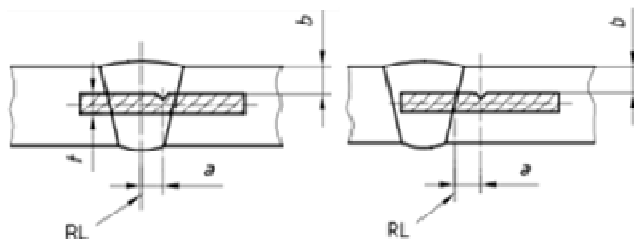
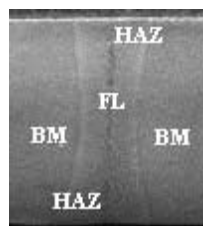


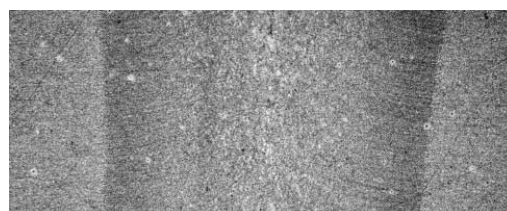
Figure 9 Sampling of Charpy specimens for determination impact toughness of weld metal and HAZ
Slika 9 Uzorkovanje Šarpi epruveta za određivanje udarne žilavosti metala šava i ZUT

Macrostructure of HF welded joint is presented in the figure 10 (a and b). From the macro photo can be clearly seen characteristic area in the welded joint. In the middle of the joint is fusion line. From the both sides of fusion line is HAZ and base metal which don't suffer from the welding heat input.

Makrostruktura HF zavarenog spoja prikazana je na slici 10 (a i b). Sa makro fotografija se jasno vidi karakteristično područje zavarenog spoja. U sredini spoja je linija stapanja. Sa obe strane linije stapanja je ZUT i osnovni materijal koji nije pretpreo uticaj toplote usled zavarivanja.



a



b

Figure 10 (a and b) Macro photos of the welded joints
Slika 10 (a i b) Makrofotografije zavarenih spojeva

Typical welding defects which can be formed during HF electric welding like cold laps, entrapped inclusions, cold weld, open weld, cross weld, cracks in the weld porosity in the welding zone are not detected in the welded joint. It can be seen that flux i.e. excess material formed during welding photo is cut (removed) from the upper and lower side of the welded joint.

Tipični defekti zavarivanja koji mogu da nastanu pri VF električnom zavarivanju kao što su hladni nalepci, zarobljeni uključci, hladni zavar, otvoreni zavar, poprečni zavar, prsline u šavu, poroznost u zoni zavarivanja nisu otkriveni u zavarenom spoju. Može se videti da šljaka t.j. višak materijala formiran tokom zavarivanja (fotografija) se reže (uklanja) sa gornje i donje strane zavarenog spoja

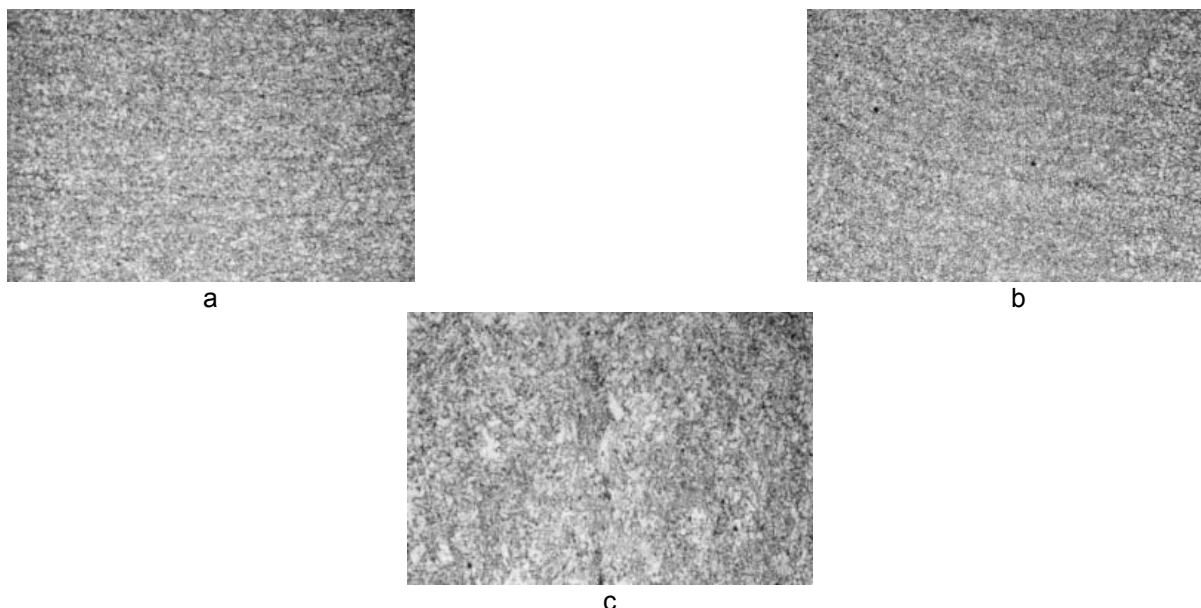


Figure 11 (a-c) Microstructure of the welded joint
Slika 11 (a-c) Mikrostruktura zavarenog spoja

Microstructure of the base metal is presented in the figure 11a. It is fine grain ferritic-bainitic microstructure. Fine grain HAZ zone can be seen in the figure in figure 11b. Both microstructures are very similar. Deformation of microstructure as result of pressure of forming rolls can be noticed in figure 11b too. Fusion line so called ferritic line is given in figure 11c. As can be see microstructure is coarser, and a dominant micro constituent in this area is block ferrite.

On the metallographic specimen was measured hardness measurement according to EN ISO 9015-1 (figure 10). Measurement was performed across the line parallel with the weld surface. Vickers method (HV10) for hardness measurement was implemented. The highest hardness was noticed in the weld metal and the lowest in the base metal, but generally pretty low hardness values are obtained According expectations, normalization lower the hardness of the welded joint (figure 12).

Mikrostruktura osnovnog materijala prikazana je na slici 11a. Ona je fino zrna feritno-beinitna. Fino zrna ZUT može se videti na slici na slici 11b. Obe mikrostrukture su vrlo slične. Deformacije mikrostrukture kao rezultat pritiska valjaka za oblikovanje može se uočiti na slici 11b. Linija stapanja tzv. feritna linija je data na slici 11c. Kao što se može videti mikrostruktura je grublja, a dominantan mikrokonstituent u ovoj oblasti su blokovi ferita.

Na metalografskom uzorku je sprovedeno merenje tvrdoće prema EN ISO 9015-1 (slika 10). Merenje je obavljeno po liniji paralelnoj s površinom šava. Primenjena je Vickers metoda (HV10) za merenje tvrdoće. Najveća tvrdoća zabeležena je u metalu šava a najmanja u osnovnom materijalu, ali generalno, dobijene su prilično niske tvrdoće. Prema očekivanjima, normalizacija snižava tvrdoću zavarenog spoja (slika 12).

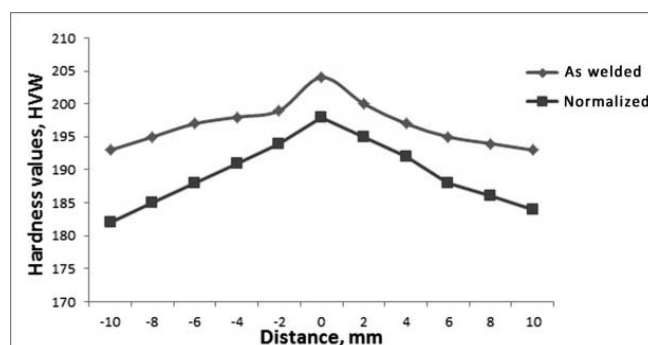


Figure 12 Hardness of the welded joint in the as welded and normalized condition
Slika 12 Tvrdoća zavarenog spoja u zavarenom i normalizovanom stanju



Discussion

Experimental welding was performed according formerly predicted parameters based on the technical knowledge and former experience. After finishing experimental work in accordance with preliminary given procedure, additional heat treatment (normalization) of welds in width of about 20 mm was carried to relax stresses in the welded joint. In order to check the properties of pipes very complex mechanical, chemical microstructural and technological investigations were performed mainly according with API 5L standard. Quality of raw material was checked before the welding. It is in accordance with standard requirement. Visual inspection showed that there is no geometrical defects of the pipe or of surface welding defects. Automatic ultrasonic investigation was done directly in the production line, and didn't detect volumetric welding defects. Hydrostatic test of pipe at pressure of 10 bar / 10 s didn't show leakage in the weld or cracks appearing. Flattening test of pipe segment 200 mm wide didn't reveal any defects in the welded joint after performed test. Hardness measurement showed that max hardness is in the WM something probably because of higher temperature and higher pressure of the welding rolls. Lower hardness was detected in the HAZ and the base material i.e. TMCR steel. On the contrary measured impact toughness values are quite opposite. So the best values have BM than HAZ and the lowest fusion line. It means that High frequent welding process lower toughness values. Anyhow all toughness values are much higher than standard requirement. Tensile testing of welded joint showed similar results to that of raw material. And all tensile specimens were broken in the base metal. As can be seen from the figure 12 normalization contribute to the lowering of hardness values as result of lowering the stresses in the welded joint.

Conclusion

This research work is about the identification of the best welding (technological) parameters which can grant the soundness of pipes realized by high frequency welding HFCW. Performed investigation of preliminary welded pipes are according API 5L standard. Obtained results of investigation confirmed that raw material and quality of experimentally produced welded pipe completely satisfy standard requirement. It means that

Diskusija

Eksperimentalno zavarivanje izvršeno je prema ranije predviđenim parametrima na osnovu tehničkog znanja i iskustva. Nakon završetka eksperimentalnog rada u skladu sa preliminarno datom tehnologijom, sprovedena je naknadna termička obrada (normalizacija) zavarenog spoja širine oko 20 mm radi otpuštanja napona u zavarenom spoju. Kako bi proverili svojstva cevi, sprovedena su vrlo kompleksna mehanička, hemijska mikrostrukturna i tehnološka istraživanja u skladu s API 5L standardom. Kvalitet sirovine je proveren pre zavarivanja. To je u skladu sa zahtevima standarda. Vizuelna kontrola je pokazala da ne postoje geometrijski defekti cevi ili oštećenja površine za zavarivanje. Automatsko ultrazvučno ispitivanje je sprovedeno direktno na proizvodnoj liniji, i nisu otkrivene zapreminske greške pri zavarivanju. Hidrostatičko ispitivanje cevi na pritisak od 10 bara / 10 s nisu pokazali curenja u zavarenom spoju ili pojavu prslina. Ispitivanje spljoštavanjem segmenata cevi širine 200 mm nije otkrio nikakve nedostatke u zavarenom spoju nakon obavljenog ispitivanja. Merenje tvrdoće je pokazalo da je maksimum tvrdoće u MŠ verovatno zbog viših temperatura i većeg pritiska valjaka za zavarivanje. Manja tvrdoća je otkrivena u ZUT i osnovnom materijalu t.j. TMCR čeliku. Naprotiv tome, izmerene vrednosti žilavosti su sasvim suprotne. Tako, najbolje vrednosti ima OM u odnosu na ZUT a najmanja vrednost je na liniji stapanja. To znači da postupak visokofrekventnog zavarivanja snižava vrednosti žilavosti. U svakom slučaju, sve vrednosti žilavosti su mnogo veće od zahteva standarda. Zatezna ispitivanja zavarenog spoja pokazuju slične rezultate sa onima za materijal sirovine. I sve epruvete za zatezanje su pukle u osnovnom materijalu. Kao što se može videti sa slike 12, normalizacija doprinosi smanjenju vrednosti tvrdoće kao rezultat smanjenja naprezanja u zavarenom spoju.

Zaključak

Ovaj istraživački rad ima za cilj identifikaciju najboljih zavarivačkih (tehnoloških) parametara koji mogu osigurati ispravnost cevi izrađenih visoko frekventnim zavarivanjem-HFCW. Sprovedena istraživanja preliminarno zavarenih cevi su prema API 5L standardu. Dobijeni rezultati istraživanja potvrdili su da sirovina i kvalitet eksperimentalno proizvedenih zavarenih cevi u potpunosti zadovoljavaju zahteve standarda. Ovo znači da je



preliminary welding procedure become qualified HFCW report for production of X60M pipes. It means that ordered production of pipes for natural gas transportation can start.

prethodni postupak zavarivanja postao izveštaj o kvalifikaciji tehnologije HFCW zavarivanja za proizvodnju cevi od X60M. To znači da poručena proizvodnja cevi za transport prirodnog gasa, može početi.

Literatura

- [1] Santosh Kumar S. K. Shukla, S. K. DeAtul Saxena, B. K. Jha, B. Mishra, API X 70 Grade HR Coils for ERW Pipe, *International Journal of Metallurgical Engineering* 2013, 2(2): 179-187
- [2] INOUE Tomohiro, SUZUKI Masahito, OKABE Takatoshi, MATSUI Yutaka, Development of Advanced Electric Resistance Welding (ERW) Linepipe "Mighty Seam TM" with High Quality Weld Seam Suitable for Extra-Low Temperature Services *JFE GIHO* No. 29 (Feb. 2012), p. 17-21
- [3] ENDO Shigeru, NAKATA Naoki, Development of Thermo-Mechanical Control Process (TMCP) and High Performance Steel in JFE, *TECHNICAL REPORT* No. 20 (Mar. 2015)
- [4] VOESTALPINE, Thermomechanically rolled fine-grain steels, Technical terms of delivery for heavy plates
- [5] Petru Simion, Vasile Dia, Bogdan Istrate, Corneliu Munteanu, Controlling and Monitoring of Welding Parameters for Micro-alloyed Steel Pipes Produced by High Frequency Electric Welding, *Advanced Materials Research* Vol. 1036 (2014) pp 464-469
- [6] D. KIM, T. KIM, Y. W. PARK, K. SUNG, M. KANG, C. KIM, C. LEE, AND S. RHEE, Estimation of Weld Quality in High-Frequency Electric Resistance Welding with Image Processing, *Welding Journal*, March 2007, 71s-79s
- [7] ARCELOR MITAL, Steel for Oil & Gas Pipes Line Pipe, OCTG & Well Intervention

Literature

- [8] C. Mapelli, C. Corna RESEARCH OF THE BEST TECHNOLOGICAL AND METALLURGICAL PARAMETERS FOR PERFORMING THE ELECTRIC RESISTANCE WELDING OF LOW CARBON STEELS, *la metallurgia italiana*, ottobre 2008
- [9] P. Yan, O. E. G'üng'or, P. Thibaux, M. Liebherr, H. K. D. H. Bhadeshia, Tackling the Toughness of Steel Pipes Produced by High Frequency Induction Welding and Heat-Treatment, *Materials Science and Engineering, A Volume 528, Issues 29-30, 15 November 2011, Pages 8492-8499*
- [10] E. Treiss. Induction Annealing of welds in the fabrication of high-frequency induction welded steel line pipes. *3R International*, 20(11):627-630, 1981.
- [11] Joo, Min Sung, Anisotropy of Charpy Properties in Linepipe Steels, Thesis for Doctor of Philosophy Pohang, Korea, 12 April 2012
- [12] John Wright, Optimizing Efficiency in HF Tube Welding Processes *TUBE & PIPE TECHNOLOGY* - November/December 1999
- [13] Athanasios S. Tazedakis, Nikolaos G. Voudouris, Mike Musslewhite MANUFACTURING OF 25MM HEAVY-WALL LINEPIPE USING THE HIGH FREQUENCY INDUCTION (HFI) WELDING TECHNIQUE, A CHALLENGE FOR A PIPE MANUFACTURER, Proceedings of the 8th International Pipeline Conference IPC 2010 September 27-October 1, 2010, Calgary, Alberta, Canada



Bore V. Jegdić¹, Biljana M. Bobić¹ i Milica Bošnjakov

Relationship between corrosion potential and different corrosion forms of metals, alloys and their welded joints-part I

Veza između korozionog potencijala i različitih vidova korozije metala, legura i njihovih zavarenih spojeva-deo I

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK / UDC: 620.193:621.791.05

Rad primljen / Paper received:

Jun 2017.

Ključne reči: korozija, korozioni potencijal, metali i legure, zavareni spojevi

Izvod

U ovom radu opisana je veza između korozionog potencijala i različitih vidova korozije metala i njihovih zavarenih spojeva. Pored toga, opisana je priroda korozionog potencijala i postupak njegovog merenja. Na jednostavan način pokazano je kako se na osnovu vrednosti korozionog potencijala može odrediti sklonost zavarenih spojeva aluminijumskih legura i zavarenih spojeva ugljeničnih čelika prema galvanskoj koroziji. Takođe je pokazano kako se na osnovu merenja korozionog potencijala mogu odrediti različita metalurška i koroziona stanja aluminijumskih legura, kao i sklonost zavarenih spojeva nerđajućih čelika prema interkristalnoj koroziji. Zbog velikog broja primena merenja korozionog potencijala, rad je podeljen na dva dela (deo I i deo II).

UVOD

Kod zavarenih spojeva se, pored strukturnih promena, često javlja i hemijska nehomogenost, što u znatnoj meri utiče na koroziono ponašanje zavarenih spojeva. Kod zavarenih spojeva postoji nekoliko različitih zona. Zona topljenja, ili oblast metala šava, nastaje popunjavanjem prethodno pripremljenog žleba rastopljenim dodatnim materijalom. Po završetku očvršćavanja metal šava ima karakterističnu strukturu livenja. Sloj koji poslednji očvršćava ima izrazito dendritnu strukturu, za koju je karakteristična pojava likvacije, tj. lokalne hemijske nehomogenosti, zbog nedostatka vremena za difuziju atoma legirajućih elemenata. U zoni uticaja toplote (ZUT), pri zagrevanju i hlađenju tokom zavarivanja, dolazi do različitih faznih i strukturnih transformacija. Na

Adresa autora / Author's address:

¹Univerzitet u Beogradu, Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju, IHTM, Njegoševa 12.

*Autor za prepisku: borejegdic@yahoo.com (Bore V. Jegdić)

Key words: corrosion, corrosion potential, metals and alloys, welded joints

Abstract

This paper briefly describes the relationship between corrosion potential and different corrosion forms of metals and their welded joints. The nature of corrosion potential and the method of its measurement is also described. It is shown in a simple way how the tendency of welded joints to galvanic corrosion can be determined on the basis of the measured corrosion potential value. It is also shown that different metallurgical and corrosion states of aluminum alloys can be evaluated using the measured value of corrosion potential. The tendency to intergranular corrosion in the welded joints of stainless steels can be predicted on the basis of corrosion potential. Due to a large number of corrosion potential measurement applications this work is divided into two parts (part I and part II).

primer, kod nerđajućih čelika i aluminijumskih legura često dolazi do izdvajanja određenih faza po granicama zrna i pojave interkristalne korozije [1]. Korozija je destrukcija metala usled hemijske ili elektrohemijske reakcije sa okolnom sredinom. Pri koroziji, na površini metala teku istovremeno dve ili više elektrohemijskih reakcija. Anodna reakcija je rastvaranje metala, odnosno prelazak metalnih jona u rastvor. Katodna reakcija je redukcija nekog oksidacionog sredstva koje je prisutno u rastvoru. To je najčešće redukcija kiseonika ili razlaganje vode uz izdvajanje vodonika. U kiseloj sredini se istovremeno odvija i reakcija redukcije vodoničnih jona. Tokom odigravanja elektrohemijske korozije na površini metala se uspostavlja korozioni



potencijal E_{kor} (potencijal otvorenog kola ili mešoviti potencijal), pri kojem je brzina anodne reakcije jednaka brzini katodne reakcije[1]. Vrednost E_{kor} zavisi od prirode metala, stanja njegove površine, sastava i koncentracije elektrolita, temperature itd.

Izmerena vrednost E_{kor} može se upotrebiti za procenu korozionog ponašanja metala i legura i njihovih zavarenih spojeva. U ovom radu pokazano je kako se na osnovu vrednosti E_{kor} može odrediti sklonost metala prema različitim vidovima korozije, kao što su galvanska korozija, piting, interkristalna i naponska korozija, sklonost prema vodoničnoj krtosti itd. Takođe, na osnovu vrednosti E_{kor} moguće je proceniti kompatibilnost pojedinih komponenata metalnih implantanata koje su u električnom kontaktu, mogu se odrediti strukturalna i metalurška stanja aluminijumskih legura, proceniti opasnost od korozije čelične armature u betonu, proceniti pravilno funkcionisanje anoda za protektorsku katodnu zaštitu itd. Opisane primene merenja E_{kor} ilustrovane su eksperimentalnim rezultatima autora rada, kao i primerima iz literature.

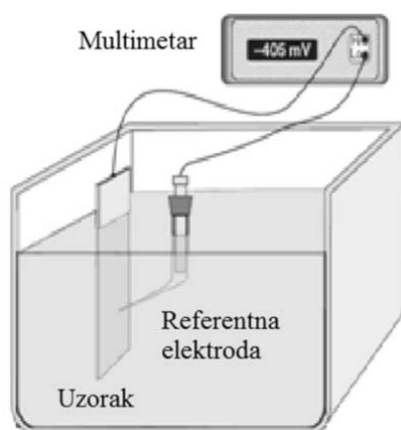
Priroda korozionog potencijala. Tokom korozije na površini metala se odvijaju anodni i katodni procesi. Anodni proces je rastvaranje metala, a katodni proces je redukcija molekula ili jona prisutnih u korozionoj sredini. Potencijal koji se pri tome uspostavlja na površini metala se naziva korozioni potencijal E_{kor} . Vrednost E_{kor} se ne može termodinamički izračunati, već se određuje eksperimentalno. Na korozionom potencijalu anodna struja rastvaranja metala jednaka je

katodnoj struji redukcije (npr. vodoničnih jona) i istovremeno je jednaka struji korozije. Struja korozije j_{kor} se može izraziti kao brzina korozije metala v_{kor} .

Vrednost E_{kor} zavisi od unutrašnjih i spoljašnjih faktora. Unutrašnji faktori su priroda metala, njegova struktura, stanje površine, prisustvo oksidnih slojeva i dr. U spoljašnje faktore spadaju vrsta i koncentracija jona u korozionoj sredini, pH vrednost, temperatura i dr.

Postupak merenja korozionog potencijala. Kada se metal izloži dejstvu korozivne sredine, na njegovoj površini se uspostavlja korozioni potencijal E_{kor} . U početnom periodu izlaganja fluktuacije vrednosti E_{kor} su značajne. Stabilan E_{kor} se uspostavlja na površini metala obično posle ~ 1 h. Nekada je taj period znatno kraći (reda veličine nekoliko minuta), a nekada znatno duži (nekoliko sati ili čak dana). Dužina vremenskog perioda do dostizanja stabilnog E_{kor} zavisi od brzine uspostavljanja ravnoteže između katodnih i anodnih reakcija. Kada brzine ovih reakcija postanu približno jednake, uspostavlja se stabilan E_{kor} .

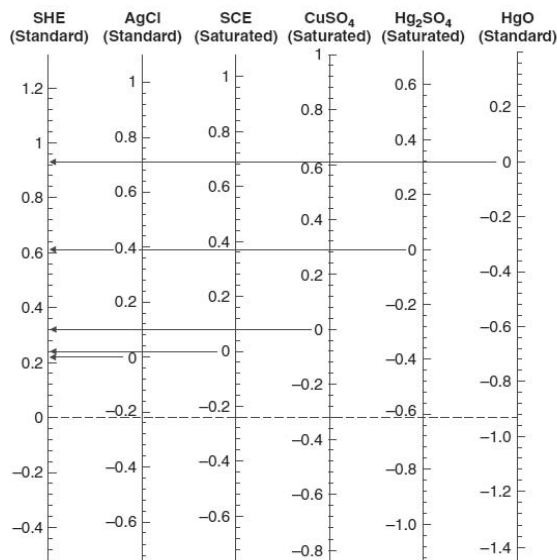
Apsolutnu vrednost korozionog potencijala nije moguće direktno izmeriti, već se E_{kor} meri u odnosu na neku drugu elektrodu koja se naziva referentna elektroda i koja ima konstantan i stabilan potencijal. Za merenje E_{kor} dovoljno je imati neku od referentnih elektroda i uređaj za merenje potencijala, kao što je komercijalni multimetar. Na slici 1 prikazana je aparatura za merenje korozionog potencijala.



Slika 1. Aparatura za merenje korozionog potencijala[2].

U svojstvu referentne elektrode može se upotrebiti neka od referentnih elektroda navedenih na slici 2. U laboratorijskim uslovima najčešće se koristi zasićena kalomelova elektroda (SCE) ili srebro/srebro-hloridna elektroda (AgCl), a za

terenska merenja E_{kor} najčešće se koristi zasićena bakar-sulfatna elektroda ($CuSO_4$). Vrednosti potencijala nekih referentnih elektroda kao i međusobno preračunavanje njihovih potencijala je prikazano na slici 2.



Slika 2. Vrednosti potencijala nekih referentnih elektroda i međusobno preračunavanje njihovih potencijala [2].

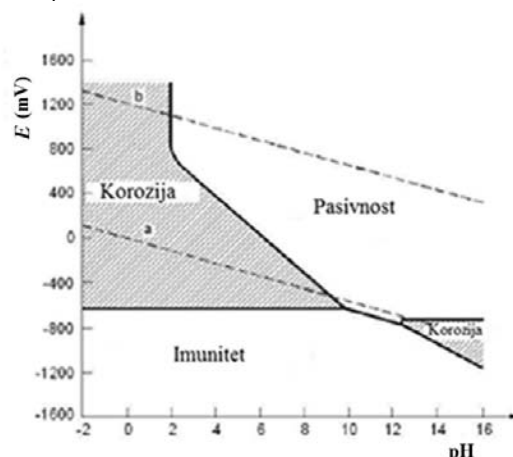
Neki metali mogu pokazivati dve vrednosti korozionog potencijala, u zavisnosti od toga da li se nalaze u aktivnom ili pasivnom stanju. To je slučaj kod nerđajućih čelika, aluminijuma i titana. Pri promeni spoljnih uslova, metal može preći iz pasivnog stanja u aktivno stanje. Taj proces se naziva aktivacijom i često se odvija lokalno, što dovodi do piting korozije, korozije u zazorima itd. Pri tome dolazi do pomeranja vrednosti E_{kor} ka negativnijim vrednostima. Prevođenje metala iz aktivnog u pasivno stanje se može ostvariti pod uticajem nekog oksidacionog sredstva, koje pomera vrednost E_{kor} ka pozitivnijim vrednostima (pasivna oblast). Vrednost korozionog potencijala je pokazatelj termodinamičke otpornosti metala prema koroziji. Što je vrednost E_{kor} pozitivnija, manja je termodinamička pogonska sila za odvijanje procesa korozije. U realnim uslovima brzina korozije metala često nije u skladu sa ovom termodinamičkom tendencijom. Na primer, ugljenični čelici su termodinamički stabilniji od cinka (čelici imaju pozitivniju vrednost E_{kor} nego cink). Međutim, u

realnim uslovima cink korodira znatno sporije, zbog obrazovanja stabilnog kompaktnog sloja korozionih produkata. U slučaju čelika sloj korozionih produkata (rđa) slabije štiti čelik od korozije.

1. Korozioni potencijal i Purbeovi dijagrami

Purbeovi dijagrami predstavljaju dijagrame zavisnosti potencijala metala od pH vrednosti rastvora u kojem se metal nalazi. Na osnovu merenja vrednosti E_{kor} u rastvoru određenog pH može se sa znatnim stepenom sigurnosti proceniti u kojoj oblasti Purbeovog dijagrama se metal nalazi (oblast stabilnosti, pasivnosti ili korozije).

Purbeov dijagram za gvožđe, prikazan na slici 3, pokazuje oblasti imuniteta, pasivnosti i korozije gvožđa, u zavisnosti od potencijala i pH. Na dijagramu se mogu uočiti četiri posebne oblasti. Oblast pri dnu dijagrama odgovara uslovima gde je gvožđe imuno i ne podleže procesu korozije. Za bilo koju kombinaciju potencijala i pH vrednosti u toj oblasti gvožđe je termodinamički stabilno i neće korodirati.



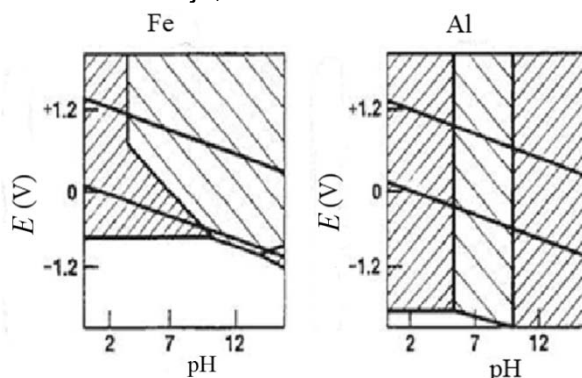
Slika 3. Purbeov dijagram za gvožđe na 25 °C[3].



Dve osenčene oblasti na dijagramu odnose se na uslove u kojima gvožđe korodira. U obe oblasti (velika oblast na levoj strani dijagrama i mala oblast krajnje desno) gvožđe podleže koroziji uz formiranje rastvornih produkata korozije. Na dijagramu je takođe prikazana i oblast u kojoj je gvožđe pasivno. U neutralnim i alkalnim rastvorima formiraju se nerastvorni produkti korozije gvožđa, pa je odvijanje korozionih reakcija otežano. Kod Purbeovih dijagrama važi pretpostavka da nerastvorni korozioni produkti štite metal od korozije. U praksi, to nije uvek slučaj. Na primer, nerastvorni korozioni produkti na titanu formiraju stabilan pasivni film, koji štiti titan od korozije, dok

su nerastvorni korozioni produkti na čeliku često porozni i ne predstavljaju zaštitu od korozije.

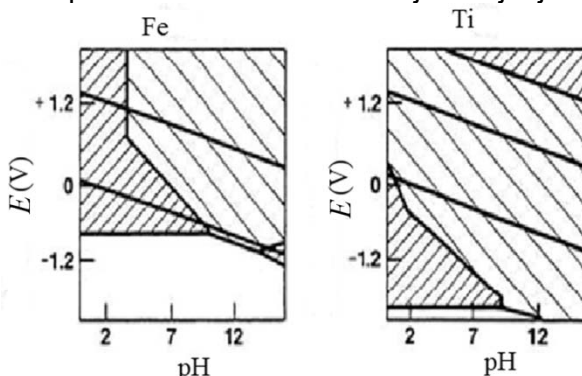
Purbeovi dijagrami za aluminijum i gvožđe su prikazani na slici 4. Aluminijum je aktivniji metal nego gvožđe. Njegova oblast imuniteta na Purbeovom dijagramu nalazi se na dnu dijagrama. Aluminijum korodira u umereno kiselim i jako kiselim sredinama, kao i u umereno alkalnim i jako alkalnim sredinama. Nerastvorni korozioni produkti aluminijuma su stabilni u neutralnim sredinama. Oblast pasivnosti aluminijuma omogućava široku primenu aluminijuma i njegovih legura u približno neutralnim sredinama.



Slika 4. Purbeovi dijagrami za gvožđe i aluminijum na 25 °C[4].

Purbeovi dijagrami za titan i gvožđe su prikazani na slici 5. Titan je izuzetno aktivan metal pa se oblast njegovog imuniteta nalazi na dnu Purbeovog dijagrama. Velika otpornost titana i njegovih legura prema koroziji u velikom broju korozionih sredina može se objasniti postojanjem kompaktnog pasivnog filma na površini. Oblast pasivnosti titana

se proteže preko celog opsega pH vrednosti, od jako kiselih do jako alkalnih sredina. Titan veoma retko korodira, npr. pri uranjanju u zagrejanu, koncentrovanu hlorovodoničnu kiselinu, bez prisustva kiseonika. U toj sredini dolazi do razaranja zaštitnog pasivnog filma na titanu, što rezultuje odvijanjem procesa korozije.



Slika 5. Purbeovi dijagrami za gvožđe i titan na 25 °C[4].

Purbeovi dijagrami oformljeni su na osnovu termodinamičkih podataka. Dijagrami ne daju informacije o kinetici korozionih procesa, odnosno o brzini korozije. Osnovni nedostatak ovih dijagrama je u tome što se odnose na čiste metale i legure, u vodenoj sredini. Realne korozione sredine su znatno složenijeg sastava i mogu da sadrže veliki broj različitih supstanci (hloridi, sulfati, nitrati, hromati itd.). Značaj Purbeovih dijagrama je veliki

jer pružaju informacije o ponašanju metala i legura pri različitim uslovima potencijala i pH.

2. Korozioni potencijal i galvanska korozija

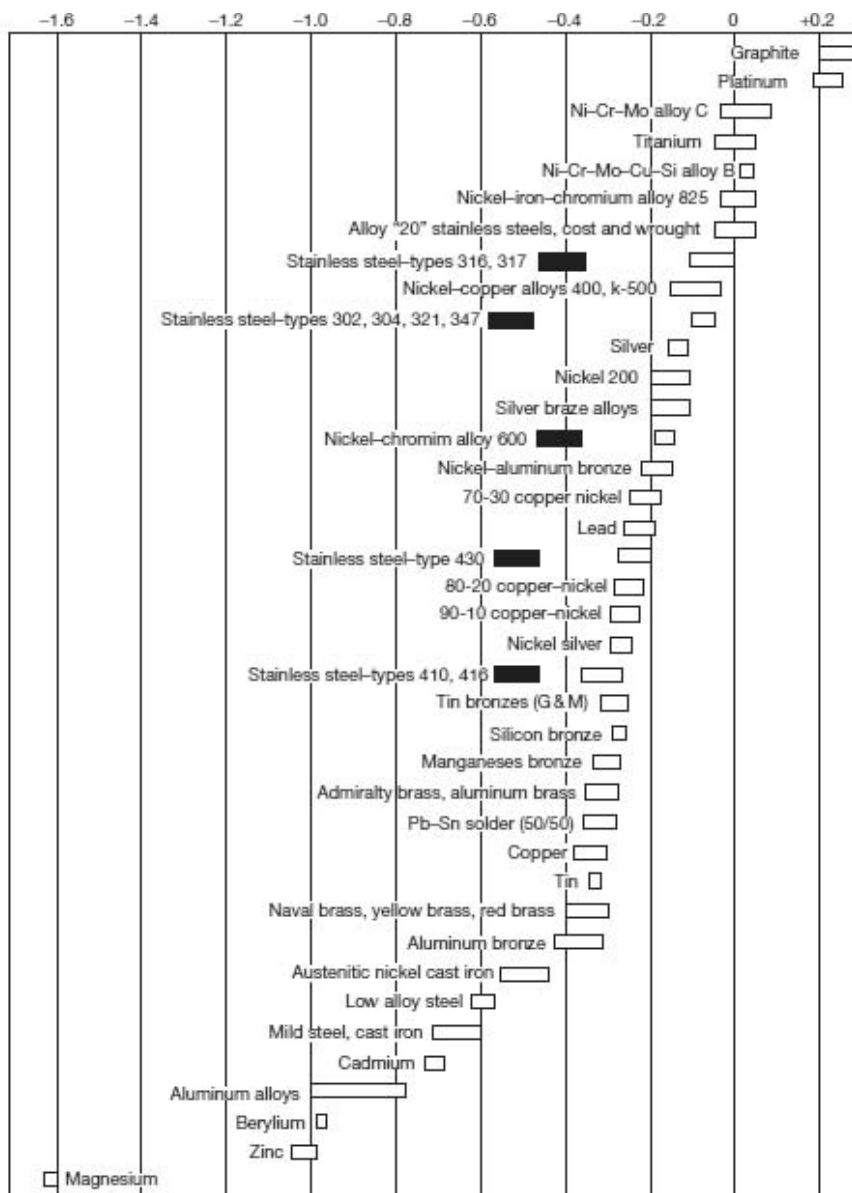
Galvanska (kontaktna ili bimetalna) korozija se javlja pri kontaktu dva ili više različitih metala ili legura u prisustvu elektrolita. Osnovni uslovi pojave kontaktne korozije su: električni kontakt između različitih metala, prisustvo elektrolita i razlika korozionih potencijala među metalima koji su u



kontaktu (ASTM G82) [5]. U nekim slučajevima do galvanske korozije može doći i u odsustvu električnog kontakta, npr. usled kontaktnog izdvajanja Cu na čeliku ili Al-legurama. Pored merenja E_{kor} metala koji su u kontaktu, za određivanje intenziteta galvanske korozije često se koristi merenje električne struje koja protiče između metala u kontaktu, a koji su uronjeni u neki elektrolit (ASTM G71) [6].

Ulogu elektrolita mogu da igraju i slojevi atmosfere vlage. Veliki uticaj na odvijanje korozionih procesa tokom galvanske korozije ima provodljivost elektrolita. Galvanska korozija je intenzivnija ukoliko je provodljivost veća. Pri maloj provodljivosti elektrolita, galvanska korozija je ograničena na oblasti metala koje su u kontaktu, dok je pri većoj provodljivosti galvanska korozija moguća i na većim rastojanjima između različitih metala.

Za odvijanje galvanske korozije neophodno je da postoji određena razlika E_{kor} između metala u kontaktu. Ukoliko je razlika E_{kor} veća, korozija je intenzivnija. Na osnovu galvanskog niza metala (ASTM G 82, slika 6) može se predvideti ponašanje različitih metala u kontaktu. Galvanski niz predstavlja niz metala poređanih po rastućoj vrednosti korozionog potencijala u određenoj korozionoj sredini. Galvanski nizovi su formirani za mnoge legure i njihova različita termička stanja, u različitim korozionim sredinama (ASTM G82, GOST 9.005 itd). Kao što se može videti sa slike 6, neki metali imaju dve vrednosti E_{kor} . Pozitivnija vrednost E_{kor} odgovara pasivnom stanju, a negativnija vrednost E_{kor} (označena na slici 6 crnom bojom) odgovara aktivnom stanju (kada je narušen pasivni sloj i odvija se aktivna korozija metala, odnosno legure).



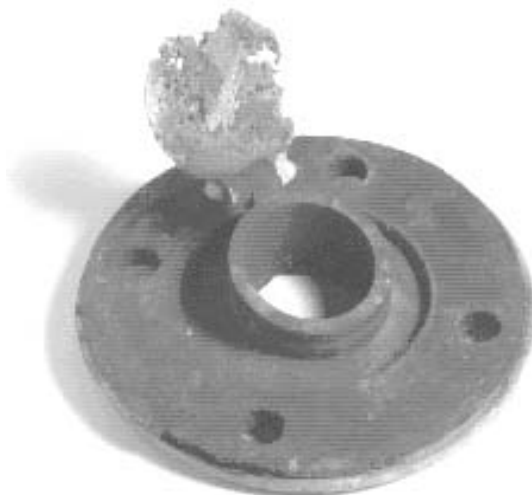
Slika 6. Galvanski niz metala u morskoj vodi prema ASTM G 82 [5].



Pri galvanskoj koroziji veliki značaj ima odnos anodnih i katodnih površina. Ukoliko je površina metala koji se ponaša anodno manja, u odnosu na površinu metala koji se ponaša katodno, utoliko je korozija anodnog metala intenzivnija.

Na slici 7 je prikazan primer galvanske korozija kontrolnog ventila od aluminijuma sa sedištem od bronz. Ventil se koristi u toploj vodi, u sistemu za

centralno grejanje na temperaturi od 70 do 90°C (pH9). Uzrok pojave galvanske korozije u ovom slučaju je velika razlika vrednosti E_{kor} između aluminijuma i bronz. Galvanska korozija se u ovom slučaju može sprečiti ukoliko se ventil i sedište ventila izrade od istog metala, npr. bronz.



Slika 7. Primer galvanske korozije.

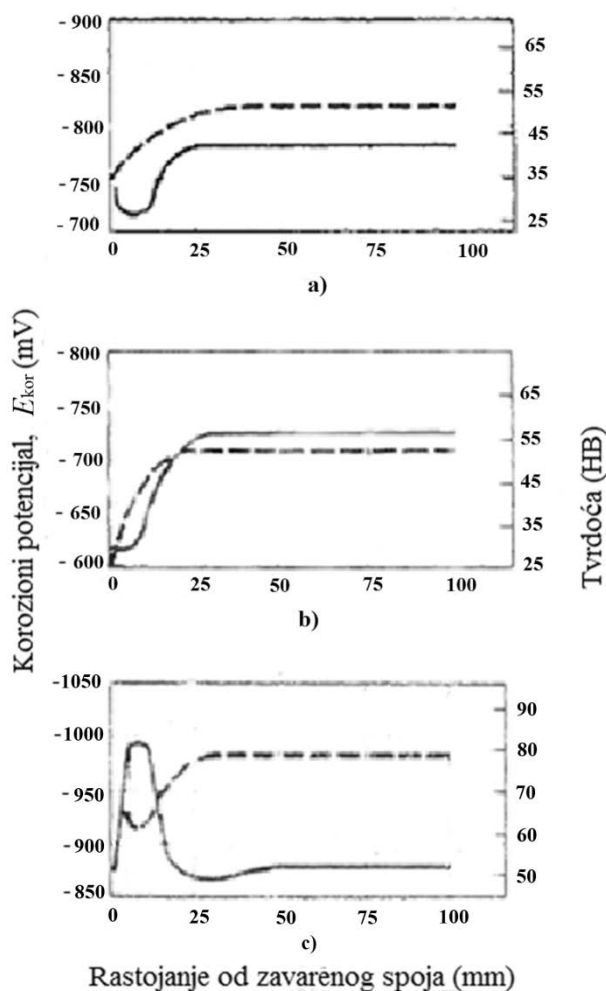
3. Korozioni potencijal i galvanska korozija zavarenih spojeva aluminijumskih legura

Kada je sastav dodatnog materijala različit od sastava osnovnog metala, dolazi do galvanske korozije u zavarenom spoju. Neke oblasti u zavarenom spoju postaju anodne i koroziono aktivnije.

Galvanska korozija se često javlja tokom zavarivanja aluminijumskih legura, ukoliko nije upotrebljen odgovarajući dodatni materijal. Aluminijumske legure različitog hemijskog sastava imaju različite korozione potencijale. Metal šava sa negativnijim korozionim potencijalom se brže rastvara. Što je površina metala šava manja u odnosu na površinu osnovnog metala, rastvaranje metala šava je intenzivnije. Optimalna otpornost zavarenog spoja prema galvanskoj koroziji se postiže kada su vrednosti E_{kor} osnovnog metala i dodatnog metala približno jednake. Kada to nije slučaj, poželjno je da metal šava ima pozitivniju vrednost E_{kor} u odnosu na E_{kor} osnovnog metala. U tom slučaju osnovni metal će se sporo rastvarati iako je anodan, zbog njegove znatno veće površine u odnosu na površinu metala šava.

Uticaj zavarivanja na korozioni potencijal i tvrdoću zavarenih spojeva prikazan je na slici 8, za svaku od tri karakteristične aluminijumske legure. Puna linija predstavlja promenu vrednosti E_{kor} , a isprekidana linija promenu tvrdoće HB.

Kao što se vidi sa slike 8a, osnovni metal (legura serije 5000) je katodan u odnosu na zavareni spoj, ali je razlika vrednosti E_{kor} relativno mala. Osnovni metal (legura serije 2000) je takođe katodan u odnosu na zavareni spoj, ali je razlika vrednosti E_{kor} znatno veća (slika 8b). Zavareni spoj kod legure serije 7000 je anodan u odnosu na osnovni metal, pa postoji velika opasnost od pojave galvanske korozije (slika 8c). U takvim slučajevima često se vrši zaštita zavarenih konstrukcija organskim prevlakama. Nekada se površina zavarenog spoja metalizira drugom aluminijumskom legurom, pre nanošenja organske prevlake, da bi se sprečila pojava galvanske korozije na mestima oštećenja organske prevlake. Standard EN 485 daje preporuke za izbor dodatnog materijala za zavarivanje aluminijumskih legura u cilju smanjenja rizika od pojave galvanske i drugih vidova korozije.



Slika 8. Uticaj parametara zavarivanja na korozioni potencijal i tvrdoću zavarenih spojeva, za tri aluminijumske legure: a) legura 5456 – H321, dodatni materijal legura 5556, GMAW postupak-trostepeni prolaz, b) legura 2219-T87, dodatni materijal legura 2319, GTAW postupak-dvostepeni prolaz, c) legura 7039-T651, dodatni materijal legura 5183, GTAW postupak-dvostepeni prolaz[7].

4. Korozioni potencijal i galvanska korozija zavarenih spojeva čelika

Do galvanske korozije dolazi u zavarenim spojevima čelika, kada je dodatni materijal različitog sastava u odnosu na osnovni metal. Treba izbegavati da vrednost E_{kor} metala šava bude negativnija od vrednosti E_{kor} osnovnog metala-čelika. Međutim, u nekim slučajevima nije poželjno da vrednost E_{kor} metala šava bude pozitivnija od E_{kor} osnovnog metala. Na primer, za reparaciju elemenata od niskolegiranih čelika (HSLA steels) obično se koriste elektrode od austenitnog nerđajućeg čelika. Pri tome dolazi do električnog kontakta između nerđajućeg čelika, koji ima pozitivniju vrednost E_{kor} , sa HSLA čelikom. U prisustvu korozione sredine na nerđajućem čeliku se izdvađa vodonik, koji difunduje u zonu uticaja toplote na HSLA čeliku i izaziva obrazovanje prslina [4].

Pri eksploataciji konstrukcija od niskougljeničnih čelika sa zavarenim spojevima primećeno je da do

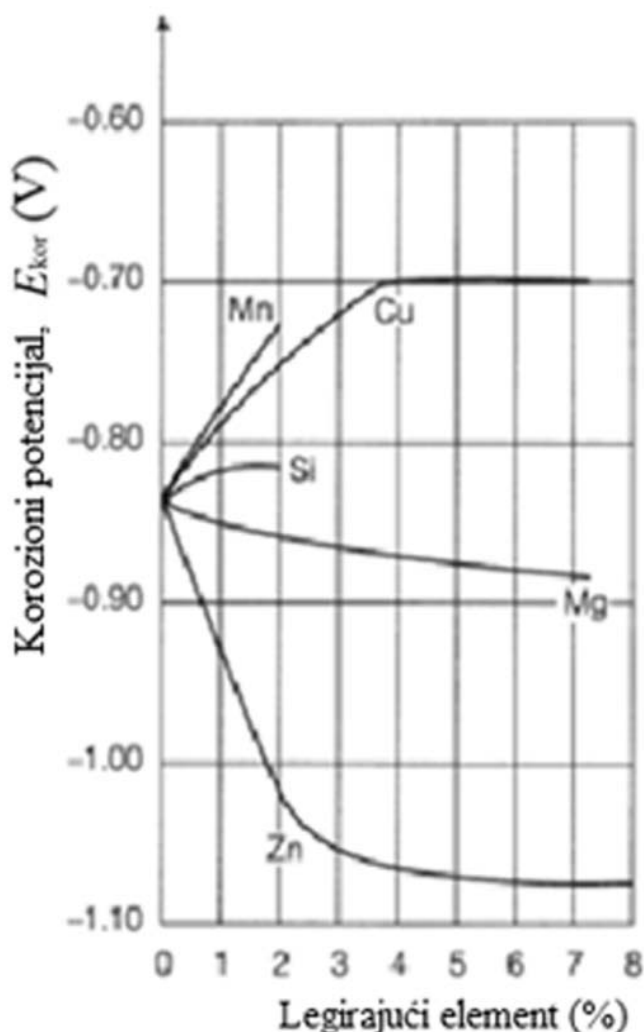
loma najčešće dolazi u ZUT-u, posle relativno dugog vremena (često dužeg od 1 do 2 godine). Tokom tog perioda, vodonik koji se izdvojio na katodnim mestima u zavarenom spoju (usled redukcije H^+ jona ili razlaganja vode uz izdvajanje vodonika), difunduje kroz zavareni spoj i sakuplja se na mestima gde postoje povećana zaostala naprezanja (obično u ZUT-u). Kada koncentracija vodonika pređe neku kritičnu vrednost dolazi do loma zavarene konstrukcije. Prema standardu GOST 9.005 razlika vrednosti E_{kor} između metala šava, ZUT-a i osnovnog metala ne treba da bude veća od 30 mV, a u izuzetnim slučajevima ne sme da bude veća od 50 mV [8]. Ukoliko je razlika vrednosti E_{kor} u zavarenom spoju veća od navedene vrednosti potrebno je primeniti odgovarajuće mere zaštite. Zbog toga merenje lokalne vrednosti E_{kor} u različitim oblastima zavarenog spoja ima veliki značaj.



5. Korozioni potencijal aluminijumskih legura

Korozioni potencijal aluminijumskih legura zavisi od sadržaja legirajućih elemenata u čvrstom rastvoru (slika 9). Kao što se vidi sa slike 9, pri legiranju aluminijuma sa Mn, Cu i Si dolazi do pomeranja vrednosti E_{kor} ka pozitivnijim vrednostima, a pri legiranju sa Zn i Mg dolazi do pomeranja E_{kor} ka negativnijim vrednostima. Ova zavisnost važi kada se legirajući elementi nalaze u čvrstom rastvoru aluminijuma. Postupak merenja vrednosti

E_{kor} aluminijumskih legura u različitim termičkim stanjima opisan je u standardu ASTM G69 [9]. Izmerene vrednosti E_{kor} se mogu koristiti za karakterizaciju metalurških stanja pojedinih aluminijumskih legura, kao i za predviđanje njihovog korozionog ponašanja. Takođe, na osnovu vrednosti E_{kor} mogu se identifikovati pojedine legure i njihova termička stanja. Korozioni potencijali aluminijumskih legura u različitim termičkim stanjima dati su u tabeli 1.



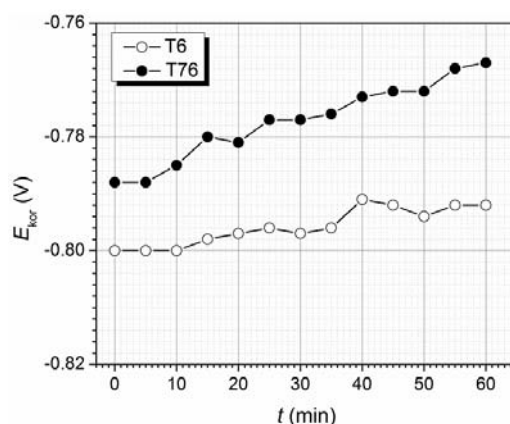
Slika 9. Uticaj legirajućih elemenata na korozioni potencijal aluminijuma[10].

Izmerene vrednosti E_{kor} aluminijumske legure AA 7049 (Al-Zn-Mg-Cu) koja se nalazi u dva termička stanja (TA i TB) su prikazane na slici 10. Legura u termičkom stanju TB ima veću koncentraciju Cu u čvrstom rastvoru nego legura u termičkom stanju TA, pa je vrednost E_{kor} pozitivnija za leguru u termičkom stanju TB. Kod legure u oba termička

Legura	Temper	E_{kor} (mV)	Legura	Temper	E_{kor} (mV)
1060		-750	5454		-770
1100		-740	5456		-780
1199		-750	6005A		-710
2008	T4	-600	6009	T4	-710
	T6	-700	6010	T4	-700
2014	T4	-600	6013	T6, T8	-730
	T6	-690	6053		-740
2017	T4, T6	-600	6060		-710
2024	T3, T4	-600	6061	T4	-710
	T8	-710		T6	-740
2090	T3, T4	-650	6063		-740
	T8	-750	7003		-940
2091	T3, T8	-670	7005		-840
2219	T3, T4	-550	7039	T6, T63	-840
	T6, T8	-700	7049	T7	-750
3003		-740	7050	T7	-750
3004		-750	7072		-860
5042		-770	7075	T6	-740
5050		-750		T7	-750
5052		-760	7178	T6	-740
5056		-780	7475	T7	-750
5086		-760	8090	T3	-700
5154		-770		T7	-750
5182		-780			

Tabela 1. Korozioni potencijali aluminijumskih legura u različitim termičkim stanjima[10]

stanja može se primetiti povećanje vrednosti E_{kor} tokom vremena. To je posledica postepenog rastvaranja elektronegativnijih legirajućih elemenata (Mg i Zn) iz čvrstog rastvora legure. Pri tome dolazi do izvesnog povećanja koncentracije Cu u čvrstom rastvoru legure.



Slika 10. Korozioni potencijal različitih termičkih stanja aluminijumske legure AA 7049, meren u rastvoru NaCl[11].

6. Korozioni potencijal intermetalnih jedinjenja u aluminijumskim legurama

Poznato je da aluminijumske legure sadrže intermetalna jedinjenja različitog sastava, pa je i vrednost E_{kor} tih intermetalnih jedinjenja različita. U tabeli 2 su navedene vrednosti E_{kor} nekih

intermetalnih jedinjenja u aluminijumskim legurama. Vrednosti E_{kor} se eksperimentalno određuju pomoću mikro-elektroda i mikroskopa. Vrednost E_{kor} može da se odredi i na makro nivou, na laboratorijski sintetizovanim intermetalnim jedinjenjima.

Intermetalno jedinjenje	E_{kor} (mV)
Al_3Ni	-430
Al_2Cu	-440
Al_6Mn	-760
Al_2CuMg	-910
$MgZn_2$	-960
Al_3Mg_2	-1150
Mg_2Si	-1190

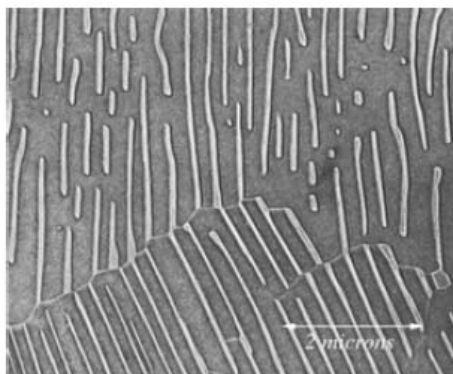
Tabela 2. Korozioni potencijal intermetalnih jedinjenja u aluminijumskim legurama[10]

Na osnovu poznavanja sastava i strukture neke aluminijumske legure i podataka navedenih u tabelama 1 i 2, može se u znatnoj meri predvideti koroziono ponašanje te legure.

7. Korozioni potencijal mikro-konstituenata čelika i livenog gvožđa

Kod perlitnih čelika razlika vrednosti E_{kor} između cementita i ferita (sastavnih mikro-konstituenata perlita) je veoma velika.

Na slici 11 prikazana je mikrostruktura perlita. Ferit, kao manje plemenita komponenta perlita, rastvara se u korozionoj sredini, a na cementitu, kao plemenitijoj komponenti, odvija se katodna reakcija.

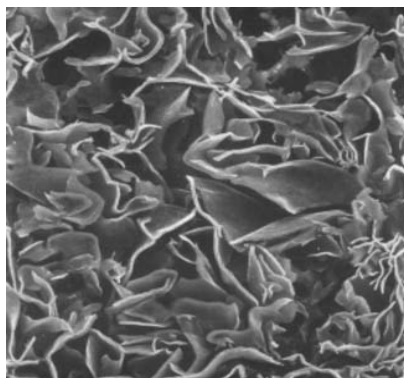


Slika 11. Mikrostruktura perlita [12].



Kod livenog gvožđa grafit je plemenitija komponenta i na njemu se, u korozionoj sredini, odvija katodna reakcija. Na preostaloj matrici odvija se anodna reakcija (rastvaranje).

Na slici 12 prikazana je mikrostruktura livenog gvožđa. Grafit ima pozitivniju vrednost E_{kor} u odnosu na E_{kor} okolne matrice.

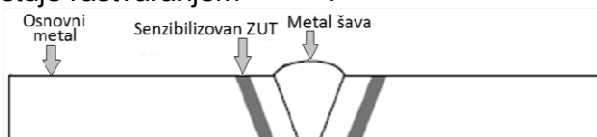


Slika 12. Mikrostruktura livenog gvožđa[12].

8. Korozioni potencijal i interkristalna korozija nerđajućih čelika i zavarenih spojeva

Interkristalna korozija nerđajućih čelika je vid lokalne korozije koji se manifestuje rastvaranjem

oblasti granica zrna. Do senzibilizacije nerđajućih čelika prema interkristalnoj koroziji najčešće dolazi u zoni uticaja toplote (ZUT-u), u oblasti koja je paralelna metalu šava (slika 13).

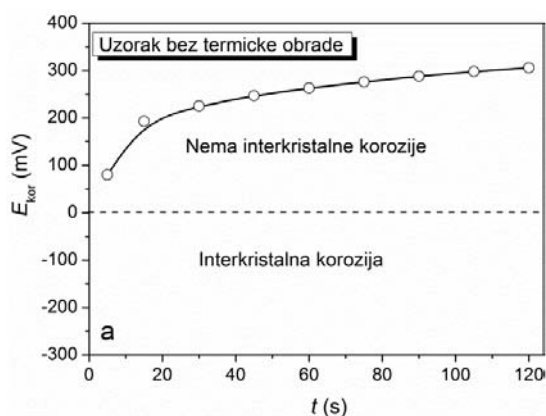


Slika 13. Šematski prikaz zavarenog spoja kod nerđajućeg čelika.

Tradicionalno, ispitivanje stepena senzibilizacije nerđajućih čelika prema interkristalnoj koroziji se izvodi hemijskim tretmanom uzoraka u ključalom rastvoru različitih kiselina. Tomašov i saradnici su razvili kvalitativnu metodu za ispitivanje sklonosti nerđajućih čelika prema interkristalnoj koroziji. Metoda se zasniva na merenju vrednosti E_{kor} u kapi rastvora koji ima specifičan hemijski sastav. U toku odvijanja korozionih reakcija na čeliku (ispod kapi rastvora) se uspostavlja određena vrednost E_{kor} . Ako je izmerena vrednost E_{kor} negativna ($E_{kor} < 0$) nerđajući čelik je u aktivnom stanju, što znači da je sklon interkristalnoj koroziji. Ako je izmerena vrednost E_{kor} pozitivna ($E_{kor} > 0$) nerđajući čelik je u

pasivnom stanju i nije sklon interkristalnoj koroziji. Ispitivanja sklonosti prema interkristalnoj koroziji na osnovu merenja vrednosti E_{kor} se izvode u rastvoru HNO_3 , koji sadrži jako oksidaciono sredstvo ($FeCl_3$) i HCl kao aktivator.

Rezultati merenja E_{kor} na nerđajućem čeliku bez termičke obrade i na senzibilizovanom nerđajućem čeliku prikazani su na slici 14. Nerđajući čelik koji nije bio termički obrađen dostiže približno konstantnu pozitivnu vrednost E_{kor} (+ 300 mV) posle ~ 45 s. Senzibilizovan nerđajući čelik na početku merenja pokazuje nagli pad vrednosti E_{kor} , a zatim se dostiže konstantna negativna vrednost E_{kor} (~ -300 mV).



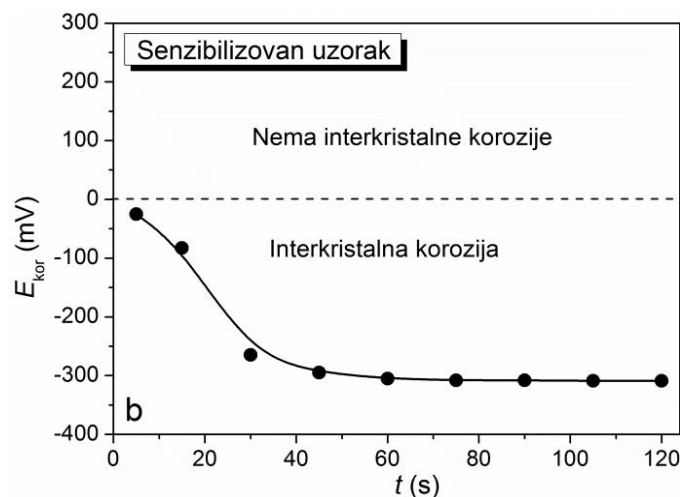


Figure 14. Rezultati određivanja sklonosti prema interkristalnoj koroziji nerđajućeg čelika na osnovu merenja E_{kor} u kapi rastvora: a) uzorak bez termičke obrade, b) senzibilizovan uzorak[13].

U standardu GOST 9.914 opisane su dve metode za određivanje sklonosti nerđajućih čelika prema interkristalnoj koroziji, na osnovu merenja vrednosti E_{kor} . Kod prve metode, merenje E_{kor} se vrši na uzorcima od nerđajućeg čelika, u rastvoru određenog sastava. Na osnovu vrednosti E_{kor} procenjuje se da li je nerđajući čelik (ili zavareni spoj nerđajućeg čelika) sklon ili nije sklon prema interkristalnoj koroziji. Ova metoda je razarajuća. Druga metoda je nerazarajuća i može da se primeni na terenu, na čeličnim konstrukcijama sa zavarenim spojevima. Merenje vrednosti E_{kor} vrši se u kapi rastvora određenog sastava, kao što je gore opisano.

ZAKLJUČAK

Pri odvijanju procesa korozije, na površini metala se spontano uspostavlja korozioni potencijal E_{kor} . Izmerena vrednost E_{kor} može se upotrebiti za procenu korozionog ponašanja metala i legura i njihovih zavarenih spojeva. Merenje E_{kor} se izvodi jednostavno, uz pomoć referentne elektrode i uređaja za merenje potencijala (komercijalni multimeter). Primena merenja E_{kor} za procenu korozionog ponašanja metala i njihovih zavarenih spojeva je razmotrena na više primera:

Pokazano je kako se na osnovu merenja E_{kor} u rastvoru sa određenom pH vrednošću može proceniti u kojoj oblasti Purbeovog dijagrama se nalazi ispitivani metal (oblast stabilnosti, pasivnosti ili korozije).

Takođe je pokazano kako se, na osnovu merenja E_{kor} metala koji su u električnom kontaktu u rastvoru elektrolita, može proceniti rizik od pojave

galvanske korozije. Opisani su primeri merenja E_{kor} u cilju predviđanja rizika od pojave galvanske korozije i vodonične krtosti zavarenih spojeva.

Korozioni potencijal aluminijumskih legura zavisi od sadržaja legirajućih elemenata u čvrstom rastvoru. Pri legiranju aluminijuma sa Mn, Cu i Si dolazi do pomeranja vrednosti E_{kor} ka pozitivnijim vrednostima, a pri legiranju aluminijuma sa Zn i Mg dolazi do pomeranja E_{kor} ka negativnijim vrednostima. Pokazano je da se na osnovu vrednosti E_{kor} mogu odrediti metalurška stanja aluminijumskih legura.

Neki metali, kao što su nerđajući čelici, pokazuju dve vrednosti E_{kor} . Pozitivnija vrednost E_{kor} odgovara pasivnom stanju metala, a negativnija vrednost E_{kor} odgovara aktivnom stanju (kada je narušen pasivni sloj i odvija se aktivna korozija metala, odnosno legure).

Na osnovu merenja E_{kor} zavarenih spojeva nerđajućih čelika u rastvoru određenog sastava može se proceniti sklonost čelika prema interkristalnoj koroziji. Ako je izmerena vrednost negativna ($E_{kor} < 0$) nerđajući čelik je u aktivnom stanju i sklon je interkristalnoj koroziji. Ako je izmerena vrednost pozitivna ($E_{kor} > 0$) nerđajući čelik je u pasivnom stanju i nije sklon interkristalnoj koroziji.

Opisane primene merenja E_{kor} ilustrovane su eksperimentalnim rezultatima autora rada, kao i primerima iz literature.

Zahvalnica:

Rad je finansiran od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, projekti TR 34028 i TR 34016.



LITERATURA

- [1] B. Bobić, B. Jegdić, Korozija zavarenih spojeva, Deo I: Vidovi korozije zavarenih spojeva, *Zavarivanje i zavarene konstrukcije*, No.1, 2005., 33-39.
- [2] P.R. Roberge, *Corrosion Engineering, Principles and Practice*, New York, McGraw-Hill, 2008.
- [3] D. Dražić, B. Jegdić, *Corrosion and Stress Corrosion Cracking*, IFMASS 8, Belgrade, 2004, 255-276.
- [4] *Corrosion: understanding the basics*, Ad. J.R. Davis, ASM International, Ohio, 2000.
- [5] Use of a Galvanic Series for Predicting Galvanic Corrosion Performance-ASTM G82.
- [6] Conducting and Evaluating Galvanic Corrosion Tests in Electrolytes-ASTM G71.
- [7] *Corrosion of weldments*, Ed. J.R. Davis, ASM International, Ohio, 2006.
- [8] Permissible and impermissible contacts with metals and non-metals-GOST 9.005.
- [9] Measurement of Corrosion Potentials of Aluminum Alloys-ASTM G69.
- [10] C. Vargel, *Corrosion of Aluminium*, Elsevier, Amsterdam, 2004.
- [11] B. Jegdić, B. Bobić, B. Gligorijević, V. Mišković-Stanković, Corrosion properties of an aluminium alloy 7000 series after a new two step precipitation hardening, *Zaštita materijala*, 55 (2014) 387-394.
- [12] ASM Handbook, Vol. 9: *Metallography and Microstructures*, Ed. G.F. Vander Voort, ASM International, Ohio, 2004.
- [13] B. Jegdić, B. Bobić, J. Stevanović, B. Alić, Metode ispitivanja interkristalne korozije na konstrukcijama od nerđajućih čelika na terenu, *Integritet i vek konstrukcija*, 16 (2016) 87-93.

“ZAVARIVAČ 2017”

U Lazarevcu, u subotu 20.5.2017. godine, u organizaciji Zajednice mašinskih škola Republike Srbije i TŠ Kolubara Lazarevac, održano je prvenstvo učenika srednjih mašinskih škola Srbije u zavarivanju. U okviru takmičenja vrednovani su test znanja kao i praktičan rad postupcima zavarivanja: REL (111), MAG (135) i TIG (141). Ukupno se takmičilo 42 učenika iz 15 škola: TŠ "Nikola Tesla" Kostolac, STŠ "Mihajlo Pupin" Kula, "Hiljadu trista kaplara" Ljig, TŠ "Ivan Sarić" Subotica, SŠ "17. Septembar" Lajkovac, Tehnička škola Mladenovac, SMS Novi Sad, SŠ "17. Septembar" Lajkovac, Tehnička škola Obrenovac, Politehnička škola – Kragujevac, STŠ "Milenko Brzak Uča" Ruma, Srednja škola "Dragačevo" Guča, Tehnička škola Loznica, Tehnička škola Železnik

Kao gosti takmičenja bila su dva učenika iz mesta Tlmače u Slovačkoj.

Pojedinačno po postupcima, ostvareni su sledeći rezultati:

Postupak 111:

- | | |
|-------------------------|---------------------------|
| 1. Antonijević Mihajlo, | TŠ „Kolubara“-Lazarevac |
| 2. Nikolić Mihajlo, | Tehnička škola-Železnik |
| 3. Petrović Miloš, | Tehnička škola-Mladenovac |

Postupak 135:

- | | |
|---------------------------|-------------------------------|
| 1. Spasojević Aleksandar, | „Hiljadu trista kaplara“-Ljig |
| 2. Brzovan Danijel, | TŠ „Ivan Sarić“-Subotica |
| 3. Sarić Uroš, | TŠ „Kolubara“-Lazarevac |

Postupak 141:

- | | |
|---------------------|--------------------------|
| 1. Lazić Ivana, | TŠ „Kolubara“-Lazarevac |
| 2. Aksentić Miloš, | Tehnička škola-Obrenovac |
| 3. Jovanović Jovan, | Tehnička škola-Železnik |



Organizatorima se zahvaljujemo na dostavljenim informacijama.



M Consonni, D J Abson, TWI Ltd

INVESTIGATION OF WELD REPAIR WITHOUT POST-WELD HEAT TREATMENT FOR P91

ISTRAŽIVANJE REPARATURE ZAVAREN OG SPOJA BEZ NAKNADNE TERMIČKE OBRAD E NA ČELIKU P91

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Adresa autora / Author's address:

UDK / UDC:

Rad primljen / Paper received:

Maj 2017

Presented at 10th International EPRI Conference on Welding and Repair Technology for Power Plants. Marco Island, Florida, USA. 26-29 June 2012.

Prezentovano na 10-oj međunarodnoj konferenciji o tehnologiji zavarivanja i reparaturi kod energetskih postrojenja. Marco Island, Florida, SAD, jun 2012

Abstract

Post-weld heat treatment (PWHT) is generally required for any grade 91 steel fabrication before entering service, as well as after any repair welding. However, this may sometimes be impractical or not cost-effective. A review of current welding practice for grade 91 showed that, whilst welding is relatively well established, there is a lack of published literature and proven procedures for non standard operations, such as weld repair without PWHT. By applying a microstructural refinement criterion (temper bead), SMAW and GTAW weld repairs of grade 91 steel without PWHT have been investigated. Metallographic examination and hardness testing were carried out to evaluate the degree of HAZ refinement and tempering, respectively. For both welding processes, a good level of refinement was produced, but only limited tempering was achieved. Recommendations are provided for the development of weld repair procedures based on an alternative criterion to that explored in this present project

Introduction

Grade 91 steel (also referred to as P91 in the pipe form, EN designation X10CrMoVNb 9-1) is widely used in fossil fuel power stations, where it has found application in new build and, particularly for headers in existing power plants, to replace lower alloy steel counterparts. The 9% chromium content and the incorporation of vanadium and niobium as alloying elements have effected a substantial improvement in creep strength compared to the

Rezime

Naknadna termička obrada (TOPZ) se generalno zahteva kod bilo kojeg čelika klase P91pre uključivanja u eksploataciju, kao i posle svakog reparaturnog zavarivanja. Međutim, to može biti nepraktično ili neisplativo. Pregled sadašnje zavarivačke prakse za klasu 91 je pokazao, da je zavarivanje relativno dobro ustanovljeno, dok postoji nedostatak publikovane literature i odobrenih procedura za nestandardne operacije, kao što je reparaturno zavarivanje bez TOPZ. Primenom kriterijuma mikrostrukturne rafinacije (zavar za otpuštanje), podvrgnuti su reparirani zavareni spojevi klase 91 bez TOPZ postupcima MIG i TIG. Radi ocene stepena rafinacije i otpuštanja sprovedena su metalografska ispitivanja i merenje tvrdoće. Za oba postupka zavarivanja, postignut je dobar nivo rafinacije, ali samo ograničeno otpuštanje. Obezbeđene su preporuke za razvoj procedura reparaturnog zavarivanja zasnovane na nekom alternativnom kriterijumu.

Uvod

Čelik klase 91 (poznat i kao P91 u obliku cevi, EN oznaka X10CrMoVNb 9-1) se naširoko koristi u elektranama na fosilna goriva, gde je našao primenu u novogradnji, a posebno za kolektore u postojećim elektranama, za zamenu niže legiranih čelika. Sadržaj hroma od 9% i ugrađivanje vanadijuma i niobijuma kao legirajućih elemenata su proizveli značajan napredak u otpornosti na puzanje u odnosu na manje Cr-Mo klase (npr klasa



lesser alloyed Cr-Mo grades (e.g. grade 22), and has allowed designers to provide for an increase in steam temperature from around 540 to 580°C or even 600°C. The higher alloy content has also ensured that the microstructure of the parent steel (and the HAZ of any weld) will be martensitic for all likely cooling rates. Moreover, the hardness of such as formed martensite is typically > 400HV. In the light of the high creep resistance of the steel, the hardness decreases only slowly during tempering or PWHT, as shown in Figure 1.

22), te je dizajnerima dozvoljeno da povećavaju temperaturu pare od oko 540-580°C ili čak 600°C. Veći sadržaj legirajućih elemenata je takođe osigurao da mikrostruktura osnovnog materijala-čelika (i ZUT i šav) bude martenzitna za sve brzine hlađenja. Osim toga, tvrdoća, tako nastalog martenzita je obično >400HV. U svetlu visoke otpornost na puzanje čelika, tvrdoća se blago smanjuje tokom otpuštanja ili TOPZ (termičke obrade posle zavarivanja), kao što je prikazano na slici 1.

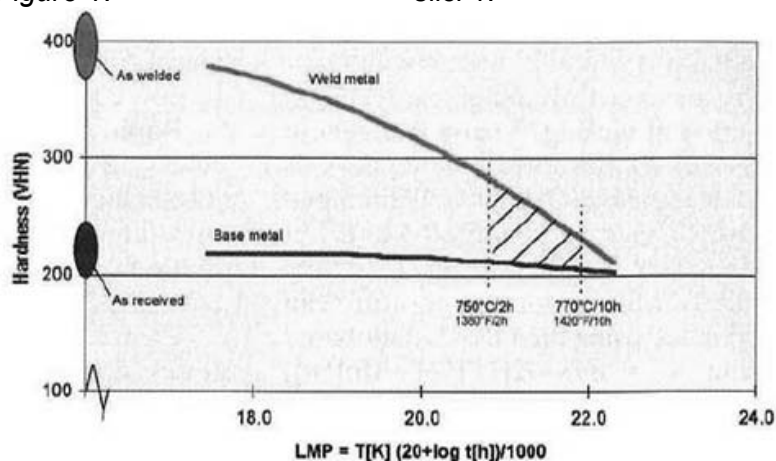


Figure 1. Trend of hardness as function of the Larson Miller parameter.^[1] Reproduced by permission of the American Welding Society. The coarse-grain HAZ hardness will be similar to that of the weld metal.

Sl. 1. Trend vrednosti tvrdoće kao funkcije Larson Miller—ovog parametra.^[1] Reprodotovano uz dozvolu American Welding Society. Tvrdoća gruboznog ZUT biće slična onoj za metal šava

PWHT is generally required for any grade 91 steel fabrication before entering service, to relieve residual stresses, to reduce weld metal and HAZ hardness, and to improve toughness. For the same reasons, after any repair welding there is an expectation, and currently a requirement, that a PWHT is carried out. However, since PWHT may be difficult to perform and often not cost effective, depending on the location and accessibility of the weld repair, a procedure that allows its omission is desirable, and controlled deposition welding procedures (also referred to as 'temper bead' or 'cold repair' procedures) have been devised for C-Mn steel and for the lower alloy steels in creep service. Although at least one study has demonstrated that some HAZ softening can be affected by careful bead placement [2], industry standards currently do not allow this approach for grade 91 steel components.

Following a review of the available literature on weld repair of grade 91 without PWHT, summarized below, this project investigated the possibility of carrying out non-PWHT weld repairs employing the controlled deposition approach, with some variation in electrode diameter being explored.

TOPZ je generalno potrebna za bilo koju klasu čelika 91 pri izradi i pre uvođenja u eksploataciju, za smanjenje zaostalih napona, kako bi se smanjila tvrdoća metala šava i ZUT, i radi poboljšanja žilavosti. Iz istog razloga, nakon svake popravke zavarivanjem postoji očekivanje, a trenutno je zahtev, da se obavlja TOPZ. Međutim, budući da se TOPZ teško izvodi i često nije isplativa, zavisno od lokacije i pristupačnosti šavu koji se reparira, postupak koji omogućava njeno izostavljanje je poželjan, i procedure kontrolisanog polaganja zavara (poznata i kao 'zavar za otpuštanje—tehnološki zavar' ili procedura 'reparatura na hladno') su osmišljene za C-Mn čelike i za manje legirane čelike u uslovima puzanja. Iako je barem jedna studija pokazala da sena izvesno omekšavanje ZUT može uticati pažljivim postavljanjem zavara [2], industrijski standardi trenutno ne dozvoljavaju ovaj pristup za klasu 91 čeličnih komponenata.

Nakon pregleda dostupne literature o reparaturnom zavarivanju klase 91 bez TOPZ, sumarno datoj ispod, ovaj projekat je istraživao mogućnost obavljanja reparature šava bez TOPZ korišćenjem pristupa kontrolisanog polaganja zavara uz neke varijacije u prečniku elektroda koje se koriste.



Low heat input levels were used, as this gives not only a reasonably small coarse-grain HAZ grain size but it also restricts the width of the thermally-damaged region at or beyond the edge of the fine-grain HAZ, which is generally the creep-weak region in a welded joint subjected to cross-weld stress. The preliminary trials reported here represent the first stage in exploring whether repair welding of grade 91 steel without a subsequent PWHT is possible; if progress is to be made, further extensive welding trials and testing will be required, including investigating HAZ toughness and cross-weld creep strength.

Literature review

Repair using Ni-based consumables

Mitchell and Brett [3] published a review of cold weld repair procedures that have been successfully applied to repairs made to type IV cracking in $2\frac{1}{4}\text{Cr}1\text{Mo}\frac{1}{4}\text{V}$ steels with Ni-based consumables. The main advantages identified by Mitchell and Brett when repairing with Ni-alloys are:

Lower risk of hydrogen cracking due to the face-centred cubic (FCC) lattice in weld metal.

Higher fracture toughness of the weld metal compared with weld metal with matching composition and initially lower residual stress.

However, major drawbacks have been identified as well, such as:

Addition of a 'dissimilar metal transition' joint in the repaired component.

Issues with NDE and slow relaxation of the residual stresses developed during repair.

Use of ferritic consumables

The use of ferritic consumables has grown in popularity over recent years. For $2\frac{1}{4}\text{Cr}1\text{Mo}$ steels, both manual metal arc and flux cored arc welding procedures have been applied. However, for the modified $9\text{Cr}1\text{Mo}\frac{1}{4}\text{V}$ steels manual metal arc (SMAW) welding has generally been selected.

A few examples of repairs of Grade 91 using matching (or near matching) consumables have been published. Storesund and Samuelson [4] indicate that a repair in a grade 91 steam line after 118,000 hours service was only subjected to 23,000 hours further service until a crack developed in the HAZ at the outside of the pipe, which was post weld heat treated. These repair welds had a consistently higher hardness than the original, service aged weld. This particular case considered repair of fabrication flaws, rather than the repair of service degradation such as type IV cracking.

Korišćeni su mali nivoi unete toplote, jer to daje, ne samo razumno malu grubozrnu ZUT, već isto tako ograničava širinu termički oštećene regije u ili izvan ivica fino-zrne ZUT, koja se generalno javlja u regijama ugroženim puzanjem zavarenog spoja koji je podvrgnut poprečnim naponima usled zavarivanja. Prema preliminarnim pokušajima, koji su saopšteni ovde, oni predstavljaju prvu fazu u istraživanju da li je moguća popravka zavarivanjem klase čelika 91 bez naknadne TOPZ; ako se napravi napredak, biće potrebna dalja opsežna zavarivanja i ispitivanje, uključujući i istraživanje žilavosti ZUT i granice puzanja poprečnog šava.

Pregled literature

Reparatura dodatnim materijalom na bazi nikla

Mitchell i Brett [3] su objavili pregled procedura reparaturnog zavarivanja na hladno koje se uspešno primenjuje na popravkama prslina tipa IV na čelicima $2\frac{1}{4}\text{Cr}1\text{Mo}\frac{1}{4}\text{V}$ dodatnim materijalom na bazi Ni. Glavne prednosti koje su identifikovali Mitchell i Brett pri reparaturi sa Ni-legurama su:

Manji rizik od vodoničnih prslina zbog površinski centrirane kubne rešetke (FCC) u metalu šava.

Veća lomna žilavost metala šava u odnosu na metal šava sa odgovarajućim sastavom i inicijalno manji zaostali naponi.

Međutim, glavni nedostaci su identifikovani, kao što su:

Dodatak spoja 'prelaz različitih metala' u repariranu komponentu.

Problemi sa IBR i spora relaksacija zaostalih napona stvorenih tokom popravke.

Korišćenje feritnih dodatnih materijala

Korišćenje feritnih dodatnih materijala je postalo popularno poslednjih godina. Za $2\frac{1}{4}\text{Cr}1\text{Mo}$ čelike, primenjuju se i ručno elektrolučno zavarivanje i punjena žica. Međutim, za modifikovani $9\text{Cr}1\text{Mo}\frac{1}{4}\text{V}$ čelike, uglavnom je odabrano ručno elektrolučno (REL).

Nekoliko primera reparature čelika klase 91 koristeći odgovarajući (ili blizu odgovarajućeg) dodatni materijal je objavljeno. Storesund i Samuelson [4] ukazuju na to da je reparatura parovoda od čelika klase 91 nakon 118.000 sati rada bila podvrgnuta daljem radu od samo 23.000 sati dok se prslina razvila u ZUT na spoljašnjoj strani cevi, koja je bila podvrgnuta termičkoj obradi posle zavarivanja. Ovi reparirani šavovi imaju sistematično veću tvrdoću od originala, šava koji je ostario tokom rada. Ovaj konkretni slučaj se odnosi na reparaturu nedostatka tokom izrade, a ne reparaturu degradacije tokom rada kao što su prslina tipa IV.



With regard to repairing service degradation flaws, it is recommended that the entire weld is cut out (including HAZ) and re-welded, as the damage accumulation in the creep weak type IV region is likely to be aggravated by the residual stresses associated with any repair. The use of grade 91 matching consumables for such repairs produces welds with have a better creep resistance compared with the parent material which is service-aged. This may aggravate further type IV cracking in the HAZ created by the weld repair.

Vekeman and Huysmans [2] proposed using less alloyed consumables as an alternative to matching the parent material. The rationale behind this is the attempt to match the creep resistance of the service-aged base material. As residual stress relaxation is a 'creep-like' mechanism, less creep resistant weld metal will allow a somewhat greater degree of relaxation of such stresses. A modified T24 filler metal with Nb alloying was used. The authors established that gas backing would be needed, so standard 2¼Cr filler metal was used for the root pass to eliminate the excessive oxidation of the weld bead. The weld repair was performed successfully. However, care needed to be taken with the deposition sequence to ensure that the maximum hardness measured in the HAZ was less than 400HV (to avoid stress corrosion cracking in the absence of PWHT), and it was observed that restrictions on the service temperature (limited to 540-580°C) may be required to avoid reheat cracking during service. At the time of writing this report, there is no evidence of components repaired with the above procedures being put in service.

Experimental approach

Summary

Two welding processes were selected for the investigation of weld repair procedures without PWHT: shielded metal arc welding (SMAW) and mechanised (machine) gas tungsten arc welding (GTAW). Both processes are allowed by clause IWA-4620 of Section XI of the ASME B&PV Code for in-service temper bead repairs of base materials classified as P-No 1, 3, 12A, 12B or 12C, which do not include grade 91 (P-No 5B). It should be noted that the GTAW process is only allowed by ASME B&PV Section XI if 'automatic' or 'machine' using cold wire feed.

For both processes multi-layer welded pads were deposited on service-aged P91 pipe material with 15 mm thickness to simulate weld repairs. The welding parameters for each layer were selected in order to maximise the refinement of the HAZ associated with subsequent welding layers, by

Što se tiče reparature oštećenja usled degradacije tokom rada, preporučuje se da se celi šav iseče (uključujući ZUT) i ponovo zavari, jer će akumulacija oštećenja u regiji oštećenja usled puzanja tipa IV verovatno biti povećana zaostalim naponima vezanim za bilo kakvu reparaturu. Upotreba dodatnog podudarnog materijala klase 91 za takve reparature daje bolju otpornost na puzanje u poređenju sa osnovnim materijalom koji je ostario tokom rada. To može dalje da pogorša prsline tipa IV u ZUT stvorenoj reparaturom šava.

Vekeman and Huismans [2] predložili su korišćenje manje legiranog dodatnog materijala kao alternativu podudaranju sa osnovnim materijalom. Obrazloženje je pokušaj da odgovara otpornosti na puzanje osnovnog materijala koji je ostario tokom rada. Za relaksaciju zaostalnih napona koristi se mehanizam 'puzanje-poput', metal šava manje otpornosti na puzanje omogućiće donekle veći stepen relaksacije takvih naprezanja. Korišćen je modifikovan T24 dodatni materijal legiran sa Nb. Autori su utvrdili da će biti potrebna gasna podloška, pa je korišćen standardni 2¼Cr dodatni materijal za koreni prolaz da bi eliminisao prekomernu oksidaciju zavora. Reparatura šava je uspešno izvedena. Međutim, potrebna je velika pažnja pri nanošenju da se osigura da maksimalna tvrdoća u ZUT bude manje od 400HV (da bi se izbegle prsline usled naponske korozije u odsustvu TOPZ), a uočeno je da se ograničenje radne temperature (ograničeno do 540-580°C) može zahtevati radi izbegavanja prsline usled ponovnog zagrevanja tokom rada. U vreme pisanja ovog izveštaja, nema dokaza o repariranim komponentama, navedenim postupcima.

Eksperimentalni pristup

Kratki pregled

Odabrana su dva postupka zavarivanja za istraživanje procedura reparature zavarenog spoja bez TOPZ: ručno elektrolučno zavarivanje (REL) i mehanizovano (mašinsko) zavarivanje u zaštiti gasa (TIG). Oba postupka su dozvoljena klauzulom IWA-4620 Sekcije XI ASME B & PV pravila za reparaturu u toku rada zavarom za otpuštanje, osnovnih materijala svrstanih kao P-No 1, 3, 12A, 12B ili 12C, koji ne uključuju klasu 91 (P-No 5B). Treba napomenuti da je postupak TIG dopušten samo po ASME B&PV sekcija XI ako se koristi 'automatsko' ili 'mašinsko' dodavanje.

Za oba postupka, naneti su višeslojni šavovi na čelik P91 koji je ostario tokom rada u obliku cevi debljine 15 mm za simulaciju reparature šava. Parametri zavarivanja za svaki sloj su odabrani kako bi se povećala rafinacija ZUT povezana sa kasnijim zavarivanjem slojeva, koristeći kriterijum



using the two-layer refinement criterion suggested by Alberry: [5] $R \leq C \leq P$ where P is the maximum fusion boundary depth (first bead), C is the sum of maximum fusion boundary depth + average layer height (first bead) and R is the maximum depth of the refining zone (second bead). A schematic representation of this criterion is shown in *Figure 2*.

rafinacije preko dva sloja koji je predložio Alberry: [5] $R \leq C \leq P$ gde je P maksimalna dubina granice stapanja (prvi zavar), C je suma maksimalnih dubina granica stapanja + prosečna visina sloja (prvi zavar) i R je maksimalna dubina zone rafinacije (drugi zavar). Shematski prikaz ovog kriterijuma je prikazan na slici 2.

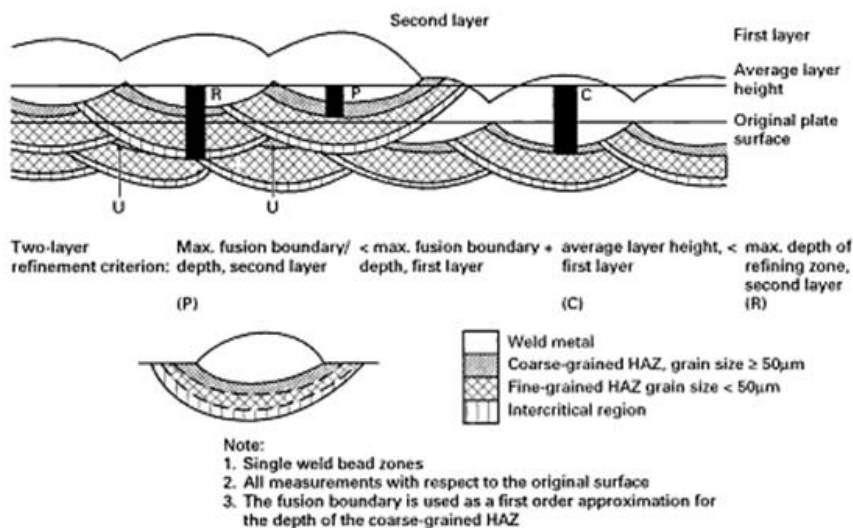


Figure 2. Two-layer refinement parameters^[6]

Sl. 2. Parametri rafinacije u dva sloja^[6]

In addition, it was expected that the deposition of subsequent welding layers would affect some tempering of the HAZ associated with the first layer. The weld repair procedures were then tested by metallographic examination and hardness testing, to evaluate the degree of refinement and tempering obtained, respectively.

Manufacture of weld repair samples SMAW.

For the SMAW welding tests, two-layer welded pads were produced, using different combinations of electrode sizes and heating cycles between the first and second layer. The welding parameters and electrode sizes were based on the work carried out on cold weld repairs of C-Mn steels, [6] which in turn used Alberry's refinement criterion, and were subsequently adjusted to suit the high Cr consumables being used.

Test weld W01 was welded using Ø3.2 and 4.0 mm (1/8 and 5/32 in) electrodes for the first and second layer, respectively. Test weld W03 was welded using Ø2.5 and 4.0 mm (3/32 and 5/32 in) electrodes for the first and second layer, respectively. A 'cascade' sequence was applied, with the second layer deposited on a smaller area, to allow sectioning of single and double-layer configurations. All welds were carried out in the vertical-up welding position; with a minimum

Osim toga, očekivano je bilo da nanošenje naknadnih zavarenih slojeva može uticati na otpuštanje ZUT od prvog sloja. Postupci reparature zavarenog spoja su potom proverene metalografskim ispitivanjem i ispitivanjem tvrdoće, za procenu stepena postignute rafinacije i otpuštanja.

Izrada uzoraka iz repariranog zavarenog spoja REL

Za testove REL zavarivanje, dva sloja zavarene jastučići su proizvedeni, koristeći različite kombinacije veličina elektroda i ciklusa grejanje između prvog i drugog sloja. Parametri zavarivanja i veličine elektroda su bile zasnovane na radu koji se obavlja popravkom C-Mn čelika hladnim zavarivanjem, [6] koji zauzvrat koristi kriterijum profinjenosti Alberry, a kasnije su prilagođeni korišćenju potrošnih materijala sa visokim Cr.

Ispitni šav W01 je zavaren elektrodama za prvi i drugi sloj Ø3.2 i 4.0 mm (1/8 i 5/32 in). Ispitni šav W03 je zavaren elektrodama za prvi i drugi sloj Ø2,5 i 4.0 mm (3/32 i 5/32 in). Primenjena je „kaskadna“ sekvenca, a drugi sloj je nanet na manju površinu, kako bi se omogućilo razdvajanje jednoslojnih i dvoslojnih konfiguracija. Svi šavovi su izvedeni u položaju zavarivanja vertikalno na gore; sa minimalnom temperaturom predgrevanja od 200°C (oko 390°F), a maksimalna međuslojna preheat temperature of 200°C (approximately



390°F) and a maximum interpass temperature of 250°C (approximately 480°F). The SMAW electrical variables are summarised in *Table 1*.

temperatura od 250°C (oko 480°F). Promenljive električne karakteristike za REL su date u tabeli 1.

Ispitni šav Test weld	Prečnik L1 ø, mm	Jačina struje i, A	Napon V	Dužina ROL mm	Uneta količina toplote AE, kJ/mm	Prečnik L2 ø, mm	Jačina struje i, A	Napon V	Dužina ROL mm	Uneta količina toplote AE, kJ/mm
W01	3.2	100	22	150	0.5-0.6	4	112	22	100	0.9-1.1
W03	2.5	75	21	150	0.5	4	125	22		1.6

Table 1. As-recorded MMA welding parameters, the corresponding welded pads are shown in Figures 3 and 4.

Tabela 1. Parametri zavarivanja koji su snimljeni za REL, odgovarajući zavareni šavovi su prikazani na slikama 3 i 4.

Notes to Table 1: L= layer number and electrode size, i=welding current, V= voltage, ROL= run-out length assuming a 50mm end stub for 350mm-long stick electrodes, AE=arc energy.

Napomene za tabelu 1: L = broj sloja i veličine elektroda, i = struja zavarivanja, V = napon, ROL = izvedena dužina uzimajući u obzir 50mm za odbačeni kraj 350mm dugačke elektrode, AE = energija luka

Welding was carried out using AWS A5.5 E8015-B8 electrodes, matching the composition of Grade 9. The purpose of these tests was to verify the effect of the selected welding procedures on HAZ microstructure and hardness, it was not considered necessary to use consumables matching Grade 91. In addition, type 'B8' consumables have a lower resistance to creep than type B9. These were considered suitable for evaluating repairs on Grade 91 in the service aged condition, *i.e.* with a somewhat reduced creep strength compared with the as-fabricated condition. After welding, the test pads were not subjected to PWHT.

Mechanised GTAW.

GTAW repair using the temperbead (or 'half bead') approach have been developed by Alberri et al [5] and Gandy et al [7] for ASME SA 508 Class 2 steel for application in the nuclear sector. In particular, Gandy et al developed a three-layer procedure, using the same parameters for all layers. Bead on plate (BoP) tests, which are not detailed in this paper, were carried out to determine the optimum welding parameters. The BoP trials were assessed according to the refinement criterion (*Formula (1)* and *Figure 2*) and one set of welding parameters was selected (table 2). Subsequently, in accordance with the abovementioned three-layer procedure, a weld pad (W15) was obtained using the same parameters for all layers. Metallographic specimens were then obtained from three cross-sections, identified as W15-1, 2 and 3, to compare the effect of the subsequent layers on the base metal via visual examination and hardness testing. AWS SFA A5.28 ER 80S-B8 with Ø1.2 mm (0.045 in) was used, matching the composition of Grade 9 rather than Grade 91, see discussion above. The TOPTIG™ variant of the GTAW

Zavarivanje je izvedeno korištenjem AWS A5.5 E8015-B8 elektrode, koja odgovara sastavu klase 9. Svrha ovih ispitivanja je bila da se proveri učinak odabranih postupaka zavarivanja na mikrostrukturu ZUT i tvrdoću, nije smatrano potrebnim da se koristi dodatni materijal koji odgovara klasi 91. Osim toga, tip "B8" dodatni materijali imaju manju otpornost na puzanje nego tipa B9. Oni su smatrani pogodnim za ocenjivanje reparature na klasi 91 u starenom stanju posle rada, *t.j.* sa nešto smanjenom granicom puzanja u odnosu na stanje posle izrade. Nakon zavarivanja, ispitne podloge nisu bile izložene TOPZ.

Mehanizovani TIG

Reparatura TIG postupkom korišćenjem zavara za žarenje (ili 'pola zavara') razvili su Alberri i dr. [5] i Gandy i dr. [7] za čelik prema ASME SA 508 klasa 2 za primenu u nuklearnom sektoru. Konkretno, Gandy i dr. su razvili proceduru sa tri sloja, koristeći iste parametre za sve slojeve.

Testovi zavara na ploči (Bop), koji nisu navedeni u ovom radu, sprovedeni su radi određivanja optimalnih parametara zavarivanja. Probe Bop su ocenjivane prema kriterijumu rafinacije (*Formula (1)* i *Slika 2*) i odabran je jedan skup parametara zavarivanja (tabela 2). Nakon toga, u skladu sa pomenutom procedurom troslojnog zavarivanja, šav (W15) je dobijen korišćenjem istih parametara za sve slojeve. Metalografski uzorci su zatim dobijen iz tri preseka, koji su identifikovani kao W15-1, 2 i 3, radi upoređenja efekta narednih slojeva na osnovni materijal putem vizuelno i merenjem tvrdoće.

Korišćen je, prema AWS A5.28 SFA dodatni materijal, ER 80S-B8 prečnika Ø1.2 mm (0.045 in) koji se poklapa sa sastavom klase 9 pre nego sa klasom 91, videti diskusiju gore. Varijanta TIG



process was used [8], as this generally allows a smoother HAZ profile for the first layer, compared with standard GTAW welding, hence increasing the possibility of a consistent refinement and tempering of the HAZ itself, when the second and third layer are deposited.

postupka, TOPTIG™ [8] je korišćena, jer generalno omogućava glatkiji profil ZUT za prvi sloj, u poređenju sa standardnim TIG zavarivanjem, stoga povećava mogućnost stalne rafinacije i otpuštanja samog ZUT, kada se nanose drugi i treći sloj.

Jačina struje A	Napon V	Brzina zavarivanja TS, mm/min	Brzina dodavanja žice WFS, mm/min	Uneta količina toplote AE, kJ/mm
200	11	250	1500	0.53

Table 2 GTAW welding parameters

Tabela 2. Parametri TIG zavarivanja

Notes to Table 2: i=welding current, V= voltage, TS=travel speed, WFS=wire feed speed, AE=arc energy, this corresponds to 'heat input' values according to the ASME terminology.

Napomene za tabelu 2: i=struja zavarivanja, V= napon, TS=brzina zavarivanja, WFS=brzina dodavanja žice, AE=energija luka, što odgovara vrednosti 'unete toplote' prema ASME terminologiji

Results SMAW

Figure 3 shows photomicrographs of the sections taken from test weld W01 ($\varnothing 3.2/4.0$ mm). The sections taken from test weld W03 ($\varnothing 2.5/4.0$ mm) are shown in Figure 4. The above mentioned figures indicate that if the combination $\varnothing 2.5/4.0$ mm electrode is used for the first/second layer, the latter penetrates through the thickness of the first layer and a new untempered and unrefined HAZ is formed. On the other hand, if the combination $\varnothing 3.2/4.0$ mm electrode is used, the outer regions of the HAZ produced by the second layer appear to overlap with that produced by the first, hence providing the condition for refinement.

Rezultati REL

Slika 3 prikazuje sliku makrostrukture tih preseka uzetih iz ispitnog šava W01 ($\varnothing 3.2/4.0$ mm). Preseci uzeti iz šava W03 ($\varnothing 2.5/4.0$ mm) su prikazani na slici 4. Gore navedeni podaci ukazuju da, ukoliko se kombinacija $\varnothing 2.5/4.0$ mm elektroda koristi za prvi / drugi sloj, zadnja prodire kroz debljinu prvog sloja i stvara novu neotpuštenu i nerafiniranu ZUT. Sa druge strane, ako se koristi kombinacija $\varnothing 3.2/4.0$ mm elektroda, spoljašnji regioni ZUT dobijeni drugim slojem koji preklapa onaj dobijen prvim slojem, time obezbeđujući uslov za rafinaciju.

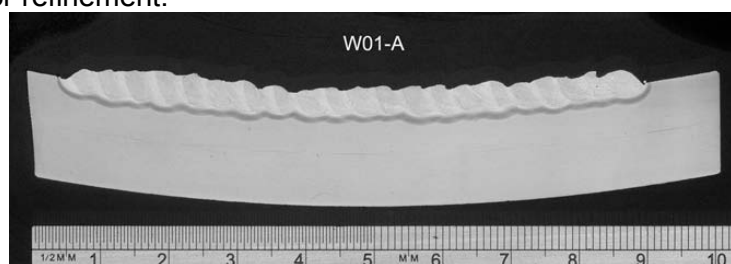
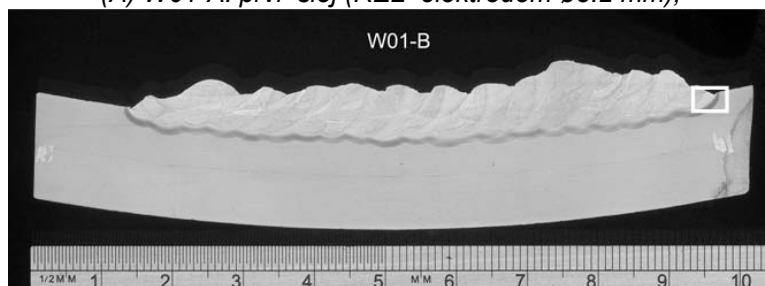


Figure 3. Macrosections taken through test weld W01. Scale ruler shown:

(a) W01-A: first layer appearance (SMAW electrode $\varnothing 3.2$ mm);

Slika 3. Makropreseći uzeti iz ispitnog šava W01. Lenjir sa skalom pokazuje:

(A) W01-A: prvi sloj (REL elektrodom $\varnothing 3.2$ mm);



(b) W01-B: appearance after second layer (SMAW electrode $\varnothing 4.0$ mm)

(b) W01-B: izgled nakon drugog sloja (REL elektrodom $\varnothing 4.0$ mm)

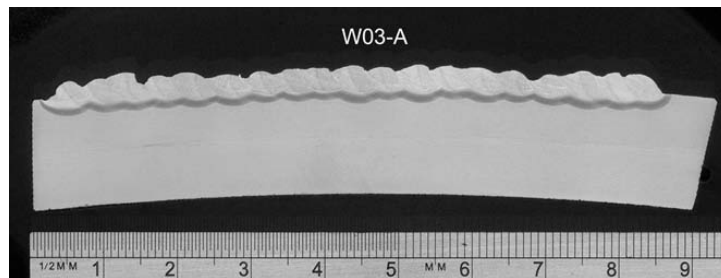
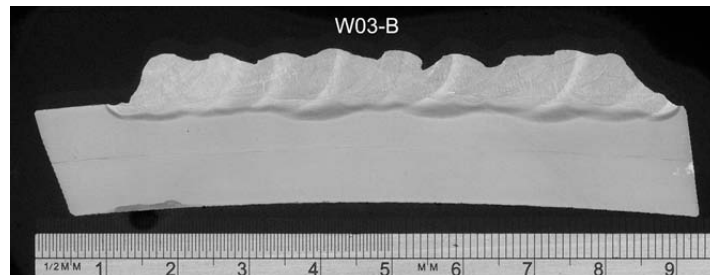


Figure 4. Macrosections taken through the samples relating to test weld W03. Scale ruler shown:
(a) W03-A: first layer appearance, showing fairly even HAZ (SMAW electrode $\varnothing 2.5$ mm);

Slika 4. Makropresci uzeti iz uzoraka vezanih za ispitni šav W03. Lenjir sa skalom pokazuje:

(a) W03-A: izgled prvog sloja, prikazuje vidljivu ZUT (REL elektrodom $\varnothing 2.5$ mm);



(b) W03-B: appearance after second layer, showing elimination of original HAZ and formation of a new HAZ resulting from the higher heat input (SMAW electrode $\varnothing 4.0$ mm).

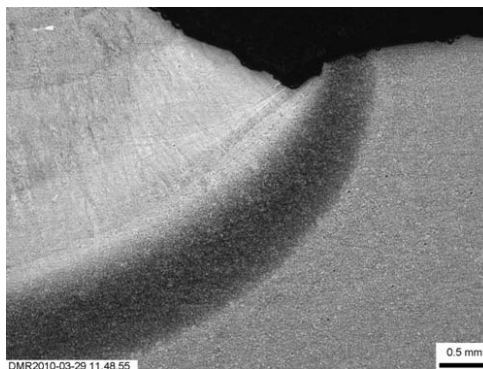
(b) W03-B: izgled posle drugog sloja, prikazuje eliminaciju originalne ZUT i stvaranje nove ZUT što je rezultat većeg unosa toplote (REL elektrodom $\varnothing 4.0$ mm).

The irregular profiles shown in Figures 3 and 4 are explained by the imposition of welding parameters and heat input levels that are outside the usual ranges for the consumables being used. It should also be noted that at this stage, the primary purpose of the test welds was to determine the effect of different combinations of electrode size and electrical parameters on the HAZ microstructure, hence limited emphasis was put on obtaining a smooth weld pad profile.

The $\varnothing 2.5/4.0$ mm combination was discarded based on the photomicrographs. Subsequent metallographic examination was limited to test weld W01 ($\varnothing 3.2/4.0$ mm). Figure 5 shows the effect of the bead placement and temper bead technique on the HAZ. Good refinement of the HAZ was obtained.

Neregularni profili prikazani na slikama 3 i 4 objašnjavaju se parametrima zavarivanja i nivoom unete toplote koji su izvan uobičajenog opsega za potrošne materijale koji se koriste. Takođe, treba napomenuti da je u ovoj fazi, primarna svrha ispitnih šavova bio da se utvrdi uticaj različitih kombinacija veličina elektroda i električnih parametara na mikrostrukture ZUT, stoga je ograničen akcenat stavljen na dobijanje glatkog profila šava.

Kombinacija $\varnothing 2.5/4.0$ mm je odbačena na osnovu makrofotografije. Naknadno metalografsko ispitivanje je ograničeno na ispitivanje šava W01 ($\varnothing 3.2/4.0$ mm). Slika 5 pokazuje efekat mesta i tehnike izvođenja zavara na ZUT. Postignuta je dobra rafinacija ZUT.

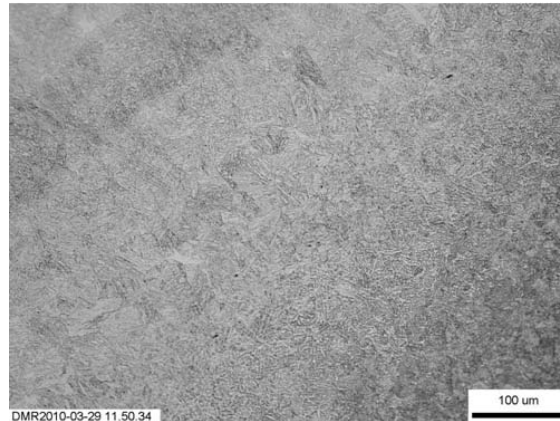


Detail of the weld and HAZ microstructures resulting from test weld W01 (Figure 3) Magnification indicated by micron marker:

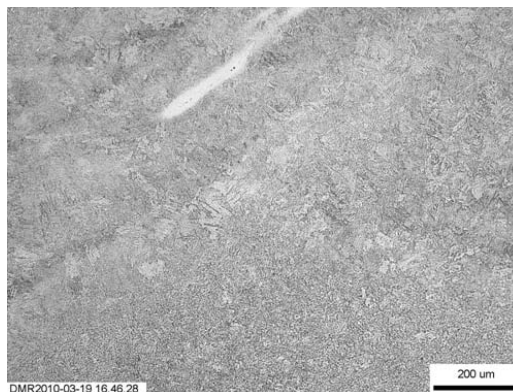
(a) Microstructure at one end of the weld pad (see Figure 3), showing limited refinement;

Detalj šava i mikrostruktura ZUT iz ispitnog šava W01 (slika 3) Uvećanje označeno oznakom mikrona:

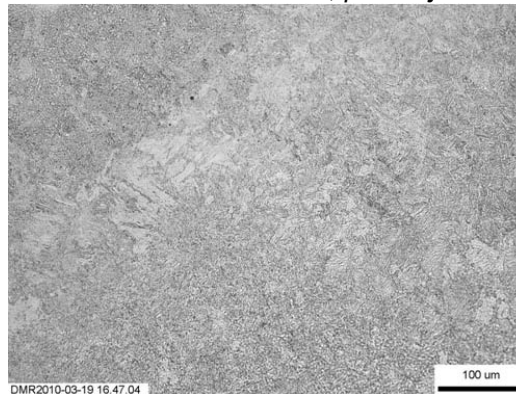
(a) Mikrostruktura na jednom kraju šava (videti sliku 3), pokazuje ograničenu rafinaciju;



(b) Detail of Figure 5a, showing a predominantly martensitic microstructure;
(b) Detalj sa slike 5a, pokazuje uglavnom martenzitnu mikrostrukturu;



(c) Microstructure of the HAZ at the centre of the weld, showing good refinement;
(c) Mikrostruktura ZUT u centru šava, pokazuje dobru rafinaciju



(d) Detail of Figure 5c, showing tempered martensite microstructure.
(d) Detalj sa slike 5c, pokazuje otpuštenu martenzitnu mikrostrukturu.

Hardness measured in the HAZ of specimen W01 ranged between 329-435HV₅ (average 385HV₅) and 258-420HV₅ (average 360 HV₅) after deposition of one and two layers, respectively, against 224-229 HV₅ for the parent metal.

Izmerene vrednosti tvrdoće ZUT na uzorku W01su u opsegu 329-435HV₅ (srednja vrednost 385HV₅) i 258-420HV₅ (srednja vrednost 360 HV₅).

GTAW

Figure 6 shows the degree of overlap between the HAZs of the three welding layers in test weld W15. In particular, Figure 6b shows that the HAZ associated with the second layer consistently overlapped that of the first layer, whereas, due to the variation in layer thickness, the HAZ produced by the third layer appears to have extended over the fusion line only in a few positions (Figure 6c).

TIG

Slika 6 prikazuje stepen preklapanja između ZUT-ova tri zavarena sloja na ispitnom šavu W15. Konkretno, slika 6b pokazuje da je ZUT vezan za drugi sloj dosledno preklapljen onim iz prvog sloja, dok zbog varijacija u debljini sloja, ZUT dobijen trećim slojem se nastavlja preko linije stapanja samo u nekoliko pozicije (slika 6c).

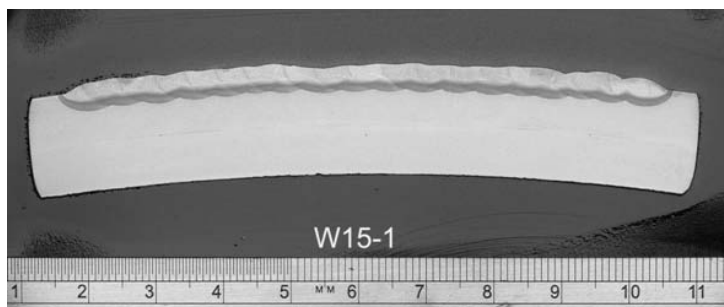
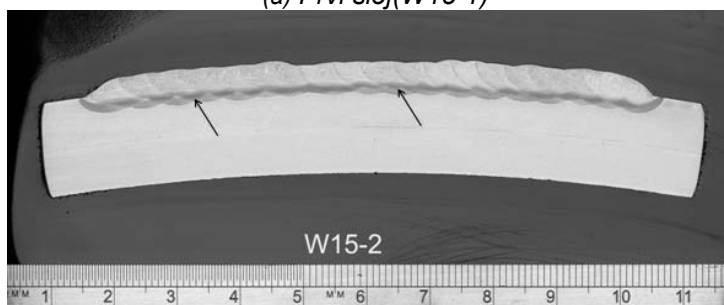
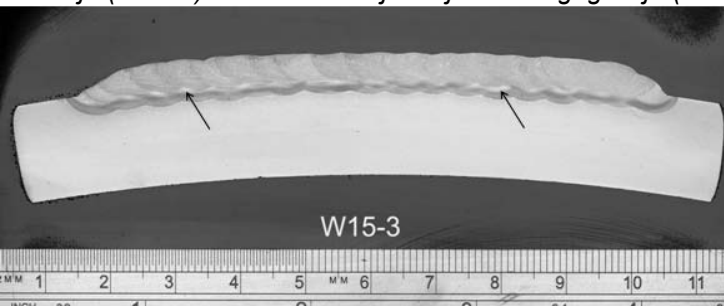


Figure 6. Macrosections taken through the samples relating to test weld W15. Scale ruler shown:
(a) First layer (W15-1);

Slika 6. Makropresci uzeti iz uzoraka vezanih za ispitni šav W15. Lenjir sa skalom pokazuje:
(a) Prvi sloj (W15-1)



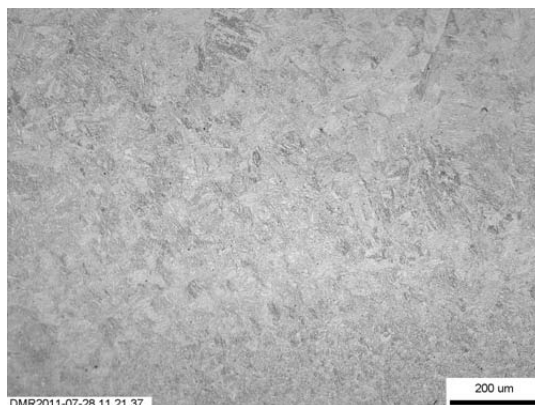
Two layers (W15-2) - arrows indicate the limit of the 2nd layer HAZ (darker);
(b) Dva sloja (W15-2) - strelice indikuju kraj ZUT drugog sloja (tamnije);



(b) Three layers (W15-3) - arrows indicate the limit of the 3rd layer HAZ (lighter).
(c) Tri sloja (W15-3) - strelice indikuju kraj ZUT trećeg sloja (svetlije);

Figure 7 shows the degree of HAZ refinement obtained when depositing two and three layers (Figure 7b and c, respectively), compared with the HAZ produced by the deposition of a single layer (Figure 7a).

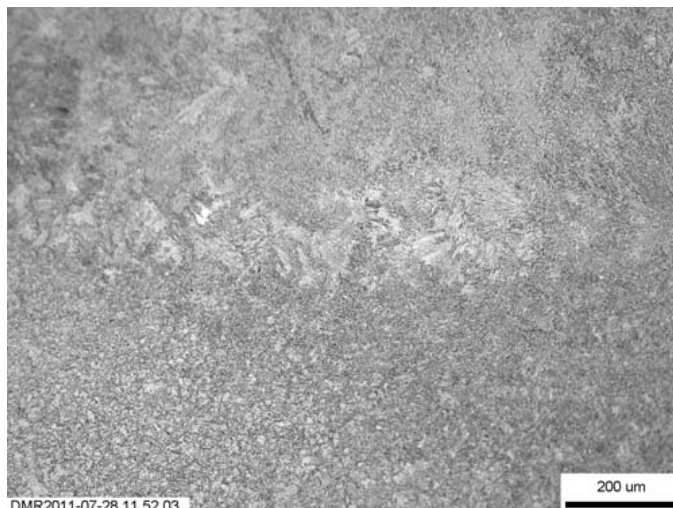
Slika 7 pokazuje stepen rafinacije ZUT dobijen kada se nanose dva ili tri sloja (slika 7b i c) u poređenju sa ZUT dobijen nanošenjem jednog sloja (slika 7a)



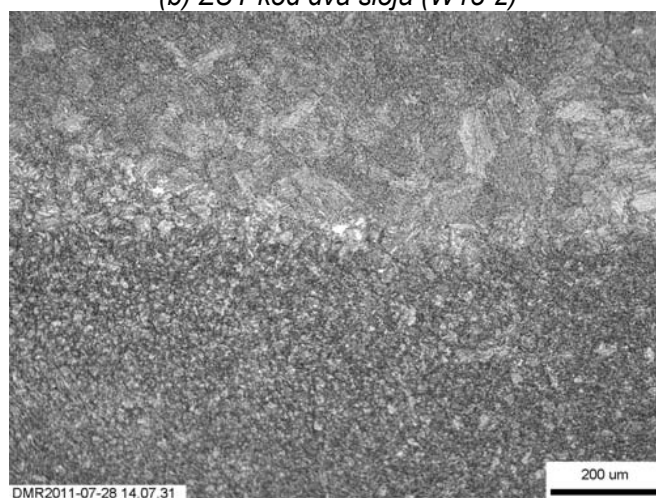
Detail of the weld and HAZ microstructures resulting from test weld W15 (GTAW). Magnification indicated by micron marker:

(a) HAZ associated with a single layer (W15-1);

Detalj šava i mikrostrukture ZUT kod ispitnog šava W15 (TIG). Uvećanje prikazano oznakom mikrona:
(A) ZUT kod jednog sloja (W15-1);



(b) HAZ associated with two layers (W15-2).
(b) ZUT kod dva sloja (W15-2)



(a) HAZ following the deposition of the third layer (W15-3).
(d) ZUT koji prati naonešenje trećeg sloja (W15-3)

The HAZ hardness associated with a single layer ranged from 391 to 473HV5, and averaged 430HV5. After the deposition of a second layer, the HAZ hardness ranged from 374 to 453HV5 and the average value slightly decreased to 423HV5. The values measured after the deposition of the third layer varied between 312 and 466HV5 with an average of 391HV5. This indicated that, whilst the third layer did not contribute to the refinement of the HAZ, it had a measurable effect on HAZ tempering.

Discussion

The review of current welding practice for grade 91 showed that whilst conventional welding and repair procedure are relatively established and can be reliably assessed, there is a lack of published literature and proven procedures for non-standard operations, such as welding without PWHT, which are highly desirable in a variety of fabrication and maintenance scenarios.

Tvrdoća ZUT vezana sa jedan sloj je od 391 do 473HV5, i prosečno 430HV5. Nakon nanošenja drugog sloja, tvrdoća ZUT je od 374 do 453HV5 a prosečna vrednost neznatno opada na 423HV5. Vrednosti merene nakon nanošenja trećeg sloja variraju između 312 i 466HV5 sa prosekom od 391HV5. To ukazuje da, iako treći sloj nije doprineo rafinaciji ZUT, ima merljive efekte na otpuštanje ZUT.

Diskusija

Pregled sadašnje prakse zavarivanja klase 91 pokazuje da iako je konvencionalno zavarivanje i procedura popravke relativno uspostavljeno i mogu se pouzdano proceniti, postoji nedostatak literature i proverenih procedure za nestandardne operacije, kao što je zavarivanje bez TOPZ (PWHT), što je veoma poželjno kod različitih izrada i scenarija održavanja.



In this respect, the experimental results showed that, if a refinement criterion previously applied to C-Mn steels, is applied to investigate the possibility to repair grade 91 components without PWHT, a substantial degree of HAZ refinement can be obtained for both the SMAW and GTAW processes. However, the tempering produced by such approach in the HAZ cannot be considered significant for SMAW, with an average hardness drop of approximately 25HV5. On the other hand, when GTAW was applied, a moderate degree of tempering was obtained, with a hardness reduction of 40HV5 after the deposition of three weld layers. It should however be noted that grade 91, being resistant to creep damage, is intrinsically resistant to tempering.

The wide range of hardness values observed indicated the range of maximum temperatures experienced in the HAZ regions with the lowest hardness values, corresponding to the areas that had been more effectively tempered by the heat cycle induced by the subsequent layers. This confirms that the depth of penetration of the second and following welding layers, as well as their associated HAZ, must be made more uniform, if consistent tempering is to be obtained.

Conclusions

No procedures for 'cold' weld repairs of P91 components are available in the public domain, which have been successfully employed in-service. SMAW and GTAW weld repair procedures for grade 91 without PWHT were investigated by applying a refinement criterion.

A combination of SMAW electrodes with diameters 3.2 mm (1/8 in, first layer) and 4.0 mm (5/32 in, second layer) produced some refinement, but only limited tempering occurred in the HAZ.

A three-layer GTAW repair procedure provided a higher degree of microstructural refinement, with limited tempering.

Recommendations

If weld repair procedures for grade 91 without PWHT are to be developed, the investigation of a controlled deposition procedure, based on a shallower penetration by the second layer than that explored in this present project, is recommended to achieve maximum tempering rather than maximum refinement.

In order to assess the performance of such repair procedures for in service applications, extensive welding trials and testing are required, including investigating HAZ toughness and cross-weld creep strength.

U tom smislu, eksperimentalni rezultati su pokazali da, ukoliko se primenjuje kriterijum rafinacije, prethodno primenjivan za C-Mn čelike, radi ispitivanja mogućnosti za popravku komponenti od klase 91 bez TOPZ (PWHT), značajan stepen rafinacije ZUT se može postići REL i TIG postupcima zavarivanja. Međutim, otpuštanje postignuto ovakvim pristupom u ZUT ne može se smatrati značajnim za REL, sa prosečnim padom tvrdoće od oko 25HV5. S druge strane, kada je primenjen TIG, umereni stepen otpuštanja je postignut, smanjenjem tvrdoće 40HV5 nakon nanošenja tri sloja. Međutim, treba napomenuti da je klasa 91, otporna na puzanje, suštinski otporna na otpuštanje.

Širok raspon vrednosti tvrdoće koji je uočen, ukazuje na opseg maksimalnih temperatura u ZUT regionima sa najnižim vrednostima tvrdoće, odgovara područjima koja su efikasnije otpuštena, toplotnim ciklusima izazvanim narednim slojevima. Ovo potvrđuje da dubina prodiranja drugog i narednih slojeva zavarivanja, kao i njihove ZUT, moraju biti uniformnije, ako se želi postići dosledno otpuštanje.

Zaključci

Nema procedure za 'hladno' reparaturno zavarivanje komponenti od P91 koje su javno dostupne, a da su bile uspešno korišćene u eksploataciji.

Postupci REL i TIG za reparaturu kod klase 91 bez TOPZ (PWHT) su ispitivani primenom kriterijuma rafinacije.

Kombinacija REL elektroda prečnika 3.2 mm (1/8 in, prvi sloj) i 4.0 mm (5/32 in, drugi sloj) proizvela je donekle rafinaciju, ali se u ZUT desilo samo ograničeno otpuštanje.

Postupak TIG reparaturnog zavarivanja u tri sloja obezbeđuje viši stepen mikrostrukturne rafinacije, sa ograničenim otpuštanjem.

Preporuke

Ako se postupci popravke zavarivanjem bez TOPZ za klasu 91 budu razvijali, istraživanje procedure kontrolisanog nanošenja, na osnovu plićeg prodora drugim slojem, koja su korišćena u sadašnjem projektu, preporučuje se da se postigne maksimalno otpuštanje, a ne maksimalna rafinacija. U cilju procene učinka takvih procedura popravke za tokom eksploatacije, obavezne su opsežne studije zavarivanja i ispitivanje, uključujući istraživanje žilavost ZUT i granicu puzanja po preseku šava.



Acknowledgements

This work was funded by the Industrial Members of TWI, as part of TWI's internal research programme. The author would like to thank TWI colleagues: Nigel Allison, Ray Banham, Rita Banks, Jackie Brand, Chris Dungey, Harry Froment, Chen Fun Wee, Alan Parker-Murrell, Diane Shaw, Shaun Smart, Ramin Taheri, Mark Tiplady and David Welsh.

References

Reference

- [1] De Smet O and Van Wortel H, 2006: 'Controlling heat treatment of welded P91'. *Welding Journal*, USA, pp42-44.
- [2] Vekeman J and Huysmans S, 2008: 'Cold weld repair of T91'. *Safety and Reliability of Welded Components in Energy and Processing Industry*.
- [3] Mitchell K C and Brett S J, 2003; 'Review of 'Cold Weld' repair applications'. *OMMI Vol. 2, No. 1*.
- [4] Storesund J and Samuelson L A, 2002: 'Creep life assessment of pipe girth weld repairs with recommendations'. *OMMI Vol. 1, No. 3*.

Zahvalnost

Ovaj rad je finansiran od strane industrijskih članova TWI, kao deo unutrašnjeg istraživačkog programa TWI. Autor želi da se zahvali kolegama iz TWI: Nigel Allison, Ray Banham, Rita Banks, Jackie Brand, Chris Dungey, Harry Froment, Chen Fun Wee, Alan Parker-Murrell, Diane Shaw, Shaun Smart, Ramin Taheri, Mark Tiplady and David Welsh.

- [5] Alberry P J and Feldstein J G, 1985: 'Alternatives to half bead repair technique (GTAW)' CEGB report TPRD/M/1512/R85, CEGB, US.
- [6] Jones R L, 1987: 'Development of two-layer deposition techniques for the manual metal arc repair welding of thick C-Mn steel plate without post-weld heat treatment'. *TWI Member Report 335*.
- [7] Gandy D W, Findlan S J and Childs W J, 1991: 'Repair welding of SA 508 Class 2 steel utilizing the 3-layer temper bead approach' *PVP-Vol. 215, Fatigue, Fracture and Risk*, ASME, US.
- Air-Liquide, 2012:
www.airliquidewelding.cz/file/otherelement/pj/new%20toptig%202386z18473.pdf

MIŠLJENJE (KOMENTAR)

o knjizi "**Termičko sečenje metala**", autor Milan Dragića Milovanović, u izdanju "Slovensko društvo za neporušitvene preiskave", Ljubljana, 2016. g.

Pročitani smo knjigu i pogledali priloženi CD (knjiga u proširenom elektronskom izdanju) i zaključili da je uložen veliki trud.

Knjiga obuhvata razne načine rezanja plazmom i laserom, a pored toga (mada nije tema naslova) opisane su i tehnike zavarivanja plazmom i laserom, MIG/MAG, pa sve do elektrootporskog zavarivanja zavrtnjeva i bolcni (nemački "Bolzenschweissen").

Uočeni su nedostaci vezani za standardizovanu terminologiju iz ove oblasti (tiče se i samog naslova, gde bi umesto izraza "sečenje" trebalo da stoji izraz "rezanje"). Takođe i najveći broj tabela i legendi ispod slika nisu na srpskom jeziku, već, pretežno, na nemačkom jeziku. Ako čitaocu to ne smeta, a dobro zna nemački jezik, u knjizi može da nađe niz interesantnih podataka iz oblasti rezanja plazmom i laserom, a i iz oblasti pomenutih tehnika zavarivanja.

Knjiga obiluje propagandnim materijalom raznih proizvođača opreme za rezanje i zavarivanje (nažalost i taj tekst je uglavnom na nemačkom jeziku), pa i to može da bude interesntno nekom ko traži rešenje za svoj problem iz pomenute tematike.

Ko je zainteresovan za ovakvu publikaciju, moguće ju je nabaviti direktno od autora.

Komentar dao: Martinovski Vlado, dipl. inž. maš.



PRIVREDNICI SRBIJE

Na nedavno održanom seminaru „Termička obrada čelika i zavarenih spojeva“, u organizaciji DUZS i ISS, sreli smo **Ostoju Milosavića**, vlasnika i direktora preduzeća **Termoproces** u Beogradu, višegodišnjeg stručnjaka u oblasti termičke obrade, izvođača poslova termičke obrade i proizvođača kompletne opreme za pomenute radove. Posetili smo ga u poslovnom i proizvodnom delu Termoprocesa.



Ostoja Milosavić u svom radnom okruženju

Kada i kako ste započeli da se bavite poslovima termičke obrade?

Počeo sam da radim 1971. godine u nemačkoj firmi kotlogradnje Babkok kao elektrotehničar na održavanju električnih aparata. Ubrzo su me poslali na specijalizaciju za rukovanje i održavanje indukcionih aparata firme AEG. Te godine, počeo sam da se bavim termičkom obradom zavarenih spojeva. Godine 1973. usledilo je dalje usavršavanje za poslove elektrootpornim aparatima, kakve danas proizvodimo u Termoprocesu i obavljamo poslove.

U Babkoku ste nesumljivo stekli dosta saznanja o primeni termičke obrade na zavarenim spojevima.

Da, dobio sam i ovlašćenje da mogu obučavati izvršioce termičke obrade. Naime, osamdesetih godina krenula je intenzivnija gradnja nuklearnih elektrana i bilo je obavezno posedovanje sertifikata o obučenosti osoblja. Babkok i druge firme obavljali su to prema uslovima propisanim od TUV-a.

Vi sada uspešno poslužete u Srbiji. Kako je do toga došlo?

U periodu 1986.-1990.godine, poslove prenosim u Srbiju i otvaram zanatsku radnju Termotehnika sa pet uposlenih i pet aparata za termičku obradu. Poslovi su dobro krenuli, godine 1990-te registrujemo preduzeće Termoproces. Danas imamo dvadeset zaposlenih. U poslednjih 12 godina prodali smo 40 aparata sopstvene proizvodnje u Sloveniji, Hrvatskoj, Nemačkoj, Austriji, Rumuniji, Šrilanki.. Aparati su dobri, u njih ugrađujemo japansku elektroniku koja se pokazala veoma pouzdanom. Pored ovih uređaja izrađujemo i montažno-demontažne peći za termičku obradu zavarenih sklopova, zapremine komora 96 do 320 kubnih metara, snage 420 KW do 900 KW. Trenutno koristimo pet takvih peći.

Termoproces je postao solidna firma, da li radite i izvan Srbije?

Termoproces je najveća firma, čak i na Balkanu. U Srbiji ima još nekoliko manjih firmi za izvođenje poslova termičke obrade zavarenih spojeva ali mislim da nijedna nije dostigla naš stepen razvoja. Od 2003. imamo ispostavu u Nemačkoj za povremeno obavljanje poslova a 2009. registrovali smo u Sloveniji preduzeće Termoproces-Servis sa sedištem u Mariboru. Poslove u Sloveniji vodi sin Boris.

Neizbežno pitanje, kakve probleme imate a koji nisu tehničke prirode?

Sa poslovima u inostranstvu nemamo finansijskih problema. Kod nas je druga priča. Zbog stečajeva firmi, izgubili smo oko 30 miliona dinara. Stalni problem je naplata i učešće na tenderima pošto poslovi termičke obrade nisu izbačeni kao posebni, nego su uključeni u radove montažera, što nama ne odgovara.

Da li vam država izlazi u susret i da li koristite neke povoljnosti?

Ne posebno, ali ovih dana smo dobili obaveštenje od Privredne komore da je Termoproces uvršten u grupu uspešnih i kvalitetnih malih preduzeća, da oni pripremaju brošuru za predstavljanje u inostranstvu i da ćemo nadalje dobijati informacije o kreditima, povoljnim i nepovratnim sredstvima i sl.

Vaša saradnja sa srpskim Udruženjem za unapređivanje zavarivanja?

Prisutni smo na stručnim manifestacijama kao što je ovaj Seminar, želimo da smo u toku sa svim inovacijama, standardima i sl. iz oblasti našeg rada ali i zavarivanja, pošto su to srodni poslovi i međusobno povezani. Učestvovali smo kao izlagači na Sajmovima zavarivanja, ukoliko ih ponovo bude bićemo i tamo.

Milan Dragić

METHOD TO CALCULATE ULTRASONIC WAVE VELOCITY BY USING CHEMICAL COMPOSITION OF AUSTENITIC STAINLESS STEELS

METODE IZRAČUNAVANJA BRZINE ULTRAZVUČNIH TALASA KORIŠĆENJEM HEMIJSKOG SASTAVA AUSTENITNOG NERĐAJUĆEG ČELIKA

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK / UDC: Weld World (2014) 58:491–497;

DOI 10.1007/s40194-014-0132-0

Rad primljen / Paper received:

Jun 2017.

Prevod izvornog rada na srpski jezik: Milica Antić, dipl.ing

Key words: Austenitic Stainless Steel, Density, Young's Modulus, Poisson's ratio, Ultrasonic wave velocity, Lattice Parameter

Abstract

Various kinds of austenitic stainless steel have been used in oil refinery and chemical plant, and a value of ultrasonic wave velocity is necessary for not only thickness measurement but also evaluation of material deterioration. Although ultrasonic wave velocity depends generally on chemical composition, material structure, grain size etc., it is hard to study the influence of all factors for calculating ultrasonic wave velocity. Therefore, we noticed chemical composition of materials only.

Since ultrasonic wave velocity depends generally on parameter such as density ρ , Young's modulus E and Poisson's ratio ν , we calculated these parameters by using material data of respective elementary substances. Then, we have investigated the relationship between the calculated values of ultrasonic wave velocity and the experimental ones measured by ultrasonic testing.

1. Introduction

In measuring thickness of various kinds of austenitic stainless steels using in oil refinery and chemical plant, it is hard to find out the velocity except for a typical type of stainless steel (for example, AISI type 304 and 347) in a public handbook. Especially, an accurate value of longitudinal wave velocity is necessary for thickness measurement by using ultrasonic pulse echo technique. Also, for estimating deterioration of material, it is useful to examine a deviation in ultrasonic wave velocity such as longitudinal or transverse wave velocity. Longitudinal wave velocity C_L and transverse wave velocity C_S are given by the following equations (1) respectively

Adresa autora / Author's adresse :

¹ Sankyu Incorporated, Fukuoka, Japan

² Kyushu Institute of Technology, Fukuoka, Japan

Ključne reči: austenitni nerđajući čelik, gustina, Jungov modul, Poasonov odnos, brzina ultrazvučnog talasa, parametar rešetke

Rezime

Razne vrste austenitnih nerđajućih čelika koriste se u rafinerijama nafte i hemijskim postrojenjima, a vrednost brzine ultrazvučnog talasa je potrebna, ne samo za merenje debljine, već i za ocenjivanje propadanja materijala. Iako brzine ultrazvučnog talasa uglavnom zavise od hemijskog sastava, strukture materijala, veličine zrna itd, teško je proučavati uticaj svih faktora za izračunavanje brzine ultrazvučnog talasa. Stoga smo razmatrali samo hemijski sastav materijala.

Dok brzina ultrazvučnog talasa uglavnom zavisi od parametara, kao što su ρ gustina, Jungov modul E i Poasonov odnos ν , izračunali smo ove parametre pomoću podataka za materijale od odgovarajućih osnovnih supstanci. Zatim smo istraživali odnos između izračunate vrednosti brzine ultrazvučnog talasa i eksperimentalno dobijenih ultrazvučnim ispitivanjem.

1. Uvod

Pri merenju debljine raznih vrsta austenitnog nerđajućeg čelika koji se koriste u rafinerijama nafte i hemijskim postrojenjima, teško je naći u raspoloživim priručnicima brzinu, osim za tipične vrste nerđajućeg čelika (na primjer, AISI tip 304 i 347). Posebno, precizna vrednost brzine longitudinalnog talasa je potrebna za merenje debljine pomoću ultrazvučne impuls-eho tehnike. Takođe, za procenu pogoršanje materijala, korisno je ispitati odstupanje brzine ultrazvučnog talasa, kao što su brzine longitudinalnog ili transverzalnog talasa. Brzina longitudinalnog talasa C_L i transverzalnog talasa C_S date su jednačinama (1)

$$C_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$

$$C_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (2)$$

where E is Young's modulus, ν is Poisson's ratio and ρ is density.

If parameters such as E , ν and ρ can be estimated by using material data of respective elementary substances of austenitic stainless steel, it will be possible to calculate ultrasonic wave velocity.

When measured longitudinal wave velocity C_L (m/s) and transverse wave velocity C_S (m/s), E (GPa), and ν can be calculated as follows.

$$E = \frac{\rho C_S^2 (3C_L^2 - 4C_S^2)}{C_L^2 - C_S^2} \quad (3)$$

$$\nu = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{(C_L/C_S)^2 - 1} \right) \quad (4)$$

In order to simulate a deviation in ultrasonic wave velocity, we set that one of these factors was variable and others were constant.

2. Materials Used for Calculating Ultrasonic Wave Velocity

We measured E , ν and ρ of T.P. No.1-1~1-6 in Table 1, and these materials were goods on the market, which were produced by solution treatment in accordance with Japanese Industrial Standard.

Data of other materials listed in Table 1 were based on those by H.M.Ledbetter^{2)~5)}, because he had measured both E and ν of AISI type 304, 304L, 316 and 310S stainless steel by measuring both C_L and C_S . The data of T.P. No.1-1~1-6 in Table 1 shows both figures of mill-sheet issued by fabricator and the results by fluorescent x-ray analysis (FXA). Carbon and sulfur of T.P.No.1-1~1-6 were analyzed by equipment for analyzing carbon and sulfur simultaneously, because it is hard to analyze these elements by FXA.

We used figures of mill-sheet, because the difference between mill-sheet and FXA were negligibly small.

3. Experimental Method

3.1 Measurement of Lattice Parameter and Density

Lattice parameter d of T.P. No.1-1 ~ 1-6 were measured by X-ray diffraction method to investigate a deviation in density caused by lattice parameter. Since the relation between $\cos^2\theta$ and d is represented by a straight line, d was obtained by extrapolating to $\cos^2\theta = 0^6)$, where θ is Bragg angle.

$$C_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$

$$C_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (2)$$

gde je E Jungov modul, ν Poissonov odnos i ρ je gustina.

Ako se parametri kao što su E , ν i ρ mogu se proceniti pomoću podataka za materijale odgovarajućih osnovnih supstanci austenitnog nerđajućeg čelika, onda je moguće izračunati brzine ultrazvučnog talasa.

Kada se meri brzina longitudinalnog talasa C_L (m/s) i brzina transverzalnog talasa C_S (m/s), E (GPa), može se izračunati ν kako sledi

$$E = \frac{\rho C_S^2 (3C_L^2 - 4C_S^2)}{C_L^2 - C_S^2} \quad (3)$$

$$\nu = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{(C_L/C_S)^2 - 1} \right) \quad (4)$$

Kako bi simulirali odstupanje u brzini ultrazvučnog talasa, postavili smo da jedan od tih faktora varira a ostali su bili konstantni.

2. Materijali se koristi za izračunavanje brzine ultrazvučnog talasa

Merili smo E , ν i ρ od T.P. No.1-1~1-6 u tabeli 1, a ovi materijali su roba na tržištu, i proizvedeni su rastvarajućim tretmanom u skladu sa japanskim industrijskim standardima.

Podaci o drugim materijalima navedenim u tabeli 1 su na osnovu tih po H.M.Ledbetter^{2)~5)}, zato što je mereno i E i ν nerđajućeg čelika tipa AISI 304, 304L, 316 i 310S merenjem i C_L i C_S . Podaci za T.P. No.1-1~1-6 u tabeli 1 pokazuju obe slike valjaoničkih podataka koje izdaje proizvođač i rezultate dobijene fluorescentnom analizom x-zracima (FXA). Ugljenik i sumpor u T.P.No.1-1~1-6 su analizirani opremom za analizu ugljenika i sumpora istovremeno, jer je teško analiziranje ovih elemenata pomoću FXA.

Koristili smo valjaoničke podatke, jer je razlika između valjaoničkih lista i FXA su zanemarljiva.

3. Eksperimentalna metoda

3.1 Merenje parametra rešetke i gustine

Parametar rešetke d za T.P. No.1-1 ~ 1-6 meren je metodom difrakcije x zraka radi istraživanja odstupanja u gustini uzrokovanog parametrom rešetke. S obzirom da je odnos između $\cos^2\theta$ i d predstavljen ravnom linijom, d je dobijen ekstrapolacijom do $\cos^2\theta = 0^6)$, gde je θ Bragg-ov ugao.

Density ρ of T.P. No.1-1~1-6 was obtained by measuring the mass of the test piece in air and water to compare experimental values with ones calculated by using d .

Densities of other materials were referred from the papers by H.M.Ledbetter^{2)~5)}.

Gustina ρ za T.P. No.1-1~1-6 je dobijena merenjem mase ispitnog komada u vazduhu i vodi radi upoređenja eksperimentalnih vrednosti sa onima izračunatim preko d .

Gustine drugih materijala su uzete iz radova H.M.Ledbetter^{2)~5)}.

T.P.No.	AISI No.	Analysis	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	Ref.No.
1-1	304	Mill-sheet	0.060	0.47	0.85	0.030	0.003	8.07	18.13	—	—	—	—
		FXA	0.059	0.59	0.94	0.032	0.005	7.54	18.09	0.20	0.372	—	
1-2		Mill-sheet	0.050	0.51	0.92	0.032	0.003	8.05	18.13	—	—	—	
		FXA	0.054	0.76	1.02	0.034	0.004	7.45	18.20	0.14	0.211	—	
1-3		Mill-sheet	0.040	0.53	0.92	0.036	0.002	8.06	18.08	—	—	—	
		FXA	0.034	0.72	1.01	0.034	0.006	7.52	18.18	0.15	0.278	—	
1-4	304L	Mill-sheet	0.017	0.37	1.32	0.029	0.004	9.07	18.12	—	—	—	
		FXA	0.023	0.64	1.41	0.029	0.006	8.41	18.25	0.25	0.332	—	
1-5	310S	Mill-sheet	0.040	0.71	0.9	0.022	0.001	19.20	24.91	—	—	—	
		FXA	0.035	0.86	1.01	0.026	0.001	17.89	24.95	0.05	0.088	—	
1-6	316	Mill-sheet	0.060	0.55	0.84	0.027	0.000	10.06	16.06	2.09	—	—	
		FXA	0.059	0.69	0.92	0.051	0.001	9.37	16.35	2.07	0.250	—	
2-1	304	—	0.028	0.50	1.57	0.021	0.019	10.10	18.30	0.200	0.210	0.039	2
2-2			0.058	0.50	1.57	0.021	0.019	10.10	18.30	0.200	0.210	0.039	
2-3			0.089	0.50	1.57	0.021	0.019	10.10	18.30	0.200	0.210	0.039	
2-4			0.037	0.57	1.50	0.022	0.017	9.91	18.00	0.205	0.197	0.120	
2-5			0.067	0.57	1.50	0.022	0.017	9.91	18.00	0.205	0.197	0.120	
2-6			0.094	0.57	1.50	0.022	0.017	9.91	18.00	0.205	0.197	0.120	
2-7			0.030	0.55	1.42	0.024	0.016	9.97	20.30	0.195	0.200	0.240	
2-8			0.057	0.55	1.42	0.024	0.016	9.97	20.30	0.195	0.200	0.240	
2-9			0.085	0.55	1.42	0.024	0.016	9.97	20.30	0.195	0.200	0.240	
3-1	304	—	0.025	0.53	1.02	0.022	0.013	8.68	18.19	0.32	0.30	0.11	3
3-2			0.025	0.60	1.19	0.023	0.015	7.81	19.36	0.32	0.28	0.19	
3-3			0.028	0.63	2.00	0.021	0.013	8.66	18.10	0.31	0.28	0.11	
3-4			0.022	0.64	2.01	0.023	0.013	7.89	19.35	0.32	0.30	0.19	
3-5			0.025	0.59	3.85	0.023	0.013	8.70	18.22	0.31	0.29	0.11	
3-6			0.024	0.65	3.85	0.022	0.014	7.84	19.25	0.31	0.29	0.19	
3-7			0.023	0.62	4.03	0.023	0.014	8.22	18.71	0.31	0.30	0.15	
3-8			0.024	0.61	5.79	0.024	0.014	7.83	19.48	0.31	0.30	0.21	
3-9			0.031	0.62	5.80	0.024	0.014	8.29	18.42	0.31	0.30	0.15	
3-10			0.021	0.64	5.81	0.023	0.014	8.62	18.06	0.33	0.30	0.11	
4-1	316	—	0.021	0.30	1.05	0.002	0.004	13.80	18.50	2.05	0.00	0.180	4
4-2			0.024	0.30	1.00	0.003	0.004	12.00	18.00	2.06	0.00	0.188	
4-3			0.022	0.30	1.02	0.002	0.005	14.00	18.20	2.98	0.00	0.188	
4-4			0.023	0.29	1.01	0.002	0.005	11.80	18.00	3.00	0.00	0.200	
4-5			0.022	0.30	1.00	0.002	0.004	14.20	17.90	4.02	0.00	0.196	
4-6			0.020	0.28	1.03	0.002	0.005	12.10	18.20	4.08	0.00	0.204	
5-1	304	—	0.048	0.38	1.88	0.019	0.024	9.49	18.65	0.52	0.07	0.120	5
5-2	310S		0.080	0.70	1.70	0.020	0.020	20.80	24.80	0.10	0.10	—	
5-3	316		0.062	0.56	1.77	0.030	0.020	12.93	17.46	2.20	—	—	

(Note) FXA means Fluorescent X-ray Analysis.

Table 1: Chemical composition of materials used

Tabela 1: Hemijski sastav korišćenih materijala

Mill-sheet –valjaonička lista
FXA znači analiza fluorescentnim X zracima

3.2 Measurement of Young's modulus and Poisson's ratio

Both E and ν were measured by using both strain gauge method and ultrasonic method.

3.3 Ultrasonic Test Instrument and Size of Test Piece for Measuring Ultrasonic Wave Velocity

Table 2 shows ultrasonic instrument and probes for measuring longitudinal and transverse wave velocity of T.P.No.1-1 ~ 1-6.

Size of test piece is shown in Table 3.

3.2 Merenje Jungovog modula i Poasonovog odnosa

I E i ν mereni su metodom merila naprežanja i ultrazvučnom metodom.

3.3 Ultrazvučni ispitni instrument i veličina ispitnog komada za merenje brzine ultrazvučnog talasa

Tabela 2 prikazuje ultrazvučni instrument i sonde za merenje brzine longitudinalnih i transverzalnih talasa za T.P.No.1-1 ~ 1-6.

Veličina ispitnog komada prikazana je u tabeli 3.

Ultrasonic test instrument	Model USN 58L, GE Inspection Technology, Inc.
Probe for longitudinal wave	Model V109 (5MHz) Panametrics-NDT, Inc.
Probe for shear wave	Model 5Z10X10N-S, Japan Probe Co, Ltd.

Table 2: Ultrasonic test instrument and probes
Tabela 2: Ultrazvučni ispitni instrument i sonde

T.P. No.	AISI No.	Size (mm)
1-1 ~ 1-4	304, 304L	1200×w 50×t 15
1-5 ~ 1-6	310S, 316	1200×w 50×t 9

Table 3: Size of test piece
Tabela 3: Veličina ispitnog komada

3.4 Measurement of Transverse Wave Velocity Ratio

To investigate acoustic anisotropy of T.P. No.1-1~1-6, ratio of transverse wave velocity at rolling direction of material to that at vertical direction was measured.

3.5 Method to Calculate Ultrasonic Wave Velocity

3.5.1 Method to calculate lattice parameter and density

In calculating ρ by using chemical composition, it is indispensable to estimate d . Although Fig. 1 shows the relation between d and carbon content C in austenitic stainless steel⁷⁾, original data are for the range where carbon content is more than 0.275%C. Since carbon content of materials used was from 0.017%C to 0.094%C, we extrapolated the original data to $C=0$ for estimating lattice parameter corresponding to respective carbon content of materials used.

W.C.Leslie⁸⁾ studied a deviation in lattice parameter of iron and its dilute substitutional solid solutions. He reported that the lattice parameter in BCC (body-centered cubic lattice) depended on atomic percent solute of dilute substitutional solid solutions. According to his study, Mn, Ni and Cr didn't cause a deviation in the lattice parameter because of negligibly small size-misfit of atom. Furthermore, Si and P decreased the lattice parameter a little.

Assuming that a deviation in lattice parameter of FCC (face-centered cubic lattice) would be similar to that in BCC, Eq. (5) was used for estimating d (nm) based on paper⁸⁾.

$$d = 0.3555 + 0.0045C - 0.000035Si - 0.00010P + 0.000067Mn + 0.00007Ni + 0.000055Cr \quad (5)$$

Density ρ (kg/m³) was calculated by Eq. (6)⁹⁾,

$$\rho = \frac{4}{Nd^3} \left(\sum_{i=1}^n M_i a_i + \frac{A}{1-A} M_c \right) \quad (6)$$

3.4 Merenje odnosa brzina transverzalnog talasa

Da bi istražili akustičnu anizotropiju za T.P. No.1-1~1-6, izmeren je odnos brzine transverzalnog talasa u smeru valjanja materijala nasuprot brzini u vertikalnom smeru

3.5 Metoda za izračunavanje brzine ultrazvučnog talasa

3.5.1 Metoda za izračunavanje parametara rešetke i gustine

U obračunu ρ pomoću hemijskog sastava, neophodno je proceniti d . Iako sl. 1 prikazuje odnos između d i sadržaj ugljenika C u austenitnom nerđajućem čeliku⁷⁾, originalni podaci su za opseg gde je sadržaj ugljenika veći od 0.275%C. s obzirom da je sadržaj ugljenika u materijalu koji se koristi od 0.017%C do 0.094%C, ekstrapolirali smo originalne podatke za $C=0$ za procenu parametra rešetke, koji odgovara odgovarajućem sadržaju ugljenika u materijalu.

W.C.Leslie⁸⁾ je proučavao odstupanje u parametru rešetke železa i njegovim razređenim supstitucijskim čvrstim rastvorima. On je saopštio da parametar rešetke u BCC (zapreminski centrirana kubna rešetka) zavisi od atomskog procenta razređenja supstitucijskih čvrstih rastvora. Prema ovoj studiji, Mn, Ni i Cr ne uzrokuju odstupanje u parametru rešetke zbog zanemarljivo male veličine-neprikladosti atoma. Osim toga, Si i P smanjuju malo parametar rešetke.

Pod pretpostavkom da je odstupanje u parametru rešetke FCC (površinski centrirana kubna rešetka) slično onom kod BCC, jednačina. (5) je korišćena za procenu d (nm) na osnovu rada⁸⁾.

$$d = 0.3555 + 0.0045C - 0.000035Si - 0.00010P + 0.000067Mn + 0.00007Ni + 0.000055Cr \quad (5)$$

Gustina ρ (kg/m³) je izračunata prema jednačini (6)⁹⁾,

$$\rho = \frac{4}{Nd^3} \left(\sum_{i=1}^n M_i a_i + \frac{A}{1-A} M_c \right) \quad (6)$$

where N is Avogadro constant [$=6.02 \times 10^{23}$], d is lattice parameter, M_i is atomic weight except carbon, a_i is atomic fraction except carbon, A is atomic fraction of carbon, and M_c is atomic weight of carbon.

gde je N Avogadrova konstanta (broj) [$=6.02 \times 10^{23}$], d je parametar rešetke, M_i je atomska težina sem ugljenika, a_i je atomska frakcija osim ugljenika, A je atomska frakcija ugljenika, i M_c je atomska težina ugljenika.

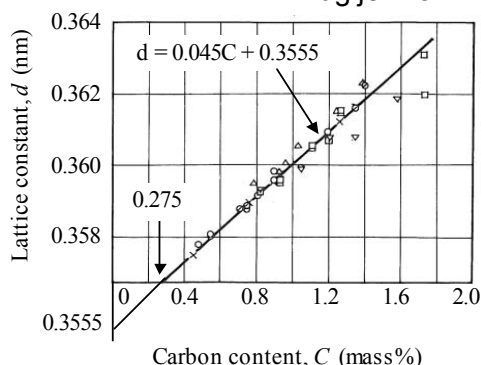


Fig. 1 Relation between lattice parameter and carbon content in austenitic steel⁸⁾
Sl. 1. Odnos između parametra rešetke i sadržaja ugljenika kod austenitnog čelika⁸⁾
 (lattice constant- konstanta rešetke; carbon content- sadržaj ugljenika)

3.5.2 Method to calculate Young's modulus and Poisson's ratio

Since S.Nishikawa¹⁰⁾ reported that Young's modulus of solid-solution type alloy in two component system was roughly proportional to each atomic percent, we assumed that Young's modulus in pluralistic componentsystem would be given by Eq. (7):

$$E = \sum_{i=1}^n a_i E_i \quad (7)$$

where, a_i is atomic fraction and E_i is Young's modulus of an elementary substance. Similarly, we assumed that ν in pluralistic component system would be given by Eq. (8):

$$\nu = \sum_{i=1}^n a_i \nu_i \quad (8)$$

where ν_i is Poisson's ratio of an elementary substance.

The atomic fraction a_i was calculated using weight fraction and atomic weight.

Both E and M of the respective elementary substances are listed in Table 4.

C_L was calculated by substituting values in Eq. (6), (7) and (8) into Eq. (1). Similarly, C_S was calculated by substituting values in Eq. (6), (7) and (8) into Eq. (2).

3.6 Method to Simulate Behavior of Deviation

3.6.1 Deviation in ultrasonic wave velocity and density

We examined the influence of the deviation in each parameter in Eq. (1) and (2) on ultrasonic wave velocity and also the deviation in lattice parameter in Eq. (6) on density.

3.5.2 Metode izračunavanja Jungovog modula i Poasonovog odnosa

S obzirom da je S.Nishikawa¹⁰⁾ saopštio da je Jungov modul kod dvokomponentnih legura tipa čvrstog rastvora, približno proporcionalan svakom atomskom procentu, pretpostavili smo da je Jungov modul u pluralističkom sistemu komponenta dat izrazom. (7):

$$E = \sum_{i=1}^n a_i E_i \quad (7)$$

gde je a_i atomska frakcija i E_i je Jungov modul elementarne supstance.

Isto tako, pretpostavili smo da ν u pluralističkom sistemu komponenta bilo dato izrazom. (8):

$$\nu = \sum_{i=1}^n a_i \nu_i \quad (8)$$

gdje ν_i Poasonov odnos osnovne supstance

Atomska frakcija a_i je izračunata korišćenjem frakcije težine i atomske težine.

I E i M su odgovarajuće elementarne supstance navedene u tabeli 4.

C_L je izračunat zamenom vrednosti u jednačini. (6), (7) i (8) u jed. (1). Slično tome, C_S je izračunat zamenom vrednosti u jednačini. (6), (7) i (8) u jed. (2).

3.6 Metoda za simuliranje ponašanja odstupanja

3.6.1 Odstupanje u brzine ultrazvučnog talasa i gustine

Analizirali smo uticaj odstupanja svakog parametra u jednačini. (1) i (2) na brzine ultrazvučnog talasa kao i odstupanje parametra rešetke u jednačini. (6) na gustinu.

-Kraj 1. dela NASTAVAK U SLEDEĆEM BROJU

ČASOPIS ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE**Cenovnik oglasnog prostora u četiri uzastopna broja 2017**

	A4	2/2	1/1	1/2	1/4	1/8
dimenzije (mm)		2 x 210 x 297	210 x 297	180 x 120	90 x 120	90 x 60
DIN	crno/beli	-	39 000	23 000	16 000	10 000
	kolor	105 000	75 000	-	-	-

- U cene nije uračunat PDV 20%.
- Objavljivanje oglasa u samo jednom broju iznosi 30% od datih cena.
- Reklamni tekstovi: 25 % od cene površine crno/belih oglasa.
- Dostava materijala:
 - za crno-beli film ili CD (Adobe Photoshop / CorelDRAW);
 - za kolor film ili CD (Adobe Photoshop / CorelDRAW);
 - izrada filma sa CD: 10 % od cene angažovanog prostora.
- Na web prezentaciji DUZS-a, (www.duzs.org.rs), na strani Marketing, objavljuje se pregled firmi-oglašivača sa podacima o glavnim grupama proizvoda/usluga i adresom web prezentacije. Svi posetioci naše web prezentacije mogu da posete i web prezentacije oglašivača, preko aktivnih linkova koji se nalaze na ovoj stranici!

WELDING & WELDED STRUCTURES, Quarterly review**Advertising prices for four successive numbers in 2017**

	A4	2/2	1/1	1/2	1/4	1/8
dimensions (mm)		2 x 210 x 297	210 x 297	180 x 120	90 x 120	90 x 60
EUR	black/white	-	840	432	336	240
	colour	2 640	1 680	-	-	-

- VAT 20% included.
- Advertising in one number only is 35% of the given prices.
- Commercial articles: 30 % of black/white advertising price.
- Print material:
 - for black/white CD (Adobe Photoshop / CorelDRAW)
 - for color CD (Adobe Photoshop / CorelDRAW).
- All the visitors of our web site may be linked to the advertisers' web site.

**INDEKS OGLAŠIVAČA
ADVERTISERS INDEX**

YASKAWA SLOVENIJA

HONEX

ELIMP

MESSER TEHNOGAS

NEMINIK

MESSE ESSEN – Schweissen & Schneiden

- | | |
|--|---------------|
| 1. ČLANARINA DUZS za 2017. godinu | 3.500 dinara |
| Članovima DUZS GRATIS godišnje izdanje časopisa "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE" | |
| 2. ČASOPIS "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE" - 2017. godina
u slobodnoj prodaji (u cene je uračunat PDV 10%): | |
| ▪ cena pojedinačnog broja..... | 825 dinara |
| ▪ godišnja pretplata za 1 komplet brojeva godišnjeg izdanja..... | 2.500 dinara |
| 3. ČASOPIS - stari brojevi (u cene je uračunat PDV 10%) | |
| a) u slobodnoj prodaji: | |
| ▪ cena pojedinačnog broja za 2015. godinu | 500 dinara |
| ▪ cena pojedinačnog broja za prethodne godine..... | 250 dinara |
| b) beneficirane cene za članove DUZS: | |
| ▪ cena pojedinačnog broja za 2016. godinu (pouzećem ili preuzimanjem) | 400 dinara |
| ▪ cena pojedinačnog broja za prethodne godine (pouzećem ili preuzimanjem) | <u>Gratis</u> |
| 4. Knjiga Organizacija i ekonomika zavarivačkih radova – autor: prof. dr Zoran Radojević (uračunat PDV 10%) | 1.045 dinara |
| 5. Zbirke standarda OBEZBEĐENJE KVALITETA U ZAVARIVANJU, komplet 4 toma | 6.750 dinara |