



ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE

WELDING & WELDED STRUCTURES

God. 60 Vol. 60	Br. 3 No. 3	97-144 97-144	Beograd Belgrade	Srbija Serbia	2015. 2015.
--------------------	----------------	------------------	---------------------	------------------	----------------

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)

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) 2850-794
(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 2015.

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.
Aleksinačkih rudara 35, Beograd
Tiraž: 400 kom.

3/2015

SADRŽAJ:

CONTENTS:



NAUKA • ISTRAŽIVANJE • RAZVOJ

SCIENCE • RESEARCH • DEVELOPMENT

101

ISPITIVANJE PITING KOROZIJE NERĐAJUĆEG
ČELIKA AISI 304 U RASTVORIMA HLORIDA

PITTING CORROSION TESTING OF STAINLESS STEEL
AISI 304 IN CHLORIDE SOLUTIONS

Bore V. Jegdić, Biljana M. Bobić

109

RAČUNARSKO VOĐENJE VISOKOFREKVENTNOG
INDUKTIVNOG ZAVARIVANJA

COMPUTERS REGULATION HF INDUCTIVE WELDING

Miroslav S. Milićević, Tatjana M. Stojanović, Vladimir Stanković, Valentina M. Nejković



MIZ

IIW

127

INFLUENCE OF GRAIN SIZE ON MECHANICAL
PROPERTIES OF ALUMINIUM GTA WELD METAL

UTICAJ VELIČINE ZRNA NA MEHANIČKE OSOBINE
METALA ŠAVA ALUMINIJUMA ZAVAREN OG TIG
POSTUPKOM

P. Schempp, R. Häcker, A. Pittner, C.E. Cross i M. Rethmeier



PRAKSA

PRACTICE

137

TEHNOLOGIJA ZAVARIVANJA TRAVERZE

Kokeza Nenad dipl.inž.maš



VESTI

NEWS

100

68. GODIŠNJA SKUPŠTINA MEĐUNARODNOG INSTITUTA ZA ZAVARIVANJE I MEĐUNARODNA
KONFERENCIJA

125

IN MEMORIAM – RADOJEVIĆ ZORAN

126

IN MEMORIAM – ŠIPEK MATEVŽ MITJA

135

TREĆI ZAVARIVAČKI KONGRES MEĐUNARODNOG INSTITUTA ZA ZAVARIVANJE ZEMALJA JUGOISTOČNE
EVROPE

143

68. GODIŠNJA SKUPŠTINA MEĐUNARODNOG INSTITUTA ZA ZAVARIVANJE I MEĐUNARODNA
KONFERENCIJA - NASTAVAK

144

MARKETING

Poštovani čitaoci,

posle vrelog leta koje nam nije dozvolilo značajniji predah, vraćamo se našim aktivnostima. Predviđena su dva veoma zanimljiva događaja:

- u oktobru treba da bude održan seminar vezan za predstavljanje mogućnosti obrazovanja iz oblasti koja spada u delokrug našeg rada ali kojom se većina ne bavi, a to je lepljenje;**
- u novembru treba da bude održano takmičenje mladih zavarivača, ali će se malo razlikovati od prethodnog, počevši od mesta održavanja do ciljne grupe.**

Za obe ove manifestacije, članovi će biti obavješteni i pozvani da učestvuju.

Sadržaj ovoga broja se donekle razlikuje od prethodnih, jer je deo radova koje sada objavljujemo, vezan za druge oblasti koje se, svakako, dodiruju sa zavarivanjem.

Pored toga, u rubrici –Vesti imaćete priliku da pročitate izveštaje sa međunarodnih skupova: regionalnog kongresa, održanog u Temišvaru, Rumunija i godišnje skupštine IIW, održane u Helsinkiju, Finska.

Objektivno očekujući da će neuobičajeni meteorološki uslovi (ove godine toplo i suvo) potrajati, očekujemo da će ovo biti prava vruća jesen sa aspekta naših aktivnosti.

Do sledećeg susreta.

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



68. GODIŠNJA SKUPŠTINA MEĐUNARODNOG INSTITUTA ZA ZAVARIVANJE I MEĐUNARODNA KONFERENCIJA

Helsinki, Finska, 28.jun – 03. Jul 2015. godine

U organizaciji Finske asocijacije za zavarivanje održana je 68. godišnja skupština međunarodnog instituta za zavarivanje i Međunarodna konferencija po temi 'Materijali visoke čvrstoće – izazovi i primena' i izložbe opreme za zavarivanje. Ova manifestacija je održana u periodu od 28. juna do 03. jula 2015. godine u Helsinkiju.

U radu Godišnje skupštine IIW učestvovalo je više od 700 učesnika iz 52 zemlje u svojstvu delegata, eksperata ili posmatrača u tehničkim Komisijama, članova radnih grupa - podkomisija, studijskih grupa, tehničkih komiteta i drugih tela. Najbrojnije delegacije, pored domaćina i Švedske, bile su Nemačka, Kina, Japan, SAD ... Korektna organizacija na visokom profesionalnom nivou je bila karakteristika i ove godišnje skupštine čemu su i brojni volonteri kao i impozantan broj sponzora: KEMPPI (platinijumski sponzor), EWM, KISWEL, TAMPEREEN MESSUT, TWO, POSIVA, ARCHTECH, SSAB, PEMA, MEYER TURKU, i drugi.



AKTIVNOSTI IIW RADNIH JEDINICA

- Generalna skupština

Generalna skupština IIW je održana 28. juna 2015.g. uz prisustvo delegata ili delegacija iz 43 zemalja članica IIW. Na Skupštinskoj sednici su usvojeni izveštaji o radu svih tela IIW, donete rezolucije o daljnjim aktivnostima, usvojen finansijski izvštaj i plan budžeta za sledeću godinu.

Usvojen je kalendar i potvrđeno da će organizatori narednih skupština biti Australija – 2016., Kina 2017. i Turska za organizaciju 71. godišnje skupštine 2018.godine. U vezi sa odlukom da se organizacija 71. Godišnje skupštine dodeli Turskoj, umesto Rusiji koja je bila evidentirana kao jedini kandidat na prethodnom zasedanju Godišnje skupštine, ostalo je nejasno kako je došlo do toga. Naime, Bord Direktora je predložio i većina zemalja je prihvatila da se Rusija ne pojavi ni kao predlog na glasanju. Ostao je mučan utisak da je i ovde politika prevladala struku.

Organizacija 72. Godišnje skupštine koja će se održati 2019. godine je dodeljena Slovačkoj. Kuriozitet je bio da se kao kandidat za organizaciju, pored Slovačke, prijavio i Singapur, ali je taj predlog odbijen od strane Borda direktora sa obrazloženjem da je Singapur bio organizator "skoro" (2009 godine).

Simptomatično je da je, samo nekoliko minuta pre te odluke, organizacija 71. Skupštine za 2018.godinu dodeljena Turskoj koja je bila organizator Godišnje skupštine "davne" 2010. godine. Za 2017. godinu je predviđen jedan regionalni IIW Kongres koji će se održati 7-9. decembra u Chennai, Indija. Na ceremoniji otvranja Skupštine dodeljene su i nagrade IIW.

- Radne jedinice IIW

Radne jedinice IIW čine 16 tehničkih Komisija, 7 podkomisija (Fizika zavarivanja, Strategija istraživanja i saradnje u zavarivanju, Spajanje i zaštita u vazduhoplovstvu, Automobilski i drumski transport, Brodogradnja, Rukovođenje kvalitetom u zavarivanju i srodnim postupcima, Istraživanje i razvoj mikro i nano tehnologija spajanja), 3 radne grupe (Regionalna saradnja, Standardizacija i komunikacija i marketing), Tehnički komitet i Međunarodno telo za ovlašćivanje (IAB) sa dve radne grupe i to: Grupa A – Obrazovanje, obuka i kvalifikacija i Grupa B – Implementacija i ovlašćivanje. Sastanci tehničkih komisija su održani tokom tri dana, od 29. juna do 01. jula. Na njima su razmatrani stručni materijali – dokumenti IIW. Izabrani dokumenti IIW su predloženi da se objave u časopisu "Welding in the world". Održani su i sastanci svih ostalih radnih jedinica i doneti odgovarajući zaključci.

Nastavak na strani 143



Bore V. Jegdić, Biljana M. Bobić

PITTING CORROSION TESTING OF STAINLESS STEEL AISI 304 IN CHLORIDE SOLUTIONS

ISPITIVANJE PITING KOROZIJE NERĐAJUĆEG ČELIKA AISI 304 U RASTVORIMA HLORIDA

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK / UDC: 620.193.4:669.14.018.841

Rad primljen / Paper received:

Jul 2015.

Key words: stainless steels, welded joint, pitting corrosion, pitting potential, critical pitting temperature

Adresa autora / Author's address:

**Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju, IHTM, Centar za elektrohemiju, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija*

Institute of Chemistry, Technology and Metallurgy, IHTM, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

Ključne reči: nerđajući čelici, zavareni spoj, piting korozija, piting potencijal, kritična temperatura pitinga

Abstract

Stainless steels and their welded joints are often susceptible to pitting corrosion in solutions containing chloride ions. Testing of pitting corrosion of stainless steels is performed using chemical and electrochemical methods. In this work pitting corrosion of the stainless steel AISI 304 was tested in chloride solutions, without the presence and in the presence of sulphate or nitrate ions. The tests were performed in order to determine the efficiency of these ions to prevent pitting corrosion, as well as to present the capabilities of the methods applied. Electrochemical methods were used to determine the value of pitting potential (E_{pit}) and the critical pitting temperature (T_{pit}). The values of these parameters represent a measure of the resistance of stainless steels and their welded joints to pitting corrosion.

INTRODUCTION

The corrosion resistance of stainless steels and their welded joints is caused by the formation of a thin, adherent passive film on the steel surface, which separates the steel from the corrosive environment. The degree of protection afforded by the passive film depends on its thickness, continuity, coherence and adhesion to the metal. The stainless steels and their welded joints are prone to some forms of localized corrosion such as pitting corrosion, crevice corrosion, intergranular corrosion and stress corrosion cracking. The presence of halide ions (eg. in aqueous NaCl solutions), can cause degradation of compact passive film and pit formation [1,2].

Izvod

Nerđajući čelici i njihovi zavareni spojevi često podležu piting koroziji u rastvorima koji sadrže hloridne jone. Ispitivanje piting korozije nerđajućih čelika se vrši primenom hemijskih i elektrohemijskih metoda. U ovom radu vršeno je ispitivanje piting korozije nerđajućeg čelika AISI 304 u rastvoru hlorida, bez prisustva i u prisustvu sulfatnih, odnosno nitratnih jona. Ispitivanja su izvedena u cilju određivanja efikasnosti navedenih jona u sprečavanju piting korozije, kao i prezentacije mogućnosti primenjenih metoda. Korišćene su elektrohemijske metode za određivanje piting potencijala (E_{pit}) i određivanje kritične temperature pitinga (T_{pit}). Vrednosti navedenih parametara predstavljaju merilo otpornosti nerđajućih čelika i njihovih zavarenih spojeva prema piting koroziji.

UVOD

Otpornost nerđajućih čelika i njihovih zavarenih spojeva prema koroziji je posledica formiranja tankog, adherentnog pasivnog filma na površini čelika, koji razdvaja čelik od korozione sredine. Step en zaštite koju pruža pasivni film zavisi od njegove debljine, kontinuiteta, koherentnosti i adhezije za metal. Nerđajući čelici i njihovi zavareni spojevi su skloni nekim vidovima lokalne korozije kao što su piting, korozija u zazorima, interkristalna i naponska korozija. U prisustvu halogenih jona (npr. u vodenim rastvorima NaCl), može doći do narušavanja kompaktnosti pasivnog filma i obrazovanja pitova [1,2].



The destruction of the passive film in the presence of NaCl takes place locally, in places where the structure or thickness of the passive film is disturbed. In these places, the pit formation occurs [1]. In the case of welded joints pits are often formed in places with a specific microstructure.

Pits are easier to form in places of metallurgical heterogeneity. For example, pits are formed in chromium depleted areas in the austenitic stainless steels heated to a sensitization temperature. Pits can also be formed at the interface austenite-ferrite in welded joints of stainless steels.

The probability of pits formation in weld metal is large, because of the existence of microsegregations in the dendritic structure. Today, the welding consumables that have a higher resistance to pitting corrosion than the base metal are produced [3]. In stainless steels pits formation takes place almost exclusively in places of MnS inclusions. There is a certain correlation between the resistance to pitting corrosion and the size of MnS inclusions. With the reduction in the size of MnS inclusions (below $\sim 1 \mu\text{m}$), significantly increases the resistance of stainless steels to pitting [4].

Therefore, the most important conditions for the formation of pits are: chemical composition and structural properties of welded joints of stainless steels, pitting potential and the presence of chloride ions in a test solution [1].

During formation of pits the electrochemical corrosion cell is formed between the passive metal surface and active metal (on the bottom of the pit). The presence of Cl^- ions prevents the repassivation of the metal surface on the bottom of the pit, which is rapidly dissolved. During the hydrolysis of the metal ion at the bottom of the pit there is a decrease of pH value ($\text{pH} = 2$ to 3), Figure 1. The potential difference between the passive metal surface, which acts as a cathode, and the bottom of the pit, which is active, is up to 200 mV [5].

Razaranje pasivnog filma u prisustvu NaCl se odvija lokalno, na mestima gde je narušena struktura ili debljina pasivnog filma. Na tim mestima dolazi do obrazovanja pitova [1]. U slučaju zavarenih spojeva pitovi se često obrazuju na mestima sa određenom mikrostrukturom. Pitovi se lakše obrazuju na mestima metalurške heterogenosti metala. Na primer, hromom osiromašene oblasti, koje nastaju kada se austenitni nerđajući čelik zagreva do temperature na kojoj se odvija senzibilizacija, su podložne pitingu [3]. Pitovi takođe mogu da se obrazuju na granicama faza austenit-ferit u zavarenim spojevima nerđajućih čelika. Verovatnoća obrazovanja pitova u metalu šava je velika, zbog postojanja mikrosegrecija u dendritnoj strukturi. Danas se proizvode dodatni materijali za zavarivanje koji imaju veću otpornost prema piting koroziji nego osnovni metal [3]. Kod nerđajućih čelika obrazovanje pitova se odvija skoro isključivo na mestima MnS uključaka. Postoji određena korelacija između otpornosti prema piting koroziji i veličine MnS uključaka. Sa smanjenjem veličine MnS uključka (ispod $\sim 1 \mu\text{m}$), znatno se povećava otpornost nerđajućeg čelika prema piting koroziji [4].

Prema tome, najvažniji uslovi za formiranje pitova su: sastav i strukturne osobine zavarenog spoja od nerđajućeg čelika, piting potencijal i prisustvo hloridnih jona u rastvoru [1].

Pri obrazovanju pita nastaje elektrohemijski korozioni spreg između pasivne površine metala i aktivne površine na dnu pita. Prisustvo Cl^- jona onemogućava repasivaciju površine metala na dnu pita, koja se zato ubrzano anodno rastvara. Tokom hidrolize metalnih jona na dnu pita dolazi do smanjenja pH vrednosti ($\text{pH} = 2$ do 3), slika 1. Razlika potencijala između pasivne površine, koja se ponaša katodno, i dna pita, koje se aktivno anodno rastvara iznosi do 200 mV [5].

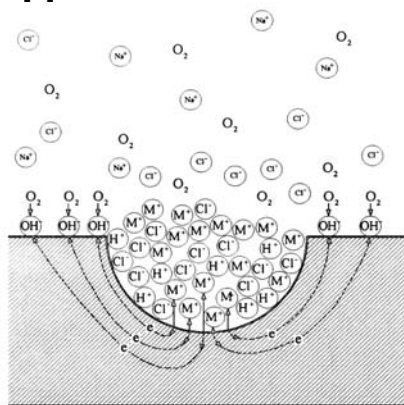


Figure 1. Formation and growth of pits [1].
Slika 1. Obrazovanje i rast pitova [1].



With increase in temperature the tendency of stainless steels and their welded joints to pits formation increases. Stable pits on stainless steels will not be formed if the temperature is below some critical value, called the critical pitting temperature, T_{pit} . The great influence of temperature on pitting corrosion led to the development of non electrochemical and electrochemical methods for the determination of the critical pitting temperature. On the basis of the T_{pit} value it is possible to rank stainless steels and their welded joints according to their resistance to pitting corrosion [6]. Unlike the pitting potential, which is determined as a potential range, T_{pit} value can be estimated more precisely (with a tolerance of 1 to 2 °C) [7].

ASTM standard G 48 prescribes the methods for determination of the pitting resistance of stainless steels in a solution of iron (III) chloride. The method A consists of the immersion of test samples in 6 wt.% $FeCl_3$ during a specified time. The method C is intended for the determination of the critical pitting temperature. It is carried out in an acidified solution of $FeCl_3$ (6 wt.% $FeCl_3$ + 1 wt.% HCl). The increase in temperature is performed in increments of 5 °C, in the temperature range of 0 °C to 85 °C. The temperature at which pits are formed is considered to be the critical pitting temperature, T_{pit} . These methods can be used to determine the influence of alloying elements, heat treatment and surface treatment, on the resistance of stainless steels to pitting corrosion.

The Nordic Innovation Centre has developed a method of testing the resistance to pitting corrosion for welded joints of stainless steels, based on ASTM standard G48 [8]. ASTM standard G 61 describes the procedure for performing electrochemical measurements, in order to determine the resistance of stainless steels to local forms of corrosion (pitting and crevice corrosion). In addition to pitting potential values (E_{pit}), it is possible to determine the value of the protection potential (E_{prot}) when the pits stop growing.

ASTM standard G 150 describes the procedure for assessing the resistance of stainless steels to pitting corrosion, which is based on electrochemical determination of T_{pit} . The increase in temperature is carried out gradually, from 0 °C, at a rate of 1 °C min^{-1} , with simultaneous registration of the current density on the test sample. The sharp rise in electrical current at a certain temperature indicates that a stable pits growth has started. The temperature at which the current density reaches a value greater than 100 $\mu A cm^{-2}$ is considered to be the critical pitting temperature, T_{pit} .

Sa povećanjem temperature raste sklonost nerđajućih čelika i njihovih zavarenih spojeva prema obrazovanju pitova. Do obrazovanja stabilnih pitova na nerđajućem čeliku neće doći ukoliko je temperatura niža od neke kritične vrednosti koja se naziva kritična temperatura pitinga, T_{pit} . Veliki uticaj temperature na piting koroziju doveo je do razvoja neelektrohemijskih i elektrohemijskih metoda za određivanje kritične temperature pri kojoj dolazi do obrazovanja pitova. Na osnovu vrednosti T_{pit} moguće je rangirati nerđajuće čelike i njihove zavarene spojeve u pogledu otpornosti prema piting koroziji [6]. Za razliku od piting potencijala E_{pit} , koji se određuje kao oblast potencijala, T_{pit} se može znatno preciznije odrediti (sa odstupanjem od 1 do 2 °C) [7].

Standard ASTM G 48 obuhvata postupke za određivanje otpornosti prema pitingu nerđajućih čelika u rastvoru gvožđe (III) hlorida. Postupak A se sastoji u potapanju uzoraka u 6 % $FeCl_3$ u toku određenog vremena i koristi se za određivanje otpornosti prema piting koroziji. Postupak C je namenjen za određivanje kritične temperature pitinga. Izvodi se u zakiseljenom rastvoru $FeCl_3$ (6 % $FeCl_3$ + 1 % HCl). Povećanje temperature vrši se u inkrementima od 5 °C, u temperaturnom intervalu od 0 °C do 85 °C. Temperatura na kojoj dolazi do obrazovanja pitova smatra se kritičnom temperaturom pitinga T_{pit} . Navedeni postupci se mogu koristiti za određivanje uticaja legirajućih elemenata, termičke obrade, kao i površinske obrade, na otpornost nerđajućih čelika prema pitingu.

Nordijski inovacioni centar je razradio postupak za ispitivanje otpornosti prema pitingu zavarenih spojeva nerđajućih čelika, na osnovu standarda ASTM G 48 [8]. Standard ASTM G 61 opisuje postupak za izvođenje elektrohemijskih merenja, u cilju određivanja otpornosti nerđajućih čelika prema lokalnim vidovima korozije (piting i korozija u zazorima). Pored vrednosti piting potencijala (E_{pit}), moguće je odrediti i vrednost zaštitnog potencijala (E_{prot}), kada pitovi prestaju da rastu.

Standard ASTM G 150 opisuje postupak za procenu otpornosti nerđajućih čelika prema piting koroziji, koji je zasnovan na elektrohemijskom određivanju T_{pit} . Povećanje temperature vrši se od 0 °C, postepeno, brzinom od 1 °C min^{-1} , uz istovremeno registrovanje gustine struje na uzorku. Nagli porast struje pri određenoj temperaturi ukazuje da je došlo do stabilnog rasta pitova. Temperatura pri kojoj gustina struje dostigne vrednost veću od 100 $\mu A cm^{-2}$ smatra se kritičnom temperaturom pitinga, T_{pit} .



Pitting corrosion can be prevented if the ions, which hinder the adsorption of Cl^- ions or displace them from the surface of the stainless steel, are present in the solution. The addition of substances such as NaNO_3 , Na_2SO_4 , etc. [9,10] in a solution containing chloride ions shifts the pitting potential in the anodic direction and makes a stainless steel more resistant to pitting corrosion.

EXPERIMENTAL

The pitting resistance of AISI 304 stainless steel was tested by electrochemical determination of E_{pit} and T_{pit} [11,12].

Working electrodes made of AISI 304 stainless steel, in the shape of a disc, with a surface of 1.13 cm^2 were prepared in the usual way: fine grinding, degreasing in ethanol and rinsing in distilled water.

Tests were carried out in a solution of 0.2 M NaCl , with and without the addition of sulfate or nitrate ions at a temperature of 25°C . The working electrode was placed in an electrochemical cell with a reference electrode (saturated calomel electrode, SCE) and an auxiliary electrode (Pt foil).

After establishing a stable corrosion potential (E_{corr}) anodic polarization curves were recorded until the current density reaches the value of $5000 \mu\text{A cm}^{-2}$. The applied scan rate was 1 mV s^{-1} . In some cases, after reaching the value of $5000 \mu\text{A cm}^{-2}$, the polarisation curves were recorded in the backward direction, Figure 2. The potential value corresponding to the current density of $10 \mu\text{A cm}^{-2}$ represents the E_{pit} (on the polarization curve, recorded in the anodic direction), or the E_{prot} (on the curve in the backward direction). At potentials more positive than the E_{pit} the pits were formed which continue to grow stably. In the potential range between E_{pit} and E_{prot} the formation of new pits did not occur, but the existing pits continue to grow. At potentials more negative than E_{prot} the growth of formed pits is stopped.

Piting korozija se može sprečiti ukoliko su u rastvoru prisutni joni koji otežavaju adsorpciju Cl^- jona, ili ih istiskuju sa površine metala. Dodavanje supstanci koji sadrže ove jone (na primer NaNO_3 , Na_2SO_4 itd.) [9,10] u rastvor koji sadrži hloride pomera piting potencijal u anodnu oblast i čini nerđajući čelik otpornijim prema piting koroziji.

EKSPERIMENTALNI DEO

Ispitana je otpornost nerđajućeg čelika AISI 304 prema piting koroziji na osnovu elektrohemijskog određivanja piting potencijala E_{pit} i kritične temperature pitinga T_{pit} [11,12]. Radne elektrode od nerđajućeg čelika AISI 304, izrađene u obliku diska površine $1,13 \text{ cm}^2$, pripremljene su na uobičajen način: fino brušenje, odmaščivanje u etanolu i ispiranje u destilovanoj vodi.

Ispitivanja su vršena u rastvoru $0,2 \text{ M NaCl}$, bez i sa dodatkom sulfata, odnosno nitrata, na temperaturi od 25°C . U elektrohemijsku ćeliju je postavljena referentna (zasićena kalomelova elektroda, ZKE) i pomoćna elektroda (Pt folija). Po uspostavljanju stabilnog korozionog potencijala (E_{kor}) snimljene su anodne krive polarizacije dok se ne dostigne gustina struje od $5000 \mu\text{A cm}^{-2}$. Brzina promene potencijala je bila 1 mV s^{-1} . U nekim slučajevima, posle dostizanja struje od $5000 \mu\text{A cm}^{-2}$, vršeno je registrovanje krivih polarizacije u povratnom smeru, slika 2.

Vrednost potencijala koja odgovara gustini struje od $10 \mu\text{A cm}^{-2}$ predstavlja E_{pit} (na krivoj polarizacije snimljenoj u anodnom smeru), odnosno E_{prot} (na krivoj u povratnom smeru). Na potencijalima pozitivnijim od E_{pit} obrazuju se pitovi, koji dalje stabilno rastu. U oblasti između E_{pit} i E_{prot} ne dolazi do obrazovanja novih pitova, već do rasta postojećih. Pri potencijalima negativnijim od E_{prot} zaustavlja se rast obrazovanih pitova.

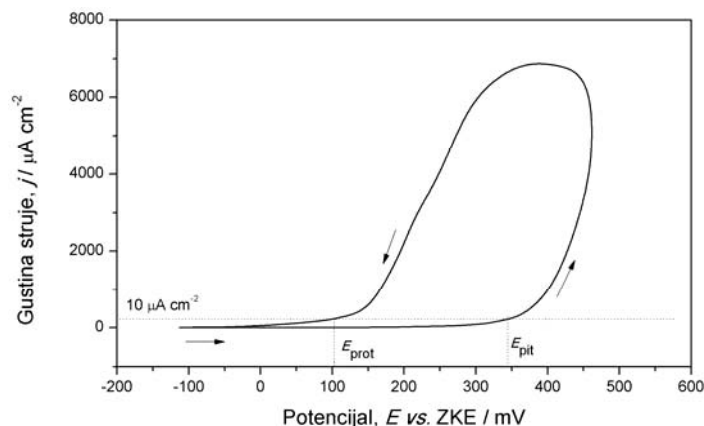


Figure 2. Determination of E_{pit} and E_{prot} for stainless steel AISI 304 in 0.2 M NaCl .

Slika 2. Postupak određivanja E_{pit} i E_{prot} za nerđajući čelik AISI 304 u $0,2 \text{ M NaCl}$.



Potentiodynamic polarization curves for the examined stainless steel are shown in Figure 3. The curves were obtained in 0.2 M NaCl, with no sulfate ions and in 0.2 M NaCl with different content of sulfate ions. It can be seen that the value of the E_{pit} is the lowest in 0.2 M NaCl and grows in the presence of SO_4^{2-} ions.

Na slici 3 prikazane su potenciodinamičke krive polarizacije za ispitivan nerđajući čelik, dobijene u 0,2 M NaCl, bez sulfata i u 0,2 M NaCl sa različitim sadržajem sulfata. Sa slike se vidi da je vrednost E_{pit} najniža u 0,2 M NaCl i da raste u prisustvu SO_4^{2-} jona.

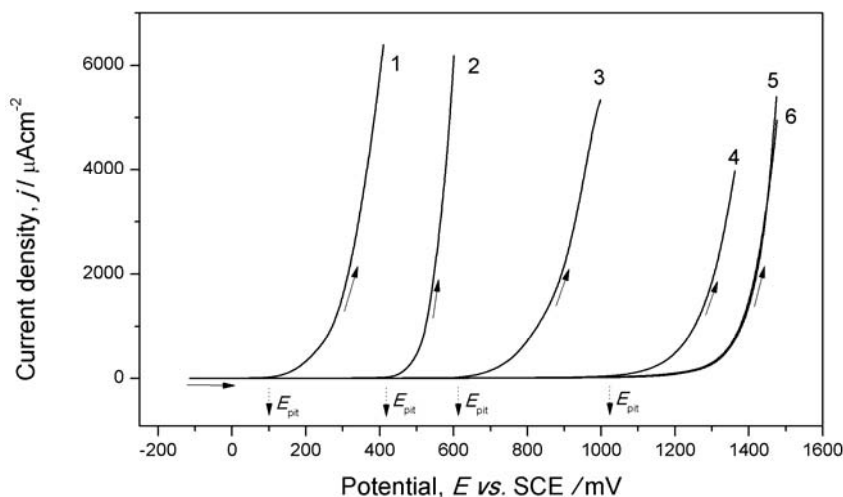


Figure 3. Anodic polarization curves for stainless steel AISI 304 in 0.2 M NaCl: (1) without sulfate ions, and with (2) 0.05M (3) 0.1M (4) 0.25M (5) 0.5M i (6) 0.75M Na_2SO_4 , respectively.

Slika 3. Anodne krive polarizacije za nerđajući čelik AISI 304 u 0,2 M NaCl: (1) bez sulfata, i sa (2) 0,05M (3) 0,1M (4) 0,25M (5) 0,5M i (6) 0,75M Na_2SO_4 , respektivno.

Potentiodynamic polarization curves of the examined stainless steel in 0.2 M NaCl with different content of nitrate ions are shown in Figure 4. It can be noticed that the pitting resistance of the tested steel is the lowest in a chloride solution (0.2 M NaCl) which does not contain nitrate ions. With the increase of nitrate ions content in the chloride solution the value of the E_{pit} increases, i.e. the resistance to pitting corrosion increases.

Na slici 4 prikazane su potenciodinamičke krive polarizacije ispitivanog čelika u 0,2 M NaCl sa različitim sadržajem nitrata. Zapaža se da je otpornost ispitivanog čelika prema pitingu najmanja u rastvoru hlorida (0,2 M NaCl) koji ne sadrži nitrate. Sa povećanjem sadržaja nitrata u rastvoru hlorida povećava se vrednost E_{pit} , odnosno otpornost prema pitingu koroziji.

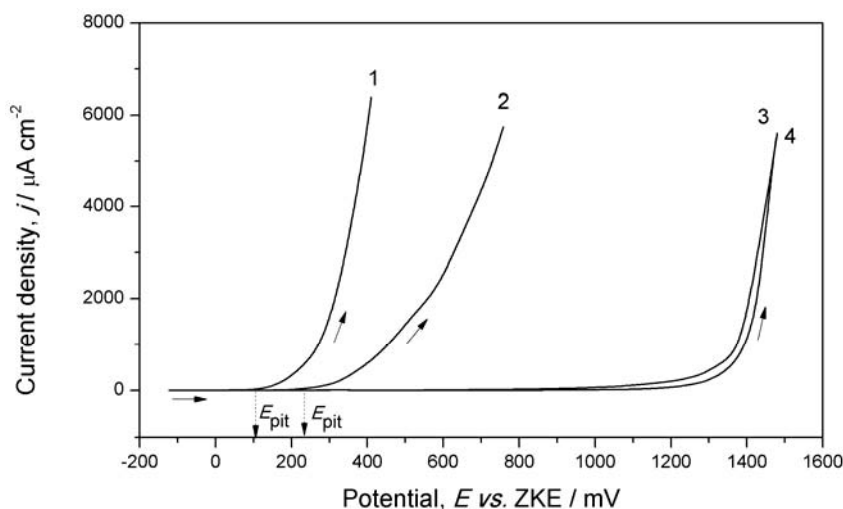


Figure 4. Anodic polarization curves for stainless steel AISI 304 in 0.2 M NaCl: (1) without nitrate ions, and with (2) 0.01M (3) 0.02M (4) 0.1 M $NaNO_3$, respectively.

Slika 4. Anodne krive polarizacije za nerđajući čelik AISI 304 u 0,2 M NaCl: (1) bez nitrata (2) 0,01M (3) 0,02M i (4) 0,1M $NaNO_3$, respektivno.



Testing of critical pitting temperature was performed in 0.2 M NaCl, with and without the addition of nitrate or sulfate ions [11,12]. To maintain the necessary operating temperature during the test a thermostat was used. The electrochemical cell contains a working electrode (stainless steel 304), a reference electrode (SCE) and an auxiliary electrode (Pt foil). Simultaneously with the heating of the test solution, changes in the current of the test sample (working electrode) were recorded. The temperature at which the current density on the sample was greater than $100 \mu\text{A cm}^{-2}$, was considered as the critical pitting temperature. The appropriate dependencies are shown in Figure 5.

The testing results of critical pitting temperature also show the less pitting resistance of the stainless steel AISI 304 in chloride solutions which do not contain nitrate or sulfate ions.

Ispitivanja kritične temperature pitinga su vršena u 0,2 M NaCl, bez i sa dodatkom nitrata, odnosno sulfata [11,12]. Za održavanje potrebne radne temperature u toku ispitivanja korišćen je termostat. U elektrohemiju ćeliju je postavljena radna elektroda (nerđajući čelik 304), referentna (ZKE) i pomoćna elektroda (Pt). Istovremeno sa zagrevanjem sistema vršeno je registrovanje promene struje na uzorku (radna elektroda). Temperatura pri kojoj je gustina struje na uzorku bila veća od $100 \mu\text{A cm}^{-2}$, smatrana je kritičnom temperaturom pitinga. Na slici 5 prikazane su odgovarajuće zavisnosti dobijene u 0,2 M NaCl i u istom rastvoru u prisustvu sulfata, odnosno nitrata. Rezultati ispitivanja kritične temperature pitinga takođe pokazuju daleko manju otpornost nerđajućeg čelika AISI 304 prema piting koroziji u rastvoru hlorida koji ne sadrži nitrata, odnosno sulfata.

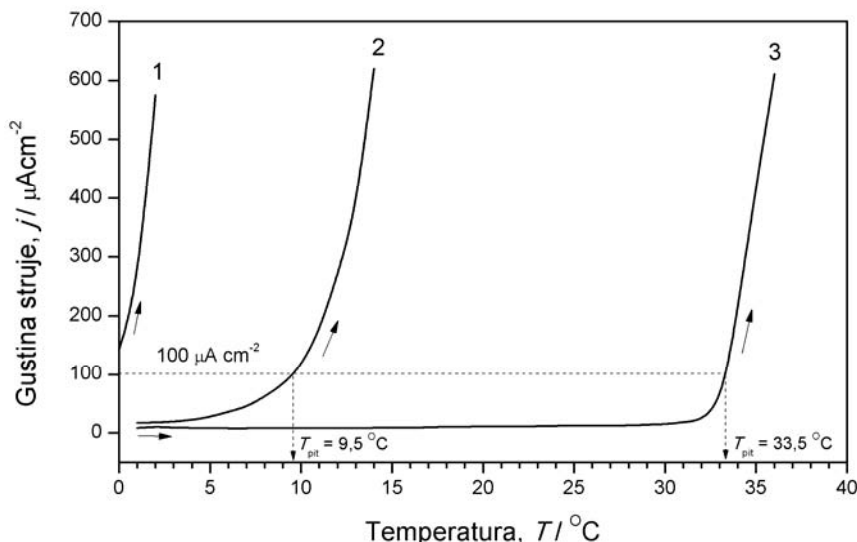


Figure 5. Determination of T_{pit} for stainless steel AISI 304 in: (1) 0.2M NaCl (2) 0.2M NaCl + 0.1 M Na_2SO_4 (3) 0.2M NaCl + 0.02 M NaNO_3 .

Slika 5. Kritična T_{pit} za nerđajući čelik AISI 304 u rastvoru (1) 0,2M NaCl (2) 0,2M NaCl + 0,1 M Na_2SO_4 (3) 0,2M NaCl + 0,02 M NaNO_3 .

DISCUSSION OF RESULTS

Comparison of the results obtained (Figures 3 and 4) clearly shows that the resistance of AISI 304 stainless steel to pitting corrosion is the lowest in a solution of 0.2 M NaCl. The resistance to this type of corrosion increases if the SO_4^{2-} or NO_3^- ions are present in the chloride solution. These ions hinder the adsorption of Cl^- ions, or displace them from the surface of the stainless steel. At a sufficiently high concentration of NO_3^- or SO_4^{2-} ions in the chloride solution, the stainless steel AISI 304 becomes completely resistant to pitting corrosion (Figures 3 and 4). This is achieved when the ratio of the concentration of these ions and the concentration of Cl^- ions is greater than 5, in the case of

ANALIZA I DISKUSIJA REZULTATA

Upoređivanjem dobijenih rezultata (slike 3 i 4) jasno se uočava da je otpornost nerđajućeg čelika AISI 304 prema piting koroziji najmanja u rastvoru 0,2 M NaCl. Otpornost prema ovom vidu korozije se povećava ukoliko su u rastvoru hlorida prisutni joni (SO_4^{2-} i NO_3^- joni), koji otežavaju adsorpciju Cl^- jona, ili ih istiskuju sa površine metala. Pri dovoljno visokoj koncentraciji jona NO_3^- ili SO_4^{2-} u rastvoru hlorida, nerđajući čelik AISI 304 postaje potpuno otporan prema piting koroziji (slike 3 i 4). To se postiže kada je odnos koncentracija navedenih jona i koncentracije Cl^- jona veći od 5, u slučaju sulfata, odnosno veći od 0,1 u slučaju nitrata. To pokazuje da su NO_3^- joni znatno efikasniji i sprečavaju piting



sulphates, or greater than 0,1 in the case of nitrates. This shows that NO_3^- ions are more efficient in preventing pitting corrosion of stainless steels in chloride solutions, which is in accordance with [10,13]. The values for the critical pitting temperature, T_{pit} (Figure 5) in chloride solutions, without the presence and in the presence of sulfate or nitrate ions, indicate less resistance of the tested stainless steel to pitting corrosion in chloride solutions which do not contain any nitrates or sulfates. The value of T_{pit} in chloride solutions containing nitrates is considerably higher than the value of T_{pit} in solutions containing sulfates. This shows that NO_3^- ions are significantly more effective inhibitors of pitting corrosion of stainless steels than SO_4^{2-} ions.

The results of testing T_{pit} indicate the adverse influence of increasing temperature on the formation of pits. For example the tested stainless steel AISI 304 is almost completely resistant to pitting corrosion in a solution of 0.2 M NaCl + 0.02 M NaNO_3 at 25 °C. However, during testing of T_{pit} in the same solution, the formation of pits starts at the temperature of ~ 33 °C.

CONCLUSIONS

Based on the results presented the following conclusions can be drawn:

The resistance of the stainless steel AISI 304 to pitting corrosion is the lowest in chloride solutions without sulphate or nitrate ions, as indicated by the lowest values of the E_{pit} and T_{pit} .

The resistance to pitting corrosion increases with the addition of NaNO_3 or Na_2SO_4 in chloride solutions.

NO_3^- ions are much more effective inhibitors of pitting corrosion than SO_4^{2-} ions, considering that a significantly lower concentrations of NO_3^- ions is necessary to achieve a complete resistance of stainless steels to pitting corrosion.

The applied electrochemical methods for determining E_{pit} and T_{pit} enable studying the influence of different factors as temperature, chemical composition of the corrosive environment, etc. on the resistance of stainless steels and their welded joints to pitting corrosion.

Acknowledgement

This work was co-financed from the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia through projects TR 34028 and TR 34016.

korozije nerđajućeg čelika u rastvorima hlorida, što je u skladu sa [10,13].

Vrednosti za kritičnu T_{pit} (slika 5) u rastvoru hlorida, bez prisustva i u prisustvu sulfata, odnosno nitrata, ukazuju na daleko manju otpornost ispitivanog čelika prema pitingu u rastvoru hlorida koji ne sadrži nitrata, odnosno sulfata. Takođe, vrednost T_{pit} u rastvoru hlorida koji sadrži nitrata je znatno veća nego vrednost T_{pit} u rastvoru koji sadrži sulfata. To pokazuje da su NO_3^- joni znatno efikasniji inhibitori piting korozije nerđajućih čelika nego SO_4^{2-} joni.

Rezultati ispitivanja T_{pit} ukazuju na nepovoljan uticaj povećanja temperature na obrazovanje pitova. Npr. ispitivani nerđajući čelik AISI 304 je praktično potpuno otporan prema piting koroziji u rastvoru 0,2 M NaCl + 0,02 M NaNO_3 , na 25 °C. Međutim, tokom ispitivanja T_{pit} , u istom rastvoru, na istom čeliku dolazi do obrazovanja pitova na temperaturi ~ 33 °C.

ZAKLJUČCI

Na osnovu izvršenih ispitivanja piting korozije nerđajućeg čelika AISI 304 u rastvorima hlorida bez prisustva i u prisustvu sulfata, odnosno nitrata, može se zaključiti:

Otpornost prema piting koroziji je najmanja u rastvoru hlorida koji ne sadrži sulfatne ili nitrata jone, na šta ukazuju najniže vrednosti E_{pit} i T_{pit} .

Otpornost prema piting koroziji se povećava sa dodatkom NaNO_3 , odnosno Na_2SO_4 u rastvor hlorida.

NO_3^- joni su znatno efikasniji inhibitori piting korozije nerđajućeg čelika nego SO_4^{2-} joni, s obzirom da je za postizanje potpune otpornosti prema piting koroziji potrebna znatno manja koncentracija NO_3^- jona.

Primenjene metode određivanja E_{pit} i T_{pit} omogućavaju ispitivanje uticaja različitih faktora (temperatura, sastav korozione sredine itd.) na otpornost nerđajućih čelika i njihovih zavarenih spojeva prema piting koroziji.

Zahvalnica

Rad je finansiran od strane Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije, kroz projekte TR 34028 i TR 34016.



LITERATURA

1. G.S. Frankel, "Pitting Corrosion" in ASM Handbook, Volume 13A: *Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection*, Vol 13A, ASM Handbook, ASM International, 2003, p 236–241.
2. M. A. Streicher, "Austenitic and Ferritic Stainless Steels" in Uhlig's Corrosion Handbook, Second Edition, Ed. by R. W. Revie, 2000., p. 601 – 650.
3. Corrosion of Stainless Steel Weldments, *Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection*, Vol 13A, ASM Handbook, ASM International, 2003, p 301–316
4. H. Bohni, "Localized Corrosion of Passive Metals", in Uhlig's Corrosion Handbook, Second Edition, Ed. by R. W. Revie, 2000., p. 173 – 190.
5. D. Dražić and B. Jegdić, "Corrosion and Stress Corrosion Cracking", IFMASS8, Belgrade, 2003.
6. J. B. Lee, J. H. Shin, D. U. Shin and D. M. Lee, "Critical Pitting Temperatures for Stainless Steels Measured by Immersion, Potentiostatic and Potentiodynamic Polarization Methods", International Society of Electrochemistry - 55th Annual Meeting, Thessaloniki, 19 – 24 September, 2004.
7. M. H. Moayed, N. J. Laycock and R. C. Newman, "Dependence of the Critical Pitting Temperature on Surface Roughness", Corrosion Science, Vol. 45, 2003., p. 1203 – 1216.
8. TR 548: Improved Method for ASTM G 48 Corrosion Testing of Welds, Nordic Innovation Centre, Oslo, 2004.
9. L. L. Shrier, "Localized Corrosion" in Corrosion, Ed. by L. L. Shreir, Oxford, 2000., p. 1:151 - 1:212.
10. I. L. Rozenfeld, "Inhibitory korrozii", Moskva, 1977.
11. B. Jegdić i B. Bobić, Piting korozija nerđajućih čelika. Deo II: Uticaj nitratnih jona na piting koroziju nerđajućih čelika u rastvoru hlorida, *Zaštita materijala*, Vol.46, Br. 3, Beograd, 2005., 25-30.
12. B. Bobić i B. Jegdić, Piting korozija nerđajućih čelika, Deo III: Uticaj sulfatnih jona na piting koroziju nerđajućih čelika u rastvorima hlorida, *Zaštita materijala*, Vol.47, Br. 2, Beograd, 2006., 17-22.
13. H. H. Uhlig and R.W.Revie, "Corrosion and Corrosion Control. An Introduction to Corrosion Science and Engineering", New York, 2008.



*Miroslav S. Milićević, Tatjana M. Stojanović, Vladimir Stanković, Valentina M. Nejković

COMPUTERS REGULATION HF INDUCTIVE WELDING

RAČUNARSKO VOĐENJE VISOKOFREKVENTNOG INDUKTIVNOG ZAVARIVANJA

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK / UDC: 621.791.77:004

Rad primljen / Paper received:

Jul 2015.

Glavne reči: generator, zavarivanje, tiristor, regulacija, mikroracunar, program, temperatura

Izvod: U radu se projektuje sistem za automatsku regulaciju temperature generatora za induktivno zavarivanje profila. Predlaže se merenje temperatura šava bezkontaktnim putem koristeći osobinu zagrejanih tela da zrače u infracrvenom spektru. Za automatsko upravljanje generatorom projektuje se mikroracunar za rad u realnom vremenu. Rad predstavlja prilog povećanju produktivnosti tehnoloških linija i uvođenju većeg nivoa automatizacije.

1. UVOD

Tehnološke linije za proizvodnju profila su sastavljene od nekoliko sekcija. Izrada počinje pripremnim uvođenjem kotura čelične trake. Radi obezbeđenja kontinuiteta rada, trake se zavaruju na mašini za poprečno zavarivanje. Postoji i akumulator čiji je zadatak da akumulira traku kako bi se proces proizvodnje nesmetano obavljao za vreme dok ulazna sekcija miruje. Na sekciji formiranja, čelične trake se valjcima oblikuju u cev određenog prečnika. Ovako formirana cev se induktivnim putem zavaruje generatorom koji radi na radiofrekvencijama. Posle sekcije za normalizaciju profil se oblikuje na sekciji za kalibrisanje. Leteća testera se nalazi na kraju tehnološke linije i njen zadatak je da odseče profil na unapred izabranu dužinu.

Predmet ovog rada, a na bazi literature [1-26], je obrada i modernizacija generatora za zavarivanje. Generator za zavarivanje se sastoji od tiristorskog mosta snage, transformatora visokog napona, ispravljača, oscilatora, RF transformatora i induktora. Oscilator radi na frekvenciji 450 kHz u klasi C. Snaga se reguliše promenom anodnog

Adresa autora / Author's address:

*Elektronski fakultet u Nišu Email:lavmiro@eunet.rs

Key words: generator, welding, thyristor, regulation, microcomputer, program, temperature

Abstract: In the paper the design of a system for automatic regulation of generator temperature for tube inductive welding. Non contact measurement of weld temperature using the characteristics of heated bodies which radiate in the infrared spectrum is suggested. For automatic generator driving a microcomputer for real time application is designed. The paper contributes to the better production of technological lines as well as the introduction of higher level of automation.

napona kontinualno. Induktor obuhvata cev u čijoj unutrašnjosti su locirani feriti tako da se energija usmerava na liniju šava koju sačinjava elektroprovodna traka. Gustina struje je najveća na površini trake. Snaga generatora za induktivno zavarivanje je nekoliko stotina kW. Kod postojećeg sistema, koji je prvobitno bio instaliran, operator bira brzinu proizvodne linije i snagu generatora za zavarivanje. Kada je fiksirana brzina linije vizuelnim ocenjivanjem zavarenog spoja bira se snaga zavarivanja, što predstavlja nedostatak.

Ispitivanjem profila na pritisak i savijanje otkriva se da je šav lošeg kvaliteta, što je sa zakašnjenjem ustanovljeno te se ne može povratno uticati na kvalitet. Ovim se nameće potreba da se projektuje sistem za automatsku regulaciju temperature šava. Za svaku vrstu čelične trake može se definisati neka optimalna temperatura. Hlađenje ferita se obavlja emulzijom koja odnosi neku količinu toplote. Stoga se mora regulisati temperatura i protok emulzije a za određenu vrstu proizvodnje moraju se fiksirati. Merenjem temperature i njenim regulisanjem, imajući u obzir bilans toplote u zoni zavarivanja, može se upravljati kvalitetom



zavarenog spoja profila. Kvalitetan šav znači da može da izdrži pritisak od 50 bara i u isto vreme da pri savijanju ne popusti. Znajući količinu ulazne i izlazne toplote može se definisati neka optimalna temperatura.

2. REGULACIJA TEMPERATURE GENERATORA ZA ZAVARIVANJE

Da bi se mogla izvršiti regulacija temperature potrebno je izabrati odgovarajući merač. Zbog brzine odziva i brzine proizvodne linije koja je maksimalno moguća u iznosu od 100 m/min primenjeno merenje mora biti bezkontaktno. Pošto je temperatura materijala u zoni zavarivanja veća od ambijentalne dolazi do razmene toplote. Ta razmena se obavlja kondukcijom i elektromagnetnom radijacijom. Elektromagnetna radijacija se nalazi u određenom spektralnom opsegu a zavisi od vrste materijala i temperature na njemu. Jedan deo radijacije obuhvata i infracrveni spektar. Samo infracrveno zračenje se kvalitativno ne razlikuje od elektromagnetskog. Tela na visokoj temperaturi zrače u vidljivom, ultraljubičastom i infracrvenom spektru. Svako telo koje emituje toplotnu energiju zračiće i toplotne zrake čija je talasna dužina zavisna od temperature tela. Vežu zračenja crnog tela i temperature dali su Štefan i Bolcman zakonom čiji je oblik dat sa

$$E_u = \sigma T^4 \quad (1)$$

gde je $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-12} \text{ Wcm}^{-2} \text{ st}^{-4}$.

Bilo koje drugo telo imaće manju emisionu sposobnost od crnog tela, te se ima

$$E = k \sigma T^4 \quad (2)$$

gde k predstavlja faktor emisivnosti površine.

Dokazano je da se postiže maksimum zračenja određene temperature i talasne dužine i da isti

zavisi od same temperature. Ovde važi Vinov zakon pomeranja

$$T \lambda_m = C \quad (3)$$

gde su: T - temperatura u [K], λ_m - talasna dužina a C je konstanta čija vrednost iznosi 2890 [K]. Veza specifične radijacije crnog tela date talasne dužine i temperature definiše se Plankovim zakonom

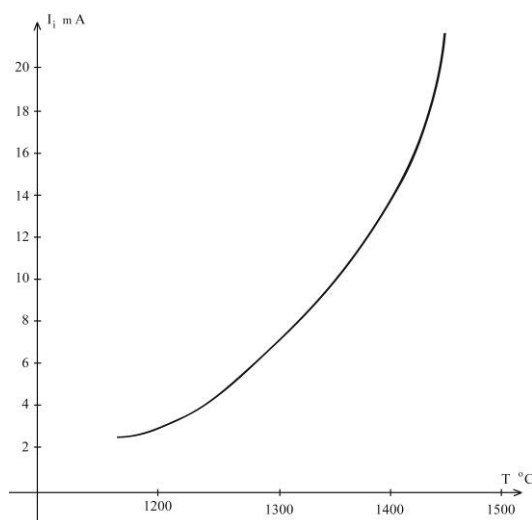
$$E_o = \frac{8\pi \delta^2}{c^3} \frac{h \delta}{e^{kT} - 1} \quad (4)$$

koji je detaljno obrađen u [16].

Možemo zaključiti, ako se zna detektovati energija zračenja znaće se i temperatura zagrejanog tela. Merenje se u paksi zasniva na detekciji zračenja jedne male tačke šav cevi u infracrvenom spektru. Podrobnom analizom i proučavanjem obilne literature, dolazimo do zaključka da izabrani merač temperature koji meri radijaciju spektralnog opsega mora da se nalazi blizu talasne dužine $\lambda = 850 \text{ nm}$.

Na osnovu napred navedenih zapažanja i podataka u [17-25], izabraćemo za merač temperature TMRS-34-M-R čija je brzina odziva 5 ms što zadovoljava naš slučaj. Izlaz ovog pirometra je strujni, u funkciji temperature on je nelinearan kao što to prikazuje slika 1. Strujni izlaz se jednostavno pretvara u naponski, što se kasnije pojačava i vodi na A/D konvertor radi sprežanja sa mikroracunarem. Merna glava poseduje i priključak za vazduh pod pritiskom koji oduvava prašinu, opijlke i isparenja čisteći merno mesto.

Temperatura za zavarivanje će varirati i u funkciji kvaliteta materijala. Zavisno od procentualnog učešća ugljenika u čeličnoj traci, koja se zavaruje induktivnim putem, imaće se različite temperature koje su potrebne.



Slika 1. Zavisnost izlaza pirometra u funkciji temperature



3. PRIMENA MIKRORAČUNARA

Blok dijagram sistema upravljanja je prikazan na slici 2. Uvođenjem glavne povratne sprege postojećem sistemu, koji je radio u otvorenoj povratnoj sprezi, dodaju se pirometar za merenje temperature, mikroračunar, upravljački pult i regulator za fazno upravljanje tiristorima. Tiristorski most snage je vezan u primaru transformatora visokog napona kao što to ilustruje slika 3. Upravljanje tiristorima je fazno. Ispravljač ispravlja visoki napon i kao anodni napon napaja elektronsku cev oscilatora. Oscilator osciluje na frekvenciji 500 kHz a zbog prilagođavanja izlaza oscilatora i induktora upotrebljen je RF transformator čiji je zadatak da izvrši maksimalno prilagođavanje.

Regulisanjem anodnog napona oscilatora induktor se napaja većom ili manjom energijom. Brzina profila se nezavisno od ovog sistema može postaviti između 0 i 100 m/min. Ograničavajući faktor je dimenzija i kvalitet čelične trake odnosno snage generatora za induktivno zavarivanje

Na upravljačkom pultu se nalazi birač temperature i displej za pokazivanje trenutne temperature u procesu zavarivanja. Postoje testeri za uključivanje pumpe rashladnog sistema, napona grejanja elektronske cevi i uključivanja glavnog kontaktora. Pult će biti snabdeven i nizom svetiljki koje će signalizirati pojavu neke od neispravnosti u sistemu, čime se povećava sigurnost i pouzdanost sistema.

Optički pirometar meri temperaturu i šalje podatak koji se preko A/D konvertora prosleđuje mikroračunaru. Na osnovu zadate i stvarne veličine generiše se upravljanje faznom regulatoru. Novoprojektovani fazni regulator ima izgled kao što prikazuje slika 4. Ovom regulacijom je moguće paliti tiristore u opsegu od 0-180 električnih stepeni, a razvijen je korišćenjem iskustva u [12] i [13]. U funkciji poluperioda neizmeničnog napona na izvodu 10 integrisanog kola IC1 generiše se testerast napon po zakonu

$$U_{io} = 6.9196 \cdot 10^7 \cdot \frac{t}{R} \quad (5)$$

Radna tačka se podešava na osnovu upravljanja sa računara i doterivanjem potenciometra od 100 kΩ. Fazni regulator je galvanski totalno odvojen od mreže. Impulsi za paljenje se pojačavaju a onda vode na pobudne elektrode. Za svaku fazu postoji po jedan ovakav regulator. Faznim upravljanjem tiristora podešava se snaga zavarivanja.

Zbog automatskog vođenja procesa, na bazi [1-11] primeniće se mikroračunar. Osnovna konfiguracija sistema je data na slici 2. Mikroračunar prima informaciju sa pirometra o stvarnoj temperaturi a sa upravljačkog pulta o željenoj, te na osnovu njih generiše upravljanje vodeći proces induktivnog zavarivanja čeličnih profila.

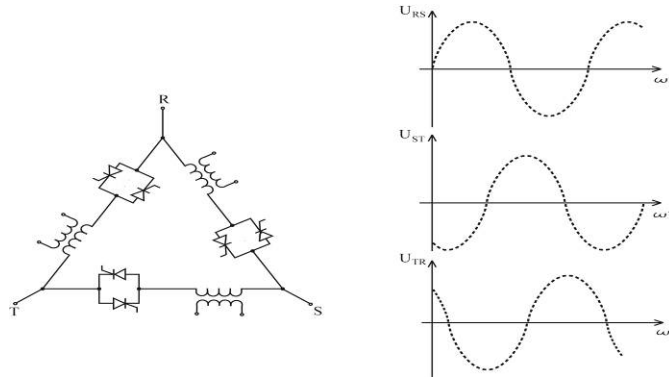
Na osnovu potrebe za očitavanjem ulaznih veličina i generisanjem određenih izlaza može se dati blok šema rada sistema data na slici 5, čiji redosled operacija mora poštovati i obavljati mikroračunar. Na početku treba izvršiti inicijalizaciju sistema. Zatim se postavlja izlazno upravljanje takvo da regulator ne dovodi tiristore u provodno stanje. Onda se tasterima uključuju redom pumpa rashlađenog sistema, napon grejanja elektronske cevi i glavni kontaktor snage. Tu se obavljaju ispitivanja da li je aktiviran taster i ako jeste, ide se dalje, inače program će se odvijati u petlji. Kada je izvršena priprema očitava se sa pulta izabrana temperatura zavarivanja i ista se pamti. Zatim se ispituje stanje A/D konvertora, i ako je konverzija započela, ispituje se kada je podatak spreman za očitavanje. Konverzija A/D konvertora se inicira od strane jednog oscilatora. Kada se očita podatak o temperaturi isti se pamti a na osnovu njega se obavlja linearizacija tj. očitavanje iz EPROM-a prave vrednosti temperature. Ovakav podatak o temperaturi se iz binarnog pretvara u BCD kod i šalje na izlazni displej upravljačkog pulta. Radi formiranja upravljanja obavlja se ispitivanje da li je zadata temperatura veća od stvarne, i ako jeste, izlazno upravljanje se povećava za jedan kvant, inače se smanjuje. Mikroračunar koji treba da izvrši zadatke specificirane blok šeme rada sa slike 5. ima izgled kao što prikazuje slika 6. On se bazira na Intelovom osmobitnom mikroprocesoru 8080. Pored mikroprocesora se upotrebljava clock generator 8224 za vremensko vođenje i kontrolor 8228. Usvojicemo RAM memoriju od 256 byte-a i EPROM od 4 kbyte-a. RAM memorija se organizuje od dve memorije tipa 2111 a EPROM od 4 tipa 2708.

Dekoder 8205 se koristi za odabiranje jedinice a za njegov ulaz se uzima adresna magistrala A_{10} , A_{11} i A_{12} . Mikroračunarski sistem ima tri programabilne ulazno-izlazne jedinice tipa 8255 i iste služe za sprezanje sa procesom. Preko njih se dovode potrebni ulazi, i posle programske obrade, generišu komande procesu. Izlazi dekodera 8205 se preko logičkih »i« kola sprežu sa komandnim signalima MEMR i MEMW tako da se na taj način odabira

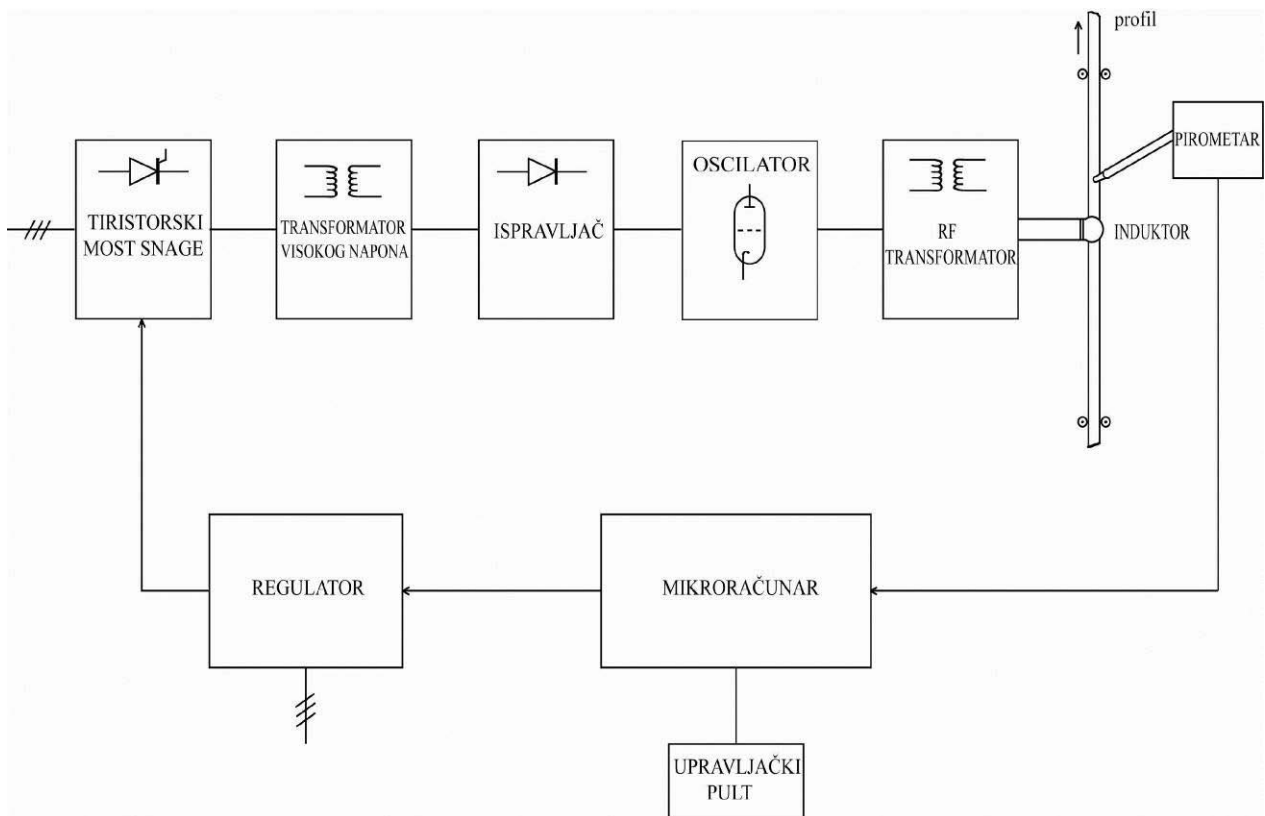


jedinica sa kojom će komunicirati procesor. To može biti RAM, EPROM ili pak ulazno-izlazna jedinica. Detalji organizacije RAM i EPROM memorije je prikazan na slici 7. Na slici 8. je detaljnije prikazan način spreznja I/O jedinice sa procesom. On se koristi kao ulaz za podatak o

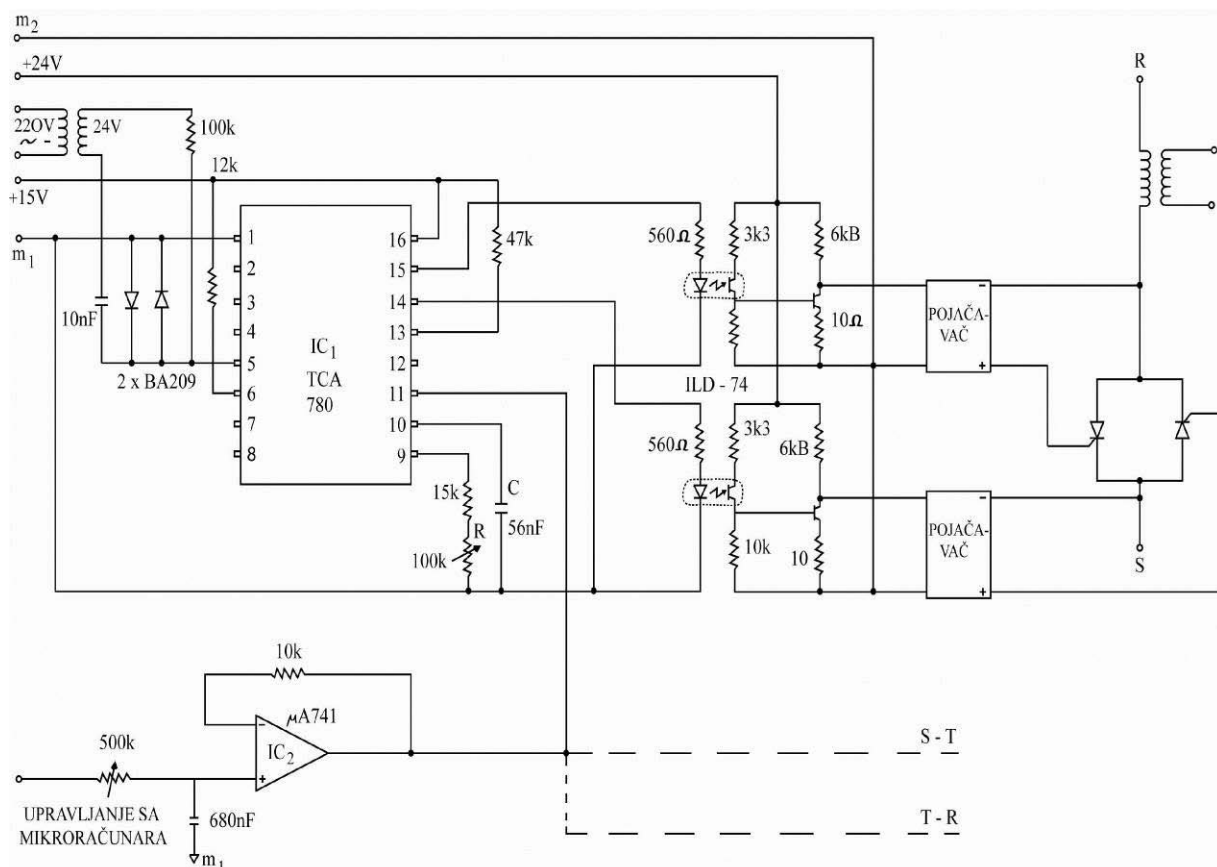
merenoj temperaturi sa pirometra i A/D konvertora. Nadalje se uzimaju podaci o uključenju pumpe, grejanja i snage kao i signali o stanju u kome se nalazi A/D konvertor.



Slika 2. Blok dijagram sistema za regulaciju snage



Slika 3. Veza tiristora u primaru transformatora sa talasnim oblicima napona napajanja



Slika 4. Elektronsko kolo za faznu regulaciju tiristorima

Izlaz se koristi za upravljanje uključenjem pumpe, grejanja i snage kao i za signalizaciju neispravnosti celokupnog sistema za induktivno zavarivanje. To su greške o nesimetričnom radu regulatora napona, previsokoj temperaturi oscilatora, neispravnom naponu grejanja cevi, povišenoj temperaturi trafoa visokog napona, nedovoljnom protoku za hlađenje i smanjenom nivou rashladne tečnosti.

Memorijska mapa je prikazana na slici 9. Od adrese 0000H do 003FH organizuje se sistem prekida. Potprogrami za obradu prekida su smešteni u EPROM-u od 0040H do 008FH. Tablica sa potrebnim podacima za linearizaciju krive temperature je smešten od 0090H do 0DFFH. Glavni program se nalazi počev od adrese 0E00H i za njega je rezervisano 512 byte-a EPROM memorije. Da se zaključiti da EPROM memorija ima adresu od 0000H do 0FFFH. RAM memorija zauzima adrese od 1000H do 10FFH, s tim da je STACK smešten počev od najviše adrese.

Iz razloga prenosa dvobajtnih podataka sa ulaza ka procesoru i obrnuto, ulazno-izlazne jedinice se hardware-ski povezuje i tretiraju kao i memorije kod adresiranja. Tako za njih važe memorijske naredbe za prenos podataka. Ovakvo rešenje se moralo izabrati iz razloga povećanja rezolucije i tačnosti

upravljanja koje se dobija sa D/A konvertora, prenos izabrane temperature ka procesoru i izbacivanje izlazne i stvarne temperature na displej kao dvobajtnih podataka. U sistemu za sprezanje su predviđene tri ulazno-izlazne jedinice tipa 8255. Adresa ulazno-izlaznih jedinica, a prema usvojenim oznakama, imaju oblik:

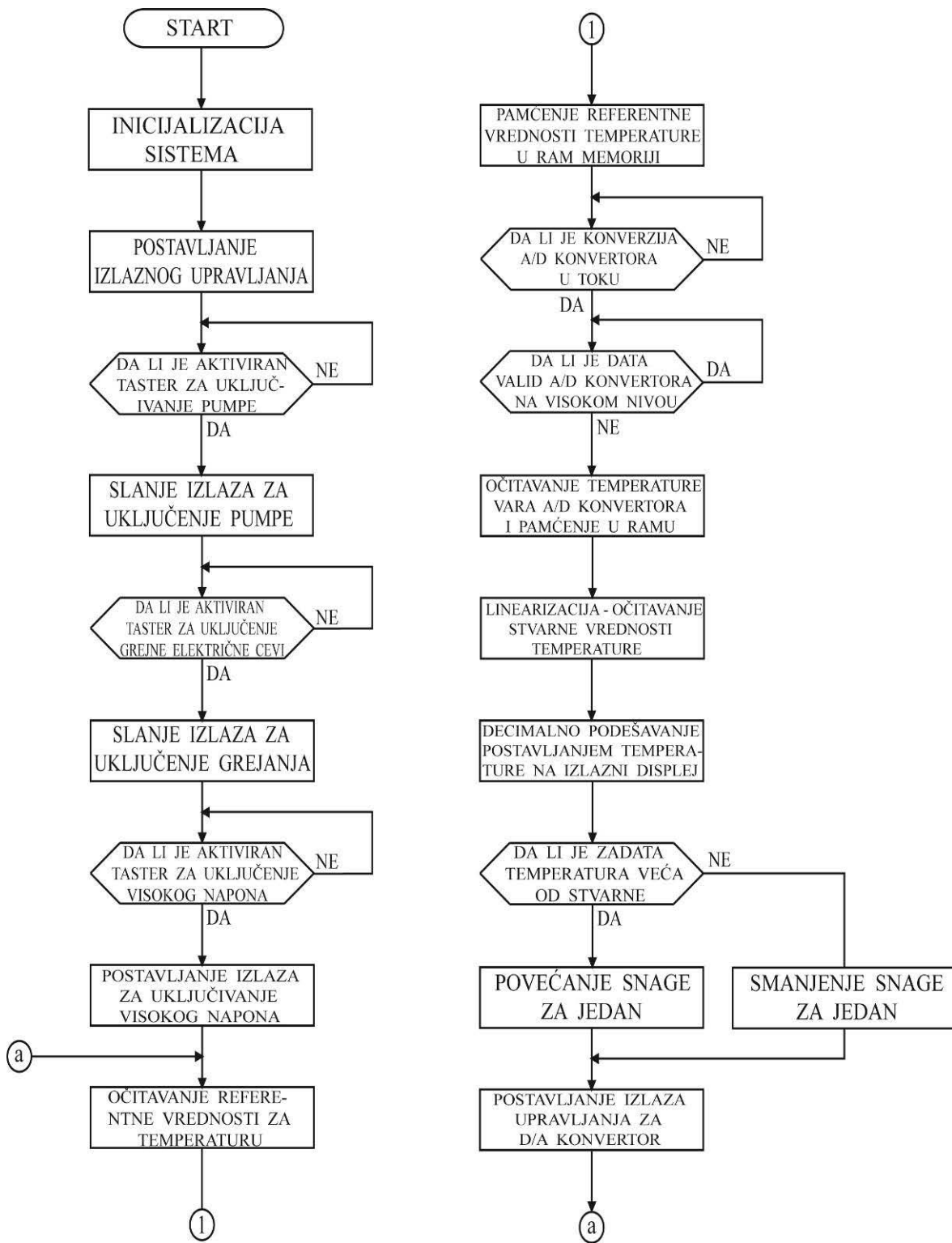
- PORT1 - 1400H
- PORT2 - 1401H
- PORT3 - 1402H
- PORT4 - 1800H
- PORT5 - 1801H
- PORT6 - 1802H
- PORT7 - 1C00H
- PORT8 - 1C01H
- PORT9 - 1C02H

Za mikroracunar se projektom omogućava da radi sa sistemom prekida gde će se koristiti enkoder prioriteta 8214 sa ulazno-izlaznom jedinicom kao što je prikazano na slici 10. Počev od najvećeg prioriteta sledeći su zahtevi za prekid: nesimetrični rad regulatora napona, previsoka temperatura

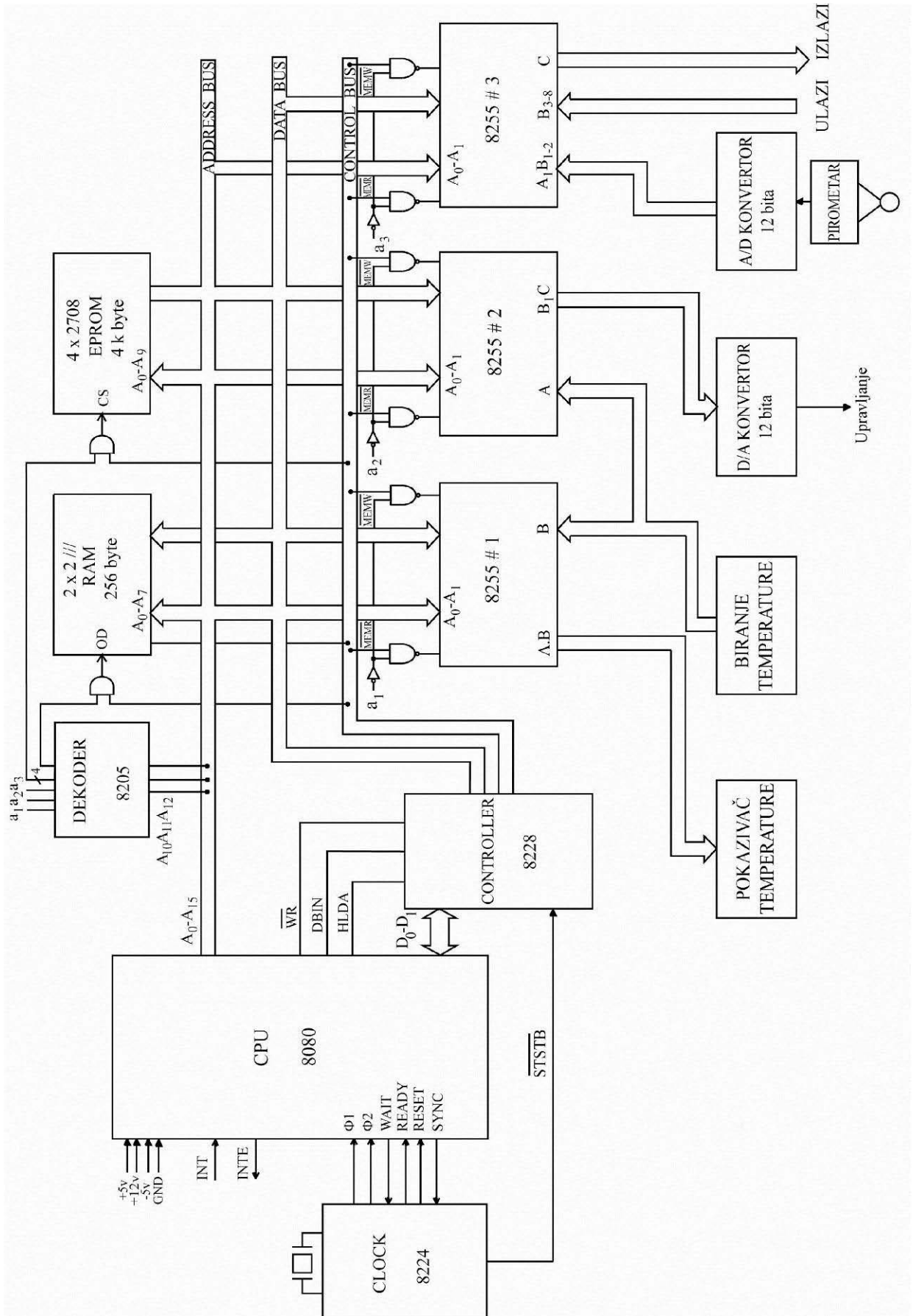


oscilatora, neispravan napon grejanja elektronske cevi, visoka temperatura trafoa visokog napona,

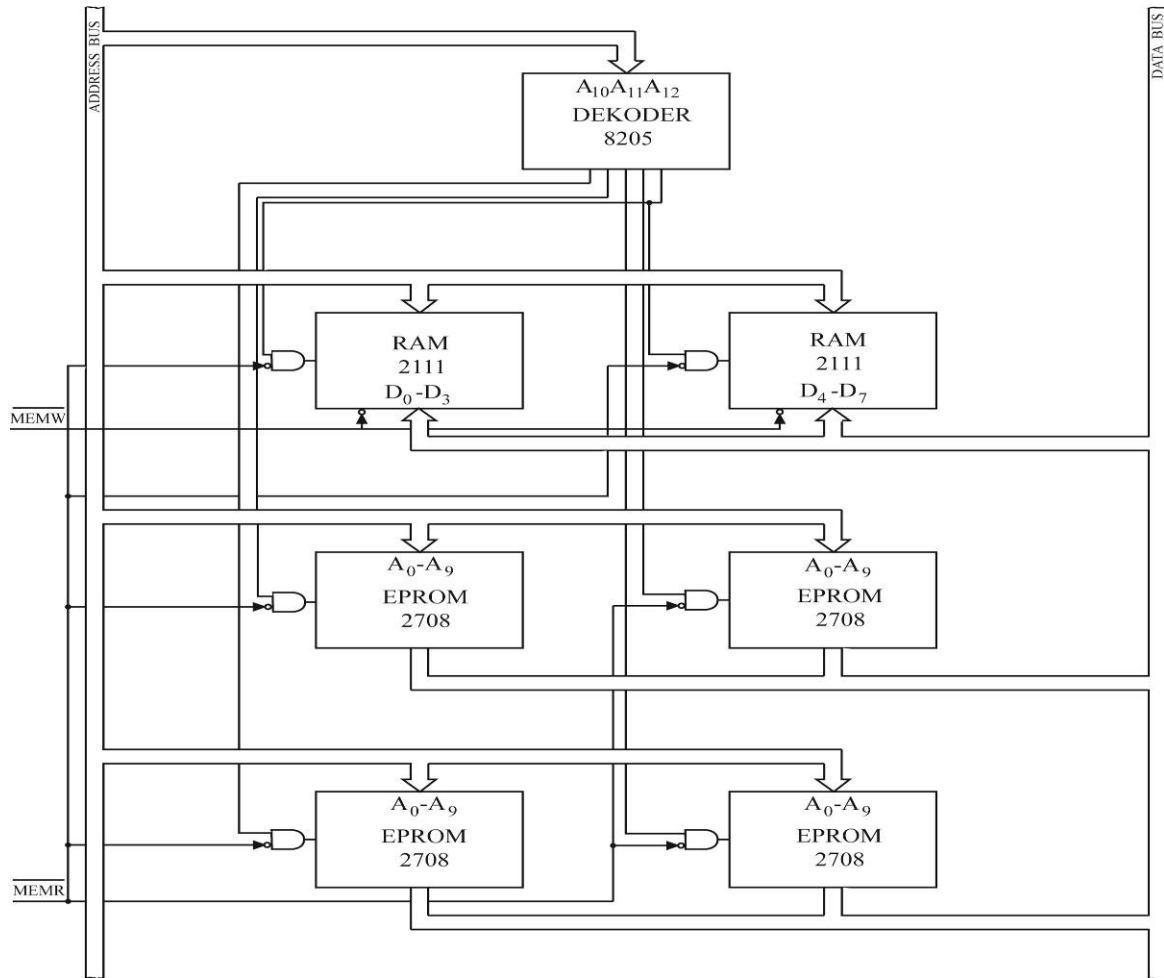
nedovoljan protok za hlađenje i nizak nivo vode u izmenjivaču.



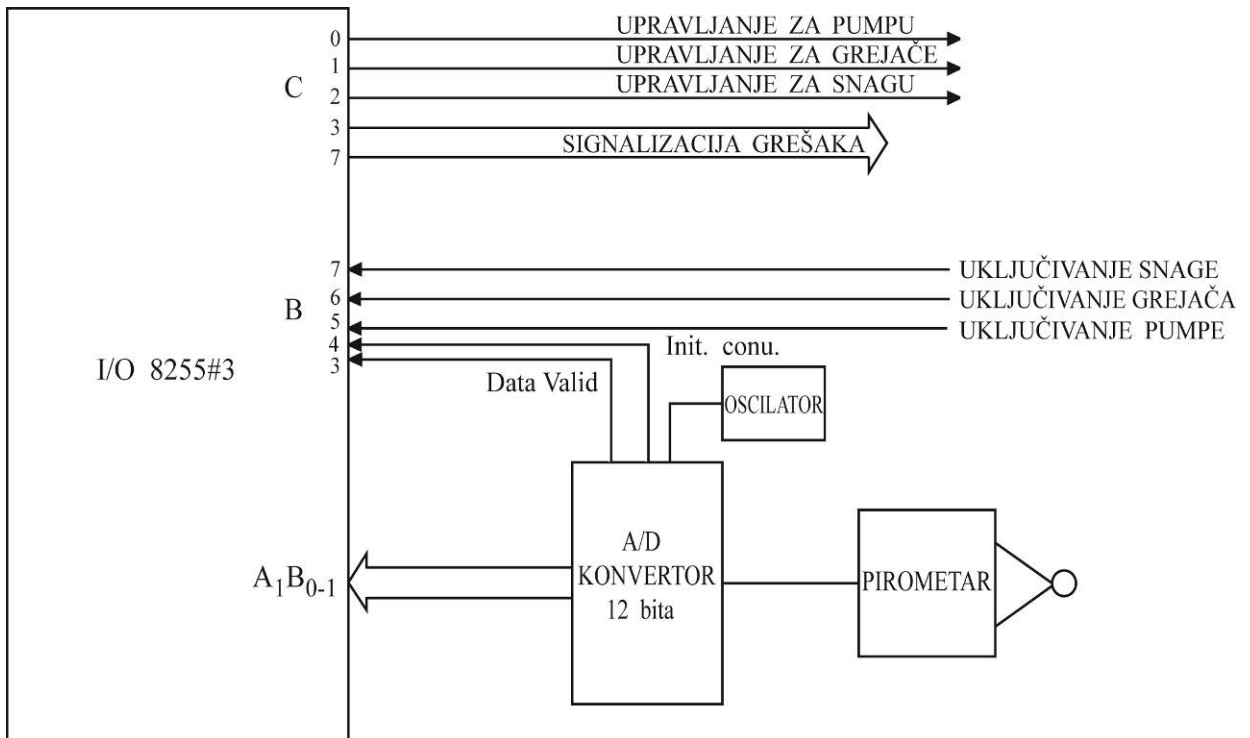
Slika 5. Blok šema rada mikroračunara



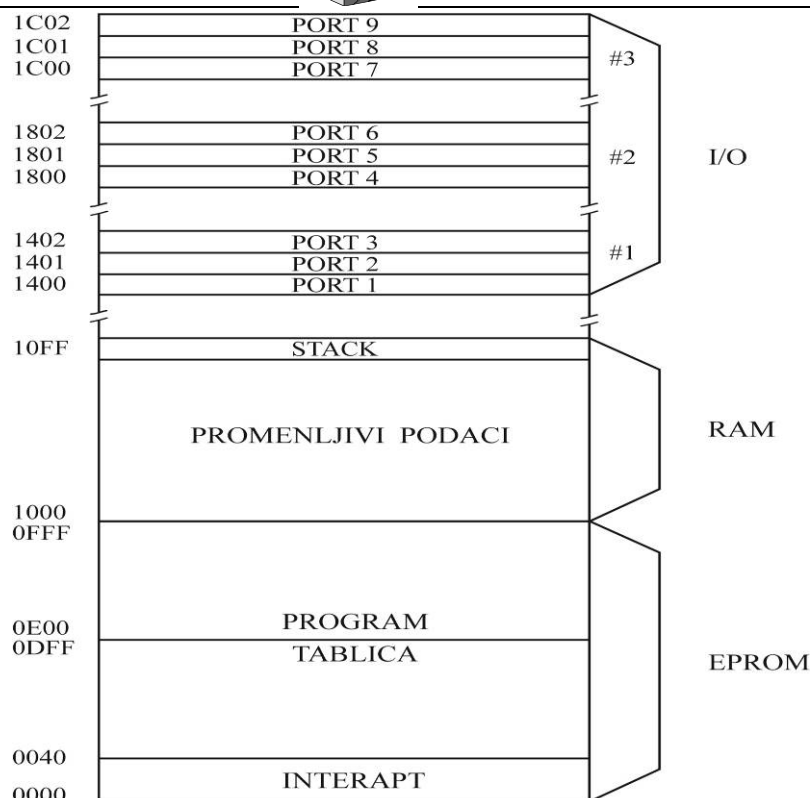
Slika 6. Blok šema hardware-a mikroračunara



Slika 7. Organizacija memorije



Slika 8. Sprezanje jedinice I/O # 3 sa procesom



Slika 9. Raspored adresa

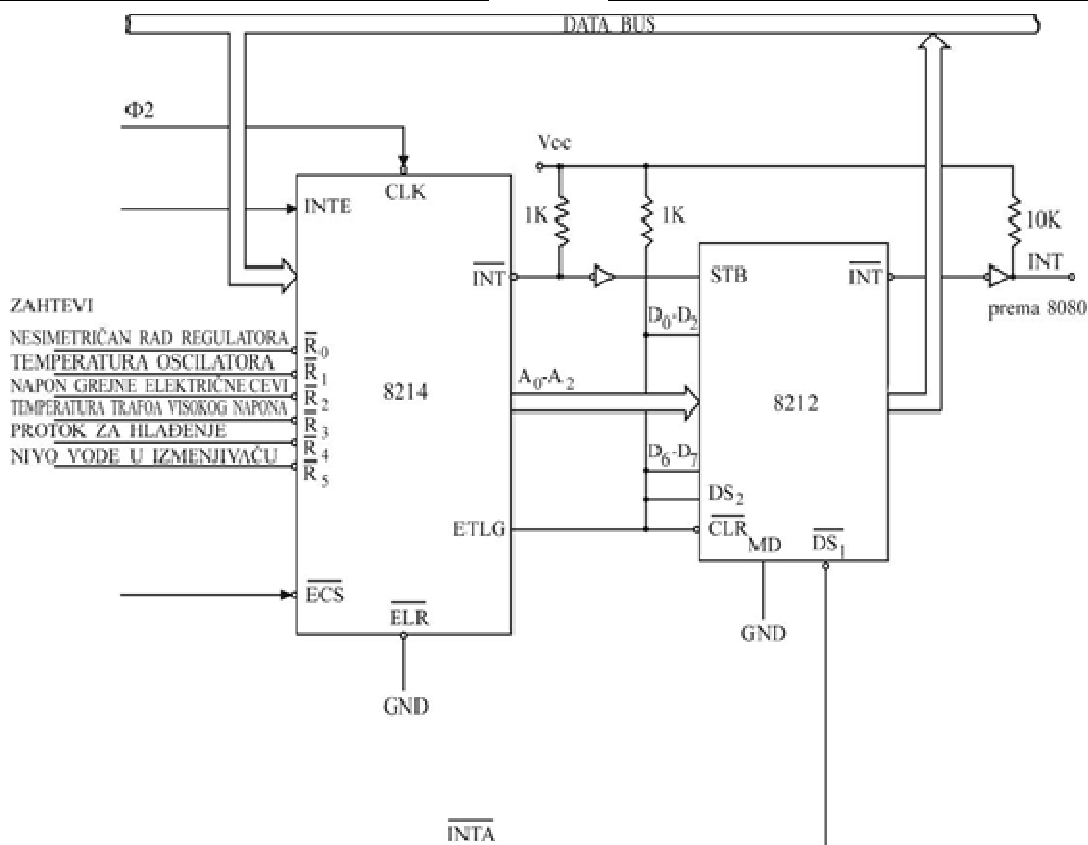
Pri nailasku zahteva za prekid, šalje se zahtev mikroprocesoru za prekid i tada se dešavaju sledeće opcije. Završava se započeta naredba koja je bila u toku kod nailaska zahteva a bit koji omogućuje prekid INTE se postavlja na nulu. Posle obrade po potprogramu za dotični prekid kada je isti završen, predhodno započeti posao se nastavlja na onom mestu gde je i stao pre nailaska prekida. Na osnovu zadatka koji treba da obavi mikroracunar, formiran je instrukcioni dijagram toka na slici 11.

Inicijalizacija sistema je okarakterisana brisanjem RAM memorije, PORT1, PORT2 i PORT9. Na PORT5 i PORT 6 se postavlja vrednost 0FFFH, koja preko faznog regulatora blokira paljenje trofaznog tiristorskog mosta snage. Ispitivanje stanja ulaznih prekidača ako su ovi uključeni obavlja se uključanjem pumpe, grejanjem elektronske cevi i prekidača snage preko PORT9-a postavljanjem odgovarajuće izlazne reči. Očitavanjem PORT3 i PORT4 čita se postavljanjem temperature i ista pamti u registar RTEMZ

Testiranjem stanja A/D konvertora ako su ispunjeni uslovi, očitava se ulazna temperatura i pamti kao rezultat A/D konverzije u registar RTEMP. Pošto podaci o temperaturi su u po dva byte-a EPROM memorije, podatak iz RTEMP se

množe sa dva linijskim pomeranjem ulevo za 1 bit. Ovom rezultatu treba dodati iznos adrese koje zauzimaju potprogrami za obradu prekida 0090H. Na osnovu ovako dobijene vrednosti adresira se sadržajem registarskog para D, E memorije, čiji se rezultat pamti u registru L. Uvećanim sadržajem D, E za jedan adresira se memorija čijim očitavanjem se rezultat pamti u registru H. RegistarSKI par H, L sadrži vrednost prave temperature u binarnom obliku a pamti se u RAM memoriji na mestu RTEMS. Sadržaj registara H, L se pretvara u BCD kod i šalje na izlaz PORT1, PORT2 čime displej poprima stvarnu vrednost. Upoređenjem sadržaja RTEMZ kao zadate temperature RTEMP kao stvarne vrednosti uvećava se ili smanjuje sadržaj RUPR gde se nalazi vrednost upravljanja. Upravljanje se šalje na PORT5 i PORT6. Na osnovu ove vrednosti D/A konvertor daje upravljanje faznom regulatoru. Na ovaj način se povećava ili smanjuje snaga zavarivanja čime se reguliše temperatura zavarivanja. Program se odvija u petlji vodeći proces zavarivanja automatski. Oznake imaju sledeće značenje:

- RTEMZ - zadata temperatura,
- RTEMP - podatak o temperaturi sa pirometra,
- RTEMS - stvarna temperatura,
- RTEMD - temperatura u BCD kodu i
- RUPR - izlazno upravljanje.



Slika 10. Organizacija sistema prekida

Korišćenjem instrukcionog blok dijagrama napisan je program u simboličkom jeziku za izabranu konfiguraciju mikroracunara. Glavni program zauzima u EPROM memoriji 184 byte-a. Kod frekvencije takt generatora 1 MHz, maksimalno trajanje petlje za izbacivanje izlaznog upravljanja iznosi 449 μ s. Za postizanje maksimalnog referentnog upravljanja na PORT5 i PORT6 potrebno je vreme od 756 ms. Tehnološki gledano tu nema smetnji jer je na postojećem sistemu operatoru trebalo više vremena da, počev od nule do maksimuma, postavi višeobrti potencijometar. No, pored ove pogodnosti vreme se može po želji programski smanjiti. Potprogrami za obradu prekida i glavni program su dati u tablici T1.

Na osnovu potrebnog vremena trajanja programske petlje, uz ostavljanje izvesne rezerve, da se definisati perioda oscilatora koji određuje početak konverzije A/D konvertora na vrednost oko 500 ms. Za sprezanje mikroracunara sa procesom izabraćemo A/D konvertor MAS-1202 rezolucija 12 bita, tačnosti +0.12% i konverzionog vremena 2 μ s. Za D/A konvertor uzimamo MDH-1202 rezolucija 12 bita. Oba ova konvertora su proizvod firme »Analog Device«. Vreme konverzije A/D konvertora je gotovo zanemarivo u odnosu na vreme trajanja petlje između dva izbačena izlaza za upravljanje. Dinamičkom analizom utvrđujemo da izabrana konfiguracija mikroracunarskog sistema odgovara

za automatizaciju procesa induktivnog zavarivanja. Kada sistem bude praktično realizovan izvršice se identifikacija parametara sistema, sa kojim će biti saglasno i kašnjenje odziva pirometra na osnovu kojih će se analizirati stabilnost i tačnost celog sistema. Realizacijom ovog projekta povećaće se kvalitet i produktivnost tehnoloških linija kao i pouzdanost celog sistema.

4. ZAKLJUČAK

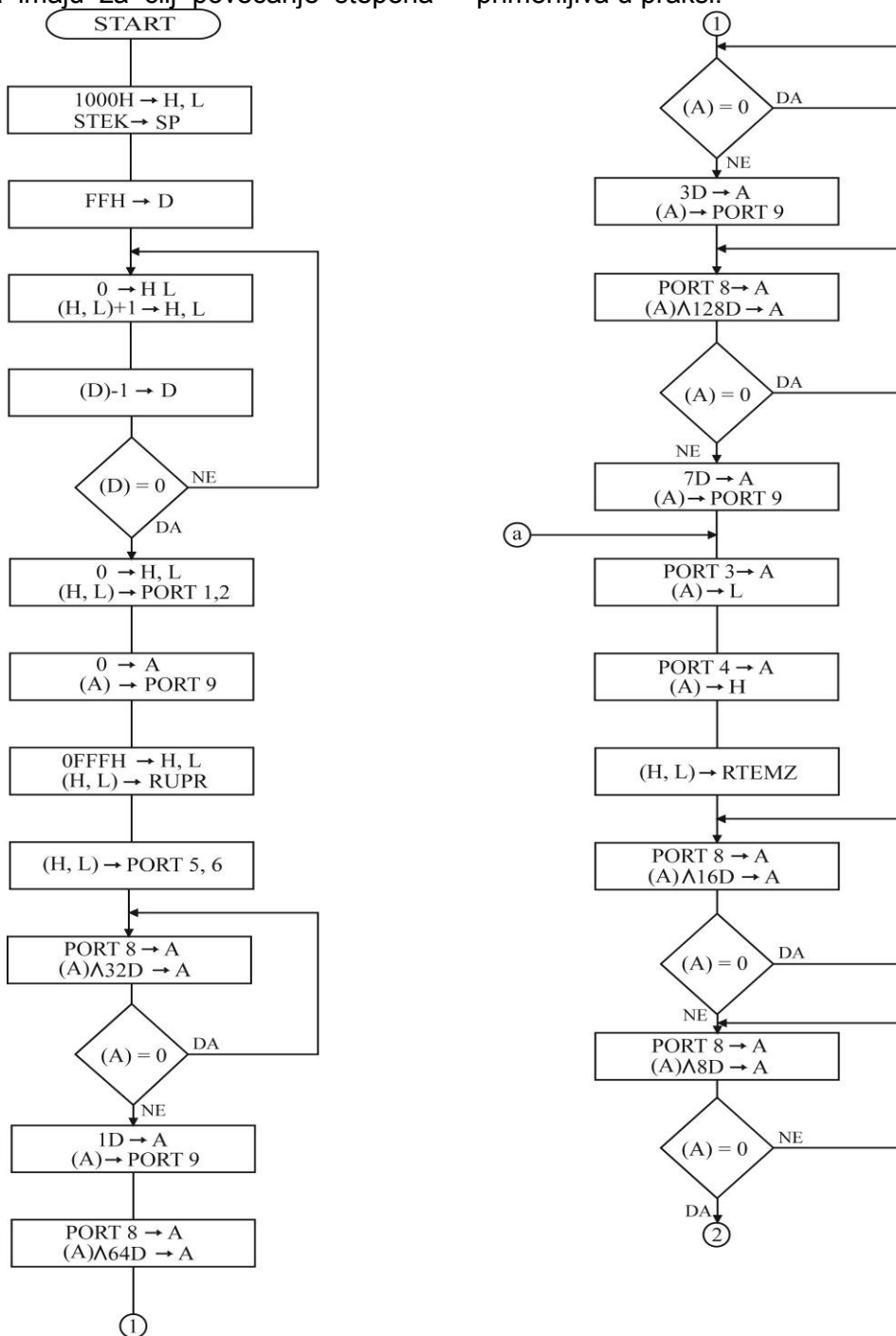
U radu je projektovan sistem za automatsku regulaciju temperature šava cevi koja se zavaruje radiofrekventnim generatorom. Izvršen je izbor senzornog elementa, za bezkontaktno merenje temperature, koji detektuje emisiju energiju šava u infracrvenom spektru. Projektovan je trofazni tiristori regulator napona koji reguliše snagu zavarivanja, odnosno uzimajući u obzir raspodelu količine toplote u zoni zavarivanja, i temperaturu. Za automatsko vođenje procesa zavarivanja projektovan je mikroracunar sa Intelovim osmobitnim mikroprocesorom 8080. Razvijen je kompletan hardware i odgovarajuća software-ska podrška. Parametri se zadaju preko upravljačkog pulta. Na osnovu zadate veličine i stvarne, programski se generiše upravljanje.

Primenom ovakvog sistema povećava se kvalitet zavarenih profila uz znatno povećanje produktivnosti tehnoloških linija. Operator će biti oslobođen stalne pažnje oko podešavanja brzine

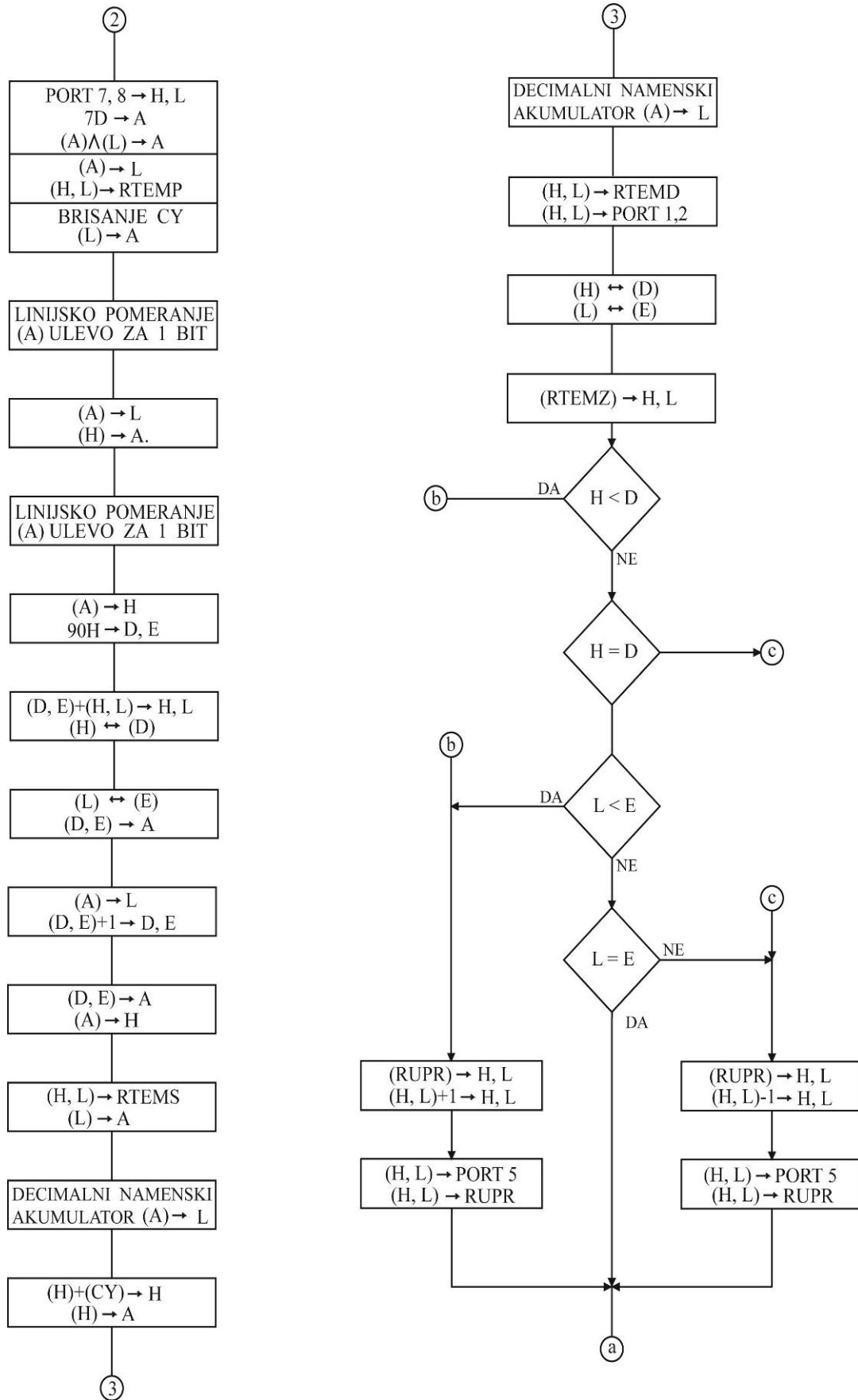


proizvodne linije i snage zavarivanja uz monotono vizuelno ocenjivanje boje i kvaliteta zavarenog spoja. U izvesnom smislu, ovo radno mesto se više humanizuje. Ovakvi sistemi se mogu primenjivati na svim proizvodnim linijama gde se koristi uzdužno induktivno zavarivanje cevi za regulaciju temperature. Oblast primenjivosti se može proširiti i na ostala metalurška postrojenja kao što su visoke peći i tome slično, zatim za žarenje, termičku obradu itd. Instaliranje sistema upravljanja sa mikroročunarima imaju za cilj povećanje stepena

automatizacije. Ovde je prikazan jedan složen sistem upravljanja koji je praktično realizovan, počev od analize procesa, izbora senzora i upravljačkog algoritma, pa sve do konačne realizacije. Prikaz je pedagoško elementaran budući da naše školstvo često nije blisko praksi. Zato, ovako prikazan rad može poslužiti tehničarima, studentima, inženjerima i na kraju nastavnicima što će im proširiti vidike kod izrade programa za izvođenje nastave koja će biti primenljiva u praksi.



Slika 11. Instrukcioni dijagram toka



Slika 11. Nastavak algoritma



Tablica T1 Program u simboličkom jeziku za mikroračunar

PORT1	EQU	1400H		HLT	
PORT2	EQU	1401H			
PORT3	EQU	1402H		ORG	18H
PORT4	EQU	1800H		PUSH	PSW
PORT5	EQU	1801H		PUSH	B
PORT6	EQU	1802H		PUSH	D
PORT7	EQU	1C00H		PUSH	H
PORT8	EQU	1C01H		JMP	PREK4
PORT9	EQU	1C02H		HLT	
RTEMZ	EQU	1000H			
RTEMP	EQU	1002H		OGR	20H
RTEMS	EQU	1004H		PUSH	PSW
RTEMD	EQU	1006H		PUSH	B
RUPR	EQU	1007H		PUSH	D
STEK	EQU	100FH		PUSH	H
				JMP	PREK5
	ORG	0H		HLT	
	PUSH	PSW			
	PUSH	B		ORG	28H
	PUSH	D		PUSH	PSW
	PUSH	H		PUSH	B
	JMP	PREK1		PUSH	D
	HLT			PUSH	H
				JUMP	PREK6
	ORG	8H		HLT	
	PUSH	PSW			
	PUSH	B		ORG	40H
	PUSH	D	PREK1:	MVI	A, 0AH
	PUSH	H		STA	PORT9
	JMP	PREK2		POP	H
	HLT			POP	D
				POP	B
	ORG	10H		POP	PSW
	PUSH	PSW		EI	
	PUSH	B		RET	
	PUSH	D			
	PUSH	H		ORG	50H
	JUMP	PREK3	PREK2:	MVI	A, 11H
	STA	PORT9		ORG	70H
	POP	H	PREK4:	MVI	A, 43
	POP	D		STA	PORT9
	POP	B		POP	H
	POP	PSW		POP	D
	EI			POP	B



	RET		POP	PSW
			EI	
	ORG	60H	RET	
PREK3:	MVI	A, 21H		
	STA	PORT9	ORG	80H
	POP	H	PREK5: MVI	A, 81H
	POP	D	STA	PORT9
	POP	B	POP	H
	POP	PSW	POP	D
	EI		POP	B
	RET		POP	PSW
			EI	
			RET	
	ORG	0E00H		
	LXI	H, 1000H		
	LXI	SP, STEK		
	MVI	D, FFH		
SKOK1:	MVI	M, 0H	; BRISANJE RAMA	
	INX	H		
	DCR	D		
	JNZ	SKOK1		
	LXI	H, 000H		
	SHLD	PORT1	; BRISANJE PORT1-A	
	MVI	A, 0H		
	STA	PORT9	; BRISANJE PORT9-A	
	LXI	H, 0FFFH		
	SHLD	PORT5	; POST. REFER. UPRAV.	
SKOK2:	LDA	32D		
	JZ	SKOK2		
	MVI	A, 1H		
	STA	PORT9	; UKLJUČENJE PUMPE	
SKOK3:	LDA	PORT8		
	ANI	64D		
	JZ	SKOK3		
	MVI	A, 3D		
	STA	PORT9	; UKLJUČ. GREJ. CEVI	
SKOK4:	LDA	PORT8		
	ANI	128D		
	JZ	SKOK4		
	MVI	A, 7D		
	STA	PORT9	; UKLJ. KONT. SNAGE	
LOOP:	LDA	PORT3	; OČITAV. TEMPER.	
	MOV	L, A		
	LDA	PORT4	; OČITAV. TEMPER.	
	MOV	H, A		



	SHLD	RTEMZ	; PAMĆ. IZABR. TEMP.
SKOK5:	LDA	PORT8	; ISP. POČ. KONVER.
	ANI	16D	
	JZ	SKOK5	
SKOK6:	LDA	PORT8	; OČITAV. KONV. POD.
	ANI	8D	
	JNZ	SKOK6	
	LHLD	PORT7	
	MVI	A, 7D	
	ANA	L	
	MOV	L, A	
	SHLD	RTEMP	; PAMĆ. TEMP. PIROM.
	STC		
	CMC		
	MOV	A, L	
	RAL		
	MOV	L, A	
	MOV	A, H	
	RAL		
	MOV	H, A	
	LXI	D, 0090H	
	DAD	D	
	XCHG		
	LDAX	D	; LINEAR. TEMP. I BYTE
	MOV	L, A	
	INX	D	
	LDAX	D	; LINEAR. TEMP. II BYTE
	MOV	H, A	
	SHLD	RTEMS	; PAMĆ. PRAV. VR. TEMP.
	MOV	A, L	
	DAA		; DECIM. PRET. TEMP.
	MOV	L, A	
	MOV	A, H	
	ACI	0H	
	DAA		
	MOV	H, A	
	SHLD	RTEMD	; PAMĆ. TEMP. U RTEMD
	SHLD	PORT1	; POST. TEMP. NA DISP.
	XCHG		
	LHLD	RTEMZ	
	MOV	A, H	
	CMP	D	
	JC	SKOK7	
	JZ	SKOK8	
	MOV	A, L	
	CMP	E	



	JC	SKOK7	
	JZ	SKOK9	
SKOK7:	LHLD	RUPR	
	INX	H	
	SHLD	PORT5	; POST. IZL. UPR.
	SHLD	RUPR	; PAMĆ. IZL. UPR.
	JMP	SKOK9	
SKOK8:	LHLD	RUPR	
	DCX	H	
	SHLD	PORT5	; POST. IZL. UPRAV.
SKOK9:	JMP	LOOP	
	END		

LITERATURA

- [1] Wester J. G., Software Design For Microprocessors, Texas Instruments, London.
- [2] Intel 8080 Microcomputer System, User's Manual, 1957.
- [3] Lilen H., Du microprocesseur au micro-ordinateur, Editions Radio, Paris, 1979.
- [4] Lilen H., Programation des microprocesseurs, Editions Radio, Paris, 1979.
- [5] Lilen H., 36 programmes pour vote micro-ordinateur, Editions, Paris, 1979.
- [6] Souček B., Mikroprocesori i mikroračunala, Tehnička knjiga, Zagreb, 1978.
- [7] Besekerski V. A., Teorija system avtomatičkog reguliranja, Nauka, Moskva, 1975
- [8] Miličević M., Adaptivno upravljanje odsecanjem metalnih profila u pokretu primenom mikroračunara, III Savetovanje o automatizaciji u crnoj metalurgiji, Sarajevo, 1981.
- [9] Seminarirs 1977, Le nouveau concept de famille microprocesseur, France, 1977.
- [10] Lilen H., Guide mondial des microprocesseur, Editions Radio, Paris.
- [11] The Memory and Microprocessor Data Book, Texas Instruments, London.
- [12] Analog ICs, Data Book, Siemens, München, 1981.
- [13] Design Examples of Semiconductor Circuits, Siemens, 1981.
- [14] Microcomputer SAB 8080 Programmierung, Siemens.
- [15] Simpozijum o VF induktivnim generatorima i elektronskim cevima, BBC - IEVT, Bled, 8-10. 03.1978. godine.
- [16] Djurić B., Čulum Ž., Fizika IV deo - Optika, Naučna Knjiga, Beograd, 1966
- [17] Optoelektronik Halbleiter, Datenbuch, Siemens, 1976.
- [18] Nauman G., Primenenie infrakrasnoi v celah kontrol za rabotai matelurgičeskih ustanovok, VI Meždunarodna konferencia SEV I SFRJ po avtomatizaciji, Budampešt, Mart 1979.
- [19] Electronic Temperature controllers, Regal House, Buncroft, Hitchin, Hertfordshire.
- [20] Temperature Recorder, Gulton, Brighton, England.
- [21] Miličević M., Merenje temperature vara primenom mikroračunara na linijama za proizvodnju šavnih cevi, Elektrotehnika br. 2, p. p. 267-276, Beograd, 1980.
- [22] Instrument TMRS-34-MR, Non-contact Temperature Measurement, Maurer infrared spectral pyrometers, Förster Engineering Trading GmbH, Reutlingen.
- [23] Dance M., MPU-s allow high precision thermometry, Electronic Industry, May 1979, p. p. 12-17, London, 1979.
- [24] Miličević M., Stoilković I., Jovanović T., Nejković V., Opis nedostataka feritnog koncentrata kod visokofrekventnog induktivnog zavarivanja, Zavarivanje i zavarene konstrukcije br.3, 2013 god., Beograd, p.p.115-120
- [25] Miličević M., Jovanović T., Nejković V., Kako smo izumeli najbolji magnetni koncentrat na svetu za visokofrekventno zavarivanje, Zavarivanje i zavarene konstrukcije br.2, 2014 god., Beograd, p.p. 71-79
- [26] Takada A., Terasaki H., Komizo Yu-ichi, Uloga uključaka kod stvaranja acikularnog ferita na deponovanom metalu šava niskougljeničnog čelika, Zavarivanje i zavarene konstrukcije br.2, 2015 god., Beograd, p.p.71-81



IN MEMORIAM

Zoran Radojević rođen je 02.08.1942.g. u Beogradu gde je i završio osnovnu, srednju mašinsko-tehničku školu i Mašinski fakultet – smer proizvodno mašinstvo. Magistarski rad pod naslovom: "Organizacija proizvodnje u uslovima jednog manjeg preduzeća metaloprerađivačke struke " odbranio je 5. marta 1975. Doktorsku disertaciju pod naslovom "Modeli organizacije proizvodnje i tehnološkog procesa pri izradi građevinskih čeličnih konstrukcija", odbranio je 1993. godine.

Od 1962 – 1963. godine radio je u industriji poljoprivrednih mašina "Zmaj" a u metalsko-montažnom preduzeću "Branko Plećaš" radio je 15 godina. Od 1985-1989. radio je u preduzeću "David Pajić-Daka". U oba ova preduzeća bio je generalni direktor. Tada je u najvećem stepenu i bio društveno angažovan, kako je to priličilo tom periodu.

Nastavno iskustvo započeo je 1966. godine u Tekstilnom školskom centru, a od 1989-1994. radi kao profesor u Višoj metalnoj školi. Od 1993. godine je bio zaposlen na Fakultetu organizacionih nauka, 1994. godine je izabran u zvanje docenta, 1997. godine u zvanje vanrednog profesora, a za redovnog profesora izabran je 2003. godine. Objavio je preko 15 radova u domaćim i inostranim časopisima, preko 100 radova na nacionalnim i međunarodnim skupovima i 22 udžbenika iz oblasti mašinstva i upravljanja proizvodnjom.

Jedan od udžbenika koji se odnosi na organizaciju zavarivačkih radova je poslednji u njegovom opusu, a izdavač je Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji čiji je Zoran bio predani član i aktivista. Njegove aktivnosti i popularisanje našeg Društva nikada nisu ni prestale.

Pamtićemo ga po njegovim vrsnim predavanjima na kursevima za inženjere i tehnologe zavarivanja iz oblasti kojom se najviše bavio-organizacijom proizvodnje.

Nesebičan, spreman da brani svoje ideje i onda kada okolnosti za to nisu povoljne, strpljiv da sasluša i spreman da reši probleme, duhovit i sa specifičnim šarmom; to je za nas, koji smo ga dobro poznavali, bio naš drugar Zoki. Teško je prihvatiti da ostajemo bez njega.



IN MEMORIAM

Šipek Matevž –Mitja (05.09.1926. ÷19.07.2015.)

Svi koji su ga poznavali jednostavno su ga oslovljavali sa Mitja. Bio je nenametljiv, drag, širokih i uvek naprednih pogleda na život, svet, a posebno na kulturu i struku. Svoja stručna znanja je nesebično prenosio svakom ko mu se obraćao. Uživao je da pomaže mladima kod rešavanja inženjerskih problema u proizvodnji i kontroli kvaliteta metalnih materijala i proizvoda. Ultrazvučnim ispitivanjem na jednoj osovini čuvenog „plavog voza“ je otkrio grešku „kovački krst“, koja je odmah zamenjena, pa je posle dugo i detaljno ispitivan i on i ta osovina. Od septembra 1944. do maja 1945. je bio učesnik NOB-e.

Godine 1952. je diplomirao metalurgiju na visokoj tehničkoj školi u Ljubljani, zaposlio se u železari Ravne i prvi put uveo kontrolu proizvoda metodom ultrazvuka. Iste godine je prvi u železari Ravne uveo obučavanje inženjera i tehničara za kontrolu metodama bez razaranja. Vremenom ovu obuku je preveo u kurseve, koji su održavani u Kotljama svake godine u više unapred planiranih termina ili po zahtevu kod korisnika. Bio je inicijator i osnivač (1965. godine) Jugoslovenskog društva za kontrolu metodama bez razaranja. Organizovao je više međunarodnih savetovanja i na svakom je izlagao svoje stručne radove, a iz ultrazvučne „defektoskopije“ najmanje po jedan.

Kasnije kada je Jugoslovensko društvo preraslo u Savez republičkih društava, svaki put se odazivao pozivu za učestvovanje na „lokalnim“ stručnim skupovima. Autor je preko 120 izuma ili inovacija. Decenijama je bio savetodavac u više nemačkih preduzeća. Metaloprerađivačka svetska industrija je svakako imala koristi od njegovih stručnih radova iz metalurgije ili iz ultrazvučne „defektoskopije“.

Ceo radni vek je proveo u železari Ravne, gde je i penzionisan 1992. sa mesta direktora kvaliteta. Kratko se bavio i politikom, ali se brzo povukao iz nje sa zaključkom „nije to za mene“ i potpuno se posvetio kulturi i jednoj od svojih najvećih ljubavi – ultrazvučnoj „defektoskopiji“.

Mitja, don-žuan, metalurg, enolog, ekspert za ispitivanja metodama bez razaranja, pesnik, pevač, prozni pisac, dirigent, glumac, režiser, rezbar duvanskih lula. U svemu ovome je bio prvi ili među prvima.

U svom rodnom Šentanelu je u mladosti osnovao pevačko društvo na čijem čelu je bio duže od 40 godina. Bio je i šef orkestra lovačkog društva Prežihovo iz Kotlji.

Za svoja angažovanost, umetnička dela i za tehničke izume mnogo puta je nagrađivan. Izdvojimo samo neke najznačajnije: ORDEN RADA SA SREBRNIM VENCEM (1961.), MEDALJA ZA ZASLUGE ZA NAROD (1965.), ORDEN ZA VOJNE ZASLUGE SA SREBRNIM MAČEM (1965.), ZLATNA PLAKETA „PREŽIHOV VORANC“ (1986.), NAGRADA „BORIS KIDRIČ“ ZA IZUME I UNAPREDJENJA (1987.), POČASNI GRADJANIN OPŠTINE PREVALJE (2001.).

Od 2000. godine je bio počasni član Srpskog društva za ispitivanje metodama bez razaranja, kome je nesebično, baš svaki put izlazio u susret i odgovarao na sve zahteve.

VEČNA MU SLAVA.

Srpsko Društvo za ispitivanje bez razaranja (SDIBR)

INFLUENCE OF GRAIN SIZE ON MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINIUM GTA WELD METAL

UTICAJ VELIČINE ZRNA NA MEHANIČKE OSOBINE METALA ŠAVA ALUMINIJUMA ZAVARENOG TIG POSTUPKOM

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:

Jul 2015.

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

Adresa autora / Author's address:

*Dipl.-Ing. Philipp SCHEMPP (Philipp.Schempp@bam.de),

*Dipl.-Ing. Ralf HÄCKER (Ralf.Haecker@bam.de),

*Dr.-Ing. Andreas PITTNER (Andreas.Pittner@bam.de) BAM – Federal Institute for Materials Research and Testing, Berlin (Germany). Prof.

**Dr. Carl Edward CROSS (CECross@lanl.gov) is with LANL – Los Alamos National Laboratory, Los Alamos (USA).

***Dr.-Ing. Michael RETHMEIER (Michael.Rethmeier@bam.de) and IPK – Fraunhofer Institute for Production Systems and Design Technology, Berlin (Germany).

Key words: GTA welding; Aluminium; Grain refinement; Tensile tests; Tear tests.

Ključne reči: TIG zavarivanje; Aluminijum; rafinacija zrna; Ispitivanje zatezanjem; Ispitivanje cepanjem

Abstract

Grain refinement is an important possibility to enhance the mechanical properties such as strength, ductility and toughness of aluminium weld metal. In this study, grain refinement was achieved through the addition of commercial grain refiner Al Ti5B1 to GTA (gas tungsten arc) weld metal of the aluminium alloys 1050A (Al 99,5) and 5083 (Al Mg4,5Mn0,7). The grain refiner additions led to a significant reduction of the weld metal mean grain size (Alloy 1050A: 86%, Alloy 5083: 44%) with a change in grain shape from columnar to equiaxed. In hardness tests, no relationship between hardness and weld metal mean grain size was found. Tensile tests showed for Alloy 5083 that the weld metal's ductility can be increased through grain refinement. No improvement in weld metal strength (i.e. yield strength and ultimate tensile strength) was observed. Furthermore, tear tests with notched specimens revealed that the resistance against initiation and propagation of cracks in the weld metal can be enhanced through grain refinement. This increase in toughness was found to depend strongly on the alloying composition and hence on size, distribution and chemical composition of the intermetallic phases. Accordingly, the toughness was observed to increase clearly by grain refinement in weld metal of commercially pure Al (Alloy 1050A). In Alloy 5083 weld metal, the toughness was not improved through grain refinement, likely because of a semi-continuous network of brittle intermetallic phases that facilitate crack propagation.

Rezime

Rafinacija zrna je važna mogućnost za promenu mehaničkih osobina kao što su čvrstoća, duktilnost i žilavost metala šava od aluminijuma. U ovoj studiji, rafinacija zrna je postignuta dodavanjem komercijalnog rafinatora zrna Al Ti5B1 TIG-om stvorenom metalu šava aluminijumskih legura 1050A (Al 99,5) i 5083 (Al Mg4,5Mn0,7). Dodaci rafinatora zrna dovode do značajnog smanjenja veličine zrna metala šava (legura 1050A: 86%, legura 5083: 44%) uz promenu oblika zrna od stubičastog do jednakoosnog. Pri ispitivanju tvrdoće, nije pronađen odnos između tvrdoće i veličine zrna u metalu šava. Ispitivanje zatezanjem je pokazalo da kod legure 5083, duktilnost metala šava može da poraste rafinacijom zrna. Povećanje čvrstoće metala šava (odn. napon tečenja i zatezna čvrstoća) nije zapaženo. Štaviše, ispitivanje cepanjem na epruvetama sa zarezom je otkrilo da otpornost na nastanak i širenje prslina u metalu šava, može biti izmenjena preko rafinacije zrna. Za ovo povećanje žilavosti nađeno je da veoma zavisi od sastava legure i stoga od veličine, raspodele i hemijskog sastava intermetalnih faza. Prema tome, ustanovljeno je da žilavost jasno raste rafinacijom zrna u metalu šava kod komercijalno čistog metala Al (legura 1050A). Kod metala šava legure 5083, žilavost se ne povećava sa rafinacijom zrna, verovatno zbog polukontinualne mreže krutih intermetalnih faza koja olakšava širenje prslina.

1. Uvod i osnovne informacije

Rafinacija zrna je vrlo značajan mehanizam ojačavanja metalnih materijala, pored ojačavanja čvrstim rastvorom, taložnog otvrdnjavanja i deformacionog ojačavanja. Prednost finostrukture je visok napon tečenja, t.j. velika otpornost na plastičnu deformaciju. Plastična deformacija se odnosi na kretanje defekata atomske rešetke (npr. dislokacije), što rezultuje u klizanju atoma po poželjnim ravnima kristala [1]. Otuda kretanje dislokacija treba da bude sprečeno da bi se postigao visok napon tečenja. Ovo se može postići mnoštvom malih i tvrdih taloga (precipitaciono otvrdnjavanje) ili granicama zrna (ojačavanje veličinom zrna): Manja zrna, veće oblasti sa granicama zrna, stvaraju barijere za prostiranje klizanja od jednog do drugog zrna [1]. Štaviše, dislokacije se odbijaju jedne od drugih tako da svaka dislokacija zahteva određenu količinu energije za početak kretanja, iz čega proizilazi da velika gustina dislokacija, takođe povećava napon tečenja. Ovaj deformacioni mehanizam se primenjuje kod obrade metala na hladno. Dodatno, velika gustina dislokacija omogućava veći stepen plastične deformacije i tada obezbeđuje narednu značajnu prednost: veliku duktilnost. Poznato je da povećanje gustine dislokacija takođe može da bude postignuto rafinacijom zrna tokom plastične deformacije (rafinacija zrna u čvrstom stanju) [1].

Postoji nekoliko objašnjenja za mehanizam ojačavanja preko veličine zrna: *Hall* [2] i *Petch* [3] su tvrdili da se dislokacije nagomilavaju na granicama zrna proizvodeći naprezanje, koje konačno dozvoljava da se plastična deformacija širi kroz susedno zrno. Veća veličina zrna, više je izražena ako se dislokacije nagomilavaju na svakoj granici zrna, veći je lokalni napon i manja je otpornost na tečenje. *Cottrell* [4] je predvideo da nagomilavanje dislokacija na granici zrna dovodi do stvaranja Frank-Read-ovih izvora koji stvaraju naredne dislokacije, što povećava gustinu dislokacija i usled toga čvrstoću. *Li* [5] je predvideo da se dislokacije ne nagomilavaju, ali se stvaraju u tankim ispupčenjima-ivicama na granicama zrna. Štaviše, širenje plastične deformacije između dva susedna zrna zahteva više energije ako je ugao između atomskih rešetki oba zrna, veliki. Ovo naglašava potrebu za mnoštvom različito orijentisanih zrna i tako za finostrukturom [6]. Posledica toga je da granice zrna blokiraju širenje dislokacija / plastičnu deformaciju sa jedne strane, što povećava čvrstoću. S druge strane, granice zrna mogu da povećaju gustinu dislokacija nastajanjem novih dislokacija, što povećava

duktilnost. Povećanje napona tečenja ojačavanjem preko veličine zrna, može se opisati *Hall-Petch-ovom* jednačinom koja glasi

$$\sigma = \sigma_0 + k \cdot d^{-0,5} \quad (1)$$

gde su σ_0 i k parametri materijala na koje utiče sastav legure, oblik zrna i kristalogrfska tekstura [7]. σ_0 je napon trenja koji je mali za čiste metale (10 MPa za čisti Al) i raste sa porastom sadržaja elemenata u leguri (npr. 20 MPa za 99,5 tež.% Al) zavisno od ojačavanja čvrstim rastvorom [8]. k karakteriše teškoću prenosa klizanja duž granica zrna [9] i stoga predstavlja sposobnost ojačavanja preko veličine zrna za dati sistem legura. Ojačavanje preko veličine zrna, međutim, nije tako veliko kod aluminijuma, tako da je k mali za većinu Al legura (2 N/mm^{3/2} do 6 N/mm^{3/2} [9-11]) u poređenju sa 4 N/mm^{3/2} za Cu [12], 10 N/mm^{3/2} za mesing [12] i 22 N/mm^{3/2} za nelegirani čelik [13]. Štaviše, što je veća plastična deformacija, to je niži je k ; za Al, k može biti 0 pri deformaciji > 10% [8].

Sprovedene su mnoge studije o uticaju veličine zrna na mehaničke osobine Al legura. Napon tečenja Al-Mg legura može da se poveća do 25% rafinacijom zrna [14, 15]. Duktilnost se jasno povećava ali ne i zatezna čvrstoća [16]. *Hansen* [8] je potvrdio da *Hall-Petch-ova jednačina* sa ispitivanjem zatezanjem za čisti Al, opoziva jednačinu (1). On je odredio preko TEM, gustinu dislokacija u hladno valjanim limovima od čistog Al (zavisnost od veličine zrna i deformacije) i potvrdio prethodne pristupe koji uzimaju u obzir to, da granice zrna proizvode dislokacije tokom deformacije. Prema tome, mikrostruktura sa malim veličinama zrna (46 μm) proizvodi tri puta više dislokacija nego mikrostruktura sa velikim zrnima (490 μm) (pri konstantnoj deformaciji = 10%) [8]. Za 2xxx (Al-Cu), 5xxx (Al-Mg), 6xxx (Al-Mg-Si) i 7xxx (Al-Zn) legure, je utvrdio da postoje oprečni zahtevi za optimalni napon tečenja i optimalnu udarnu žilavost [17-19]: S jedne strane, veliki napon tečenja podrazumeva veliku otpornost na kretanje dislokacija. S druge strane, velika udarna žilavost podrazumeva visoku plastičnost i stoga potrebu za kretanjem dislokacija u cilju zaokruživanja prethodno postojećih prslina i otvrdnjavanja vrha prslina [18, 20]. Ipak, eksperimentalno je utvrđeno da rafinacija zrna može povećati udarnu žilavost npr. legure 7075 [18].

Efekti rafinacije zrna na mehaničke osobine TIG zavarenih spojeva, ispitivani su na taložno otvrdnutim Al legurama u nekoliko studija. Ustanovljeno je da rafinacija zrna metala šava može da promeni posebno napon tečenja i duktilnost [21-23] i u nekim slučajevima zateznu čvrstoću metala šava [24]. U jednom slučaju, tvrdoća metala šava je poboljšana rafinacijom zrna [21]. Kod postupka „friction stir“, rafinacija zrna i intenzivna plastična deformacija mogu da rezultuju u vrlo visokim vrednostima čvrstoće, duktilnosti i žilavosti Al osnovnog materijala [25].

Pored poboljšanih mehaničkih osobina, sledeća značajna prednost finostrukture metala šava od aluminijuma, je smanjena osetljivost na solidifikacione prsline kod zavarivanja topljenjem [26-29], što može biti vezano za zavarljivost osnovnog materijala [30]. Veruje se da mala zrna sa istoosnim oblikom imaju veću otpornost na širenje solidifikacionih prsline zbog raspodele naprezanja između više granica zrna [31].

Rafinacija zrna metala šava može se postići kod elektrolučno zavarenih spojeva različitim metodama kao što su tehnike pulzirajuće struje [32] ili magnetnog mešanja zavarivačke kupke [33]. Međutim, najčešće korišćeni i najefektivniji pristup u zavarivanju aluminijuma je dodatak rafinatora zrna u metal šava [21, 28, 34]. Neke komercijalne žice za zavarivanje sadrže male količine elemenata rafinatora zrna koji se često koriste kod aluminijumskih odlivaka za rafinaciju njihove mikrostrukture. Tipična legura za rafinaciju zrna je npr. Al Ti₅B₁ (Al + 5 tež.% Ti + 1 tež.% B) [35]. Titan i bor su prisutni u obliku čestica kao što su TiB₂ [36] i Al₃Ti [37] koje deluju kao jezgra heterogenog očvršćavanja tokom očvršćavanja zavarivačke kupke. Stoga, dodaci rafinatora zrna dovode do povećanja čestica TiB₂ i Al₃Ti što finalno rezultuje u rafinaciji zrna [38]. Drugi zahtev za efektivnu rafinaciju zrna je dovoljan stepen podhlađivanja radi aktiviranja prisustva čestica. Podhlađivanje se obezbeđuje udelom legirajućih elemenata u rastopu. Dodaci rafinatora zrna dovode do viška rastvorenog titana, koji bi trebalo da obezbedi najveće podhlađivanje svih elemenata [39]. Štaviše, tvrdi se da nukleacija napred pomenutih čestica zahteva manje podhlađenje nego druge čestice [40].

Do sada, međutim, nije jasno koliko je rafinatora zrna potrebno za rafinaciju mikrostrukture metala šava – zavisi od legure i uslova zavarivanja. Štaviše, literatura obezbeđuje samo nekoliko i to nekonzistentnih informacija o odnosu veličine zrna metala šava i mehaničkih osobina, posebno žilavosti. Raspoloživi podaci se samo fokusiraju na

zavarivanje topljenjem, taložno ojačanih Al legura 2xxx i 7xxx. Zbog toga se ova studija fokusira na rafinaciju zrna TIG metala šava preko dodatka rafinatora zrna kod jedne od najčešće korišćenih Al-Mg legura (Legura 5083) i – radi poređenja – komercijalno čistog Al (Legura 1050A). Ispitivan je uticaj na veličinu zrna obe legure koje se upoređuju, kao i uticaj veličine zrna metala šava na tvrdoću, napon tečenja, zateznu čvrstoću, duktilnost i žilavost.

2. Eksperiment

2.1 Materijali i uslovi zavarivanja

Obrađeni osnovni materijali korišćeni u ovoj studiji su: legura 5083 (Al Mg₄,5Mn_{0,7}, stanje H111) koja se često koristi u brodogradnji ili kao materijal posuda i komercijalno čisti aluminijum legura 1050A (Al 99,5, stanje H14). Obe legure su isporučene u obliku limova (debljina 3 mm), gde je stepen deformacionog ojačavanja srednji za leguru 1050A (½ tvrd) i mali za leguru 5083 (manje od ⅓ tvrd). Kao komercijalni rafinator zrna korišćen je Al Ti₅B₁ i ispušten je kao šipka (prečnik 9.5 mm). Hemijski sastav svih legura merenih Optičkim Emisionim Spektrometrom (ICP-OES) dat je u tabeli 1. U cilju variranja sadržaja elemenata rafinatora zrna Ti i B u metalu šava, ingoti su liveni tako da sadrže odgovarajući osnovni materijal plus dodaci Al Ti₅B₁. Svaki liveni ingot je potom mašinski obrađen na nekoliko malih umetaka (140 mm x 2 mm x 1.5 mm). Žljeb je izbušen na donjoj površini (u pravcu valjanja) kupona za zavarivanje (140 mm x 60 mm x 3 mm) koji su izrađeni iz limova osnovnog materijala. Posle toga, i umeci i kuponi su očišćeni odmaščivanjem i nagrizanjem u trajanju od 15 minuta reagensom koji se sastoji od 869 ml H₂O, 125 ml 65% HNO₃ i 6,25 ml 48% HF. Svaki umetak je postavljen u žljeb kupona i fiksiran udarcima čekićem. Tada je kupon za zavarivanje pričvršćen u držaču sa livenim umetkom sa donje strane. Deponovani liveni umetak je potpuno istopljen u jednom prolazu, TIG zavareni spoj sa potpunim provorom i parametrima pobrojanim u tabeli 2. Podloška je napravljena od bakra i korišćena je za izbegavanje nepoželjnih prokapina u korenu. U cilju obezbeđenja sličnih veličina zavara u šavu i stepena mešanja umetka, jačina struje je malo veća nego pri zavarivanju legure 1050A zbog veće termičke provodljivosti u poređenju sa legurom 5083 [41]. Više detalja o livenju i postupku zavarivanja dati su u [34].

Alloy	Chemical composition in wt.-%												
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	B	V	Zr	Al
1050A H14 (Al 99.5)	0.09	0.24	0.01	0.004	0.001	0.001	0.004	0.01	0.008	0.0003	0.01	0.001	Bal.
5083 H111 (Al Mg4.5Mn0.7)	0.25	0.40	0.74	0.58	4.57	0.09	0.01	0.07	0.027	0.002	0.006	0.002	Bal.
Al Ti5B1	0.06	0.11	-	-	-	-	-	-	4.98	0.99	0.02	-	Bal.

Tabela 1: Hemijski sastav osnovnog materijala i rafinatora zrna izmeren optičkim emisionim spektrometrom (ICP-OES).

Parameter	1050A (Al 99.5)	5083 (Al Mg4.5Mn0.7)
Current in A	180	175
Voltage in V	11.3 ± 0.2	
Polarity	AC (80% negative, 20% positive)	
Frequency	50 Hz	
Torch speed in mm s ⁻¹	4.2	
Electrode	W + 2% CeO ₂ , diameter 3.2 mm, point angle 30°	
Shielding gas	50% Ar, 50% He	
Flow rate	26 l min ⁻¹	
Distance electrode – coupon	3 mm	

Tabela 2: Parametri TIG zavarivanja korišćeni za stapanje livenih umetaka u osnovni materijal (current-jačina struje; voltage-napon; polarity-polaritet; frequency-frekvenca; torch speed- brzina pomeranja pištolja ; electrode-elektroda; shielding gas-zaštitni gas; flow rate-brzina protoka; distanceelctrode-coupon-rastojanje elektroda-kupon)

2.2 Metalografska, hemijska i SEM ispitivanja

Metalografski uzorci su pripremljeni iz sredine svakog šava da bi se dobio poprečni presek metala šava. Svaki uzorak je brušen, poliran mehanički i anodno nagrižen rastvorom koji sadrži 2% HBF₄ i 98% H₂O. Mikrografi su napravljeni na mikroskopu korišćenjem polarizovanog svetla koje pomaže kod diferencijacije zrna. Merenje veličine zrna je sprovedeno u najmanje četiri različita položaja svakog poprečnog preseka metala šava procedurom kružnog preseka prema standardu [42] a srednja vrednost za svaki metal šava je izračunata. Hemijski sastav (posebno sadržaj Ti i B) komada koji su isečeni iz zavarenih spojeva određen je pomoću ICP-OES. Neke epruvete iz ispitivanja cepanjem (videti deo 2.3) analizirane su pomoću SEM (Skenirajući Elektronski Mikroskop) u cilju ispitivanja njihove površine preloma. Za ispitivanje hemijskog sastava intermetalnih faza nekih metalografskih uzoraka korišćena je spektroskopija disperzije talasne dužine X zraka (WDS).

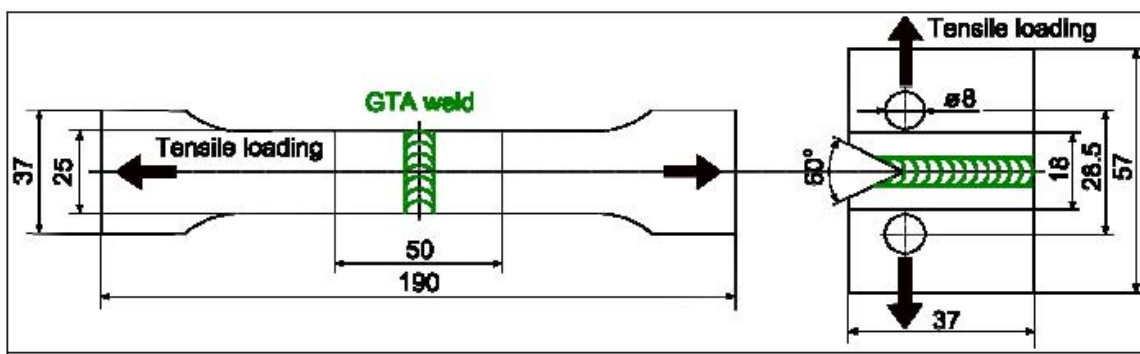
2.3 Mehanička ispitivanja

Tvrdoća nekih metalografskih uzoraka merena je metodom Vickers-a uz korišćenje ispitnog opterećenja od 0.3 kiloponda (= 3 N) za leguru 1050A i 0.5 kiloponda (5 N) za leguru 5083 da bi se omogućila slična veličina otisaka za obe legure. Takođe, glatke pljosnate epruvete za ispitivanje

zatezanjem i epruvete sa zarezom za ispitivanje cepanjem [43] izrađene su iz zavarenih kupona, videti sliku 1. U sredini ovih epruveta za ispitivanje poprečno na šav, debljina lima je smanjena glodanjem sa 3 na 2 mm sa širinom od 50 mm (epruveta za zatezanje) ili 18 mm (epruveta za cepanje) da bi se minimizirao uticaj površine šava na rezultate ispitivanja. Stvarni radijus oštrog korenog zarez (0,1mm) i rastojanje između korenog zarez i zadnje strane svih epruveta za ispitivanje cepanjem, izmerene su pre ispitivanja. Posle toga su epruvete podvrgnute opterećenju (zajedno sa epruvetama izrađenim iz osnovnih materijala) kvazistatičkom zatezanju i ispitivanju cepanjem. Brzina kretanja glave je 3 mm/min (ispitivanje zatezanjem) ili 2 mm/min (ispitivanje cepanjem) i pravac opterećenja je upravan na pravac valjanja epruveta. Optički 3D merni sistem Aramis™ je služio za merenje deformacije na gornjoj površini epruveta za zatezanje, a potom je izračunavano odgovarajuće istežanje. Posle toga je konstruisana referentna kriva napon-izduženje za izduženje u pravcu opterećenja za metal šava svake epruvete, izračunavanjem srednje vrednosti izduženja iz mnogo lokalnih mernih tačaka na površini metala šava. Zatezni napon je izračunat deljenjem zateznog opterećenja sa početnim poprečnim presekom (50 mm²) epruveta. Konačno, referentna kriva napon-izduženje je konstruisana tako da predstavlja metal šava svake epruvete za

zatezanje. Iz ovih krivih određeni su čvrstoća otpornosti ($R_{p0,2}$), zatezna čvrstoća (R_m), plastično širenje pri maksimalnoj sili (A_g) i izduženje posle loma (A). Kod nekih epruveta za

ispitivanje zatezanjem, za merenje deformacije korišćen je klipni merač (merna dužina 25 mm) u cilju upoređenja ove metode sa optičkim Aramis™ sistemom.



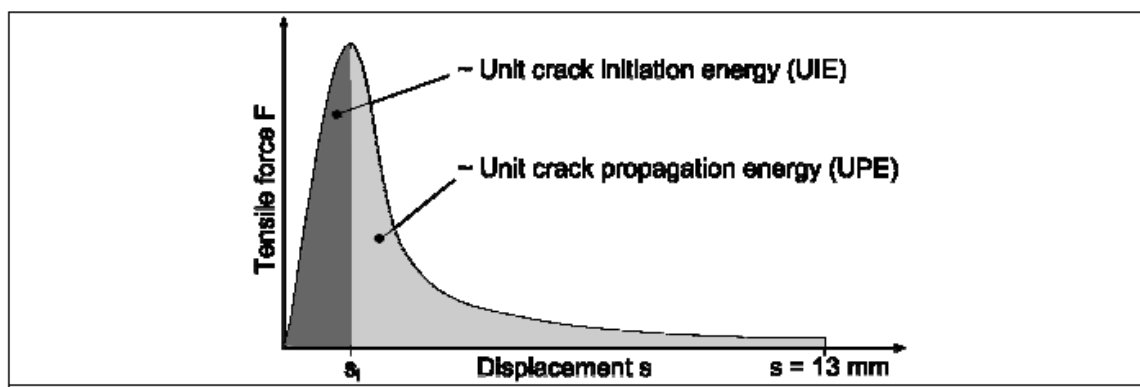
Slika 1. epruvete za ispitivanje (a) zatezanjem i (b) cepanjem (GTA weld-TIG šav; Tensile loading-zatezno opterećenje)

Procedura ispitivanja cepanjem u ovoj studiji ([43]) je poznata kao odgovarajući indikator za žilavost tankih Al limova [44]. Iz ovog razloga, takvo ispitivanje cepanjem se široko primenjuje za određivanje žilavosti zavarenog spoja u avio industriji [45, 46] gde se većina delova izrađuje od tankih Al limova (debljina: nekoliko mm). U ovoj studiji je vertikalno pomeranje između dve čivije (u pravcu opterećenja) mereno klipnim meračem (merna dužina 28,5 mm, videti sliku 1) koji je postavljen direktno na čivije. Sve epruvete su bile opterećene dok se nije proširio lom (ispitivanje zatezanjem) ili dok propagirajuća prslina nije potpuno podelila epruvetu na dva dela (ispitivanje cepanjem). Posle toga je konstruisana kriva sila-pomeranje za svaku epruvetu prema odgovarajućem standardu [43], videti sliku 2. Iz ovih dijagrama je izračunata energija potrebna za nastanak (UIE) i za širenje (UPE) prslina (kroz integrisanje) površine ispod krive sila-pomeranje:

$$UIE = \frac{1}{w \cdot t} \int_{s=0}^{s=s_i} F \cdot ds \quad (2)$$

$$UPE = \frac{1}{w \cdot t} \int_{s=s_i}^{s=13mm} F \cdot ds \quad (3)$$

gde je w širina epruvete (25 mm, rastojanje između korena zarezova i donje strane epruvete), t je debljina epruvete (2 mm), F je sila zatezanja, s je pomeranje u pravcu opterećenja i s_i je pomeranje pri nastajanju prslina. Gornja granica integrala za izračunavanje UPE izabrana je na rastojanju od 13 mm. Treba naglasiti da se prema standardu [43] smatra da prslina nastaje u momentu dostizanja maksimalne sile (F_{max}), videti sliku 2. U ovoj studiji je, međutim zapaženo da prslina ne nastaju uvek pri maksimalnoj sili, već često posle postizanja F_{max} (posebno kod legure 1050A). Iz ovog razloga, s_i je određen optičkim 3D mernim sistemom (Aramis™) i UIE i UPE su izračunate sa stvarnim vrednostima s_i .



Slika 2. Jedinične energije za nastanak i širenje prslina zavisno od sile zatezanja i pomeranja pri ispitivanju cepanjem

3. Rezultati i diskusija

3.1 Uticaj veličine zrna

Sadržaj Ti/B u metalu šava može da varira preko kontrolisanog dodatka rafinatora zrna $\text{Al Ti}_5\text{B}_1$ u livene umetke. Rezultujuća srednja vrednost

veliçine zrna u metalu šava je značajno smanjena, gde maksimalna veličina zrna opada 44% (Legura 5083) do 86% (Legura 1050A), videti sliku 3, kada

sadržaj Ti u metalu šava reprezentuje dodatke rafinatora zrna. Svaka pogrešna oznaka na slici 3 je standardno odstupanje različitih srednjih vrednosti veličina zrna koje su određene u (najmanje četiri) različita preseka za svaki metal šava. Dodaci rafinatora zrna dovode do promene oblika zrna od stubičastog do istoosnog. Efekat rafinacije zrna preko kalemljenja je opisan na više mesta [22, 28, 47, 48] za metal šava od aluminijuma; to se može objasniti 1) većim brojem aktivnih očvrsljivih nukleusa kao što su TiB_2 [36] i Al_3Ti [37] koji su prisutni u zavarivačkoj kupki tokom očvršćavanja i 2) većim stepenom podhlađenja usled sastava, koje je posebno obezbeđeno rastvorenim titanom [38]. Čak i mali nivoi dodataka $Al Ti_5B_1$ (što dovodi do sadržaja Ti < 0,05 tež.-%) rezultuju u velikom smanjenju veličine zrna, što je više izraženo kod komercijalno čistog Al (Legura 1050A) nego kod legure 5083.

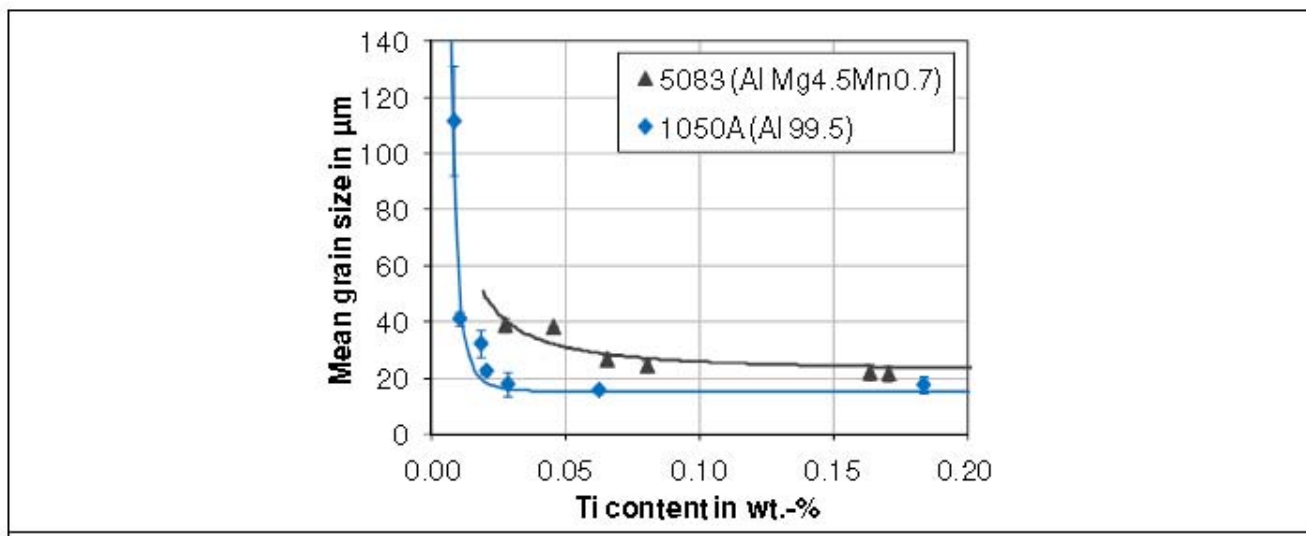
Razlozi za veći efekat rafinacije kod legure 1050A su verovatno [49]:

- Sadržaj rastvorenih elemenata: kada nisu dodati rafinatori (levi ugao na slici 3), komercijalno čisti Al (legura 1050A)

obezbeđuje vrlo sporo podhlađivanje, što rezultuje u manje aktivnim nukleusima pri očvršćavanju i zato je veća veličina zrna u poređenju sa legurom 5083.

- Interakcije TiB_2 i/ili Al_3Ti sa legirajućim elementima u osnovnom materijalu redukuju efikasnost rafinatora zrna i zato su poželjniji kod legure 5083 nego kod legure 1050A [50, 51].
- Termička provodljivost je veća kod legure 1050A (210 W/m·K) nego kod legure 5083 (110W/m·K) [41] što dovodi do 30% veće brzine hlađenja u zavarenim spojevima od 1050A [49], što povratno povećava podhlađivanje i smanjenje veličine zrna [40].

Veličina zrna u metalu šava zasićenom određenim nivoom rafinatora zrna, može se videti na slici 3. Ova minimalna veličina zrna je moguća zbog čestica Al_3Ti koje nastaju iz rafinatora zrna Ti_5B_1 i iz velikih aglomerata Al_3Ti vezanih za Ti [49]. Sledeći razlog može biti privremeni rast temeperature, usled latentne toplote koja se oslobađa preko rasta Al kristala koji umanjuju podhlađivanje i time veličinu zrna u livenoj strukturi [52].



Slika 3. Srednja vrednost veličine zrna zavisno od sadržaja Ti u metalu šava, izmereno ICP-OES. TIG zavarivanje, debljina lima 3 mm, brzina kretanja pištolja 4,2 mm/s, srednja vrednost količine unete toplote 482 J/mm

Merenja veličine zrna i srednje vrednosti veličina zrna u zoni uticaja toplote (HAZ) i osnovnom materijalu prikazana za fino-zrne zavarene spojeve od 1050A, govore da je veličina zrna u metalu šava (16 μm) čak manja nego u osnovnom

materijalu (20 μm) i HAZ (31 μm) kada rekristalizacija dovodi do povećanja veličine zrna, videti tabelu 3. To nije bio slučaj kod zavarenih spojeva od legure 5083, gde je srednja vrednost veličine zrna osnovnog materijala i HAZ bila ista.

Parameter	1050A (Al 99.5)			5083 (Al Mg4.5Mn0.7)				
	BM	HAZ	WM	BM	HAZ	WM		
Ti content in wt.-%	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.07	0.17
Mean grain size in μm	20	31	112	14	14	39	28	22

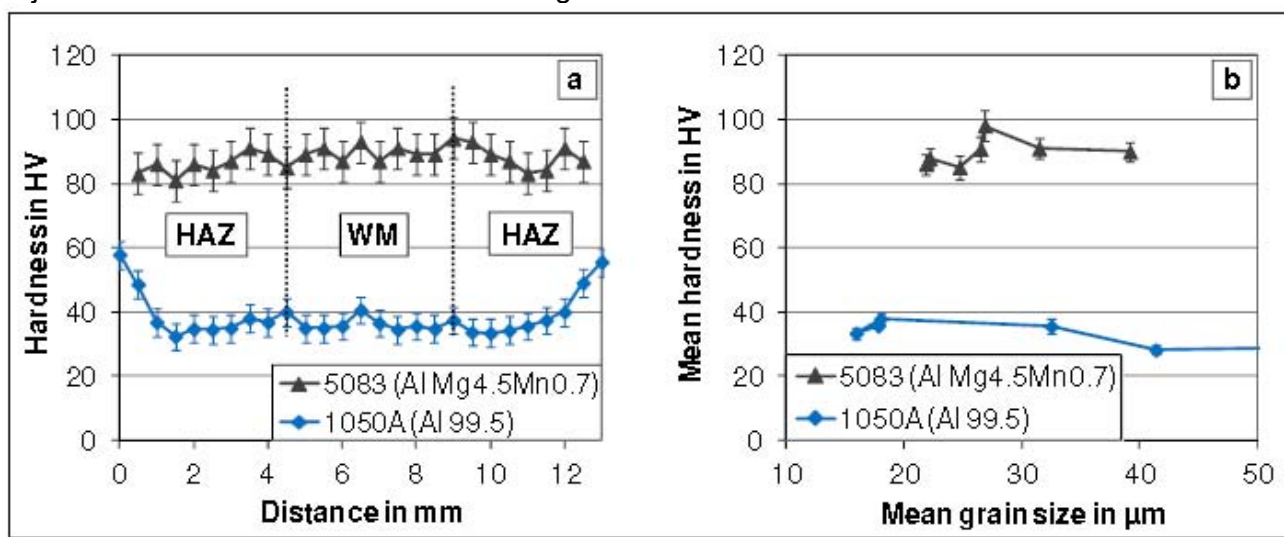
Tabela 3: Srednja vrednost veličine zrna osnovnog materijala (BM), zone uticaja toplote (HAZ) i metala šava (WM) zavisno od sadržaja Ti

Rafinacija zrna u metalu šava od aluminijuma može da smanji osetljivost metala šava na solidifikacione prsline i time poboljša zavarljivost [26, 28]. Ovo je prikazano u prethodnoj studiji, gde je nastanak solidifikacionih prsline po centralnoj liniji u TIG zavarenim spojevima kod legure 6082 (Al Si1MgMn), osetljive na solidifikacione prsline, sprečen rafinacijom zrna [29]. Zbog odlične zavarljivosti legura 1050A i 5083, ova studija se fokusira na uticaj veličine zrna u metalu šava na mehaničke osobine.

3.2 Tvrdoća

Na slici 4a prikazan je profil tvrdoća po Vickersu tipičnog zavarenog spoja legure 1050A (sa srednjom vrednosti veličine zrna metala šava od 18 μm) i za leguru 5083 (39 μm). Pogrešne oznake indikuju standardno odstupanje pojedinačnih merenja tvrdoće u metalu šava i HAZ svake legure.

Kao što se i očekivalo, tvrdoća zavarenih spojeva od legure 1050A je mnogo manja nego kod zavarenih spojeva od legure 5083. Tvrdoća osnovnog materijala je određena kao HV 59 (Legura 1050A) i HV 84 (Legura 5083) i tvrdoća metala šava i HAZ su određene kao slične za svaku leguru. Zbog toga, prema tabeli 3, različita veličina zrna HAZ (31 μm , poziv na tabelu 3) i metal šava (18 μm , videti sliku 4a) za zavarene spojeve od legure 1050A nije loše uticala na odgovarajuće tvrdoće. Slika 4b potvrđuje da srednja vrednost veličine zrna u metalu šava nema značajan uticaj na srednju vrednost tvrdoće metala šava – nasuprot velikoj razlici u odgovarajućim veličinama zrna, pozivanje na sliku 3. Prethodna studija je utvrdila malo povećanje tvrdoće sa smanjenjem veličine zrna kod TIG metala šava taložno ojačanih Al legura 7020 [21].



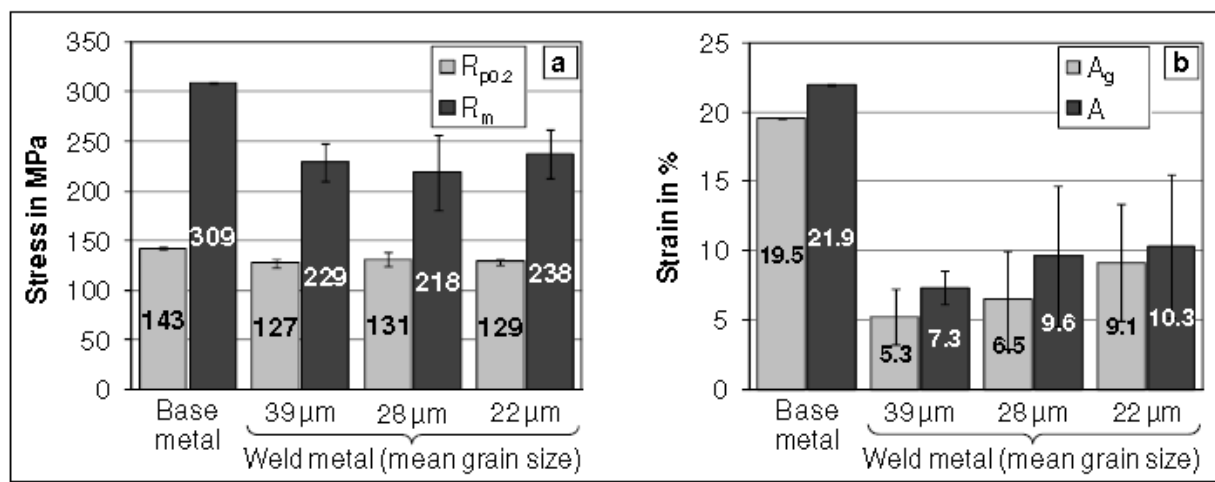
Slika 4. a) tvrdoća zone uticaja toplote (HAZ) i metala šava (WM) pri veličini zrna od 18 μm (1050A) i 39 μm (5083) i b) srednja vrednost tvrdoće metala šava zavisno od srednje vrednosti veličine zrna. TIG zavarivanje, debljina lima 3 mm, brzina kretanja pištolja 4,2 mm/s, srednja vrednost količine unete toplote 482 J/mm

Mora se napomenuti da opterećenje pri ispitivanju tvrdoće stvara otiske dovoljne veličine (prečnik oko 100 μm) da bi se dozvolilo poređenje merenja tvrdoće u zavarenim spojevima sa grubom veličinom zrna (srednja vrednost veličine zrna npr. 100 μm) i finom veličinom zrna (srednja vrednost veličine zrna npr. 16 μm).

3.3 Čvrstoća i duktilnost

Na slici 5 prikazani su rezultati ispitivanja zatezanjem za leguru 5083 na epruvtama izrađenim od osnovnog materijala ili zavarenih spojeva različite srednje vrednosti veličine zrna. Svaka vrednost je srednja vrednost 5 različitih ispitivanja zatezanjem. Ustanovljeno je da su parametri čvrstoće, granica otpornosti ($R_{p0,2}$) i zatezna čvrstoća (R_m) osnovnog materijala veći nego kod metala šava, pri čemu veličina zrna ne

pokazuje uticaj na parametre čvrstoće, videti sliku 5a. Lom usled zatezanja koji se javlja u epruvtama od osnovnog materijala je uvek u pravcu maksimalnog napona smicanja odnosno u ravni pod 45° na pravac opterećenja. U zavarenim epruvtama, lom se uvek javlja u metalu šava i ravni pod 90° na pravac opterećenja. Odgovarajući parametri izduženja, plastičnog širenja pri maksimalnoj sili (A_g) i izduženja posle loma (A) prikazani su na slici 5b. Oba izduženja su mnogo manja u metalu šava nego u osnovnom materijalu, pri čemu smanjenje srednje vrednosti veličine zrna u metalu šava dovodi do značajnog povećanja vrednosti izduženja. Prema tome, rafinacija zrna je izmenila duktilnost metala šava od legure 5083 ali ne i njegovu čvrstoću



Slika 5. Granica otpornosti $R_{p0,2}$ i zatezna čvrstoća R_m (a) i plastično širenje pri maksimalnoj sili A_g i izduženje nakon loma A (b) osnovnog materijala i metala šava pri različitim veličinama zrna kod ispitivanja zatezanjem. TIG zavarivanje, debljina lima 3 mm, brzina kretanja pištolja 4,2 mm/s, srednja vrednost količine unete toplote 482 J/mm

Slika 5a podržava mišljenje da je ojačavanje preko veličine zrna uporedivo manje u Al legurama [9-11]. Štaviše, rezultati sa obe slike 5 a i b potvrđuju prethodne studije o TIG zavarenim spojevima sa rafinisanim zrnima koje izveštavaju za 2xxx i 7xxx Al legure da postoji samo mali uticaj veličine zrna na čvrstoću i napon tečenja i izražen efekat deformabilnosti [21-23]. Sledeći razlog za poboljšanje duktilnosti (videti sliku 5b) može biti sprečavanje dugačkih perjastih zrna koja smo pronašli u grubozrnom ali ne i u finoizrnom metalu šava 5083 [34]. Takvi dvojnički kristali se često javljaju u livenim strukturama 5083 [40], kada mogu da oslabe mehaničke osobine [53].

Razlog velikom padu duktilnosti od epruveta iz osnovnog materijala ka zavarenim epruvetama (poziv na sliku 5b) može biti uvećan usled gubitka elemenata tokom zavarivanja: Hemijska analiza metala šava je pokazala da je znatan deo Mg (pribl. 10%) i Si (pribl. 25%) izgubljen tokom TIG zavarivanja – verovatno usled isparavanja i nezavisnog povećanja sadržaja Ti ili veličine zrna. Ovo može da smanji deformabilnost metala šava. Pogrešne oznake (posebno na slici 5b) su verovatno usled nehomogenosti u metalu šava kao što su pore, segregacije i varijacije u lokalnoj veličini zrna (poziv na pogrešne oznake na slici 3) koje se ne mogu izbeći u postupcima zavarivanja topljenjem. Shodno tome, merenje deformacije optičkim Aramis™ sistemom je potvrdilo da većina epruveta za ispitivanje zatezanjem ima lokalne pikove plastične deformacije u metalu šava. Ove loše tačke imaju malu čvrstoću što rezultuje u eventualno ranom lomu cele epruvete. Takođe, ovo zapažanje je dodatno objašnjeno za pad duktilnosti na slici 5b. Pored toga, slika 5b jasno pokazuje

pozitivan uticaj rafinacije zrna na duktilnost zavarenih spojeva od legure 5083.

Kod nekih epruveta za zatezanje, obavljena su komparativna merenja deformacije pomoću klipnog merača (merna dužina 25 mm). Rezultati su potvrdili vrlo male razlike između obe metode (klipni merač i optički sistem Aramis™); razlike u izduženju su bile samo do 0,3%, što je ekvivalentno relativnoj grešci od 2%.

Obe metode i klip i Aramis™ su takođe korišćeni za leguru 1050A pri ispitivanju zatezanjem epruveta iz osnovnog materijala i metala šava. Kao rezultat, srednje vrednosti za osnovni materijal 1050A su bile 108 MPa ($R_{p0,2}$), 122 MPa (R_m) i 13% (A), određene klipnim meračem. Ove vrednosti su u zavisnosti od stepena hladne obrade ($\frac{1}{2}$ tvrd) limova od 1050A. Nasuprot leguri 5083, sve zavarene epruvete za zatezanje od 1050A su se polomile u HAZ (90° u odnosu na pravac opterećenja) gde je plastična deformacija bila najveća. Razlog za ovaj način loma je rekristalizacija HAZ tokom zavarivanja (videti deo 3.2) što rezultuje u gubitku efekta obrade na hladno kao i u povećanju veličine zrna (poziv na tabelu 3). Tako je najgori deo zavarenih spojeva od 1050A bio HAZ – čak i merenja tvrdoće (poziv na sliku 4) to nisu jasno indikovala. Posledica toga je da ni parametri čvrstoće, ni parametri izduženja za metal šava od legure 1050A nisu određeni. Rezultati iz ispitivanja zatezanjem su pokazali da je primarni mehanizam ojačavanja u leguri 1050A, ojačavanje preko veličine zrna, dok je kod legure 5083 to ojačavanje preko čvrstog rastvora.

-Kraj 1. dela

NASTAVAK U SLEDEĆEM BROJU



TREĆI ZAVARIVAČKI KONGRES MEĐUNARODNOG INSTITUTA ZA ZAVARIVANJE ZEMALJA JUGOISTOČNE EVROPE

U terminu od 3. do 5. juna 2015. godine, u Regionalnom poslovnom centru u Temišvaru (Rumunija), održan je treći IIW Kongres zemalja jugoistočne Evrope - "The 3rd IIW South – East European Welding Congress" sa osnovnom temom "Zavarivanje i spajanje za održivi razvoj i zaštitu životne sredine".

Kongres je organizovan pod pokroviteljstvom Međunarodnog instituta za zavarivanje – (International Institute of Welding – IIW). Organizatori Kongresa bili su Institut ISIM iz Temišvara (National R&D Institute for Welding and Material Testing) u partnerstvu sa Društvom za zavarivanje Bugarske (Bulgarian Welding Society - BWS), Društvom za zavarivanje Rumunije (Romanian Welding Society - ASR), Društvom za unapređivanje zavarivanja u Srbiji (DUZS) i Zavodom za zavarivanje AD Beograd. Institut ISIM je ovom prilikom obeležio 45 godina postojanja.

Kongres je zvanično otvoren 3. juna 2015. godine, svečanom ceremonijom u zgradi Opere u Temišvaru. Dobrodošlicu je poželeo dr Alin Constantin Murariu, generalni direktor ISIM-a i predsednik Organizacionog odbora kongresa, nakon čega je usledilo tradicionalno "The Jaeger Lecture" predavanje – tj. uvodno predavanje kojim se uvek otvaraju IIW regionalni kongresi, nazvano po prof. Jaegeru iz Holandije, jednom od osnivača IIW-a i velikom poborniku međunarodne saradnje. Ovoga puta uvodno predavanje sa temom "**Structural Integrity. A Probabilistic Perspective**" održao je Prof. Dragoș Dumitru Cioclov, jedan od najcenjenijih rumunskih stručnjaka u oblasti zavarivanja i ispitivanja materijala.



Naučni program kongresa se odvijao u Regionalnom poslovnom centru u Temišvaru. Prezentovano je 57 radova, od čega 20 potpisuju autori iz Srbije. Prisustvovalo je više od 200 učesnika iz 23 zemlje (Australija, Austrija, Belgija, Bosna i Hercegovina, Bugarska, Kanada, Češka, Nemačka, Mađarska, Italija, Izrael, Japan, Pakistan, Poljska, Portugal, Rumunija, Srbija, Slovenija, Španija, Švajcarska, Turska, Velika Britanija i SAD).

Radni deo je počeo u četvrtak, 4. juna, pre podne Plenarnom sesijom, na kojoj je bilo izloženo 7 predavanja, po jedno iz Australije, Švajcarske, Portugala, Rumunije, Srbije, Bugarske i Slovenije.

Iz Srbije je pozivno predavanje održao dr Vencislav Grabulov sa naslovom "47 godina razvoja mehanike loma i ocene integriteta konstrukcija u regionu".

U nastavku su održane paralelne sesije: **Integritet konstrukcija** – posvećena uspomeni na prof. Stojana Sedmaka, **Postupci spajanja** i **Upravljanje kvalitetom**.





U petak, 5. juna, usledio je nastavak programa kroz paralelne sesije: **Integritet konstrukcija**, **Postupci spajanja** i **Upravljanje kvalitetom** i kraj rada Kongresa.

PRATEĆI PROGRAM:

Kao prateći program regionalnog IIW kongresa održane su dve radionice, Međunarodna konferencija o integritetu zavarenih konstrukcija, Međunarodni sajam zavarivanja i poslovni susreti

- Workshop - National Welding Capability

Kao jedna od pratećih manifestacija održana je Radionica po temi "Nacionalni kapaciteti u zavarivanju". Radionica je održana 3. juna. Glavni cilj je bio da svaka zemlja iz regiona analizira i oceni situaciju u pogledu zavarivačkih kapaciteta u svojoj zemlji, identifikuje buduće zadatke i pripremi akcioni plan za jačanje svojih zavarivačkih kapaciteta. Za ovu temu je zadužena Radna grupa za regionalne aktivnosti Borda direktora IIW-a, zajedno sa Komisijom XIV. Moderator je bio Chris Smallbone, direktor u Bordu direktora IIW iz Australije inače bivši predsednik IIW.

Diskutovalo se o nacionalnim kapacitetima u Rumuniji, Bugarskoj i Srbiji. U diskusiji su učestvovali, pored predstavnika ove tri zemlje iz regiona i dva visoka zvaničnika IIW: Dr Sorin Keller direktor u bordu direktora Međunarodnog instituta za zavarivanje i Prof.Dr. Luisa Countinho iz IAB grupe IIW.

- Workshop - Pipeline Construction & Meeting of the IIW Sub-commission XI-E Transmission Pipelines

Radionica je održana 5. juna, uz podršku Sub-Komisije XI E Međunarodnog instituta za zavarivanje (IIW). Moderator je bio Christoph Gerritsen - ArcelorMittal Global R&D Gent iz Belgije.

- 11 th International Conference Structural Integrity of Welded Structures (ISCS15)

Konferencija je održana 5. Juna kao posebna sesija IIW kongresa. Prezentovano je 46 naučnih radova. Autori su izložili rezultate istraživanja koja su sprovedli u okviru svojih instituta i univerziteta iz Rumunije, Srbije, Bugarske, Češke i Izraela.

- International Fair 2015 - Innovation in Welding and NDT

Tokom Kongresa (3-5. juna) u prizemlju Regionalnog poslovnog centra (CRAFT) organizovan je izložbeni sajam na kome je 17 izlagača predstavilo svoje proizvode i usluge iz oblasti zavarivanja i srodnih postupaka. DUZS je imao svoj štand i priliku da predstavi svoje aktivnosti.

- B2B Meetings (Business to Business Meetings)

Tokom Kongresa (4.-5. juna) učesnici koji su se unapred prijavili, imali su priliku da se upoznaju i razgovaraju sa potencijalnim saradnicima. Cilj je bio da se potencijalni poslovni saradnici upoznaju, uspostave kontakt i razmene iskustva.

Predstavnici DUZS su imali nekoliko sastanaka sa kompanijama iz Rumunije i Bugarske koje su izrazile interes da sarađuju sa DUZS u delu ispitivanja tržišta za usluge u oblasti zavarivanja.



Konačna ocena je da je Treći regionalni kongres međunarodnog instituta za zavarivanje koji se odnosio na zemlje jugoistočne Evrope bila veoma uspešna manifestacija koja je opravdala i najzahtevnija očekivanja bilo u stručnom, naučnom i organizacionom smislu.

Doprinos učesnika iz Srbije, bilo učesnika Kongresa sa radovima ili kao deo organizacionih struktura je bio veoma zapažen. Očekuje se da će se sledeći Kongres ovakvog tipa održati u Srbiji.

Dr Vencislav Grabulov, dipl.ing. IWE



*Kokeza Nenad dipl.inž.maš

TEHNOLOGIJA ZAVARIVANJA

TRAVERZE

Stručni rad / Professional paper**Adresa autora / Author's address:**

* Lohr Bačka Topola d.o.o.

Rad primljen / Paper received:

Jul 2015.

Ključne reči: TIG, zavarivanje, raznorodni čelici, metode ispitivanja zavarenog spoja**Abstract:** TIG, welding, dissimilar steels, methods of welded joints testing**APSTRAKT**

Predmet ove tehnologije je uputstvo za zavarivanje traverze. Osnovni materijal za izradu konstrukcije je čelik kvaliteta S690QL. Radi obezbeđenja

zahtevanog kvaliteta zavarenih spojeva u celini, potrebno je zavarivanje izvesti u skladu sa standardom EN 15085 -1 do 5 koji uzima u obzir posebne zahteve zavarivanja željezničkih vozila.

OSNOVNI MATERIJAL

Za izradu čelične konstrukcije koristi se konstrukcioni čelik visoke čvrstoće S690QL (EN

10025 -6), čiji su hemijski sastav i mehaničke osobine prikazane u tabelama 1 i 2.

Oznaka po EN 10025 -6	C max [%]	Si max [%]	Mn max. [%]	P max [%]	S max [%]	N max [%]	B max [%]	Cr max [%]
S690QL	0,20	0,80	1,70	0,020	0,010	0,015	0,0050	1,50
	Cu max [%]	Mo max [%]	Nb max. [%]	Ni max [%]	Ti max [%]	V max [%]	Zr max [%]	-
	0,50	0,70	0,06	2,0	0,05	0,12	0,15	-

Tabela broj 1. Hemijski sastav osnovnog materijala

Red. br.	Oznaka čelika	Gornji napon tečenja R_{eH} min [N/mm ²]	Zatezna čvrstoća R_m [N/mm ²]	Izduženje A_5 min %	Žilavost KV min[J]
1.	S690QL	690	770+940	24	30 (-40°C)

Tabela broj 2. Mehaničke osobine

Čelik S690QL (EN 10025 - 6) pripada grupi čelika visoke čvrstoće . U principu, svi sitnozrni čelici imaju dobru zavarljivost. Kod kaljenih i otpuštenih sitnozrnih čelika legirajući elementi Cr, Mn, Ni, Mo snižavaju kritičnu brzinu hlađenja. Pošto se obavlja višeslojno zavarivanje, predgrevanje se izbegava održavanjem dovoljno visoke međuslojne temperature prolaza i korišćenjem odgovarajućeg redosleda zavarivanja, a u skladu sa preporukom SRPS EN1011-2 : 2007. Mogućnost izbegavanja predgrevanja održavanjem visoke međuslojne temperature ne zavisi samo od uslova proizvodnje, već i od hemijskog sastava čelika koji

se zavaruje (CET – ekvivalent ugljenika) i temperature predgrevanja.

Ekvivalent ugljenika (CET)

Prema standarda SRPS EN 1011-2 : 2007, uticaj hemijskog sastava na pojavu hladnih prslina okarakterisan je ekvivalentom ugljenika CET

$$CET = C\% + (Mn\% + Mo\%) / 10 + (Cr\% + Cu\%) / 20 + Ni\% / 40$$

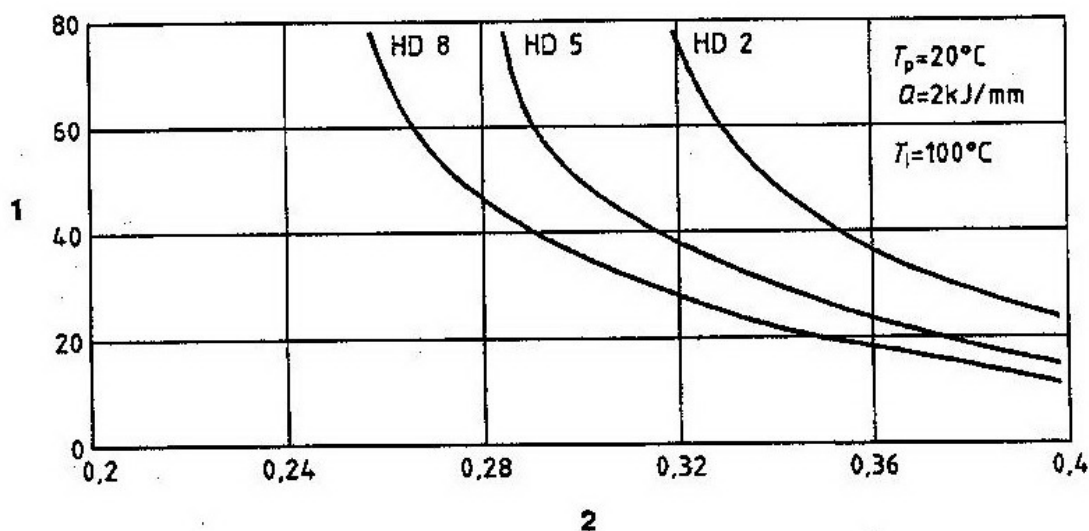
$$CET = 0,20 + (1,7 + 0,7) / 10 + (1,50 + 0,50) / 20 + 2,0 / 40 = 0,6$$



Temperatura predgrevanja

Prema standardu SRPS EN 1011-2:2007; sa slike 1), moguće je odrediti graničnu debljinu lima u

zavisnosti od sadržaja legirajućih elemenata i sadržaja vodonika u metalu šava, a u cilju izbegavanja predgrevanja održavanjem međuslojne temperature 100°C.



Na slici je:

- 1 debljina lima d u mm
- 2 ekvivalent ugljenika CET u %

Slika 1) Zavisnost granične debljine lima u zavisnosti od sadržaja legirajućih elemenata i sadržaja vodonika u metalu šava

Sklonost ka pojavi hladnih prslina

Jedan od pokazatelja povećane krutosti usled fazno-strukturnih promena, a time i sklonosti ka pojavi hladnih prslina, je tvrdoća čelika (HV) u zoni uticaja toplote (ZUT). Smatra se da u slučaju većine konstrukcionih čelika neće doći do formiranja krutih faza ukoliko tvrdoća ne prelazi vrednost $HV = 350$. Na osnovu hemijskog sastava konstrukcijskog čelika i empirijske formule moguće je odrediti vrednosti tvrdoće HV

$$HV = 90 + 1050 \times C + 47 \times Si + 75 \times Mn + 30 \times Ni + 31 \times Cr$$

Zamenom procentualnih masenih sadržaja hemijskih elemenata iz tabele 1

$$HV = 90 + 1050 \times 0,20 + 47 \times 0,80 + 75 \times 1,70 + 30 \times 2,0 + 31 \times 1,5$$

dobija se $HV = 571,6 > 350$

Na osnovu vrednosti HV, čelik S690QL je sklon pojavi hladnih prslina.

POSTUPAK ZAVARIVANJA

Na osnovu podataka o mehaničkim karakteristikama osnovnog materijala, izvođenja

zavarivanja u hali, kao i na osnovu dimenzija žlebova uslova i mesta zavarivanja, za izvođenje zavarivanja koristeće se postupak MAG (oznaka prema ISO 4063):

135– elektrolučno zavarivanje punom žicom u zaštiti gasa, koji nije inertan.

Sitnozrni čelici se zavaruju svim elektrolučnim postupcima. U odnosu na E postupak, MAG ima prednost zbog jednostavnijeg upravljanja procesom kontrolisanja količine unete toplote preko brzine zavarivanja. Ovo je način da se u ovom slučaju ne primenjuje predgrevanje.

UREĐAJ ZA ZAVARIVANJE

Za zavarivanje postupkom **135** treba koristiti poluautomate sa mogućnošću regulacije struje u dijapazonu potrebnom za zavarivanje i odgovarajućom intermitencom. Aparati za zavarivanje treba da su provereni i ispravni za rad. Izabran je SAF MIF 400 BLX.



Slika 2) Aparat za zavarivanje SAF MIF 400 BLX.

Napajanje - trofazna naizmjenična struja	230V/400V - 50 Hz
Nominalni napon otvorenog strujnog kola.....	16,6 do 45,8 V
Struja zavarivanja.....	28 do 380 A
Intermitenca na 45 %.....	380 A (40%)
Intermitenca na 60 %.....	320 A
Intermitenca na 100%.....	280 A
Dimenzije.....	925x580x1060 mm
Masa.....	161 kg
Klasa izolacije transformatora.....	H
Klasa zaštite	IP 23
Standard.....	EN 60974-1

DODATNI MATERIJAL

Za zavarivanje postupkom **135** odabrana je žica uporedna klasifikacija po standardima **AWS** i **EN ISO**.
oznake po **AWS 5.18 : ER70S-3**. U tabeli 3 data je

Standard	AWS A 5.18	EN ISO 14341-A	EN 440
Žica	ER70S-3	G 42 3M21 2Si	G2Si

Tabela 3) Klasifikacija žice za MAG postupak 135.

Zavarivanje se vrši u zaštiti mešavine gasova Ferroline C18 (82%Ar+18%CO₂) gasova Ferroline C18 (klasifikacija M21 prema EN ISO 14175). Pri zavarivanju u zaštiti mešavine izabrana žica daje metal šava čije su karakteristike navedene u tabeli 4) i tabeli 5).

Žica	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Ni [%]	Cr[%]	Mo[%]
G 42 3M21 2Si	0,06-0,14	0,50-0,8	0,9-1,3	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15
	V[%]	Cu[%]	Al[%]	Ti+Zr [%]		-	-	-
	0,03	0,35	0,02	0,15		-	-	-

Tabela 4) Hemijski sastav metala čistog šava

Žica	Gornji napon tečenja R _{eH} min[N/mm ²]	Zatezna čvrstoća R _m [N/mm ²]	Izduženje A ₅ min %	Žilavost KV min[J]
G 42 3M21 2Si	420	500÷640	20	80(-20°C)

Tabela 5) Mehaničke karakteristike metala čistog šava

Komercijalna oznaka žičane elektrode je : IS-5

G2Si 1.2 B300 16 PLW CO

Proizvođač: ISAF

Prečnik : Ø 1,2 (mm)



PARAMETRI ZAVARIVANJA

Za zavarivanje koristiti jednosmernu struju obrnute polarnosti. Osnovni parametri zavarivanja dati su tehnološkim listama za oba spoja. Izbor parametara

Prečnik elektode d(mm)	Ø 1,2mm
Napon (V)	28-30
Jačina struje (A)	250-275
Brzina dodavanja žice (m/min)	8,0-10,0
Protok gasa (l/min)	18

Zavarivač pri izboru jačine struje zavarivanja mora imati u vidu da sa većom jačinom struje postiže veći učinak ali su gubici zbog rasprskavanja i greške u zavaru veće, a kod premalih struja mogu se javiti greške tipa uključaka, nalepljivanja i sl.

PRIPREMA OSNOVNOG MATERIJALA ZA ZAVARIVANJE

Priprema osnovnog materijala za zavarivanje sastoji se iz gasnog sečenja, mašinske obrade za izradu žljeba odgovarajućeg oblika i dimenzija, prema radioničkoj dokumentaciji i tehnologiji zavarivanja, kao i čišćenja i brušenja.

Priprema pozicija

Žljebovi se pripremaju mašinski. Dimenzije žljebova su prikazane u tehnološkim listama i rade se u

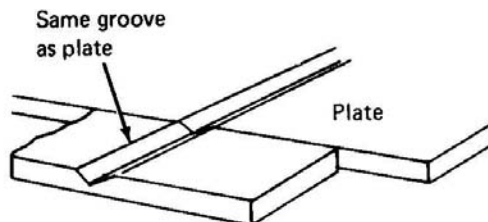
baziran je na preporuci proizvođača dodatnog materijala i podacima iz literature. Za izvođenje zavarivanja koristimo u žicu Ø 1,2mm.

skladu sa standardom EN ISO 9692-1. Čelične površine na kojima se zavaruje moraju biti suve i bez vlage od kondenzacije.

Priprema radnog komada

Pre početka zavarivanja mora se izvršiti pregled površina koje se zavaruju. One moraju biti metalno čiste (očišćene od vode, ulja, masti, boje, rđe) u širini od 30 mm sa obe strane žleba.

Elementi koji se spajaju zavarivanjem moraju se dovesti u odgovarajući geometrijski položaj. U ovom slučaju, neophodno je da se sa zavarivanjem počne na tzv. startnim pločicama, sl.3). Time se izbegavaju sve greške, inače tipične, u početku rada npr. pri uspostavljanju luka. Ista tehnika se primenjuje i pri zaustavljanju procesa, tj. na kraju ploča koje se zavaruju.



Slika 3. Startne pločice

Pripajanje pozicija izvodi se pod istim uslovima zavarivanja kao i koreni prolaz. Pripajanje radnih komada vrše, isključivo, atestirani zavarivači koji su dužni da poštuju sledeće:

- 1) Svi pripoji moraju biti obrušeni ili pretopljeni. Uspostavljanje luka pri zavarivanju dozvoljeno je samo na startnim pločicama.
- 2) Kapljice rastopljenog materijala u okolinu zavarenog spoja i prokapine koje nastaju za vreme zavarivanja moraju se obrusiti. Nastavljanje zavara izvodi se nakon obaveznog prethodnog čišćenja već položenog zavara.

Radni uslovi i položaji za izvođenje zavarenog spoja

Potrebno je obezbediti zaštitu od promaje, zbog zaštitnog gasa. Na radnom mestu ne sme da ima vode. Električni priključci treba da su u ispravnom stanju. Zavarivanje izvodi se u najpovoljnijem položaju (PA) položaju.

PLAN I REDOSLED ZAVARIVANJA

Površine elemenata u zoni spajanja moraju biti suve i čiste. Postavljanje elemenata u položaj za zavarivanje obavlja se u alatima i uređajima bez pripojnih zavara ili sa pripojnim zavarima u kom slučaju se u toku zavarivanja pripojni zavari moraju odstraniti mehaničkim postupkom žlebljenja. Prilikom postavljanja elemenata treba voditi računa da zazor po konturi elemenata budu kontinualni po celom obimu.

Zavarivanju se pristupa tek pošto su ispoštovani svi napred navedeni uslovi. Zavarivanje se vrši po pozicijama u skladu sa tehničkom dokumentacijom i sa tehnologijom zavarivanja datom na tehnološkim listovima (WPS) u prilogu.

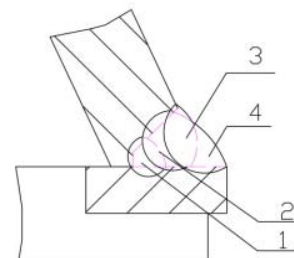
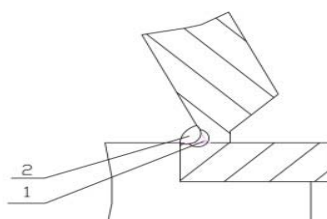
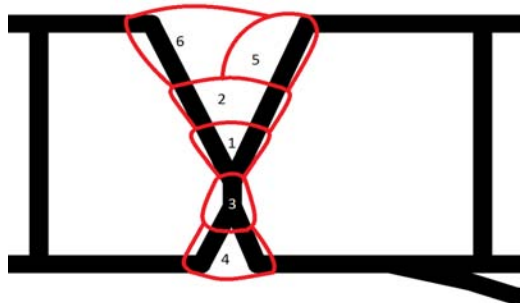
Redosled zavarivanja je takodje dat u **tehnološkom postupku** koga se zavarivač mora pridržavati, kako bi se sprečilo unošenje velike količine toplote, koja može negativno da utiče na kvalitet zavarenog spoja.



Pre sklapanja delovi moraju biti očišćeni od viška masnih naslaga i oksida na svim površinama koji se zavaruju. Potrebno je očistiti ih, odmastiti i izbrusiti.

Zavarivanje i pripajanje se vrše u PA i PB položaju. Rotirati alat svaki put kada je neophodno obezbediti bolji položaj pri zavarivanju ili pripajanju.

➤ Šeme redosleda prolaza :



Slika 4) Šeme redosleda zavarivanja

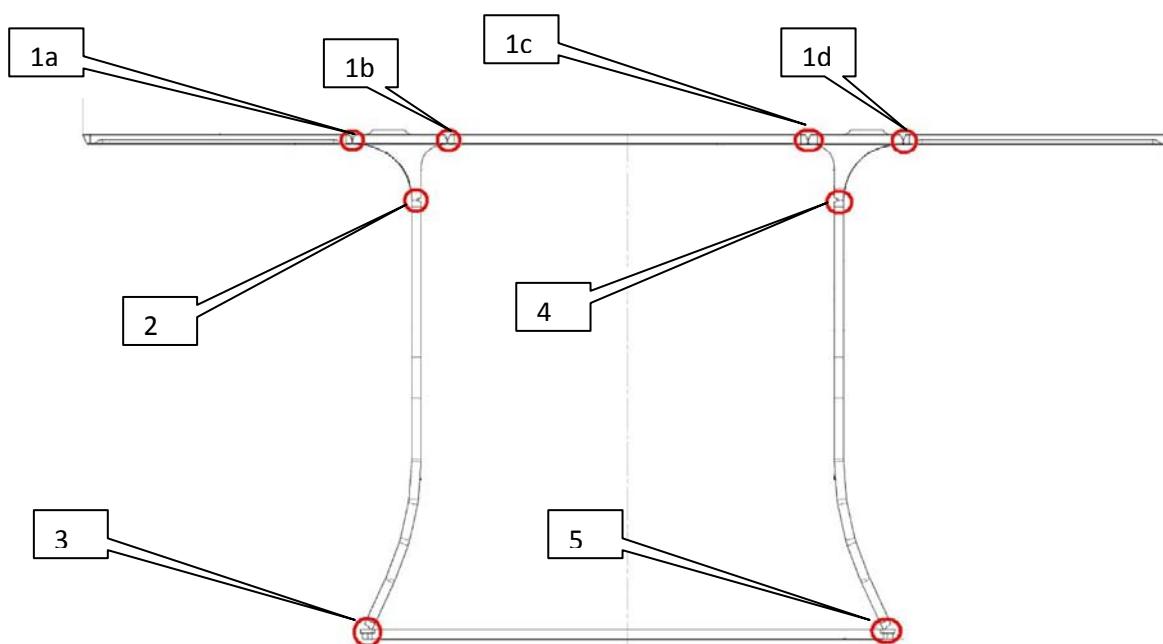


Nakon pritezanja i pripajanja startnih pločica, proveriti sve dimenzije u alatu. Ukoliko su sve mere odgovarajuće, početi zavarivanje u šablonu. Pre zavarivanja potrebno je očistiti žleb koji se zavaruje. Potrebno je podesiti parametre zavarivanja za prvi prolaz i voditi računa da energija bude u zadatim tolerancijama.

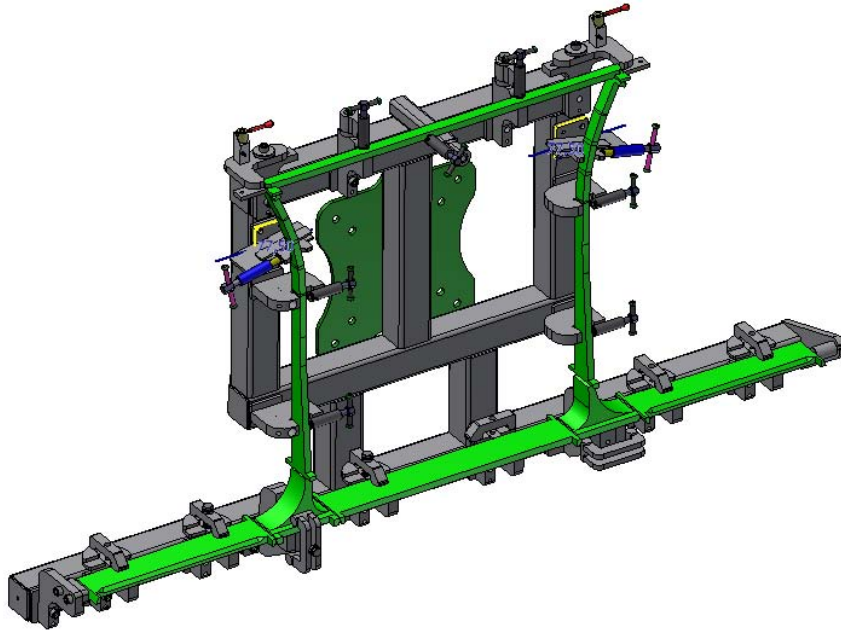
Slika 5. Provera dimenzija pre zavarivanja

Zavarivanje izvršiti prema redosledu na slici 11). Radni komad pritegnuti u alatu. Sve šavove zavariti u horizontalnom položaju. Voditi računa o

redosledu zavarivanja i o parametrima zavarivanja prema WPS za svaki zavar. Vršiti kontrolu pre, za vreme i posle zavarivanja.



Slika 6. Redosled zavarivanja



Slika 7. Traverza u alatu za zavarivanje

Kontrola kvaliteta izrade zavarenih spojeva krovne čelične konstrukcije i zavarivanja pri sklapanju iste se izvodi kroz 3 faze:

- Kontrola pre zavarivanja
- Kontrola u toku zavarivanja
- Kontrola posle zavarivanja

Kontrola pre zavarivanja obuhvata sledeće aktivnosti:

- Geometrije elemenata za ugradnju;
- Čišćenja delova u zoni zavarenog spoja;
- Funkcionalnosti aparata za zavarivanje;
- Provera protoka zaštitnog gasa;
- Provera žice za zavarivanje;
- Geometriju žlebova za zavarivanje;
- Sertifikate potrošnog materijala;
- Sertifikate zavarivača;

Kontrola u toku zavarivanja

Provera primene propisanih elemenata tehnologije

- Propisane parametre zavarivanja;
- Brušenje radi čišćenja nakon svakog prolaza;
- Pridržavanje potrebnog redosleda zavarivanja;
- Čišćenje prethodno izvedenih zavarenih spojeva;

Kontrola nakon zavarivanja

Posle zavarivanja izvršiti sledeću kontrolu spojeva u skladu sa standardom EN 1090:

- Vizuelni kontrolu zavarenih spojeva u obimu 100%;

- Geometrijsku kontrolu svih šavova i elemenata koji se spajaju zavarivanjem, u obimu 100%;
Kontrola ultrazvukom (UT) svih sučeonih zavarenih spojeva, prema zahtevu kupca.

Kriterijum prihvatljivosti grešaka u zavarenim spojevima prema standardu EN ISO 5817 odnosno EN 15085 prema CPC2 i CPC3 kvalitetu zavarenih spojeva. O izvršenoj kontroli prikupiti izveštaje.

Popravka grešaka nakon zavarivanja

Nedopustive greške nastale pri zavarivanju moraju se popraviti. U tom smislu merodavan je kriterijum prihvatljivosti prema EN 15085. Ponovno zavarivanje radi popravljavanja se vrši prema WPS listi za popravljani zavar.

Spisak korišćenih standarda

EN 15085 Zavarivanje željezničkih vozila i komponenti

SRPS ISO 5817 - Kriterijumi prihvatljivosti grešaka zavarenih spojeva

SRPS ISO 6520 - Klasifikacija grešaka u zavarenim spojevima izvedenim topljenjem metala

SRPS ISO 9692 - Zavarivanje- Oblici i mere zlebova za elektrolučno zavarivanje

ISO 9606-1 Kvalifikacija zavarivača i čeličnih materijala

Literatura

- 1) Vlastimir Palić – Zavarivanje, Novi Sad 1987.
- 2) Grupa autora – Predavanje sa kursa za IWE

Nenad Kokeza – Diplomski rad, Projektovanje tehnologije izrade sapnice, Novi Sad 2001



Nastavak sa strane 100

IIW MEĐUNARODNA KONFERENCIJA

IIW međunarodna konferencija pod naslovom "Materijali visoke čvrstoće – izazovi i primena" održana je 2. i 3. jula. Na 20 usmenih sesija prezentovano je oko 80 radova.

IZLOŽBA ZAVARIVANJA

Sponzori i druge zainteresovane kompanije iskoristili su mogućnost da predstave svoje proizvode na izložbi koja je organizovana u Hotelu CROWNE PLAZA za vreme trajanja Skupštine. Skroman broj izlagača u odnosu i na broj sponzora ipak nije umanjio značaj ovog dela manifestacije.

AKTIVNOSTI DELEGACIJE SRBIJE

U pripremnim aktivnostima u vezi Godišnje skupštine učestvovali su naši predstavnici člana IIW, Zavoda za zavarivanje, a u aktivnostima u vezi Međunarodnog tela za ovlašćivanje – IAB, Grupe A i Grupe B, predstavnici ANB za Srbiju, Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji, odnosno DUZS CertPers i predstavnici ANBCC, Zavod za zavarivanje. Na 68. sednici Skupštine međunarodnog instituta za zavarivanje je, ispred naše zemlje bio prisutan dr Vencislav Grabulov, izvršni rukovodilac DUZS CertPers-a. Pored učešća u radu na samoj sednici Skupštine koja je održana 28.06., najznačajnija aktivnost je bila učešće u radu IAB Grupe A (održana 29.06.), IAB Grupe B (30.06.) i predstavnika članica IAB grupe (01.07). Na ovim sednicama su razmatrane izmene i dopune dokumenata za realizaciju kurseva za obrazovanje kadrova u zavarivanju kao i primena istih. Pored redovnih aktivnosti Grupa A i B kao i IAB grupe i ovoga puta najznačajnija je bila diskusija vezana za inicijativu da se promene pravila funkcionisanja nacionalnih tela za ovlašćivanje (ANB) u funkciji usaglašavanja sa Zakonima koji se primenjuju, pre svega u zemljama EU, a odnose se na sprečavanje konkurencije. Cilj je da se nacionalne granice "ukinu" kao smetnja za delovanje ANB i izvan granice domicilne zemlje. Donošenje odluke je odloženo do sledećeg sastanka IAB grupe (februara meseca 2016. godine u Parizu). Zbog verovatne izmene pravila delovanja članica IAB grupe, do daljeg je zamrznut postupak prijema novih članica.



Na sastanku članica IAB grupe koji je održan 01. jula u HOTELU SCANDIC PARK dr. Vencislavu Grabulovu, izvršnom rukovodiocu DUZS CertPers je uručeno priznanje i značka za dugogodišnje angažovanje u radu Godišnjih Skupština IIW i "zahvalnost za doprinos unapređenju globalnog kvaliteta života kroz optimalnu primenu tehnologija zavarivanja i njegovu pionirsku ulogu i značajan doprinos u primeni Međunarodnog sistema obrazovanja kadrova u zavarivanju". Priznanje je uručio predsednik Međunarodnog instituta za zavarivanje prof. Dr. Gary Marquis

Sastanak radne grupe za regionalnu saradnju održan je 29. juna. Što se naših aktivnosti tiče, na ovom sastanku je prezentovana informacija o Trećem regionalnom kongresu IIW zemalja jugoistočne Evrope, održanom od 3. do 5. juna 2015. godine u Temišvaru, Rumunija.

Zaključak je da je Kongres bio veoma uspešan i da je zadovoljio i najstrožije kriterijume IIW.

Može se zaključiti da je učešće na Skupštinama IIW korisno i opravdano, ali kao što je i ranije bilo naglašeno, neophodno je da se više aktivista-stručnjaka uključi u rad Međunarodnog instituta, odnosno tehničkih komisija ili radnih grupa. Potrebno je aktivnije učešće većeg broja subjekata u pripremnom radu na izradi dokumenta, učešće u radu radnih grupa čija je aktivnost veoma bitna za zavarivačku javnost Srbije.

Uspešnost zavisi i od brojnosti naše delegacije koja prisustvuje u radu stručnih tela.

Dr Vencislav Grabulov dipl.ing.IWE

ČASOPIS ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE**Cenovnik oglasnog prostora u četiri uzastopna broja 2015**

	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 2015**

	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**

REFIT INŽENJERING

YASKAWA SLOVENIJA

HONEX

ELIMP

ZAVOD ZA ZAVARIVANJE

MESSER

KEMPER GmbH

GSI SLV-SVV Praha, s.r.o. Centrum
Lepeni Brno

- | | |
|--|---------------------|
| 1. ČLANARINA DUZS za 2015. godinu | 3.500 dinara |
| Članovima DUZS GRATIS godišnje izdanje časopisa "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE" | |
| 2. ČASOPIS "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE" - 2015. 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 2013. godinu | 500 dinara |
| ▪ cena pojedinačnog broja za prethodne godine..... | 250 dinara |
| b) beneficirane cene za članove DUZS: | |
| ▪ cena pojedinačnog broja za 2014. 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 |