



ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE

WELDING & WELDED STRUCTURES

God. 66 Vol. 66	Br. 2 No. 2	49-96 49-96	Beograd Belgrade	Srbija Serbia	2021. 2021.
--------------------	----------------	----------------	---------------------	------------------	----------------

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

Dr Zoran Odanović, dipl.ing.

duzs011@gmail.com, odanovic@ptt.rs

Tehnički urednik / Technical Editor

Branislav Lukić, dipl.ing

Redakcijski odbor / Editorial Board

Dr Nenad Radović, dipl.ing.

Dr Radomir Jovičić, dipl.ing.

Dr Bore Jegdić, dipl.ing.

Miloš Pavlović, dipl.ing.

REDAKCIJA I MARKETING / EDITORIAL OFFICE AND MARKETING

Vesna Jović

Grčića Milenka 67, I sprat
11000 Beograd

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

duzs@eunet.rs

www.duzs.org.rs



UREĐIVAČKI ODBOR / PUBLISHING COUNCIL

Dr Vencislav Grabulov, dipl.ing, (predsednik)

Prof.dr Vukić Lazić, dipl.ing.

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

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

Prof. dr Dragoslav Dobraš, dipl.ing. (BiH, Republika Srpska)

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

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

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

Dr Horia Dascau, dipl.ing. (Rumunija)

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 Zoran Odanović. – Vol. 41, no. 1
(1996)- . - Beograd : DUZS - Društvo za unapređivanje
zavarivanja u Srbiji, 1996-. (Beograd : VIS studio).-29 cm

Tromesečno. Je nastavak: Zavarivač = 0513-8523
ISSN 0354-7965 = Zavarivanje i zavarene konstrukcije
COBISS.SR-ID 105396743

CENE I NARUDŽBINA ZA 2021.

Cena pojedinačnog broja 825,00 dinara

Godišnja pretplata 2500,00 dinara

Tekući račun: 325-9500600002588-46

PRICE AND ORDER

Annual subscription: EUR 100

Account No. RS35325960160000041546

OTPVRS22 (VOJVOĐANSKA BANKA AD)

IBAN RS35325960160000041546

ŠTAMPA / PRINTED

“VIS STUDIO” d.o.o.

Bulevar Arsenija Čamojevića 123, Beograd

Tiraž: 400 kom.

SADRŽAJ

CONTENTS



NAUKA • ISTRAŽIVANJE • RAZVOJ

SCIENCE • RESEARCH • DEVELOPMENT

53

**ISTRAŽIVANJE PROCESA REZANJA UGLJENIČNOG
ČELIKA PLAZMOM VODA-VAZDUH**

**RESEARCH ON WATER-AIR PLASMA CUTTING
PROCESS OF CARBON STEEL**

S. Hana, D. Caib, Z. Luoc, Y. Yid



PRAKSA

PRACTICE

63

**PROUČAVANJE FAZNIH TRANSFORMACIJA U ZONI
UTICAJA TOPLOTE ALUMINOTERMIJSKI ZAVARENIH
ČELIKA ZA ŠINE EKSPERIMENTALNIM METODAMA I
SIMULACIJOM**

**EXPERIMENTAL AND SIMULATION STUDY OF PHASE
TRANSFORMATION IN THERMITE WELDED RAILWAY
STEEL HEAT-AFFECTED ZONE REGIONS**

K. Sojiphan



PRAKSA

PRACTICE

75

**SPAJANJE RAZNORODNIH METALA ULTRAZVUČNIM
ZAVARIVANJEM**

**DISSIMILAR METAL JOINING BY ULTRASONIC
WELDING**

T. A. Kovácsa A. Vladár, P. Pinkec, H. L. Jaber



IBR (PRAKSA)

NDT (PRACTICE)

83

**KONTROLISANJE ZAOSTALIH NAPONA: RAZVOJ
NAJNOVIJIH INŽENJERSKIH METODA ZA MERENJE
BEZ RAZARANJA I POVOLJNU PRERASPODELU
ZAOSTALIH NAPONA**

**RESIDUAL STRESS MANAGEMENT: RECENT
ADVANCES IN ENGINEERING METHODS FOR NON-
DESTRUCTIVE MEASUREMENT AND BENEFICIAL
REDISTRIBUTION OF RESIDUAL STRESSES**

J. Kleiman



VESTI

NEWS

52

IN MEMORIAM – VLADETA MATOVIĆ

72

68. GODIŠNJA SKUPŠTINA DUZS

72

SAVETOVANJE ZAVARIVANJE – OKTOBAR 2021

73

11. MEĐUNARODNO ZNANSTVENO-STRUČNO SAVJETOVANJE SBZ 2021

74

12. MEĐUNARODNA KONFERENCIJA TIMA21

96

MARKETING

Poštovani čitaoci,

Globalna pandemija COVID-19 uticala je na naše svakodnevne živote, ali ujedno je uticala i na naše profesionalne živote, a pored svega na ekonomiju i na industriju, ostavljajući posledice naravno i na industriju zavarivanja.

Najviše negativnih efekata pretrpeli su regioni Latinske Amerike i Kariba, zatim Evropa i Centralna Azija. Ozbiljna ograničenja nametnuta su radi ublažavanja efekata COVID-19, ali ujedno dovela su do inovacija i prilagođavanja radi prevazilaženja negativnih efekata pandemije.

Predviđa se da će budući oporavak od efekata pandemije biti neujednačen, zbog neravnomernog pristupa vakcinama i različitih ekonomskih kapaciteta zemalja.

U takvoj situaciji na našim prostorima zbog sve raširenije primene vakcina i mera zaštite od virusa, dolazi do postepenog popuštanja rigoroznih protiv pandemijskih mera.

Obzirom na popuštanje mera zaštite od virusa u našoj zemlji i relativno povoljnoj epidemiološkoj situaciji, predvideli smo da se održi redovna 68. godišnja skupština DUZS, u utorak 29. juna 2021. godine u Beogradu.

Takođe planira se i 31. tradicionalno savetovanje ZAVARIVANJE koje bi se održalo u oktobru 2021. godine u Kladovu.

I u našem okruženju predviđaju se stručni skupovi i to 11. Međunarodno naučno-stručno savetovanje SBZ 2021 koje je planirano da se održi u Slavonskom Brodu u Hrvatskoj u periodu 03-05. novembra 2021, kao i Međunarodna konferencija TIMA21 čije održavanje se planira 25-26. novembra 2021. godine u Temišvaru – Rumunija.

Pa, nadajmo se, do skorog viđenja.

***Glavni i odgovorni urednik
Dr Zoran Odanović, dipl.ing.***



IN MEMORIAM

Dana 5. aprila 2021. godine napustio nas je dragi dugogodišnji saradnik i prijatelj, Vladeta Matović.



Vladeta Matović, dipl.inž.građ.

1943-2021

Vladeta Matović je rođen 1943. godine u Zasadu, opština Kraljevo. Potiče iz skromne, patrijarhalne porodice, vaspitavan je u duhu vere i Pravoslavlja, u kojoj se oduvek osećao duh manastira Studenice, što će se kasnije pokazati presudnim na njegov rad i pomoć pri obnovi srpskih crkava i manastira.

Osnovnu školu je završio u Studenici nadomak rodnog Zasada, a srednju tehničku školu u Kosovskoj Mitrovici. Diplomirao je 1974. godine na Građevinskom fakultetu u Beogradu, na odseku za konstrukcije.

Još tokom studija, Vladeta dobija stipendiju od RO "Mašinoprojekt" Beograd, gde nastavlja da radi i po diplomiranju, na radnom mestu od pripravnika do projektanta.

Godine 1982. biva izabran za stručnog saradnika u Institutu za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta u Beogradu, a u nastavi učestvuje u izvođenju vežbi iz predmeta Ispitivanje konstrukcija, na odseku za konstrukcije. Godine 1998. izabran je u zvanje višeg stručnog saradnika. Od 1992–2000. godine, obavljao je dužnost zamenika upravnika Instituta za materijale i konstrukcije, a od 2003–2008. godine postaje i tehnički rukovodilac Laboratorije za ispitivanje konstrukcija.

I po penzionisanju, Vladeta ostaje aktivan. Angažovan je u Inovacionom centru Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, zatim kao tehnički ekspert u ATS - Akreditacionom telu Srbije i u Društvu za unapređivanje zavarivanja u Srbiji, u okviru DUZS-CertPers-a, na realizaciji stručnih kursa za međunarodne inženjere i tehnologe zavarivanja (IWE i IWT).

Impozantna je lista stručno - naučnog angažmana i rezultata koje je postigao Vladeta Matović. Teško je bilo pretpostaviti da se iza lika nenametljivog i skromnog saradnika krije pravi div koji je delovao i postigao izuzetne rezultate u oblastima projektovanja građevinskih konstrukcija, revizija, ekspertiza, ispitivanja konstrukcija i materijala, projekata rekonstrukcija, sanacija i/ili nadzora na izvođenju konstrukcija.

Treba svakako izdvojiti učešće na 3 naučna projekta i koautorstvo 3 knjige – univerzitetskih udžbenika. Neko je izbrojao, učešće u realizaciji na preko 550 projekata, revizija i ispitivanja konstrukcija.

No, krenimo redom, u svojoj plodnoj karijeri je objavio preko 50 radova na kongresima, simpozijumima i časopisima, učestvovao u realizaciji na blizu 100 projekata čeličnih i betonskih konstrukcija.

Značajan je angažman na nostrifikaciji inostrane tehničke dokumentacije, oko 40 projekata, kao i učešće u obimnim i zahtevnim ispitivanjima konstrukcija, izrada studije, stručnih mišljenja, revizija i tehničke kontrole. I ovde je bio impozantna, oko 360.

Od posebnog značaja je njegovo angažovanje po raznim osnovama u poslovima akreditacija laboratorija, sertifikacionih tela i kontrolnih tela, kao i tela za sertifikaciju proizvoda, ukupno 64 reference.

Posebno treba izdvojiti angažovanje Vladete Matovića u delu realizacije projekata u funkciji očuvanja srpske kulturne i svete baštine. To se ne ogleda samo u 29 projekata vezanih, pre svega, za izgradnju Hrama Svetog Save, već i na restauraciju, obnovu, ispitivanje i sanaciju mnogih crkava i manastira. Taj deo aktivnosti je obavljao sa posebnom ljubavlju, ne štedeći sebe, a za opštu dobrobit.

Najposebniji rad je svakako bio onaj na izgradnji Spomen-Hrama Svetog Save na Vračaru gde je bio angažovan dugi niz godina obavljajući različite poslove: od pregleda konstrukcije kupole, pregleda i ocene stanja konstrukcije centralnog dela Hrama, analize kompletne tehničke dokumentacije koja se odnosi na konstrukciju, ispitivanja ankera za nošenje kamene fasade na Hramu, pripreme podloge za izradu mozaika, pa sve do imenovanja za glavnog inženjera gradnje Hrama.

Angažovanje u Društvu za unapređivanje zavarivanja je ono što nas je spojilo. Više od 16 godina je bio član tima koji je uveo Međunarodni sistem obrazovanja kadrova u zavarivanju po pravilima Međunarodnog instituta za zavarivanje (International Institute of Welding-IIW). Bio je nezaobilazan predavač na Kursovima za međunarodne inženjere i tehnologe zavarivanja i član Ispitnih komisija kod svih ovlašćenih organizacija za sprovođenje Kursova u okviru DUZS-CertPers-a.

Osim što je bio izuzetan inženjer i pedagog, Vladeta Matović je bio veliki čovek - skroman, blage naravi, vredan, nenametljiv, pouzdan, savestan i uvek spreman da pomogne. Ostavio je neizbrisiv trag u našem udruženju i u životima svih nas koji su imali čast da sarađuju sa njim.

Dr Vencislav Grabulov, IWE

Zahvaljujemo porodici Matović i Jovanović na dostavljenom biografskom materijalu



Shanguo Han^a, Detao Cai^b, Ziyi Luo^c, Yaoyong Yi^d

Research on water-air plasma cutting process of carbon steel Istraživanje procesa rezanja ugljeničnog čelika plazmom voda- vazduh

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad je u izvornom obliku objavljen u okviru 72. IIV godišnje Skupštine i međunarodne konferencije održane u Bratislavi-Slovačka 07-12. Jula 2019

Rad primljen / Paper received:

Decembar 2020.

Prevod izvornog rada na srpski jezik: A. Mitrašinić

Adresa autora / Author's address:

High-energy beam welding R&D center, Guangdong Welding Institute (China-Ukraine E.O.Paton Institute of Welding), Guangzhou, China

^ashanguohan@163.com,

^bcaidt@gwi.gd.cn,

^cluozy@gwi.gd.cn,

^dyiyy@gwi.gd.cn

Keywords: water-air plasma cutting, inclusion quality, water curtain, plasma arc, microstructure

Ključne reči: rezanje voda-vazduh plazmom, kvalitet uključaka, vodena zavesa, luk plazme, mikrostruktura

Abstract

The principle and equipment of water-air plasma cutting has been introduced in this paper. Especially, the function of water is not only to prevent the cutting pool from oxidizing in the form of a water curtain, but also to generate plasma in the center of arc. The Numerical Model of Low-temperature Plasma has been established with equation of energy, status, motion and chemical dynamic equation. Working process, mechanical properties and micro-structural features of 20 mm carbon steel processed by water-air plasma cutting and air plasma have been investigated, which choose the same parameters. The voice of plasma arc and dust of pool are being limited in the area of water curtain, so that the noise and dust of water-air plasma cutting can be compared favorably with under-water plasma cutting. Lower temperature of water-air cutting plates is due to the fluent water taking off energy of metal pool during cutting. It is impossible to find oxide layer on the incisions surface of water-air plasma cutting, and the heat affected zone is so thin that welding can be carried out directly after cutting without any else process. So inclusion also can be avoided in the weld. But for air plasma cutting, lot of time is waste to remove oxide layer by mechanical polishing before welding. With the help of addition plasma arising from water, the water-air plasma arc becomes stronger, so smooth and high flatness cutting surface can be

Rezime

U ovom radu je predstavljen princip rada i oprema za sečenje plazmom voda-vazduh. Funkcija vode nije samo sprečavanje oksidacije kupke za rezanje formiranjem vodene zavese, već i stvaranje plazme u središtu luka. Numerički model niskotemperaturne plazme je definisan jednačinom energije, statusa, kretanja i hemijske dinamičke jednačine. Istraženi su radni proces, mehanička svojstva i mikrostrukturne karakteristike ugljeničnog čelika od 20 mm obrađenog rezanjem voda-vazduh plazmom. Takođe je analizirana vazдушna plazma sa istim parametrima. Zvuk luka plazme i prašina kupke su bili ograničeni područijem vodene zavese, tako da se buka i prašina sečenja voda-vazduh plazmom mogu uporediti sa podvodnim rezanjem plazmom. Niža temperatura ploča koje se režu vodom i vazduhom je posledica tečnja vode koja preuzima energiju metalne kupke tokom sečenja. Nije pronađen oksidni sloj na površini reza pri sečenju voda-vazduh plazmom, a zona pod uticajem toplote je toliko tanka, da se zavarivanje može izvršiti neposredno nakon sečenja bez ikakvog drugog postupka pripreme. Time se izbegavaju nečistoće u zavarenom spoju. Pri rezanju vazдушnom plazmom, pre zavarivanja je neophodno uklanjanje oksidnog sloja mehaničkim poliranjem što zahteva određeno vreme. Uz pomoć dodatno stvorene plazme od vode, luk voda-vazduh plazme postaje snažniji, tako da se može dobiti glatka i velika ravna površina rezanja. U poređenju



acquired. Compared with the technology of air plasma cutting, water-air plasma cutting has benefits of friendly working environment, higher quality incision and lower cost.

1. Introduction

The method of metal cutting can be classified into thermal cutting and cold cutting, depending on whether the metal is melted, and the plasma cutting is belongs to thermal cutting. But it is necessary to consider the cutting quality and cutting cost before choosing cutting methods. With excellent incision quality and cutting efficiency, laser cutting and high-pressure water cutting have been introduced to many industries. But these equipment cost are too high to be widely used. Due to roughness cutting surface, oxygen-acetylene and mechanical cutting are applied in unimportant applications. Considering economic and performance of cutting, plasma cutting can be used in most of machinery factories.

There are several kinds of plasma cutting, such as air plasma cutting, under-water plasma cutting and fine plasma cutting. The fine plasma cutting can be choice when desires high quality cutting which similar to laser cutting. With the benefits of low noise and dust, the under-water plasma cutting provides a friendly working environment. However, neither fine plasma cutting equipment nor under-water cutting equipment is more expensive than the cost of air plasma cutting machine. Water-air plasma cutting have the benefits of low cost and high cutting quality, which have a great future.

Based on the air plasma cutting power, the water-air plasma cutting has a unique design producing surround water curtain and additional plasma. A water injection port is located on the top of the torch, and water channel is arranged inside the torch, isolating from generation gas and protecting gas channels.

Under the gas pressure, the water flows out of the nozzle in the style of water curtain. An enclosed space surrounding by the torch nozzle, the work piece surface and the water curtain can prevent cutting metal pool from oxidation during cutting. The plasma arc is formed at the center of the nozzle under the action of high pressure and high temperature air. And the water will transfer to plasma when entering into the plasma region already existing.

sa tehnologijom vazdušnog rezanja plazmom, rezanje voda-vazduh plazmom ima prednosti povoljnijim radnim okruženjem, kvalitetnijim rezom i nižim troškovima.

1. Uvod

Način rezanja metala može se klasifikovati na termičko i hladno rezanje, u zavisnosti od toga da li se metal topi, pa tako rezanje plazmom pripada termičkom rezanju. Pre odabira metode sečenja neophodno je uzeti u obzir zahtevani kvalitet i troškove sečenja. Sa odličnim kvalitetom reza i visokom efikasnošću rezanja, lasersko sečenje i rezanje vodom pod visokim pritiskom primenjuju se u mnogim industrijama. Troškovi opreme su previsoki da bi se pomenute metode mogle široko koristiti. Za široku primenu se koristi mehaničko sečenje ili kiseonik-acetilen plazma. Uzimajući u obzir ekonomičnost i performanse sečenja, rezanje plazmom se može koristiti u većini mašinskih postrojenja.

Postoji nekoliko načina rezanja plazmom, kao što su vazdušno, podvodno i fino rezanje plazmom. Fino rezanje plazmom može biti izbor kada se želi visokokvalitetno rezanje slično laserskom rezanju. Uz prednosti niskog nivoa buke i prašine, rezanje pod vodom pruža prijatno radno okruženje. Međutim, oprema za fino rezanje plazmom i oprema za rezanje pod vodom nisu skuplje od troškova mašina za rezanje vazdušnom plazmom. Rezanje voda-vazduh plazmom ima prednosti zbog niske cene i visokog kvaliteta rezanja i zato ima sjajnu budućnost.

Zasnovano na snazi rezanja vazdušnom plazmom, rezanje voda-vazduh plazmom ima jedinstveni dizajn koji stvara vodena zavesa koja ujedno doprinosi i dodatnoj plazmi. Priključak za ubrizgavanje vode nalazi se na vrhu gorionika, dok je vodeni kanal postavljen unutar gorionika, izolujući od radnog gasa i štiteći gasne kanale.

Pod pritiskom gasa, voda izlazi iz mlaznice u vidu vodene zavese. Zatvoreni prostor koji okružuje mlaznica gorionika, površina radnog predmeta i vodena zavesa mogu sprečiti oksidaciju metalnog kupatila tokom sečenja. Luk plazme se formira u središtu mlaznice pod dejstvom visokog pritiska i vazduha visoke temperature. Voda prelazi u plazmu prilikom ulaska u već postojeći region plazme.

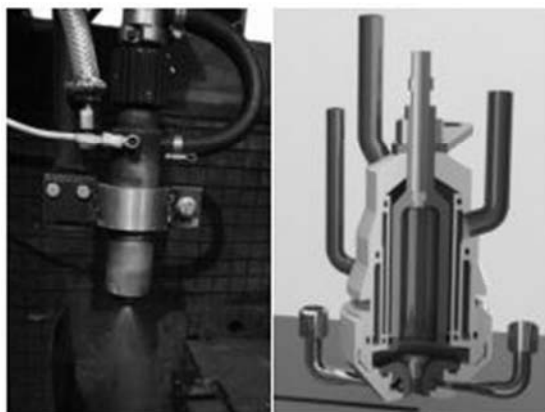


Figure 1. The water-air plasma torch and its schematic diagram

Slika 1. Voda-vazduh plazma gorionik i njegov šematski diagram

The water-air plasma cutting machine is consisting of power supply, control system, plasmatron, water tank and motion mechanism. The range of power supply currents is 50 - 200A. The control system is used for controlling parameters of water-air cutting and process on the basis of the PLC-controller. The device has the capability to alternately switch on and operation of the plasma-tron on direct polarity with thermochemical cathode and plasmatron for operation on the reverse polarity with copper hollow "cold" electrode, which controlled by switching system integrated in control system.

It also can be regulate the exact dosage of water that as a plasma-forming medium to influence the energy and chemical parameters of the plasma, and regulate the exact dosage of water, to protect the reactive zone of the cut from atmospheric gases, to cool the edges, to reduce the cast zone of the cut, to reduce the harmful factors of the process. In order to implement an emergency stop algorithm, real-time analysis of emergency conditions is necessary.

2. Numerical model of water-air plasma cutting

The physical and chemical characteristics of low-temperature plasma (the temperature range of 10³ to 2×10⁴ °C), a high- temperature air system consisted by atoms, free radicals, ions, electrons and free molecules with same temperature, are rapidly accelerating. The plasma producing during water-air plasma cutting is a kind of low-temperature plasma. The change laws of chemical composition of the reaction components over time can be reflected by founding chemical kinetic equations, which described the flow and interaction air of multi-component under static condition as follows.

Mašina za rezanje voda-vazduh plazmom se sastoji od napajanja, kontrolnog sistema, plazmatrona, rezervoara za vodu i mehanizma za kretanje. Raspon struja napajanja je od 50 do 200 A. Upravljački sistem se koristi za kontrolu parametara rezanja na bazi PLC-kontrolera. Uređaj ima mogućnost naizmeničnog uključivanja i rada plazmetrona na direktnom polaritetu sa termohemijskom katodom i rad na obrnutom polaritetu sa šupljom bakarnom "hladnom" elektrodom, gde se kontrola vrši preklopnim sistemom integrisanim u sistem upravljanja.

Takođe se može regulisati tačna količina vode, koja kao medij za formiranje plazme utiče na energetske i hemijske parametre plazme, radi zaštite reaktivne zone reza od atmosferskih gasova, zatim za hlađenje ivica, za smanjenje istopljene zone reza i za smanjenje drugih štetnih faktora procesa. Da bi se primenio algoritam hitnog zaustavljanja, neophodna je analiza hitnih stanja u realnom vremenu.

2. Numerički model sečenja voda-vazduh plazmom

Fizičke i hemijske karakteristike niskotemperaturne plazme (opseg temperatura od 10³ do 2×10⁴ °C) vezane su za visokotemperaturni vazdušni sistem koji se sastoji od atoma, slobodnih radikala, jona, elektrona i slobodnih molekula sa istom temperaturom, koji se velikom brzinom ubrzavaju. Plazma nastala tokom sečenja voda-vazduh plazmom je niskotemperaturna vrsta plazme. Promena sastava reakcionih komponenti tokom vremena može se objasniti postavljanjem kinetičkih jednačina višekomponentnih hemijskih reakcija pod statičkim uslovima koje opisuju protok i interakciju vazduha na sledeći način.



$$\frac{d(\rho WF)}{dx} = 0 \tag{1}$$

$$\rho W \frac{dW}{dx} + \frac{dP}{dx} = 0 \tag{2}$$

$$\rho W \frac{du}{dx} + \frac{d(PW)}{dx} + \rho W^2 \frac{dW}{dx} + \frac{dQ}{dx} = 0 \tag{3}$$

$$PV = \sum n_i RT \tag{4}$$

$$\frac{d(n_i W)}{dx} = \frac{dn_i}{dt} \tag{5}$$

Where ρ - air flow density; W - air flow velocity; x - air flow motion path coordinates; F air flow (channel) cross-sectional area; P pressure; U - the system internal energy; Q - the heat flow of reaction channel wall; n_i composition moles unit time passage channel cross-section.

When boundary value $x=0$, a set of new equations have acquired:

$$\rho WF = MG \tag{6}$$

$$\rho W^2 + P = L \tag{7}$$

$$L = \rho_0 W_0 + P_0 \tag{8}$$

Where G - integral constant, M - mass flow of gas, L - integral constant determined by initial conditions;

When the integral value transfer to total cross-sectional area, energy equation described by energy flow density in unit cross-sectional area as follow:

$$\rho WF \left(U + \frac{P}{\rho} + \frac{W^2}{2} \right) + QF = Q_0 \tag{9}$$

Where Q_0 - the integral constant represents the total energy of the system at the initial moment, $\left(U + \frac{P}{\rho} \right)$ the gas entropy of unit mass, which can be included by the following equation:

$$\rho WF \left(U + \frac{P}{\rho} \right) = \sum_{i=1}^i n_i \mu_i \left(U + \frac{P}{\rho} \right) = \sum_{i=1}^i n_i h_i(T) \tag{10}$$

Where n_i , $h_i(T)$, and μ_i - the molar fraction, enthalpy and density of components.

When use $G = \sum_{i=1}^i n_i \mu_i$ which has no heat exchange with the reactor wall, the energy equation can be show as follow:

$$\sum_{i=1}^i n_i h_i(T) + \frac{GW^2}{2} = Q_0 \tag{11}$$

$$\frac{d(\rho WF)}{dx} = 0 \tag{1}$$

$$\rho W \frac{dW}{dx} + \frac{dP}{dx} = 0 \tag{2}$$

$$\rho W \frac{du}{dx} + \frac{d(PW)}{dx} + \rho W^2 \frac{dW}{dx} + \frac{dQ}{dx} = 0 \tag{3}$$

$$PV = \sum n_i RT \tag{4}$$

$$\frac{d(n_i W)}{dx} = \frac{dn_i}{dt} \tag{5}$$

gde je ρ - gustina protoka vazduha; W - brzina protoka vazduha; x - koordinate putanje kretanja vazdušnog toka; F - površina poprečnog preseka protoka vazduha (kanala); P - pritisak; U - unutrašnja energija sistema; Q - protok toplote kroz zid reakcionog kanala; n_i - molska koncentracija po jedinici vremena na poprečnom preseku.

Kada je granična vrednost $x=0$, dobija se set novih jednačina:

$$\rho WF = MG \tag{6}$$

$$\rho W^2 + P = L \tag{7}$$

$$L = \rho_0 W_0 + P_0 \tag{8}$$

gde je G - konstanta integrala, M - maseni protok gasa, L - konstanta integrala određena početnim uslovima.

Kada se integralisana vrednost prenese na ukupnu površinu poprečnog preseka, dobija se jednačina energije opisana gustinom protoka energije po jedinici površine poprečnog preseka:

$$\rho WF \left(U + \frac{P}{\rho} + \frac{W^2}{2} \right) + QF = Q_0 \tag{9}$$

gde je Q_0 integralna konstanta koja predstavlja ukupnu energiju sistema u početnom trenutku, $\left(U + \frac{P}{\rho} \right)$ entropija gasa jedinične mase, koja se može izraziti sledećom jednačinom:

$$\rho WF \left(U + \frac{P}{\rho} \right) = \sum_{i=1}^i n_i \mu_i \left(U + \frac{P}{\rho} \right) = \sum_{i=1}^i n_i h_i(T) \tag{10}$$

Gde su n_i , $h_i(T)$ i μ_i molarna frakcija, entalpija i gustina komponenti.

Ako se sa $G = \sum_{i=1}^i n_i \mu_i$ koji podrazumeva da nema razmene toplote sa zidom reaktora, jednačina energije može se prikazati na sledeći način

$$\sum_{i=1}^i n_i h_i(T) + \frac{GW^2}{2} = Q_0 \tag{11}$$



When consider the cross section of passageway (F), the gas flow tare (W), and the flow continuity of each element, the volume of the reaction system changing due to temperature, the changing of reaction moles, and p replaced by ratio $\frac{\sum n_i \mu_i}{V}$

$$\frac{dn_i}{dx} = \sum_{j=1}^j V_{ij} \left(\frac{1}{W}\right)^{q_j} \left(\frac{1}{F}\right)^{q_{j-1}} K_j(T) \prod_j (n_i) \quad (12)$$

Where V_{ij} - the stoichiometric coefficient of reaction equation when component i entering j ('+' indicates the reaction product and '-' indicates the starting material; $\prod_j (n_i)$ - the molar number product of reaction component during reaction j; for cylindrical channels $F = const$.

When the initial conditions uslovi $n_i(0)=n_i^0$; $W(0)=W_0$; $P(0)=P_0$; $T(0)=T_0$; $F=Const$, which representing airflow velocity, pressure, and temperature, respectively, a_i, b_i, c_i - the approximate coefficient of entropy depending temperature.

$$W(x) = \frac{L}{2G} - \sqrt{\left(\frac{L}{2G}\right)^2 - \sum n_i \frac{R \cdot T}{G}} \quad (13)$$

$$P(x) = L - \frac{F}{G \cdot W} \quad (14)$$

$$T(x) = \frac{-\sum b_i n_i + \sqrt{(\sum b_i n_i)^2 - 4 \left[\sum a_i n_i - \frac{G}{2} \left(\frac{\sum n_i R}{P \cdot F} \right) \right] (\sum c_i n_i - Q_i)}}{2 \left[\sum a_i n_i - \frac{G}{2} \left(\frac{\sum n_i R}{P \cdot F} \right) \right]} \quad (15)$$

3. Materials and experimental procedure

In this study, 20 mm thick carbon steel was used as experimental metal. With the same cutting parameters (show in Tab. 1) and other situations, air plasma cutting and water-air plasma cutting had been implemented.

Kada se uzme u obzir poprečni presek prolaza (F), protok gasa (W) i kontinuitet protoka svakog elementa, zapremina reakcionog sistema koja se menja zbog temperature, promena koncentracije reagujućih substanci, i p zamenjen odnosom $\frac{\sum n_i \mu_i}{V}$, dobija se:

$$\frac{dn_i}{dx} = \sum_{j=1}^j V_{ij} \left(\frac{1}{W}\right)^{q_j} \left(\frac{1}{F}\right)^{q_{j-1}} K_j(T) \prod_j (n_i) \quad (12)$$

gde je V_{ij} stehiometrijski koeficijent jednačine reakcije kada komponenta i ulazi u j gde '+' označava proizvod reakcije, a '-' označava polazni materijal; $\prod_j (n_i)$ je broj molarnih produkata reakcionih komponenti tokom reakcije j; za cilindrične kanale F je konstantno.

Kada su početni uslovi $n_i(0)=n_i^0$; $W(0)=W_0$; $P(0)=P_0$; $T(0)=T_0$; $F=Const$, što predstavlja brzinu protoka vazduha, pritisak, i temperaturu, respektivno. a_i, b_i, c_i su aproksimativni koeficijenti entropijski zavisne temperature.

$$W(x) = \frac{L}{2G} - \sqrt{\left(\frac{L}{2G}\right)^2 - \sum n_i \frac{R \cdot T}{G}} \quad (13)$$

$$P(x) = L - \frac{F}{G \cdot W} \quad (14)$$

$$T(x) = \frac{-\sum b_i n_i + \sqrt{(\sum b_i n_i)^2 - 4 \left[\sum a_i n_i - \frac{G}{2} \left(\frac{\sum n_i R}{P \cdot F} \right) \right] (\sum c_i n_i - Q_i)}}{2 \left[\sum a_i n_i - \frac{G}{2} \left(\frac{\sum n_i R}{P \cdot F} \right) \right]} \quad (15)$$

3. Materijali i eksperimentalni postupak

U ovom istraživanju, kao eksperimentalni metal je korišćen ugljenični čelik debljine 20 mm. Sa istim parametrima sečenja (prikazano u Tab. 1) primenjeno je sečenje vazдушnom plazmom i voda-vazduh plazmom u različitim situacijama.

Table 1. Cutting process parameters

Tabela 1. Parametri procesa sečenja

Parameters name/Parametar	Air Cutting/ Vazdušno sečenje	Water-air Cutting/ Voda-vazduh sečenje
Cutting Current/Struja sečenja, A	70	70
Cutting velocity/Brzina sečenja, m min-1	0,16	0,16
Plasma-forming gas (air) pressure/Pritisak plazma formirajućeg gasa (vazduh), MPa	0,8	0,8
Plasma-forming gas (air) flow rate/Protok plazma formirajućeg gasa (vazduh), m3/min	25	25
Water flow rate /Protok vode, g/min	-	100



In order to evaluate the cutting quality, the perpendicularity of the cut, the surface roughness and the depth of the heat affected zone are choice as the main basis. The first parameter reflects the cutting accuracy, and the latter two parameters show the cleanliness of the cut surface, the tissue and chemical changes in the metal. With the help of macroscopic microscope, the cutting verticality of two kinds of incisions without any treatment had been researched. The tests of surface roughness of cutting were conducted by roughness meter.

To examine the microstructures of heat affect zone, the samples had to cut off in the transverse direction. Samples were first polished by using silicon carbide waterproof electro coated abrasive paper from CW400 to CW2000, and were then polished in 3.5 μ m diamond polishing liquid for 1 min, followed by etching in Concentrated nitric acid for 5 seconds. But to analysis the microstructures and chemical composition of incision, the tests of SEM and energy spectrum were necessary. The type of SEM equipment is FEI QUANTA 250.

4. Results and Discussion

The surface morphology of water-air plasma cutting is shown in Fig. 2



Figure 2. The surface morphology of water-air plasma cutting

Slika 2. Morfologija površine voda-vazduh plazma sečenja

The cutting sample section is show in Fig. 3 (a), and the cutting surface located at the top of sample is show in Fig. 3 (b). The length of straight section (L), the offset distance (D), the tilt angle (α) and the deflection angle (β) have been used for revealing cutting verticality. As we know from Tab. 2, the similar value has been acquired with two cutting methods, in other words, the main influencing factors of incision verticality are cutting current, cutting velocity, plasma-forming gas pressure and flow rate, but the function of water is limited which can be inferred from α and β . It can be concluded that only few water will transfer to plasma when cutting, and most of water keep the original status.

Izabrani parametri za procenu kvaliteta sečenja su okomitost reza, hrapavost površine i dubina zone pod uticajem toplote. Prvi parametar odražava tačnost sečenja, a sledeća dva parametra pokazuju čistoću površine reza, strukturu i hemijske promene u metalu. Uz pomoć makroskopskog pregleda svetlosnim mikroskopom istražena je vertikalnost rezanja dve vrste rezova bez dodatnog tretmana. Ispitivanja površinske hrapavosti rezanja izvedena su meraćem hrapavosti.

Da bi se ispitale mikrostrukture zone uticaja toplote, uzorci su odsečeni u poprečnom smeru. Uzorci su prvo polirani upotrebom silicijum-karbid-vodootpornog elektro-obloženog abrazivnog papira od CW400 do CW2000, a zatim su polirani sa dijamantskom tečnošću za poliranje od 3,5 μ m u trajanju od jednog minuta, nakon čega je sledilo pet sekundi nagrizanja u koncentrovanoj azotnoj kiselini. Za analizu mikrostrukture i hemijskog sastava reza bile su primenjene skening elektronska analiza - SEM i testovi energetskog spektra. Tip SEM opreme je FEI QUANTA 250.

4. Rezultati i diskusija

Morfologija površina voda-vazduh sečenja je prikazana na Sl. 2.

Deo sečenog uzorka prikazan je na slici 3(a), a presečena površina koja se nalazi na vrhu uzorka prikazana je na slici 3(b). Dužina ravnog preseka (L), udaljenost odstupanja (D), ugao nagiba (α) i ugao skretanja (β) su korišćeni su za određivanje vertikalnosti sečenja. Kao što se vidi iz Tabele 2, slične vrednosti su ostvarene za obe metode sečenja, drugim rečima, glavni faktori uticaja vertikalnosti reza su struja sečenja, brzina rezanja, pritisak gasa i protok gasova koji formiraju plazmu. Funkcija vode je ograničena, što se može zaključiti na osnovu rezultata za ugao nagiba (α) i ugao skretanja. Može se zaključiti da će se samo mali deo vode razgraditi u plazmu prilikom sečenja, a većina će se zadržati u prvobitnom stanju.

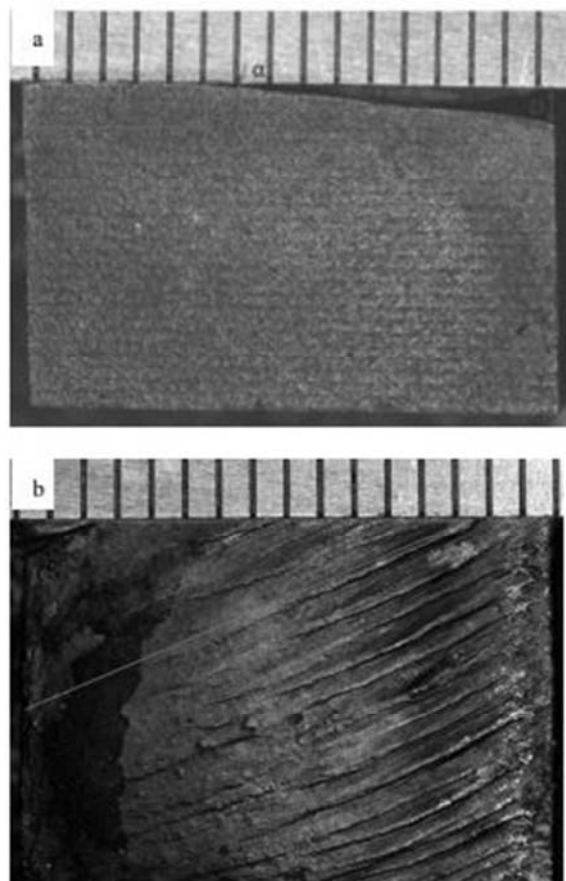


Figure 3. The cutting sample section (a) and surface (b)

Slika 3. Deo sečenog uzorka (a) i površina (b)

The incision surface roughness of air plasma cutting is $Ra=24.19\mu m$, but the incision surface roughness of water-air plasma is $Ra=3.16\mu m$ which is more smoother than air plasma cutting. So the water vapor and its transformed plasma have an important interaction with cutting molten metal to improve the incision surface roughness. For further study, microstructure and elemental composition of incision surface had been studied by SEM.

Hrapavost površine reza pri sečenju vazdušnom plazmom je $Ra = 24,19\mu m$, dok je hrapavost površine reza vodeno-vazdušne plazme $Ra = 3.16\mu m$ što je viša vrednost ravnosti u poređenju sa rezanjem vazdušnom plazmom. Vodena para i plazma formirana od vodene pare, imaju važnu interakciju sa istopljenim metalom tokom rezanja i utiču na smanjenje hrapavosti površine reza. Mikrostruktura i elementarni sastav površine reza je dalje analiziran pomoću SEM-a.

Table 2. The verticality parameters

Tabela 2. Parametri vertikalnosti

	Air cutting /Vazdušno sečenje	Water-air cutting/ Voda-vazduh sečenje
L/mm	5.5	5.3
D/mm	1.6	1.3
$\alpha/^\circ$	6.7	5.4
$\beta/^\circ$	21.5	17.5



The incision surface results of specimens examined by SEM and energy spectrum (EDS) are shown in Fig. 4 and Fig. 5. The surface of the slit is relatively flat, and there is little difference between the parts' microstructure. In order to reflect the actual situation of water-air plasma cutting more accurately, three locations were picked up for EDX analysis (Fig. 4(a)), where contain at 9.09% ~ 10.32% C, at 48.97%~59.39% O and at 29.44%~40.76% Fe with atomic measurement, similar to the composition of base material.

It indicates that the surface of the cutting surface was less affected by oxidation under the protection of water curtain (Fig. 4(b)). The incision surface microstructure of air plasma cutting consists of rugged areas that attached with small particles (Fig. 5(a)). The position of point 2, which has universal characteristics, contains at 24.65% C, at 53.46% O and at 12.1% Fe show in Fig. 5(b). Compared with base material, there is a huge discrimination. It makes sure that oxide had formed on the surface of the slit. Some oxide will transfer to oxide inclusions in welds which was consider crack source when welding, and other oxide can increase the oxygen content leading pores during welding.

Rezultati analizirane površine reza uzoraka ispitivanih SEM-om i energetske spektrom (EDS) su prikazani na slikama 4 i 5. Površina reza je relativno ravna i postoji mala razlika u mikrostrukturi. Da bi se tačnije prikazala stvarna situacija posle sečenja voda-vazduh plazmom, tri lokacije su uzete za EDX analizu (slika 4 (a)), gde je hemijski sastav analiziranih lokacija sledeći: 9,09 ~ 10,32 %C, 48,97 ~ 59,39 %O, i 29,44 ~ 40,76 %Fe u atomskim procentima, što je slično sastavu osnovnog materijala.

To ukazuje da je rezna površina pod zaštitom vodene zavese bila manje pod uticajem oksidacije (slika 4 (b)). Mikrostruktura površine reza pri rezanju vazdušnom plazmom sastoji se od neravnih područja sa prisustvom malih čestica (slika 5 (a)). Položaj tačke 2 na slici 5 (b), koja ima univerzalne karakteristike, sadrži 24,65% C, 53,46% O i 12,1% Fe. U poređenju sa osnovnim materijalom postoji velika razlika. To ukazuje na formiranje oksida na površini reza. Neki oksidi će preći u oksidnu nečistoću zavarenog spoja, što se smatra izvorom prslina prilikom zavarivanja, dok drugi oksidi mogu povećati sadržaj kiseonika u porama tokom zavarivanja.

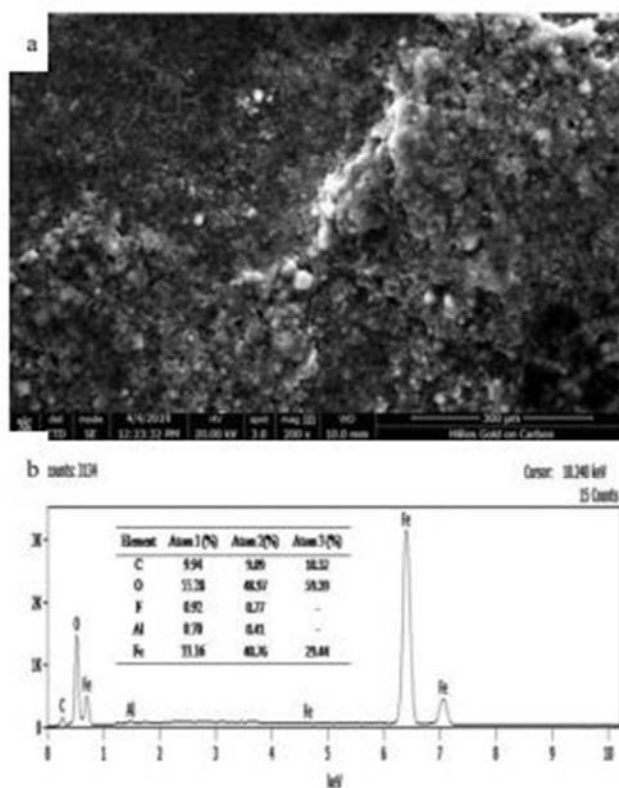


Figure 4. The water-air plasma cutting sample surface microstructure (a) and Energy spectrum (b)

Slika 4. Površinska mikrostruktura (a) i energetske spektar (b) uzorka presečenog voda-vazduh plazmom

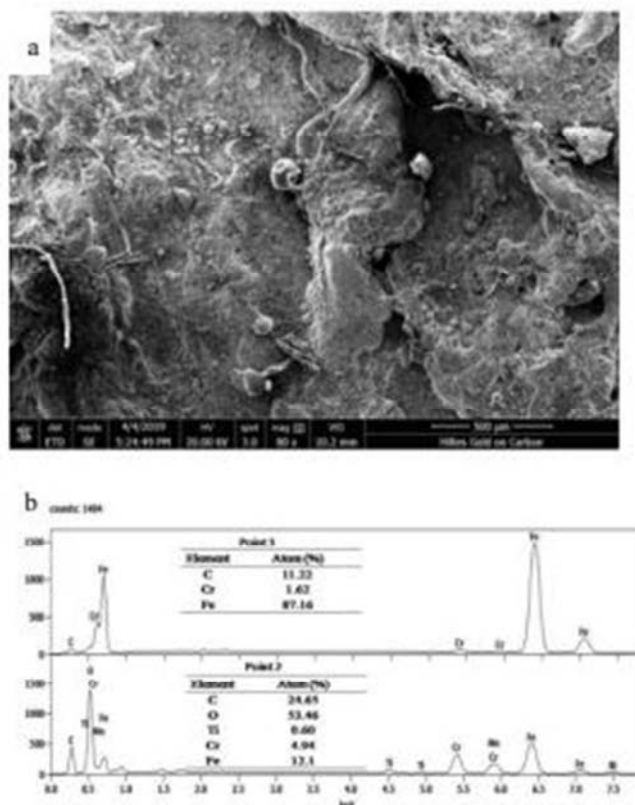


Figure 5. The air plasma cutting sample section microstructure (a) and Energy spectrum (b)

Slika 5. Mikrostruktura (a) i energetska spektar (b) uzorka presečenog vazdušnom plazmom

Through the analysis of the metallographic of the cut section, the results show that the thickness of nitride layer produced by air plasma cutting is 0.016 mm, while no nitride layer has been found after water-air plasma cutting; the thickness of heat affected zone caused by air plasma cutting is more than 0.65 mm, and the thickness of heat affected zone resulting in water-air plasma cutting is less than 0.45 mm. With the additional water vapor, it effectively avoids the formation of nitride layers and reduces the extent of the heat affected zone. The nitrogen content exceeds the partial pressure of nitrogen in the gas, even exceeding the solubility of nitrogen in the metal. Because the solubility of nitrogen in the molten metal during cutting is high, nitrogen cannot overflow from the metal in time under rapid cooling conditions, and nitrogen is stay in the solidified metal. This is an important factor leading to the production of pores. When choice the plates cutting by water-air plasma method, no additional processing required before welding, which decrease the time of processing and cost.

5. Concluding remarks

We investigated carefully the differences of incision surfaces used air plasma cutting and water-air plasma cutting, and revealed that: (a) only little water transfer to plasma when water-air plasma

Metalografska analiza preseka rezne zone pokazuje da je debljina sloja nitrida proizvedenog vazdušnim rezanjem plazmom 0,016 mm, dok nakon rezanja voda-vazduh plazmom nije pronađen nijedan sloj nitrida. Debljina zone pod uticajem toplote dobijena rezanjem vazdušnom plazmom je veća od 0,65 mm, a debljina zone pod uticajem toplote koja je dobijena rezanjem voda-vazduh plazmom je manja od 0,45 mm. Sa dodatnom vodenom parom efikasno se izbegava stvaranje nitridnih slojeva i smanjuje se veličina zone uticaja toplote. Sadržaj azota premašuje parcijalni pritisak azota u gasu, čak premašujući rastvorljivost azota u metalu. Pošto je rastvorljivost azota u rastopljenom metalu tokom sečenja velika, azot ne može na vreme da disocira iz metala usled velike brzine hlađenja, pa azot ostaje u očvrslom metalu. Ovo je važan faktor koji dovodi do stvaranja šupljina. Pri izboru rezanja ploča metodom vodeno-vazdušne plazme, nije potrebna dodatna obrada pre zavarivanja, što smanjuje vreme obrade i troškove.

5. Zaključne napomene

Pažljivo su istražene razlike na reznim površinama koje su nastale rezanjem vazdušnom plazmom i voda-vazduh plazmom i otkriveno je da: (a) samo malo vode prelazi u plazmu kod rezanja voda-



cutting and most of water keeps the original status, which have almost no influence on the cutting verticality, but significant to incision roughness; (b) the surface of the water-air plasma cutting surface was less affected by oxidation under the protection of water curtain, but a lot of oxide had formed on the surface of the air plasma incision; (c) it effectively avoids the formation of nitride layers and reduces the extent of the heat affected zone

Acknowledgements

The author thanks for the supports of financial funding by Guangdong Academy of Sciences (No. 2017GDASCX-0411, No.2018GDASCX-0803, No.2019GDASYL-0501011).

References / Literatura

[1] Wang Jianxin, Zhu Qing, Li Wenhong. Research status and development trends of underwater cutting[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition). 2018, 32(2): 180-185.

[2] Deniel Krajcarz. Comparison Metal Jet Cutting with Laser and Plasma Cutting[J]. Procedia Engineering, 2014, 69:838-843.

[3] Liu Duo, Li Hongliang, Yan Yaotian, et al. Effects of processing parameters on arc stability and cutting quality in underwater wet flux-cored arc cutting at shallow water[J]. Journal of Manufacturing Processes. 2018, 33:24-34.

[4] Jae Sung Skin, Seong Yongoh, Hyunmin Park, et al. Cutting performance of thick steel plates up to 150mm in thickness and large size pipes with a 10-kW fiber laser for dismantling of nuclear facilities [J]. Annals of Nuclear Energy, 2018, 122:62-68.

[5] Jae Sung Skin, Seong Yongoh, Hyunmin Park, et al. Underwater cutting of 50 and 60 mm thick stainless steel plates using a 6-kW fiber laser for dismantling nuclear facilities[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 115:1-8.

vazduh plazmom, dok većina vode zadržava prvobitno stanje. To nema gotovo nikakav uticaj na vertikalnost sečenja, ali je značajno za hrapavost reza; (b) površina uzorka presečenog voda-vazduh plazmom pod zaštitom vodene zavese je bila manje izložena oksidaciji, ali je na površini reza uzorka presečenog vazdušnom plazmom nastalo puno oksida; (c) voda-vazduh plazma efikasno sprečava stvaranje nitridnih slojeva i smanjuje veličinu zone pod uticajem toplote.

Zahvalnica

Autor se zahvaljuje na finansijskoj podršci Guangdong akademiji nauka (No. 2017GDASCX-0411, No.2018GDASCX-0803, No.2019GDASYL-0501011).

[6] Sovan Bhowmick, Jisnu Basu, Gautam Majumdar, et al. Experimental study of plasma arc cutting of AISI 304 stainless steel[J]. Materialstoday Processdings, 2018, 5(2):4541-4550.

[7] A.P.Hoult, I.R.Pashby, K.Chan. Fine plasma cutting of advanced aerospace materials[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 48(1-4):825-831.

[8] Li Wenhong, Zhao Jingyu, Wang Yirong, et al. Research on underwater flux cored arc cutting mechanism based on simulation of kerf formation[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 40:169-177.

[9] Suvradip Mullick, Yuvraj K.Madhukar, Subhransu Roy, et al. Development and parametric study of a water-jet assisted underwater laser cutting process. International journal of machine tools and manufacture, 2013, 68:48-55.

[10] Suvradip Mullick, Yuvraj K.Madhukar, Subhransu Roy, et al. Performance optimization of water-jet assisted underwater laser cutting of AISI 304 stainless steel sheet[J]. Optics and lasers in Engineering, 2016, 83:32-47



^{1,2}Kittichai Sojiphan

Experimental and simulation study of phase transformation in thermite welded railway steel heat-affected zone regions

Proučavanje faznih transformacija u zoni uticaja toplote aluminotermijski zavarenih čelika za šine eksperimentalnim metodama i simulacijom

Stručni rad / Professional paper

Rad je u izvornom obliku objavljen u okviru 72. IIV godišnje Skupštine i međunarodne konferencije održane u Bratislavi-Slovačka 07-12. Julia 2019

Rad primljen / Paper received:

Oktobar 2020.

Prevod izvornog rada na srpski jezik: Z. Odanović

Adresa autora / Author's address:

1 Department of Welding Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

2 Center for Welding and Materials Joining Research Network, Welding Institute of Thailand, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

kittichai.s@cit.kmutnb.ac.th

Keywords: Railway steel, thermite welding, simulation

Ključne reči: Čelici za železnicu, aluminotermisko zavarivanje, termit zavarivanje, simulacija

Abstract

Rail transportation has been an emerging and promising transportation method for economic development in Thailand and several countries. Thermite welding is one of the major welding and joining processes used to weld rail steel both during construction and maintenance. Unlike most welding processes in which heat is generated by electrical energy, thermite welding use heat generated during the chemical reactions between iron oxide and aluminum or other metallic compounds to create the weld. The amount of heat generated is thus depended on the composition and ratios of iron oxide, aluminum, as well as other metallic compounds mixed in the thermite powder. In addition, the size, shape, and material used for thermite mold could also play an important role in the heat transfer process during thermite welding of rail steel. In this research, SYSWELD software developed by ESI Group is used to perform thermal-mechanical-metallurgical welding simulation during thermite welding of rail steel. The current article presents that research methodology used to formulate the prediction of microstructure developed in the heat-affected zone regions of thermite welding of railway steel. It is noted that this work attempts to evaluate how preheat, heat generation during chemical reaction, and possible post-weld heat treatment could be performed to controlled the microstructure of pearlitic rail steel using SYSWELD software. The results of this on-

Rezime

Prevoz železnicom je obećavajući način transporta značajan za ekonomski razvoj Tajlanda i još nekih država. Aluminotermisko zavarivanje (Termit) je jedan od glavnih procesa spajanja i zavarivanja šina, kako pri izgradnji, tako i pri održavanju železničkih pruga. Za razliku od većine procesa zavarivanja koji toplotu generišu primenom električne energije, aluminotermisko zavarivanje koristi toplotu koja se generiše tokom hemijske reakcije između železnih oksida i aluminijuma ili drugih metalnih komponenti, da bi se dobio zavareni spoj. Količina generisane toplote zavisi od sastava i odnosa železnih oksida i aluminijuma ili drugih metalnih komponenti koje su izmešane u prahu za zavarivanje. Takođe, veličina i oblik materijala koji se koristi za kalup za proces Termit, takođe imaju značajan uticaj na proces prenosa toplote za vreme zavarivanja čelika šina. U ovom istraživanju softver SYSWELD, razvijen od strane ESI Grupe, je primenjen za simulaciju termičko – mehaničkih – metalurških pojava za vreme aluminotermiskog zavarivanja čelika za šine. Ovaj rad prikazuje metodologiju istraživanja radi formulisanja predviđanja nastalih mikrostruktura u oblastima zone uticaja toplote aluminotermisko zavarenog čelika za šine. Ovaj rad pokušava da proceni kako predgrevanje, generisnje toplote za vreme hemijske reakcije i moguća termička obrada posle zavarivanja, može da vrši kontrolu mikrostrukture perlita čelika za šine, primenom



going research will be used as the baseline for future development of structural integrity program for improving joining of rail steel such as the design and selection of welding processes and materials involved for rail construction, especially when appropriate grades and welding procedures of rail steels must be chosen and developed to withstand the actual loading conditions.

1. Introduction

Thermite welding is the the welding process widely used in construction and repair of railway steel due to its portability and no electrical power source required. During thermite welding, two rails are joined together by exothermic chemical reaction called aluminothermic reaction between metal oxide and aluminum in thermite powder. This produces molten metal that fills the mold and the gap between two rails and welds them together. It is important to provide sufficient preheat in the range of 800oC to 1 000oC to avoid fast cooling rate which produces hard and brittle microstructure in the weld metal and heat affected zones [1- 2]. Additional preheat would be necessary to remove excess moisture and contaminant in the environment to perform welding. It is also very important to properly select preheat time, preheat temperature, liquid temperature, and weld gap size to minimize shrinkage cavity, cold-lap and centerline defects during thermite welding of railway steel [3].

Myers, et al. [1] investigated microstructure and properties of thermite welds in rails of composition 0.75- 0.76C, 0.80-0.93Mn, 0.17-0.74Si (wt.%). They found that the peak hardness in the heat affected zone (HAZ) regions is always adjacent to the weld metal, while the lowest hardness is almost always in the outer extremity of the HAZ in the partially spheroidized pearlite microstructure. Also preheat time hardly influences the width of the HAZ regions in thermite welds. Wang, et al. [2] studied mechanical properties and fracture roughness of thermite welded rail steels of composition 0.72C, 1.21Mn, 0.22Si and 0.77C, 0.95Mn, 0.62Si (wt.%) at low temperature. They found that the impact toughness values of the weld metal were much lower than those of rail steels with rail steel of composition 0.72C, 1.21Mn, 0.22Si performed better at low temperature. Chen, et al. [3] investigated weld defect formation in rail thermite welds including cold-lap defect, shrinkage cavity, centerline defect, and distributed microporosity. They reported that with current thermite welding practice, shrinkage cavities can be avoided, while cold-lap and centerline defect likely form. With

SYSWELD softvera. Rezutati ovog istraživanja će se koristiti kao osnova za budući razvoj programa za unapređenje spajanja čelika za šine, kao što je projektovanje i izbor procesa zavarivanja i materijala koji se koriste u železničkim konstrukcijama, posebno za postojeće kvalitete i procedure zavarivanja čelika za šine koje bi morale da se razvijaju za postojeće uslove opterećenja.

1. Uvod

Aluminotermisko zavarivanje (Termit), je process zavarivanja široko primenjivan pri izgradnji i popravci čelika za železnice, zbog njegove mobilnosti i ne zahtevanja izvore električne energije. Za vreme termit zavarivanja, dve šine se spajaju ekzotermnom reakcijom koja se zove aluminotermijska reakcija između metalnog oksida i aluminijuma u termit prahu. Tako nastao tečni metal ističe u kalup i međuprostor između dve šine i zavaruje ih. Važno je da se obezbedi dovoljno predgrevanja u oblasti od 800°C do 1 000°C da bi se izbegla velika brzina hlađenja koja daje tvrde i krte mikrostrukture u metalu šava i zoni uticaja toplote [1-2]. Da bi se izvršilo zavarivanje neophodno je dodatno predgrevanje da bi se uklonio višak vlage i štetni sastojci iz okruženja. Takođe je vrlo važno da se pravilno odredi trajanje predgrevanja, temperature predgrevanja, likvidus temperatura i veličina zazora između šina, da bi se izbegle šupljine usled skupljanja, nalepi i centralne greške za vreme zavarivanja čelika za železnice [3].

Myers i dr. [1] su ispitivali mikrostrukturu i osobine aluminotermisko zavarivanih šina sledećeg hemiskog sastava: 0.75-0.76C, 0.80-0.93Mn, 0.17-0.74Si (zapr. %). Oni su našli da je naviša tvrdoća u zoni uticaja toplote (ZUT) u oblastima uz metal šava, dok je skoro uvek najniža tvrdoća na spoljnoj starani ZUTa, u delimično sferoidizovanoj perlitnoj mikrostrukтури. Takođe, vreme predgrevanja značajno utiče na širinu oblasti ZUTa u zavarenom spoju. Wang i dr. [2] ispitivali su mehaničke osobine i udarnu žilavost aluminotermisko zavarivanih čelika za šine sledećeg hemiskog sastava: 0.72C, 1.21Mn, 0.22Si and 0.77C, 0.95Mn, 0.62Si (zapr.%) na niskim temperaturama. Chen, i dr. [3] su ispitivali stvaranje zavarivačkih grešaka i raspodelu mikroporoznosti. Oni su pokazali da pri postojećoj praksi pri aluminotermiskom zavarivanju, šupljine usled skupljanja se mogu izbeći, dok se hladni nalepi i centralne greške teško izbegavaju. Sa produženjem vremena predgrevanja, povišenjem temperature tečnog metala i veličinom zazora, ove greške se mogu smanjiti. Za razliku od



increasing of preheat time, liquid temperature and weld gap size, these two defects can be reduced. Unlike other defects, microporosity cannot be eliminated during thermite welding.

In terms of modeling and simulation of thermite welding of rail steel, only one paper was found. Chen, et al. [4] performed thermal modeling of rail thermite welding using FIDAP, which is a finite-element package available in Fluent. They also mentioned the difficulty of including all physical phenomena involved in thermite welding in one model and they only performed the heat conduction model which is the dominant heat transfer that influences the temperature evolution during thermite welding. In their work, temperature evolution, width of weld metal, and width of HAZ regions were calculated for different welding conditions. Based on their summary, weld gap size was reported to be the most significant factor in determining thermal condition in thermite welding. Other related modeling works include simulation of pearlite formation during flash-butt welding of R350HT rail steel with composition 0.72-0.80C, 0.70-1.20Mn, 0.15-0.58Si (wt.%) by Weingrill, et al. [5]. They used interlamellar spacing as main parameter to obtain mechanical properties of pearlitic rail steel such as strength, hardness, and wear-resistance. Their thermo-metallurgical numerical simulation utilizes MATLAB routines in combination with SYSWELD. First, they obtained a TTT-diagram of R350HT rail steel from JMatPro based on the chemical composition and austenitization condition. Next, the CCT diagram was obtained using dilatometry experiment. During their flashbutt welding experiments, thermocouples were attached in the HAZ at the rail head at different distances from the weld centerline. The Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK) and Koistinen-Marburger kinetics models for non-isothermal diffusion-controlled transformation were performed on MATLAB. Finally, all determined parameters were input into SYSWELD metallurgical database to perform thermometallurgical simulation of flash-butt welding of R350HT rail steel [5]. In their subsequent work of multi-layer GMAW of R350HT rail steel [6], they also used SYSWELD to perform a 3D multilayer thermo-metallurgical simulation using SYSWELD to calculate temperature evolution as well as phase transformation in the HAZ of multi-layer GMAW welds. They also simplify their model to reduce the model complexity and simulation time by using a symmetry model in the y-z plane along the centerline of the weld path to lower the element numbers. In addition, they also neglect the motion

drugih grešaka, mikroporoznost se ne može izbeći za vreme aluminutermiskog zavarivanja.

Iz oblasti modeliranja i simulacije aluminutermiskog zavarivanja čelika za šine, pronađen je samo jedan rad. Chen, i dr. [4] su izvršili termičko modeliranje primenom FIDAP programa, koji predstavlja proračunski paket zasnovan na metodi konačnih elemenata, koji je u okviru programskog paketa Fluent. Oni su takođe napomenuli da je problem uključivanje svih fizičkih fenomena koji se javljaju kod aluminutermiskog zavarivanja čelika za šine u jedan model i oni su primenili samo model provođenja toplote koji je dominantan pri prenosu toplote i koji utiče na formiranje temperatura tokom aluminutermiskog zavarivanja. U njihovom radu, raspodela temperature, širina metala šava i širina oblasti ZUTa su izračunavani za različite uslove zavarivanja. Na osnovu njihovih zaključaka, navedeno je da je veličina zazora najznačajniji faktor pri određivanju termičkih uslova pri aluminutermiskom zavarivanju. Drugi slični radovi uključuju simulaciju formiranja perlita pri sučeonom elektrotopnom zavarivanju čelika za šine R350HT, sa sledećim hemijskim sastavom: 0.72-0.80C, 0.70-1.20Mn, 0.15-0.58Si (zapr. %), što je prikazano u radu Weingrill i dr. [5]. Oni su koristili međulamelarno rastojanje kao glavni parameter za dobijanje mehaničkih osobina perlitnog čelika za šine, kao što su čvrstoća, tvrdoća i otpornost na habanje. Njihova termo – metalurška numerička simulacija koristi MATLAB rute u kombinaciji sa programom SYSWELD. Prvi korak je dobijanje IR dijagrama za čelika za šine R350HT uz pomoć programa JMatPro zasnovano na hemijskom sastavu i uslovima austenitizacije. Sledeće je izrada KH dijagrama primenom dilatometrijskih ispitivanja. Za vreme eksperimenata sučeonog zavarivanja, termoparovi su postavljeni u ZUTu, glave šine na različitim rastojanjima od centralne linije zavarenog spoja. Kinetički modeli Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK) i Koistinen-Marburger model za ne - izotermalnu difuzijom kontrolisanu transformaciju, su primenjeni u programu MATLAB. Konačno, tako određeni parametri su unešeni u SYSWELD metaluršku bazu podataka da bi se izvršila termo – metalurška simulacija sučeonog zavarivanja čelika za šine R350HT [5]. U njihovom daljem radu na višeprolaznom zavarivanju čelika za šine R350HT postupkom MAG [6], gde je takođe primenjen program SYSWELD da bi se izvršila 3D simulacija termičkih i metalurških procesa radi dobijanja temperaturne istorije, kao i faznih transformacija u ZUTu višeprolaznog MAG zavarenog spoja. Oni su



of welding torch as well as using the simplified spherical shape of Goldak heat source (16 mm width and length, power ratio of 1.0 and length ratio of 0.9) as compared to the actual pulsed mode GMAW process.

Regarding the modeling of mechanical property of rail steel, Boonsukachote, et al. [7] performed mechanical property modeling of pearlitic rail steel of composition 0.747C, 0.782Mn, 0.298Si (wt.%). Their experimental tasks involves the tensile test, Charpy impact test, and metallurgical analysis. Next, they used the microstructure based RVE models to evaluate the effects of each single phase on the mechanical property, i.e. performance of rail steel. Different amount of bainite were predicted using their 3D RVE simulations and the relationships between strength (yield strength and tensile strength) and bainite volume fraction were obtained.

In this research, SYSWELD software [8] is used to perform thermal-mechanical-metallurgical simulation during thermite welding of rail steel. This article mainly discusses the research methodology that will be used to formulate the prediction of the microstructure evolution in the heat affected zone regions of thermite welding of railway steel. It is noted that the aim of this research work is to simulate and evaluate how preheat, heat generation during chemical reaction of thermite welding and possible post-weld heat treatment affect the microstructure evolution as well as the mechanical property of thermite welded railway steel. The output and the outcome of this research will be used as the baseline for future development of structural integrity program for improving the welding procedure of railway steel including the design and selection of welding processes and materials involved for repair and maintenance of railway steel tracks, which undergo several loading conditions. The following sections discuss the preliminary experimental studies and how it will be used to perform SYSWELD simulation, which will be the focus of our on-going research.

pojednostavili model da bi smanjili kompleksnost modela i vreme simulacije, primenom simetrije modela prema y-z ravni duž centralne linije spoja, čime je smanjen broj elemenata za koje se vrši proračun. Takođe je zanemareno kretanje gorionika primenom pojednostavljenog sferičnog oblika za opis izvora toplote prema modelu Goldaka (16mm širine i dužine, odnos snage 1.0 i dužina 0.9) u poređenju sa aktuelnim pulsirajućim MAG procesom.

Što se tiče modeliranja mehaničkih osobina čelika za šine Boonsukachote i dr. [7] su izvršili modeliranje mehaničkih osobina perlitnih čelika za šine sledećeg hemijskog sastava: 0.747C, 0.782Mn, 0.298Si (zapr.%). Njihovo eksperimentalno istraživanje obuhvatalo je ispitivanje zatezanjem, ispitivanje energije udara po Šarpiju i metaluršku analizu. Zatim su primenili mikrostrukturne RVE modele, da bi ispitali efekte svake pojedinačne faze na mehaničke osobine čelika za šine. Različiti udeli beinita su predpostavljeni u njihovoj 3D RVE simulaciji i dobijena je zavisnost između čvrstoće (granice razvlačenja i zatezne čvrstoće) i zapreminskog udela beinita.

U ovom radu SYSWELD softver [8] je primenjen da bi se izvršila termičko – mehanička – metalurška simulacija procesa alumintermiskog zavarivanja čelika za šine. U ovom radu se najviše razmatra istraživačka metodologija koja će biti primenjena da bi se predvidelo nastajanje mikrostrukture u oblastima zone pod uticajem toplote pri alumintermiskom zavarivanju čelika za šine. Istaknuto je da je cilj ovog istraživačkog rada simulacija i procena kako predgrevanje, generisanje toplote za vreme hemijske reakcije alumintermiskog zavarivanja i moguća termička obrada posle zavarivanja, utiču na mikrostrukturu i mehaničke osobine alumintermiski zavarenog spoja čelika za šine. Dobijeni rezultati ovog istraživanja će biti korišćeni kao osnova za budući razvoj programa integriteta konstrukcija za unapređenje procedura zavarivanja čelika za šine, uključujući projektovanje i izbor procesa zavarivanja i materijala koji se koriste za popravku i održavanje železničkih pruga, koje podnose različite uslove opterećenja. Naredna poglavlja razmatraju preliminarna eksperimentalna istraživanja i način kako mogu da se primene u SYSWELD simulacijama, što će biti focus tekućih istraživanja.



2. Experimental works

Rail steel grade R260 (0.62-0.80C, 0.70-1.20Mn, 0.15- 0.58Si, wt.%) was used in the current phase of the study. Thermite welding of R260 rail steels was performed at the Rail Welding Section, Production and Repair Center, Civil Engineering Department, State Railway of Thailand as showed in Fig. 1. The experimental procedures were explained in our previous works [9-10]. In our former works the effect of preheat and cooling rate during thermite welding were investigated. Our results reported that thermite welding of rail steel grade R260 with slower cooling rate would result in slightly softer pearlite, i.e. coarser pearlite in the heat affected zone region in the rail head section [9]. In addition, the soundness and quality of the weld were tested using slow-bend test and ultrasonic testing. The results showed improved performance and lower weld defects when higher preheat was performed during thermite welding.

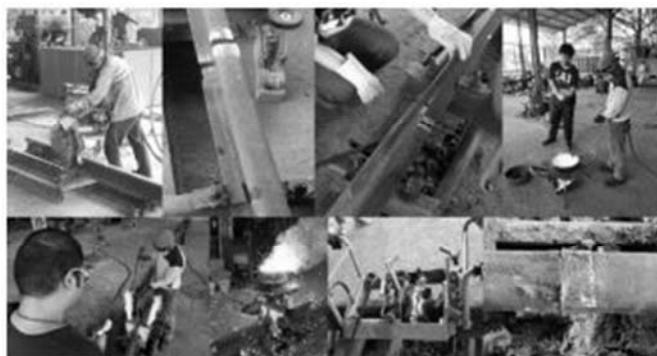


Figure 1. Thermite welding of rail steels

Slika 1. Aluminotermisko zavarivanje (Termit) čelika za šine

Next, the microstructure evolution at different cooling rate was performed using Jominy End Quench Test method on rail steels of two different grades [11]. It was later proved using the mass spectroscopy technique to analyze the chemical composition of one of the two steel to be in the specification of R260 steel and another with lower carbon and manganese contents which results in softer and has less hardness. The chemical composition of R260 steel used in this work was found to be 0.725-0.735C, 1.195-1.231Mn, and 0.238-0.253Si, wt.%. Fig. 2 displays the hardenability curves of rail steel grade R260 for data No. 1 and data No. 2, which were heat treated at different temperatures before quenching. It was found that austenitizing temperature at higher temperature of 950°C for 1 hour resulted in lower

2. Eksperimentalni rad

Čelik za šine kvaliteta R260 (0.62-0.80C, 0.70-1.20Mn, 0.15-0.58Si, zapr.%) je primenjen u ovoj fazi ispitivanja. Aluminotermisko zavarivanje čelika za šine kvaliteta R260 je izvršeno u Rail Welding Section, Production and Repair Center, Civil Engineering Department, State Railway of Thailand, kao što je prikazano na Slici 1. Eksperimentalna procedura je prikazana u našim prethodnim radovima [9-10]. U prethodnim radovima ispitivan je efekat predgrevanja i brzine hlađenja za vreme aluminotermiskog zavarivanja. Dobijeni rezultati pokazuju da aluminotermisko zavarivanje čelika za šine kvaliteta R260 sa nižim brzinama hlađenja rezultuju stvaranjem mekšeg perlita, na primer grubog perlita u oblasti zone uticaja toplote u delu glave šine [9]. Zatim je vršeno ispitivanje homogenosti i kvaliteta zavarenog spoja primenom ispitivanja sporim savijanjem i ispitivanje ultrazvukom. Rezultati su pokazali poboljšane osobine i manje zavarivačkih grešaka kada je primenjeno predgrevanje na višim temperaturama pri aluminotermiskom zavarivanju.

Ocena mikrostruktura pri različitim brzinama hlađenja je vršena primenom Jomini proba na čeliku za šine na dva kvaliteta [11]. Kasnije je dokazano primenom tehnike masene spektroskopije za analizu hemijskog sastava, da je jedan od dva čelika po specifikaciji čelik R260, a drugi sa nižim sadržajem ugljenika i mangana koji je mekši i pokazivao je nižu tvrdoću. Hemijski sastav čelika R260 koji je korišćen u ovom istraživanju je bio: 0.725-0.735C, 1.195-1.231Mn i 0.238-0.253Si (zapr.%). Slika 2 prikazuje krive otvrdnjavanja čelika za šine R260 za podatke Br. 1 i Br. 2. koji su termički obrađeni na različitim temperaturama pre kaljenja. Nađeno je da temperatura austenitizacije na višoj temperature od 950°C za 1 sat rezultuje nižom tvrdoćom u



hardness as compared to austenitizing temperature at lower temperature of 850°C for 1 hour.

poređenju sa temperaturom austenitizacije na nižoj temperaturi od 850°C za 1 sat.

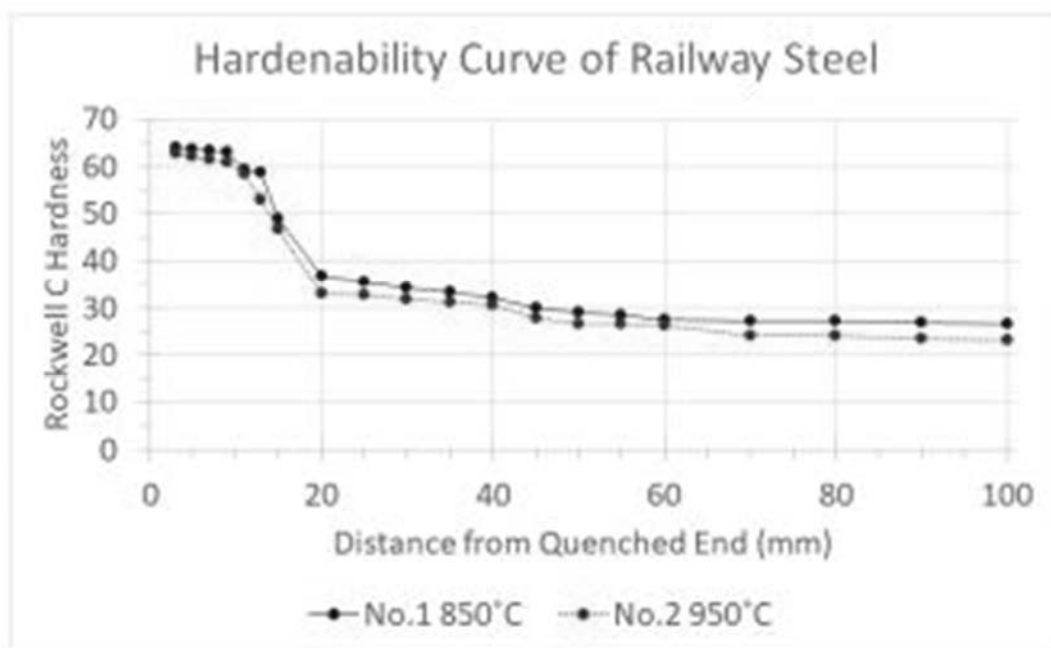


Figure 2. Hardenability curves of railway steels

Slika 2. Krive otvrdnjavanja čelika za šine

Next, the rail steel grade R260 specimens were sectioned at different hardness to obtain their representative microstructure evolutions at different cooling rates from Jominy End Quench tests performed. The microstructure at 1000X magnification obtained from optical microscope is provided in Fig. 3 below. It can be seen that the microstructure that corresponds to high hardness of 59-60 HRC is mainly consists of martensite phase. At hardness levels of 53-56 HRC, the microstructure is mixture of martensite, bainite and pearlite phases. For hardness levels at 37-42 HRC, microstructure is a little difficult to distinguish and is possibly mixture of martensite, bainite, and pearlite. At further distance, the hardness levels of 31-33 HRC display mainly pearlite structures. In order to validate this further, similar approach to Weingrill, et al. [5-6] is necessary to obtain TTT and CCT diagrams for R260 rail steel. Our plan is to use Electron Backscatter Diffraction (EBSD) to quantify the phase fractions, size, and volume fraction of martensite, bainite, and pearlite in different regions of rail steels subjected to different heating and cooling conditions. It is important to obtain microstructure characterization of representative thermite welding experimentally similar to those already obtained from Jominy End Quench test in order to validate the SYSWELD simulation of thermite welding of R260 rail steels.

Uzorci čelika za šine kvaliteta R260 su isecani na mestima različitih tvrdoća, da bi se dobile reprezentativne mikrostrukture pri različitim brzinama hlađenja sa Jominy testa. Mikrostrukture pri uvećanju od 1000 puta dobijene na svetlosnom mikroskopu prikazane su na Slici 3. Može se videti da na uzorcima sa tvrdoćom koja odgovara visokoj tvrdoći od 59-60 HRC, mikrostruktura se uglavnom sastoji od martenzitne faze. Pri tvrdoćama od 53-56 HRC, mikrostruktura je mešavina martenzitne, beinitne i perlitne faze. Za nivoe tvrdoća od 37-42 HRC, teško je izdvojiti pojedine faze, pa je verovatno mikrostruktura mešavina martenzita, beinita i perlita. Na većim rastojanjima od centralne linije spoja, gde je nivo tvrdoće 31-33 HRC, javlja se uglavnom perlitna struktura. Da bi ovo potvrdili, primenjen je sličan pristup kao u radu Weingrill, i dr. [5-6], pa je bilo neophodno da se dobiju IR i KH dijagrami za čelik za šine R260. Naš plan je da se primeni elektronska povratna difrakcija - Electron Backscatter Diffraction (EBSD), da bi se kvantifikovali udeli faza, veličina i zapreminski udeli martenzita, beinita i perlita u različitim oblastima čelika za šine, koji su podvrgnuti različitim uslovima zagrevanja i hlađenja. Važno je dobiti karakteristične mikrostrukture dobijene eksperimentalno pri aluminotermijskom zavarivanju, slične onim koje su dobijene Jominy testom, a da bi se potvrdila simulacija aluminotermijskog zavarivanja čelika za šine R260.

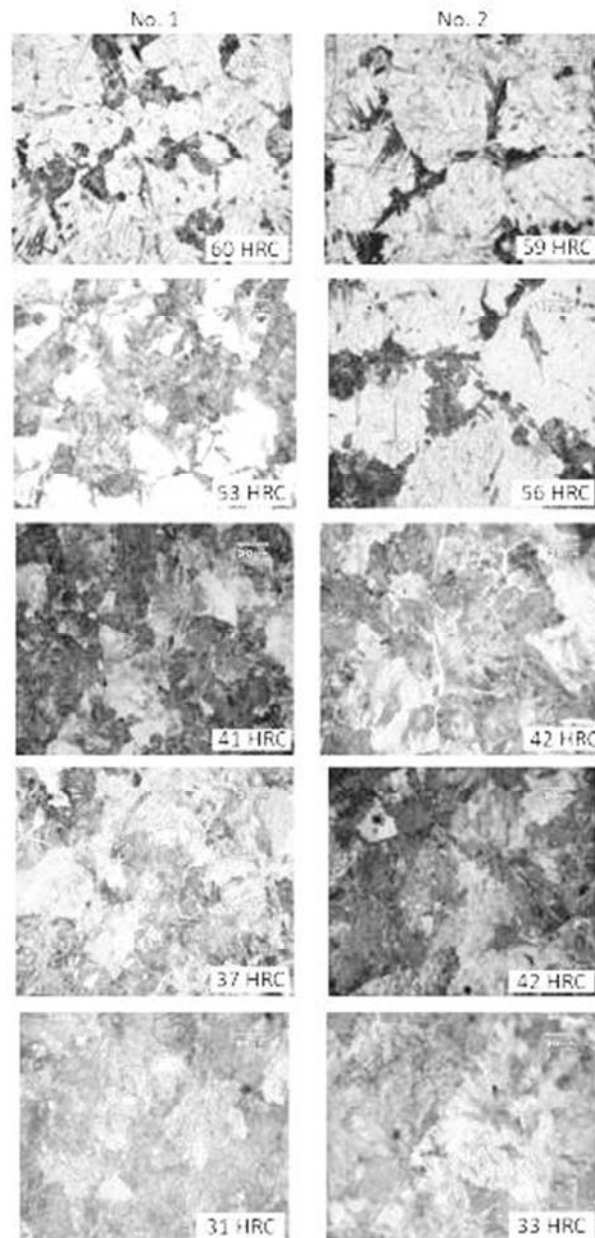


Figure 3. Microstructure of R260 rail steel at different cooling rates

Slika 3. Mikrostrukture čelika za šine R260 pri različitim brzinama hlađenja

3. Simulation works

The effects of cooling rate during thermite welding was simulated using SYSWELD software. Fig. 4 displays calculation example from ESI Group's SYSWELD software [8] on the application of heat treatment analysis during Jominy End Quench Test of Steels. In our work, we will start with validating the simulation with experimental Jominy End Quench Test results discussed in previous section. After that, the thermite welding simulation will be performed using simplified symmetry along the centerline to calculate both the temperature evolution with different liquid or molten temperature, which will be used to determine the

3. Simulacija procesa

Efekti brzina hlađenja za vreme aluminotermijskog zavarivanja su simulirani primenom SYSWELD softvera. Na Slici 4 prikazan je primer proračuna SYSWELD softverom ESI Grupe [8], primenjenom na analizi termičke obrade za vreme Jomini testa. U ovom radu započeto je sa potvrdom simulacije sa ekperimentalnim rezultatima Jomini testa, što je diskutovano u prethodnom odeljku. Nakon toga simulacija aluminotermijskog zavarivanja će biti vršena primenom pojednostavljene simetrije duž centralne linije spoja, da bi se proračunale temperature na obe strane sa različitim temperaturama tečne i



microstructure and hardness in the heat affected zone of thermite welded R260 railway steel. It is noted that the simulation work is not included in this article and will be explained in our future work.

rastopljene faze i koje će biti iskorišćene za određivanje mikrostruktura i tvrdoća u zoni uticaja toplote aluminotermijsko zavarivarenog čelika za šine R260. Naglašeno je da rad na simulaciji procesa nije prikazan u ovom radu i da će biti izložen u našem budućem radu.

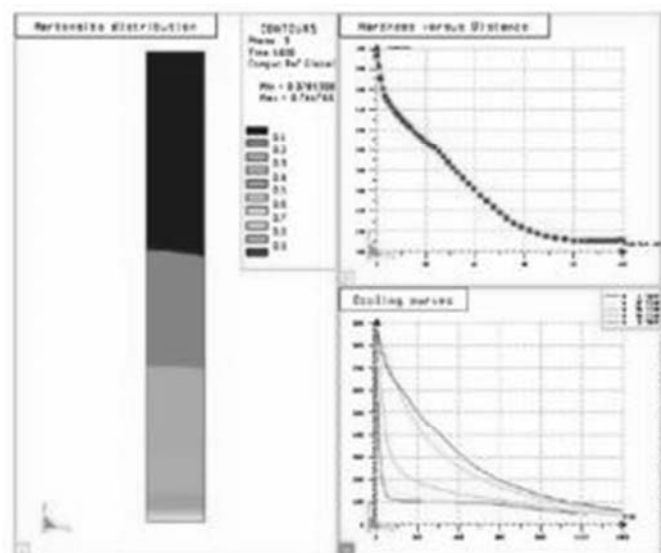


Figure 4. Example of SYSWELD calculation of Jominy End Quench Test [8]

Slika 4. Primer SYSWELD proračuna Jomini testa zakaljivanja [8]

4. Summary

This paper discusses the experimental and simulation study of thermite welding of R260 rail steel. The effect of preheat temperature and cooling rate has already been performed experimentally and discussed in this paper. The simulation work using SYSWELD is explained in the literature review and how it will be utilized to simulate the thermite welding of rail steel. To validate the simulation, Jominy End Quench Test was used to quantify the cooling rate and microstructure evolution in R260 steel. Further details on the models will be available in future publication.

Acknowledgements

This research was funded by College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok (Grant No. Res-CIT0316/2018). The author also thanks ESI-Group South-East Asia and Patkol Public Company Limited for their support of hardware and computer software during this project. The author also thanks the State Railway of Thailand for their support for thermite welding and railway steel. The author also thanks Mr. Anuwat Rattana and all students who assist in this research project.

4. Zaključak

Ovaj rad razmatra eksperimentalno istraživanje i simulaciju aluminotermijskog zavarivanja čelika za šine R260. Efekti temperature predgrevanja i brzine hlađenja su praćeni eksperimentalno i diskutovani su u radu. Simulacija primenom programa SYSWELD je objašnjena u pregledu literature, kao i način kako će on biti iskorišćen za simulaciju aluminotermijskog zavarivanja čelika za šine. Za potvrdu simulacije primenjen je Jomini test prokaljivanja, da bi se kvantifikovale brzine hlađenja i mikrostrukture koje se formiraju kod čelika R260. Više detalja modela će biti prikazani u budućim publikacijama.

Zahvalnica

Ovo istraživanje je finansirano od strane College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok (Grant No. Res-CIT0316/2018). Autor se takođe zahvaljuje ESI-Group South-East Asia i Patkol Public Company Limited na njihovoj podršci za hardver i kompjuterski softver za vreme projekta. Autor se takođe zahvaljuje State Railway of Thailand za njihovu podršku za aluminotermijsko zavarivanje i za čelik za šine. Autor se zahvaljuje Mr. Anuwat Rattana i svim studentima koji su pomagali u istraživačkom projektu.



References / Literatura

- [1] Myers J, Geiger GH and Poirier DR. 1982 Welding Journal 61 8 285s-268s
- [2] Wang Y, Zhou H, Shi Y and Feng B. 2012 Metallurgy and Materials 19 5 409-420
- [3] Chen Y, Lawrence FV, Barkan CPL and Dantzig JA. 2006 Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 220 4 373-384
- [4] Chen Y, Lawrence FV, Barkan CPL and Dantzig JA. 2006 Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 220 4 207-217
- [5] Weingrill L, Nasiri MB, Enzinger N. 2016 Proceedings of 10th International Conference on Trends in Welding Research, Tokyo, Japan 599-602
- [6] Weingrill L, Nasiri MB and Enzinger N. 2019 Welding in the World 63 63-73
- [7] Boonsukachote P, Kingklang S and Uthaisangasuk V. 2019 Key Engineering Materials 798 3-8
- [8] ESI Group SYSWELD 2018
- [9] Sojiphan K, Lertpatipolchai A, Krittapas S and Chaichumpoo N. 2017 Proceedings of the 4th Thailand Rail Academic Symposium, Nakhon Ratchasima, Thailand 1-4
- [10] Sojiphan K, Sukpanaum N, Sangrung E, Lakaew W and Wichasri P. 2019 Proceedings of The 8th Asia-Pacific IIW International Congress, Bangkok, Thailand 121-124
- [11] Sojiphan K, Netnirandor T, Watcharin W and Suasawat S. 2018 Proceedings of the 11th Thailand Metallurgy Conference, Pattaya, Thailand 24-2

Članstvo u strukovnoj asocijaciji DUZS

je referenca za Vaš profesionalni status

Članarina za 2021. godinu je 3500,00 dinara

Uplatom članarine stižete pravo na beneficirane cene
pretplate časopisa (strana MARKETING)

Tekući račun DUZS: 325-9500600002588-46

Informacije



+ 381 (11) 2420-652 (10-16 h)



duzs@eunet.rs

www.duzs.org.rs



68. GODIŠNJA SKUPŠTINA DUZS

Redovna 68. godišnja skupština DUZS zakazana je za utorak, 29. jun 2021. godine u svečanoj sali Instituta IMS u Beogradu, Bulevar vojvode Mišića 43 sa sledećim dnevnim redom:

1. Otvaranje zasedanja Skupštine i izbor radnih tela
2. Verifikacija mandata članova Skupštine
3. Izveštaj o radu DUZS za period 2020 - 2021. godine.
Podnosilac izveštaja: predsednik DUZS
4. Izveštaj o radu DUZS-CertPers za period 2020 - 2021. godine.
Podnosilac izveštaja: izvršni rukovodilac DUZS-CertPers
5. Izveštaj o finansijskom poslovanju u 2020. godini.
Podnosilac izveštaja: predsednik Nadzornog odbora
6. Diskusija po podnetim izveštajima i usvajanje izveštaja
7. Predlog plana rada za 2021 - 2022. godinu; diskusija i usvajanje
8. Razno

SAVETOVANJE ZAVARIVANJE – OKTOBAR 2021.

Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji – DUZS vas sa zadovoljstvom poziva na 31. tradicionalno savetovanje ZAVARIVANJE.

Zbog pandemije COVID 19, organizacija skupa "ZAVARIVANJE 2020" (WELDING 2020) je pomerena na 2021. godinu. S obzirom da se situacija donekle stabilizovala, naše udruženje nastavlja sa planiranjem skupa za datum 13-16. oktobar 2021. godine u Kladovu, u hotelu „Aquastar Danube“.

Teme Savetovanja su

1. Konvencionalni i nekonvencionalni postupci zavarivanja
2. Osnovni, dodatni i pomoćni materijali
3. Integritet konstrukcija i osiguranje kvaliteta
4. Tehnička regulativa, obrazovanje, ekologija i zaštita

U vreme održavanja Savetovanja, planirana je i prateća izložba opreme i materijala za zavarivanje i IBR. Nadamo se da će zdravstvena situacija biti stabilna i da ćemo se na jesen ponovo družiti onako kako smo navikli....

Više informacija možete naći na sjatu DUZS, www.duzs.org.rs



11. MEĐUNARODNO NAUČNO - STRUČNO SAVJETOVANJE SBZ 2021. „Strojarske tehnologije u izradi zavarenih konstrukcija i proizvoda“

U godini obilježavanja 100. godišnjice metaloprerađivačke industrije „Đuro Đaković“ u Slavonskom Brodu - Hrvatska, organizuje se od 03. do 05. 11. 2021. 11. Međunarodno naučno - stručno savjetovanje SBZ 2021: „Strojarske tehnologije u izradi zavarenih konstrukcija i proizvoda“. U okviru savetovanja predviđene su sledeće teme:

- Nove tehnologije i materijali
- Postupci zavarivanja
- Robotizacija i automatizacija
- Posude pod pritiskom
- Zavarivanju srodne tehnike
- Izrada zavarenih konstrukcija
- Kontrola kvalitete zavarenih proizvoda
- Pouzdanost i sigurnost zavarenih proizvoda i konstrukcija
- Zavarljivost materijala
- Dodatni materijali za zavarivanje
- Oprema za zavarivanje i srodne postupke
- Kadrovi i obrazovanje u zavarivanju
- Metalurgija
- Ekologija i zaštita na radu
- Ekonomski aspekti u zavarivanju

Najnovije informacije o skupu možete pronaći na sajtu: <https://dtzsb.unisb.hr/>



Društvo za tehniku
zavarivanja Slavonski
Brod



Univerza v Mariboru
Fakulteta za strojništvo



Sveučilište u
Slavonskom Brodu



The Faculty of Materials
Science and Technology
in Trnava



Đuro Đaković Grupa
Slavonski Brod

PRVI POZIV

U godini obilježavanja obljetnice „Đuro Đaković“-100 godina metaloprerađivačke industrije u Slavonskom Brodu, organiziramo

11. MEĐUNARODNO ZNANSTVENO-STRUČNO SAVJETOVANJE SBZ 2021

„STROJARSKE TEHNOLOGIJE U IZRADI ZAVARENIH KONSTRUKCIJA I PROIZVODA, SBZ 2021.“

SLAVONSKI BROD, 03. - 05. 11. 2021.

TEME:

Nove tehnologije i materijali
Postupci zavarivanja
Robotizacija i automatizacija
Posude pod tlakom
Zavarivanju srodne tehnike
Izrada zavarenih konstrukcija
Kontrola kvalitete zavarenih proizvoda
Pouzdanost i sigurnost
zavarenih proizvoda i konstrukcija
Zavarljivost materijala
Dodatni materijali za zavarivanje
Oprema za zavarivanje i srodne postupke
Kadrovi i obrazovanje u zavarivanju
Metalurgija
Ekologija i zaštita na radu
Ekonomski aspekti u zavarivanju



VAŽNI DATUMI

01. rujan 2021. Prijava sažetaka
15. rujan 2021. Obavijest o prihvaćanju sažetaka
18. listopada 2021. Krajnji rok za slanje radova
25. listopada 2021. Krajnji rok za prijavu sudionika

KONTAKT

Sveučilište u Slavonskom Brodu
Trg I. B. Mažuranić 2,
35 000 SLAVONSKI BROD
E-mail: dtzsb@unisb.hr

Miroslav Duspara
Tel. 035 493 414
mduspara@unisb.hr

Božo Despotović
Tel. +385989836753
despotovic.bozo@gmail.com

Najnovije informacije o skupu možete pronaći na:

<https://dtzsb.unisb.hr/>

Smještaj: Turistička zajednica Slavonskog

Broda: <http://www.tzgsb.hr>

RIJEČ ORGANIZATORA

Poštovane Kolegice i Kolege

U ime Organizacijskog odbora, pozivamo Vas na 11. MEĐUNARODNO ZNANSTVENO-STRUČNO SAVJETOVANJE, SBZ 2021 "STROJARSKE TEHNOLOGIJE U IZRADI ZAVARENIH KONSTRUKCIJA I PROIZVODA, SBZ 2021".

U godini u kojoj slavimo veliki jubilej 100 godina metaloprerađivačke industrije u Slavonskom Brodu, izuzetno nam je zadovoljstvo pozvati vas na ovaj skup koji osim svečarskog dijela ima i znanstveno – stručni karakter. Tijekom proteklih deset susreta ovaj skup je okupljao brojne znanstvenike i stručnjake koji su svojim doprinosom prezentirali i promovirali novitete u zavarivačkoj struci. Stoga i ovaj puta organizatori pozivaju sve koji mogu dati svoj doprinos na području tehnologije zavarivanja i ostalih tehnologija kao što su obrada odvajanjem čestica, deformiranje, toplinska obrada, automatizacije i robotizacije u proizvodnji zavarenih konstrukcija i sve ostale koji mogu na bilo koji drugi način dati svoj doprinos u razvoju zavarivačke djelatnosti da prezentiraju svoja znanstvena i stručna saznanja i iskustva. I ove godine uz izložbu uređaja, dodatnih materijala i opreme za zavarivanje, svi prezentirani radovi bit će objavljeni na stranicama DTZ-a Slav. Brod. Svim dosadašnjim i budućim sudionicima skupa želimo dobrodošlicu u Slavonski Brod.

Prof.dr.sc. Ivan Samardžić, dipl.ing. IWE
Božo Despotović, dipl.ing. IWE



MEĐUNARODNA KONFERENCIJA TIMA21– OKTOBAR 2021. "Innovative Technologies for Joining Advanced Materials"

Međunarodna konferencija TIMA21 je planirana da se održi 25-26. novembra 2021. godine u Temišvaru – Rumunija. Ovo je 12. u nizu uspešnih konferencija o inovativnim tehnologijama za spajanje materijala koje organizuje Nacionalni institut za istraživanje i razvoj zavarivanja i ispitivanje materijala - ISIM Temišvar u saradnji sa Politehničkim Univeritetom u Temišvaru i Akademijom tehničkih nauka Rumunije - Odsek Temišvar.

Važni datumi:

- Prijava teme i apstrakta - do 30. septembra 2021
- Prihvatanje apstrakta - do 05. oktobra 2021
- Predaja radova - do 29. oktobra 2021
- Prihvatanje radova – do 05. novembra 2021
- Registracija učesnika – do 12. novembra 2021

Više informacija možete naći na sjatu DUZS, www.duzs.org.rs



The 12th International Conference



Innovative Technologies for Joining Advanced Materials

Indexed in major international database:
ISI, SCOPUS, Ei Compendex, REAXYS etc.

Conference topics

- New joining technologies
- Materials coatings
- Modelling and simulation of welding and allied processes
- Specific problems in advanced materials joining
- Non-Destructive Testing (NDT)
- Mechanical and structural characterization of advanced materials and joints
- Quantitative non-destructive testing
- Fracture mechanics of advanced materials
- Damage of advanced materials under time-dependent-actions and remaining life assessment, fatigue, creep, corrosion, irradiation
- Quality of welded joints and welded structures

Important dates

- Submission of abstracts
September 30, 2021
- Abstract acceptance
October 05, 2021
- Submission of papers
October 29, 2021
- Acceptance of papers
November 05, 2021
- Registration of participants
November 12, 2021

Registration fees

Before August 31, 2021	Before September 30, 2021	Papers in cooperation with authors/co-authors from ISIM	Papers with authors/co-authors from UPT and ASTR	
140 €	190€	free of charge	90€	first author
100 €	140 €	free of charge	75 €	first author from the academic environment
70 €	100 €	free of charge	50 €	student, master student, PhD student, under 35 years old researchers

November 25-26, 2021
Timisoara, ROMANIA

2023 Timisoara 2023
European Capital
of Culture

Organisers



TIMIȘOARA



Universitatea
Politehnica
Timisoara



www.isim.ro/tima



¹Tünde Anna Kovácsa, ²Annamária Vladár, ³Peter Pinkec, ⁴Hassanen L. Jaber

Dissimilar metal joining by ultrasonic welding Spajanje raznorodnih metala ultrazvučnim zavarivanjem

Stručni rad / Professional paper

Rad je u izvornom obliku objavljen u okviru 72. IIW godišnje Skupštine i međunarodne konferencije održane u Bratislavi-Slovačka 07-12. Jula 2019

Rad primljen / Paper received:

Oktobar 2020.

Prevod izvornog rada na srpski jezik: Z. Odanović

Key words: Ultrasonic welding, solid-state welding, heat affected zone

Adresa autora / Author's address:

District of Materials Technology, Óbuda University, Budapest, Hungary

¹akovacs.tunde@bgk.uni-obuda.hu,

²bvladar.anna@gmail.com,

³cpinke.peter@bgk.uni-obuda.hu,

⁴dhassen.jaber@bgk.uni-obuda.hu

Ključne reči: Ultrazvučno zavarivanje, zavarivanje u čvrstom stanju, zona uticaja toplote

Abstract

The dissimilar metal welding always challenges. The different alloys have different physical and mechanical properties. In the case of the electronic component of the car, it needs to establish a joint between dissimilar metals. The useful metals are for this application are copper and aluminium. Even that has good conductivity, corrosion resistance and formability. By fusion welding technologies these thin metal workpiece joining is not a simple technology. To use a solid state welding technology can be a suitable solution to establish a cohesion joint in case of this task. It well-known much suitable technologies, even that all of them has advantages and disadvantages. The choice of solid-state technology is the ultrasonic welding process. In the case of this process, we use pressure and highfrequency vibration for welding. Besides this process, the friction and vibration generated heat is lower than the metal melting temperature. The base of this technology is the ultrasound-assisted high-level formability. The optimization of this dissimilar joining technology parameters needs many pre-welding and testing process. In this work, we wanted to introduce this empirical optimization process.

1. Introduction

Well known that the weldability of the materials is not a material property, depends on the material properties, the welding process and the process parameters too. In this article, we wanted to studies the weldability of some metals by ultrasonic welding process under different preparation and in case of different process parameters. The ultrasonic welding is a special quasi-solid-state process because the joint established by high-frequency ultrasound and clamping force. The high-frequency sound waves vibration cause friction and occurs

Rezime

Zavarivanje različitih metala uvek predstavlja izazov. Različite legure imaju različite fizičke i mehaničke osobine. U slučaju elektronskih komponenti za vozila, potrebno je uspostaviti spoj različitih metala. Metali koji se primenjuju su bakar i aluminijum. Čak i kada imaju dobru provodljivost, koprozonu otpornost i plastičnost, zavarivanje takvih metalnih komada nije jednostavna tehnologija. Upotreba tehnologija zavarivanja u čvrstom stanju može predstavljati prihvatljivo rešenje za dobijanje kohezionog spoja. Dobro su poznate mnoge takve tehnologije i one imaju svoje prednosti i nedostatke. Jedan od mogućih izbora tehnologija zavarivanja u čvrstom stanju je process ultrazvučnog zavarivanja. Kod tog postupka zavarivanja primenjuje se pritisak i vibracije viskih frekvencija. Osim toga kod ovog postupka trenje i vibracije generišu toplotu koja je niža od potrebne za topljenje metala. Osnova ove tehnologije je visok nivo plastičnosti metala potpomognut ultrazvukom. Optimizacija ove tehnologije spajanja različitih metala zahteva puno probnih zavarivanja i ispitivanja. U ovom radu bila je želja da se prikaže proces empiričke optimizacije.

1. Uvod

Dobro je poznato da zavarljivost materijala nije osobina materijala i zavisi od više uticajnih faktora: pored osobina materijala i od postupka zavarivanja i procesnih parametara. U ovom radu izučavana je zavarljivost nekih metala zavarivanih ultrazvučnim zavarivanjem u zavisnosti od različitih priprema i u slučaju različitih procesnih parametara. Ultrazvučno zavarivanje je poseban process, u kvazi čvrstom stanju, zato što se spoj uspostavlja visokofrekventnim ultrazvukom i silom spajanja. Visokofrekventni zvučni talasi vibracijom izazivaju



heat [2]. Between the joined surfaces, the introduced affects build strong cohesion bonding. This joint is a real welding joint without melting and fusion but with strong atomic bonding. The advantages of ultrasonic welding are that it: Permits joining of thin materials to thick materials, permits dissimilar metal joints provides joints with good thermal and electrical conductivity Joins metals without the heat of fusion, provides efficient energy use Typically requires no filler material, flux, or special atmosphere Typically requires no special cleaning processes Welds through most oxides [2] The high-frequency friction establishes heat could cause some changing in the microstructure and the mechanical properties of the joint and the heat affected zone. Even that the joining technologies established bonds quality and failures kinds depends on the process parameters. The parameters optimization on the base of the joining process physical and theoretical knowledge is very important to assure the quality by the way of the expected mechanical properties.

2. Theoretical background

The ultrasonic welding is a solid state welding. The joining process base is the plastic deformation. The plastic deformation and the plasticity depends on the temperature. Also the microstructure and the mechanical properties of the metal depends on the deformation leve and the temperature. The heat during the ultrasonic welding established from the process friction and vibration. Known the dislocation theory of the ultrasound energy influence in case of the metalworking [4]. The base of the ultrasonic welding technology the ultrasound effect for the metal formability because the joint made by pressing and vibration. The ultrasonic welding is a solid-state welding technology in which detectable the high-frequency vibration caused friction effected warming in the joint and the heat-affected zone [5- 7]. The established heat can cause changes in the joint microstructure as a function of the established heat and the heat transfer coefficient of the used metal. This changing of the microstructure determine the mechanical properties of the joint. The established heat level and the changing in the metal structure depends on the welding parameters. The expected mechanical properties need always to satisfy the industrial quality requirements. The relationship found between the experimented aluminium-aluminium and aluminium-copper thin sheets welded joint mechanical properties and the welding parameters.

trenje pri čemu se oslobađa toplota [1, 2]. Između površina koje se spajaju, nastaju efekti koji ostvaruju snažno koheziono spajanje. Ovaj spoj je stvarni zavareni spoj bez topljenja i stapanja, ali sa jakim atomskim vezama. Prednosti ultrazvučnog zavarivanja su da ono: omogućava spajanje tankih materijala sa debelim materijalima, omogućava spajanje raznorodnih metala obezbeđujući spoj sa dobrom toplotnom i električnom provodljivošću. Spojevi metala nastali bez utroška toplote za spajanje, obezbeđuju efikasnu upotrebu energije. Proces obično ne zahteva upotrebu dodatnog materijala, topitelja ili posebne atmosfere, zatim ne zahtva poseban proces pripreme čišćenjem i omogućava spajanje kroz većinu oksida [1, 2]. Visokofrekveno trenje stvara toplotu koja može da proizvede neke promene u mikrostrukturi i kod mehaničkih osobina spoja, kao i zonu pod uticajem toplote. Tehnologija spajanja uslovljava nivo kvaliteta spoja, kao i pojavu grešaka koje zavise od procesnih parametara. Optimizacija parametara procesa spajanja, na osnovu fizičkih i teoretskih znanja, je vrlo značajna radi obezbeđenja potrebnog kvaliteta spoja i očekivanih mehaničkih osobina.

2. Teoretske osnove

Ultrazvučno zavarivanje je proces zavarivanja u črstom stanju. Proces spajanja se zasniva na plastičnoj deformaciji. Plastična deformacija i plastičnost zavise od temperature. Takođe mikrostruktura i mehaničke osobine metala zavise od nivoa deformacija i temperature. Toplota nastala pri procesu ultrazvučnog zavarivanja nastaje od procesa trenja i vibracija. Poznato je iz dislokacione teorije uticaj energije ultrazvuka u slučajevima prerade metala [3, 4]. Osnova tehnologije ultrazvučnog zavarivanja je efekat ultrazvuka na plastičnost metala, obzirom da spoj nastaje pritiskom i vibracijama. Ultrazvučno zavarivanje je tehnologija zavarivanja u črstom stanju pri kojoj visokofrekventne vibracije izazivaju efekat trenja koji zagreva spoj i stvara zonu uticaja toplote [5-7]. Nastala toplota može izazvati promene u mikrostrukturi spoja u zavisnosti od količine nastale toplote i koeficijenta prenosa toplote korišćenog metala. Promene u mikrostrukturi određuju mehaničke osobine spoja.

Nivo nastale toplote i promene u strukturi metala zavise od parametara zavarivanja. Očekivane mehaničke osobine spoja trebalo bi uvek da zadovolje industrijske zahteve za kvalitet. U radu su prikazane eksperimentalne zavisnosti parametara zavarivanja na mehaničke osobine, za kombinacije zavarenih spojeva tankih traka metala u kombinaciji aluminijum – aluminijum i aluminijum – bakar.



In the case of the traditional ultrasonic welder machines used magnetostrictive inverter but nowadays the piezoelectric inverter is the applied, the ultrasonic welding setup shown in Fig. 1. The ultrasonic welding standard sign MSZ EN ISO 4063, number 41 process [7, 8].

U slučaju tradicionalnih uređaja za ultrazvučno zavarivanje koristi se magnetostruktivni inverter, dok se danas koristi piezoelektrični inverter u opremi za visokofrekventno zavarivanje, a šematski prikaz procesa je prikazan na slici 1. Standard za ultrazvučno zavarivanje označava se MSZ EN ISO 4063, a broj procesa je 41 [7, 8].

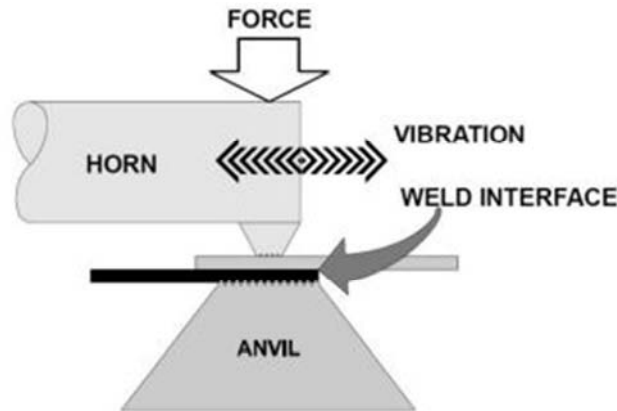


Figure 1. Ultrasonic welding setup [7]

Slika 1. Šematski prikaz ultrazvučnog zavarivanja [7]

The vibration is transmitted by sonotrode. The geometry of the sonotrode is a very important parameter in the setup. Also the material of them is a special alloy (f.ex. Ti base). Ultrasonic welded aluminum samples shown in the Fig. 2. It can be seen that the joint tested by visual inspection is suitable.

Vibracije se prenose sonotrodom. Geometrija sonotroda je vrlo važan parametar pri podešavanju procesa. Takođe njihov material je od specijalnih legura, na primer titanovih legura. Ultrazvučno zavarivareni aluminijumski uzorci prikazani su na Slici 2. Može se primetiti da je moguće da se spoj vizuelno ispita.

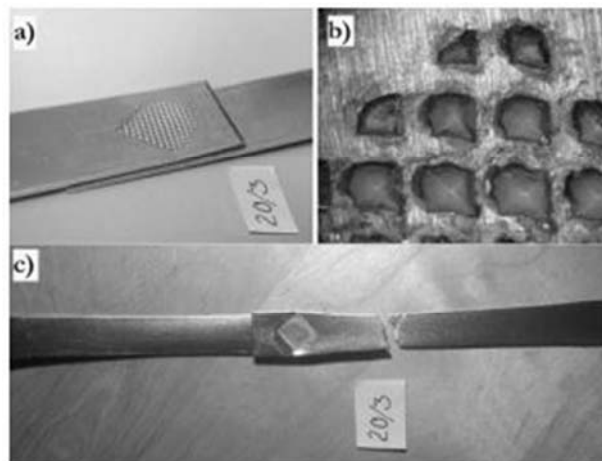


Figure 2. The welded joint

Slika 2. Zavareni spoj

3. Application for dissimilar joining

The variable parameters of the process are the next: time, T (s) the duration of applied ultrasonic vibration, amplitude, A (μm) the longitudinal displacement of the vibration, clamping force, F (N) the compressive force applied perpendicular (normal) to the direction of the vibration. The frequency f (Hz) was constant [9, 10]. The power and energy are calculable from the variable parameters by following equation (1-2), where

3. Primena za raznorodne spojeve

Promenljivi parametri procesa su sledeći: vreme T (s), trajanje primenjenih ultrazvučnih vibracija, amplituda A (μm) uzdužnog pomeranja vibracija, sila pritiska F (N), pritisna sila primenjena poprečno (normalno) na pravac vibracija. Frekvencija f (Hz) je bila konstantna [9, 10]. Snaga i energija se mogu proračunati iz promenljivih parametara sledećim jednačinama (1-2),



F force (N), A amplitude (μm), f frequency 20 000 Hz, T time (s):

$$P = F \cdot A \cdot f \text{ [W]} \quad (1)$$

$$E = P \cdot T \text{ [J]} \quad (2)$$

gde je F sila (N), A amplituda (μm), f frekvencija 20 000 Hz, T (s) vreme:

$$P = F \cdot A \cdot f \text{ [W]} \quad (1)$$

$$E = P \cdot T \text{ [J]} \quad (2)$$

3.1 Used materials

It was used aluminium (Al) and copper (Cu) metals sheets for the joining process. The experiments metal pairs were Al-Al and the Al-Cu. The used aluminium grade for the welding experiments was aluminium EN AW 1050A (EN 485-2:2016), chemical composition shown in the Tab. 1. The hardness of the used aluminium samples were 32 HV_{0,2}.

3.1 Primenjeni materijali

Za process spajanja korišćene su metalne trake od aluminijuma (Al) i bakra (Cu). Eksperimentalni parovi metala su bili Al – Al i Al – Cu. Kvalitet aluminijuma za ekperimente zavarivanja je bio EN AW 1050A (EN 485-2:2016), a hemijski sastav je prikazan u Tabeli 1. Tvrdoća primenjenih uzoraka aluminijuma je bila 32 HV_{0,2}.

Table 1. The experimented aluminium sheets chemical composition on mass percent (%)

Tabela 1. Hemijski sastav eksperimentalnih aluminijumskih traka u masenim (%)

Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	Al
0.25	0.40	0.05	0.05	0.07	0.05	rest

The used copper CW008A (EN/TS 1172:2011) chemical composition shown in the Tab. 2. The hardness of the samples were 73 HV_{0,2}.

Hemijski sastav korišćenog bakra CW008A (EN/TS 1172:2011) prikazan je u Tabeli 2. Tvrdoća uzoraka je bila 73 HV_{0,2}.

Table 2. The experimented copper sheets chemical composition on mass percent (%)

Tabela 2. Hemijski sastav eksperimentalnih bakarnih traka u masenim (%)

Pb	Bi	Cu
Max. 0.005	Max. 0.001	rest

3.2 Experiments

The design of the test samples shown in Fig. 3. In the case of the Al-Cu joint used 0,5 mm thickness sheets. The width of the Al-Cu were 15 mm.

3.2 Eksperimenti

Oblik ispitnih uzoraka je prikazan na slici 3. U slučaju spojeva Al- Cu korišćene su trake debljine 0.5mm, a širine 15mm.

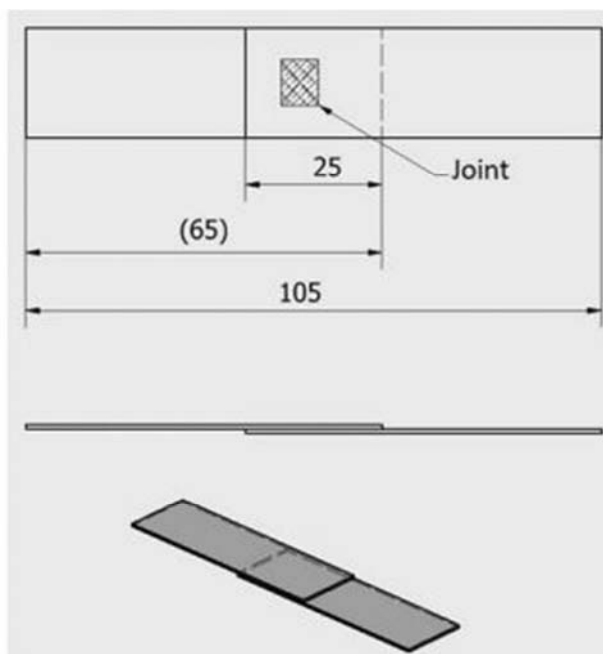


Figure 3. The test samples design

Slika 3. Oblik i dimenzije uzoraka za ispitivanje



The experiments were made by standard parameters as a function of the welding time and used a Branson L20 setup [11, 12]. The copper and the aluminium shows different formability and plastic deformation under the same loading. On the base of the Al-Al joining experiments results, it was used the same welding parameters.

Ekspерименти су вршени са стандардним параметрима у функцији времена заваривања на уређају Branson L20 [11, 12]. Bakar i aluminijum pokazuju različitu obradljivost i plastičnu deformaciju pri istim opterećenjima. Na osnovu eksperimentalnih rezultata spojeva Al – Al, korišćeni su identični parametri zavarivanja.

Table 3. Al-Cu joint suitable welding parameters

Tabela 3. Parametri zavarivanja za Al – Cu spoj

Welding Energy	Energija zavarivanja	600 J
Trigger Pressure	Pritisak aktivacije	26 Psi
Welding Pressure	Pritisak zavarivanja	26 Psi
Amplitude	Amplituda	40 μm
Min. Welding Time	Min. vreme zavarivanja	0,5 s
Max. Welding Time	Max. vreme zavarivanja	1,26 s
Min. Welding Power	Min. snaga zavarivanja	690 W
Max. Welding Power	Max. snaga zavarivanja	4800 W

As function on the joint mechanical properties, the parameters were modified. Base on the empirical and literature results during the tests, it changed the amplitude and the welding energy [13-15]. The used parameters are shown in Tab. 3

U funkciji mehaničkih osobina, parametri zavarivanja su modifikovani. Na osnovu empirijskih rezultata ispitivanja i podataka iz literature, menjani su amplituda i energija zavarivanja [13-15]. Primenjeni parametri prikazani su u Tabeli 3.

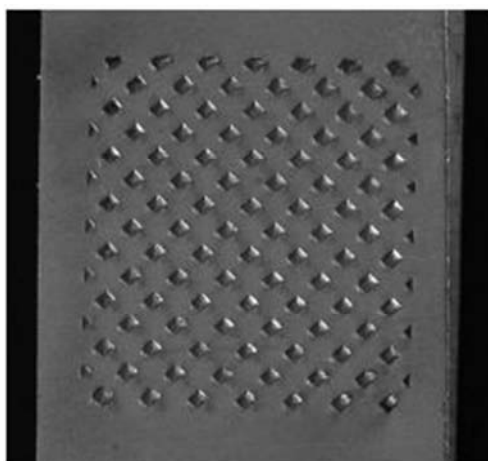


Figure 4. The joint welded face side
Slika 4. Prednja strana zavarenog spoja

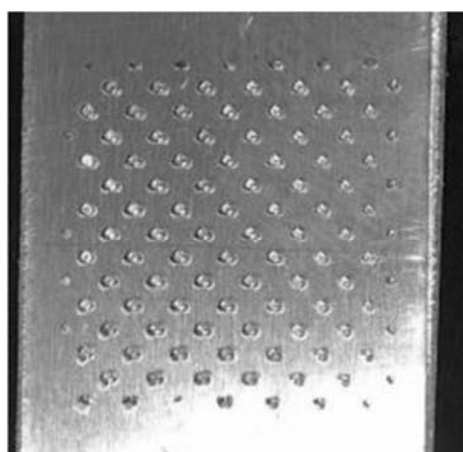


Figure 5. Joint root side
Slika 5. Korena strana zavarenog spoja



The Fig. 4-5. show the welded joint by the suitable parameters. The tensile test results reinforced the visual inspection results, about the used parameters. The strengthened samples are shown in Fig. 6., the tensile test measured maximal tensile forces summarized in the Tab. 4.

Slike 4 i 5 prikazuju zavarene spojeve dobijene odgovarajućim parametrima. Rezultati ispitivanja zatezanjem potvrdili su i dopunili rezultate vizuelnog ispitivanja za primenjene parametre zavarivanja. Na Slici 6 prikazan je izgled uzoraka ispitivanja zatezanjem, a u Tabeli 4 sumirani su rezultati zateznih ispitivanja sa merenim maksimalnim silama.

Table 4. Maximal tensile forces under the suitable welding parameters
Tabela 4. Maksimalne zatezne sile sa odgovarajućim parametrima zavarivanja

Sample sign Oznaka uzorka	Maximal tensile force Maksimalna zatezna sila
600/40/1	533,5 N
600/40/2	534 N
600/40/3	535,8 N
Average Srednja vrednost	534,43 N

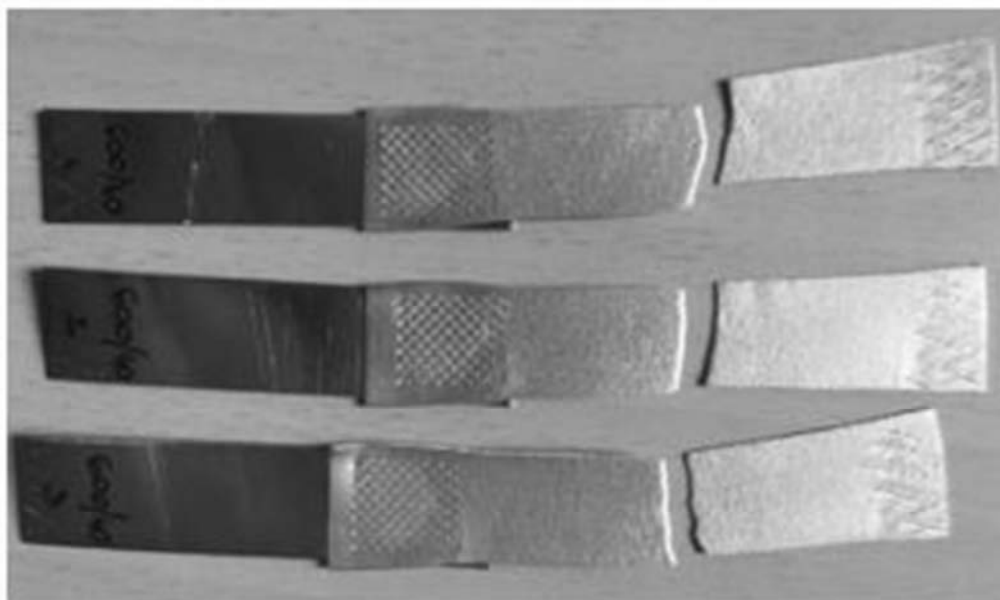


Figure 6. The strengthened samples
Slika 6. Uzorci ispitani zatezanjem

The welded joint is shown higher tensile strength than the lowest base material tensile strength. The unsuitable parameters affected failures in the joint and modified the mechanical properties [16-19].

3.3 Failures

The unsuitable parameters cause cracking and failures. The optimization of the parameters in the case of this process is important like in the case of any metal working process. The parameters effects are different. The high level amplitude and long welding time effected heat can burn the joint surface and result unsuitable joint quality. The cacking in the joint shown in Fig. 7.

Zavareni spojevi pokazuju višu zateznu čvrstoću u odnosu na zateznu čvrstoću osnovnog materijala. Neodgovarajući parametri uzrokuju lomove u spojevima i menjaju mehaničke osobine [16-19].

3.3 Prelomi

Neodgovarajući parametri prouzrokuju prsline i lomove uzoraka. Optimizacija parametara u slučaju ovog procesa su značajni, kao i u slučajevima bilo kog procesa obrade metala. Uticaj parametara je različit. Visok nivo amplitude i dugo vreme zavarivanja izazivaju toplotu koja može da ošteti površinu spoja i time rezultira neodgovarajućim kvalitetom spoja. Pucanje uzorka u spoju prikazano je na Slici 7.

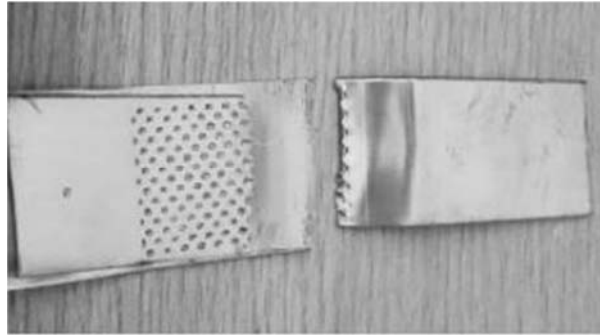


Figure 7. Cracking in the joint border
Slika 7. Prelom na granici spoja

As we use too short welding time, the joint cant establish.

Ako se primeni suviše kratko vreme zavarivanja, zavareni spoj ne može da se ostvari, što je prikazano na Slici 8.

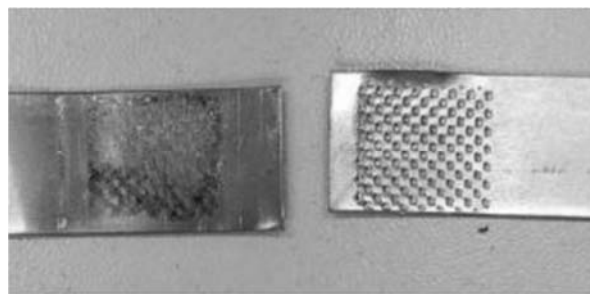


Figure 8. Unjoined samples
Slika 8. Nespojjeni uzorci

4. Conclusion

It was optimized the ultrasonic welding parameters in case of the used Al-Cu grades joining by the experimental way. Under different parameters welded samples were visual inspected and tensile tested (maximal tensile force). Base on the experimental results is concluded:

- I. The ultrasonic welding technology is suitable in case of similar aluminium and dissimilar aluminium-copper thin sheets under the determined welding parameters.
- II. The suitable parameters determination is the key to the ultrasonic welding process joint quality.
- III. On the base of the experimental results, it can conclude that between the parameters the time, amplitude and power is the most important.
- IV. The ultrasonic welding joints welded under optimal parameters show the required joint strength.

Acknowledgements

The author want to tell thanks for Gergely Alvincz and Marci Schramkó for the assistance in the experiments. The authors acknowledge the financial support of this work by the Hungarian State and the European Union under the EFOP-3.6.1-16-2016-00010 project.

4. Zaključak

Na osnovu eksperimentalnih ispitivanja optimizovani su parametri ultrazvučnog zavarivanja za spajanje materijala kvaliteta Al – Cu. Uzorci su zavarivani različitim parametrima zavarivanja i ispitivani su vizuelno i zatezanjem sa određivanjem maksimalne zatezne sile. Na osnovu eksperimentalnih rezultata, može se zaključiti:

- I. Tehnologija ultrazvučnog zavarivanja je primenljiva za slučajeve spajanja sličnih aluminijumskih i različitih aluminijum – bakar tankih traka primenom odgovarajućih parametara zavarivanja.
- II. Određivanje odgovarajućih parametara procesa ultrazvučnog zavarivanja je najznačajnij za postizanje kvalitetnog spoja.
- III. Na osnovu eksperimentalnih rezultata može se zaključiti da su najznačajniji parametri: vreme, amplituda i snaga.
- IV. Ultrazvučno zavareni spojevi, zavareni optimalnim parametrima pokazuju zahtevanu čvrstoću spoja.

Zahvalnica

Autori žele da se zahvale Gergely Alvincz i Marci Schramkó za pomoć pri eksperimentima. Autori se zahvaljuju na finansijskoj podršci za ovaj rad od strane Hungarian State i European Union po projektu EFOP-3.6.1-16-2016-00010.



References / Literatura

- [1] Kicukov E., Gursel A. Ultrasonic welding of dissimilar materials: A review 2015 Periodicals of Engineering And Natural Sciences Vol. 3 No. 1
- [2] Takahashi, S. et al: Prediction of fatigue life of high-heat-load components made of oxygen-free copper by comparing with Glidcop, Journal of Synchrotron Radiation Vol. 20. (2013) 67- 73.
- [3] <https://doi.org/10.1107/S0909049512041192>
- [4] <http://fgg-web.fgg.unilj.si/~pmoze/esdep/master/wg12/I0200.htm> (2018.03.22.)
- [5] Wu X, et al.: Microstructure, welding mechanism, and failure of Al/Cu ultrasonic welds. Journal of Manufacturing Processes (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.06.002>
- [6] V.K. Astashev, V.I. Babitsky: Ultrasonic Processes and Machines, Dynamics, Control and Applications, SpringerVerlag Berlin Heidelberg 2007, page 33-45.
- [7] Bagyinszki, Gy., Bitay E.: Welding technologies II. Setups and measuring. Vol.2. Műszaki Tudományos Füzetek 10., EME, Kolozsvár/Cluj, 2010. ISSN 2068 – 3081, ISBN 978-606-8178- 06-6, p. 286 <http://eda.eme.ro/handle/10598/15438>
- [8] Bagyinszki Gy., Bitay E.: Welding technologies I. Processes and machines. Vol.1. Műszaki Tudományos Füzetek 9., EME Kolozsvár/Cluj, 2010. ISSN 2068 – 3081, ISBN 978-606-8178- 06-6, ISBN 978-606-8178-04-2, p. 288 <http://eda.eme.ro/handle/10598/15437>
- [9] Szilágyi M., Kovács T.: Thin aluminium sheets ultrasonic welding, Hegesztéstechnika, Budapest, 2016
- [10] Szilágyi M., Kovács T.: Ultrasonic Welding process in case of aluminium sheets, In. Proceedings of 8th International Engineering Symposium at Bánki, Budapest, 2016. paper 55. <http://bgk.uni-obuda.hu/iesb/2016/publication/55.pdf>
- [11] Gy, Bagyinszki, E. Bitay: “Welding technologies II. Setups and measuring.” Vol.2. Papers on Technical Science 10., EME, Kolozsvár/Cluj, 2010. ISSN 2068 – 3081, ISBN 978- 606-8178-06-6, ISBN 978-606-8178-05-9, 286 p. <http://eda.eme.ro/handle/10598/15438>
- [12] ASM Handbook Volume 6, Welding, Brazing, and Soldering (ASM International) 1993. pp.
- [13] W.D. Callister, Jr., D.G. Rethwisch: Materials science and engineering an introduction, 8th ed., John Wiley & Sons, Inc. USA, 2000, pp. 219-222.
- [14] Tisza M.: Ultrasound effect for the mechanism of the plastic deformation and for the parameters of the deep drawing / Az ultrahang hatása a képlékeny alakváltozás mechanizmusára és a mélyhúzás technológiai paramétereire, Candidate dissertation 1979. Miskolc University
- [15] M. Szilágyi, T. Kovács: Ultrasonic Welding process in case of aluminium sheets, Proceedings of 8th International Engineering Symposium at Bánki, Budapest, 2016. paper 55. (<http://bgk.uni-obuda.hu/iesb/2016/publication/55.pdf>)
- [16] Wu X, et al.: Microstructure, welding mechanism, and failure of Al/Cu ultrasonic welds. Journal of Manufacturing Processes (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.06.002>
- [17] V.K. Astashev, V.I. Babitsky: Ultrasonic Processes and Machines, Dynamics, Control and Applications, SpringerVerlag Berlin Heidelberg 2007, page 33-45.
- [18] K.Chen, Y.Zhang: Mechanical analysis of ultrasonic welding considering knurl pattern of sonotrode tip, Materials & Design Volume 87, 15 December 2015, Pages 393-404
- [19] T.Kovács: Investigation of the Ultrasound Welded Aluminium Joint Microstructure, Lecture Notes in Mechanical Engineering 2018. pp. 735-741



Jacob Kleiman

Residual stress management: recent advances in engineering methods for non-destructive measurement and beneficial redistribution of residual stresses

Kontrolisanje zaostalih napona: razvoj najnovijih inženjerskih metoda za merenje bez razaranja i povoljnu preraspodelu zaostalih napona

Stručni rad / Professional paper

Rad je u izvornom obliku objavljen u okviru 72. IIV godišnje Skupštine i međunarodne konferencije održane u Bratislavi-Slovačka 07-12. Jula 2019

Rad primljen / Paper received:

Decembar 2020.

Prevod izvornog rada na srpski jezik: S.A. Sedmak

Keywords: Residual stress management, ultrasonic peening, non-destructive ultrasonic measurement of stresses, ultrasonic impact treatment, residual stress

Adresa autora / Author's address:

Structural Integrity Technologies, Inc., Markham, Canada

Jkleiman@sintec.ca

Ključne reči: Kontrolisanje zaostalih napona, ultrazvučno sačmarenje, ultrazvučno merenje napona bez razaranja, obrada ultrazvučnim udarom, zaostali napon

Abstract

Welding is used widely in the automotive industry for joining a variety of structural components and parts. Of paramount importance in these structures are their engineering properties, such as fatigue life, distortions, dimensional stability and corrosion resistance that can be affected considerably by the presence of residual stresses (RS). The knowledge of RS and the ability to control their distribution in welded structures is critical when evaluating their fatigue life and preventing catastrophic failures. An engineering concept of residual stress management (RSM) has been developed that addresses all aspects of residual stresses in structural elements. RSM includes three major stages in stress management, i.e. RS determination, RS analysis and RS redistribution. Using this approach, stresses in structures and materials can be evaluated in each specific case either theoretically or experimentally and the performance and fatigue behavior of such structures optimized. This paper is built as an overview of the RSM concept and its application in the fields of non-destructive measurement of residual and applied stresses and in treatment of structures with residual stresses to achieve better performance and longer fatigue life. All three stages of the RSM concept will be discussed and for each of the stages practical engineering approach examples will be given. An example of a project in

Rezime

Zavarivanje je veoma rasprostranjeno u automobilskoj industriji i koristi se za spajanje raznih vrsta komponenata i delova. Inženjerske osobine ovih konstrukcija su od ključne važnosti, uključujući zamorini vek, distorzije, stabilnost dimenzija i otpornost na koroziju, pri čemu na sve ove faktore može značajno uticati prisustvo zaostalih napona (ZN). Poznavanje zaostalih napona i mogućnost kontrole njihove raspodele u zavarenim konstrukcijama je od ključnog značaja pri oceni zamornog veka i sprečavanju katastrofalnih otkaza. Inženjerski koncept kontrolisanja zaostalih napona (Residual stress management – RSM) je razvijen sa ciljem da odgovori na sve aspekte zaostalih napona u nosećim elementima. RSM obuhvata tri glavne faze kontrole napona, tj. određivanje ZN, njihovu analizu i preraspodelu. Primenom ovog pristupa, naponi u konstrukcijama i materijalima se mogu oceniti za svaki zaseban slučaj, kako teorijski tako i eksperimentalno, na osnovu čega se performance i ponašanje pri zamoru ovakvih konstrukcija može optimizovati. Ovaj rad je napisan kao pregled koncepta RSM i njegove primene u oblastima merenja bez razaranja zaostalih i delujućih napona i poboljšavanju performansi i produženju zamornog veka konstrukcija u kojima su ovakvi naponi prisutni. Sve tri faze koncepta RSM će biti razmotrene i za svaku od njih će biti predstavljen



which the residual stress distribution in a fillet welded joint was measured, analyzed and changed by post-weld treatment will be presented to demonstrate the effectiveness of the RSM approach. The advancements in the modern tools used in this project for non-destructive measurement of residual stresses using an ultrasonic computerized complex for residual stress measurement and the ultrasonic peening for redistribution of the residual stresses that allowed improving the quality of the welds and increasing their fatigue life will also be presented.

1. Introduction

Residual stress can significantly affect engineering properties of materials and structural components, notably, fatigue life, distortion, dimensional stability, corrosion resistance etc.. Such effects usually lead to considerable expenditures in repairs and restoration of parts, equipment and structures. For that reason, the residual stress analysis is a compulsory stage in the design of structural elements and in the estimation of their reliability under real service conditions.

Systematic studies had shown that welding residual stresses may lead to a drastic reduction in fatigue strength of welded elements. In multi-cycle fatigue ($N > 10^6$ cycles) the effect of residual stresses can be compared with the effect of stress concentration. Even more significant are the effects of residual stresses on the fatigue life of welded elements in the case of relieving harmful tensile residual stresses and introducing beneficial compressive residual stresses in the weld toe zones. The results of fatigue testing of welded specimens in as-welded condition and after application of ultrasonic peening showed that in case of non-load caring fillet welded joint in high strength steel, the redistribution of residual stresses resulted in approximately two-fold increase in the limit stress range [1,2].

The residual stresses, therefore, are one of the main factors determining the engineering properties of materials, parts and welded elements and this factor should be taken into account during the design and manufacturing of different products. Although certain progress has been achieved in the development of techniques for residual stress management, a considerable effort is still required to develop efficient and cost-effective methods of residual stress measurement and analysis as well

odgovarajući praktični inženjerski pristup kao primer. Jedan takav primer obuhvata raspodelu zaostalih napona u ugaonom zavarenom spoju, koji su određeni, analizirani i izmenjeni primenom naknadne termičke obrade. Ovaj primer će demonstrirati efikasnost RSM pristupa. Takođe će biti prikazana i dostignuća u izradi modernih alata koji će se koristiti u ovom projektu za merenje bez razaranja zaostalih napona, primenom ultrazvučnog kompjuterizovanog kompleksa i ultrazvučnog "sačmarenja" u preraspodeli zaostalih napona kojom se positiže poboljšani kvalitet zavarenih spojeva i povećan zamorni vek.

1. Uvod

Zaostali naponi mogu značajno uticati na ponašanje materijala i komponenti konstrukcije, pre svega na zamorni, vek, distorziju, stabilnost dimenzija, otpornost na koroziju, itd. Ovakvi uticaji obično za rezultat imaju značajne troškove reparature i obnove delova, opreme i konstrukcija i iz tog razloga, analiza zaostalih napona predstavlja obavezan deo faze konstruisanja nosećih elemenata i ocene njihove pouzdanosti u stvarnim radnim uslovima.

Sistematske studije su pokazale da zaostali naponi pri zavarivanju mogu doprineti značajnom umanjenju zamorne čvrstoće zavarenih elemenata. Prvi visokocikličnom zamoru ($N > 10^6$ ciklusa), efekat zaostalih napona se može uporediti sa efektom koncentracije napona. Zaostali naponi mogu imati još veći uticaj na zamorni vek zavarenih elemenata u slučaju njihovog otpuštanja i uvođenja pozitivnih prisitnih zaostalih napona u zavarenom spoju. Rezultati ispitivanja zamora zavarenih spojeva u početnom stanju i nakon primene ultrazvučnog sačmarenja su pokazali da je, u slučaju ne nosećih ugaonih spojeva od čelika povišene čvrstoće, preraspodela zaostalih napona dovela do približno dvostrkog povećanja graničnog napona [1,2].

Stoga, zaostali naponi predstavljaju jedan od glavnih faktora koji određuje inženjerske osobine materijala, delova i zavarenih konstrukcija, koji se mora uzeti u obzir tokom projektovanja različitih proizvoda. Iako je ostvaren izvestan napredak u razvoju tehnika za kontrolu zaostalih napona, još uvek je potreban značajan napor kako bi se razvila efikasna i isplativa metoda merenja zaostalih napona, kao i tehnologije za povoljnu preraspodelu zaostalih napona.



as technologies for the beneficial redistribution of residual stresses.

It is very important to consider the problem of residual stress as a complex problem including, at least, stages of the determination, the analysis and the beneficial redistribution of residual stresses. The combined consideration of the above-mentioned stages of residual stress analysis gives rise to so called Residual Stress Management (RSM) concept approach [3]. The RSM concept includes the following main stages:

Stage 1: Residual Stress Determination.

Stage 2: Analysis of the Residual Stress Effects. The effect of residual stresses can be evaluated either through experimental studies or via computational methods.

Stage 3: Residual Stress Modification, if required. The modification of the residual stresses could be performed through changes in the technology of manufacturing/assembly and/or through application of stresses relieving techniques.

A number of new advanced engineering tools for all three stages of RSM were developed recently at Structural Integrity Technologies (Sintec) Inc. (Markham, Canada). An overview of the newest developments of these engineering tools for residual stress management and examples of their practical application are presented below.

2. Residual stress determination

The stresses can be evaluated directly through measurements either using destructive methods or nondestructive methods and through computation. Over the last few decades, various destructive and non-destructive quantitative and qualitative methods of residual stress measurement have been developed [4]. In general, a distinction is usually made between destructive and nondestructive techniques.

The first series of methods is based on destruction of the state of equilibrium of the residual stress after sectioning of the specimen, machining, layer removal or hole drilling. The redistribution of the internal forces leads to local strains, which are measured to evaluate the residual stress field. The residual stress is deduced from the measured strain using the elastic theory (analytical approach or finite element calculations).

The second series of methods is based on non-destructive measurements of residual stresses that are based on the relationship between the physical and the crystallographic parameters and the

Jako je bitno posmatrati zaostale napone kao složen problem, koji minimalno obuhvata faze njihovog određivanja, analizu i povoljnu preraspodelu. Kombinovano razmatranje gore pomenutih faza analize zaostalih napona je dovelo do nastanka takozvanog RSM koncepta (kontrolisanje zaostalih napona)[3]. Ovaj koncept obuhvata sledeće glavne faze:

Faza 1: Određivanje zaostalih napona.

Faza 2: Analiza uticaja zaostalih napona. Uticaj zaostalih napona se može oceniti bilo eksperimentalnim, bilo računskim metodama.

Faza 3: Modifikacija zaostalih napona (ukoliko je potrebna). Modifikacija zaostalih napona se može izvršiti promenama tehnologije proizvodnje/sklapanja i/ili primenom tehnika za rasterećenje zaostalih napona.

U poslednje vreme je razvijen veliki broj naprednih inženjerskih alata za sve tri faze RSM, od strane kopmanije Sintec Inc (Markam, Kanada). Pregled ovih novih inženjerskih alata za kontrolu zaostalih napona i primeri njihove praktične primene su prikazani ispod.

2. Određivanje zaostalih napona

Naponi se mogu odrediti direktno, merenjem primenom metoda sa ili bez razaranja, ili preko proračuna. Tokom poslednjih par decenija, raznovrsne kvalitativne i kvantitativne metoda sa i bez razaranja su razvijene sa ciljem merenja zaostalih napona [4]. Uopšteno, razlikuju se tehnike sa razarenjem i tehnike bez razaranja.

Prva grupa metoda je zasnovana na razaranju ravnotežnog stanja zaostalih napona nakon isecanja epruveta, mašinske obrade, skidanja slojeva ili bušenja rupa. Preraspodela unutrašnjih sila dovodi do pojave lokalnih deformacija, koje se mere kako bi se odredilo polje zaostalih napona. Zaostali napon se potom oduzima od izmerene deformacije, primenom teorije elastičnosti (analitičkim pristupom ili metodom konačnih elemenata).

Druga grupa metoda je zasnovana na merenju bez razaranja, koje se zasniva na poznavanju veza između fizičkih i kristalografskih parametara i zaostalih napona. Tehnika razvijena pod imenom ITL je zasnovana na primeni ultrazvuka. Ovaj pristup se oslanja na varijacije u brzini ultrazvučnih



residual stress. The technique developed at ITL is based on the use of ultrasound. In this approach the variations in the velocity of ultrasonic wave propagation in the materials under the action of mechanical stresses are measured.

However, new industrial problems, new geometrical and material complexities related to them, combined with a general need for fast and economical residual stress measurements create strong demand in new effective techniques and devices. The most desired technology must be reliable and user-friendly, i.e. it should not require guessing and intuition from the engineer/technician and it must be computerized for quick analysis. The demand for sophisticated systems is increasing dramatically.

2.1 Measurement of Residual Stresses by Ultrasonic Method

The measurements of residual stresses (RS) by UltraMARS® are based on solid theory, original technique and use of precise instrumentation. It is possible to use ultrasound for measurement of stresses in materials, because, according to the acousto-elastic theory of interaction of ultrasound with materials, the changes in travel velocities (or frequencies) of ultrasound in a material depend linearly on the stresses in the materials over a certain range of stresses.

For measurement of RS in parts, welded elements and structures, as a prerequisite, the determination of acousto-elastic coefficients of the considered material has to be performed that is based on measurement of ultrasonic wave velocities in the sample under different known loadings and calculation of the acousto-elastic coefficients, based on these measurements. Once the acousto-elastic coefficients are determined, they are added to the UltraMARS® device microprocessor for further computation of RS.

2.2 Determination of Acousto-elastic Coefficients

The samples for determination of acousto-elastic coefficients can be loaded in compression or in tension. Depending on the loading scheme the geometry of the sample is selected. Thus, for instance, a small sample, cut as shown in Fig.1, can be used for measurements of ultrasonic velocities in compression mode.

talasa koji se prostiru u materijalu, koji je izložen mehaničkim naponima.

Međutim, novi problemi koji se javljaju u industriji, nove geometrijske i materijalne složenosti vezane za njih, u kombinaciji sa opštom potrebom za brzim i ekonomičnim merenjem zaostalih napona su doveli do povećanog zahtev za razvojem novih efikasnih tehnika i aparata. Najpoželjnija bi bila tehnika koja je puzdana i laka za primenu, tj. tehnika koja ne zahteva nagađanje i intuiciju od strane tehničara/inženjera i koja mora biti kompjuterizovana u ime brže analize. Zahtev za ovakve napredne sisteme dramatično raste.

2.1 Merenje zaostalih napona ultrazvučnom metodom

Merenje zaostalih napona (ZN) primenom UltraMARS® metode je zasnovano na čvrstoj teorijskoj osnovi, originalnoj tehnici i primeni preciznih instrumenata. Moguće je koristiti ultrazvuk za merenje napona u materijalima usled dobro poznatog svojstva ultrazvuka da, prema akustično-elastičnoj teoriji interakcije, linearno menja brzinu (ili frekvenciju) u materijalu u zavisnosti od napona, u određenom rasponu.

U slučaju merenja ZN u delovima, zavarenim elementima i konstrukcijama, određivanje akustično-elastičnih koeficijenata za predmetni material je preduslov, i mora se izvršiti na osnovu merenja brzina ultrazvučnih talasa u uzorku pod različitim poznatim opterećenjima. Na osnovu ovih merenja se određuju akustično-elastični koeficijenti, i nakon njihovog određivanja se unose u UltraMARS® aparat (mikroprocesor), kako bi se proračun zaostalih napona nastavio.

2.2 Određivanje akustično-elastičnih koeficijenata

Uzorci za određivanje akustično-elastičnih koeficijenata se mogu opteretiti na pritisak ili zatezanje. U zavisnosti od vrste opterećenja se bira geometrija uzorka. Stoga, na primer, mali uzorak isečen kao na Slici 1, može da se koristi za merenje ultrazvučnih brzina pri pritisnom opterećenju.

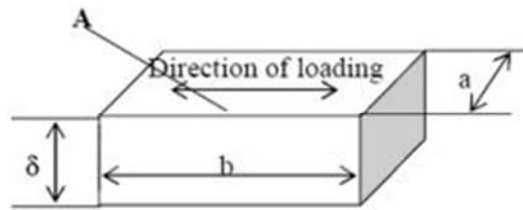


Figure 1. Schematic presentation of a sample prepared for determination of the acoustic-elastic coefficients of considered material: $a = 50\text{-}60\text{ mm}$; $b = 70\text{-}80\text{ mm}$; δ – thickness of considered material; A – zone of installation of ultrasonic gauge(s) during loading of sample.

Slika 1. Šematski prikaz uzorka pripremljenog za određivanje akustično-elastičnih koeficijenata posmatranog materijala: $a=50\text{-}60\text{ mm}$; $b=70\text{-}80\text{ mm}$; δ – debljina materijala; A – zona instalacije ultrazvučnih traka tokom opterećivanja uzorka.

An example of such a sample mounted for compressive loading in a tensile system is shown in Fig. 2. It is enough to perform the determination of acoustic-elastic coefficients on only one type of sample for follow up measurements and computation of both tensile and compressive residual stresses.

Primer jednog ovakvog uzorka izloženog pritiskom opterećenju na kidalici je prikazan na Slici 2. Ovo je dovoljno da se odrede akustično-elastični koeficijenti samo u jednom tipu uzoraka, koji će se koristiti pri narednim merenjima i proračunima, kako za pritisne, tako i za zatezne zaostale napone.

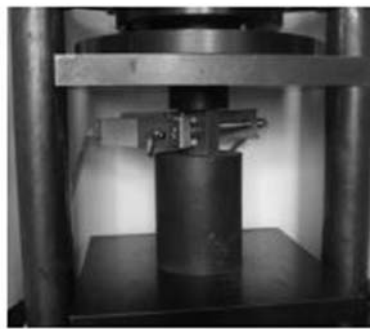


Figure 2. General view of the small sample loading set-up in a press

Slika 2. Opšti prikaz malog uzorka postavljenog u presi.

Fig. 3 presents the results of measurements of frequency changes in three ultrasonic signals, i.e. the longitudinal wave and two shear orthogonally polarized waves that were conducted at no load and at two compressive loads of - 150 MPa and - 300 MPa.

Na Slici 3 je prikazan rezultat merenja promene frekvencije u tri ultrazvučna signala, jednom podužnom i dva smičuća ortogonalno polarizovana talasa koji su pušteni bez opterećenja i pri pritiskim opterećenjima od -150 i -300 MPa.

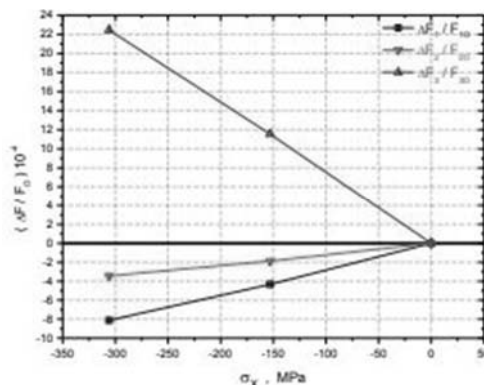


Figure 3. Changes of ultrasonic wave velocities in the sample of considered material under the action of applied stresses

Slika 3. Promene brzine ultrazvučnih talasa u uzorku posmatranog materijala pod delujućim opterećenjem



2.2 Examples of Residual Stress measurements with Bulk, Surface and Subsurface

Transducers A butt welded sample, as shown in Fig. 4, with dimensions 200x150 mm and 12 mm thick was used for residual stress measurements. The distribution of the longitudinal and transverse residual stresses (respectively, parallel and perpendicular to the weld direction) were measured along Lines 1-1 – 1-4, as marked in Fig. 4. The stresses were measured starting from point 1 (as marked in Fig. 4) and advancing towards point marked as N.

The measurement point #1 on vertical lines 1-1 and 1-3 was located at a distance of ~ 3 mm from the weld toe. All measurements along horizontal lines 1-2 and 1-4 were made at a distance of ~5 mm from the weld toe. In general, ultrasonic measurements of residual stresses closer to the weld/bead or in the weld are possible, but require special preparation of surface of the weld/bead or removing of the weld reinforcement.

2.2 Primeri merenja zaostalih napona primenom zapreminskih, površinskih i podpovršinskih sondi

Ugaoni za vareni spoj prikazan na Slici 4, dimenzija 200x150 mm i debljine 12 mm je korišćen za merenje zaostalih napona. Raspodela podužnih i poprečnih zaostalih napona (paralelnih i upravni na pravac zavarivanja, respektivno) je merena duž linija 1-1 – 1-4, kao što je obeleženo na slici. Naponi su mereni od početne tačke 1 (Slika 4), u pravcu tačke obeležene sa N.

Merna tačka #1 na vertikalnim linijama 1-1 i 1-3 se nalazi na rastojanju od ~3 mm od zavarenog spoja. Sva merenja duž horizontalnih linija 1-2 i 1-4 su izvršena na udaljenosti od ~5 mm od zavarenog spoja. Uopšteno, ultrazvučno merenje zaostalih napona u neposrednoj blizini zavarenog spoja je moguće, ali zahteva posebnu pripremu površine zavara ili uklanjanje njenog dela.

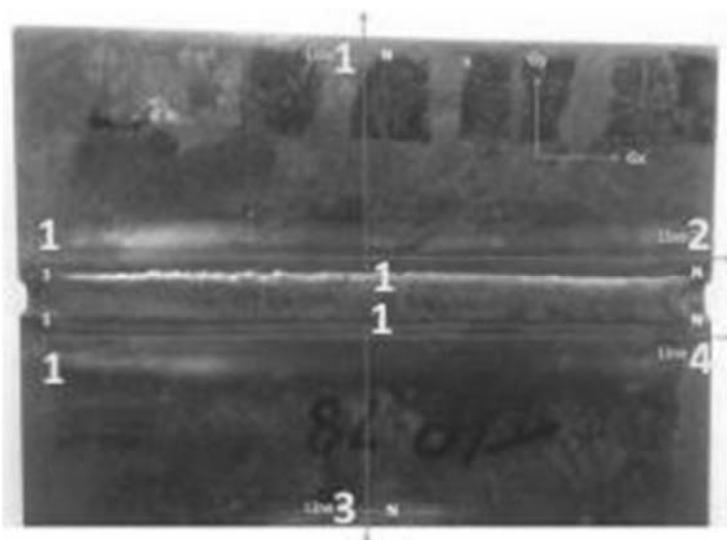


Figure 4. Welded sample (low carbon steel) with lines 1 - 4 marked on it that indicate the locations where the RS were measured

Slika 4. Zavareni uzorak (niskouglenični čelik) sa obeleženim linijama 1 – 4, koje označavaju mesta gde su ZN mereni

The longitudinal and transverse residual stresses (respectively parallel and perpendicular to the weld direction) were measured in the sample in each point with three types of ultrasonic transducers (Fig. 5), i.e. for recording the average through thickness (bulk) ultrasonic waves, the surface ultrasonic waves and the subsurface ultrasonic waves. Using the bulk ultrasonic waves allows measuring average through thickness residual stresses. Standard bulk transducers, with an active area of 10x10 mm were used in these measurements (Fig. 5a).

Podužni i poprečni zaostali naponi (paralelni i upravni na pravac zavarivanja, respektivno) su mereni u svakoj tački na uzorku korišćenjem tri vrste ultrazvučnih sondi (Slika 5), tj. zapreminskih (za merenje po debljini), površinskih i podpovršinskih ultrazvučnim talasima. Primena zapreminskih ultrazvučnih talasa omogućava merenje prosečnih vrednosti zaostalih napona kroz celu debljinu. Standardne zapreminske sonde, sa aktivnom površinom 10x10 mm su korišćeni za ovo merenje (Slika 5a).

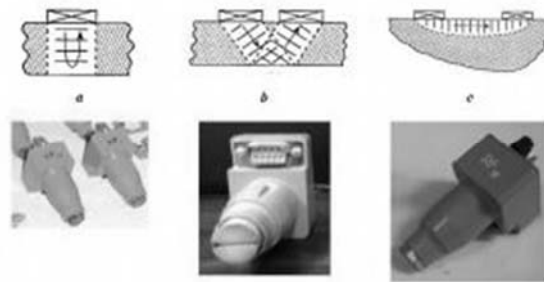


Figure 5. Schematic presentation and examples of transducers for ultrasonic measurement configurations: (a) through-thickness pulse-echo used for bulk, average through thickness stresses, (b) through-thickness pitch-catch that was set for sub-surface measurements and (c) surface pitch-catch used for surface residual stresses.

Slika 5. Šematski prikaz i primeri konfiguracija sonde za ultrazvučno merenje: (a) Puls-eho sonda za zapreminsko merenje zaostalih napona kroz celu debljinu, (b) T-R sonda za podpovršinsko merenje i merenje po debljini, (c) površinska T-R sonda

Fig. 6 through Fig. 8 present the measurement results of residual stresses along lines 1-1 and 1-2 for all three types of transducers, i.e. bulk, surface and subsurface. Thus, Fig. 6a and Fig. 6b show the results from measurements of the bulk stresses along lines 1-1 and 1-2. In all cases two components of the residuals stress, σ_{22} and σ_{33} were measured (marked in the figures as σ_x and σ_y).

Na slikama 6-8 su prikazani rezultati merjenja zaostalih napona duž linija 1-1 i 1-2, za sva tri tipa sonde (zapreminska, podpovršinska i površinska). Slike 6a i 6b prikazuju rezultate merjenja zapreminskih napona duž linija 1-1 i 1-2. U svim slučajevima su merene dve komponente zaostalih napona, σ_{22} i σ_{33} (na slika obeležene kao σ_x i σ_y).

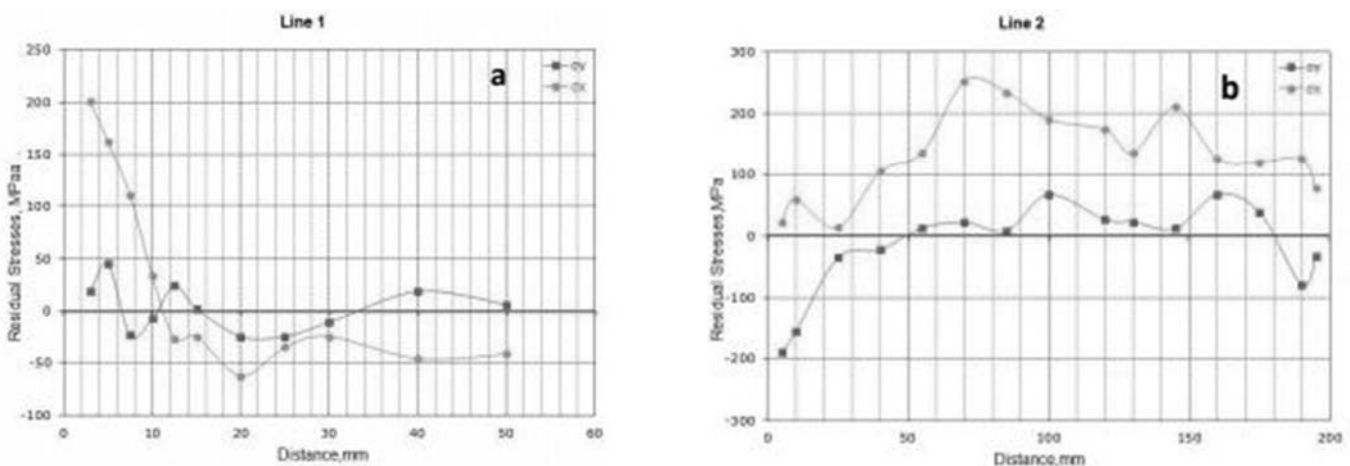


Figure 6. (a) The distribution of residual stresses in the sample along Line 1-1. Bulk ultrasonic waves; (b) The distribution of residual stresses in sample along Line 1-2. Bulk ultrasonic waves.

Slika 6. (a) Raspodela zaostalih napona u uzorcima duž linije 1-1. Zapreminski ultrazvučni talasi; (b) Raspodela zaostalih napona duž linije 1-2. Zapreminski ultrazvučni talasi.

Fig. 7a and Fig. 7b present data measured using surface and subsurface transducers along line 1-1. Fig. 8a and Fig. 8b show similar data that was measured along line 1-2.

Slike 7a i 7b prikazuju rezultate merjenja pomoću podpovršinskih i površinskih sonde duž linije 1-1, dok slike 8a i 8b prikazuju rezultate merjenja duž linije 1-2.

The obtained RS profiles were analyzed and the obtained data had shown that the results of ultrasonic RS measurements in the sample are in accordance with existing understanding of the distribution of RS in welded elements and structures.

Dobijeni profili ZN su analizirani i dobijeni podaci su pokazali da su rezultati ultrazvučnog ispitivanja ZN u skladu sa postojećim znanjem o raspodeli ZN u zavarenim spojevima i konstrukcijama.



The 7x4 mm standard surface transducer was used to measure residual stresses in surface layers of the sample material (Fig. 5c). The experimentally determined depth of penetration of ultrasonic signal (maximum depth of detected/measured signal) for this case was ~ 0.7 mm.

Standardna površinska sonda 7x4 mm je korišćena za merenje zaostalih napona u površinskim slojevima uzorka materijala (Slika 5c). Eksperimentalno određena dubina penetracije ultrazvučnog signala (maksimalna dubina detektovanog/izmerenog signala) u ovom slučaju je iznosila ~ 0.7 mm.

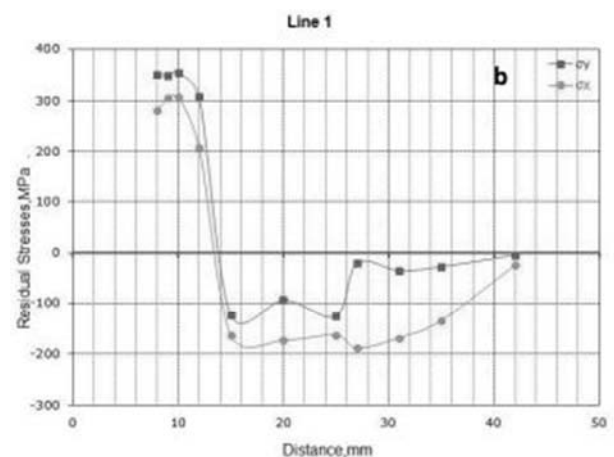
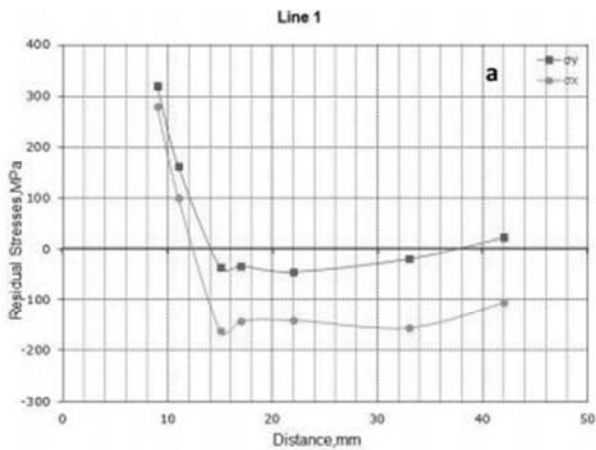


Figure 7. Distribution of residual stresses in surface and subsurface layers in the sample shown in Fig. 4. (a) Residual stresses in sample along Line 1-1. Surface ultrasonic waves; (b) Residual stresses in sample along Line 1-1. Subsurface ultrasonic waves.

Slika 7. Raspodela zaostalih napona na površini i ispod površine u uzorku sa slike 4. (a) Zaostali naponi duž linije 1-1. Površinski ultrazvučni talasi (b) Zaostali naponi duž linije 1-1. Podpovršinski ultrazvučni talasi

The experimentally determined depth of penetration of the ultrasound signal for the case of subsurface measurements reached 2.4 mm. The 7x4 mm standard transducer was selected for this application (Fig. 5b). In general, it should be noted that by using subsurface transducers, it is possible to measure stresses to a depth of 3-10 mm and more.

Eksperimentalno određena dubina penetracija ultrazvučnog signala u slučaju podpovršinskog merenja je iznosila 2.4 mm. Standardna sonda 7x4 mm je izabrana za ovu svrhu (Slika 5b). Uopšteno, treba napomenuti da je primenom podpovršinskih sondi moguće meriti napone do dobine od 3-10 mm (ili više).

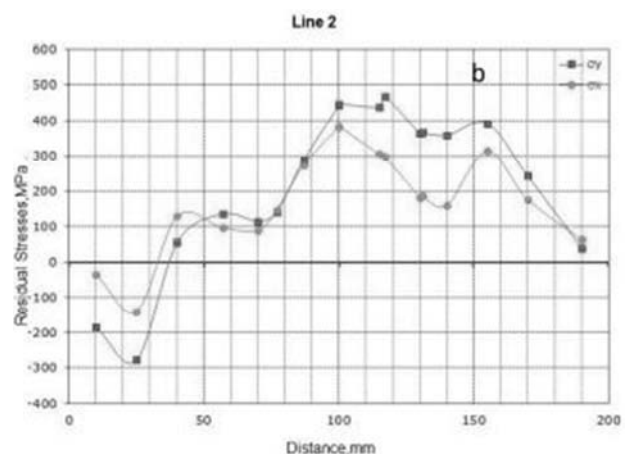
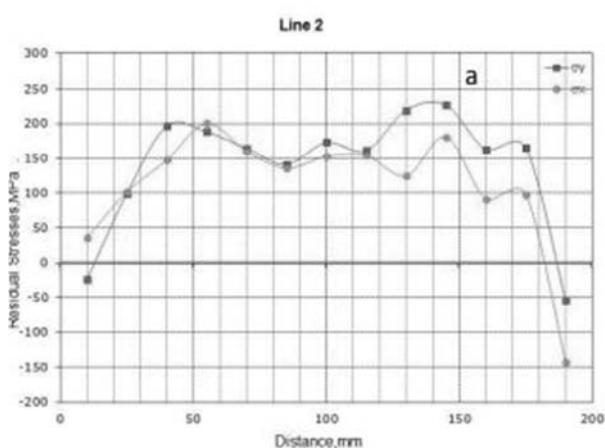


Figure 8. Distribution of residual stresses in surface and subsurface layers in the sample shown in Fig. 4. (a) Residual stresses in sample along Line 1-2 as measured with the surface transducer; (b) Residual stresses in sample along Line 1-2 as measured with the subsurface transducer

Slika 8. Raspodela zaostalih napona na površini i ispod površine u uzorku sa slike 4, (a) Zaostali naponi duž linije 1-2. Površinski ultrazvučni talasi (b) Zaostali naponi duž linije 1-2 Podpovršinski ultrazvučni talasi



2.3 Residual Stress Measurement System - UltraMARS®

In general, the change in the ultrasonic wave velocity in structural materials under mechanical stress amounts only to tenths of a percentage point. Therefore, the equipment for practical application of ultrasonic technique for residual stress measurement should be of high resolution, reliable and fully computerized. The major parts of the developed system for residual stress analysis [5]] – [[9] include a measurement unit with supporting software, a preamplifier with a magnetic, electromagnetic or mechanical holder and interchangeable transducers. For selection of the appropriate reflected wave and tuning in manual mode an oscilloscope is, usually, used (Fig. 9). The designed system allows determining uni- and biaxial applied and residual stresses for a wide range of materials and structures.



Figure 9. Ultrasonic Computerized Complex for residual and applied stress measurement. - Measurement unit UltraMARS with supporting software, (2a) – Preamplifier, (2b) – Magnetic holder, (3) – Transducer, (4) – Oscilloscope, (5) – Sample.

Slika 9. Kompjuterizovani Ultrazvučni Kompleks za merenje delujućih i zaostalih napona. – Merna jedinica UltraMARS® i njen prateći softver, (2a) – Predpojačalo, (2b) – Magnetni držač, (3) – Pretvarač, (4) – Osciloskop, (5) – Uzorak.

The UltraMARS system also offers measurement of material thickness and their Young modulus and Poisson ratio.

3. Analysis of the residual stress effects

In general, in the modern standards and codes on fatigue design the data presented correspond to the fatigue strength of real welded joints including the effect of welding technology, type of welded element and welding residual stresses. Nevertheless, in many cases there is a need to consider the influence of welding residual stresses on the fatigue life of structural components in details. These cases include: the using of the results of fatigue testing of relatively small welded specimens without high tensile residual stresses, analysis of the effect of the such factors as

2.3 Merenje zaostalih napona sistemom - UltraMARS®

Uopšteno, promena brzine ultrazvučnih talasa u konstrukcijskim materijala izloženim mehaničkim naponima se izražava u desetim delovima procenta. Stoga, oprema za praktičnu primenu ultrazvučne tehnike pri merenju zaostalih napona mora imati visoku rezoluciju, i da bude pouzdana i potpuno kompjuterizovana. Glavni delovi razvijenog sistema za analizu zaostalih napona [5-9] obuhvataju mernu jedinicu i njen prateći softver, predpojačalo sa magnetnim, elektromagnetnim ili mehaničkim držačem i zamenljive sonde. Za izbor odgovarajućeg reflektovanog talasa se obično koristi ručno podešavanje i osciloskop (Slika 9.). Ovakav sistem omogućava određivanje jedno- i dvoosnih zaostalih napona za jako veliki broj materijala i konstrukcija.

UltraMARS sistem takođe nudi mogućnost merenja debljine materijala, modula elastičnosti i Poasonovog koeficijenta.

3. Analiza uticaja zaostalih napona

Uopšteno, podaci dati u savremenim standardima i kodovima vezanim za zamor odgovaraju zamornoj čvrstoći stvarnih zavarenih konstrukcija, u koju ulaze i uticaji tehnologije zavarivanja, vrste zavarenog elementa i zaostali naponi pri zavarivanju. Međutim, u mnogim slučajevima je potrebno još detaljnije posmatrati uticaj ZN na zamorni vek komponenti. Ovi slučajevi obuhvataju: korišćenje rezultata zamornih ispitivanja na relativno male zavarene uzorke bez visokih zatezних zaostalih napona, analizu uticaja



overloading, spectra loading, application of the improvement treatments etc.

An Expert System for Fatigue Assessment and Optimization of Welded Elements - RESIsT was developed to find the optimum way for fatigue life improvement of welded elements without the increase in metal consumption [10]. Major attention was paid to developing the predictive model for analysis of the influence of the residual stresses and their redistribution under the effect of cyclic loading and improvement treatments on the fatigue life of welded elements.

The following important parameters of welded elements with the goal to enhance the fatigue performance are analyzed:

- preferred design of welded elements;
- material selection and weld processes;
- welding residual stresses;
- application of the improvement treatments;
- influence of possible repair technologies;
- realistic service conditions.

The RESIsT includes the possibility to assess through calculations the effect of residual stresses and improvement treatments application on the fatigue life of welded elements without having the performing the time and labour consuming fatigue tests [11].

4. Residual stress modification

In 2010 Commission XIII of the International Institute of Welding (IIW) introduced the term high frequency mechanical impact (HFMI) as a generic term to describe several related surface treatment technologies. In addition to the ultrasonic sources, alternate power sources like compressed air may be employed [12]. The working principle in the HFMI treatments is similar, i.e. cylindrical indenters are accelerated against a component or structure and strike it with high frequency (>90 Hz), producing highly plastically deformed regions in the impacted material and causing changes in the material microstructure and the local geometry as well as the residual stress state in the region of impact. Differences exist, however, between the different HFMI devices that are presently on the market, among which the main is in the treatment frequency that covers a range from a few hundred to over thousand of Hz. Usually, the higher the treatment frequency, the easier it is to control the tool and, consequently, the less is the operator's fatigue.

faktora poput preopterećenja, spektra opterećenja, primenu obrade u cilju poboljšanja, itd.

Stručni Sistem za Ocenu Zamora i Optimizaciju Zavarenih Elementata – RESIsT je razvijen sa ciljem da se pronađe optimalni način produženja zamornog veka zavarenih elemenata bez povećane potrošnje metala [10]. Najveća pažnja je posvećena razvoju prediktivnog modela za analizu uticaja zaostalih napona i njihove preraspodele pod uticajem cikličnog opterećenja i obrade u cilju poboljšanja na zamorni vek zavarenih elemenata.

Sledeći važni parametri zavarenih elemenata će biti analizirani u cilju poboljšavanja ponašanja konstrukcije pod zamorom:

- Poželjan dizajn zavarenih elemenata
- Izbor materijala i postupka zavarivanja
- Zaostali naponi pri zavarivanju
- Primena obrade u cilju poboljšanja
- Uticaj potencijalnih tehnologija reparacije
- Stvarni radni uslovi

RESiST takođe omogućava i ocenu uticaja zaostalih napona preko proračuna, kao i poboljšanje zamornog veka zavarenih konstrukcija bez potrebe za izvođenjem zamornih ispitivanja koja zahtevaju mnogo vremena i napora [11].

4. Modifikacija zaostalih napona

Na Komisiji XIII Međunarodnog Instituta za Zavarivanje (International Welding Institute – IIW), 2010. godine je uvede termin visokofrekventni mehanički udar (high frequency mechanical impact – HFMI), kao opšti termin za opisivanje nekoliko usko povezanih metoda površinske obrade. Pored ultrazvučnih izvora, mogu se koristiti i alternative, kao na primer komprimovani vazduh [12]. Princip rada HFMI obrade je veoma sličan, i zasniva se na visokofrekventnom (>90 Hz) udaranju ubrzanog cilindričnog čekića, usled čega nastaju veoma plastično deformisane oblasti u udarenom materijalu. Usled toga dolazi do značajnih promena u mikrostrukturi i lokalnoj geometriji, uz pojavu zaostalih napona u oblasti udara. Ipak, postoje razlike između raznih HFMI aparata koji su trenutno prisutni na tržištu, pre svega u pogledu frekvencije obrade, koja pokriva opseg od nekoliko stotina do nekoliko hiljada Hz. U opštem slučaju, što je viša frekvencija obrade, to je lakše kontrolisati alat, što za posledicu ima manji zamor operatera.



4.1 Ultrasonic Impact Treatment

The ultrasonic impact treatment (UIT) [1], [13] - [17] that in most industrial applications is also known as ultrasonic peening (UP) [18] - [20] is gaining worldwide acceptance as one of the new and promising processes for fatigue life improvement of welded elements and structures. The beneficial effect of UP is achieved mainly by relieving of harmful tensile residual stresses and introducing of compressive residual stresses into surface layers of materials, decreasing of stress concentration in weld toe zones and enhancement of mechanical properties of the surface layers of the material.

The fatigue testing of welded specimens showed that the UP is the most efficient improvement treatment when compared with such traditional techniques as grinding, TIG-dressing, heat treatment, hammer peening, shot peening and application of low temperature transformation (LTT) electrodes [1], [23], [24].

The UP technique is based on the combined effect of high frequency impacts of special strikers and ultrasonic oscillations in treated material. A number of basic units for different application were developed to include treatments in air and underwater (Fig. 10) [25].

All systems are designed based on "Power on Demand" concept. Using this concept, the power and other operating parameters of the UP equipment are adjusted to produce the necessary changes in residual stresses, stress concentration and mechanical properties of the surface layers of materials to attain the maximum possible increase in fatigue life of welded elements and structures.

4.1 Obrada ultrazvučnim udarom

Obrada ultrazvučnim udarom (Ultrasonic impact treatment – UIT) [1, 13-17], u većini industrija poznata pod nazivom ultrazvučno sačmarenje (ultrasonic peening – UP), [18-20] postaje opšteprihvaćena kao novi i obećavajuć proces vezan za produženje zamornog veka zavarenih elemenata i konstrukcija. Svoj koristan efekat UP ostvaruje pre svega rasterećenjem opasnih zateznih zaostalih napona i uvođenjem pritisnih ZN u površinske slojeve materijala, čime se smanjuje koncentracija napona u oblasti linije stapanja i poboljšavaju se mehaničke osobine površinskog sloja materijala.

Zamorno ispitivanje zavarenih uzoraka je pokazalo da je UP najefikasnija metoda obrade u poređenju sa drugim tradicionalnim tehnikama, poput brušenja, TIG oblaganja, termičke obrade, čekićanja, klasičnog sačmarenja i primene nisko-temperaturne transformacije (low-temperature transformation – LTT) [1, 23, 24].

UP tehnika je zasnovana na kombinovanom uticaju visokofrekventnog udara specijalnim čekićima i ultrazvučnih oscilacija u obrađenom materijalu. Veliki broj osnovnih jedinica za različite vrste primena je razvijen kako bi se obuhvatile i obrade na vazduhu i pod vodom (Slika 10) [25].

Svi sistemi su konstruisani na osnovu koncepta „Snaga po potrebi“. Primenom ovog koncepta, snaga i drugi radni parametri UP opreme se prilagođavaju kako bi se ostvarile neophodne promene zaostalih napona, koncentracije napona i mehaničkih osobina površinskih slojeva materijala, čime se postiže maksimalno produženje zamornog veka zavarenih elemenata i konstrukcija.



Figure 10. Ultrasonic peening systems for fatigue life improvement of welded elements and structures. **a)** UP-600 Model; **b)** ultrasonic peening tool for underwater peening UP-600U; **c)** various modifications of the basic peening tool for UP-600; **d)** New ultrasonic peening system UP-700.

Slika 10. Sistemi za ultrazvučno sačmarenje za poboljšanje zamornog veka zavarenih elemenata i konstrukcija. **a)** UP-600 Model; **b)** alat za podvodno sačmarenje UP-600U; **c)** različite modifikacije osnovnog alata za ultrazvučno sačmarenje UP-600, **d)** novi sistem UP-700



All peening tools have replaceable interchangeable working heads that were developed based on the requirements in particular applications and that vary in geometry, shape and number of pins. Fig. 11 shows some of the designs of the interchangeable working heads.

Sav alat za sačmarenje ima zamenljive radne glave koje su razvijene prema zahtevima pojedinačnih primena i koje se razlikuju po geometriji, obliku i broju pinova. Na Slici 11 su prikazana neka od postojećih rešenja za zamenljive radne glave.



Figure 11. Examples of the replaceable interchangeable working heads developed for the ultrasonic peening of materials and structures.

Slika 11. Primeri zamenljivih radnih glava za optrebe ultrazvučnog sačmarenja materijala i konstrukcija

4.2 Principles of Ultrasonic Peening Treatment

In the fatigue improvement, the beneficial effect is achieved mainly by introducing of the compressive residual stresses into surface layers of metals and alloys, decrease in stress concentration in weld toe zones and the enhancement of the mechanical properties of the surface layer of the material. The schematic view of a cross section of a material/part improved by UP is shown in Fig. 12 with the attained distribution of the stresses after the UP. The description of the benefits that may be achieved after UP treatment is presented in Tab. 1.

4.2 Primene obrade ultrazvučnim sačmarenjem

U pogledu poboljšanja otpornosti na zamor, pozitivan efekat se ostvaruje pre svega uvođenjem pritisnih zaostalih napona u površinske slojeve metala i legura, smanjenjem koncentracije napona u oblasti zavarenog spoja i poboljšanjem mehaničkih osobina površinskog sloja materijala. Šematski prikaz preseka materijala/dela poboljšanog primenom UP se može videti na slici 12, zajedno sa dobijenom raspodelom napona nakon obrade. Opis prednosti koje se mogu ostvariti primenom ove metode je prikazan u tabeli 1.

Table 1. Zones of Material/Part Improved by Ultrasonic Peening (see Figure 12 for illustration of the zones)

Tabela 1. Zone materijala/delova koje su poboljšane UP metodom (vidi ilustraciju na slici 12).

Zona	Description of zone/Opis zone	Distance from surface/ Udaljenost of površine	Improved characteristics/ Unapredene osobine
A	Zone of plastic deformation and compressive residual stresses/ Zona plastične deformacije i pritisnih zaostalih napona	1-1,5 mm	Fatigue/Zamor Corrosion/Korozija Wear/Habanje
B	Zone of relaxation of welding residual stresses/ Zona relaksacije zaostalih napona pri zavarivanju	15 mm i više	Distortion/Distorzija Crack propagation /Rast prsline
C	Zone of nanocrystallization(produced at certain conditions)/ Zona nanokristalizacije (nastaje u određenim uslovima)	0.01-0.1 mm	Corrosion/Korozija Wear/Habanje Fatigue at elevated temperature/Zamor na povišenim temperaturama

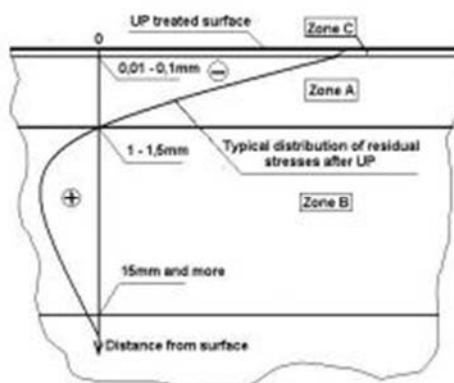


Figure 12. The distribution of residual stresses through thickness of a material/part improved by Ultrasonic Peening

Slika 12. Raspodela zaostalih napona po debljini materijala/delova poboljšanih primenom ultrazvučnog sačmarenja

4.3 Ultrasonic Peening Treatment of Welded Structures

Ultrasonic peening was applied successfully in mining industry to repair and rehabilitate welded elements subjected to fatigue loading. In an examples shown below, all welds in two large grinding mills (Fig. 13, left) used for iron ore crushing were treated by UP to increase the fatigue performance of the mills and to allow increasing the ore load (Fig. 13, right). About 300 meters of welds critical from fatigue point of view were UP treated on each of the mills to provide the improved fatigue performance. Only the weld toes on the shell plate side were treated in both, the longitudinal and circumferential welds.

4.3 Obrada zavarenih konstrukcija ultrazvučnim sačmarenjem

Ultrazvučno sačmarenje je uspešno primenjeno u rudarskoj industriji u cilju reparature i rehabilitacije zavarenih elemenata izloženih zamornom opterećenju. U primerima prikazanim ispod, svi zavareni spojevi u okviru dva velika mlina za mlevenje rude gvožđa (Slika 13, levo) su obrađena primenom UP, kako bi im se poboljšala otpornost na zamor, čime bi se omogućila prerada veće količine rude (Slika 13, desno). Oko 300 metara zavara koji su smatrani kritičnim, s tačke gledišta zamora su obrađene na ovaj način, kako bi im se poboljšala otpornost na zamor. Samo su linije stapanja obrađene u oba pravca, podužnom i poprečnom.



Figure 13. General view of one of the grinding mills that was treated by UP (left) and application of UP for rehabilitation of a weldment region in the grinding mill (right).

Slika 13. Opšti prikaz jednog od mlinova za rudu gvožđa koji je obrađen primenom UP (levo) u cilju rehabilitacije zavarenih elemenata (desno).

A number of studies were conducted on use of UP for improvement of the fatigue life of different welded aluminium alloys [26] - [28]. Thus, in a study of the influence of UP on fatigue strength of overlapped welded 3 mm thick 6061-T6 aluminium alloy samples (Fig. 14a), two series of samples with joints with overlap sizes of 6 mm and 15 mm were MIG-Pulse welded and fatigue tested before and after UP treatment to estimate the influence of misalignment angle on fatigue of the welded joints.

Sproveden je veliki broj studija o primeni UP u poboljšavanju zamornog veka različitih zavarenih konstrukcija od aluminijuma [26-28]. U tu svrhu će biti prikazana studija o uticaju UP na zamornu čvrstoću preklopnog zavarenog spoja debljine 3 mm, od aluminijumske legure 6061-T6 (Slika 14a), uz još dva uzorka sa preklopima od 6 i 15 mm, koji su zavareni MIG-puls postupkom i ispitani na zamor pre obrade ultrazvučnim sačmarenjem, kako bi se ispitaio uticaj ugla smaknuća.

-Kraj 1. dela NASTAVAK U SLEDEĆEM BROJU

ČASOPIS ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE

Cenovnik oglasnog prostora u četiri uzastopna broja 2021

	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%.
- Objavlivanje 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 2021

	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

MESSER TEHNOGAS
WELD-ING
YASKAWA SLOVENIJA
HONEX
ELIMP
NEMINIK

1. ČLANARINA DUZS za 2021. godinu **3.500 dinara**
Članovima DUZS **GRATIS** godišnje izdanje časopisa "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE"
2. ČASOPIS "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE" - 2021. 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 2019. godinu 500 dinara
 - cena pojedinačnog broja za prethodne godine..... 250 dinara
 - b) beneficirane cene za članove DUZS:
 - cena pojedinačnog broja za 2020. godinu (pouzećem ili preuzimanjem) 400 dinara
 - cena pojedinačnog broja za prethodne godine (pouzećem ili preuzimanjem) Gratis
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