



ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE

WELDING & WELDED STRUCTURES

God. 63 Vol. 63	Br. 4 No. 4	145-192 145-192	Beograd Belgrade	Srbija Serbia	2018. 2018.
--------------------	----------------	--------------------	---------------------	------------------	----------------

ČASOPIS DRUŠTVA ZA UNAPREĐIVANJE
ZAVARIVANJA U SRBIJI

SERBIAN WELDING SOCIETY
QUARTERLY REVIEW

IZLAZI TROMESEČNO

IZDAVAČ / PUBLISHER

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

Adresa: 11000 Beograd, Grčića Milenka 67

Za izdavača / For Publisher

Branislav Lukić, dipl.ing, predsednik DUZS

UREDNIŠTVO / EDITORIAL

Glavni i odgovorni urednik / Editor-in-Chief

Milica Antić, dipl.ing. EWE

duzs@eunet.rs, milicamantic@yahoo.com

Tehnički urednik / Technical Editor

Branislav Lukić, dipl.ing

Redakcijski odbor / Editorial Board

Dr Nenad Radović, dipl.ing.

Dr 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 Miroslav Đurđanović, dipl.ing.

Prof.dr Vukić Lazić, dipl.ing.

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

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

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

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

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

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

Dr Horia Dascau, dipl.ing. (Rumunija)

CIP - Каталогизacija u publikaciji
Nародна библиотека Србије, Београд
621.791

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

Tromesečno.

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

CENE I NARUDŽBINA ZA 2018.

Cena pojedinačnog broja 825,00 dinara

Godišnja pretplata 2500,00 dinara

Tekući račun: 355-1025530-87

PRICE AND ORDER

Annual subscription: EUR 100

Account No. 000200073783

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

ŠTAMPA / PRINTED

“VIS STUDIO” d.o.o.

Aleksinačkih rudara 35, Beograd

Tiraž: 400 kom.

SADRŽAJ

CONTENTS



NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

149

NOVI ALATI ZA MODEL ZAVARLJIVOSTI ČELIKA
ZASNOVAN NA OCENI RIZIKANEW TOOLS FOR STEELS WELDABILITY MODEL
BASED ON THE RISK ASSESSMENT

M.Bodea, N.A. Sechel, C.V Prică



NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

159

UDARNA ŽILAVOST OSNOVNOG MATERIJALA I
METALA ŠAVA SPOJA ZAVARENOG FSW
POSTUPKOM OD ALUMINIJUMSKE LEGURE EN
AW 7049AT652 FRACTURE TOUGHNESS OF BASE AND
WELD METAL OF ALUMINUM ALLOY EN AW
7049A T652 FSW JOINT

Jovičić, R., Pantelić N., Sedmak, S., Pavlović, D., Štrbački, Ž., Popović, O., Prokić Cvetković, R.



NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

171

DOPUNA 3D ROZENTALOVIH JEDNAČINA RADI
OPTIMIZACIJE VEZE IZMEĐU KRITIČNOG
VREMENA HLAĐENJA I TEMPERATURE
PREDGREVANJA KOD ELEKTROLUČNOG
ZAVARIVANJA

Miroslav S. Miličević



MIZ

IIW

176

KVALITET JE BEZBEDNOST

QUALITY IS SAFETY

L. Petrick



PRAKSA

PRACTICE

188

TEHNOLOGIJA ZAVARIVANJA KLIZNICE BOČNOG
KLIZAČA KOD OBRTNOG POSTOLJA Y25WELDING TECHNOLOGY OF SIDE WIPER SLIDERS
ON WAGON ROTATING SHASSIS Y25

Stefan Mladenović



VESTI

NEWS

148

Izveštaj sa 4. IIW kongresa zavarivanja
Jugoistočne EvropeReport on the 4th IIW South-East European
Welding Congress

168

Izveštaj sa 4. IIW kongresa zavarivanja
Jugoistočne Evrope - nastavakReport on the 4th IIW South-East European
Welding Congress - continue

192

MARKETING

Poštovani čitaoci,

Poštovani čitaoci,

ova, za nas izuzetno značajna godina, bliži se svom kraju. Naredna bi trebalo da bude mirnija po pitanju manifestacija ali druge obaveze su pred nama, pre svega, sertifikacija koordinatora i inspektora zavarivanja

Izveštaj sa 4. IIW kongresa zavarivanja Jugoistočne Evrope predstavlja glavni deo naše rubrike Vesti.

Kao što smo i započeli u prošlom broju nastavljamo sa štampanjem radova koji su sastavni deo obe naše manifestacije, jedan od njih, je našeg preminulog kolege, Milenka Perovića.

Pored ovih, imaćete priliku da pročitate i jedan nesvakidašnji ali veoma interesantan rad koji je izlagan u okviru međunarodne konferencije sa temom “Advanced Welding and Smart Fabrication Technologies for Efficient Manufacturing Processes” u okviru „The 71 IIW Annual Assembly & International Conference“, July 2018 | Bali, Indonesia.

To naravno nije sve, možete još čitati i ponešto o jednačinama za izračunavanje temperatura predgrevanja kao i rad iz prakse vezan za zavarivanje Hatfieldovog čelika.

Želimo vam da u novoj godini budete zdravi, srećni i uspešni i da naših okupljanja bude više.

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





Izveštaj sa 4. IIW kongresa zavarivanja Jugoistočne Evrope

Report on the 4th IIW South-East European Welding Congress

Beograd 10 – 13. oktobar, 2018

Beograd, glavni grad Srbije, bio je domaćin **4. IIW kongresa zavarivanja Jugoistočne Evrope** održanog u hotelu Metropol od 10. do 13. oktobra 2018. godine.

Kongres je organizovalo Društvo za unapređivanje zavarivanja u Srbiji – DUZS u saradnji sa Rumunskom asocijacijom za zavarivanje i Bugarskim društvom za zavarivanje, a uz podršku Međunarodnog instituta za zavarivanje (IIW).

Kongresu je prisustvovalo preko 200 učesnika iz 25 zemalja (Australija, Belorusija, Bosna i Hercegovina, Bugarska, Kanada, Hrvatska, Češka, Nemačka, Grčka, Mađarska, Izrael, Italija, Makedonija, Crna Gora, Holandija, Portugal, Rumunija, Rusija, Srbija, Slovačka, Slovenija, Švajcarska, Turska, Velika Britanija, SAD).

Tokom tri radna dana predstavljeno je više od 70 radova, a kao predavači po pozivu, izlaganja su imali: Douglas R. Luciani, predsednik IIW-a; Chris Eady, predsednik EWF-a; Chris Smallbone, bivši predsednik IIW-a; Roland Boecking, direktor Nemačkog društva za zavarivanje - DVS; Sorin Keller, GE Power, Švajcarska; Luisa Coutinho, izvršna direktorka EWF-a; Heidi Cramer, Univerzitet primenjenih nauka u Minhenu, Nemačka; Christian Ahrens, predsednik IIW-IAB grupe.

U sredu, 10. oktobra, održana je veoma uspešna radionica predstavnika zavarivačkih asocijacija iz Regiona na temu *Kako unaprediti zavarivanje u regionu*. Glavni cilj je bio da se identifikuju ključne oblasti saradnje koje bi mogle biti preduslov za partnerstvo između zemalja iz Regiona u cilju poboljšanja daljih aktivnosti.

Na radionici su učestvovali predstavnici Bugarske, Grčke, Mađarske, Turske, Rumunije i Srbije sa prezentacijama o svojim nacionalnim kapacitetima u zavarivanju, a predstavnici Bosne i Hercegovine, Crne Gore i Makedonije, koji su takođe bili prisutni, imali su priliku da učestvuju u diskusiji.

Chris Smallbone je bio moderator ove radionice.

Belgrade, the capital of Serbia, hosted **the 4th IIW South-East European Welding Congress**, held at Metropol Palace Hotel, October 10 to 13, 2018.

The Congress was organized by Serbian Welding Society - DUZS in cooperation with Welding associations of Romania and Bulgaria, and with support of the International Institute of Welding (IIW).

Over 200 participants from 25 countries attended the Congress (Australia, Belarus, Bosnia & Herzegovina, Bulgaria, Canada, Croatia, Czech Republic, Germany, Greece, Hungary, Israel, Italy, Macedonia, Montenegro, Netherlands, Portugal, Romania, Russia, Serbia, Slovakia, Slovenia, Switzerland, Turkey, United Kingdom, USA).

During the three working days, over 70 papers were presented, while special attention was given to invited and keynote speakers: Douglas R. Luciani, IIW President; Chris Eady, EWF President; Chris Smallbone, IIW Past President; Roland Boecking, CEO of the German Welding Society – DVS; Sorin Keller, GE Power, Switzerland; Luisa Coutinho, Executive director of EWF; Heidi Cramer, University of Applied sciences Munich, Germany; Christian Ahrens, IIW-IAB Chair.

On October 10th, a very successful IIW WG-RA Workshop "*SEENET National Welding Capability*" was held. The main objective was to identify key areas of co-operation and collaboration which could be undertaken between SEENET countries in order to improve further activities.

Representatives of Bulgaria, Greece, Hungary, Turkey, Romania and Serbia attended the Workshop and all of them had a presentation on their own national welding capability, while the representatives of Bosnia and Herzegovina, Montenegro and Macedonia were present and had the opportunity to participate in the work.

Chris Smallbone was the moderator of this Workshop.

Nastavak na strani 174



M.Bodea^{1,a}, N.A. Sechel^{1,b}, C.V Prică^{1,c}

NEW TOOLS FOR STEELS WELDABILITY MODEL BASED ON THE RISK ASSESSMENT

NOVI ALATI ZA MODEL ZAVARLJIVOSTI ČELIKA ZASNOVAN NA OCENI RIZIKA

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad je u izvornom obliku objavljen u Zborniku sa 4. IIW Kongresa zavarivanja Jugoistočne Evrope „Safe Welded Construction by High Quality Welding“ održanog u Beogradu 10-13. Oktobra 2018

Rad primljen / Paper received:

Novembar 2018.

Ključne reči: zavarljivost, analiza rizika

Abstract

In this paper a new weldability model is presented, which can be applied to different steels grades based on a risk analysis, parent and filler materials properties, welding process and welding technology. The previous weldability models based on carbon equivalent formula or on other indirect methods available in the literature have limited applications. This is because it consider only the steel chemical composition, ignoring others process factors over the weldability. The weldability should consider all material and process factors of influence, even for the very same steel grade, which can be welded in different conditions, thus obtaining different weldability results.

1. Introduction

Nowadays, many applications require high strength metallic welded structures, capable to support dynamic loads in different environments and temperature conditions. Such applications require the utilization of advanced high strength steels (AHSS) or even ultrahigh strength steels (UHSS), which beside high strength should present also good weldability properties. Due to exploitation conditions and safety concerning, the weldability property plays a fundamental role in designing and fabrication of modern metallic welded structures. According to American Welding Society (AWS), the weldability is defined as the metal capacity to be welded under the fabrication conditions imposed with a specific suitability and designed structure, which perform satisfactorily in service, [1].

Similarly, DIN 8528 Part 1, is defining the weldability as result of interaction of three main group factors, according to material, manufacture and design characteristics. These factors must be accounted and are summarised in the Table 1.

Adresa autora / Author's address:

¹ Technical University of Cluj, 28 Memorandumului, Cluj-Napoca, Romania

^a ambodea@stm.utcluj.ro, ^b bniculina.sechel@stm.utcluj.ro,

^c ccalin.prica@stm.utcluj.ro

Key words: weldability, risk analysis

Rezime

U ovom radu je predstavljen novi model zavarljivosti, koji se može primeniti za različite vrste čelika na osnovu analize rizika, karakteristika osnovnog i dodatnog materijala, postupka i tehnologije zavarivanja. Prethodni modeli zavarljivosti zasnovani na ekvivalentu ugljenika ili na drugim indirektnim metodama dostupnim u literaturi, imaju ograničene primene. Ovo je zato što uzima u obzir samo hemijski sastav čelika, ignorišući druge procesne faktore od kojih zavisi zavarljivost. Zavarljivost treba da uzme u obzir sve faktore materijala i procesa, čak i za istu klasu čelika, koji se mogu zavariti u različitim uslovima, i stoga se dobijaju različiti rezultati zavarljivosti.

1. Uvod

Danas, mnoge aplikacije zahtevaju metalne zavarene konstrukcije visoke čvrstoće, sposobne da izdrže dinamička opterećenja u različitim okruženjima i temperaturnim uslovima. Ovakve primene zahtevaju korišćenje naprednih čelika visoke čvrstoće (AHSS) ili čak čelika visokih čvrstoća (UHSS), koji pored visoke čvrstoće treba da imaju i dobre karakteristike zavarljivosti. Zbog uslova eksploatacije i sigurnosti, svojstvo zavarljivosti igra osnovnu ulogu u projektovanju i izradi modernih metalnih zavarenih konstrukcija. Prema Američkom zavarivačkom društvu (AWS), zavarljivost se definiše kao mogućnost metala da bude zavaren pod uslovima izrade koji su nametnuti specifičnom pogodnošću i projektom konstrukcije, a da zadovolje uslove rada [1].

Slično tome, DIN 8528 deo 1, definiše zavarljivost kao rezultat interakcije tri glavne grupe faktora, u zavisnosti od materijala, proizvodnje i karakteristika projekta. Ovi faktori se moraju uzeti u obzir i prikazani su u tabeli 1.



	MATERIAL/MATERIJAL
Welding Suitability Pogodnost za zavarivanje	Chemical composition, Tendency to hardening, Tendency to ageing, Tendency to hot cracking Melting point, Thermal conductivity, Expansion coefficient, Mechanical properties Segregations, Inclusions, Grain size, Anisotropy Hemijski sastav, Sklonost ka otvrdnjavanju, Sklonost ka starenju, Sklonost ka vrućim prslinama, Tačka topljenja, Toplotna provodljivost, Koeficijent širenja, Mehaničke osobine, Segregacije, Uključci, Veličina zrna, Anizotropija
	MANUFACTURE/IZRADA
Welding Possibility Mogućnost zavarivanja	Welding process, Groove shape, Preheating, Susceptibility to cracking, Heat input and dilution, Welding position, Welding sequence, Weld penetration, Post weld heat treatment, Grinding, Pickling Postupak zavarivanja, Oblik žljeba, Predgrevanje, Osetljivost na prsline, Uneta toplota I stepen mešanja, Položaj zavarivanja, Uvarivanje šava, Termička obrada posle zavarivanja, Brušenje, Ispiranje
	DESIGN/ Projekat
Welding Safety Bezbednost zavarivanja	Material thickness, Notch effect, Stiffness differences, Joint geometry and displacement, Temperature range, Corrosion resistance, Loads and stress distribution, Weld bead shape Debljina materijala, Efekat zareza, Razlika u krutosti, Geometrija spoja i postavljenost, Opseg temperature, Otpornost na koroziju, raspodela opterećenja i napona, Oblik zavara

Table 1. Groups of weldability factors of influence

Tabela 1. Grupe uticajnih faktora zavarljivosti

Detailed description of each factor influence over weldability exceeds the present purpose of this paper, but a short comment is given for the main factors considered in our weldability model.

1.1 Chemical composition

Parent and filler material chemical composition is a key element that has a great influence over the weldability. Usually, the filler material is selected in order to match the parent material mechanical properties, taking into account the differences in the weld microstructure, as result of the welding thermal cycle applied. In literature, different empirical carbon equivalent formulas can be found, that are used to evaluate the weldability and the tendency of hydrogen induced cracking of the weld. The most frequently formulas used for carbon equivalent calculus are given in the eq. (1)-(5), [3]-[7].

$$CE_{IIW} = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15 \quad (1)$$

$$CET = C + (Mn+Mo)/10 + (Cr+Cu)/20 + Ni/40 \quad (2)$$

$$CEN = C + k \cdot [Si/24 + Mn/6 + Cu/15 + Ni/20 + (Cr+Mo+V+Nb)/5 + 5B] \quad (3)$$

$$\text{where } k = 0.75 + 0.25 \cdot \tanh(20 \cdot (C - 0.12)) \quad (4)$$

$$P_{cm} = C + Si/30 + (Mn+Cu+Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B \quad (5)$$

$$CE_q = C + Si/25 + (Mn+Cu)/16 + Ni/40 + Cr/10 + Mo/15 + V/10 \quad (6)$$

Each formula has been developed for different steels classes, based on a chemistry that in time has changed for modern steels, in order to obtain a better weldability and superior mechanical properties. These properties are achieved based on the steel microstructure control, rather than by increasing steel carbon equivalent value.

Detaljan opis uticaja svakog faktora na zavarljivost prevazilazi sadašnju svrhu ovog rada, ali je dat kratak komentar za glavne faktore koji se uzimaju u obzir u našem modelu zavarljivosti.

1.1 Hemijski sastav

Hemijski sastav osnovnog i dodatnog materijala je ključni element koji ima veliki uticaj na zavarljivost. Obično se dodatni materijal bira tako da se podese sa mehaničkim osobinama osnovnog materijala, uzimajući u obzir razlike u mikrostrukturi zavarenog spoja, kao rezultat primenjenog termičkog ciklusa zavarivanja. U literaturi se mogu naći različite empirijske formule za ekvivalent ugljenika, koje se koriste za procenu zavarljivosti i tendenciju stvaranja vodoničnih prslina u zavarenom spoju. Najčešće formule koje se koriste za izračunavanje ekvivalenta ugljenika date su u jednačinama. (1) - (5), [3] - [7].

$$CE_{IIW} = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15 \quad (1)$$

$$CET = C + (Mn+Mo)/10 + (Cr+Cu)/20 + Ni/40 \quad (2)$$

$$CEN = C + k \cdot [Si/24 + Mn/6 + Cu/15 + Ni/20 + (Cr+Mo+V+Nb)/5 + 5B] \quad (3)$$

$$\text{where } k = 0.75 + 0.25 \cdot \tanh(20 \cdot (C - 0.12)) \quad (4)$$

$$P_{cm} = C + Si/30 + (Mn+Cu+Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B \quad (5)$$

$$CE_q = C + Si/25 + (Mn+Cu)/16 + Ni/40 + Cr/10 + Mo/15 + V/10 \quad (6)$$

Svaka formula je razvijena za različite klase čelika, zasnovana je na hemiji koja se vremenom promenila za savremene čelike, kako bi se postigla bolja zavarljivost i vrhunska mehanička svojstva. Ova svojstva se postižu na osnovu kontrole mikrostrukture čelika, a ne povećanja vrednosti ekvivalenta ugljenika čelika.



However, there is no universal carbon equivalent formula that could be applied to all steels grades, some formulas giving better results for low carbon and HSLA steels, equations (4), (5), while others formula are more accurate for steels with higher carbon equivalent content equations (1), (3). Nevertheless, all carbon equivalent formulas are related to the steel cold-cracking susceptibility, being a direct connection between the steel carbon equivalent and the martensite volume or maximum hardness in the HAZ.

1.2 Heat input and cooling cycle

The welding thermal cycle plays also a key factor in the microstructure control in parent material and HAZ. The formation of hard secondary phases depends directly on the carbon equivalent and cooling rates experienced in the 800-500°C temperature range, for structural steels to HSLA and AHSS steels. In order to avoid the stainless steels sensitization the apparition of sigma and chi phases must be avoided. That requires different cooling rates, especially in the maximum temperature transformation range, between 1000-800°C.

Heat input is determined by the welding parameters, I (A), U (V) and welding speed (m/min), while the cooling rate CR (°C/sec) depends on the material thickness, heat flow regime, metallic structure design, material thermal conductivity and welding pool properties.

Međutim, ne postoji univerzalna formula za ekvivalent ugljenika koja bi se mogla primeniti na sve vrste čelika, neke formule daju bolje rezultate za niskougljenične i HSLA čelike, jednačine (4), (5), dok su druge formule tačnije za čelike sa većim sadržajem ugljenika, jednačine (1), (3). Bez obzira na sve, sve formule sa ekvivalentom ugljenika odnose se na podložnost ka hladnim prslinama čelika, što je direktna veza između ekvivalenta ugljenika čelika i zapremine martenzita ili maksimalne tvrdoće u ZUT-u.

1.2 Uneta toplota i ciklus hlađenja

Termički ciklus zavarivanja predstavlja ključni faktor u kontroli mikrostrukture u osnovnom materijalu i ZUT-u. Formiranje tvrdih sekundarnih faza zavisi direktno od ekvivalenta ugljenika i brzine hlađenja u temperaturnom opsegu od 800-500°C, za konstrukcije čelika do HSLA i AHSS čelika. Da bi se izbegla senzitivizacija nerđajućih čelika, mora se izbeći pojavljivanje sigma i chi faza. To zahteva različite brzine hlađenja, posebno u maksimalnom opsegu temperature transformacije, između 1000-800°C.

Unošenje toplote određuje se parametrima zavarivanja I (A), U (V) i brzine zavarivanja (m / min), a brzina hlađenja CR (°C/sec) zavisi od debljine materijala, režima provođenja toplote, projekta metalne konstrukcije, toplotne provodljivosti materijala i karakteristike zavarivačke kupke.

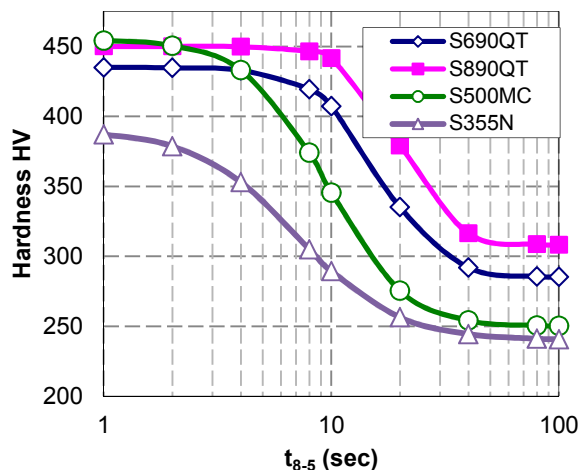


Figure 1. HAZ hardening for different materials as a function of cooling time t_{8-5} after welding, calculated after [8].

Slika 1. Otvrdnjavanje ZUT kod različitih materijala kao funkcija vremena hlađenja t_{8-5} posle zavarivanja [8].

As the steel's carbon equivalent become higher and cooling rate faster, the tendency to form hard and brittle phases in HAZ get stronger, increasing the weld cracking susceptibility and lowering the weldability. The risk of cracking in HAZ depends on the diffusible hydrogen level, joint restraint and HAZ hardening. The dependence between the maximum HAZ hardness and cooling rate expressed by the t_{8-5} parameter is presented in the Figure 1 for

Kako ekvivalent ugljenika čelika postaje veći i brzina hlađenja raste, tendencija stvaranja tvrdih i krutih faza u ZUT-u postaje sve jača, povećavajući podložnost prslinama i smanjenje zavarljivosti. Rizik od prslina u ZUT-u zavisi od nivoa difundovanog vodonika, krutosti zavarenih spojeva i otvrdnjavanja ZUT-a. Zavisnost između maksimalne tvrdoće ZUT i brzine hlađenja izražena



different steels, used frequently in welded structures.

2. Weldability model proposed

The weldability model proposed in this paper is measuring how much the deposited metal and HAZ properties have been negatively affected by the welding process in respect with the parent material properties reference system (MPRS). Practically, in MPRS are included but not limited to: hardness, impact energy, ductility, fatigue strength, creep and corrosion resistance, grain size, microstructure anisotropy, stress distribution and others specific properties.

The weldability is determined based on each property impact analysis, by calculating the weighted arithmetic mean of all negative impacts. The risks and weights factors are arranged in a matrix form, considering normalized values for each risk analysed. Thus, the weldability will result as a number between 0 and 1, representing the weldability number (WN). Mathematically, the weldability could be described by a five-parameter logistic (5PL) function that has two horizontal asymptotes.

parametrom t_{8-5} prikazana je na slici 1 za različite čelike, često se koristi kod zavarenih konstrukcija.

2. Predviđeni model zavarljivosti

Model zavarljivosti predložen u ovom članku meri koliko je na naneti metal i svojstva ZUT negativno uticao proces zavarivanja u odnosu na referentni sistem svojstava osnovnog materijala (MPRS). Praktično, u MPRS su uključeni ali ne i ograničeni na: tvrdoću, energiju udara, duktilnost, zamornu čvrstoću, otpornost na puzanje i koroziju, veličinu zrna, anizotropiju mikrostrukture, raspodelu napona i druge specifične osobine.

Zavarljivost se određuje na osnovu analize uticaja svake osobine, izračunavanjem ponderisane aritmetičke sredine svih negativnih uticaja. Faktori rizika i težine su raspoređeni u matičnom obliku, uzimajući u obzir normirane vrednosti za svaki analizirani rizik. Prema tome, zavarljivost će rezultovati kao broj između 0 i 1, što predstavlja broj zavarljivosti (WN). Matematički, zavarljivost se može opisati pomoću petoparametarske logističke (5PL) funkcije koja ima dve horizontalne asimptote.

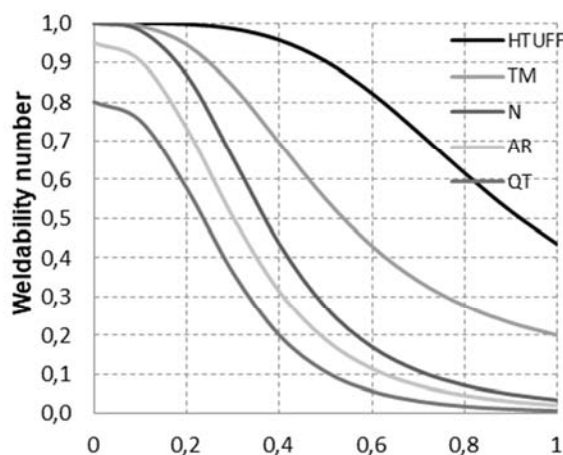


Figure 2 Weldability vs. Equivalent Risk Factor.

Slika 2. Zavarljivost –Ekvivalent faktora rizika

5PL weldability function has been graphically represented vs. the equivalent risk factor, in the The Figure 2. This representation allows us to obtain a compared view of different steels weldability calculated for the same welding conditions or risk factors. Beside the parent and filler material properties – e.g. carbon equivalent, the weldability is strongly affected by many others factors, like those presented in the Table 1

In the Table 2 are presented the parameters of the 5PL weldability function, which is graphically represented in the Figure 2, for different steels grades, using the equation (7), where RF represent the equivalent risk factor.

Funkcija zavarljivosti 5PL je grafički prikazana u odnosu na ekvivalentni faktor rizika, na slici 2. Ova prezentacija nam omogućava da dobijemo upoređeni prikaz različitih zavarljivih čelika izračunatih za iste uslove zavarivanja ili faktore rizika. Pored karakteristika osnovnog i dodatnog materijala - npr. ugljenični ekvivalent, zavarljivost je snažno pogođena mnogim drugim faktorima, kao što su one prikazane u Tabeli 1

U tabeli 2 prikazani su parametri funkcije zavarljivosti 5PL, koja je grafički prikazana na slici 2, za različite vrste čelika, koristeći jednačinu (7), gde RF predstavlja ekvivalentni faktor rizika.



Parameters 5PL Function Parametri 5PL funkcije	a	d	c	b	e
HTUFF Steels Ultra finožrni čelici visoke čvrstoće	0.1	1	0.8	4	0.8
Thermomechanical steels TM Termomehanički obrađeni čelici	0.1	1	0.5	3	1
Structural steels (N) Konstrukcioni čelici (normalizaciono stanje)	0	1	0.4	3	1.2
Structural steels (AR) Konstrukcioni čelici (vruće valjani)	0	0.95	0.4	2.5	1.6
Structural steels (QT) Konstrukcioni čelici (kaljeni i otpušteni)	0	0.8	0.4	2.5	2

Table 2. Parameters of 5PL weldability function 5PL
Tabela 2. Parametri funkcije zavarljivosti

$$WN(RF) = a + \frac{d - a}{\left[1 + \left(\frac{RF}{c}\right)^b\right]^e} \quad (7)$$

The equivalent risk factor RF, equation (8) is obtained also by a weighted arithmetic mean of individual risks RFi considered in the Table 3, arranged in five groups, according to the risk level. Each individual risk is normalized and is accounted on equivalent risk number based on an impact factor IFi or weight, given also in the Table 3.

Ekvivalentni faktor rizika RF, jednačina (8) se dobija i ponderisanom aritmetičkom sredinom pojedinačnih rizika RFi razmatranih u Tabeli 3, raspoređenih u pet grupa, prema nivou rizika. Svaki pojedinačni rizik se normalizuje i obračunava se na ekvivalentnom broju rizika zasnovanom na faktoru uticaja IFi ili težini, datom u tabeli 3.

$$RF = \sum_{i=1}^n RF_i \cdot IF_i \quad (8)$$

Risk factor RFi Faktor rizika	Group Risks/ Grupe rizika					Weight factor Faktor težine
	1	2	3	4	5	
Groove type Vrsta žljeba	I, J, Y 0.1	V, U, X 0.2	2X, 2U 0.5	fillet 0.8	asym. 1	5%
Weld bead shape Oblik zavara	Flat/ravno 0.1	convex 0.2	concave 0.4	convex+ 0.8	concave+ 1	5%
Weld H/W ratio Odnos H/W u šavu	<1 0.2	1-2 0.3	2-3 0.5	3-4 0.8	>4 1	5%
Joint Restraint Krutost spoja	no restr./bez 0	Low/malo 0.2	Medium/srednje 0.5	High/veliko 0.8	very high/vrlo veliko 1	10%
Welding position Položaj zavarivanja	PA 0.1	PB, PH 0.2	PC 0.5	PD,PG,PF 0.8	PE 1	5%
Material thickness Dejina materijala	< 10 0.1	11-20 0.2	21-30 0.4	31-40 0.8	>40 1	5%
Welding process Postupak zavarivanja	LW,EBW 0.2	GMAW, 0.3	SAW 0.5	ESW 0.8	OAW 1	5%
Cold crack susceptibility Osetljivost na hladne prsline	very low 0	low 0.2	medium 0.5	high 0.8	very high 1	25%
Hot crack susceptibility Osetljivost na vruće prsline	very low 0	low 0.2	medium 0.5	high 0.8	very high 1	25%
Microstructure anisotropy Anizotropija mikrostrukture	UFG 0	FG 0.2	AR 0.5	AR+PD 0.8	CAST 1	10%

Table 3. Risk factors matrix
Tabela 3. Matrica faktora rizika

Notes: UFG-Ultra Fine Grained; FG-Fine Grained (micro alloyed); AR-As Rolled (hot rolled, conventional structural steels); PD-severe plastic deformation; CAST-cast steel. Convex+ or concave+ means weld surface excessive curvature.
Napomene: UFG-ultrafinožrni; FG-finožrni (mikrolegirani); AR- Kao valjano (vruće valjani, konvencionalni konstrukcioni čelici); PD-značajna plastična deformacija; CAST-čelični liv; Konveksan ili konkavan znači prekomernu zakrivljenost površine šava.



3. Weldability measurement

In equation (9), it has been proposed a formula for experimental measuring of weldability. The basic principle is to measure the extension of which the properties of the deposited metal and in HAZ have been affected by the welding process, in respect with the parent material properties reference system. Thus, we can measure the hardening or softening effect, the toughness reduction, heat input effect, changes in microstructure and hardness profile variation across the HAZ and deposited metal, in respect with the parent material hardness, Figure 3 and Figure 4.

3. Merenje zavarljivosti

U jednačini (9) predložena je formula za eksperimentalno merenje zavarljivosti. Osnovni princip je merenje obima nanetog metala i ZUT na koje je uticao proces zavarivanja, u odnosu na referentni sistem svojstava osnovnog materijala. Tako možemo meriti efekat otvrdnjavanja ili omekšavanja, smanjenje žilavosti, uticaj unete toplote, promene u mikrostrukтури i varijacije profila tvrdoće preko ZUT-a i nanetog metala, u odnosu na tvrdoću osnovnog materijala, slika 3 i 4.

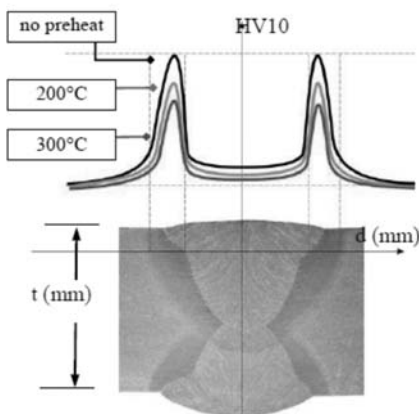


Figure 3 Hardness profile across the HAZ and deposited metal, for an over-strength weld ($R_{p0,2}$ filler > $R_{p0,2}$ base)
Slika 3. Profil tvrdoće preko ZUT i nanetog metala sa „jačim“ metalom šava ($R_{p0,2}$ dodatni > $R_{p0,2}$ osnovni)

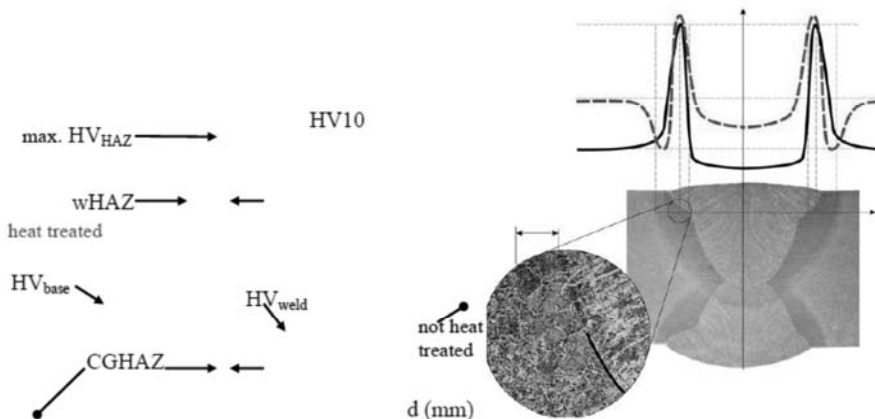


Figure 4 Hardness profile across the HAZ and deposited metal, for an under-strength weld ($R_{p0,2}$ filler < $R_{p0,2}$ base)
Slika 4. Profil tvrdoće preko ZUT i nanetog metala sa „slabijim“ metalom šava ($R_{p0,2}$ dodatni < $R_{p0,2}$ osnovni)

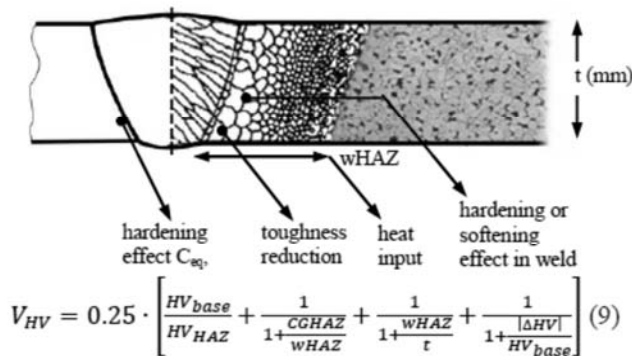


Figure 5 Hardness vector VHV calculus
Slika 5. Vektor tvrdoće VHV računski



The hardness vector VHV depends on parent and filler material chemistry, but also on heat input, dilution and cooling rates. The best weldability scenario is achieved when $VHV = 1$, meaning that there are not any differences between the parent material, HAZ and deposited material, in terms of hardness, tensile strength, impact energy or microstructure. This is a hypothetical positive scenario, but based on the hardness vector VHV, we can estimate how much the weld joint properties are different from that situation.

The hardness vector VHV given in equation (9) has four terms, each one taking values between 0 and 1. The first term is measuring the hardening effect in HAZ, the HVHAZ representing the maximum hardness reached in HAZ. The second term would be proportional with the toughness reduction in the coarse-grained region (CGHAZ), wHAZ representing the width of the HAZ. As the ratio between the two zones (CGHAZ vs. HAZ) grows, more pronounced the toughness reduction would be, Figure 5. This is happening especially when conventional or structural steels are welded with processes characterized by large heat inputs, when the austenite grain pinning effect during heating cycle is no longer effective.

The heat input effect is measured also by the third term, where HAZ width is compared against to welded part thickness. As the HAZ become narrower, the weldability is increased accordingly. Finally, the last term is considering the hardening or softening effect in the deposited metal, according to dilution, parent and filler material properties, where $\Delta HV = HV_{weld} - HV_{base}$. If $\Delta HV > 0$ we have a hardening effect, while for $\Delta HV < 0$ we have a softening effect, Figure 5.

4. Experimental results

For weldability model validation, we have analysed the data recorded in a welding procedure specification WPS available in a standard form, from a Romanian company. These data can be used in our weldability model in order to build a large database, thus allowing us to refine the 5PL logistic function for the weldability function.

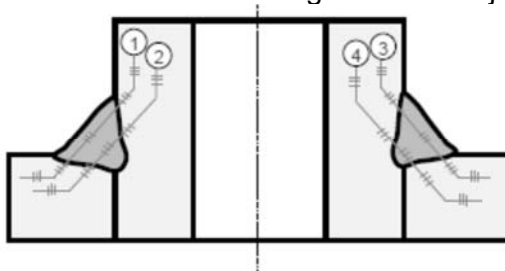


Figure 6 Hardness vector VHV measurement based on a WPS_1
Slika 6. Merenje vektora tvrdoće VHV zasnovano na WPS 1

VHV vektor tvrdoće zavisi od hemijskog sastava osnovnog i dodatnog materijala, ali i od količine toplote, stepena mešanja i hlađenja. Najbolji scenario zavarljivosti se postiže kada je $VHV = 1$, što znači da ne postoje razlike između osnovnog materijala, ZUT-a i nanetog materijala, u smislu tvrdoće, zatezne čvrstoće, energije udara ili mikrostrukture. Ovo je hipotetički pozitivan scenario, ali na osnovu VHV vektora tvrdoće, možemo proceniti koliko su osobine zavarenog spoja različite od te situacije.

Vektor tvrdoće VHV dat u jednačini (9) ima četiri termina, od kojih svaki ima vrednosti između 0 i 1. Prvi izraz je za merenje efekta otvrdnjavanja u ZUT-u, a HVHAZ predstavlja maksimalnu tvrdoću koja je postignuta u ZUT-u. Drugi termin bi bio proporcionalan smanjenju žilavosti grubog zrna (CGHAZ), nasuprot (vHAZ) koji predstavlja širinu ZUT-a. Kako raste odnos između dve zone (CGHAZ vs. HAZ), bilo bi izrazitije smanjenje smanjenja žilavosti, slika 5. Ovo se dešava posebno kada su konvencionalni ili konstrukcioni čelici zavareni postupcima koje karakterišu veliki ulazi toplote, kada efekat zakačinjanja austenitnog zrna tokom ciklusa grejanja, više nije efikasan.

Efekat unete toplote meri se i trećim načinom, gde se upoređuje širina ZUT-a prema debljini zavarenog dela. Kako ZUT postaje uži, zavarljivost se povećava u skladu s tim. Konačno, poslednji termin razmatra efekat otvrdnjavanja ili omekšavanja u nanetom metalu, u skladu sa karakteristikama stepena mešanja osnovnog i dodatnog materijala, gde je $\Delta HV = HV_{šav} - HV_{osnovni}$. Ako je $\Delta HV > 0$, imamo efekat otvrdnjavanja, dok za $\Delta HV < 0$ imamo efekat omekšavanja, slika 5.

4. Eksperimentalni rezultati

Za validaciju modela zavarljivosti, analizirali smo podatke iz WPS specifikacije zavarivanja koji su dostupni u standardnom obliku, od rumunske kompanije. Ovi podaci se mogu koristiti u našem modelu zavarljivosti kako bi se izgradila velika baza podataka, što nam omogućava da usavršimo 5PL logističku funkciju za funkciju zavarljivosti.



The welding parameters, welding test conditions and material properties are given in the Table 4, while the hardness measurement details and results are presented in the Figure 6 and Figure 7.

Parametri zavarivanja, uslovi ispitivanja zavarivanja i svojstva materijala dati su u tabeli 4, dok su detalji i rezultati merenja tvrdoće prikazani na slikama 6 i 7.

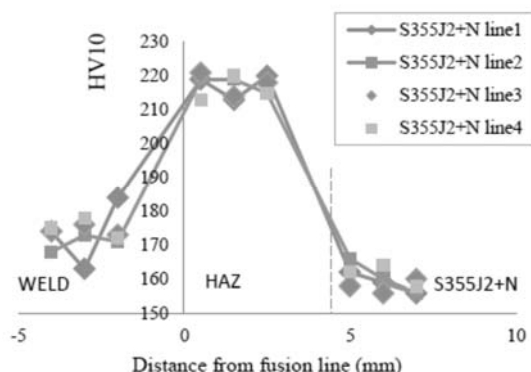


Figure 7 Hardness profile across the HAZ and deposited metal, measured for welded samples using WPS_1
Slika 7. Profil tvrdoće preko ZUT i nanetog metala, mereno na zavarenim uzorcima prema WPS 1

	Current Jačina struje I [A]	Tension Napon U [V]	Travel speed Brzina w _s (cm/min)	Heat input H Uneta toplota [kJ/mm]
Root pass Koreni zavar	180-181	13.5-14.6	6.5	1.40
Filler pass Zavar ispune	180-181	14.4-15.6	6.3	1.55
Cover Pass Pokrivni zavar	165-166	13.8-15.2	4.8	1.80
Materials: Ø75 x 20 mm t=20 mm Filler material	Welding Dissimilar materials* Zavarivanje raznorodnih materijala EN 10272 – 1.4541 EN 10025 – S355J2+N EN ISO 14343-A-W23 12L SiØ2.0 mm			
Welding process Postupak	141 – TIG			
Welding position Položaj	PB			
Shielding gas Zaštitni gas	EN ISO 14175 - I1 - Ar			
Welding current Vrsta struje	DC ⁻			

Table 4. Welding Procedure Specifications, WPS_1
Tabela 4. Specifikacija tehnologije zavarivanja WPS 1

Hardness Vector V _{HV}	Measured Izmeren	Calculated Izračunat
S355J2+N Line 1	0.82	WN=0.88 eq.(7) jed.(7) for a risk factor equivalent za ekvivalent faktora rizika RF=0.20
S355J2+N Line 2	0.84	
S355J2+N Line 3	0.82	
S355J2+N Line 4	0.83	
Average value V _{HV} Srednja vrednost	0.83	
Standard distribution Standardna raspodela	0.009	

Table 5. Hardness vector VHV results
Tabela 5. Rezultati za vektor tvrdoće VHV



Figure 8 Fusion line and HAZ for welded sample S355J2+N, $WN=0.88$, $RF=0.2$, $\sigma = \pm 0.009$, X200, nital.

Slika 8. Linija stapanja i ZUT zavarenih uzoraka S355J2+N, $WN=0.88$, $RF=0.2$, $\sigma = \pm 0.009$, X200, nital.



Figure 9 Fusion line and HAZ for welded sample S355J2+N, $CGHAZ = 500 \mu m$, $HAZ = 1500 \mu m$ (visual delimitation), X500, nital

Slika 9 Linija stapanja i ZUT zavarnih uzoraka S355J2+N, $CGHAZ = 500 \mu m$, $HAZ = 1500 \mu m$ (vizuelna razgraničenja), X500, nital

In Figure 8 and Figure 9 is presented the microstructure near fusion line and in the weld. Just after the fusion line in the metal base, it can be observed large ferrite grains that have coalesced into a continuous network of ferrite grains, which constitute the CGHAZ. The visible HAZ has been considered the microstructure area, which presents visual modifications in respect to parent material microstructure, as, can be seen in the Figure 8 at smaller magnification.

The banded microstructure feature has been preserved in the HAZ, where at larger magnification can be observed predominantly granular bainite morphology.

The weldability is measured based on the hardness vector formula presented in the equation 9, which was applied for each measurement line, illustrated in the Figure 6. The obtained results are given in the Table 5. The average value for hardness vector VHV has been measured to 0.83 with a standard deviation of 0.009 which is in a good agreement with the calculated weldability number $WN=0.88$ obtained for an equivalent risk factor $RF=0.196$.

The weldability number WN was calculated with eq.(7) using the 5PL parameters given in the Table 2 for structural steels (N).

Na slikama 8 i 9 prikazana je mikrostruktura u blizini linije stapanja i u metalu šava. Neposredno uz liniju stapanja linije u osnovnom metalu, primećuju se velika feritna zrna koja su se spojila u kontinuiranu mrežu feritnih zrna, koja čine CGHAZ. Vidljiva ZUT se smatra površinom mikrostrukture, koja prikazuje vizuelne modifikacije u odnosu na mikrostrukturu osnovnog materijala, kao što se vidi na slici 8 pri manjim uvećanjima.

U ZUT-u je očuvana trakasta mikrostruktura, gde se kod većih uvećanja može primetiti pretežno granularna morfologija beinita.

Zavarljivost se meri na osnovu formule vektora tvrdoće predstavljene u jednačini 9, koja je primenjena za svaku mernu liniju, ilustrovanu na slici 6. Dobijeni rezultati su dati u tabeli 5. Prosečna vrednost vektora tvrdoće VHV je merena na 0,83 sa standardnim odstupanjem od 0,009, što je u dobroj saglasnosti sa izračunatim brojem zavarljivosti $WN = 0,88$ dobijenog za ekvivalentni faktor rizika $RF = 0,196$.

Broj zavarljivosti WN izračunat je prema jednačini (7) korišćenjem parametara 5PL datih u tabeli 2 za konstrukcione čelike (N).



5. Conclusion

1) The weldability number WN has been proposed as a new way for materials weldability assessment. The WN is measuring how much the deposited metal and HAZ properties have been negatively affected by the welding process, in respect with the parent material properties reference system.

2) The weldability model proposed can be applied for different steels grades based on a risk analysis, parent and filler materials properties, welding process and welding technology. Thus, we have a more accurate model that considers the effective welding conditions over the weldability. More important, we obtain a compared view over materials weldability in respect to major risk factors encountered in the welded structures fabrication.

3) The hardness vector VHV can be used for experimentally measurements of the materials weldability. The VHV depends on parent and filler material chemistry, but also on heat input, dilution and cooling rates.

4) The proposed weldability model can be improved and extended further by refining 5PL function parameters for others metallic materials. This can be accomplished by analysing large welding database, or existing WPS in large companies, being very useful in the Industry 4.0 implementation.

References

- [1] Larry Jeffus, Welding And Metal Fabrication, ISBN-13: 978-1-4180-1374-5, Delmar Cengage Learning, 2012, pp.780.
- [2] Springer Handbook of Mechanical Engineering, Volumul 10, Karl-Heinrich Grote, Erik K. Antonsson, ISBN: 978-3-540-49131-6, 2009, pp.3.
- [3] TWI, What is the difference between the various Carbon Equivalent Formulae used in relation to hydrogen cracking?, <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-the-difference-between-the-various-carbon-equivalent-formulae-used-in-relation-to-hydrogen-cracking/>, june 2018.
- [4] DILLINGER, Help welding calculation – WELDING, <https://www.dillinger.de/d/en/e-service/tools/welding/help/index.shtml>, june 2018.

5. Zaključak

1) Broj zavarljivosti WN je predložen kao novi način za procenu zavarljivosti materijala. WN meri koliko na svojstva nanetog metala i ZUT negativno utiče proces zavarivanja, u odnosu na referentni sistem svojstava osnovnog materijala.

2) Predloženi model zavarivanja može se primeniti za različite vrste čelika na osnovu analize rizika, osobina osnovnog i dodatnog materijala, postupka i tehnologije zavarivanja. Dakle, imamo tačniji model koji uzima u obzir efektivne uslove zavarivanja. Što je još važnije, dobijamo upoređeni prikaz o zavarljivosti materijala u odnosu na glavne faktore rizika koji se javljaju pri izradi zavarenih konstrukcija.

3) Vektor tvrdoće VHV može se koristiti za eksperimentalno merenje zavarljivosti materijala. VHV zavisi od hemijskog sastava osnovnog i dodatnog materijala, ali i od količine toplote, stepena mešanja i hlađenja.

4) Predloženi model zavarivanja može se unaprediti i proširiti rafiniranjem parametara funkcije 5PL za druge metalne materijale. Ovo se može postići analizom velike baze za zavarivanje ili postojećih WPS u velikim kompanijama, što je veoma korisno u implementaciji industrije 4.0.

- [5] Tadashi KASUYA, Yuji HASHIBA, Carbon Equivalent to Assess Hardenability of Steel and Prediction of HAZ Hardness Distribution, NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT No. 95 January 2007.

[6] Kasuya, Tadashi, Nobutaka Yurioka, and Makoto Okumura. "Methods for predicting maximum hardness of heat-affected zone and selecting necessary preheat temperature for steel welding." Nippon Steel Technical Report (1995): pp.7-14.

[7] Wesley Wang, The Great Minds of Carbon Equivalent, <https://ewi.org/the-great-minds-of-carbon-equivalent-part-ii-2/>

[8] IMOJA, Heat-treatable Plate Steel, <https://www.imoja.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-alloy-steels-irons/heat-treatable-plate-steel.php>



M. Perović¹, T. Vuherer², D. Bajić³, K. Gerić⁴, S. Baloš⁴, M. Rakin⁵

Fracture toughness of base and weld metal of aluminum alloy EN AW 7049A T652 FSW joint

Udarana žilavost osnovnog materijala i metala šava spoja zavarenog FSW postupkom od aluminijumske legure EN AW 7049A T652

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad je u izvornom obliku objavljen u Zborniku sa 4. IIW Kongresa zavarivanja Jugoistočne Evrope „Safe Welded Construction by High Quality Welding“ održanog u Beogradu 10-13. Oktobra 2018

Rad primljen / Paper received:

Novembar 2018.

Adresa autora / Author's address:

¹Chamber of Economy of Montenegro, Novaka Miloševa 29/II, 81000 Podgorica, Montenegro, ¹mperovic@pkcg.org,

²University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering, Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenia ²tomaz.vuherer@um.si,

³University of Montenegro, Faculty of Mechanical Engineering, Džordža Vašingtona bb, 81000 Podgorica, Montenegro ³darko@ac.me,

⁴University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Serbia

⁴sebab@uns.ac.rs

⁵University of Belgrade, Faculty of Technology and Metallurgy, Karnegijeva 4, 11000 Belgrade, Serbia, ⁵marko@tmf.bg.ac.rs

Ključne reči: zavarivanje trenjem sa mešanjem, udarna žilavost, povlačenje strane WM, rekristalizacija

Key words: friction stir welding, fracture toughness, retreating side of the WM, recrystallization

Abstract

The paper analyses the impact of the tool geometry on the friction stir welding (FSW) method on fracture toughness values of the base metal (BM) and weld metal (WM) of a butt welded joints of a high strength aluminium alloy. Values of fracture toughness KJlc were obtained using single-edge notched bend (SENB) specimens with fatigue pre-crack sampled from the BM and TMAZ (thermo-mechanically affected zone). Single specimen method was used according to ASTM E 1820 and parameters of elastic-plastic fracture mechanics were determined (CTOD crack tip opening displacement and the J integral).

Although the welding tools had different values of cone angle ($\alpha = 2.5^\circ - 10^\circ$) and the variable length of the pin ($h = 5.1 \text{ mm} - 5.4 \text{ mm}$) at a constant ratio of the number of tool revolutions and the speed of welding, the largest value of fracture toughness has the retreating side of the weld, then the advancing side of the WM, while the BM has the lowest value. This is the effect of recrystallization process in the retreating side of the WM due to combined rotating-straight forward motion of the tool during which the softened material is repeatedly transformed from one side to the other side around the centre of the tool.

Rezime

Papir analizira uticaj geometrije alata na metodu zavarivanja trenjem sa mešanjem (FSW) na vrednostima udarne žilavosti osnovnog materijala (BM) i metala šava sučeonog zavarenog spoja od legure aluminijuma visoke čvrstoće. Vrednosti žilavosti loma KJlc su dobijene korišćenjem epruveta sa zarezom sa jednom ivicom (SENB) na uzorcima koji su sadržali zamornu predprslinu iz BM i TMAZ (zona pod termo-mehaničkim uticajem). Metoda pojedinačnih uzoraka korišćena je u skladu sa ASTM E 1820 i određeni su parametri elasto-plastične mehanike loma (CTOD pomeranje otvora vrha prsline i J integral).

Iako su alati za zavarivanje imali različite vrednosti ugla konusa ($\alpha = 2,5^\circ - 10^\circ$) i promenljive dužine klina ($h = 5,1 \text{ mm} - 5,4 \text{ mm}$) pri konstantnom odnosu broja obrtaja alata i brzine zavarivanja, najveću vrednost udarne žilavosti ima povučena strana šava, zatim uznapređovalu stranu WM, dok BM ima najmanju vrednost. Ovo je efekat procesa rekristalizacije na povučenoj strani WM zbog kombinovane rotaciono-ravnog kretanja alata tokom koje se omekšani materijal više puta transformiše sa jedne strane na drugu stranu, oko centra alata.



1. Introduction

The procedure of Friction stir welding (FSW) with a tool is dominant in connecting of metal sheet materials, in particular light metals. The high quality of the joint achieved in the absence of a liquid phase and without the use of a filler, enables the use of materials that before FSW were limited to weld, or even by conventional methods unweldable. Such material is a four component aluminium alloy (Al-Zn-Mg-Cu) usually applied in military industry for production of artillery projectile carriers, warhead charge casings, housings for personal weapons and light housing for batteries based mainly on fuel cells. Of the alloy EN AW 7049 in T652 state which is an intermediate product for production of said components, specific for its high strength, low plasticity and explicit sensibility to fatigue and stress corrosion, it is required that such constructive structures, in exploitation conditions characterized by dynamic impacts and varying temperatures, maintain or improve technological-mechanical properties. This is particularly significant in welds that due to microstructural inhomogeneity represent macro inhomogeneous sites where stress concentration occurs as a potential cause of fracture. The problem is much more complex when it is an artificially aged, forged and homogenized relatively thick sheet made using local design. The aluminium alloy of high strength EN AW 7049 T652 used in the experiment was made from several batches of crude high purity Al 99.8% with the addition of alloying elements Zn, Mg and Cu, i.e. Zr, Ti, V, and B. This makes it unconventional compared to standard series 7 alloys [1]. After semi-continuous horizontal casting of cylindrical logs 200 x 6000 mm in size at a temperature of 700-705°C at a casting speed of 65-70 mm/min, level I of homogenization is performed at a temperature of 465 + 5°C for 6 h and maintaining for 3 h, while at the level II of homogenization the temperature is lower by 5°C and the retaining time 13 h longer. Cooling of the logs is in a chamber, naturally. After cutting with a circular saw across the diameter of 192 mm and length of 360 mm, the sample is three-point free forged on a press with nominal intensity pressure force of 300 MN. In the first stage to the height of 51 + 1 mm, with temperature of the tool between 150°C and 200°C and the temperature of the cartridge 420°C- 440°C at a forging rate of 5 mm/s. Reducing the height of the forging to 25 + 1 mm at a compacting speed of 3 mm/s, while at forging level III during the height reduction to 15 + 1 mm the speed was 2 mm/s, whereby the heat status of the tool and cartridge had not changed. [2]

1.Uvod

Postupak zavarivanja trenjem sa mešanjem (FSW) sa alatom je dominantan uspjehu pločastih metalnih materijala, posebno lakih metala. Visok kvalitet spoja postignut u odsustvu tečne faze i bez upotrebe dodatnog materijala, omogućava korišćenje materijala koji su pre FSW-a bili ograničeni za zavarivanje, ili čak i konvencionalnim metodama nezavarljivi. Takav materijal je četvorna aluminijumska legura (Al-Zn-Mg-Cu) koja se obično primenjuje u vojnoj industriji za proizvodnju nosilaca artiljerijskih projektila, kućišta za bojevu glavu, kućišta za lično oružje i laganog kućišta za baterije bazirane uglavnom na gorivim ćelijama. Od legure EN AW 7049 u T652 stanju isporuke, koja je međuproizvod za izradu pomenutih komponenti, specifične zbog svoje visoke čvrstoće, niske plastičnosti i eksplicitne osetljivosti na zamor i naponsku koroziju, zahteva se da takve konstrukcije, u uslovima eksploatacije koju karakterišu dinamički uticaji i različite temperature, održavaju ili poboljšavaju tehnološko-mehaničke osobine. Ovo je naročito značajno kod zavarenih spojeva koji zbog mikrostrukturne nehomogenosti predstavljaju makro nehomogene stranice gde se koncentracija napona javlja kao potencijalni uzrok loma. Problem je mnogo složeniji kada je veštački staren, kovan i homogenizovan relativno debeo sloj napravljen korišćenjem lokalnog oblika. Aluminijumska legura visoke čvrstoće EN AW 7049 T652 koja je korišćena u eksperimentu, napravljena je iz nekoliko serija neobrađenog Al 99,8% visoke čistoće uz dodavanje legirajućih elemenata Zn, Mg i Cu, tj. Zr, Ti, V i B. To je čini nekonvencionalnom u poređenju sa standardnim serijama legura 7 [1]. Posle polu-kontinuiranog horizontalnog livenja cilindričnih trupaca veličine 200 x 6000 mm na temperaturi od 700 do 705 ° C pri brzini livenja 65-70 mm/min, nivo I homogenizacije se izvodi na temperaturi od 465 + 5 ° C tokom 6 h i održavanje na 3 h, dok je na nivou II homogenizacije temperatura niža za 5 ° C i vreme zadržavanja 13 h duže. Hlađenje trupaca je prirodno u komori. Nakon sečenja kružnim testerom preko prečnika 192 mm i dužine 360 mm, uzorak je slobodno kovan na presi sa nominalnom silom pritiska 300 MN. U prvoj fazi do visine od 51 + 1 mm, temperatura alata je između 150 ° C i 200 ° C i temperatura uloška 420 ° C-440 ° C pri brzini kovanja od 5 mm/s. Smanjivanje visine kovanem na 25 + 1 mm pri brzini sabijanja od 3 mm/s, dok je kod kovanja na nivou III radi smanjenja visine do 15 + 1 mm brzina je bila 2 mm/s, pri čemu se status toplote alata i uloška nije promenio. [2]



Heat treatment in regime T652 includes quenching at 470°C for 1 h, rapid cooling in water for no longer than 15 s from opening the furnace, then cold additional deformation by compression in a press with a goal of eliminating residual stresses of the quenching process due to which the height of the cartridge is reduced by 1% -3%. Two-step artificial aging is in two iterations: 100°C-5 h and 160°C -5 h.

Appearance of microstructure in individual forging stages of alloy EN AW 7049 T652 is shown in Figure 1.

Toplotna obrada u režimu T652 uključuje kaljenje sa temperature od 470 ° C u trajanju od 1 h, brzo hlađenje u vodi najviše do 15s od otvaranja peći, a zatim hladna dodatna deformacija pritiskom u presi sa ciljem eliminisanja zaostalih napona usled procesa kaljenja zbog čega je visina uložka smanjena za 1% -3%. Dvostepeno veštačko starenje je u dve iteracije: 100 ° C-5 h i 160 ° C -5 h.

Izgled mikrostrukture u pojedinačnim fazama kovanja od legure EN AW 7049 T652 je prikazan na slici 1.

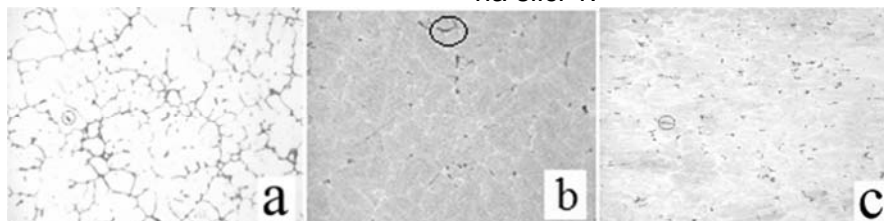


Figure 1. The microstructure of BM a) cast state magnification x200 b) state after homogenization magnification x 200 c) the heat-treated state magnification x200

Slika 1. Mikrostruktura BM a) livenog stanja- uvećanje x200 b) stanje nakon homogenizacije- uvećanje x 200 c) termički obrađeno stanje- uvećanje x 200

2. Experimental Procedure

For determining the chemical composition of the samples for friction stir welding on the optical emission quantometer type ARL 3580 with the "Peshiney" etalon samples, obtained was the chemical composition which compared to the chemical composition of the standard alloy EN AW 7049 is given in table 1.

2. Eksperiment

Za određivanje hemijskog sastava uzoraka za zavarivanje trenjem sa mešanjem na emisionom optičkom kvantometru tipa ARL 3580 sa "Peshiney" etalon uzorcima dobijen je hemijski sastav koji je u poređenju sa hemijskim sastavom standardne legure EN AW 7049 dat u tabeli 1.

Alloy marking Oznaka legure	Element content, mass% Sadržaj elemenat, mas. %									
	Zn	Mg	Cu	Cr	Zr	Ti	V	B	Fe	Si
EN AW 7049A T652	7,45	2,45	1,53	0,17	0,15	0,015	0,003	0,003	0,12	0,11

Table 1. Comparison of chemical composition of samples for friction welding with a tool and standard EN AW 7049A alloy

Tabela 1. Upoređivanje hemijskog sastava uzoraka za zavarivanje mešanjem pomoću alata i standardne legure EN AW 7049A

For these investigations significant are manufacturing static properties and hardness of the BM of the specially designed alloy EN AW 7049. The FSW (Friction Stir Welding) process is carried out so that a specially designed cylindrical tool on which is a conical pin considerably smaller and significantly of different geometry penetrates the welding work pieces. One type of tool (tool type B) for which the

Za ova istraživanja značajna su statička svojstva i tvrdoća BM specijalno dizajnirane legure EN AW 7049.

Proces FSW (zavarivanje trenjem sa mešanjem) se obavlja tako da specijalno dizajnirani cilindrični alat na kome je konični klin znatno manji i značajno različite geometrije prodire u radnekomade za zavarivanje. Jedan tip alata (alat tip B) za koji je efikasnost zatezanja spoja postignuta 76% u ET 05



tensile efficiency of the joint achieved is 76% in the ET 05 is shown in Figure 2, and the phases and cycles of the welding process are shown in Figure 3.

prikazan je na slici 2, a faze i ciklusi procesa zavarivanja su prikazani na slici 3.

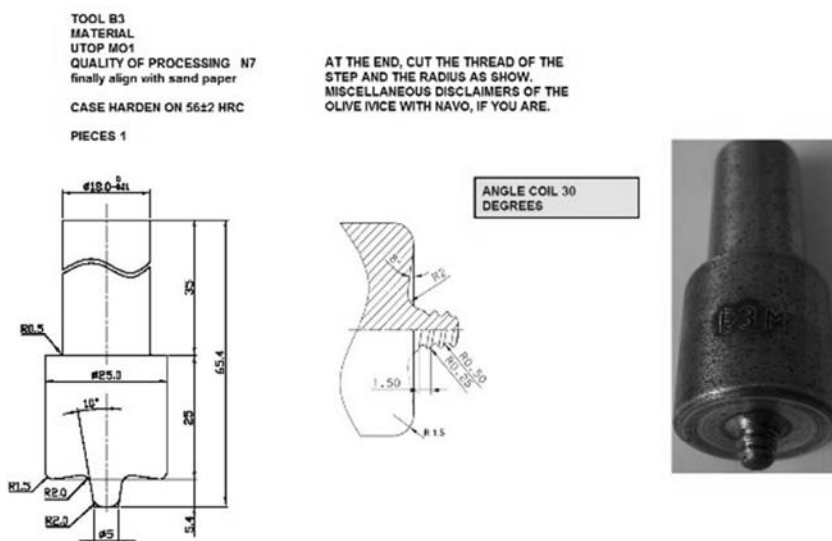


Figure 2. The tool with a conical coil type B
Slika 2. Alat sa konusnim klinom tipa B

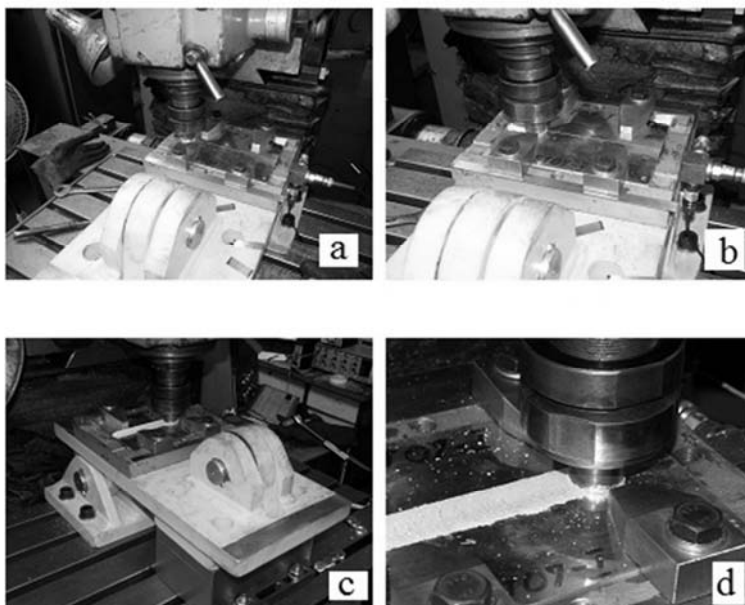


Figure 3. Stages and cycles of the FSW process
Slika 3. Faze i ciklusi procesa ZTM

Insight into the impact of welding parameters on fracture toughness is possible by applying a multi factor plan of the experiment by varying the values from minimum to maximum levels. Sheets 180 x 65 x 6 mm in size facing each other by thickness in the longitudinal direction are firmly clamped to the dieplate made of steel for improving 42CrMo4 with a work bench of the milling tool with CNC control. The kinematic parameters: the number of tool revolutions $n = 850 \text{ min}^{-1}$ and the welding speed $v = 80 \text{ mm/min}$ are maintained constant. The depth of penetration of the tool into the BM was 0.2 mm,

Uvid u uticaj parametara zavarivanja na udarnu žilavost moguće je primenom multi- faktorskog plana eksperimenta promenom vrednosti od minimalnog do maksimalnog nivoa. Ploče dimenzija 180x65x6 mm postavljene jedna prema drugoj po debljini u uzdužnom pravcu, čvrsto su pričvršćene na lim matrice od čelika za poboljšanje 42CrMo4 sa radnim stolom alata za glodanje sa CNC kontrolom. Kinematički parametri: broj obrtaja alata $n = 850 \text{ min}^{-1}$ i brzina zavarivanja $v = 80 \text{ mm/min}$ se održavaju konstantno. Dubina prodiranja alata u BM iznosila je 0,2 mm, dok je nagib alata u pravcu



while the tilt of the tool against the direction of welding was 1° . Speed of penetration of the tool pin was 0.25 mm/s and the tool head 0.01 mm/s did not change values during the welding of all four sheets [3]. After ET 05 welding, radiographic examination of the sheet was done to detect presence of volumetric defects, after which the samples are water jet cut for machining by milling and making SENB (single-edge notched bend) specimens per standard ASTM E 1820-15a. [4] The sampling locations of SENB specimens with notch orientation in different structural contents on the advancing side (AS) and the retreating side (RS) of the WM are shown in Figure 4 [5].

zavarivanja bio 1° . Brzina prodiranja klina alata iznosila je 0,25 mm/s, a glava alata 0,01 mm/s nije menjala vrednosti tokom zavarivanja sve četiri ploče [3]. Posle zavarivanja ET 05, obavljen je radiografski pregled pločata radi otkrivanja prisustva volumetrijskih defekata, nakon čega su uzorci rezani vodenim mlazom za mašinsku obradu na strugu i izradu SENB uzoraka po standardu ASTM E 1820-15a. [4] Lokacije uzorkovanja SENB epruveta sa orijentacijom zarez u različitim strukturnim sadržajima na napredovalo strani (AS) i udaljenoj strani (RS) WM, prikazane su na slici 4 [5].

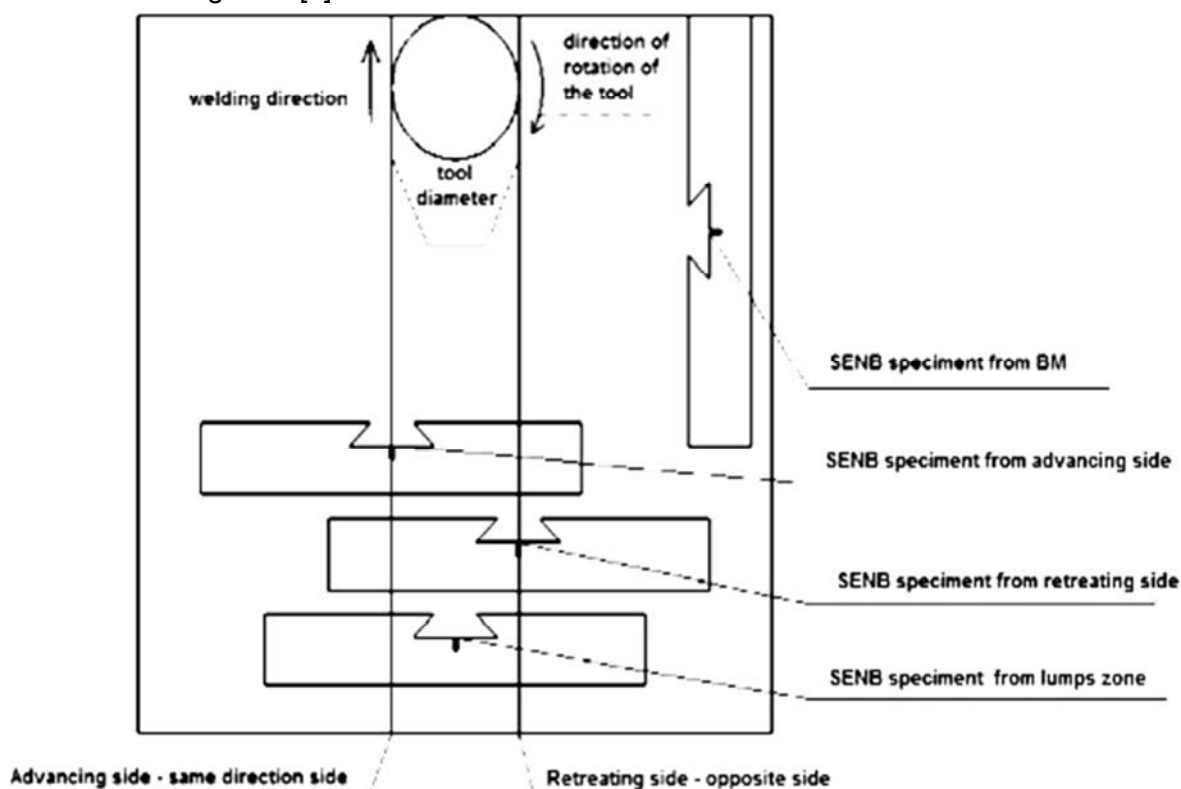


Figure 4. Sampling locations on SENB specimens

Slika 4. Lokacije uzorkovanja na SENB uzorcima

For determining parameter values of fracture toughness of the BM and WM the method of partial-successive compliance is used while recording the load-displacement line. Since the relief is elastic, compliance is obtained allowing to determine of the crack length. The test consists of: mechanical cutting of the specimen using a wire 0.02 mm in diameter on the device (see Figure 5a), then the initial fatigue on the Cractronik Rumulu with an integrated computer connection (Figure 5b), continued by single edge notch bending on the testing machine SMITWELD 1405 equipped with a computer unit for data acquisition and control (Figure 6) and the final fatigue on the Cractronik Rumulu prior to the final fracture of the specimen.

Za određivanje parametarskih vrednosti udarne žilavosti BM i WM koristi se postupak parcijalnog uzastopnog usaglašavanja pri snimanju linije promene opterećenja. Pošto je reljef elastičan, dobija se saglasnost koja omogućava utvrđivanje dužine prslina. Test se sastoji od: mehaničkog sečenja uzorka korišćenjem žice od 0,02 mm na uređaju (pogledajte sliku 5a), zatim početni zamor na Cractronik Rumulu sa integrisanim povezivanjem računom (slika 5b), nastavljen je savijanjem jedne ivice na mašini za testiranje SMITVELD 1405 opremljenom računarskom jedinicom za prikupljanje i kontrolu podataka (Slika 6) i konačni zamor na Cractronik Rumulu pre završnog loma uzorka.



Figure 5. a) Device for creating an initial fatigue pre-crack b) Fatigue device Crafronic Rumuli
Slika 5. a) Uređaj za stvaranje inicijalne zamorne predprsline b) Uređaj za izazivanje zamora Crafronic Rumuli



Figure 6. The testing machine SMITWELD1405
Slika 6. Mašina za ispitivanje SMITVELD1405

The above mentioned standard specifies that the minimum length of the crack must be greater than 45% and the maximum less than 55% of the height of the SENB specimen.

In addition to the data of the length of the notch for calculating used is the size of the specimen from the BM and from one experimental point ET 05 (chosen as the best, for which by previous single axially tension determined was the highest value of tensile strength $WM R_m = 485 \text{ MPa}$, the highest tensile joint efficiency 76% and the largest angle of 35° to crack initiation by bending around a roller). Based on the data determined is the maximum and minimum force applied at fatigue loading, and the value of the maximum and minimum stress intensity factor which is entered into the program of the computer unit of the fatigue device Lab View. Measuring the values of force, displacement and crack mouth opening for each of the specimens was performed respectively at room temperature. Based on the obtained data determined is the maximum and minimum force F that is applied in the fatigue test after which the value of the maximum and minimum stress intensity factor K_u is calculated. Both figures are inserted into the computer unit program of the fatigue device. At each of the points of failure it is necessary to record

Pomenuti standard navodi da minimalna dužina prsline mora biti veća od 45% a maksimalna, manja od 55% visine SENB epruvete.

Pored podataka o dužini zarez, za izračunavanje je korišćena veličina uzorka BM i iz jedne eksperimentalne tačke ET 05 (izabrana je kao najbolja, za koju je prema prethodnom jednoosnom zatezanju, utvrđena najviša vrednost zatezne čvrstoće $WM R_m = 485 \text{ MPa}$, najveća efikasnost zatezanja spoja 76% i najveći ugao od 35° za iniciranje prsline savijanjem oko valjka). Na osnovu podataka, utvrđena je maksimalna i minimalna sila koja se primjenjuje pri zamaranju, i vrednost maksimalnog i minimalnog faktora intenziteta napona koja se unosi u program računarske jedinice Lab View uređaja za zamor. Merenje vrednosti sile, pomeranja i otvaranja otvora prsline za svaki od uzoraka vršeno je na sobnoj temperaturi. Na osnovu dobijenih podataka, utvrđena je maksimalna i minimalna sila F koja se primenjuje u testu zamaranjema nakon čega se izračunava vrednost maksimalnog i minimalnog faktora intenziteta napona K_u . Obe slike se ubacuju u program računarske jedinice uređaja za zamor. Na svakoj od tačaka loma, neophodno je zabeležiti silu F , pomeranje otvora vrha prsline (CMOD) i odrediti usklađenost epruvete radi određivanja



the force F , the crack mouth opening displacement (CMOD) and determine the compliance of the specimen to determine the crack growth using the difference in compliance values.

3. Results

Programming the database for evaluation of the results obtained with the "three point" fatigue test contains all the data which was obtained using previously calculated formulas and standard recommendations, which is shown in Table 2.

rasta prsline koristeći razliku u usklađenim vrednostima.

3.Rezultati

Programiranje baze podataka za procenu rezultata dobijenih testom zamora u tri tačke sadrži sve podatke koji su dobijeni korišćenjem ranije izračunatih formula i standardnih preporuka, što je prikazano u tabeli 4.

	W [mm]	B [mm]	a0 [mm]	Δa [mm]	bo [mm]	σ_{YS} [MPa]	σ_{TS} [MPa]	ν [-]	E [MPa]	
OM	11,94	5,64	6,024	1,193	5,916	582,03	642,93	0,3	73455	
ET 05	ZG	11,90	5,79	6,116	0,604	5,784	342,4	484,84	0,3	71738
	SS	11,96	5,82	6,123	0,532	5,837	342,4	484,84	0,3	71738
	IS	11,96	5,81	5,603	0,610	6,357	342,4	484,84	0,3	71738

Table 2. Basic geometric measures and mechanical properties of specimens from the BM and WM for experimental point ET 05.

Tabela 2. Osnovne geometrijske mere i mehaničke osobine uzoraka BM i WM za eksperimentalnu tačku ET 05.

For determining of the J-integral parameter, the most important is that the tests range so that the ratio of the maximum stress intensity factor K_{max} and the elastic modulus E is equal to 0,00015, being outside of this range can cause uncontrolled fracture as a consequence of the formation of a larger plastic zone.

The average value of the initial crack length through the cross-section of the specimen enables determining the value of crack growth DELTA, by microscopic measuring of crack length at nine points on the cross section.

Determining the J-integral is particularly important for the process of normalization after which obtained are resistance curves $J-\Delta a$ (Figure 7) and CTOD (δ)- Δa (Figure 8). They were obtained after processing the results and represent the resistance curves of BM and TMAZ as part of the WM during stable crack growth.

Za određivanje parametra J-integrala, najvažnije je da se ispitivanja kreću tako da je odnos maksimalnog faktora intenziteta napona K_{max} i modula elastičnosti E jednak 0,00015, što je izvan ovog opsega, i može prouzrokovati nekontrolisani lom kao posledicu formiranja veće plastične zone. Prosečna vrednost dužine inicijalne prsline kroz presek uzorka omogućava određivanje vrednosti rasta prsline DELTA, mikroskopskim merenjem dužine prsline u devet tačaka na poprečnom preseku.

Određivanje J-integrala je naročito važno za proces normalizacije, nakon čega se dobijaju krive otpornosti $J-\Delta a$ (Slika 7) i CTOD (δ)- Δa (slika 8). Oni su dobijeni nakon obrade rezultata i predstavljaju krive otpornosti BM i TMAZ kao deo WM tokom stabilnog rasta prsline.

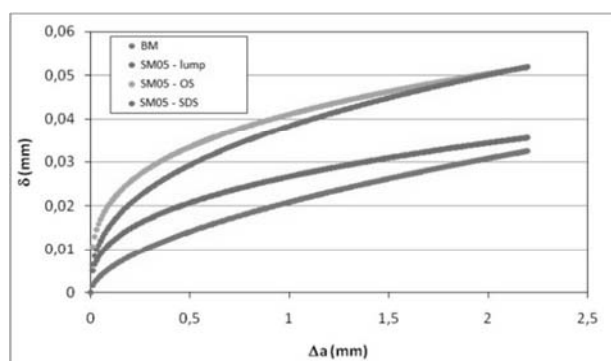


Figure 7. Resistance curves $J-\Delta a$ for experimental point ET 05 (nugget zone LZ, SDS same direction side, OS opposite side, BM-base material)

Slika 7. Krive otpornosti $J-\Delta a$ za eksperimentalnu tačku ET 05 (zona grudve LZ, SDS ista strana, OS suprotna strana, BM-osnovni materijal)

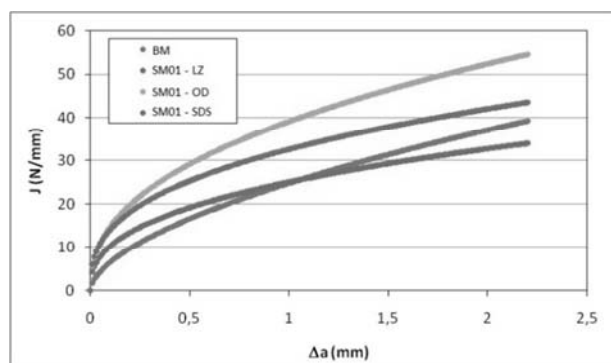


Figure 8. Resistance curves $\delta - \Delta a$ for experimental point ET 05 (nugget zone (lump), SDS same direction side, BM - base material)

Slika 8. Krive otpornosti $d - \Delta a$ za eksperimentalnu tačku ET 05 (zona grudve (komora), SDS ista strana BM-osnovni materijal)

As an engineering critical value taken is the value at the intersection of the parallel at crack growth of 0.2 mm and resistance curves $J_{IC} - \Delta a$ and $\delta - \Delta a$. That is actually fracture toughness of WM and BM for experimental point ET 05 of which a graph is given in Figure 9 where by comparative analysis of measured values of K_{JIC} in the TMAZ and BM relevant conclusions can be made.

Kao inženjerska kritična vrednost uzeta je vrednost na ukrštanju paralelno rastu prslinea od 0,2mm i krivama otpornosti $J_{IC} - \Delta a$ i $d - \Delta a$. To je stvarna udarna žilavost WM i BM za eksperimentalnu tačku ET 05 za koju je grafikon prikazan na slici 9, gde se, komparativnom analizom izmerenih vrednosti K_{JIC} , mogu izvesti relevantni zaključci za TMAZ i BM.

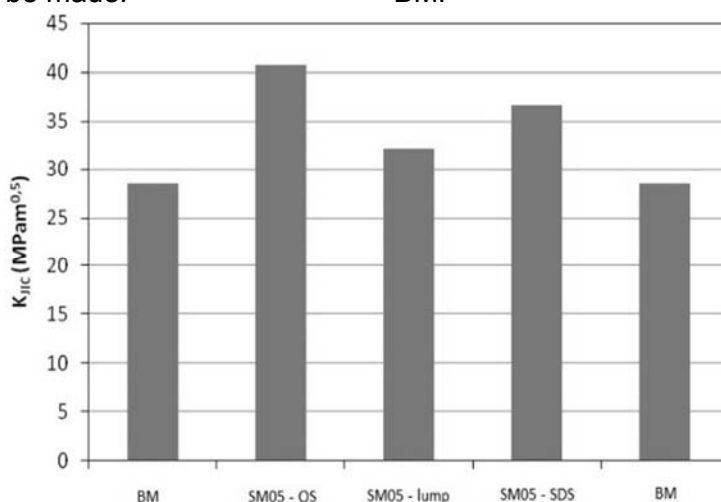


Figure 9. Fracture toughness in the experimental point ET 05 (lump-lump zone, SDS - same direction side, OS - opposite side, BM-base material)

Slika 9. Udarna žilavost u eksperimentalnoj tački ET 05 (zona grumen-grumen, SDS - isti smer, OS-suprotna strana, BM-osnovni materijal)

4. Discussion of the results and conclusions

Examination of the parameters of elastic-plastic fracture mechanics of BM and WM of FSW welded forgings of alloy EN AW 7049A T652 determines the fracture toughness K_{JIC} as their level of sensitivity to the presence of a fatigue sharp pre-crack. It was proven that the highest fracture toughness is at the (RS) – retreating side of the WM, then the (AS) – advancing side and then at the WM core i.e. NZ. The lowest value of fracture toughness K_{JIC} has the BM in the ET 05, even 42% less than the K_{JIC} of the retrieving side of WM. These results correspond with the microstructural transformations on WM side where, due to the left

4. Diskusija rezultata i zaključci

Ispitivanje parametara elasto plastične mehanike loma BM i WM od FSW zavarenih odlivaka od legure EN AW 7049A T652 određuje žilavost loma K_{JIC} kao njihov nivo osetljivosti na prisustvo oštre predprsline. Dokazano je da je najveća žilavost loma na (RS) – uvučenoj strani WM, a zatim (AS) – napredovaloj strani, a zatim i na jezgru WM tj. NZ. Najmanju vrednost žilavosti loma K_{JIC} ima BM u ET 05, čak 42% manje od K_{JIC} uvučene strane WM-a. Ovi rezultati odgovaraju mikrostrukturnim transformacijama na strani WM, gdje se, zahvaljujući levom namotaju na klinu alata, omekšali materijal gurne sa vrha do oboda. Ovo je



coil on the tool pin the softened material is pushed from the tip to the shoulder. This is due to the simultaneous influence of the primary and secondary phases of material flow. This particle torque allows the transfer of mass to take place at the back leveling edge with elements of retreating to the front side of the overlapping tool edge, which leads to dynamic recrystallization as a result of the simultaneous plastic deformation from the tool action and friction generated heat. This is actually the result of thermo-mechanical processing which is dominant in this welding process.

Acknowledgement

Authors gratefully acknowledge different projects on financial support. MR acknowledges support from NATO SPS G4738 project, as well other co-authors from NATO countries. MR and KG acknowledge support from project ON174004.

References

- [1] Song, M., Kovačević, R., Numerical and Experimental Study of the Heat Transfer Process in Friction Stir Welding, *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 217-1, pp. 73-85, 2003.
- [2] Reynolds, A.P., Lockwood, W.D., Seidel, T.U., Processing property correlation in friction stir welds, *Materials Science Forum*, Vol. 331-3, pp. 1719-1724, 2000.
- [3] Veljić, D., Rakin, M. Perović, M., Medjo, B., Radaković, Z., Todorović, P., Pavišić, M., Heat generation during plunge stage in friction stir welding, *Thermal Science*, Vol. 17, pp. 489-496, 2013.

posledica istovremenog uticaja primarne i sekundarne faze protoka materijala. Ovaj obrtni moment čestice omogućava prenos mase na zadnju ivicu sa elementima povlačenja na prednju stranu preklapajuće ivice alata, što dovodi do dinamične rekristalizacije koja je rezultat istovremene plastične deformacije usled dejstva alata i stvaranja toplote usled trenja. Ovo je zapravo rezultat termo-mehaničke obrade koja je dominantna u ovom procesu zavarivanja

Zahvalnost

Autori zahvaljuju različitim projektima na finansijskoj podršci. MR zahvaljuje na podršci iz projekta NATO SPS G4738, kao i drugim koautorima iz zemalja NATO-a. MR i KG zahvaljuju na podršci iz projekta ON174004.

- [4] Zhang, H. W., Zhang, Z., Numerical Modeling of Friction Stir Welding Process by Using Rate dependent Constitutive Model, *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 23-1, pp. 73-80, 2007.
- [5] Technical Documentation, KAT, Titograd, 1984. (in Serbian)
- [6] Perović M., Todorović P., Jevtović M.: Experimental analysis of dynamical behaviour during friction stir welding, *Welding and welding structures*, No.2, pp.53-59, Beograd, 2014.
- [7] ASTM E 1820-Fracture Mechanics experimental test, Pisa, June 15-Jul 14, 2015.
- [8] Zavratnik B.: Determination of resistance to fracture of 7049 A aluminium alloy, M.Sc Thesis, University of Maribor, 2016. (in Slovenian)



Učesnici radionice / Workshop participants



U četvrtak, 11. oktobra 2018. na ceremoniji otvaranja prisutnima su se obratili Vencislav Grabulov, predsedavajući Kongresa i Branislav Lukić, predsednik DUZS, a Kongres je zvanično otvorio Viktor Nedović, Državni sekretar u Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije i Douglas R. Luciani, Predsednik Međunarodnog instituta za zavarivanje (IIW).

On October 11th 2018 the welcoming address was presented by Congress Chairmain Vencislav Grabulov and President of Serbian Welding Society Branislav Lukic and the Congress was officially opened by Viktor Nedovic, State Secretary in the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia and Douglas R. Luciani, President of the International Institute of Welding (IIW).

Otvaranje kongresa / Congress opening ceremony

Viktor Nedović, Državni sekretar u Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije / State Secretary in the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia

Douglas R. Luciani, Predsednik Međunarodnog instituta za zavarivanje (IIW) / President of the International Institute of Welding (IIW)



Vencislav Grabulov, predsedavajući Kongresa/, Congress Chairmain; Chris Eady, Predsednik/President EWF-a; Douglas R. Luciani, Predsednik/President IIW-a; Branislav Lukić, Predsednik/President DUZS





U skladu sa tradicijom, usledilo je "Jaeger Lecture" predavanje – uvodno predavanje kojim se uvek otvaraju IIW regionalni kongresi, sa temom "*Safe Welding Construction - Structural Integrity approach*" koje je održao profesor Aleksandar Sedmak, Mašinski fakultet Beograd.

Profesor Aleksandar Sedmak,
Mašinski fakultet Beograd / Faculty of Mechanical Engineering Belgrade



Naučni program Kongresa pod nazivom "*Visokokvalitetno zavarivanje za sigurne konstrukcije*" obuhvatao je glavne teme:

- Visokokvalitetno zavarivanje
- Integritet i životni vek zavarenih spojeva i konstrukcija
- Zavarivanje cevi
- Obrazovanje, kvalifikacija, sertifikacija osoblja

U okviru Kongresa je održano i redovno Savetovanje "*ZAVARIVANJE 2018*" koje se tradicionalno organizuje jednom u dve godine u Srbiji.

Najeminentniji stručnjaci, ne samo iz regiona već i sa evropske i međunarodne scene, stručnjaci iz industrije, akademskih i istraživačkih oblasti iskoristili su priliku za razmenu informacija o aktuelnim regionalnim i globalnim temama. Prikazana su najnovija istraživanja, a kvalitet radova je bio na visokom nivou.

Program je obogaćen komercijalnom izložbom - "*Međunarodni sajam zavarivanja i srodnih postupaka*" koji je okupio najvažnije kompanije iz regiona koje se bave zavarivanjem, proizvođače opreme i materijala za zavarivanje i IBR, kao i njihove zastupnike. Većina je iskoristila priliku da predstavi svoje proizvode i dostignuća.

Veoma cenimo doprinos naših sponzora, donatora i izlagača: Proficut, Lincoln Electric, Messer, Var Sistem, Honex, Elimp, Neminik, ICI, 3M, Galeb System, Mosa, Kontrol Inspekt, Durum, Kon Mat, GSI SLV, Panasonic, Fin Import, Trokut test. Organizacija ovakvog događaja ne bi bila moguća bez njihove podrške.

According to tradition, the Jaeger Lecture followed – "*Safe Welding Construction - Structural Integrity approach*", presented by Aleksandar Sedmak, Faculty of Mechanical Engineering Belgrade, Serbia.



The scientific program of the Congress with the theme "*Safe Welded Construction by High Quality Welding*" included main topics:

- High Quality Welding
- Structural Integrity and Life of Welded Joints/Structures
- Welding of pipelines
- Education, qualification, certification of personal

The *Conference WELDING 2018*, traditionally organized once in two years in Serbia, was held in conjunction with the Congress.

Most important experts, not only from the region but from the European and international scene, specialists from the industry, academic and research fields used the opportunity to exchange information on current regional and global topics. The latest researches were presented and the quality of papers was at high level.

The program was enriched by a commercial exhibition – "*International Fair of Welding and allied processes*" that gathered most important regional companies in the field of welding and related areas. Most of them used the opportunity to present their products and achievements.

We appreciate the contribution to the event of our sponsors, donors and exhibitors: Proficut, Lincoln Electric, Messer, Var Sistem, Honex, Elimp, Neminik, ICI, 3M, Galeb System, Mosa, Kontrol Inspekt, Durum, Kon Mat, GSI SLV, Panasonic, Fin Import, Trokut test. The organization of such an event would not have been possible without their support.



Želimo da se zahvalimo Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije za podršku, Međunarodnom institutu za zavarivanje (IIW), Evropskoj federaciji za zavarivanje, spajanje i rezanje (EWF), Bugarskom zavarivačkom društvu - BWS, Rumunskom zavarivačkom društvu - ASR, ISIM-u i svim autorima i govornicima koji su doprineli naučnom delu programa, kao i Organizacionom odboru, predsedavajućima, sponzorima, izlagačima i svim učesnicima konferencije.

Učesnici su takođe uživali u različitim društvenim aktivnostima tokom Kongresa

We would like to thank Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia for their support, International Institute of Welding, European Federation for Welding, Joining and Cutting, Bulgarian Welding Society - BWS, Romanian Welding Society – ASR, ISIM and all the authors and speakers who have contributed to the scientific programme and also to the organizing committee, chairpersons, sponsors, exhibitors and all the conference participants.

Participants were also enjoying different social activities during Congress.

Beograd sa reka – noćno krstarenje Dunavom i Savom /
Belgrade from the rivers – night cruise on the Danube and Sava



Poseta Sremskim Karlovcima / Visiting Sremski Karlovci



Za više informacija o događaju posetite veb stranicu konferencije:
www.seeiiw2018.duzs.org.rs

Fotografije sa Kongresa možete preuzeti na:
<http://seeiiw2018.duzs.org.rs/download/>.

For more information about the event please visit the conference web site:
www.seeiiw2018.duzs.org.rs.

Congress photographs are available at:
<http://seeiiw2018.duzs.org.rs/download/>.



Miroslav S. Milićević* 1

DOPUNA 3D ROZENTALOVIH JEDNAČINA RADI OPTIMIZACIJE VEZE IZMEĐU KRITIČNOG VREMENA HLAĐENJA I TEMPERATURE PREGREVANJA KOD ELEKTROLUČNOG ZAVARIVANJA

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK / UDC: 621.791.753

Rad primljen / Paper received:

Novembar 2018.

Ključne reči: temperatura predgrevanja, vreme hlađenja, zavarivanje, toplota

Adresa autora / Author's address:

¹ Prof. Dr, Univerzitet u Beogradu, Visoka tehnička škola, Beograd

*Korespondentni autor; E-mail: milicevic.miroslav@mts.rs

Key words: preheating temperature, cooling time, welding, heat

Rezime

Ovde se predstavlja poboljšanje izračunavanja veličina kod elektrolučnog zavarivanja, kao što su temperatura predgrevanja i kritičnog vremena hlađenja $t_{8/5}$. Ova istraživanja su rezultirala studiranjem teorije termike kod elektrolučnog zavarivanja i praktičnim radom, nakon čega su pronađeni načini da se rešavanje navedenih problema omogućava uvođenjem novih grafičkih i analitičkih zavisnosti. Provera navedenih rešenja je obavljena numeričkim primerima.

1. Uvod

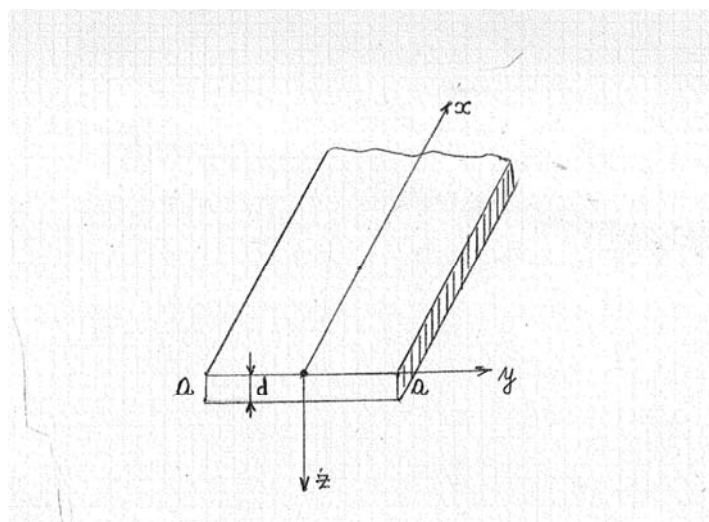
Rad se bazira na proučenoj relevantnoj literaturi [1-17]. U ovoj oblasti postoje radovi koji su bazni i oni su prezentovani u literaturi [18-22]. Ovu teoriju primenjuju radovi autora ovog rada [23-27] publikovani višedecenijskim teoretskim i primenjenim istraživanjima na polju zavarivanja.

Abstract

Here is an improvement in the calculation of the sizes for arc welding, such as preheating temperature and critical cooling time $t_{8/5}$. These studies resulted in the study of thermodynamic theory in arc welding and practical work, after which ways were found to solve these problems by introducing new graphic and analytical dependencies. Checking the above solutions is done numerically.

Glavne veličine su određene izračunavanjem potrebne snage za zavarivanje određenog čeličnog proizvoda, određenom brzinom zavarivanja.

Kod elektrolučnog zavarivanja, gde su na sl.1 prikazane dve čelične ploče koje se zavaruju, uspostaviće se model radi definisanja temperaturnog polja u ploči debljine d i širine D .



SI.1. Detalj dveju čeličnih ploča koje se zavaruju



U ploči temperatura T je po debljini približno ujednačena i nezavisna od ose z , te je $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$.

Uz pretpostavku da je muđudejstvo površina toplotno provodnog tela u odnosu na okolinu adijabatsko, stoga toplotni fluks kroz granicu izostaje

$$Q_n = 0 \text{ i } \frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad (1)$$

n je normala na površinu a .

Obe strane metalne ploče se smatraju adijabatskim jer je

$$\frac{\alpha}{\lambda} \rightarrow 0 \quad (2)$$

gde je α koeficijent prelaza toplote i λ koeficijent toplotne provodnosti. Zavarivanje ide duž ose x , te se izvor smatra pokretnim. Izvor toplote je element zapremine tela preseka $dx dy$ i visine d kao debljine. To se temperaturno polje linijskog izvora može dobiti primenom principa slaganja, što posle integracije elemenata priraštaja temperature po [18,19] je

$$T(t) = \int_0^t dT(t) \quad (3)$$

gde je t interval vremena u kome deluje izvor toplote a t' je proizvoljan moment vremena. Distribucija temperature u ploči koja se zavaruje može se opisati Furijeovom jednačinom

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (4)$$

gde je $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ - koeficijent temperaturne provodnosti, c - specifična toplota i γ specifična težina.

Koristeći iskustva iz [20,21] rešenje Furijeove jednačine se svodi na

$$T(r, x) = \frac{q}{2\pi\lambda d} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) K_0 \left[r \left(\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a} \right)^{0,5} \right] \quad (5)$$

gde je K_0 modifikovana Beselova funkcija II vrste i nultog reda.

Nakon razvijanja jednačine (5) za 3D Rozentalov model dobija se jednačina (6) koja definiše vezu kritičnog vremena hlađenja i temperature predgrevanja. Izrazom (1) je prikazana formula za izračunavanje, odnosno uspostavljanje relacije, sa temperaturom predgrevanja za 3D model zavarivanja. Zbog odstupanja u izračunavanju pronađen je izraz (7) od strane British Standard [32] koji je tačniji

$$t_{8,5} = \frac{Q}{2\pi\lambda} \left[\frac{1}{500 - T_p} - \frac{1}{800 - T_p} \right] \quad (6)$$

$$t_{8,5} = (6700 - 5T_p) \times Q \times \left[\frac{1}{500 - T_p} - \frac{1}{800 - T_p} \right], \quad (7)$$

gde su d debljina ploča koje se zavaruju, Q uneta toplota, T_p temperatura predgrevanja i $t_{8/5}$ vreme hlađenja između temperatura 800°C i 500°C .

Jednačina (6) razvijena kod elektrolučnog zavarivanja nije u praksi davala najtačnije rezultate te je stoga urađena približnija formula za 3D model, usvojena prema standardu EN 1102-2, prikazana relacijom (7). Promenljive imaju dimenzije

λ - termička provodnost u $[\text{Js}^{-1}\text{m}^{-1}\text{C}^{-1}]$ i c specifična toplota u $[\text{Jkg}^{-1}\text{C}^{-1}]$.

Zna se da je $Q = \frac{q}{v}$, gde je q kod elektrolučnog zavarivanja = $UI\eta$, U je napon zavarivanja u $[\text{V}]$ a I jačina struje kod elektrolučnog zavarivanja u $[\text{A}]$ i η koeficijent iskoriscenja pri zavarivanju, zavistan od vrste zavarivanja. Q je ulazna količina toplote za određenu brzinu u $[\text{kJ/mm}]$.

2. Proračun kritičnog vremena hlađenja $t_{8/5}$ za 3D model zavarivanja

Za ovo izračunavanje ćemo jednačinu (7) predstaviti u obliku

$$\frac{t_{8,5}}{Q} = (6700 - 5T_p) \left[\frac{1}{500 - T_p} - \frac{1}{800 - T_p} \right] \quad (8)$$

Desna strana jednačine (8) je zavisna samo od temperature T_p , te možemo vrednosti predstaviti na apscisnoj osi a leva strana iste jednačine na ordinatnoj osi. Tako za 3D model se može naći rešenje za vreme hlađenja i temperaturu predgrevanja u obliku grafičkom i analitičkom.

2.1 Grafičko rešenje za 3D model prezentacije kod elektrolučnog zavarivanja

Uradimo grafik funkcije predstavljene relacijom (8) tako da se leva strana jednačine nanosi na ordinatnu osu a desna na apscisnu osu. Grafik je dat na slici 2.

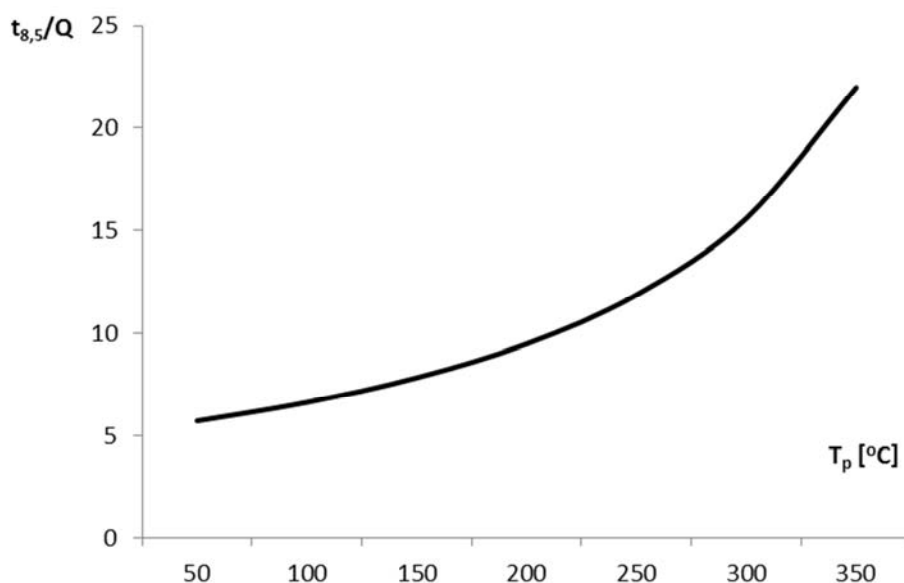
Primer 2: Ako je vrednost vremena hlađenja 20 [s] i količina unete toplote 1,5 [kJ/mm], naći temperaturu predgrevanja.

Nalaženjem odnosa $t_{8,5}/Q$ dobija se vrednost 13,33, onda se povlači sa ordinatne ose prava sa tom vrednošću sve do grafika na sl.2, a od presečne tačke spušta do apscisne ose. U konkretnom



slučaju se dobija vrednost za temperaturu predgrevanja u iznosu od 235 [°C]. Moguć je i obrnut slučaj kada se zna vrednost temperature

predgrevanja kod elektrolučnog zavarivanja da se pronađe kritično vreme hlađenja $t_{8/5}$.



SI.2. Grafička zavisnost za izračunavanje veličina kod elektrolučnog zavarivanja kod 3D modela

2.2 Analitičko nalaženje vrednosti veličina Kod elektrolučnog zavarivanja 3D modela

Uvedimo smenu oblika

$$C_1 = \frac{t_{8,5}}{Q} \quad (9)$$

tako da će jednačina (8) se transformisati u

$$C_1[(500 - T_p)(800 - T_p)] = 300(6700 - 5T_p) \quad (10)$$

Ovde, kod ove vrste zavarivanja nećemo rešavati putem aproksimacije zato što se prethodna jednačina svodi na kvadratnu jednačinu. Na taj način možemo naći tačno rešenje, te uvodimo još jednu smenu oblika

$$C_2 = \frac{Q}{t_{8,5}} \quad (11)$$

Svođenjem jednačina (9), (10) i (11) dobija se kvadratna jednačina čije je rešenje oblika

$$T_{p1/2} = 10^3 [0,75C_2 - 0,65 \pm [(1,5C_2 - 1,3)^2 - 0,4(4 - 20,1C_2)]^{0,5}] \quad (12)$$

Ovim je prikazano analitičko i grafičko rešavanje relevantnih veličina 3D modela kod elektrolučnog zavarivanja, što omogućava istraživačima i teoretičarima iz oblasti termike da lakše i brže proračunavaju veličine radi optimizacije zavarivanja.

3. Diskusija i prikaz rezultata u odnosu na postojeća rešenja

Za izračunavanje temperature predgrevanja T_p i vremena hlađenja $t_{8/5}$ postoje dve grupe rešenja i to

2D i 3D model. Koji će se model uzimati u obzir kod izračunavanja ispitivače se vrednost kritične debljine koja se izračunava po formuli (13). Kada je debljina trake koja se zavaruje u postupku elektrolučnog zavarivanja veća od vrednosti d_{gr} iz (13) onda će se primenjivati 3D model za koji važe formule (6) i (7). U suprotnom se primenjuju formule za 2D model izračunavanja koje nisu predmet analize u ovom radu. U nekoj literaturi se ove formule nazivaju Rozentalovim i one su usvojene u standardu EN 1102-2.

Izračunavanje po ovim formulama stvara velike probleme jer se po samom izgledu formula, vidi da je temperatura predgrevanja nezavisno promenljiva i kao takva bi trebalo da se unapred zna. To je nemoguće jer se za svaku vrstu čelika mora unapred znati određena vrednost za kritično vreme hlađenja a po literaturi [15], se podrazumeva čak i predistorija proizvodnje čelika. Znači, vreme $t_{8/5}$ je ono vreme kada se temperatura zavarivanja od tačke zavarivanja smanjuje od 800 °C do 500 °C. U radovima [28, 31] se primenjuje indirektno procenjivanje putem simulacija, negde uzimaju podaci sa eksperimenta, odnosno unapred se zadaje temperatura predgrevanja i izračunava vreme hlađenja. To ne stvara mogućnost posedovanja stalnog algoritma određivanja ovih ključnih dveju ključnih veličina, veoma bitnih za kvalitet zavarivanja finalnih proizvoda.

$$d_{gr} = \left[\frac{Q}{\rho c} \left(\frac{1}{500 - T_p} \right) + \left(\frac{1}{800 - T_p} \right) \right]^{0,5} \quad (13)$$



Zato je istraživanjem u ovom radu se došlo na ideju da se prekomponuju jednačine (6) i (7), tako da će imati oblik (8) i (12). Takvim jednačinama je omogućeno grafičko predstavljanje odakle se na osnovu poznatih ulaznih veličina zavarivanja izračunava nepoznata kao što su temperatura predgrevanja ili vreme hlađenja. Takav način estimacije pruža mogućnost primene i u teoriji i u praksi na posve jednostavan način. Numerički rezultati iz ovog rada su upoređeni sa nekim primerima iz radova [29-30], čime je pored originalnosti i jednostavnosti izračunavanja utvrđena verodostojnost i tačnost rezultata autora ovog rada. Istraživanjem je utvrđeno da rezultati u radu [31] za sve primere znatno odstupaju u odnosu na egzaktno rezultate. Primenom algoritma iz ovog rada se izbegavaju pogreške i stvara uslov da se projektuje zavarivanje sa kontrolnim kvalitetom.

4. Zaključak

U radu se nakon analiziranih problema u teoriji i praksi izračunavanja temperature predgrevanja i

5. Popis oznaka

d	debljina zavarivanja, [mm]
Q	količina unete toplote, [kJ/mm]
T_p	temperatura predgrevanja, [°C]
$t_{8/5}$	kritično vreme hlađenja, [s]
v	brzina zavarivanja, [mm/s]
U	napon luka, [V]
I	jačina struje zavarivanja, [A]
λ	termička provodnost, [$\text{Jkg}^{-1} \text{°C}^{-1}$]
ρ	specifična težina, [kgm^{-3}]
c	specifična toplota, [$\text{Jkg}^{-1} \text{°C}^{-1}$]
η	koeficijent iskorišćenja

LITERATURA

1. Simpson P.G., *Induction Heating - Coil and System Design*, Mc Graw Hill, New York, USA, p.304, 1960
2. *Welding Handbook*, Vol. 3, 7th ed., American Welding Society, Miami, FL, 1980, pp. 170–238.
3. Mendez, P. F., and Eagar, T. W., *Advanced Materials and Processes*, 159: 39, 2001.
4. *Welding Handbook*, Vol. 1, 7th ed., American Welding Society, Miami, FL, 1976, pp. 2–32.
5. *Welding Workbook*, Data Sheet 212a, *Weld. J.*, 77: 65, 1998.
6. *Welding Handbook*, Vol. 2, 7th ed., American Welding Society, Miami, FL, 1978, pp. 78–112, 296–330.
7. Lyttle, K. A., in *ASM Handbook*, Vol. 6, ASM International, Materials Park, OH, 1993, p. 64.
8. Schwartz, M. M., *Metals Joining Manual*, McGraw-Hill, New York, pp. 2–1 to 3–40., 1979
9. Lesnewich, A., in *Weldability of Steels*, 3rd ed., Eds. R. D. Stout and W. D. Doty,
10. *Welding Handbook*, Ninth Edition, Volume 4, *Materials and Applications, Part 1*, American Welding Society, Annette O'Brien - Editor, Miami, FL, USA, p.860, 2011
11. Sindo Kou, *Welding Metallurgy*, Second Edition, Wiley-Interscience, Hoboken, New Jersey, USA, p.466, 2003



12. D. Gulaev: *Improvements of production technologies and quality of electrically welded tubes*, (Kiev, Tehnika) p.p. 4-116, 1984
13. Choong/Mzeoung Kim, POSCO, Zong-Seong Kim, Hong Ik University; Korea, *Tube and Pipe Technology*, January/February, (2001)
14. Suzuki S., Takamme T., " The Formation Mechanism of White Line Welded Joints of ERW Steel Pipes", *Tetsu to Hagane*, Vol.40, No 10,(1984) p.p.153-159
15. H. Schuman: *Metallography*, Leipzig, VEB Deutcher Verlag fur Grunstoffindustrie (1989)
16. Gaultois M.W., Ph.D. thesis, Design Principles for Oxide Thermoelectric Materials, University of California, Santa Barbara, USA, 2015
17. Hyungsuk K., Ph.D. Thesis, Magnetoelectric Effect and Magnetodielectric Effect in Magnetic Nanoparticles, University of California, Los Angeles, USA
18. Rosenthal, D., *Weld. J.*, 20: 220s, 1941.
19. Rykalin, N.N., *Calculation of Heat Flow in Welding*, Trans. Z. Paley and C. M. Adams, Jr., Document 212-350-74, 1974, International Institute of Welding,
20. Rykalin, N. N., Nikolaev, A. V. Welding Kod elektrolučnog Heat Flow. // *Welding in the World*, 9, 3/4(1971), pp.112-132.
21. Rosenthal, D. The Theory of Moving Source of Heat and its Application to Metal Transfer. // *Transactions ASME*, 43, 11(1946), pp. 849-866.
22. Christensen B.N., Davies V.D.L., Gjermundsen K., Distribution of temperatures in kod elektrolučnog welding, *British Welding Journal*, February (1965), p.p. 54 to 75
23. Milićević M., The Application of a New Formula of Nakaoka Coefficient in HF Inductive Welding, *Journal of Mechanical Engineering* 56 (2010), 7-8, p.p. 483-488
24. Milićević, M., Stoiljković, I., Jovanović, T., Nejković, V., Opis nedostataka feritnog koncentratora kod visokofrekventnog induktivnog zavarivanja, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, br.3, 2013 god., Beograd
25. Milićević, S.M., Jovanović, M.T., Nejković, M.V., Kako smo izumeli najbolji magnetni koncentrator na svetu za visokofrekventno zavarivanje, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, br.2, 2014 god., Beograd
26. Milićević S.M., Stojanović M.T., Stanković V., Nejković M.V., Computers regulation HF inductive welding, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, br.3, 2015 god., Beograd
27. Milićević S.M., Stojanović M.T., Stanković V., Nejković M.V., Contribution to contact temperature measurement, Welded & welded structures, br.2, 2016, Beograd, pp.63-70
28. Poorhaydari K., Patchett B.M., Ivey D.G., Estimation of Cooling Rate in the Welding of Plates with Intermediate Thickness, *Welding Journal*, October (2006), p.p. 149 to 155
29. Lazic, V. N., et al, Theoretical-Experimental Determining of Cooling Time (T(8/5)) in Hard Facing of Steels for Forging Dies, *Thermal Science*, 14, (2010), 1, pp. 235-246
30. Lazic, V. N., et al.: Numerical Analysis of Temperature Field During Hardfacing... *Thermal Science*: Vol. 18, Suppl. 1, (2014), pp.113-120
31. Meseguer-Valdenebro, J.L. et al.: Calculation of t8/5 by Response Surface... *Thermal Science*: Vol. 18, Suppl. 1, (2014), pp. S149 - S158
32. Standard EN 1011 – 2/2007: Zavarivanje – Preporuke za zavarivanje metalnih materijala – Deo2: Elektrolučno zavarivanje feritnih čelika

Quality is safety Kvalitet je bezbednost

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK / UDC: Rad je izlagan u okviru međunarodne konferencije sa temom "Advanced Welding and Smart Fabrication Technologies for Efficient Manufacturing Processes" u okviru „The 71 IIW Annual Assembly & International Conference“, July 2018 | Bali, Indonesia

Rad primljen / Paper received:

Novembar 2018.

Key words: Weld quality management, catastrophic failure, engineering, ethics, design, inspection

Abstract

Welding alters the engineered properties of a material, affecting irrevocable changes to the metallurgical structure and mechanical characteristics due to the addition of energy, to combine two materials into one. As a fabrication process, this method has been used since the early part of the 20th century and has become the basic means to construct and build most of the industries required for modern society. Almost since the beginning, in the 1930s, there was the recognition that welding codes or standards were required for higher quality weld metal. This understanding has expanded to include and manage the parent material changes in the heat-affected zone as well. Most codes and standards in use, has been influenced by catastrophic failures and therefore provide minimum requirements to achieve suitable welds that will result in safe service. In addition, the control of weld properties and therefore the integrity of a welded component to function safely, is managed in part by quality control. Weld safety, however, is more than this, and should entail the whole process from design to delivery and is achieved by a systematic weld quality management system, implemented ethically. This paper reviews the influence of some catastrophic weld failures, and aims to show how ethics, weld quality management, and engineering interact to ensure weld safety.

1. Introduction

Welding is defined in many places, and in the Australian Standards it is described as a "joint in material, produced by means of heat or pressure, or both, in such a way that there is continuity in the nature of the metal between these parts." [1].

It encompasses a range of processes developed over the last century that have been commercially used since the early 1900s [2].

Adresa autora / Author's adresse :

¹ Weld Australia, 20 Bridge Street, Pymble NSW 2073, Australia

^a l.petrick@weldaustralia.com.au

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

Ključne reči: menadžment kvalitetom zavarivanja, katastrofalni nedostatak, inženjering, etika, projekat, inspekcija

Rezime

Zavarivanje menja inženjerske osobine materijala, koje utiču na neopozive promene metalurške strukture i mehaničkih karakteristika usled unosa energije, radi kombinovanja dva materijala u jedan. Kao proces izrade, ova metoda je korišćena od početka 20. veka i postala je osnovno sredstvo za konstruisanje i izradu u većini industrija neophodnih za savremeno društvo. Skoro od početka, 1930-ih, uočeno je da su pravila ili standardi za zavarivanje, potrebni za kvalitetniji metal šava. Ovo shvatanje je dalje prošireno tako da uključuje i upravlja promenama osnovnog materijala u zoni uticaja toplote. Na većinu pravila i standarda u upotrebi uticali su katastrofalni propusti i stoga obezbeđuju minimalne zahteve za postizanje odgovarajućih zavarenih spojeva koji će rezultovati sigurnim radom. Pored toga, kontrola karakteristika zavarivanja i samim tim i integriteta zavarene komponente radi bezbednog rada, delimično se upravlja kontrolom kvaliteta. Bezbednost zavarivanja, međutim, je više od ovoga i trebalo bi da obuhvati čitav proces od projekta do isporuke i postiže se sistematičnim menadžmentom kvalitetom zavarivanja, koji se etički primenjuje. U radu se analizira uticaj nekih katastrofalnih propusta zavarivanja i ima za cilj da pokaže kako etika, menadžment kvalitetom zavarivanja i inženjering zajednički deluju na obezbeđenje bezbednog zavarivanja.

1. Uvod

Zavarivanje je definisano na mnogim mestima, u australijskim standardima opisano je kao "spoj u materijalu, proizveden toplotom ili pritiskom, ili oba, na takav način da postoji kontinuitet u prirodi metala između tih delova." [1].

Ono obuhvata niz procesa razvijenih tokom prošlog veka koji su komercijalno korišćeni od početka 1900-ih godina [2].

While its usefulness and versatility has been the foundation for many technological advances, the application of pressure or heat to achieve coalescence changes the engineered structure of the parent materials. Therefore, it may be a high risk process that requires careful management, since it can affect the safety of the component or structure it is applied to.

When selecting the appropriate weld quality management requirements, the application requirements determine the design code or standard, which sets materials, fabrication and inspection specifics to economically and safely deliver the required technology or product.

The role of the engineer is to respond to a perceived need by building or creating something to a set of guidelines (the relevant design code or standard) that performs a certain function [3]. It is imperative that the device, system, or component should perform its function without failure. However, since everything must eventually fail in some way, this means that a desired level of performance is needed. Therefore, it is the responsibility of the engineer to design in such a way as to avoid catastrophic failure that could result in the loss of property, damage to the environment and injury or loss of life [3].

A traditional design methodology is shown in Figure 1.

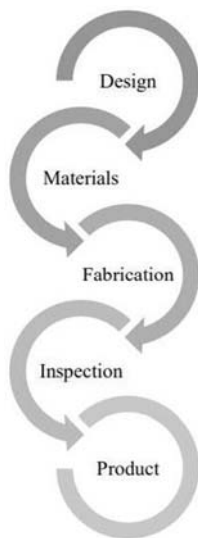


Figure 1. Common conceptual model from design to product [5]

Slika 1. Uobičajeni konceptualni model od projekta do proizvoda [5]

Here, the design usually provides input about dimensions and materials, but seldom welding process. When referring to a standard or code, the reference is mostly general and many aspects are left to the fabrication and inspection function to make engineering decisions.

This may lead to decisions being made during fabrication and inspection that ultimately affect the sought level of performance of the components or

lako je njegova korisnost i svestranost bila temelj mnogih tehnoloških napredaka, primena pritiska ili toplote za postizanje koalescentnih promena strukture osnovnih materijala. Stoga, to može biti proces visokog rizika koji zahteva brižljiv menadžment, jer utiče na bezbednost komponente ili konstrukcije na kojoj se primjenjuje.

Prilikom izbora odgovarajućih zahteva za menadžment kvalitetom zavarivanja, zahtevi primene određuju pravilo ili standard pri projektovanju, koji podešava materijale, izradu i specifične inspekcije kako bi se ekonomično i bezbedno isporučila potrebna tehnologija ili proizvod.

Uloga inženjera je da odgovori na uočene potrebe za izgradnjom ili kreiranjem niza smernica (odgovarajuće projektno pravilo ili standard) koji obavlja određenu funkciju [3]. Neophodno je da uređaj, sistem ili komponenta izvrše svoju funkciju bez nedostataka. Međutim, s obzirom da sve eventualno može da propadne na neki način, to znači da je potreban željeni nivo osobina. Zbog toga, inženjer je odgovoran da projektuje na način kojim bi se izbegao kritični otkaz koji bi mogao dovesti do gubitka imovine, oštećenja životne sredine i povređivanja ljudi ili gubitka života [3].

Tradicionalna metodologija projektovanja prikazana je na slici 1.

Ovde, projekat obično nudi ulazne podatke o dimenzijama i materijalima, ali retko postupak zavarivanja. Kada se govori o standardu ili pravilu, referenca je uglavnom opšta, a mnogi aspekti su prepušteni izradi i inspekcijskoj funkciji za donošenje inženjerskih odluka.

Ovo može dovesti do donošenja odluka prilikom izrade i inspekcije koje na kraju utiču na traženi nivo performansi komponenti ili konstrukcija, što će,

structures, which, as some of the case studies presented will show, resulted in catastrophic failure. Analyses done on catastrophic failures have identified factors, flaws and failures in engineering that resulted in these events [3].

While the design and therefore engineering practices have fundamental influences on the safety and performance of components and structures, during fabrication the safe application of welding relies heavily on many disciplines, including welding inspection.

The role of the welding inspector is also examined, and illustrated by looking at the consequences of poor inspection ethics and the importance of accurate inspection data.

This article aims to show how an integrated weld quality management process is required to prevent catastrophic failures and achieve safe welds, from design to inspection during fabrication, as well as in-service inspection during maintenance activities.

2. Quality Management

6.1. Why quality management is required for welding

The old expression: "Horses for courses" has been used to describe the fact that not all welding operations require the same level of intervention or management to achieve a safe outcome [13]. There are significantly different requirements for a basic weld to hold a small bracket in place to the complex requirements of a system under high temperature and pressure, where the catastrophic failure of the weld could allow the uncontrolled release of energy, i.e. explosion.

Since welding fundamentally changes the carefully engineered properties of the material when it is welded, the application determines the safety level needed, which will determine the applicable risk reduction to be implemented that therefore influences the quality requirements, as shown in Figure 2. And many times at this part of the discussion, the question of cost is raised, and usually in terms of the cost of implementing quality management.

But the pertinent discussion should not just be about the cost of quality management, but rather the cost of catastrophic failure. This is the true cost to benefit analysis that is indispensable for the safe application of welding.

6.2. Quality management historically

But is quality management a new phenomenon, a modern day buzz word, excessively used? The fact is that quality management has been around for centuries, and can be traced back to the Middle Ages [4] where a master craftsman inspected work completed by apprentices and journeyman before

kako će pokazati neke od studija slučaja, dovesti do kritičnog otkaza. Analize koje su sprovedene na kritičnim otkazima identifikovale su faktore, greške i propuste u inženjeringu koje su rezultovale ovim događajima [3].

Iako projektne i stoga inženjerske prakse imaju fundamentalne uticaje na sigurnost i performanse komponenti i konstrukcija, prilikom izrade, sigurna primena zavarivanja se oslanja na mnoge discipline, uključujući inspekciju zavarivanja.

Takođe je ispitana uloga inspektora za zavarivanje i ilustrovana sagledavanjem posledica loše inspekcijske etike i važnosti preciznih podataka inspekcije.

Ovaj članak ima za cilj da pokaže kako je neophodan integralni proces menadžmenta kvalitetom zavarivanja kako bi se sprečili kritični otkazi i postiglo bezbedno zavarivanje, od projekta do inspekcije tokom izrade, kao i inspekcija tokom eksploatacije kao i tokom održavanja.

2. Menadžment kvalitetom

6.1. Zašto je potreban menadžment kvalitetom u zavarivanju

Stari izraz: "različitim ljudima pašu različite stvari" se koristi da opiše činjenicu da za sve operacije zavarivanja nije potreban isti stepen intervenisanja ili upravljanja kako bi se postigao siguran ishod [13]. Postoje značajno različiti zahtevi za osnovni zavareni spoj koji drži mali nosač na mestu prema složenim zahtevima sistema pod visokom temperaturom i pritiskom, gde bi katastrofalni otkaz zavarenog spoja doveo do nekontrolisanog oslobađanja energije, tj. eksplozije.

Pošto zavarivanje fundamentalno menja pažljive konstruktivne osobine materijala kada se zavaruju, primena određuje potrebni nivo sigurnosti, koji će odrediti primenljivo smanjenje rizika koje će se implementirati, što utiče na zahteve kvaliteta, kao što je prikazano na slici 2. I mnogo puta u ovom delu diskusije postavljeno je pitanje troškova, a obično u smislu troškova implementacije menadžmenta kvalitetom.

Ali relevantna diskusija ne bi trebalo da bude samo o troškovima menadžmenta kvalitetom, nego o ceni kritičnog otkaza. Ovo je prava analiza troškova koja je neophodna za bezbednu primenu zavarivanja.

6.2 Menadžment kvalitetom istorijski

Ali da li je menadžment kvalitetom novi fenomen, reč koja se danas previše čuje i koristi?

Činjenica je da je menadžment kvalitetom postojao vekovima, a može se pratiti u srednjem veku [4], gde bi majstor zanatlija obavio inspekciju radova koje su završili šegrti i kalfe pre nego što bi gotove

providing the finished products to clients. This ensured quality standards were met, that the finished products and all the required aspects were suitable for use; and it made certain that the client was satisfied.

proizvode dali klijentima. Ovim je obezbeđeno da su standardi kvaliteta ispunjeni, da su gotovi proizvodi i svi potrebni aspekti bili pogodni za upotrebu; i sigurno je da je klijent bio zadovoljan.



Figure 2. How application determines quality requirements

Slika 2. Kako primena određuje zahteve kvaliteta

During the 1920s, quality management systems, as we know them today, started to emerge, where there the focus still remained on the end product and quality control was determined by final inspections.

This started to change in the 1940s, when companies continued to experience difficulties in following through with quality standards, which precipitated a change with respect to inspections. These were now carried out by production personnel during the fabrication process at specific intervals, thereby preventing problems in the end product through early detection [4]. Therefore, the reduction in defective parts resulting in cost savings, and, possibly, in an increase in safety.

3. Factors, Flaws and failures contributing to catastrophic failure

Catastrophic failure is defined by the Centre for Chemical Process Safety [6] as "A failure which is both sudden and causes termination of one or more fundamental functions". According to the Oxford definition [7], catastrophic is defined as something that causes "sudden great damage or suffering". So, it is a sudden failure where termination of one or more fundamental functions causes great damage or suffering.

Since the aim of engineering is to prevent catastrophic failure when creating new structures or components, or maintaining existing ones, it follows that there could be factors, flaws and failures contributing to the primary causes of engineering disasters [3]. These can be grouped as human factors, design flaws, materials failures (which would include weld failures) or extreme conditions and environments. Often, these occur in combination.

Tokom 1920-ih godina, sistemi menadžmenta kvalitetom, kako ih danas znamo, počeli su da se pojavljuju, gde je fokus i dalje ostao na krajnjem proizvodu, a kontrola kvaliteta određena je završnim inspekcijama.

Ovo je počelo da se menja u četrdesetim godinama, kada su kompanije nastavile da se suočavaju sa poteškoćama u sprovođenju standarda kvaliteta, što je dovelo do promene u pogledu inspekcije. Ovo je sada sprovedeno od strane proizvodnog osoblja tokom procesa proizvodnje u određenim intervalima, čime se sprečavaju problemi u krajnjem proizvodu kroz rano otkrivanje [4]. Zbog toga smanjenje defektnih delova rezultuje uštedom troškova i, eventualno, povećanjem sigurnosti.

3. Faktori, mane i propusti koji doprinose kritičnom otkazu

Kritični otkaz je definisan od strane Centra za bezbednost hemijskih procesa [6] kao "otkaz" koji je iznenađan i uzrokuje prekid jedne ili više osnovnih funkcija". Prema definiciji Oksforda [7], kritično se definiše kao nešto što uzrokuje "iznenađnu veliku štetu ili stradanje". Dakle, iznenađni otkaz je termin za kraj jedne ili više osnovnih funkcija što izaziva veliku štetu ili stradanje.

Pošto je cilj inženjerstva da spreči kritični otkaz pri stvaranju novih konstrukcija ili komponenti ili održavanja postojećih, sledi da bi moglo biti faktora, mana i propusta koji bi doprineli primarnim uzrocima tehničkih katastrofa [3]. One se mogu grupisati kao ljudski faktori, nedostaci u projektu, propusti u materijalima (koji bi uključivali grešku u zavarivanju) ili ekstremne uslove i okruženje. Često se one javljaju u kombinaciji.

Interestingly, it was shown [3] that human factors included both ethical failure and accidents, and it included unethical practices under design flaws, thereby concluding that engineering ethics was found to be one of the root causes of engineering disasters that resulted in catastrophic failure. Therefore, it was proposed that engineers as professionals have a responsibility to clients, employers and the general public to perform their duties in as conscientious a manner as possible. This goes beyond just acting within the bounds of the law [3], and requires avoiding conflict of interest, not misrepresenting knowledge and accepting work outside their area of expertise, while acting in the best interest of society and fulfilling the terms of the contract in a professional manner. In light of this, it is proposed that ethical engineering practice to prevent failure can also be extended not just to fabrication, but welding inspection as well.

4. Case study: Unethical welding inspection

In 2009, a welding inspector at Northrop Grumman's Virginia shipyard in the USA, reported a fellow inspector for signing off on ship welds without inspecting them [8]. The admission of wrong doing by the inspector resulted in a very serious situation, since he was responsible for over 10 000 welds on 8 Virginia class nuclear fast attack submarines and a new nuclear aircraft carrier.

It was also found that 10% of the submarine welds affected joints on critical components and hull integrity. Equally alarming was the inclusion of similar issues at General Dynamic Boat in 2010, at their Rhode Island shipyard. They were a sub-building partner of Northrop Grumman, and this highlighted that the failure of inspection ethics was not an isolated event, which precipitated a costly in-depth review and welding re-inspection program. While the Navy review of Dynamic Boat provided some measure of assurance since it indicated that there was a low probability of improper welds, the additional time and cost to validate safety critical welds added costs that were completely unnecessary.

The question then is what can contribute to unethical welding inspection practices?

5. Importance of accurate weld inspection data

It may be beneficial to conduct a formal industry survey regarding welding inspection expectations, since numerous discussions within Australia with asset managers, fabrication and maintenance companies and welding inspectors highlighted that there may be conflicting requirements affecting inspection practices. During some of these conversations, a "good" welding inspector was seen as someone not finding too many issues and

Interesantno je pokazano [3] da su ljudski faktori uključivali i etički neuspeh i nesreće, a uključivao je i neetičku praksu u projektnim propustima, čime se zaključuje da je inženjerska etika utvrđena kao jedan od osnovnih uzroka inženjerskih katastrofa koji su rezultovali kritičnim otkazima. Zbog toga je predloženo da inženjeri kao stručnjaci imaju odgovornost prema klijentima, poslodavcima i široj javnosti da svoje poslove obave na što savesniji način. Ovo prevazilazi samo delovanje unutar granica zakona [3] i zahteva izbegavanje sukoba interesa, a ne pogrešno predstavljanje znanja i prihvatanje posla izvan njihovog stručnog područja, istovremeno delujući u najboljem interesu društva i ispunjavanju uslova ugovora na profesionalan način. U svetlu ovoga, predlaže se da etička inženjerska praksa za sprečavanje neuspeha proširi ne samo na izradu, već i na zavarivanje.

4. Studija slučaja: neetička inspekcija zavarivanja

Godine 2009, inspektor za zavarivanje u brodogradilištu Northrop Grumman u Virdžiniji u SAD-u prijavio je kolegu inspektora za objavljivanje sa brodograđevinskog zavarivanja bez inspekcije [8]. Pogrešan postupak od strane inspektora doveo je do veoma ozbiljne situacije, pošto je bio odgovoran za više od 10 000 zavarenih spojeva na 8 brzih nuklearnih podmornica Virginia klase i novi nuklearni nosač aviona.

Takođe je utvrđeno da 10% podmorničkih zavarenih spojeva su spojevi koji utiču na kritične komponente i integritet trupa. Podjednako alarmantno je bilo uključivanje sličnih problema na General Dinamic Boat 2010. godine u brodogradilištu u Rhode Islandu. Oni su bili partner za izgradnju Northrop Grummana, i to je naglasilo da neuspeh inspekcije nije bila izolovani događaj, što je dovelo do skupog programa dubinske kontrole i programa za ponovnu inspekciju zavarivanja. Dok je mornarički pregled Dinamičkog broda davao određenu meru sigurnosti, pošto je ukazao na to da je postojala mala verovatnoća nepravilnog zavarivanja, dodatno vreme i troškovi za validaciju sigurnosno kritičnih zavarenih spojeva stvaraju troškove koji su potpuno nepotrebni.

Pitanje je onda šta može doprineti neetičkim postupcima inspekcije zavarivanja?

5. Značaj preciznih podataka o inspekciji zavarenog spoja

Može biti korisno obaviti formalno istraživanje industrije o očekivanjima vezanim za inspekciju zavarivanja, pošto su brojni razgovori u Australiji sa menadžerima sredstava, proizvodnje i održavanja i inspektorima za zavarivanje pokazali da mogu postojati konfliktni zahtevi koji utiču na praksu inspekcije. Tokom nekih od ovih razgovora, "dobar"

inspektor therefore not interrupting production targets or project deadlines negatively.

However, an industry survey done by TWI in 2011 on weld repair rates [9] showed that rates in the Power and Oil and Gas sectors were typically 1 to 3%, but with peaks up to 25% in specific locations with exceptional values up to 55%. Peak repair rates were observed for root runs, fillet welds and areas with limited access. Both these sectors have piping systems, onshore piping and pressure vessels, with the Oil and Gas sector including off-shore structures and pipelines. The factors affecting weld repair rates are shown in Figure 3. The question then is what can contribute to unethical welding inspection practices?

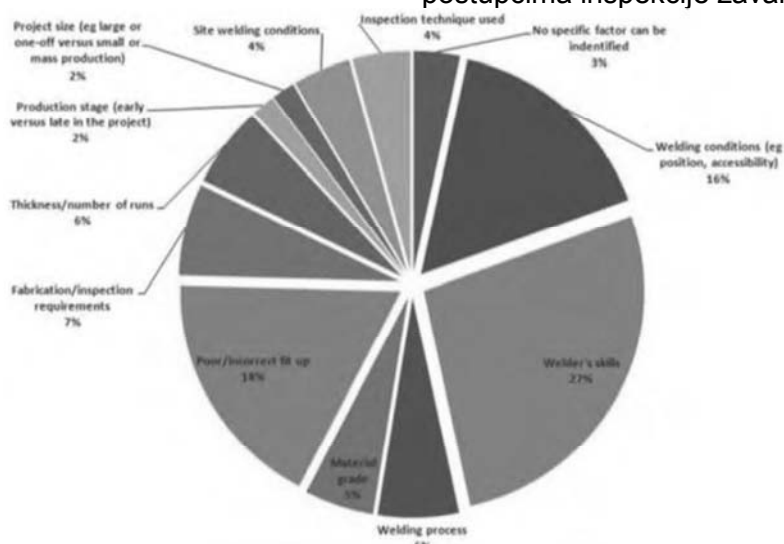


Figure 3. Factors affecting weld repair rates [9]

Slika 3. Faktori koji utiču na popravke zavarenih spojeva [9]

The main contributing factors affecting weld repair rates, listed in descending order, are:

- Welder's skills;
- Poor or incorrect fit up;
- Welding conditions, such as position and accessibility;
- Fabrication or inspection requirements;
- Thickness or number of runs;
- Welding process;
- Material grade;
- Site welding conditions
- Inspection technique used; or
- Minor contributions (< 3% each) from production stage, project size or no specific factor identified

Therefore, a professional welding inspector, acting ethically by fulfilling their responsibility to their employer, client and the general public can identify 93% of listed factors during the fabrication or maintenance welding activities. So, the question

za zavarivanje je smatran neko ko ne pronalazi previše problema, pa samim tim ne prekida ciljeve proizvodnje ili projektne rokove.

Međutim, istraživanje industrije koje je uradio TWI u 2011. godini o stopama popravki zavarenih spojeva [9] pokazalo je da su stope u sektoru snabdevanja naftom i gasom obično od 1 do 3%, ali sa skokovima do 25% na određenim lokacijama sa izuzetnim vrednostima do 55%. Najveći obim popravki je zabeležen kod korenih zavara, ugaonih zavarenih spojeva i područja sa ograničenim pristupom. Oba ova sektora imaju sisteme cevovoda, kopnene cevovode i posude pod pritiskom, sa sektorom nafte i gasa, uključujući i podmorske konstrukcije i cevovode. Faktori koji utiču na popravke zavarenih spojeva su prikazani na slici 3. Pitanje je onda šta može doprineti neetičkim postupcima inspekcije zavarivanja?

Glavni faktori koji utiču na popravke zavarenih spojeva, navedeni u padajućem redosledu, su:

- Veštine zavarivača;
- loše ili nepravilno prilagođavanje;
- uslovi zavarivanja, kao što su položaj i pristupačnost;
- zahtevi za izradu ili inspekciju;
- debljina ili broj slojeva (prolaza);
- postupak zavarivanja;
- klasa materijala;
- uslovi za zavarivanje na terenu (lokacije)
- korišćena tehnika inspekcije;
- ili manji doprinosi (< 3% svaka) iz faze proizvodnje, veličine projekta ili nespecifični faktori

Zbog toga, profesionalni inspektor za zavarivanje, etički postupajući ispunjavanjem svoje odgovornosti prema svom poslodavcu, klijentu i široj javnosti, može identifikovati 93% navedenih faktora u toku svog rada tokom proizvodnje ili održavanja. Dakle,

then should be: "Do you want the welding inspector to tell you what you want to hear, or what you need to hear?"

6. Consequences of poor engineering and inspection ethics

If poor design, fabrication and inspection ethics occur, what could the consequences be? To answer this, three additional case studies will be considered.

6.3. Case study: Weld failures in lifting and pressure equipment – Australia 2000 and 2005

An industry alert was issued in 2000, and updated in 2005, by WorkSafe Victoria, Australia with a warning that "weld failure of industrial equipment could cause serious injuries in workplaces", since a number of incidents occurred where lifting equipment and pressure equipment failed that resulted in serious injuries and fatalities [10].

The listed contributing factors, either individually or in combination, resulted in events that prompted the alert. They fell in two categories, namely engineering deficiencies and inspection deficiencies.

The engineering deficiencies during design were:

- The stresses exerted on welds were not fully analysed in the design, alteration or repair of the equipment; and
- Incorrect specification of the type, size, composition and location of the welds, and incorrect specification of the materials of construction in the design, alteration or repair of the equipment.

The inspection deficiencies during fabrication and inspection were:

- Poor quality control of the welding process;
- Using welders without adequate skills to carry out the welding; and
- Inadequate inspection and testing to detect any weld deficiency during the fabrication of the equipment or during the service life of the equipment.

This highlighted that insufficient material and welding engineering specification in design or during modifications requiring design changes, can result in catastrophic failure, which may be exacerbated by poor fabrication and inspection practices.

Some may argue that this comes from lack of knowledge and understanding of the requirements in the Australian Standards. The counter argument can be made that this harkens back to the definition of engineering ethics provided in the Introduction to not act outside the area of knowledge and competence, underscoring the fact that ignorance of the standards and regulations cannot be used as an excuse.

pitanje bi trebalo da bude: "Da li želite da vam inspektor za zavarivanje kaže šta želite da čujete ili šta treba da čujete?"

6. Posledice loše inženjerske i inspeksijske etike

Ako se desi loša konstrukcija, etika izrade i inspekcije, kakve bi bile posledice? Da bismo odgovorili na ovo, biće razmatrane još tri studije slučaja

6.3. Studija slučaja: neuspešni zavareni spojevi u opremi za podizanje i pod pritiskom - Australija 2000 i 2005

Industrijsko upozorenje objavljeno je 2000. godine, a WorkSafe Victoria iz Australije je 2005. izdao upozorenje da "neuspešno zavarivanja industrijske opreme može prouzrokovati ozbiljne povrede na radnim mestima", jer je došlo do velikog broja incidenata gde oprema za podizanje i oprema pod pritiskom nije izdržala opterećenja što je dovelo do ozbiljnih povreda i smrtnih slučajeva [10].

Navedeni faktori doprinosa, pojedinačno ili u kombinaciji, rezultovali su događajima koji su izazvali upozorenje. Spadaju u dve kategorije, odnosno inženjerski nedostaci i nedostaci inspekcije

Inženjerski nedostaci tokom projektovanja bili su:

- Naponi koji deluju na zavarene spojeve nisu bili u potpunosti analizirani u projektovanju, izmeni ili popravci opreme; i
- Pogrešne specifikacije tipa, veličine, sastava i lokacije zavarenih spojeva i pogrešne specifikacije materijala za konstrukciju pri projektovanju, izmeni ili popravci opreme.

Inspeksijski nedostaci tokom izrade i inspekcije bili su:

- loša kontrola kvaliteta postupka zavarivanja;
- korišćenje zavarivača bez adekvatnih veština za obavljanje zavarivanja; i
- neadekvatna kontrola i ispitivanje radi otkrivanja nedostatka zavarenih spojeva tokom izrade opreme ili tokom upotrebe opreme

Ovo je naglasilo da nedovoljna specifikacija materijala i specifikacija zavarivanja u projektu ili prilikom modifikacija koje zahtevaju izmene u projektu, može dovesti do kritičnog otkaza, što može biti pogoršano lošim postupcima izrade i inspekcije.

Neki mogu tvrditi da ovo potiče od nedostatka znanja i razumevanja zahteva u australijskim standardima. Može se izvesti kontra argument jer ovo upućuje na definiciju inženjerske etike koja je predviđena u uvodu t.j. da ne deluje izvan područja znanja i kompetencija, naglašavajući činjenicu da se ignorisanje standarda i propisa ne može koristiti kao izgovor.

6.4. Case study: Petrobas P-36 – Brazil 2001

The National Aeronautics and Space Administration (NASA) in the USA has a publication called Systems Failure Case Studies where they take an in-depth look at a particular topic or situation. In a review of the Petrobas P-36 oil rig that sank on 20 March 2001, published in October 2008, direct and indirect causes of the disaster were identified [11].

The direct cause was attributed to a leakage of volatile fluids that burst a shut-down emergency drain tank causing a violent chain of events, resulting in 11 fatalities and the complete loss of the oil rig. The indirect, underlying causes were a combination of a corporate focus on cost-cutting over safety, poor design of individual parts with regards to a system safety context, component failure without sufficient back-ups and lack of training and communication.

Petrobas executives implemented "aggressive and innovative" cost cutting during the design and production of the P-36 production facilities, while they "extolled that the project successfully rejected the established constricting and negative influences of prescriptive engineering, onerous quality requirements, and outdated concepts of inspection and client control" and that the "elimination of these unnecessary strait jackets" was delivering superior financial performance" [11]. Their statements did not include what analyses were done to determine how these innovations affected safety, showing how corporate culture can be a contributing factor in catastrophic failures.

6.5. Case study: Alexander L Kielland – Norway 1980

The Alexander L Kielland platform capsized on 27 March 1980 resulting in 123 fatalities. This happened during severe gale force winds, though the weather was not considered extreme storm conditions [12]. The investigation concluded that the structural failure occurred in one brace, due to a fatigue failure initiation from a gross fabrication defect, which caused progressive failure of all the other braces.

The Japanese online Failure Knowledge Database published a detailed assessment of the failure [13]. The brace that failed from the gross fabrication defect was identified as D6, which contained a hydrophone installed in a circular hole that was cut in the brace, and welded with double fillet welds. Cracks about 70 mm long, and related to lamellar tearing in the heat affected zone contained traces of paint, therefore they were introduced during fabrication. No weld defects were found at any other location, which indicates that the design rules were followed for all other welds. In addition to lamellar tearing, incomplete penetration, slag

6.4. Studija slučaja: Petrobas P-36 - Brazil 2001

Nacionalna uprava za aeronautiku i kosmos (NASA) u SAD-u ima publikaciju pod nazivom Studije slučajeva neuspeha gde se detaljno analiziraju određena tema ili situacija. U pregledu naftne platforme Petrobas P-36, koja je potonula 20. marta 2001. godine, objavljene u oktobru 2008. godine, identifikovani su direktni i indirektni uzroci ove katastrofe [11].

Neposredni uzrok je bio pripisan curenju isparljivih tečnosti koje su zapalile zatvoreni rezervoar za odvodnjavanje u slučaju nužde, a koji je izazvao tragičan sled događaja, što je dovelo do 11 smrtnih slučajeva i potpunog gubitka naftne opreme. Indirektni, osnovni uzroci bili su kombinacija korporativnog fokusa na smanjenje troškova zbog sigurnosti, lošeg projekta pojedinačnih delova u vezi sa sigurnosnim kontekstom sistema, loma komponenata bez dovoljnih rezervnih kopija i nedostatka obuke i komunikacije.

Rukovodioci kompanije Petrobas su implementirali "agresivno i inovativno" smanjenje troškova prilikom projektovanja i proizvodnje proizvodnih pogona P-36, dok su "naglasili da je projekat uspešno odbacio utvrđene ograničavajuće i negativne uticaje inženjeringa na bazi propisa, preterane zahteve kvaliteta i zastarele koncepte inspekcije i kontrolu klijenata i da je "uklanjanje ovih nepotrebnih mesta za zatezanje" dalo superiorne finansijske performanse" [11]. Njihove izjave nisu uključivale koje su analize sprovedi da bi se utvrdilo kako ove inovacije utiču na sigurnost, pokazujući kako korporativna kultura može biti faktor koji doprinosi kritičnim otkazima.

6.5. Studija slučaja: Alexander L Kielland – Norway 1980

Platforma Alekander L Kielland je prevrnula 27. marta 1980. godine, što je dovelo do 123 smrtna slučaja. Ovo se dogodilo usled snažnih sila vetra, mada se vreme nije smatralo ekstremnim olujnim uslovima [12]. Istraga je pokazala da se lom konstrukcije pojavio u jednom nosaču, zbog otkaza usled zamora iniciranog velikim defektom pri izradi, što je uzrokovalo progresivno otkazivanje svih ostalih nosača.

Japanska onlajn baza podataka o otkazima objavila je detaljnu procenu [13]. Nosač koji se polomio iz velikog defekta pri izradi, identifikovan je kao D6, u kome je bio hidrofon instaliran u kružnom otvoru koji je isečen u nosaču i zavaren dvostrukim ugaonim zavarenim spojem. Prsline dugačke oko 70 mm, vezane su za lamelarni lom u zoni uticaja toplotom, sadrže tragove boje, što znači da su nastale tokom izrade. Na bilo kojoj drugoj lokaciji nisu pronađeni defekti, što ukazuje na to da su

inclusions and root cracks were introduced by welding on flame-cut edges that were ground back to clean metal before welding. The materials used for the hydrophone also did not meet the requirements for the application.

In this instance, organisational and human factors were identified that contributed to the catastrophic failure [12]. These can also be classified with respect to engineering and inspection deficiencies:

The engineering deficiencies were:

- A fatigue design check was not carried out;
- The relevant Codes did not require damage tolerance assessment; and
- Damage stability rules did not assess the consequences of the loss of a column on the whole structure.

The following inspection deficiencies occurred during fabrication, inspection and maintenance inspection:

- Poor welding practice resulted in fabrication defects;
- Inadequate inspection did not identify the critical welding defect; and
- Maintenance inspections did not include the bracing containing the hydrophone weld.

7. Avoiding engineering disasters

Welding is a key industrial process used to create practical solutions in answering perceived needs, and is used extensively all over the world.

Welding affects the engineered properties of materials and can result in catastrophic failure, as highlighted by the various case studies. It therefore requires careful control and management to achieve the design requirements, and it is recommended that the application requirements should influence the design requirements of welds.

But incorporating weld quality management alone is not sufficient, and therefore ethical conduct during all aspects of projects should also be part of the process.

7.1. Interactive approach incorporating quality management

While the common concept model, as referenced in Figure 1 has provided a basic framework to deliver projects from design to inspection, a more interactive model, illustrated in Figure 4 [5], is proposed to address the influence of product or application requirements, therefore quality, over the whole process, especially with respect to welds.

Each element is not isolated and should therefore not be implemented in a linear fashion, but rather in such a way that the application of the product influences the aspects of design, materials, fabrication and inspection. The application will also therefore determine the level of quality

pravila za projektovanje ispoštovana za sve druge zavarene spojeve. Pored lamelnog loma, nepotpuno uvarivanje, uključci troske i prsline u korenu nastale su zavarivanjem na ivicama posle gasnog rezanja, koje su bile izbrušene do čistog metala pre zavarivanja. Materijali koji se koriste za hidrofona takođe nisu ispunili uslove primene.

U ovom slučaju identifikovani su organizacioni i ljudski faktori koji su doprineli katastrofalnom otkazu [12]. One se takođe mogu klasifikovati u pogledu inženjerskih i inspeksijskih nedostataka:

Inženjerski nedostaci bili su:

- nije sprovedena provera projekta na zamor;
 - relevantni propisi nisu zahtevali ocenu tolerancije oštećenja; i
 - pravila o stabilnosti oštećenja nisu procenile posledice gubitka stuba na celu konstrukciju.
- Tokom izrade, inspekcije i održavanja inspekcije došlo je do sljedećih nedostataka u pogledu inspekcije:
- loša praksa zavarivanja dovela je do defekata u izradi;
 - neadekvatna inspekcija nije identifikovala kritični defekt u zavarenom spoju; i
 - inspekcije pri održavanju nisu uključivale veze koje sadrže zavareni spoj hidrofona.

7. Izbegavanje inženjerskih katastrofa

Zavarivanje je ključni industrijski proces koji se koristi za stvaranje praktičnih rešenja u odgovoru na zapažene potrebe, a široko se koristi u celom svetu.

Zavarivanje utiče na osobine materijala i može dovesti do katastrofalnih otkaza, što je istaknuto u različitim studijama slučaja. Zbog toga se zahteva pažljiva kontrola i menadžment kako bi se ispunili zahtevi za projektovanje, a preporučuje se da zahtevi primene utiču na projektne zahteve zavarenog spoja.

Međutim, uvođenje/primena menadžmenta kvalitetom zavarivanja nije dovoljno, te stoga etičko ponašanje u svim aspektima projekata takođe treba da bude deo procesa.

7.1. Interaktivni pristup koji uključuje menadžment kvalitetom

Iako je uobičajeni model koncepta, kao što je prikazano na slici 1, obezbedio osnovni okvir za realizaciju projekata od projektovanja do inspekcije, predložen je interaktivniji model, ilustrovan na slici 4 [5], kako bi se naglasio uticaj zahteva proizvoda ili primene, stoga kvalitet, tokom čitavog procesa, naročito u odnosu na zavarene spojeve.

Ni jedan element nije izolovan, zbog čega ovaj model ne treba sprovoditi u jednom pravcu, već radije na takav način da primena proizvoda utiče na aspekte projekta, materijala, izrade i inspekcije. Tako će primena takođe utvrditi nivo potrebnog

management needed. This means that the required level of performance and therefore quality is incorporated during design, materials selection, fabrication and inspection, as shown in Figure 5. Guidance to select the required weld quality management level can be found in the ISO 3834 series of documents: Quality management for fusion welding of metallic materials: Part 1: Criteria for the selection of the appropriate level of quality requirements [16].

menadžmenta kvalitetom. To znači da je potreban nivo performansi i samim tim i kvalitet uključen tokom projekta, odabira materijala, izrade i pregleda, kao što je prikazano na slici 5. Smernice za odabir potrebnog nivoa menadžmenta kvalitetom zavarivača mogu se naći u seriji dokumenata ISO 3834: Menadžment kvalitetom kod zavarivanja topljenjem metalnih materijala: Deo 1: Kriterijumi za izbor odgovarajućeg nivoa zahteva kvaliteta [16].

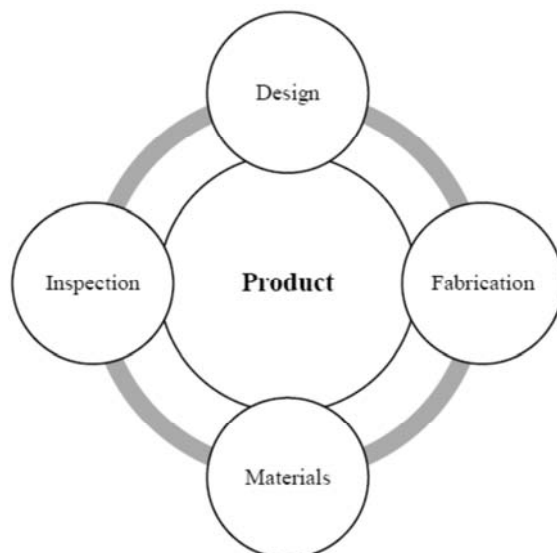


Figure 4: Interactive model [5]
Slika 4: Interaktivni model [5]



Figure 5: Quality management as part of the engineering process
Figure 5: Menadžment kvalitetom kao deo inženjering procesa

7.2. Supporting professional conduct and ethics

Engineering and inspection ethics have been influenced many times by corporate culture and management decisions, resulting in catastrophic failures [11, 12, 13, 15 and 17]. An unethical culture can be implemented the same way that a safety culture begins with management and employee engagement, and it can form the core of quality,

7.2. Podrška profesionalnom ponašanju i etici

Inženjerska i inspeksijska etika su mnogostruko uticale na korporativnu kulturu i odluke menadžmenta, što je dovelo do katastrofalnih lomova [11, 12, 13, 15 i 17]. Neetička kultura se može primeniti na isti način na koji bezbednosna kultura počinje sa menadžmentom i angažovanjem zaposlenih, a može da formira jezgro kvaliteta,

engineering and inspection, as illustrated in Figure 6.

inženjeringa i inspekcije, kao što je ilustrovano na slici 6.

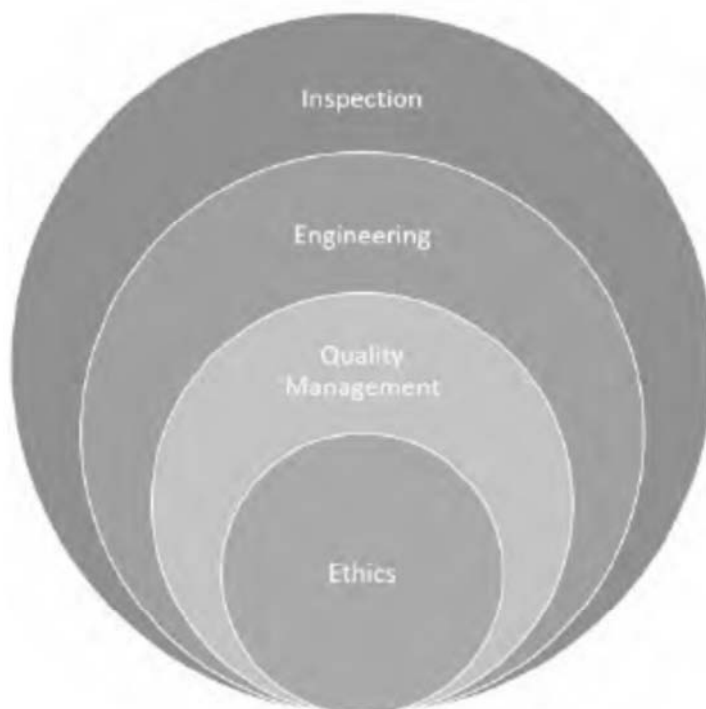


Figure 6: Ethics forming the core of quality, engineering and inspection.
Slika 6: Etika koja čini jezgro kvaliteta, inženjeringa i inspekcije

Recommendations from NASA [17] incorporating the lessons learnt from the Apollo, Challenger and Columbia disasters, addressed corporate culture issues in the following way:

- Reporting Culture: reporting concerns without fear of reprisal;
- Just Culture: treating each other fairly;
- Flexible Culture: changing and adapting to meet new demands;
- Learning Culture: learning from successes and failures; and
- Engaged Culture: everyone doing their part.

8. Conclusion

Engineering failure can be caused by human factors, design flaws, materials and welding issues or extreme conditions, but also as a combination of these. Underlying these aspects are issues around quality and ethics. Therefore, implementing an organisation culture of ethical behaviour, with an integrated process in design, fabrication and inspection supported by the appropriate quality management requirements, can prevent catastrophic failures, so that quality equals safety.

Preporuke NASA-a [17] koje uključuju lekcije naučene iz katastrofa Apollo, Challenger i Columbia, rešavala su pitanja korporativne kulture na sledeći način:

- Kultura izveštavanja: prijavljivanje zabrinutosti bez straha od odmazde;
- Prava kultura: pošteno uzajamno tretiranje;
- Fleksibilna kultura: menjanje i prilagođavanje kako bi se zadovoljili novi zahtevi;
- Kultura učenja: učenje iz uspeha i neuspeha; i
- Angažovana kultura: svi učestvuju.

8. Zaključak

Neuspeh u inženjeringu mogu prouzrokovati ljudski faktori, nedostaci projekta, materijali i problemi zavarivanja ili ekstremni uslovi, ali i kombinacija svega ovoga. Osnova ovih aspekata su pitanja kvaliteta i etike. Zbog toga, sprovođenje organizacione kulture etičkog ponašanja, sa integrisanim procesom projektovanja, izrade i inspekcije uz podršku odgovarajućih zahteva za menadžment kvalitetom, može sprečiti katastrofalne propuste, tako da je kvalitet jednak sigurnosti.

9. References

9. Literatura

1. AS 2812:2005. Welding, brazing and cutting of metals - Glossary of terms.
2. <http://www.weldinghistory.org/whfolder/folder/wh1900.html>
3. Engineering Disasters and Learning from Failure.
<http://www.matscieng.sunysb.edu/disaster/>
4. <http://qualitymanagementsystem.com/total-quality-management/the-history-of-quality-management/>
5. <http://www.nationalboard.org/Index.aspx?pageID=164&ID=187>
6. <https://www.aiche.org/ccps/resources/glossary/process-safety-glossary/catastrophic-failure>
7. <https://en.oxforddictionaries.com/definition/catastrophic>
8. <https://www.defenseindustrydaily.com/NGC-Inspection-Failure-Calls-Ships-Into-Question-05468/>
9. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-are-the-typical-repair-rates-for-welded-products-and-what-are-the-main-factors-affecting-them/>
10. [https://www.worksafe.vic.gov.au/pages/forms-and-publications/weld-failures-in-lifting-and-pressure-equipment](https://www.worksafe.vic.gov.au/pages/forms-and-publications/forms-and-publications/weld-failures-in-lifting-and-pressure-equipment)
11. <https://sma.nasa.gov/docs/default-source/safety-messages/safetymessage-2008-10-01-lossofpetrobrasp36.pdf?sfvrsn=4>
12. <https://officerofthewatch.com/2013/04/29/alexander-l-kielland-platform-capsize-accident/#more-4564>
13. <http://www.shippai.org/fkd/en/cfen/CB106109.html>
14. <https://officerofthewatch.com/2012/05/31/weld-defects-in-ships/>
15. https://nsc.nasa.gov/docs/default-source/system-failure-case-studies/sfcs-2013-04-01-throughanewlens-rev.pdf?sfvrsn=b6b1eff8_2
16. AS/NZS ISO 3834.1:2008: Quality requirements for fusion welding of metallic materials Part 1: Criteria for the selection of the appropriate level of quality requirements.
17. https://nsc.nasa.gov/docs/default-source/system-failure-case-studies/sfcs-2013-04-01-throughanewlens-rev.pdf?sfvrsn=b6b1eff8_2



Stefan Mladenović, mast. inž. maš., IWE, EWE

TEHNOLOGIJA ZAVARIVANJA KLIZNICE BOČNOG KLIZAČA KOD OBRITNOG POSTOLJA Y25

WELDING TECHNOLOGY OF SIDE WIPER SLIDERS ON WAGON ROTATING SHASSIS Y25

Stručni rad / Professional paper

UDK / UDC: 625.548:621.791

Rad primljen / Paper received:

Novembar 2018.

Adresa autora / Author's address:

MING Forging, Bulevar 12. Februar b.b., 18000 Niš, Republic of Serbia

e-mail: stefan.mladenovic@mingbgd.com.

Ključne reči: Zavarivanje, železnica, obrtno postolje, kliznica, Hatfieldov čelik

Key words: Welding, Railway, Rotating shassis, Slider, Hatfield Steel

Rezime

U radu je opisan postupak zavarivanja kliznica koje su deo bočnog klizača obrtnih postolja teretnih vagona. Poseban akcenat je dat zavarivanju visokomanganskog Hatfieldovog čelika.

Uvod

Kliznica je deo bočnog klizača i naleže na poprečni nosač rama obrtnog postolja Y25 teretnih železničkih vagona. Sedište klizača je deo bočnog klizača, a prima deo aksijalnih i radijalnih opterećenja od glavnih postolja vagona.

Bočni klizač je sklop kliznice i sedišta klizača ostvaren uz pomoć graničnika i opruga. Klizne ploče su njihova neposredna klizna veza i primaju na sebe sile trenja i udarna opterećenja. Čep kliznice služi za centriranje kliznice i sedišta klizača i kao dodatno osiguranje od ispadanja.

Kliznica i sedišta se izrađuju kovanjem u kalupu, čep kliznice se izrađuje mehaničkom obradom, dok se pločice dobijaju rezanjem lima plazmom.

1. Osnovni materijal

Prema tehničkoj dokumentaciji, kliznica i čep kliznice se izrađuju od konstrukcijskog čelika S355J2+N (1.0577) EN 10025-2, a klizne ploče od austenitnog čelika otpornog na habanje X120Mn12 (1.3401) koji je poznat po nazivu Hatfieldov čelik.

1.2 Hemijski sastav osnovnog materijala

Oznaka prema		C %	Si %	Mn %	P %	S %	N %	Cu %	Cr %
SRPS EN 10027-1	SRPS EN 10027-2								
S355J2	1.0577	0,2-0,22	max.0,55	max. 1,6	max. 0,025	max. 0,025	/	max. 0,55	/
X120Mn12	1.3401	1,1-1,3	0,3-0,5	12-13	max. 0,1	max. 0,04	/	/	max. 1,5

Tabela 1. Hemijski sastav osnovnog materijala prema standardu



Oznaka prema		C %	Mn %	Si %	P %	S %	Cr %	Ni %	Cu %	Mo %	Al %	V %	N %
SRPS EN 10027-1	SRPS EN 10027-2												
S355J2+AR	1.0577	0,16	1,01	0,21	0,016	0,01	0,11	0,1	0,27	0,019	0,034	0,03	0,01
X120Mn12	1.3401	1,15	12,2	0,36	0,031	0,005	0,17	0,1	0,16	0,03	0,03	/	/

Tabela 2. Hemijski sastav osnovnog materijala prema atestu

1.3 Mehaničke karakteristike osnovnog materijala

Oznaka prema		R _{eH} R _{p0,2} N/mm ²	R _m N/mm ²	A min. %	KV min. J
SRPS EN 10027-1	SRPS EN 10027-2				
S355J2	1.0577	355	470-630	22	27
X120Mn12	1.3401	410	800-1130	40	/

Tabela 3. Mehaničke karakteristike osnovnog materijala prema standardu

Oznaka prema		R _{eH} R _{p0,2} N/mm ²	R _m N/mm ²	A %	KV J
SRPS EN 10027-1	SRPS EN 10027-2				
S355J2+AR	1.0577	400	544	28	53,7
X120Mn12	1.3401	/	/	/	/

Tabela 3. Mehaničke karakteristike osnovnog materijala prema atestu

2. Analiza zavarljivosti i toplotnog ciklusa pri zavarivanju

Na kliznici ima dve vrste zavarenog spoja, jedna vrsta je kružni 1/2V spoj i druga ugaoni spoj. Kod kružnog 1/2V spoja je spajanje istorodnih materijala, dok je kod ugaonog spoja spajanje raznorodnih materijala. Zbog toga će biti urađena analiza zavarljivosti za oba spoja.

2.1 Analiza zavarljivosti kliznice i čepa kliznice

Čelik S355J2+N pripada grupi niskougljeničnih i nelegiranih čelika. Zavarljivost ovih čelika se procenjuje na osnovu sadržaja ekvivalentnog ugljenika (CE).

2.1.1 Ekvivalent ugljenika (CE)

Ekvivalent ugljenika određuje se po formuli:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

$$CE = 0,16 + \frac{1,01}{6} + \frac{0,11 + 0,019 + 0,03}{5} + \frac{0,1 + 0,27}{15}$$

$$CE = 0,16 + 0,168 + 0,031 + 0,024$$

$$CE = 0,385$$

2.1.2 Ocena sklonosti ka pojavi hladnih prslina

Jedan od kriterijuma koji takođe može da pokaže povećanje krтости zbog strukturnih preobražaja, a time i sklonost ka pojavi hladnih prslina, je veličina

tvrdoće u ZUT. Iako ovaj pokazatelj nije jednoznačan kao ekvivalent ugljenika, smatra se da kod većine konstrukcijskih čelika veličina tvrdoće do 350 HV ukazuje da se u strukturi, pri razlaganju austenita, ne javljaju tvrde i krte faze. Kod ugljeničnih i niskolegiranih čelika najveća vrednost tvrdoće u zoni uticaja toplote može da se odredi formulom:

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

$$HV = 90 + 1050 \cdot 0,16 + 47 \cdot 0,21 + 75 \cdot 1,01 + 30 \cdot 0,1 + 31 \cdot 0,11$$

$$HV = 90 + 168 + 9,87 + 75,75 + 3 + 3,41$$

$$HV = 350,03$$

2.2 Analiza zavarljivosti kliznice i klizne pločice

Čelik X120Mn12 je visokolegirani manganski čelik austenitne strukture. Kao i većina austenitnih čelika i ovaj čelik je nemagnetičan. Pri zavarivanju ovog čelika neophodno je nastojati da se toplota razvijena zavarivanjem dovoljno brzo odvede u cilju dobijanja što manje količine karbida, odnosno postizanja postojane žilave austenitne strukture. Pri zavarivanju manganskih austenitnih čelika koji ojačavaju udarnim dejstvom sile, potrebno je voditi računa da ne dođe do naglog rasta austenitnog zrna usled prekomernog unosa toplote. Zbog toga se zavarivanje izvodi sa malim unosom toplote. U suprotnom, dobijaju se gruba austenitna zrna, što pogoršava zavarljivost i mehanička svojstva.



3. Određivanje temperature predgrevanja, međuslojne temperature i parametara termičke obrade nakon zavarivanja

3.1 Proračun temperature predgrevanja po formuli seferijana

Određivanje temperature predgrevanja prema formuli Seferijana uzima u obzir CE i debljinu osnovnog materijala s u mm .

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{C_{Eu} - 0,25}$$

$$C_{Eu} = CE \cdot (1 + 0,005 \cdot s)$$

$$C_{Eu} = 0,385 \cdot (1 + 0,005 \cdot 30)$$

$$C_{Eu} = 0,443$$

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{0,443 - 0,25}$$

$$T_p = 153,66 \text{ } ^\circ\text{C}$$

3.2 Proračun temperature predgrevanja prema srps en 1011-2

Uticaj hemijskog sastava, okarakterisan ekvivalentom ugljenika CE , debljina lima d , sadržaj vodonika u metalu šava HD i količina unete toplote Q mogu se povezati sledećom jednačinom koja se koristi za izračunavanje temperature predgrevanja T_p :

$$T_p = 697 \cdot CE + 160 \cdot \tanh\left(\frac{d}{35}\right) + 62 \cdot HD^{0,35} + (53 \cdot CE - 32) \cdot Q - 328 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$CE = 0,385$$

$$d = 30 \text{ mm}$$

$$HD = 5 \text{ mL}/100\text{g}$$

$$Q = 0,620 \text{ kJ}/\text{mm}$$

$$T_p = 153,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Usvaja se temperatura predgrevanja

$$T_p = \min. 155 \text{ } ^\circ\text{C}$$

za zavarivanje kliznice i čepa kliznice. Zavarivanje kliznice i klizne pločice se izvodi bez predgrevanja.

4. Izbor postupka zavarivanja

Za ovaj slučaj mogući postupci zavarivanja su E 111 i MAG 135. Imajući u vidu hemijski sastav materijala, mehaničke osobine materijala, uslove zavarivanja, raspoloživu opremu i ekonomičnost odabira se postupak MAG 135.

5. Izbor dodatnog i potrošnog materijala za zavarivanje

Na osnovu kvaliteta i dimenzija osnovnog materijala, složenosti konstrukcije i položaja zavarivanja određen je sledeći dodatni materijal za MAG postupak (135):

Za zavarivanje Kliznice i Čepa kliznice puna žica $\varnothing 1,2 \text{ mm}$ pod zaštitom gasa EN ISO 14175 **M21** (Ar + 18% CO₂) EN ISO 14341-A **G42 5M/C G3Si1**. Za zavarivanje Kliznice i Klizne pločice puna žica $\varnothing 1,0 \text{ mm}$ pod zaštitom gasa EN ISO 14175 **M12** (Ar + 2,5% CO₂) EN ISO 14343-A **G 18 8 Mn**.

U tabeli 5. date su komercijalne oznake ovih dodatnih materijala

Oznaka prema EN ISO 14341-A / EN ISO 14343-A	SIJ Elektrode Jesenice	Elektroda Zagreb	BÖHLER
G42 5M/C G3Si1	VAC 60	EZ – SG2	BÖHLER EMK 6
G 18 8 Mn	MIG 18/8/6 Si	EZ – MIG 307 Si	BÖHLER A 7-IG

Tabela 5. Komercijalne oznake dodatnog materijala

5.1 Hemijski sastav dodatnog materijala

C %	Si %	Mn %	P %	S %
0,08	0,90	1,50	< 0,025	< 0,025

Tabela 6. Hemijski sastav dodatnog materijala G42 5M/C G3Si1

C %	Si %	Mn %	Cr %	Ni %
0,08	0,80	7,0	18,50	9,0

Tabela 7. Hemijski sastav dodatnog materijala G 18 8 Mn

5.2 Mehaničke karakteristike dodatnog materijala

Oznaka prema EN ISO 14341-A / EN ISO 14343-A	R_{eH} $R_{p0,2}$ N/mm ²	R_m N/mm ²	A min. %	KV min. J
G42 5M/C G3Si1	> 410	510 - 590	> 22	> 47 na - 40 °C
G 18 8 Mn	> 380	560 - 660	35	> 40 na + 20 °C

Tabela 8. Mehaničke karakteristike dodatnog materijala



6. Plan i redosled zavarivanja

Zavareni spojevi mogu se izvoditi samo u radnom prostoru koji je zaštićen od padavina, niskih temperatura, vetra i si. Zavarivanje kliznice i čepa kliznice izvoditi u PA položaju, a zavarivanje Kliznice i Kliznih pločica u najpovoljnijem položaju (PA, PB, PF).

Formiranje podsklopa nastaje sledećim redosledom prema crtežu :

- Zavarivanje ugaonih spojeva **a3 – 2x15/49**
- Zavarivanje ugaonih spojeva **a3 – 48**
- Zavarivanje kružnog 1/2V spoja **6 1/2V – 157**

7. Izbor parametara zavarivanja

Tokom zavarivanja kliznice i kliznih pločica postupkom MAG 135 koristiti sledeće parametre:

Položaj zavarivanja:	PA, PB, PF
Prečnik dodatnog materijala:	∅ 1,0 mm
Jačina struje:	130 A
Napon:	19 V
Vrsta struje / polaritet:	DC +
Protok gasa:	10-12 l/min
Brzina zavarivanja:	20 cm/min
Unos toplote:	0,623 kJ/mm

Za zavarivanje kliznice i čepa kliznice postupkom MAG 135 koristiti sledeće parametre:

Položaj zavarivanja:	PA
Prečnik dodatnog materijala:	∅ 1,2 mm
Jačina struje:	180 A
Napon:	27 V
Vrsta struje / polaritet:	DC +
Protok gasa:	10-12 l/min
Brzina zavarivanja:	40 cm/min
Unos toplote:	0,620 kJ/min

Pre i u toku zavarivanja obavezno se moraju proveravati parametri zavarivanja, koji su prilikom

provere propisane tehnologije potvrđeni kao ispravni.

8. Utvrđivanje vrste i obima kontrole i kriterijuma prihvatljivosti u svim fazama rada

Kvalitet zavarenog spoja propisan je standardom **SRPS EN 15085-2:2011** Primene na železnici – Zavarivanje konstrukcija železničkih vozila i njihovih komponenata – Deo 2: Zahtevi kvaliteta i sertifikacija odeljenja za zavarivačke radove.

Kontrola se vrši u tri faze:

- pre zavarivanja;
- tokom zavarivanja;
- posle zavarivanja.

8.1 Kontrola posle zavarivanja

Kontrolu posle zavarivanja izvesti u skladu sa standardom **SRPS EN 15085-3**.

- Klasa kontrole zavara CT3;
- Vizuelna kontrola svih zavarenih spojeva (VT 100%);
- Dimenziona kontrola u skladu sa crtežem.

9. Zbirka dokaza o kvalitetu konstrukcije

Kao dokaz da su zavarivački radovi izvedeni kvalitetno i u skladu sa važećim propisima i standardima potrebno je priložiti sledeću dokumentaciju:

- Tehničku dokumentaciju;
- Uverenje o stručnoj osposobljenosti zavarivača u skladu sa SRPS EN 9606-1;
- Uverenje o kvalitetu osnovnog materijala;
- Uverenje o kvalitetu dodatnog materijala;
- Uverenje o ispravnosti uređaja za zavarivanje;
- Kvalifikaciju tehnologije zavarivanja;
- Izveštaj o vizuelnoj i dimenzionoj kontroli.

10. Literatura

- [1] Grupa autora – Moduo 4 – Proizvodnja i inženjerska primena – Mašinski fakultet Niš
- [2] Grupa autora – Moduo 2 – Materijali i njihovo ponašanje pri zavarivanju – Mašinski fakultet Niš
- [3] Standard SRPS EN 10025-2 – Toplovaljani proizvodi od konstrukcionih čelika - Deo 2: Tehnički zahtevi za isporuku nelegiranih konstrukcionih čelika
- [4] Standard SRPS EN 1011-1 - Zavarivanje - Preporuke za zavarivanje metalnih materijala - Deo 1: Opšte uputstvo za elektrolučno zavarivanje

- [5] Standard SRPS EN 1011-2 – Zavarivanje - Preporuke za zavarivanje metalnih materijala - Deo 2: Elektrolučno zavarivanje feritnih čelika
- [6] Milica Antić, Zoran Odanović – Značaj izbora materijala pri zavarivanju i primer nenamenske upotrebe Hartfieldovog čelika – Zavarivanje i zavarene konstrukcije (3/2004)
- [7] Katalog dodatnog materijala – Elektrode Jesenice, Slovenija
- [8] Katalog dodatnog materijala – Elektroda Zagreb, Hrvatska
- [9] Katalog dodatnog materijala – BÖHLER, Austrija

ČASOPIS ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE**Cenovnik oglasnog prostora u četiri uzastopna broja 2018**

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

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

WELDING & WELDED STRUCTURES, Quarterly review**Advertising prices for four successive numbers in 2018**

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

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

**INDEKS OGLAŠIVAČA
ADVERTISERS INDEX**

YASKAWA SLOVENIJA

HONEX

ELIMP

MESSER TEHNOGAS

NEMINIK

- | | |
|---|---------------------|
| 1. ČLANARINA DUZS za 2018. godinu | 3.500 dinara |
| Članovima DUZS GRATIS godišnje izdanje časopisa "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE" | |
| 2. ČASOPIS "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE" - 2018. 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 2016. godinu | 500 dinara |
| ▪ cena pojedinačnog broja za prethodne godine..... | 250 dinara |
| b) beneficirane cene za članove DUZS: | |
| ▪ cena pojedinačnog broja za 2017. godinu (pouzećem ili preuzimanjem) | 400 dinara |
| ▪ cena pojedinačnog broja za prethodne godine (pouzećem ili preuzimanjem) | <u>Gratis</u> |
| 4. Knjiga Organizacija i ekonomika zavarivačkih radova – autor: prof. dr Zoran Radojević (uračunat PDV 10%) | 1.045 dinara |
| 5. Zbirke standarda OBEZBEĐENJE KVALITETA U ZAVARIVANJU, komplet 4 toma | 6.750 dinara |