



ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE

WELDING & WELDED STRUCTURES

God. 65 Vol. 65	Br. 4 No. 4	145-192 145-192	Beograd Belgrade	Srbija Serbia	2020. 2020.
--------------------	----------------	--------------------	---------------------	------------------	----------------

ČASOPIS DRUŠTVA ZA UNAPREĐIVANJE
ZAVARIVANJA U SRBIJI

SERBIAN WELDING SOCIETY
QUARTERLY REVIEW

IZLAZI TROMESEČNO

IZDAVAČ / PUBLISHER

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

Adresa: 11000 Beograd, Grčića Milenka 67

Za izdavača / For Publisher

Branislav Lukić, dipl.ing, predsednik DUZS

UREDNIŠTVO / EDITORIAL

Glavni i odgovorni urednik / Editor-in-Chief

Dr Zoran Odanović, dipl.ing.

duzs011@gmail.com, odanovic@ptt.rs

Tehnički urednik / Technical Editor

Branislav Lukić, dipl.ing

Redakcijski odbor / Editorial Board

Dr Nenad Radović, dipl.ing.

Dr Radomir Jovičić, dipl.ing.

Dr Bore Jegdić, dipl.ing.

Miloš Pavlović, dipl.ing.

REDAKCIJA I MARKETING / EDITORIAL OFFICE AND MARKETING

Vesna Jović

Grčića Milenka 67, I sprat
11000 Beograd

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

duzs@eunet.rs

www.duzs.org.rs



UREĐIVAČKI ODBOR / PUBLISHING COUNCIL

Dr Vencislav Grabulov, dipl.ing, (predsednik)

Prof.dr Vukić Lazić, dipl.ing.

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

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

Prof. dr 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 2020.

Cena pojedinačnog broja 825,00 dinara

Godišnja pretplata 2500,00 dinara

Tekući račun: 325-9500600002588-46

PRICE AND ORDER

Annual subscription: EUR 100

Account No. RS35325960160000041546

OTPVRS22 (VOJVOĐANSKA BANKA AD)

IBAN RS35325960160000041546

ŠTAMPA / PRINTED

“VIS STUDIO” d.o.o.

Aleksinačkih rudara 35, Beograd

Tiraž: 400 kom.

SADRŽAJ

CONTENTS



NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

**PRILOG NOVIM IZRAČUNAVANJIMA
TEMPERATURE PREDGREVANJA I
DIFERENCIRANJA PRIMENOM LAGRANŽEOVE
INTERPOLACIJE**

**CONTRIBUTION TO NEW CALCULATIONS OF
PREHEATING AND DIFFERENTIATION
TEMPERATURES USING LAGRANGE
INTERPOLATION**

149

M. Milićević



NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

**CHARACTERIZATION OF BAINITE-FERRITE
STRUCTURES FORMED ON THE HEAT-
AFFECTED ZONE OF A DISSIMILAR WELDS OF
HIGH-STRENGTH STEEL (S700MC/S960QC)
AND THEIR DEPENDENCY ON COOLING TIME**

**KARAKTERIZACIJA BEINITNO-FERITNIH
STRUKTURA FORMIRANIH U ZONI UTICAJA
TOPLOTE ZAVARENIH SPOJEVA RAZLIČITIH
ČELIKA VISOKE ČVRSTOĆE (S700MC/S960QC)
I NJIHOVA ZAVISNOST OD BRZINE HLAĐENJA**

159

F. Njock Bayock, P. Kah, B. Mvola, P. Layus, X. Cai



OBRAZOVANJE

EDUCATION

**REAL TIME PHYSICAL SIMULATION FOR
VIRTUAL WELDING TRAINING**

**FIZIČKA SIMULACIJA VIRTUELNOG
ZAVARIVANJA U REALNOM VREMENU**

173

O. Mokrov, A. Schmidt, M. Simon, U. Reisgen, A. Behmel, J. Martin, D. Rudolph, A. Becirovic



PRAKSA

PRACTICE

**FATIGUE IMPROVEMENT OF WELDED
ELEMENTS BY ULTRASONIC IMPACT
TREATMENT**

**POBOLJŠANJE OTPORNOSTI NA ZAMOR
ZAVARENIH ELEMENATA PRIMENOM OBRADJE
ULTRAZVUČNIM UDAROM**

179

Y. Kudryavtsev



VESTI

NEWS

148

65 GODINA ČASOPISA ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE

158

IIW - NAJAVA DOGAĐAJA – JUL 2021

191

UPUTSTVO AUTORIMA (ENG)

192

MARKETING

Poštovani čitaoci,

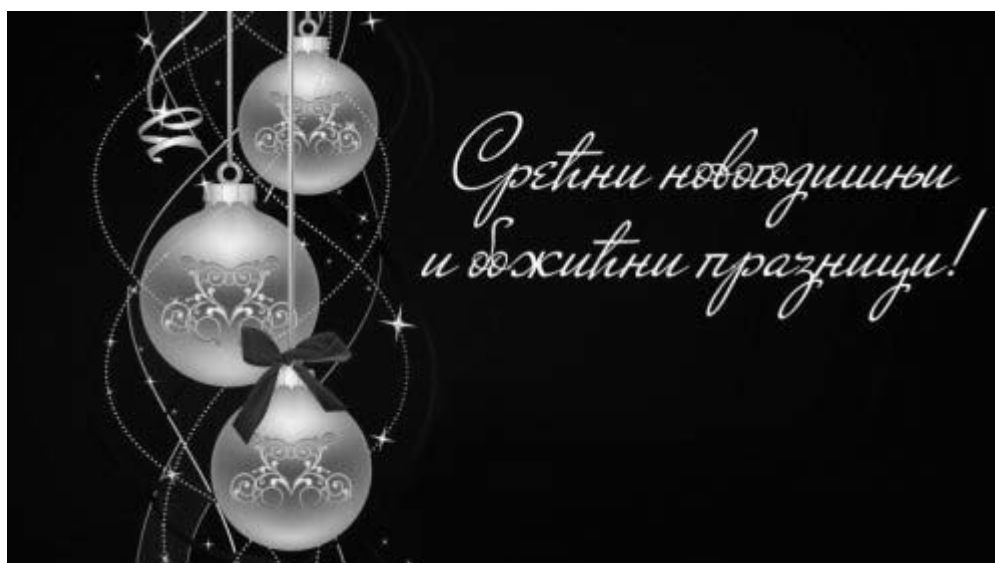
Na izmaku smo godine koja nam je donela puno neizvesnosti, briga i problema koji su direktno uticali na naš svakodnevni život i rad. Sredinom ove godine iznenada nas je napustila i naša Milica Antić, glavni i odgovorni urednik časopisa Zavarivanje i zavarene konstrukcije, veliki zaljubljenik u zavarivanje.

Pored svih ovih turbulentnih događanja, dogodio se i jedan lep jubilej, a to je da naš časopis upravo ove godine slavi svoj šezdeset peti rođendan. Tokom ovih 65 godina za opstanak časopisa traženi su putevi koji su ponekad bili i stranputice sa kojih se izlazilo zalaganjem članstva DUZS-a i svih onih koji su voleli časopis. Entuzijazam za uspešan rad časopisa postojao je u svakoj generaciji, a za uzvrat časopis nam je tokom svih ovih godina omogućavao međusobni kontakt, zbližavanje sa kolegama iz našeg bližeg i daljeg okruženja, razmenu stručnih znanja i iskustava, i posebno informisanje o novim naučnim stručnim i tehničko-tehnološkim dostignućima iz oblasti zavarivanja na međunarodnom nivou. Bez tog saznanja opstanak časopisa ne bi imao nikakvog smisla.

Iskreno se nadamo da će nam sledeća godina doneti mirnija vremena i više prilika za druženja.

Želimo vam srećnu, zdravu i uspešnu Novu 2021. godinu.

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





65 GODINA ČASOPISA ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE

Povodom 65. godišnjice časopisa Zavarivanje i zavarene konstrukcije podsetićemo na značajne događaje i periode koji su obeležili njegov put do današnjih dana.

Prapočetak časopisa je Zavarivač, koji je zajednički časopis Društva na unapređenje zavarivanja NR Srbije i Društva za tehniku zavarivanja NR Hrvatske tokom 1954.-1955. godine.

Godina 1955.

U drugoj polovini 1955. časopis Zavarivač izdaje DUZ NR Srbije, i hronološki je to godina od koje se računa volumen časopisa. Glavni i odgovorni urednik je ing. Stanislav Mišković.

Godina 1958 – 1960.

Časopis Zavarivač izdaje DUZS (Beograd), ali je to glasilo četiri republičke zavarivačke asocijacije (Srbije, Hrvatske, BiH i Makedonije), članice Saveza društava za tehniku zavarivanja Jugoslavije (SDTZJ). Glavni i odgovorni urednik je Prof. ing. Milan Radojković.

Godina 1961 –1969.

Donet je Poslovnik o radu časopisa Zavarivač kojim se utvrđuje da je osnivač časopisa DUZS, izdavač i pravni subjekt, a da ostala republička društva koja ga prihvataju kao svoje glasilo imaju obavezu da određen broj primeraka plasiraju na svojoj teritoriji. Kao svoje glasilo časopis su prihvatile republičke asocijacije BiH i Makedonije, a od 1967. i asocijacija Crne Gore.

Godina 1969 –1975.

Izdavači časopisa Zavarivač su republička društva koja su ga prihvatila kao svoje glasilo, a suizdavači privredne organizacije (Energoinvest - Sarajevo, Termoelektro - Beograd, Zavod za zavarivanje - Beograd) koje pružaju finansijsku podršku. Od 1973. u impresumu se naznačava da je to časopis Saveza društava za tehniku zavarivanja Jugoslavije (SDTZ).

Godina 1975 –1980.

Izdavač časopisa Zavarivač je samo DUZS, a suizdavači su republička društva koja su ga prihvatila kao svoje glasilo, kao i privredne organizacije iz Srbije (stalni suizdavač je bio Zavod za zavarivanje - Beograd) koje ga finansijski podržavaju. Izdavanje dotira Republička zajednica za nauku Republike Srbije. Od 1978. glavni i odgovorni urednik je Ing. spec. zav. Dragoslav Macanković.

Godina 1980 –1989.

Od polovine 1980. zaključno sa 1989. izdavači časopisa Zavarivač su republička društva Srbije, BiH, Makedonije i Crne Gore, a suizdavači privredne organizacije (uglavnom veći oglašivači) sa celog područja Jugoslavije. Časopis dotiraju SIZ za nauku republika izdavača. U 1985. uspostavlja se Izdavački savet, kao nadzor nad uređivačkom politikom časopisa. Prezentacija naučnih i stručnih radova je prema pravilima za naučno - stručne publikacije. Počev od 1989. glavni i odgovorni urednik je Prof. dr. Stojan Sedmak, dipl.ing.

Godina 1990.

DUZ Crne Gore svojom voljom prestaje da bude jedan od izdavača, dok asocijacije BiH i Makedonije ostaju od kraja te godine izdanja, odnosno do kraja članstva u JSZ. Time, de facto, časopis je samo časopis DUZS.

Godina 1991 – 1995.

Izdavač časopisa Zavarivač je DUZS, a suizdavači privredne organizacije: Zavod za zavarivanje - Beograd i Yuweld-Beograd. Povremeno časopis dotira Ministarstvo za nauku Srbije i Savezne republike Jugoslavije. U uređivanju časopisa, za autorske radove koji se visokostručno kotiraju, uvodi se dvojezični tekst (srpski- engleski), što ga još dodatno u tom segmentu (rubrika nauka - istraživanje - razvoj) karakteriše kao naučno - stručni časopis.

Godina 1996.

Časopis **Zavarivač** menja naslov u **Zavarivanje i zavarene konstrukcije / Welding & Welded Structures**. Time je usaglašen naslov sa sadržajem i namenom časopisa. Izdavač i suizdavači su kao u prethodnom periodu.

Godina 2001 - 2003.

Časopis Zavarivanje i zavarene konstrukcije izdaje DUZS, bez suizdavača. Rubrika Vesti dobija karakter sažetih i komentatorskih strukovnih informacija o događanjima u DUZS, čime se prevazilazi biltenski stil prikaza zapisnika bez kritičkog osvrta. Time je završena transformacija u savremenu stručnu periodičnu publikaciju novoga veka. Uspostavljaju se pravila sistema kvaliteta u uređivanju časopisa. Glavni i odgovorni urednik je Mirjana Smiljanić, dipl.ing.

Godina 2004 – 2010.

Činom ukidanja JSZ (decembar 2003.g.) časopis Zavarivanje i zavarene konstrukcije je i de jure časopis DUZS, što je naznačeno u impresumu. Počev od broja 2, glavni i odgovorni urednik je Dr. Zoran Odanović, dipl. ing.

Godina 2011 - 2013.

Glavni i odgovorni urednik časopisa Zavarivanje i zavarene konstrukcije je Ljiljana Peković, dipl.ing.

Godina 2014 - 2020.

Glavni i odgovorni urednik časopisa Zavarivanje i zavarene konstrukcije je Milica Antić, dipl.ing.

Miroslav S. Milićević¹

PRILOG NOVIM IZRAČUNAVANJIMA TEMPERATURE PREDGREVANJA I DIFERENCIRANJA PRIMENOM LAGRANŽEOVE INTERPOLACIJE

CONTRIBUTION TO NEW CALCULATIONS OF PREHEATING AND DIFFERENTIATION TEMPERATURES USING LAGRANGE INTERPOLATION

Originalni naučni rad / Original scientific paper**UDK / UDC: 621.791****Rad primljen / Paper received:**

Oktobar 2020.

Ključne reči: Zavarivanje, temperatura predgrevanja, aproksimacija, vreme**Rezime**

U radu se daje prikaz hronologije kako se do sada određivalo kritično vreme hlađenja i temperatura predgrevanja kod zavarivanja. Autor rada uvodi jedan nov pristup u izračunavanju temperature predgrevanja koristeći iskustva iz stanja tehnike kao i svoje dugogodišnje rezultate istraživanja na polju zavarivanja. Ranija rešenja su se bazirala na 2D i 3D Rosenthalovom modelu izračunavanja kritičnog vremena hlađenja i pripadajuće temperature predgrevanja i poboljšane izraze koje je koristio British Standard. Ovaj rad koristi potrebna iskustva iz termije i odgovarajućih disciplina matematike. Problemi koji se javljaju i sprečavaju efikasno dobijanje rešivih izraza na prost i elementaran način, autor ovog rada to rešava na jedan potpuno nov i inventivan način.

1. Uvod

Rad je nastao analizom i studiranjem literature date u [1-5]. Posebno valja izložiti rezultate velikih istraživača prikazanih u [6-10] čiji su doprinosi omogućili istraživanja istraživačima u oblasti termije.

Autor ovog rada je istraživao značajan broj stručnih i naučnih radova koji se bave određivanjem kritičnog vremena hlađenja i temperature predgrevanja od kojih treba istaći radove prikazane u referencama [10-24] rada. U ovim radovima se koriste teorijski modeli i formule, paketi za simulaciju, rezultati iz prakse, upotrebljava se određivanje navedenih veličina na osnovu ekvivalenta ugljenika ili ekvivalenta CE, kao i druga razna iskustva iz prakse.

Adresa autora / Author's address:^{1*} Prof. Dr. Univerzitet u Beogradu, Visoka tehnička škola u Beogradu

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

Keywords: Welding, preheating temperature, approximation, time, new expression**Abstract**

This paper presents a chronology of how the critical cooling time and preheating temperature in welding have been determined so far. The author of this paper introduces a new approach in calculating preheating temperature using prior art experience as well as his long-term research results in the field of welding. Earlier solutions were based on Rosenthal's 2D and 3D model for calculating the critical cooling time and the corresponding preheating temperature and the improved expressions used by the British Standard. This paper uses the necessary experience in thermal and the corresponding disciplines of mathematics. Problems that occur and prevent efficient obtaining of solvable expressions in a simple and elementary way, the author of this paper solves it in a completely new and inventive way.

Pošto su se dosadašnje formule za proračun bitnih komponenti termičkih procesa pokazale grubim u smislu tačnosti i rešivosti, autor je korišćenjem brojne i izabrane literature iz matematike i numeričke analize [25-34] izveo proste analitičke izraze za temperaturu predgrevanja koji će biti od velike koristi istraživačima i tehnolozima koji se bave tehnologijom zavarivanja.

Inventivnim rezultatima su doprineli rezultati koje je postigao autor ovog rada učestvujući u publikovanju radova [35-40] sa koautorima ili samostalnim istraživanjima. Korisno su poslužili i izlaganje i rezultati radova [41-42] koji su publikovani u renomiranom časopisu iz oblasti zavarivanja gde su dati teoretski i praktični rezultati.



2. Nov model izračunavanja temperature predgrevanja zavarivanja

Raspodela temperature u ploči koja se zavaruje se može opisati Furijeovom jednačinom

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

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

Koristeći iskustva iz [6-9] rešenje Furijeove jednačine se svodi na

$$T(r,x) = \frac{q}{2\pi\lambda} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) K_0\left[r\left(\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}\right)\right]^{0.5} \quad (2)$$

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

Kada je intenzitet unosa količine toplote q veći, prethodna jednačina se svodi na

$$T(y_0,t) = \frac{q}{vd\sqrt{4\pi\lambda c\gamma t}} \exp\left(-\frac{y^2}{4at} - bt\right) \quad (3)$$

i ova jednačina predpostavlja da je toplotni fluks duž ose x nula. Za slučaj da je najveća brzina hlađenja u zoni vara, može se pisati $y=0$ i zanemariti taj član u eksponentu, te je

$$T(t) = \frac{q}{vd\sqrt{4\pi\lambda c\gamma t}} \quad (4)$$

Pri zavarivanju bitne su veličine vremena pri kome se prolazi hlađenjem, posle zavarivanja, na temperaturama od 800 °C i 500 °C.

Do sada su se u literaturi [1-10], ovi režimi opisivali i istraživali pomoću 2D i 3D Rosenthalovog modela jednačina. Tako je za 2D model

$$t_{8,5} = \frac{q^2}{4\pi\lambda\gamma cd^2} \left[\frac{1}{(500-T_p)^2} - \frac{1}{(800-T_p)^2} \right] \quad (5)$$

gde su: d debljina materijala, q ulazna toplota, T_p temperatura predgrevanja, $t_{8,5}$ kritično vreme hlađenja, λ termalna provodnost u [$J s^{-1} m^{-10} C$], c specifična toplota u [$J kg^{-10} C^{-1}$] i γ je specifična težina u [$kg m^{-3}$].

Za 3D model za izračunavanje kritičnog vremena hlađenja u funkciji temperature predgrevanja postoji u literaturi izraz:

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

Za izbor modela pri zavarivanju se koristi jednačina

$$d_{gr} = \left[\frac{q}{\rho c} \left(\frac{1}{500-T_p} + \frac{1}{800-T_p} \right) \right]^{0.5}, \quad (7)$$

tako da se ispituje debljina trake koja se zavaruje, te ako je jednaka ili manja od veličine date izrazom (7) tada se uzima model tipa 2D, u suprotnom se koristi 3D model. Sve ovo se vrši da bi se poboljšala tačnost.

Jednačine (5) i (6) su se upotrebljavale u dugom vremenskom periodu, a da pri tome se nije pristupalo njihovom kritičkom ocenjivanju pri

praktičnim primenama gde se podrazumeva ceo opseg korišćenja promenljivih i za razne vrste zavarivanja.

U referencama [1-9] se koriste relacije (5) i (6), što dokazuje korišćenje ovih relacija sve do vremena istraživanja u ovom radu.

U manjem broju radova se konstatuje odstupanje izračunatog vremena hlađenja, ali se ne daju ispravke ni potvrde i dokazi za tačnost rešenja. Zato je zbog odstupanja u tačnosti vremena hlađenja, pri izradi British Standarda za ovu oblast zavarivanja [28], izvršena ispravka u smislu tačnijeg izračunavanja što se daje jednačinama (8) i (9) respektivno za 2D i 3D model.

$$t_{8,5} = (4300 - 4,3T_p) \frac{q^2}{d^2} \left[\frac{1}{(500-T_p)^2} - \frac{1}{(800-T_p)^2} \right] \quad (8)$$

$$t_{8,5} = (6700 - 5T_p) \times q \times \left[\frac{1}{500-T_p} - \frac{1}{800-T_p} \right] \quad (9)$$

Kroz primenjena istraživanja numeričkim izračunavanjima pronalazi se da i relacije (8) i (9) na nekim delovima opsega korišćenja znatno odstupaju.

3. Apoksimativno određivanje temperature predgrevanja primenom metode Lagranžeove interpolacije

Za tačno određivanje kritičnog vremena hlađenja i temperature predgrevanja autor ovog rada je sa koautorima u priloženim radovima pored egzaktnog izračunavanja primenjivao i iterativne metode kod rešavanja transcendentnih jednačina. Ova rešenja se mogu naći i grafičkim putem ali to nije uvek dobar slučaj kada se radi o pripremi tehnologije raznih zavarivanja.

Zato će se relacija (3) rešavati tako što će se transcendentni deo koji sadrži kvadratni koren i eksponencijalnu funkciju aproksimirati primenom Lagranžeove interpolacije kako je to ilustrovano u referencama [25-34]. Pošto se kod većine zavarivanja proces $T(t)$ završava do vremena od 50 sekundi to će se posmatrati ovaj opseg za aproksimiranje kroz sledeći primer.

Primer 1

Projektovati zavarivanje čeličnih limova debljine 7,4mm i unete količine toplote $q_1=13610 J/cm$. Izračunati optimalnu temperaturu predgrevanja čeličnog materijala kako bi se dobio kvalitetan var a da se pri tome ne remeti struktura osnovnog materijala u proizvodu koji se zavaruje. Koristi se čelik kritične brzine hlađenja 15 °C/s.

Da bismo došli do brzine hlađenja, ona je sada vodeća i ne uzima se u obzir kritično vreme



hlađenja $t_{8/5}$, jednačinu (3) iz ovog rada ćemo diferencirati po t čime se dobija

$$W_0 = \frac{q}{vd\sqrt{4\pi\lambda cyt}} \exp\left(-\frac{y^2}{4at} - bt\right) \frac{\sqrt{t}}{t} \left[\left(\frac{y^2}{4at^2} - b\right) \sqrt{t} - \frac{1}{2\sqrt{t}} \right] \quad (10)$$

što posle svođenja i izvlačenja dela za temperaturu T daje

$$W_0 = T(y,t) \left[\frac{1}{2t} \left(\frac{y^2}{2at} - 1 \right) - b \right] \quad (11)$$

Relacija (11) definiše brzinu hlađenja materijala bez ograničenja ona će poslužiti da se izračuna temperatura predgrevanja. Za slučaj $y=0$, jednačina (11) postaje

$$W_0 = -T(t) \left[\frac{1}{2t} + b \right] \quad (12)$$

U relaciji (12) koja je posve originalna budući da sadrži osnovni izraz za temperaturu T proizilazi da izraz u srednjoj zagradi faktički predstavlja "operator diferenciranja". Na ovaj način je omogućeno da se na skraćeni način izračunava brzina hlađenja, a preko nje i drugi potrebni elementi sve do temperature predgrevanja.

Problem u osnovi je što se u izrazu za temperaturu javlja kvadratni koren i eksponencijalni član što jednačinu čini transcendentnom. Ta jednačina se može rešavati grafički, iterativno ili primenom nekih gotovih paketa koji se koriste u računarima.

$$P_3(t) = 0,419 \frac{(t-20)(t-35)(t-50)}{(5-20)(5-35)(5-50)} + 0,174 \frac{(t-5)(t-35)(t-50)}{(20-5)(20-35)(20-50)} + 0,109 \frac{(t-5)(t-20)(t-50)}{(35-5)(35-20)(35-50)} + 0,075 \frac{(t-5)(t-20)(t-35)}{(50-5)(50-20)(50-35)} \quad (16)$$

što posle sređivanja daje

$$P_3(t) = -0,000007359 t^3 + 0,000841545 t^2 - 0,03350835 t + 0,56641575 \quad (17)$$

Funkcija data izrazom (17) aproksimira naš transcendentni član jednačine (14) sa nekom greškom koja mora biti tehnološki opravdana, s jedne strane, a s druge strane ona mora analitički biti rešiva. U ovom slučaju pošto se radi o polinomu trećeg stepena on je rešiv pomoću poznatih, u matematičkoj teoriji, Kardanovih obrazaca.

Tako se može naći vreme t_8 koje predstavlja vreme kada na $T(t)$ dijagramu se dostigne vrednost od 800°C , kao i vreme t_5 kada se postiže vrednost temperature od 500°C , čija razlika određuje dobro poznato kritično vreme hlađenja u terminu poznato kao $t_{8/5}$.

Zato ćemo mi za naš primer 1 izdvojiti poznate elemente od ovih koji treba da se aproksimiraju, tako da jednačina (3) postaje

$$T(t) = k \frac{e^{-bt}}{\sqrt{t}} \quad (13)$$

što posle smene poznatih veličina daje

$$T(t) = 4015 \frac{e^{-bt}}{\sqrt{t}} \quad (14)$$

Iz jednačine (14) se vidi da je promenljiv deo sa kvadratnim korenom i eksponencijalni član, te ćemo izvršiti aproksimaciju pomoću Lagranževog interpolacionog polinoma III stepena kako bismo mogli lakše da analitički rešavamo projektni zadatak.

U opštem slučaju za nepoznatu funkciju $f(x)$ koja je zadata tabelarno sa pripadajućim numeričkim vrednostima, kod Lagranževog interpolacionog polinoma [25-34], određuje se rešenje u obliku polinoma:

$$y = \sum_{i=0}^m a_i x^i \quad (15)$$

gde se određuju nepoznati koeficijenti a_i .

Za različite vrednosti vremena t izračunava se vremenski zavistan član jednačine (14) i tako izabranim parovima, posle izračunavanja grešaka aproksimacije i većih numeričkih izračunavanja, (5;0,419), (20;0,174), (35;0,109) i (50;0,075) formira se Lagranžev interpolacioni polinom oblika:

Ali, da bismo izveli obrazac za brzinu hlađenja potrebno je polinom (17) diferencirati po t , tako da se dobija izraz

$$W(t) = -0,000022077 t^2 + 0,00168309 t - 0,03350835 \quad (18)$$

Kod izračunavanja vrednosti izraza (17) i (18) potrebno ih je pomnožiti konstantom $k=4015$ kako bismo dobili nominalne veličine za pravu temperaturu, odnosno za brzinu hlađenja.

U Tabeli 1 za naš primer zavarivanja iz prakse su date vrednosti za temperature hlađenja i brzine hlađenja, gde je sa "T" označena tačna vrednost a sa "A" aproksimativna.



Tabela 1. Vrednosti temperature i brzine hlađenja za egzaktno i približno dobijene Lagranževim interpolacionim polinomom

$t(s)$	Temperatura $T^T(t)(^{\circ}C)$	Temperatura $T^A(t)(^{\circ}C)$	Brzina hlađenja $W^A(t) / W^T(t)(^{\circ}C/s)$
10	1120	1236	-58/-70
15	859	916	-53/-39
20	698	696.7	-35/-26
25	586	561	-21/-19
30	506	481	-11.6/-14.76
35	438	435.4	-6.6/-11.7
40	385	405	-6.05/-9.6
45	341	369	-9.93/-8.06
50	301	301.1	-18.25/-6.78
55	272	180	-31/-5.87
60	245	17.7	-48.2/-5.1

Napomena: indeksom "T" označena tačna vrednost a sa "A" aproksimativna

U navedenoj tabeli pored temperatura su date i brzine hlađenja respektivno za tačan izraz i za aproksimacioni interpolacioni polinom III stepena. Studiranjem nominalno dobijenih rezultata vidi se da su temperature približne, dovoljno za inženjersku praksu u ovom tehnološkom slučaju, međutim primetno je veliko odstupanje u brzinama hlađenja.

Tabela 2 daje prikaz relativnog procentualnog odstupanja tačne i aproksimacione temperature, što je u dozvoljenim granicama za inženjersku praksu. Zbog odstupanja brzina hlađenja (odnosno prvih izvoda) urađena je Tabela 3 u kojoj su predstavljena relativna procentualna odstupanja.

Tabela 2. Procentualno odstupanje tačne i aproksimacione temperature hlađenja

$t(s)$	Temperatura $T^T(t)(^{\circ}C)$	Temperatura $T^A(t)(^{\circ}C)$	Relat.greska (%)
10	1120	1236	10
15	859	916	6.6
20	698	696.7	0.2
25	586	561	4.3
30	506	481	4.9
35	438	435.4	0.6
40	385	405	5.2
45	341	369	8.2
50	301	301.1	0.0
55	272	180	33.8

Napomena: indeksom "T" označena tačna vrednost a sa "A" aproksimativna

Tabela 3. Procentualno odstupanje prvog izvoda (brzine hlađenja) tačne i aproksimacione formule

$t(s)$	Tacni prvi izvod($^{\circ}C/s$)	Aproksimacioni prvi izvod($^{\circ}C/s$)	Relat.greska (%)
10	-70	-58	20.68
15	-39	-53	35.89
20	-26	-35	34.6
25	-19	-21	10.53
30	-14.76	-11.6	21.46
35	-11.7	-6.6	43.58
40	-9.6	-6.05	-36.97
45	-8.06	-9.93	23.20
50	-6.78	-18.25	-169.2
55	-5.87	-31	-428.1
60	-5.1	-48.2	-845.1

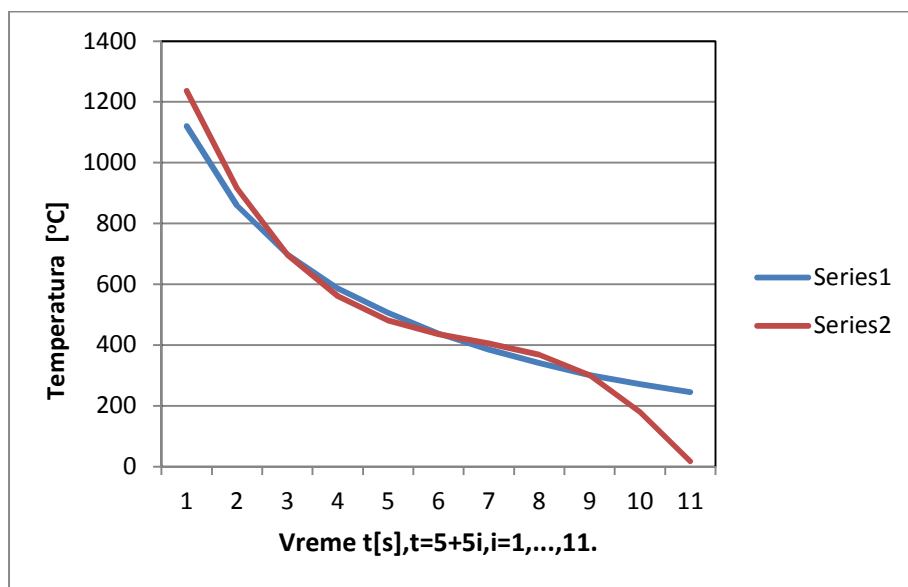
Napomena: indeksom "T" označena tačna vrednost a sa "A" aproksimativna



Uvidom u vrednosti relativnog odstupanja u procentima za brzine hlađenja, tj. prvih izvoda interpolacionog polinoma, konstatuje se velika pogreška u izračunavanju prvog izvoda iako je funkcija iz izraza (18) diferencijabilna i ispunjava sve uslove za diferenciranje po referencama iz priloga ovog rada. Tako se i čvrnoj tački interpolacionog polinoma za vreme od 50 s ima relativno odstupanje od oko 170%, pri 55s čak 428% što je nedopustivo veliko odstupanje. Prosečno odstupanje brzine hlađenja u opsegu 10s do 50 s iznosi 44°C/s što direktno ima

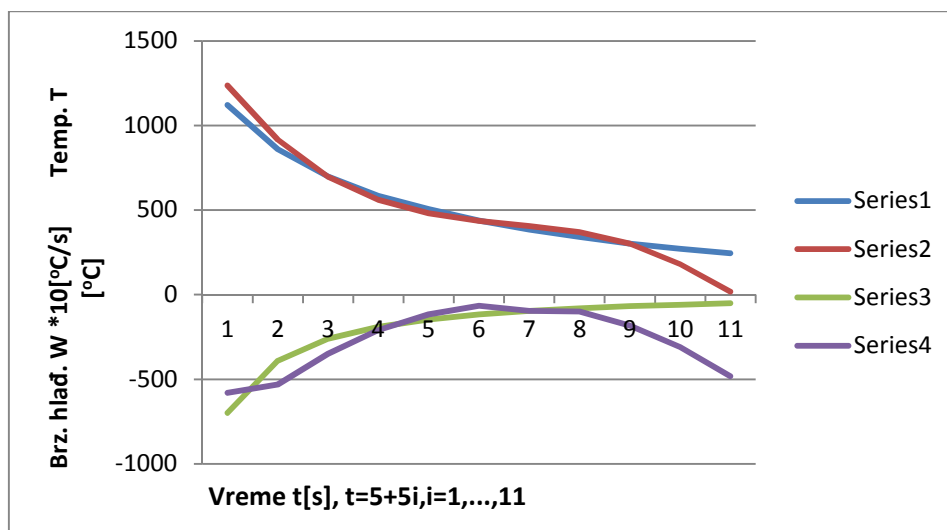
za posledicu netačno određivanje temperature predgrevanja.

Problem odstupanja brzina hlađenja dovodi u pitanje tačnost diferenciranja, te da bi se to istražilo konstruisaćemo pripadajuće grafičke zavisnosti za temperature hlađenja i brzine hlađenja koje su numerički date u Tabelama 1 i 2. Na Slici 1. su dati grafici za temperature hlađenja i oni pokazuju opravdanost i valjanost aproksimacije što su potvrdile i vrednosti iz ranije navedenih tabela, gde posle 50s interpolacioni polinom daje značajnija odstupanja (kriva 2).



Slika 1. Grafički prikaz temperature hlađenja po tačnoj (kriva 1) i aproksimacionoj formuli (kriva 2)

Slika 2. prikazuje, pored temperatura hlađenja i grafičke zavisnosti za brzine hlađenja što i želimo da još detaljnije ispitamo.

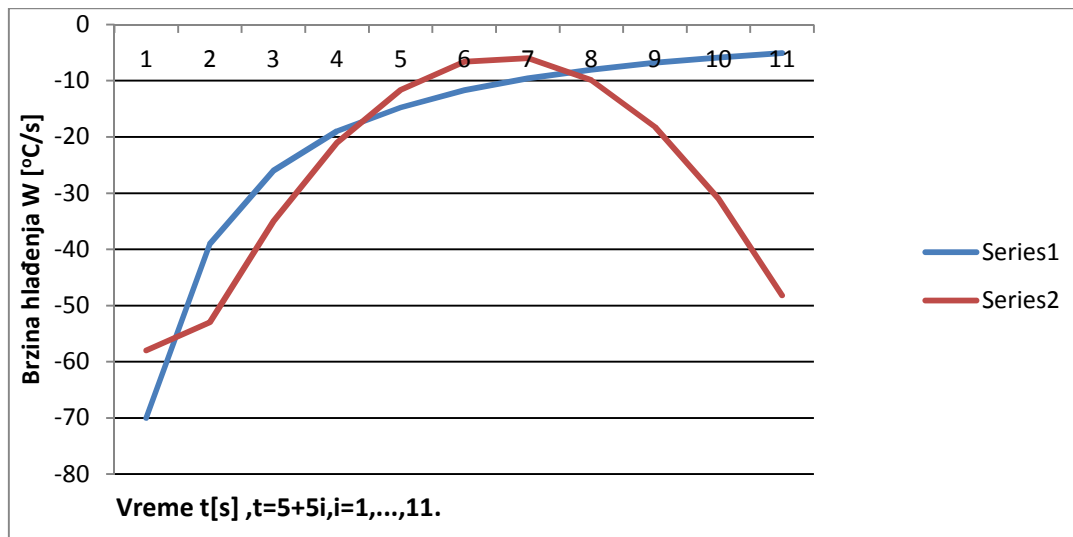


Slika 2. Grafički prikaz tačnih (kriva 1) i aproksimativnih (kriva 2) temperatura i tačne brzine hlađenja (kriva 3) i aproksimativne brzine hlađenja (kriva 4)



Na Slici 2.kriva "3" predstavlja prvi izvod tačne temperature, a kriva "4" predstavlja prvi izvod aproksimacione krive za temperaturu i dokazuje se netačnost.Radi bolje vidljivosti vrednosti za brzine hlađenja su povećane deset puta, to je negativni

deo ordinatne ose.Ovo će se potkrepiti grafikom sa slike Slike 3, gde je veoma primetno veliko odstupanje krive "2" koja predstavlja prvi izvod interpolacionog polinoma (17) u obliku (18).



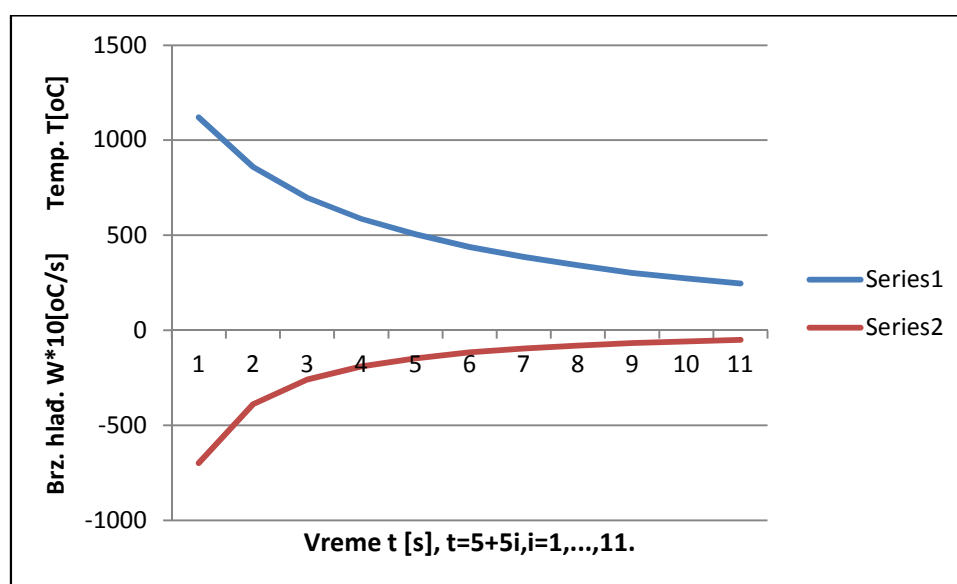
Slika 3. Grafici prvih izvoda (brzina hlađenja) po tačnoj (kriva 1) i interpolacionoj formuli (kriva 2)

Sa Slike 3 se vidi da brzina hlađenja dobijena diferenciranjem interpolacionog polinoma se smanjuje, dostiže ekstremum, i ponovo raste. Sve ovo pored velikog nominalnog odstupanja u odnosu na tačnu krivu, stvara još veći problem budući da ponovo raste posle ekstrema. Zbog ovoga bi se dobila dva rešenja kada bi se rešavala kvadratna jednačina i to bi dovelo do zabune. Nažalost oba rešenja bi bila netačna, a za male vrednosti brzine hlađenja ne bi se našlo rešenje.

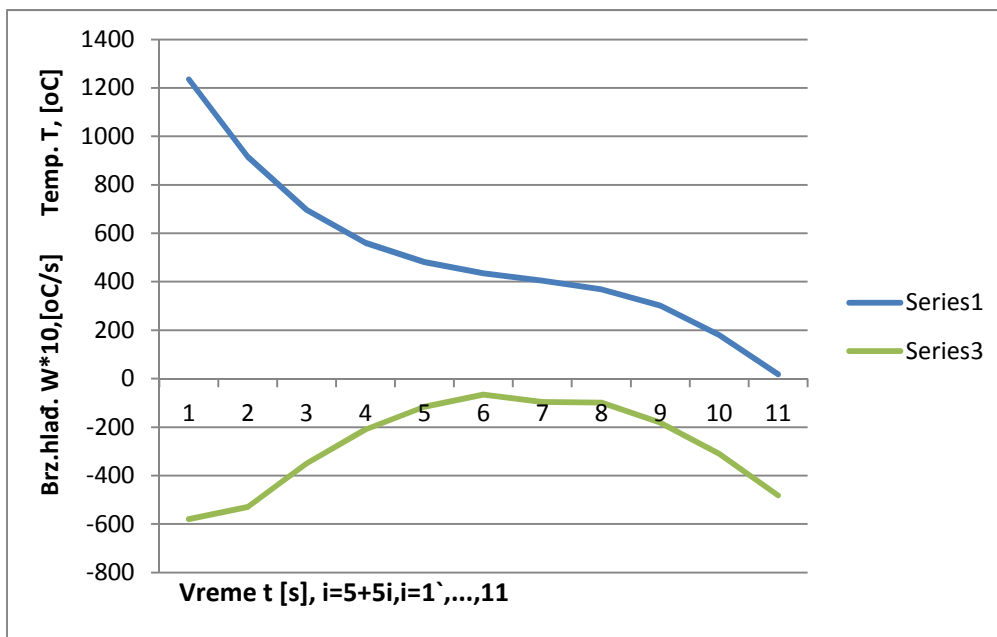
4. Analiza rezultata i diskusija

U prethodnom delu rada je aproksimirana zavisnost za temperaturu $T(t)$ čime su stvoreni uslovi za prosta analitička izračunavanja temperature u funkciji vremena i kritičnog vremena hlađenja.

Prikazaće se posebni grafici za temperaturu i brzinu hlađenja za egzaktne zavisnosti i aproksimacione, jer to do sada nije urađeno. Na Slici 4. je prikazan grafik za tačne vrednosti a na Slici 5. za aproksimacione vrednosti.



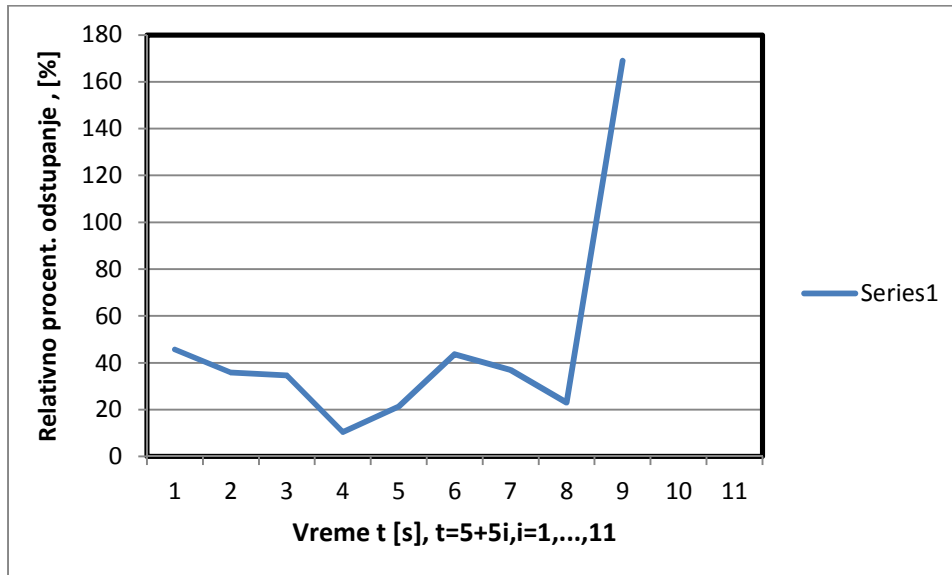
Slika 4. Grafičke zavisnosti za temperaturu (kriva 1) i brzinu hlađenja (kriva 2) po tačnim formulama



Slika 5. Grafički prikaz aproksimativnog modela za temperaturu (kriva 1) i brzinu hlađenja (kriva 2)

Za grafike sa Slika 4 i 5 važi da je za brzinu hlađenja zbog povećanja rezolucije uvećane su vrednosti za deset puta. Zbog potvrđivanja netačnosti prvih izvoda interpolacionih polinoma konstruisaće se grafik dat na Slici 6. gde je

ilustrovan relativni procentaulni podatak netačne vrednosti u odnosu na tačnu koja je dobijena diferenciranjem transcendentne jednačine za temperaturu (3) predstavljene izrazom (10).



Slika 6. Grafik procentualnog odstupanja prvog izvoda (brzine hlađenja) egzaktnog izraza i izvoda aproksimacionog polinoma u funkciji vremena

Grafik sa Slike 6. dokazuje neispravnost nalaženja prvog izvoda koja ne može biti tolerisana jer pokazuje veliku netačnost kada se diferencira dobijena formula nastala putem interpolacije. Ovo je autor ovog rada utvrdio da se to isto dešava i kod drugih inetrpolacionih polinoma. To se isto potvrđuje i analitički kada se izraz za brzinu hlađenja izjednači sa zadatom vrednošću, najčešće ne može

se naći tačno rešenje, a ponekad se dobijaju konjugovano kompleksna rešenja.

Radi rešavanja nastalog problema, autor ovog rada, na bazi višegodišnjih iskustava, uvešće jednu posve novu invenciju, tako što budući da je

$$T(t) = P_3(t) + R \quad (19)$$

a R je dozvoljiva greška aproksimacije, to izraz za brzinu hlađenja je sada



$$W_0 = -P_3(t) \left[\frac{1}{2t} + b \right] \quad (20)$$

Za primer br.1, se zamenom da je $W_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C/s}$, i za $P_3(t)$ iz (17) dobija vrednost za vreme t_p u iznosu od 29.5s karakteristično i ključno u određivanju temperature predgrevanja. Smenom ove vrednosti za t u (17) dobija se temperatura

$$T(t) = 500^\circ\text{C} \quad (21)$$

čija razlika do temperature od $800 \text{ }^\circ\text{C}$ predstavlja temperaturu predgrevanja

$$T_p = 800 - 500 = 300^\circ\text{C} \quad (22)$$

Zavarivanje iz primera 1 treba prethodno ostvariti tako da se izvrši predgrevanje na temperaturi 300°C . Ovim je na originalan način, i pored problema sa netačnim diferenciranjem, predstavljen originalan tačan analitički algoritam koji će koristiti u rešavanju problema iz termije uvođenjem novog tipa diferenciranja. Novo diferenciranje se primenjuje od izraza dobijenog posle diferenciranja tačnog izraza $T(t)$, tako što se tim novim izrazom, a bez $T(t)$, množi interpolacioni polinom dobijen Lagranževom interpolacijom.

Za slučaj primene izraza (18) dobile bi se dve vrednosti temperature predgrevanja, što stvara problem odluke koja da se uzme, s jedne strane, i velika odstupanja u posmatranom intervalu, prosečno od oko 44%, s druge strane, onemogućavaju primenu u praksi. To bi za posledicu imalo loš var sa visokim procentom ugljenika i krtnu strukturu po [4].

5. Zaključak

Ovaj rad je rezultat teoretsko primenjenih istraživanja u dužem vremenskom periodu. Obradeno je i prezentovano kretanje u teoriji i praksi, kada je pronađeno da ima više formula za izračunavanje ključnih veličina u termiji, kojom prilikom je utvrđeno da ne daju precizne rezultate na svim segmentima izračunavanja koji su potrebni u termiji kod zavarivanja. Te formule se i danas navode u brojnim radovima, knjigama pa čak i u disertacijama bez identifikovanja tačnosti rezultata. A kasnije se primenju gotovi kupljeni softverski paketi za simulaciju i izračunavanje kako bi se stvorio privid primene postojeće teorije. Autor ovog rada je sa koautorima i sam u brojnim svojim

Literatura

- [1] Welding Handbook, Vol. 3, 7th ed., American Welding Society, Miami, FL, 1980, pp. 170–238.
- [2] Welding Handbook, Ninth Edition, Volume 4, Materials and Applications, Part 1, American Welding Society, Annette O'Brien - Editor, Miami, FL, USA, p.860, 2011
- [3] Sindo Kou, Welding Metallurgy, Second Edition, Wiley-Interscience, Hoboken, New Jersey, USA, p.466, 2003

radovima [35–40] ukazivao na to nudeći nove i veoma precizne zavisnosti i postuke za izračunavanje. Budući da je za rešavanje transcendentnih jednačina autor koristio iterativne metode koje su davale precizne rezultate karakterističnih veličina i to kritičnog vremena hlađenja i temperature predgrevanja [40] gotovo istih kao što to daje FEM metoda. To znači da rezultate koje je autor ovog rada dobio u ponuđenoj referenci, gotovo da su isti kao oni dobijeni FEM metodom.

Zato je autor u ovom radu prišao numeričkom izračunavanju, koja zamenjuju transcendentne jednačine za temperaturu i brzinu hlađenja, primenom Lagranževove interpolacije. Ova interpolacija je dala korisne rezultate za izračunavanje temperature hlađenja. Međutim, nažalost kada se pokušalo izvesti izraz za brzinu hlađenja, diferenciranjem interpolacionog polinoma, otkriveno je i pored diferencijabilnosti izraza prvi izvodi su bili neprecizni. Taj nedostatak je uočen i kod aproksimacije sa drugim polinomima.

Ovaj problem je nagnao autora ovog rada da jednom novom ivencijom dobije tačan prvi izvod (što predstavlja brzinu hlađenja), tako što je direktno množio interpolacioni polinom izdvojenim izrazom za diferenciranje koji potiče od matične funkcije. Rezultati su bili ispravni što je potvrđeno brojnim tabelama i graficima. Dobijeni analitički izrazi za temperaturu hlađenja i brzinu hlađenja nisu transcendentni, lako su rešivi kod primenjenih istraživanja i primene u praksi.

Zahvalnost

Autor rada se zahvaljuje glavnom uredniku časopisa Zavarivanje i zavarene konstrukcije na uspešnom vođenju i kreiranju profila ovog časopisa, kao i ostalim saradnicima na visokoj profesionalnosti i spremnosti za saradnju. Autor rada želi da ovaj rad posveti Isacu Newton-u, budući da je njegovo veličanstvo uvelo u matematiku još pre 350 godina elemente više matematike kroz poznatu u literaturi Newton Lajbnicovu relaciju za diferenciranje koja je osnov za nalaženje izvoda i integrala.

- [4] H. Schuman: Metallography, Leipzig, VEB Deutcher Verlag fur Grunstoffindustrie (1989)
- [5] Shamov, N.A., et al., High Frequency Metal Welding, Masinostroenie, Leningrad, Russia, 199
- [6] 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,
- [7] Rykalin, N. N., Nikolaev, A. V. Welding Arc Heat Flow. Welding in the World, 9, 3/4(1971), pp.112-132.



- [8] Rosenthal, D. The Theory of Moving Source of Heat and its Application to Metal Transfer. Transactions ASME, 43, 11(1946), pp. 849-866.
- [9] Christensen B.N., Davies V.D.L., Gjermundsen K., Distribution of temperatures in arc welding, British Welding Journal, February (1965), p.p. 54 to 75
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 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
- [13] Lazic, V. N., et al.: Numerical Analysis of Temperature Field During Hardfacing... Thermal Science: Vol. 18, Suppl. 1, (2014), pp.113-120
- [14] Meseguer-Valdenebro, J.L. et al.: Calculation of $t_{8/5}$ by Response Surface. Termale Science:Vol. 18, Suppl. 1, (2014), pp. S149 - S158
- [15] Jovičić R., Prokić Cvetković R., Popović O., Milošević, Metode za izračunavanje temperatura predgrevanja pri zavarivanju čelika povišene i visoke čvrstoće, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, br.3, 2016, pp.113 to 119
- [16] Jovičić R., Erić Cekić O., Petrović S., Štrbački S., Jovičić D., Definisane parametara zavarivanja pomoću vremena hlađenja u intervalu temperatura 800 do 500 °C, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, br.4, 2016, pp.149 to 156
- [17] Ito, Y., Bessyo, K., Weld crackability formula of high strength steels, J. Iron and Steel Inst., Jap., No 13., 1972.
- [18] Yurioka N., Tadashi K., A Chart Method to Determine Necessary Preheat Temperature in Steel Welding, Quarterly Journal of Japan Welding Society, Vol.13, No.3, pp.347 to 357, 1995
- [19] Yurioka N., Physical Metallurgy of Steel Weldability, ISIJ International, Vol.41, 2001, no.6, pp. 566-570
- [20] Kasuza T., Yurioka N., Determination of Necessary Preheat Temperature to Avoid Cold Cracking under Varying Ambient Temperature, ISIJ International, Vol.35, 1995, No.10, pp.1183-1189
- [21] Merchant S.Y., Investigation on Effect of Heat Input on Cooling Rate and Mechanical Property (Hardness) of Mild Steel Weld Joint by MMAW Process, IJMERE, Vol.5, Iss.3, Mar. 2015, pp.34-41
- [22] Merchant S.Y., An Overview on Effect of Preheating on Cold Cracking of Low Alloy Steel and Stainless Steel Weld Joint, IJAIEEM, Vol.4, Issue 4, April 2015, pp.70-77
- [23] Poorhaydari K., Patchett B.M., Ivey D.G., Estimation of Cooling rate in the Welding of Plates with Intermediate Thickness, Welding Research, October 2005, pp.149-155 BRITISH STANDARD BS EN 1011-2:2001, Incorporating Amendment No.1, Welding- recommendations for welding of metallic materials, Part 2: Arc welding of ferritic steels, The European Standard EN 1011-2:2001
- [24] Pejović T., Matematička analiza II, treće izdanje, Naučna knjiga, Beograd, 1961, Srbija
- [25] Pejović T., Matematička analiza V, peto izdanje, Građevinska knjiga, Beograd, 1978, Srbija
- [26] Mitrinović S.D., Kečkić D.J., Jednačine matematičke fizike, Građevinska knjiga, 1972, Beograd, Srbija
- [27] Mitrinović S.D., Uvod u specijalne funkcije, Matematički metodi u fizici i tehnici, Građevinska knjiga, Beograd, 1972, Srbija
- [28] Mihailović D., Janić R.R., Elementi matematičke analize, četvrto izmenjeno izdanje, Naučna knjiga, Beograd, 1974, Srbija
- [29] Mitrinović S.D., Kompleksna analiza, treće izmenjeno i dopunjeno izdanje, Građevinska knjiga, Beograd, 1973, Srbija
- [30] Demidovič P. B., Maron A. I., Computational Mathematics, Mir Publishers, Moscow, 1973
- [31] Milovanović V.G., Đorđević Ž. Radoslav, Matematika za studente tehničkih fakulteta, I deo, IP Nauka, 1992, Beograd, Srbija
- [32] Milovanović V.G., Numerička analiza I deo, Univerzitet u Nišu, 1979, Niš, Srbija
- [33] Milovanović V.G., Numerička analiza II deo, treće izdanje, Naučna knjiga, 1991, Beograd, Srbija
- [34] Milićević, M., Radaković, Z., Quality Improvement of Steel Pipes by Seam Welding with New Magneto-Dielectric Impeder, Materials Transactions, 47, 06, The Japan Institute of Metals, (2006), 1464-s to 1468-s.
- [35] M. Milicević and V. Milicević: Impeder for HF Inductive Welding of Steel Tubes, IEE Proceedings, Science, Measurement and Technology, vol.149.(2002), No.3, p.p. 113-116
- [36] M. S. Milićević and V. M. Milićević: European Transactions on Electrical Power, 14 No. 2 (2004) 111-118.
- [37] Milićević M. et al., Defects identification of the high frequency inductive welding, Mining and Metallurgy Engineering Bor, 2006, no.2
- [38] Nejković M.V., Milićević S.M., Radaković Z., Temperature distribution in thermal processes, Welding in the World, DOI 10.1007/s40194-018-0672-9, (2018)
- [39] Nejković M.V., Milićević S.M., Radaković Z., New method of determining of cooling time and preheating temperature in Arcwelding, Thermal Science, DOI/10.2298/ TSC11 80330297N, (2018)
- [40] Vukićević M., Petrović Z., Bjelić M., Đurić S., Statički i dinamički modeli u zavarivanju, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, br.1, 2009, str.159 do 164
- [41] Katavić B., Jegdić B., Odanović Z., Hut M., Mladenović M., Jaković D., Ristivojević M., Predviđanje optimalnih parametara interventnog reparaturnog zavarivanja čelika 13CrMn4 analitičkim metodama, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, br.3, 2010, str. 91 do 96



IIW - najava događaja – jul 2021

Poziv za učešće na virtuelnoj izložbi fotografija umetničkih radova nastalih zavarivanjem u organizaciji Međunarodnog instituta za zavarivanje (IIW)

WELDED ART
PHOTOGRAPHIC EXHIBITION
THE ARTISTIC SOUL OF WELDING

Sledeća Godišnja skupština Međunarodnog instituta za zavarivanje (IIW), 74. po redu, bila je planirana za kraj juna 2021. godine, međutim, zbog pandemije Covid-19, Međunarodni institut za zavarivanje je doneo odluku da zameni Godišnju skupštinu IIW 2021 u Đenovu on-line verzijom Godišnje skupštine IIW, koja će se održati u periodu od 11. do 17. jula 2021. godine. Na isti način održana je i ovogodišnja, 73. Godišnja skupština IIW, gde se pokazalo da je moguće na ovaj način organizovati i održati sve glavne i prateće aktivnosti koje su uobičajene za ovaj skup. Uprkos pandemiji, IIW je uspeo da obavi sve svoje aktivnosti kroz virtuelno radno okruženje.

Jedna od pratećih aktivnosti Godišnje skupštine IIW 2020 bila je i održavanje umetničke izložbe na temu zavarivanja, koja je takođe bila virtuelna. Ljudi iz celog sveta, umetnici, zanatlije, inženjeri, pa čak i učenici predstavili su svoje umeće i kreativnost. U ovome se ogleda ideja organizatora da izložba bude platforma za ljude koji žele da prikažu svoje sposobnosti i umetnički se izraze - bilo da je reč o zanatskoj veštini, čistoj kreativnosti i ličnom izrazu autora ili umetničkom delu koji ima za cilj da saopšti neku ideju i prenese emociju. Kroz održavanje umetničkih izložbi zavarivanja ili takmičenja u zavarivanju, IIW podstiče ljude da se bave umetnošću, zanatom ili profesijom zavarivanja. Spoj zavarivanja i umetnosti donosi brojne pogodnosti. Kao hobi, pomaže u poboljšanju mentalnog zdravlja, sjajno je sredstvo za poboljšanje slike o zavarivanju, a u nekim slučajevima donosi i prihod ljudima sa odgovarajućim umetničkim veštinama.

Kako je izložba ocenjena kao veoma uspešna, najavljeno je njeno ponovno održavanje u virtuelnom režimu tokom on-line Godišnje skupštine IIW 2021 kroz fotografije eksponata - zavarenih umetničkih dela. Kao i prethodnog puta, učesnici Godišnje skupštine će moći da uđu u on-line prostoriju u kojoj će biti prikazane fotografije zavarenih umetničkih dela, a takođe će moći da preuzmu i digitalni katalog koji će sadržati fotografije radova i podatke o umetnicima.

Ovo je ujedno i poziv za sve zainteresovane koji zavarivanje koriste u izradi različitih umetničkih dela, da učestvuju na ovoj izložbi u julu 2021. godine. Kategorije su „Zavarena umetnička dela“, „Nove tehnologije spajanja“, „Mladi umetnici“, „Fotografija“, „Instruktori i studenti/đaci“.

Važno je napomenuti da ova izložba nije takmičenje, već je zamišljena da bude platforma za one koji imaju želju da pokažu svoje veštine i umetnički se izraze, neformalno i bez pritiska. Osnovna svrha ove inicijative jeste da prikaže fleksibilnost i svestranost discipline zavarivanja i kako ona postaje prihvaćena kao još jedan umetnički medijum preko koga može da se stvori mnogo različitih dizajna i oblika.

Budući da je reč o fotografskoj izložbi radova, nema potrebe da umetnici prisustvuju, a nema komplikacija ni oko transporta i postavljanje glomaznih eksponata. Procedura prijavljivanja je jednostavna i ne iziskuje mnogo vremena. Ukratko, potrebno je poslati fotografiju, naziv i kraći opis vašeg odabranog umetničkog rada nastalog zavarivanjem, kao i fotografiju i kratku biografiju autora.

Možete se prijaviti za učešće do 12. februara 2021. godine, a više informacija i katalog sa protekle izložbe potražite na našem sajtu (<http://www.duzs.org.rs/2020/12/17/izlozba-zavarenih-umetnickih-dela-poziv-za-predaju-radova/>).



Francois Njock Bayock^{1a}, Paul Kah^{1b}, Belinga Mvola^{1c}, Pavel Layus^{1d}, Xiaoyu Cai^{2e}

Characterization of bainite-ferrite structures formed on the heat-affected zone of a dissimilar welds of high-strength steel (S700MC/S960QC) and their dependency on cooling time

Karakterizacija beinitno-feritnih struktura formiranih u zoni uticaja toplote zavarenih spojeva različitih čelika visoke čvrstoće (S700MC/S960QC) i njihova zavisnost od brzine hlađenja

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK / UDC:

Prezentovano u okviru 72. IIV godišnje Skupštine i međunarodne konferencije održane u Bratislavi-Slovačka 07-12. Jula 2019

Rad primljen / Paper received:

Oktobar 2020.

Prevod izvornog rada na srpski jezik: Z. Odanović

Ključne reči: Zavarivanje različitih materijala, S960QC, S700MC, zrnasti beinit, temperovani martenzit

Abstract

Modern steel structures and joints must satisfy various increasingly demanding requirements such as high yield strength, improved cross section to mass ratio, and desirable ductile-to-brittle transition properties. Consequently, joining different types of high-strength steels has become an attractive option from the cost perspective and for weight and corrosion reduction. In dissimilar welding, however, there remains a need for better understanding of discrepancies in microstructure formation resulting from asymmetric heat distribution. In this study, a characterization of the transformation of bainite, ferrite, and martensite in the microstructure of the heat affected zone (HAZ) formed by a cooling time of 10 kJ/cm of heat input was carried out for dissimilar high-strength joint steels (S700MC/S960QC). The characterization was performed by scan electron microscopy (SEM) sampling, the images of which were analyzed by ImageJ Pro and evaluated by volume fraction of block – like granular bainite (GB). The alloy elements composition close to the fusion line of both materials was then assessed using energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). The results showed a strong presence of GB, which had about 70% volume fraction in S700MC at 615 °C, and which comprised formations of lower bainite and retained austenite (RA) at 420 °C. The presence of 55% block GB was observed at 470 °C in S960QC, which was caused by the formation of tempered martensite (TMA) at 400 °C. Presence of 1.3Ni,

Adresa autora / Author's address:

¹Mechanical Engineering, Welding Technology Laboratory, Lappeenranta-Lahti University of Technology, Lappeenranta, Finland, ^afrancois.njock.bayock@lut.fi, ^bpaul.kah@lut.fi, ^ceric.mvola.belinga@lut.fi, ^dpavel.layus@lut.fi

²State Key Laboratory of Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin Shi, China

^exycail@hit.edu.cn

Keywords: dissimilar welding, S960QC, S700MC, granular bainite, tempered martensite

Rezime

Moderne čelične structure i spojevi moraju da zadovolje različite zahteve kao što je visoki napon tečenja, visok odnos poprečnog preseka prema masi komada, i zadovoljavajući odnos osobina prelaznih osonina plastičnosti i krtosti. Na taj način, spajanje različitih tipova čelika visoke čvrstoće je postalo atraktivno sa stanovišta troškova i smanjenja težine i korozije. Pri zavarivanju različitih materijala, postoji potreba za bolje razumevanje odstupanja nastajanja mikrostruktura kao rezultat asimetrične raspodele toplote. U ovoj studiji, karakterizacija transformacije beinita, ferita i matrenzita u mikrostrukturi zone uticaja toplote (ZUT), nastale hlađenjem pri unosu toplote od 10 kJ/cm, je izvedena za spojeve različitih čelika visoke čvrstoće (S700MC/S960QC). Karakterizacija je izvršena skenirajućom elektronskom mikroskopijom (SEM), analiza slika je vršena sa softverom ImageJ Pro i određivan je udeo zapreminskog udela faza, kao što je zrnasti beinit (GB). Sadržaj legirajućih elemenata uz liniju spoja oba materijala je određen primenom energo – disperzivne spektroskopije X zracima (EDS). Rezultati pokazuju značajno prisustvo GB, koji je imao oko 70% zapreminskog udela u čeliku S700MC pri 615 °C i koji se sastoji od donjeg beinita i zaostalog austenite (RA) na 420°C. Prisustvo od 55% GB je konstatovano pri 470°C kod čelika S960QC, koje je prouzrokovano stvaranjem temperovanog martenzita (TMA) na 400 °C. Prisustvo 1.3Ni, 0.4Mo, i 1.6Mn u zoni porasta



0.4Mo, and 1.6Mn in the coarse grain heat affected zone (CGHAZ) of S700MC confirmed the risk of brittle failure on the S700MC side due to the high presence of carbide and ferrite in the GB.

1. Introduction

The specifications of new steels, especially high strength, provide the desirable qualities of strength, hardness, and ductility at reduced weight, which significantly extends the range of possible applications. For example, in assembly of some parts of vehicle structures, there is the challenge of maintaining structural strength while simultaneously reducing the mass of the vehicle to improve fuel consumption and environmental sustainability. Dissimilar welds between high strength steels with a maximum yield strength of 700 MPa and yield strength of 960 MPa, would meet these aims of reducing mass while maintaining strength. However, joining two materials with different thermo-mechanical, chemical and manufacturing properties has an exceptional character, and requires thorough analysis of the welding processes used, and the effects of weld joint geometry and choice of filler material. Investigation of the feasibility of submitting such materials to pre and post weld heat treatment while maintaining their beneficial chemical and mechanical characteristics is a critical task [1-3]. Welding a material such as S700MC [4], which in its production has already undergone heat treatment, and maintaining its mechanical, and chemical characteristics even after having experienced a thermal shock with S960QC is a great challenge. S960QC, whose microstructure also has low alloy elements, exhibits thermal sensitive behavior and thus analysis of essential microstructure (phase transformation) change is required, particularly in the heat affected zone during the welding process. The microstructural composition of S700MC, consists mainly of bainite-ferrite (BF), and S960QC, is composed of bainite martensite (BM). During cooling process, displacement of phase transformations occurs around and even in the austenite grains. Transformation is observed from ferrite to bainite and, bainite to martensite, with some incomplete changes called retained austenite (RA) [7,8]. Much research has investigated characterization of the microstructure of steels with a low percentage of carbon. Most such research applies heat treatment to these steels and analyzes the behavior of the phase transformation of bainite, ferrite, and martensite. In most cases, the constituents of the austenite grains are identified and the volume fraction of the phase transformation then determined. These transformations have an

zrna u zoni uticaja toplote (CGHAZ) kod čelika S700MC potvrđuje rizik nastajanja krtog loma na strani čelika S700MC, zbog visokog sadržaja karbida i ferita u GB.

1. Uvod

Karakteristike novih vrsta čelika, posebno visoke čvrstoće, obezbeđuju željene osobine visoke čvrstoće, tvrdoće i plastičnosti sa smanjenjem težine, čime se proširuje mogućnost njihove primene. Na primer, pri izradi nekih delova konstrukcija vozila, poseban izazov predstavlja zadržavanje čvrstoće konstrukcije, uz istovremeno smanjuje mase vozila, a sve da bi se smanjila potrošnja goriva i poboljšala zaštita životne okoline. Zavarivanjem čelika visoke čvrstoće sa maksimalnom granicom tečenja od 700 MPa i čelika sa granicom tečenja od 960 MPa, omogućava se zadovoljavanje zahteva za smanjenjem težine sa zadržavanjem čvrstoće. Međutim spajanje dva materijala sa različitim termo-mehaničkim, hemijskim i proizvodnim osobinama, zahteva posebnu pažnju kroz analizu i izbor procesa zavarivanja i uticaja geometrije zavarenog spoja i izbora dodatnog materijala. Ispitivanja izvodljivosti i podvrgavanja takvih materijala prethodnoj i naknadnoj termičkoj obradi uz zadržavanje povoljnih hemijskih i mehaničkih karakteristika je poseban izazov [1-3].

Zavarivanje materijala kao što je čelik S700MC [4], koji se tokom proizvodnje podvrgava termičkoj obradi i zadržava svoje mehaničke i hemijske karakteristike čak i ako se izlaže termičkim šokovima, sa čelikom S960QC, je veliki izazov. Čelik S960QC, čija mikrostruktura takođe sadrži legirajuće elemente, pokazuje termičku osetljivost, što zahteva analizu promene osnovne mikrostrukture i faznih transformacija, posebno u zoni uticaja toplote za vreme procesa zavarivanja. Mikrostruktura čelika S700MC se uglavnom sastoji od beinita i ferita (BF), a mikrostruktura čelika S960QC se sastoji od beinita i martenzita, sa nepotpuno transformisanom fazom nazvanom zaostali austenit (RA) [7,8].

Mnogi istraživači su ispitivali i vršili karakterizaciju mikrostrukture čelika sa niskim sadržajem ugljenika. U većini takvih ispitivanja primenjena je termička obrada na čelicima i analizirano su fazne transformacije beinita, ferita i martenzita. U većini slučajeva su identifikovani konstituenti austenitnih zrna i određen je zapreminski udeo faza pri transformaciji. Ove transformacije imaju važan uticaj na ponašanja prelaska plastičnog ka krtom stanju zavarenog spoja.

U ovoj studiji, zavareni uzorci su pažljivo pripremani i zatim analizirani na SEMu, da bi se dobile



important impact on the ductile to brittle factor of the weld joint. In this study, welded samples is carefully prepared, and then analyzed by sampling using SEM images, to evaluate the composition of the microstructures of the weld joint (CGHAZ and FGHAZ). Determination of volume fractions of the different grain surface was done using ImageJ Pro software. EDS analysis of the welded samples was used to determine the composition of alloy elements forming microstructures in the CGHAZ and for analysis of fusion line between the base metal and filler material. This analysis allowed the correlation between the cooling time ($t_{8/5}$), the microstructure behavior, and the mechanical properties of the weld joint to be determined.

2. Experimental Section

2.1 Materials

Dissimilar High-strength steels, namely S700MC and S960QC, and filler material X96, were welded as part of this investigation. The chemical composition of both steels and filler material is given in Table 1, which includes also the welding parameters of the welding process used. The GMAW welding was done using a robot system with protective shielding of Ar + 18% CO₂. The welded specimens had dimensions of 300 x 200 x 8 mm, and the weld was a V joint (60°) with 2 mm gap. Analysis of heat effects was carried out by varying the heat source parameters current (I), voltage (V), welding speed (s) and heat input (Q). The welding process was carried out according to the international standards ISO 1561-1-2017. The automatic robotic welding process equipment comprising an ABB IRC robot control unit, MAG torch and data acquisition control unit used in this study is illustrated in Fig. 1. A laser sensor was installed in the welding equipment to record thermal transfer data for calculation of the cooling time ($t_{8/5}$) from 800 °C to 500 °C. In the laser thermal control process, the recorded cooling time was $t_{8/5}=31$ s. The prepared samples were placed in the SEM equipment for imaging of areas of the HAZ (WM, CGHAZ and FGHAZ) of the materials. 15.0 kV magnification was used and 50.0 μm definition to enable clear identification of microstructure growth in the austenite grain. ImageJ Pro software was used to determine the volume fraction of phase transformations (GB, TMA, and RA) inside the austenite grain. Energydispersive X-ray spectroscopy (EDS) was applied to evaluate the concentration of alloyin elements close to the fusion line of both material. Analysis focused mainly on Mn, Ni, Mo, which have an impact on hardness in the HAZ of the weld joint.

mikrostrukture zavarenog spoja (zona porasta zrna u ZUTu - CGHAZ i finozrna zona u ZUTu - FGHAZ). Određivanje zapreminskog udela različitih površina zrna je izvođena primenom softvera ImageJ Pro. EDS analiza zavarenih uzoraka je primenjena za određivanje sadžaja legirajućih elemenata koji formiraju mikrostrukture u zoni porasta zrna CGHAZ i za analizu linije spoja između osnovnog metala i dodatnog metala. Ova analiza je omogućavala uspostavljanje korelacije između vremena hlađenja ($t_{8/5}$), ponašanja mikrostrukture i mehaničkih osobina zavarenog spoja.

2. Experimentalni deo

2.1 Materijali

Kao deo ovih istraživanja zavarivani su različiti čelici visoke čvrstoće i to čelik S700MC i S960QC sa dodatnim materialom X96. Hemijski sastav oba čelika i dodatnog materijala su prikazani u Tabeli 1., gde su prikazani i parametri procesa zavarivanja. Primenjen je postupak zavarivanja MAG sa zaštitnim gasom Ar + 18% CO₂. Uzorci za zavarivanje su imali dimenzije 300 x 200 x 8 mm, sa V žljebom (60°) i zazorom od 2 mm. Analiza toplotnih efekata je vršena promenom parametara izvora toplote kao što su jačina struje (I), napon (V), brzina zavarivanja (s) i unos toplote (Q). Proces zavarivanja vršen je u skladu sa internacionalnim standardom ISO 1561-1-2017.

Automatska robotizovana oprema za zavarivanje sastojala se od ABB IRC kontrolne jedinice za robota, zatim MAG gorionika i kontrolne jedinice za akviziciju podataka, što je prikazano je na Slici 1. Laserski sensor je bio instaliran na opremu za zavarivanje da bi beležio podatke prenosa toplote za proračun vremena hlađenja ($t_{8/5}$) od 800°C do 500°C i zabeleženo je vreme hlađenja od $t_{8/5}=31$ s. Pripremljeni uzorci su montirani u opremu uređaja SEMa, da bi se posmatrale oblasti ZUTa materijala (WM, CGHAZ i FGHAZ). 15.0 kV uveličanje je korišćeno i rezolucija od 50.0μm omogućavala je jasnu identifikaciju rasta mikrostrukturnih komponenti u austenitnim zrnima. ImageJ Pro softver je korišćen za određivanje zapreminskog udela faznih transformacija (GB, TMA, and RA) unutar austenitnih zrna. Energo disperzivna spektroskopija X zracima (EDS) je primenjena za određivanje koncentracije legirajućih elemenata uz liniju spoja kod oba materijala. Analiza je prvenstveno primenjena na Mn, Ni i Mo, koji imaju uticaj na tvrdoću u ZUTu zavarenog spoja.

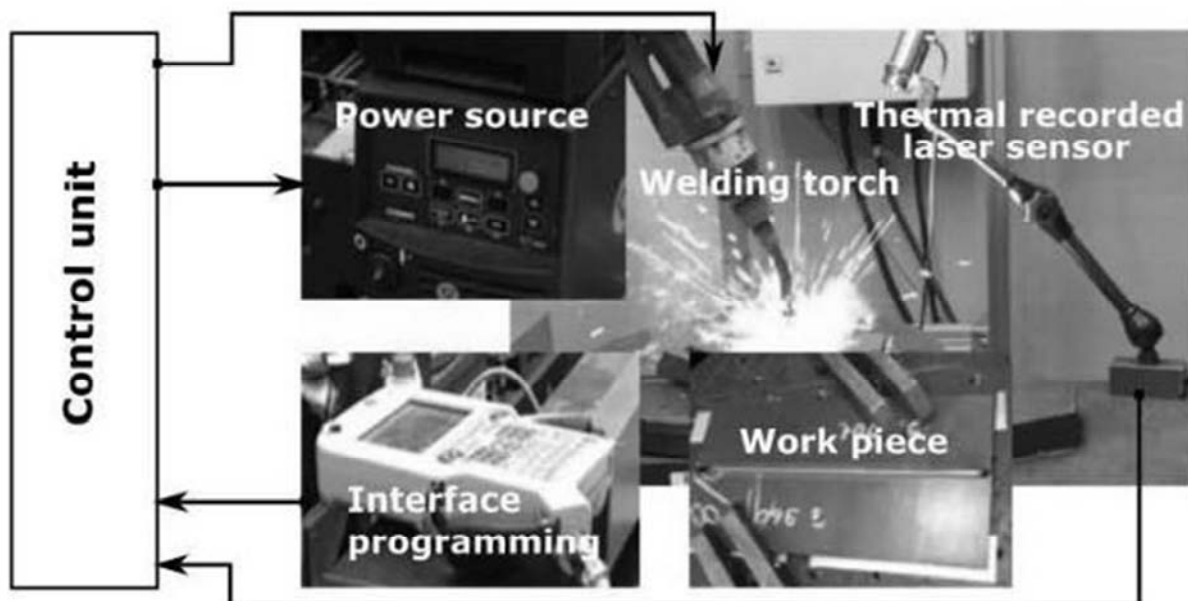


Figure 1. Automatic GMAW process using an ABB IRC 5 Robot
 Slika 1. Automatizovani MAG proces uz primenu ABB IRC 5 robota

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of S700MC and S960QC steels and filler material X96
 Tabela 1. Hemijski sastav i mehaničke osobine čelika S700MC i S960QC i dodatnog materijala X96

Chemical composition of base and filler material, Wt. % Hemijski sastav osnovnih i dodatnih materijala, zapr. %															
Materials	C	Si	Mn	Al	B	Nb	Ti	V	Cu	Cr	Ni	Mo	N	P	S
S700MC	0.056	0.16	1.18	0.027	0.002	0.044	0.12	0.006	0.02	0.062	0.06	0.01	0.005	0.01	0.005
S960QC	0.09	0.021	1.05	0.03	0.002	0.03	0.032	0.008	0.025	0.82	0.04	0.04	-	0.01	0.004
Filler / Dodatni material	0.12	0.8	1.9		-	-		-	≤0.30	0.45	2.35	0.55		-	-
Welding parametars Parametri zavarivanja															
Welding current Struja zavarivanja [A]	Arc / Napon [V]		Welding speed Brzina zavarivanja [cm/min]	Q [kJ/cm]	Torch Angle Ugao gorionika	Shielding Zaštitni gas	Distance contact tube Rastojanje do radnog komada								
225	25.3		62.1	7 kJ/cm P1 10 kJ/cm P2	5°	Ar ⁺ 18% CO ₂	18mm								

2.2 Experimental procedure

CCT diagrams drawn based on literature [13,14] and recorded thermal transfer data allowed identification of phase transformation in the microstructure of the WM, CGHAZ, and FGHAZ of both materials and filler material. Fig. 2a presents the CCT diagram for S960QC showing the cooling time of the welded sample which determines the phase transformations subsequently observed in the microstructure. The curve for S960QC indicates three transformation points: 550 °C, 470 °C and 400 °C. Following the liquefaction phase, cooling to 550 °C corresponds to the start of bainite

2.2 Eksperimentalna procedura

KH dijagrami su zasnovani na podacima iz literature [13,14] i sa zabeleženim podacima prenosa toplote omogućavaju identifikaciju faznih transformacija u mikrostrukturi u oblasti zavarenog spoja, kao što su WM, CGHAZ, i FGHAZ za oba materijala i za dodatni material. Slika 2a predstavlja dijagram KH za čelik S960QC koji prikazuje vreme hlađenja zavarenog uzorka koji određuje fazne transformacije koje se opažaju u strukturi. Kriva za čelik S960QC pokazuje tri transformacione tačke: 550°C, 470°C and 400°C. Prateći stvaranje faza, hlađenje do 550°C odgovara početku beinitne



transformation and 470 °C marks the end of the transformation. The end of bainite transformation corresponds to beginning of the martensite transformation, which ends at a temperature estimated at 400 °C. Fig. 2b presents the CCT diagram for S700MC showing the cooling time curve of the weld. The following temperatures were defined as those triggering phase transformation in microstructures, particularly in the HAZ. The first phase transformation (ferrite) starts at 670 °C and ends at 615 °C, followed by the bainite transformation, which starts at 615 °C and ends at about 500 °C. Observation of the curves of the two CCT diagrams indicates that there may be incomplete transformations because differences in temperatures of the transformations in the different steels are very small.

transformacije, a 470°C označava kraj transformacije. Kraj beinitne transformacije predstavlja početak martenzitne transformacije, koja se završava na temperature od 400°C. Slika 2b predstavlja KH dijagram za čelik S700MC koji pokazuje krivu hlađenja zavarenog spoja. Sledeće temperature se definišu kao inicijatori faznih transformacija posebno u ZUT-u. Prva fazna transformacija (ferita) počinje na 670°C i završava se na 615°C, na koju se nadovezuje beinitna transformacija, koja počinje na 615°C i završava se na oko 500°C. Razmatranjem krivih ova dva KH dijagrama, ukazuje da je možda nepotpuna transformacija zbog razlika u temperaturama transformacija kod ovih različitih čelika, ali je ona vrlo mala.

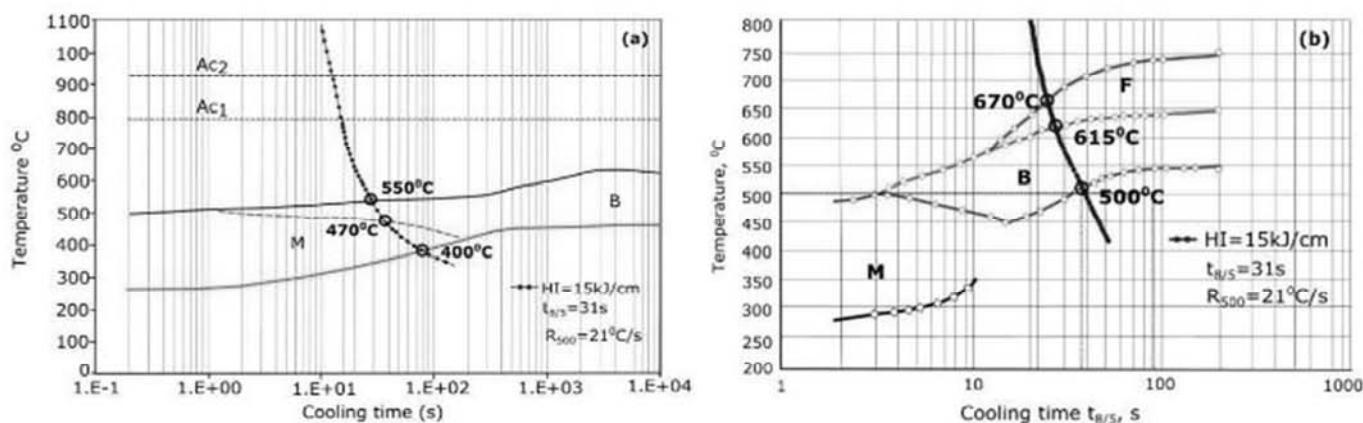


Figure 2. CCT diagrams obtained by JMat Pro software: (a) CCT diagram for S960QC; (b) CCT diagram for S700MC

Slika 2. KH dijagrami dobijeni softverom JMat Pro: a) KH dijagram za čelik S960QC, b) KH dijagram za čelik S700MC

3. Results and Discussion

Fig. 3 shows SEM images of the CGHAZ and FGHAZ of S700MC, S960QC and WM of the weld joint of the dissimilar HSS S700MC/S960QC weld. Fig. 3(a) presents an SEM image of the CGHAZ of S700MC; Fig. 3(b) an SEM image of the CGHAZ of S960QC; Fig. 3(c) a macro image of the welded sample showing the mapping area; and Fig. 3(d) an SEM micrograph of the WM. Using mapping of Fig. 3(a), it can be seen that the cooling temperature of 615 °C corresponds to the ferrite-bainite phase transformation. From the image, it is difficult to draw clear conclusions in terms of the type of bainite or ferrite. Using mapping of Fig. 3(b), the micrograph of the CGHAZ of S960QC cooling temperature of 470 °C for the transformation of GB composed of ferrite cementite inside bainite transformations. The microstructure of the WM, Fig.3(d), has a morphology of a fine line showing formation of Widmanstätten ferrite (WF) with some

3. Rezultati i diskusija

Slika 3 prikazuje izgled mikrostrukture na SEM mikroskopu zona CGHAZ i FGHAZ, čelika S700MC, S960QC i metala šava (WM) zavarenog spoja različitih čelika HSS S700MC/S960QC. Na Slici 3a) predstavljen je SEM izgled zone CGHAZ čelika S700MC, Slika 3b) daje izgled na SEMu zone CGHAZ čelika S960QC; Slika 3c) makro izgled zavarenog uzorka sa mestima analize; i na Slici 3d) prikazan je izgled na SEMu metala šava. Primenom mapiranja sa Slike 3a), može se videti da temperatura hlađenja 61 °C odgovara faznoj feritno-beinitnoj transformaciji. Sa slike je teško jasno zaključiti o tipovima beinita ili ferita. Primenom mapiranja sa Slike 3b), mikrostruktura zone CGHAZ čelika S960QC, za temperaturu hlađenja od 470°C za transformaciju GB, se sastoji od feritnog cementita unutar transformisanog beinita. Mikrostruktura metala šava (WM), Slika 3d), ima fino linijsku morfologiju koja pokazuje



surfaces with isolated cylindrical and square shapes, which were identified as acicular ferrite (AF). The same process was applied to the images on the right side of Fig. 3 with the difference that the mapping was performed on the FGHAZ, which allowed identification of the austenite grains and some phase transformations inside the grains. The different morphologies were characterized as bainite, ferrite, martensite and cementite, and retained austenite was observed in these grains. By observing austenite grains of S700MC at 500 °C Fig. 3(f), transformation of GB is detected with RA, which is identified as a dark area inside the austenite grain. transformation of bainite to RA is observed on austenite grains of S960QC at 400 °C, where RA is transformed to TMA.

formiranje Widmanstätten-ovog ferita (WF), sa ponekim izolovanim cilindričnim i kvadratnim oblicima, koji su identifikovani kao acikularni ferit (AF). Identična procedura je primenjena na mikrostrukturama na desnoj strani Slike 3, sa razlikom da je mapiranje izvršeno na fino zrnastoj zoni FGHAZ, koja omogućava identifikaciju austenitnih zrna i delom faznih transformacija unutar zrna. Različite morfologije se karakterišu kao beinit, ferit, martenzit i cementit, i zaostali austenit je uočen u tim zrnima. Posmatranjem austenitnih zrna čelika S700MC na 500°C Slika 3f), transformacija zrnastog beinita (GB) je otkrivena sa RA, koji je identifikovan kao tamna oblast unutar austenitnih zrna. Transformacija beinita u RA je uočena na austenitnim zrnima čelika S960QC na 400°C, gde se RA transformiše u TMA.

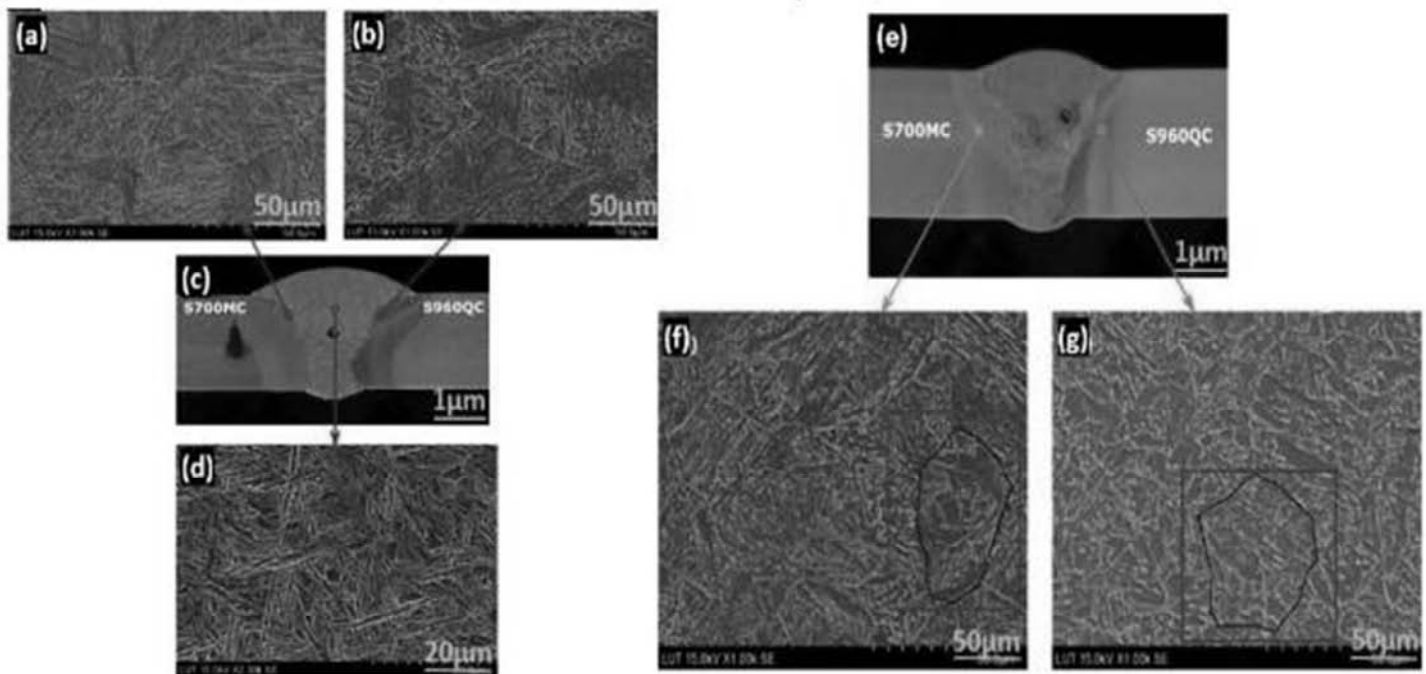


Figure 3. Macro image of the sample and SEM images of the CGHAZ and FGHAZ of S700MC, S960QC and WM. (a) SEM image of CGHAZ of S700MC; (b) SEM image of CGHAZ of S960QC; (c) Macrograph of the sample; (d) SEM image of WM; (e) Macrograph of the sample; (f) SEM image of FGHAZ of S700MC; (g) SEM image of FGHAZ of S960QC

Slika 3. Makro izgled uzorka i SEM slike zona CGHAZ i FGHAZ čelika S700MC, S960QC i WM. (a) SEM slika zone CGHAZ čelika S700MC; (b) SEM slika zone CGHAZ čelika S960QC; (c) Makro struktura uzorka zavarenog spoja; (d) SEM slika zone metala šava WM; (e) Makro struktura uzorka zavarenog spoja; (f) SEM slika zone FGHAZ čelika S700MC; (g) SEM slika zone FGHAZ čelika S960QC

3.1 Microstructural features

The microstructure composition of austenite grains in the FGHAZ of S700MC was characterized based on the geometry [15,16] illustrated in Fig. 4(a). The yellow-colored block in a il in a black background is inferred as RA mixed with some amount of ferrite transformation (RA + F). The remainder of the austenite grain surface is recognized as GB.

3.1 Mikrostrukturne karakteristike

Mikrostrukturni sastav austenitnih zrna u zoni FGHAZ čelika S700MC je okarakterisana na osnovu geometrije [15,16] što je ilustrovano na slici 4a). Žuto obojena oblast na crnoj pozadini se poklapa sa RA, pomešanim sa izvesnim udelom ferita (RA + F). Ostatak površina austenitnih zrna se prepoznaje kao GB.



Inside the GB, the morphology of upper bainite is observed, as is some intergranular ferrite and carbide particles. The formation of intergranular ferrite is the result of a process of early phase transformation at high temperature, observed in the CCT diagram. This phase transformation is the cause of a displacive form of ferrite internally and around the austenite grain. On the S960QC side, austenite grains appear in Fig.(4b), which displays different behavior at a temperature of around 400 °C. A grain boundary of ferrite develops along the austenite grain, and intergranular ferrite occupies a large part of the GB and RA, which can be identified here as TMA (in green) on the figure. Tab. 2 presents features of some of the characterized microstructures of the studied materials. In S700MC, the shape of the bright dots inside the GB differs from that found in the GB of S960QC, which consists of bright lines. The structure of the GB of S960QC contains a lot of carbides (this can be justified by the lower cooling time) causing retained blocks of austenite in the grain.

Unutar GB, uočena je morfologija gornjeg beinita, kao i intergranularnog ferita i uključaka karbida. Formiranje intergranularnog ferita je rezultat procesa rane faze transformacije na visokim temperaturama, što je prikazano na KH dijagramu. Ova fazna transformacija je uzrok pojave ferita u i oko austenitnih zrna. Na strani čelika S960QC, austenitna zrna prikazana na Slici 4b) pokazuju drugačije ponašanje na temperaturama od oko 400°C. Granice zrna ferita se razvijaju duž austenitnih zrna, i intergranularni ferit zauzima veliki deo GB i RA, koji je identifikovan kao TMA (zeleno) na slici.

Tabela 2. prikazuje izgled nekih mikrostrukture koje su karakterizovane u ispitivanim materijalima. U čeliku S700MC, oblik svetlih tačaka unutar GB se razlikuje od onih koje su pronađene u GB čelika S960QC, koji se sastoji od svetlih linija. Struktura GB čelika S960QC sadži dosta karbida (što može biti uzrokovano nižom brzinom hlađenja) koji uzrokuju zaostale blokove austenite u zrnju.

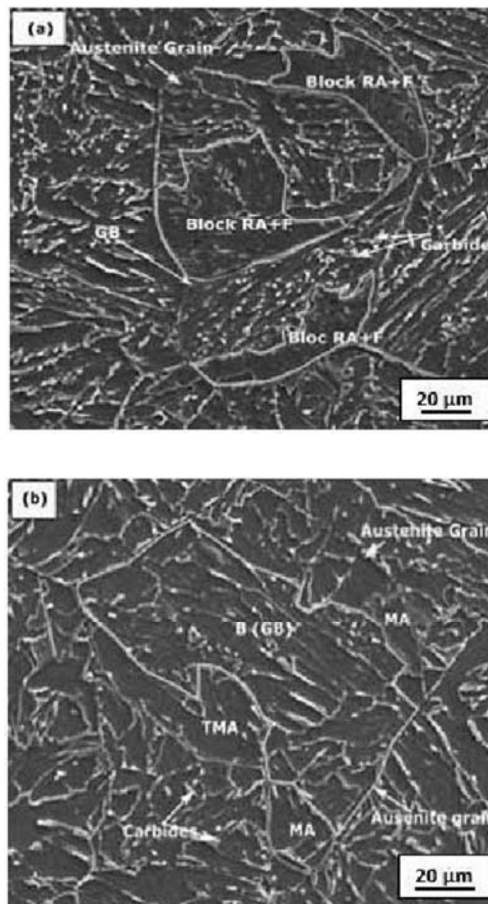


Figure 4. SEM micro images showing the composition of structures formed in the austenite grains: (a) microstructure of S700MC austenite grains; (b) microstructure of S960QC austenite grains

Slika 4. SEM mikro slike koje pokazuju struktura formiranih u austenitnim zrnima: a) mikrostrukture austenitnih zrna čelika S700MC; b) mikrostrukture austenitnih zrna čelika S960QC



Table 2. Features of some microstructures in the CGHAZ of the studied materials (S700MC/S960QC)
Tabela 2. Karakteristike nekih mikrostruktura u zoni porasta zrna ZUTa (CGHAZ) ispitivanih materijala (S700MC/S960QC)

Type of steel	Structural Feature	Characteristic	Cooling at 615 °C	Cooling at 420 °C	Phase transformation
S700MC		GBF	Bainite + Ferrite + Cementite		Bainitic Phase
		RA		Bainite+ RA	Bainitic phase
S960QC		Granular Bainite	470 °C Bainite transformation at 550 °C	400 °C	Bainitic Phase
		TMA		RA to TMA	Martensitic + Retained Austenitic

3.2 Volume fraction of the phase

Based on sampling of the SEM micrographs, measurements were carried out directly on the images of both materials [16], focusing on the area of the CGHAZ and FGHAZ. The cooling temperatures used in the analysis were respectively 615 °C, 420 °C for S700MC and 470 °C, 400 °C for S960QC. The images were uploaded into the image processing software (ImageJ Pro) for identification of the different grain surfaces in the image. Fig. 5(a), 5(b) and 5(c) show for S700MC, respectively, the original picture, the representation of the block GB (in black color), the description of the surfaces formed by deduction of retained austenite, (colored manually in yellow), and finally the infiltration ferrite + cementite, (colored in red). XT is the total area mapped, X1 is the surface area occupied by GB (black color); X2 is the surface area of the RA (colored manually in yellow); and X3 is the space occupied by ferrite + cementite particles (in red). The ImageJ Pro software first determined the

3.2 Zapreminski udeo faza

Na osnovu uzoraka SEM mikrofotografija, merenja su vršena direktno na slikama za oba materijala [16], fokusirajući se na oblasti CGHAZ and FGHAZ. Temperature hlađenja koje su korišćene u analizi iznosile su 615°C, 420°C za čelik S700MC i 470°C, 400°C za čelik S960QC. Slike su procesuirane softverom za analizu slika (ImageJ Pro) sa ciljem identifikacije različitih površina zrna na slikama. Slike 5a), 5b) i 5(c) prikazuju za čelik S700MC redom: originalnu sliku mikrostrukture, izgled blokova GB (obojeno u crno), ocrtane površine formiranih odbačkom zaostalog austenita (obojeno ručno u žuto) i napokon prožimanje ferita + cementita (obojeno u crveno).

XT je ukupna mapirana površina, X₁ je površina GB (u crnoj boji), X₂ je površina zaostalog austenita (obojena ručno u žutu boju), i X₃ je prostor koji zauzimaju čestice ferita + cementita (obojeno u crveno). Softver ImageJ Pro prvo određuje ukupnu površinu analiziranog uzorka XT, a nakon toga process merenja određuje X₂ i X₃. Sledeća relacija



overall surface of the sampled XT, after which a measurement process was used to discover X₂ and X₃. The following relationship determines the volume fraction (X₁) not occupied by the GB:

$$X_1 = X_T - (X_2 + X_3) \quad (1)$$

određuje zapreminski udeo (X₁) koji nije zauzet sa GB:

$$X_1 = X_T - (X_2 + X_3) \quad (1)$$

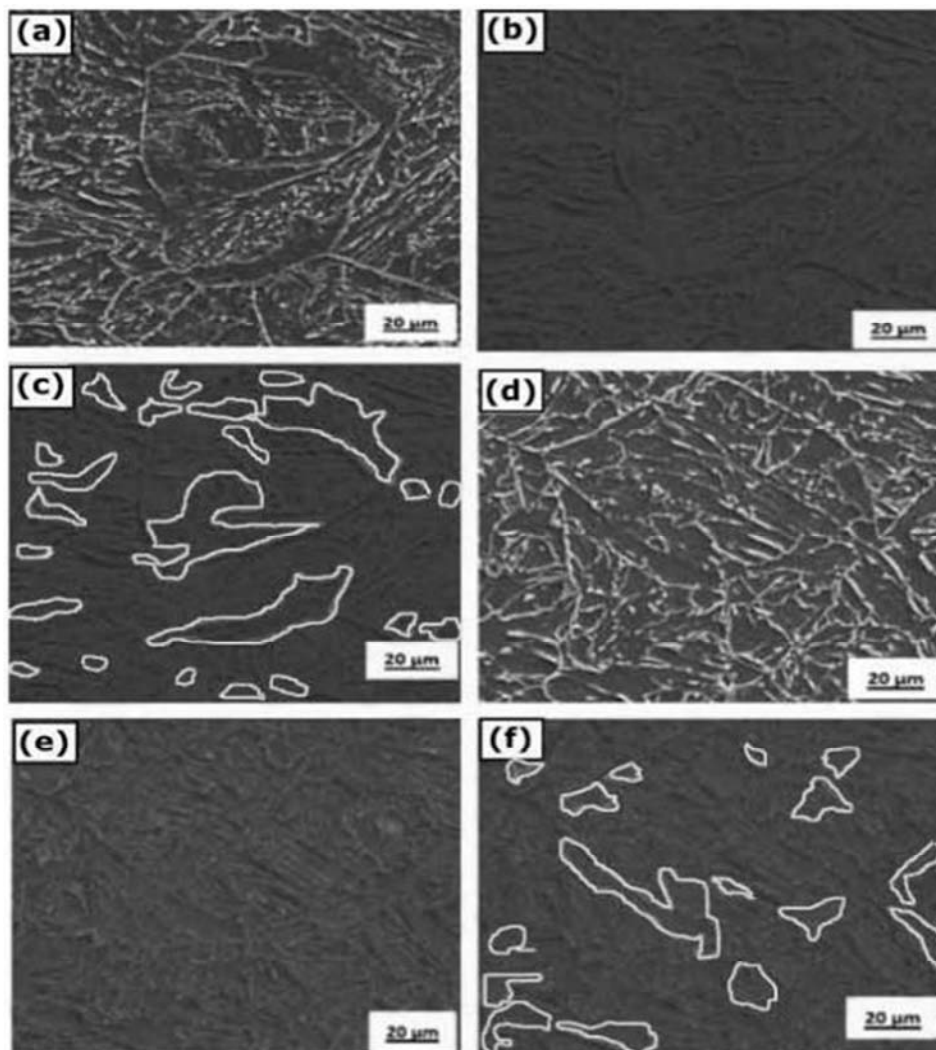


Figure 5. Evaluation of volume fraction of GB, TMA, RA, and ferrite using ImageJ Pro software: (a) original micrograph of S700MC; (b) darker area to measure the GB, ferrite, and cementite, colored in red; (c) geometries to measure the volume fraction of RA, yellow; (d) original micrograph of S960QC; (e) darker area to measure the GB volume fraction, and red zone to measure the volume fraction of ferrite; and (f) geometries to measure the TMA, yellow

Slika 5. Određivanje zapreminskog udela GB, TMA, RA, i ferita primenom softvera ImageJ Pro: a) originalna microslika čelika S700MC; (b) tamnija oblast za merenje GB, ferita, i cementita, obojena u crveno; (c) geometrija za merenje zapreminskog udela RA, žuta; (d) originalna microslika čelika S960QC; (e) tamnija oblast za merenje GB zapreminskog udela, i crvena zona za merenje zapreminsko udela ferita; i (f) geometrija za merenje TMA, žuto

The same measurement method was applied for the S960QC steel. The phase transformation was identified mainly as cooling time GB and the TMA has temperatures of 470 °C and 400 °C respectively. Fig. 4(a) presents the original SEM image. XT is the total area of the sample map; X₁ is the part occupied by the GB (Black) measured in Fig. 4(b); X₂ represents the ferrite particles and cementite (in red) obtained on the same figure as

Isti metod merenja je primenjen za čelik S960QC. Fazne transformacije su identifikovane kao GB i TMA pri hlađenju sa temperatura 470°C and 400°C. Slika 4a) prikazuje originalnu SEM sliku. XT je ukupna površina uzorkovane mape; X₁ je deo zauzet sa GB (crno) mereno na Slici 4b); X₂ predstavlja feritne čestice i cementit (crveno) dobijeno sa iste slike kao X₂; i X₃ je oblast TMA merena ručno softverom ImageJ Pro. Rezultati



X_2 ; and X_3 is TMA measured from ImageJ Pro software manually. The results of the analysis giving the fraction volumes as a function of the temperature points identified are presented in Fig. 6. Fig. 6(a) shows the maximum value of the volume fraction of GB is about 70%, which is observed at a temperature of 500 °C. Fig. (6b) presents two results separately; the fraction volume of the ferrite, which has a maximum value of 60% at a temperature of 615 °C corresponding to the start of solidification of the weld sample, and the fraction volume of RA with a maximum value at 25% at 420 °C. Fig. 6(c) shows volume fraction of GB produced in S960QC, which peaks at around 60% at a temperature of 470 °C. Fig. 6(d) has two graphs, which show the respective volume fractions of ferrite and TMA. As found in previous data, the volume fraction of ferrite increases when the temperature is still high, at 58%, and decreases as it decreases. During the transformation, incomplete processing inside the austenite grain will translate into RA, which has a reduced temperature change to TMA, which is estimated to be 34% to its maximum value (400 °C).

analize prikazani na Slici 6. daju zavisnost zapreminskih udela od identifikovanih temperaturnih tačaka.

Slika 6a) prikazuje maksimalnu vrednost zapreminskog udela GB koja iznosi oko 70% i koja je konstantovana na temperaturi od 500°C. Na Slici 6b) prikazana su dva pojedinačna rezultata, zapreminski udeo ferita koji ima maksimalnu vrednost od 60% na temperaturi od 615°C, koja odgovara početku očvršćavanja zavarenog uzorka, kao i zapreminski udeo RA sa maksimalnom vrednošću od 25% na 420°C. Slika 6c) prikazuje zapreminski udeo GB nastalog u čeliku S960QC, čiji je najviša vrednost od oko 60% na temperaturi od 470°C. Slika 6d) ima dva grafika koji pokazuju zapreminske udele ferita i TMA. Kao što je pronađeno u prethodnim podacima, zapreminski udeo ferita raste dok je temperatura visoka, i iznosi 58% i opada kada temperature opadaju. Za vreme transformacije, unutar austenitnih zrna se odvija nekompletni proces pretvaranja u RA, koje ima smanjenu temperaturnu promenu ka TMA, koji je procenjen na 34% do njene maksimalne vrednosti (400 °C).

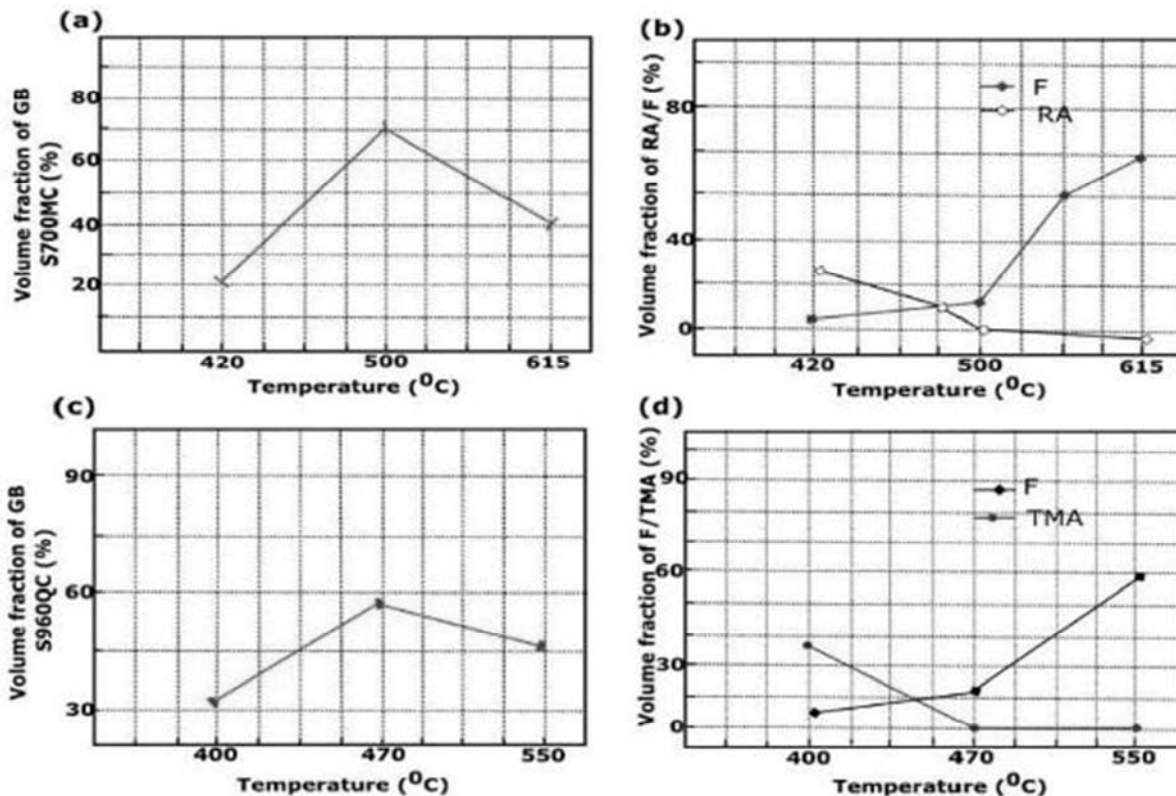


Figure 6. Volume fraction of phase transformations in studied both materials: (a) volume fraction of GB of S700MC; (b) volume fraction of RA and F; (c) volume fraction of GB of S960QC; (d) volume fraction of TMA/F of S960QC

Slika 6. Zapreminski udeo faznih transformacija kod oba ispitivana materijala: a) zapreminski udeo GB čelika S700MC; b) zapreminski udeo RA i F; c) zapreminski udeo GB čelika S960QC; d) zapreminski udeo TMA/F čelika S960QC



3.3 Precipitates in the welded sample using EDS Analysis

For analysis of the micro-alloy elements, EDS was applied to two sides of the weld. Fig. 7 shows the mapping and spectra records for alloy elements in S700MC and Fig. 8 the same information for S960QC. The EDS was calibrated at a voltage up to 15 kV with mapping at 20 kV, and the resolution of the image was 1024 by 768, with a magnification of 2.5 μ m. The data was recorded in weight %, which presents the percentages of C transforms, Si, Cr, Mn, Fe, Ni, and Mo. Tab. 3 shows the proportions of the weights of the micro-elements of alloys obtained. An absence of Ni, Mo in the microstructure of the S960QC can be seen, and an increase in the weight % of Mn. These three alloy elements play a significant role in the relation between the microstructure behavior and mechanical properties of the weld joint, particularly as regards the HAZ.

3.3 Taloz i zavarenim uzorcima koji su određeni pimenom EDS analize

Za analizu mikro legirajućih elemenata primenjena je EDS analiza na obe strane zavarenog spoja. Slika 7. prikazuje mapiranje i zapis spectra za legirajuće elemente u čeliku S700MC, a na Slici 8. za čelik S960QC. EDS je kalibrisan do 15 kV sa mapiranjem pri 20 kV, a rezolucija slika je bila 1024x768, sa uvećanjem od 2.5 μ m. Podaci su zabeleženi u težinskim %, i oni predstavljaju procenete transformacije C, Si, Cr, Mn, Fe, Ni i Mo. Tabela 3. prikazuje dobijene težinske udele mikro elemenata ovih legura. Može se konstatovati odsustvo Ni i Mo u mikrostrukturi čelika S960QC, kao i povećanje težinskih % mangana. Ova tri legirajuća elementa igraju glavnu ulogu u odnosu između mikrostrukture i mehaničkih osobina zavarenog spoja, posebno ZUTA.

Table 3. Micro-alloy elements composition in both sides of the dissimilar welded joint (S700MC/S960QC)

Tabela 3. Sastav mikro legirajućih elemenata sa obe strane zavarenog spoja različitih čelika (S700MC/S960QC)

Elements (%)	C	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo	%
S700MC (CGHAZ area)	3.3	0.6	0.5	1.6	92.2	1.3	0.4	100
S960QC (CGHAZ area)	3.4	0.3	0.1	1.8	94.2	-	-	

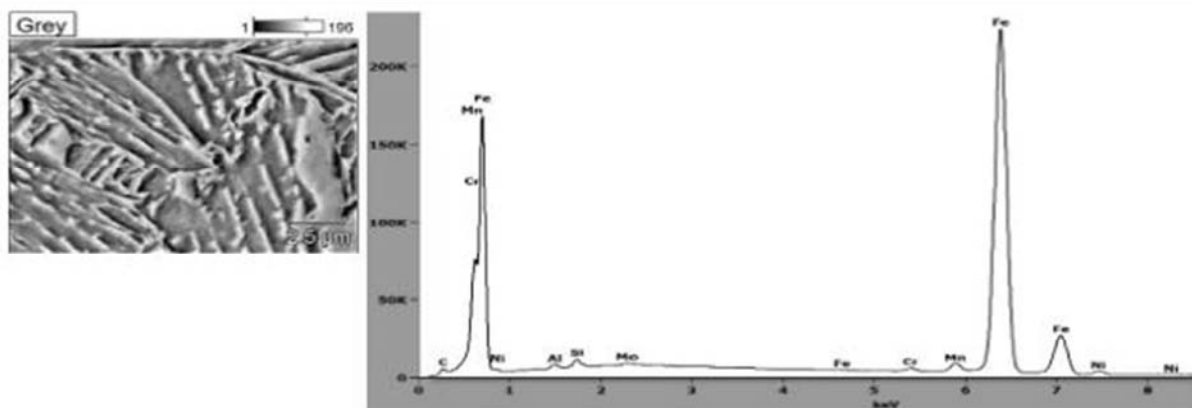


Figure 7. EDS analysis of the composition of alloy elements in S700MC

Slika 7. EDS analiza sastava legirajućih elemenata u čeliku S700MC

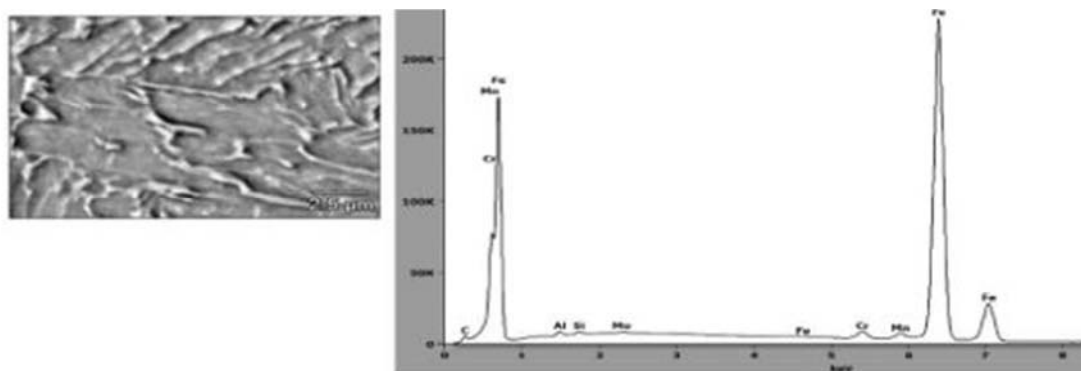


Figure 8. EDS Analysis of the composition of alloy elements in S960QC

Slika 8. EDS analiza sastava legirajućih elemenata u čeliku S960QC



The respective weights of Mn, Ni, Mo obtained were 1.6, 1.3 and 0.4 for S700MC, and 1.8, 0, 0 for S960QC. The absence of Ni in the CGHAZ of S960QC can cause softening in this area even though there is a small increase in the weight % of Mn. As observed in the evaluation of the phase transformations, the rise in Mn promotes the appearance of martensite at the end of the transformation phase of S960QC. In the S700MC, the formation of alloy elements of Mn, Ni and Mo enable composition of upper bainite at 615 °C and TMA at 400 °C, as indicated in the previous results showing a high-volume fraction of GB (GB = 70%). This high value of GB resulting from the appearance of alloy elements is the source of softening in the CGHAZ, which was confirmed during the hardness analysis, and shows the link between the microstructure behavior of the weld joint and the mechanical behavior of the weld. Equation 2 estimate the increasing of the strain zones of both materials, which lead to reinforced the precipitation strengthening () in the area analyzed using EDS.

$$\rho_p = \frac{0.538Gb f_{GB}^{1/2}}{X} \ln\left(\frac{X}{2b}\right) \quad (2)$$

Where G indicates the modulus of elasticity (in MPa), b (mm) is the vector of Jan burgers [17], is the volume fraction of particle GB of both materials, and finally X is the precipitation diameter of the GB transformation into the austenite grain. After different evaluations, it is notice an increase in yield strength compared to the experimental values, which can be evaluated tensile test. The for example, the precipitation strengthening (ρ_p) obtained was 23.2 MPa for S700MC, and 27 MPa for S960QC respectively.

4. Conclusions

Phase evaluation of the transformation of bainite, ferrite, and martensite in the HAZ of a dissimilar weld joint of dissimilar high strength steels (S700MC/S960QC) welded with X96 filler material was carried out in this study. SEM and EDS analysis were used to identify the different phase transformations, quantify the volume fractions, and evaluate the composition of the alloy elements in the weld.

1. CCT diagrams indicated phase transformations in S700MC of ferrite from 670 °C to 615 °C and bainite from 615 °C to 500 °C.

Dobijeni su odgovarajući težinski % Mn, Ni, Mo u iznosu od 1.6, 1.3 and 0.4 za čelik S700MC, a za čelik S960QC iznosili su 1.8, 0, 0. Osustvo Ni u zoni CGHAZ čelika S960QC može uzrokovati omekšavanje u toj oblasti bez obzira na malo povećanje težinskog % Mn. Kao što je konstatovano tokom faznih transformacija, povećanje sadržaja Mn potpomaže pojavu martenzita na kraju transformacija faza u čeliku S960QC. U čeliku S700MC, prisustvo elemenata Mn, Ni, i Mo omogućava stvaranje gornjeg beinita na 615°C i TMA na 400°C, kao što je prikazano prethodnim rezultatima koji pokazuju visok zapreminski udeo GB (GB = 70%). Ova visoka vrednost GB kao rezultat pojave legirajućih elemenata na lokaciji omekšavanja u zoni CGHAZ, što je potvrđeno analizom tvroća, pokazuje vezu između ponašanja mikrostruktura zavarenog spoja i ponašanja mehaničkih osobina zavarenog spoja. Jednačina 2 prikazuje povećanje zona deformacije kod oba materijala, koje dovodi do taložnog ojačavanja u oblasti koja je analizirana primenom EDSa.

$$\rho_p = \frac{0.538Gb f_{GB}^{1/2}}{X} \ln\left(\frac{X}{2b}\right) \quad (2)$$

Gde G označava modul elastičnosti (u MPa), b (mm) je vector Jan burgers [17], f je zapreminski udeo čestica GB kod oba materijala i konačno X je prečnik transformacija za GB transformacije u austenitnom zrnju. Nakon proračuna uočava se povećanje granice razvlačenja u poređenju sa eksperimentalnim vrednostima, dobijenim ispitivanjem zatezanjem. Na primer, dobijena je vrednost za taložno ojačavanje (ρ_p) od 23.2 MPa za čelik S700MC, i 27 MPa za čelik S960QC.

4. Zaključci

U ovom istraživanju izvršena je procena faznih transformacija beinita, ferita, i martenzita u ZUTu zavarenog spoja različitih materijala i to čelika visoke čvrstoće (S700MC/S960QC) zavarenih sa dodatnim materijalom X96. SEM i EDS analize su primenjene za identifikaciju različitih fazing transformacija, kvantifikaciju zapreminskih udela i za procenu sadržaja legirajućih elemenata u zavarenom spoju.

1. KH dijagrami prikazuju fazne transformacije u čeliku S700MC i to za ferit od 670°C do 615°C i za beinit od 615°C do 500°C.



2. In the case of S960QC steel, there is bainite transformation from 550 °C to 470 °C, and martensite from 470 °C to 400 °C.

3. SEM images confirmed the ascendancy of GB transformation for cooling time to 500 °C, allowing evaluation of the volume fraction of GB as 70% (500 °C), ferrite as 60% (615 °C) and RA of almost 23% at 420 °C.

4. In the austenite grain of the S960QC steel, there was development of GB with a high volume fraction of 70% at 470 °C, then some amount of ferrite cementite around and inside the austenite grain, evaluated as 40% at 550°C, which later transformed into TMA at 400 °C.

5. EDS analysis showed the absence of alloy elements such as Ni and Mo in the CGHAZ of S960QC, but their presence in the same area of the S700MC (1.3Ni, 0.4Mo). This finding confirms the correlation between the microstructural analyses suggesting softening in the HAZ and the mechanical behavior of the sample.

6. The noticeable presence of 1.3Ni, 0.4Mo, and 1.6Mn (S700MC) confirmed the temperature rise in the HAZ, as did the production of bainite with significant intrusion of ferrite and cementite.

The different compositions of alloy elements on different side of the dissimilar weld may produce different behaviors in the HAZ of the weld, for example, there may be an increase in toughness on the S960QC side caused by the absence of alloy elements such as Ni and Mo. It is essential to evaluate the amount of Mn found in the steel, in this case 1.8Mn, as increased strength can expose the weld to a higher risk of brittle fracture.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge financial support from the Finnish Cultural Foundation (No. 190749), the EU project Energy-efficient systems based on Renewable Energy for Arctic Conditions (EFREA) (Grant number K51054).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

2. U slučaju čelika S960QC, beinitna transformacija je od 550°C do 470°C, i martenzitna od 470°C do 400°C.

3. Slike SEM analize potvrđuju dominaciju transformacije GB za vreme hlađenja do 500°C, omogućavajući procenu zapreminskog udela GB od oko 70% (500°C), ferrite oko 60% (615°C) i RA od skoro 23% na 420°C.

4. U austenitnim zrnima čelika S960QC stvarao se GB sa visokim zapreminskim udelom od 70% na 470°C, zatim izvesni udeo ferita oko i unutar austenitnih zrna, u količini oko 40% na 550°C, koji je kasnije transformisan u TMA na temperaturi od 400°C.

5. EDS analiza pokazuje odsustvo legirajućih elemenata kao što su Ni i Mo u zoni CGHAZ čelika S960QC, ali i prisustvo u pojedinim zonama čelika S700MC (1.3Ni, 0.4Mo). Ovi nalazi potvrđuju korelaciju između mikrostrukturnih analiza predpostavljajući omekšavanje u ZUTu i mehaničkog ponašanje uzorka.

6. Uočljivo prisustvo elemenata 1.3Ni, 0.4Mo i 1.6Mn (S700MC) potvrđuje da sa porastom temperature u ZUTu nastaje beinit sa značajnim nastajanjem ferita i cementita.

Različit sadžaj legirajućih elemenata na različitim stranama zavarenog spoja različitih metala, može izazvati različito ponašanje u ZUTu zavarenog spoja, na primer može doći do povećanja žilavosti na strani čelika S960QC uzrokovano odsustvom legirajućih elemenata kao što su Ni i Mo. Zato je važno odrediti udeo Mn u čeliku, u ovom slučaju 1.8Mn, pošto povišena čvrstoća može zavareni spoj da izloži višem riziku ka krtom lomu.

Zahvalnica

Autori se zahvaljuju na finansijskoj podršci od strane Finnish Cultural Foundation (No. 190749), zatim EU projektu Energy-efficient systems based on Renewable Energy for Arctic Conditions (EFREA) (Grant number K51054).

Konflikt interesa

Autori potvrđuju da nema konflikta interesa.



References

- [1] Mvola B, Kah P, Martikainen Y, and Suoranta R 2015 Reviews on Advanced Materials Science 44, pp. 146-159.
- [2] Njock B. F. Kah P. Mvola B. and Pavel L. 2019 Review on Advanced Materials Science, 58(1), pp. 38-49.
- [3] Pirinen M. Martikainen Y. Pavel L. Karkhin V. and Ivanov S 2015 Welding International 2, pp. 14-17.
- [4] Gorka J. 2016 Material and Technology 50 pp. 617-621.
- [5] Yasar U. and Hamdullah C. 2015 Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM15), Incheon, Korea.
- [6] Lambert A. Drillet J. Gourgues F Sturel T. and Pineau A. 2000 Science and Technology of Welding and Joining 5(3), pp. 168-173.
- [7] Siltanen J. and Tihinen S. 2012 Journal. of Laser Applications. doi.org/10.2351/1.5062489.
- [8] Kulakov M. Poole W. and Militzer M. 2014 ISIJ International, 54(11) pp. 2627-2636,.
- [9] Zajac S. Schwinn V. and Tacke H. 2005 Materials Science Forum 500-501 pp. 387-394.
- [10] Van Bohemen S.M.C. Sietsma J. 2010 Materials Science and Engineering A 527 pp. 6672-6676.
- [11] Mingxing Z. Guang X. Haijiang H. Qing Y. and Junyu T. 2017 Steel Research International 88(7) pp. 1-7.
- [12] Seppälä O. Pohjonen A. Kaijalainen A. Larkiola J. and Porter D. 2018 Procedia Manufacturing 15, pp. 1856-1863.
- [13] Gorka J. 2014 Metals 837 pp. 375-380.
- [14] Tasalloti H. Kah P. Martikainen J. 2017 Material and Characterization 123 pp. 29-41.
- [15] Navarro-Lopez A. Hidalgo J. Sietsma J. and Santofimia M. 2017 Materials Characterization 128 pp. 248-256.
- [16] Junyu T. Guang X. Mingxing Z. and Haijiang H. 2018 Steel Research International 1700469 pp. 1-10.
- [17] Shu Y. Xianghua L. Taosha L. Jingqi C. and Yang Z. 2019 Steel Research International, 1800257 pp. 1-10.

Podsećamo Vas da je članarina za 2021.g ostala

nepromenjena i iznosi 3500,00 dinara.

Uplatom članarine stičete pravo na GRATIS godišnje izdanje
časopisa "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE"

Tekući račun DUZS: 325-9500600002588-46

Informacije:



+ 381 (11) 2420-652



Oleg Mokrov^{1a}, Andre Schmidt^{1b}, Marek Simon^{1c}, Uwe Reisgen^{1d}, Andreas Behmel^{2e}, Jochen Martin^{2f}, Daniel Rudolph^{3g}, Almedin Becirovic^{4h}

Real time physical simulation for virtual welding training

Fizička simulacija virtuelnog zavarivanja u realnom vremenu

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK / UDC:

Prezentovano u okviru 72. IIW godišnje Skupštine i međunarodne konferencije održane u Bratislavi-Slovačka 07-12. Julia 2019

Rad primljen / Paper received:

Oktober 2020.

Prevod izvornog rada na srpski jezik: Z. Odanović

Ključne reči: elektrolučno zavarivanje, vizuelizacija, zavarivanje, obrazovanje, modeliranje

Abstract

Modern visualization methods facilitate the user a better and deeper understanding of the welding process. Current methods and visualization systems are based on empirical groundwork. A simulation software on the basis of physical models is put at the disposal of the user, which facilitates a visualization of the weld joint geometry and temperature distribution. In this way corrupt weld joints can be detected and handled in advance. This leads to an increase of quality and profitability. For this reason, this approach offers a new benchmark in the world of electric arc technology and sets a basis for a variety of future visions. Physical welding models are so far optimized and reduced in order to facilitate a real-time simulation. The reduction of the models was achieved by a combination of analytical solutions with optimized numerical algorithms for partial differential equations. These measures facilitate the execution of a welding simulation in a very short time. Experimental support (provided by AUDI and Fronius) upon the calibration leads to well validated and reliable results. With modern visualization methods the results are user-friendly presentable. A demonstrator in the form of an expansion of the Fronius Virtual Welding system was set up. The demonstrator contains an offline and an online mode. The offline mode performs the analysis after the welding. The online mode performs the real-time (simulation) analysis during welding. The development is based on results from preceding developments such as Virtual Welding System (Fronius, FH JOANNEUM) and SimWeld Software (RWTH Aachen).

Adresa autora / Author's address:

¹ISF - Welding and Joining Institute, RWTH Aachen University, Aachen, Germany, ^amokrov@isf.rwth-aachen.de, ^bschmidt@isf.rwth-aachen.de, ^csimon@isf.rwth-aachen.de, ^dhead@isf.rwth-aachen.de

²CMI, Institute of Design & Communication, FH JOANNEUM, Graz, Austria, ^eAndreas.Behmel@fh-joanneum.at, ^fJochen.Martin@fh-joanneum.at

³Audi AG, Neckarsulm, Germany, ^gDaniel.Rudolph@audi.de

⁴Fronius International GmbH, Thalheim bei Wels, Germany, ^hBecirovic.Almedin@fronius.com

Keywords: arc welding, visualization, weld pool, education, modelling

Rezime

Savremene metode vizualizacije omogućavaju korisniku bolje i dublje razumevanje procesa zavarivanja. Trenutne metode i sistemi vizualizacije se zasnivaju na empirijskim osnovama. Razvijeni simulacioni softveri zasnivaju se na fizičkim modelima, što korisniku olakšavaju vizualizaciju geometrije zavarenog spoja i raspodele temperatura. Na ovaj način eventualno loši zavareni spojevi mogu se unapred otkriti i korigovati. To vodi ka povećanja kvaliteta i profitabilnosti procesa. Ovakav pristup uvodi novo merilo u svetu tehnologije električnog luka i postavlja osnovu za budući razvoj. Fizički modeli zavarivanja su do sada optimizovani i pojednostavljeni kako bi se olakšala simulacija u realnom vremenu. Pojednostavljenje modela postignuto je kombinacijom analitičkih rešenja prenosa toplote sa optimizovanim numeričkim algoritmima za parcijalne diferencijalne jednačine koje opisuju prenost toplote tokom procesa. Ove mere omogućavaju izvođenje simulacije zavarivanja u vrlo kratkom vremenu. Eksperimentalna podrška, koju pružaju firme AUDI i Fronius, omogućavaju kalibraciju modela i dovode do dobijanja proverenih i pouzdanih rezultata. Sa modernim metodama vizualizacije dobijeni rezultati su primenljivi za prezentaciju. Simulacija zavarivanja je unapređena i proširena od strane firme Fronius. Simulator zavarivanja poseduje režime rada "offline" i "online". Oflajn režim vrši analizu nakon zavarivanja. Onlajn režim vrši analizu u realnom vremenu (simulacija) tokom zavarivanja. Razvoj prikazanog modela se zasniva na rezultatima iz prethodno razvijenih modela, poput sistema za virtuelno zavarivanje (Fronius, FH JOANNEUM) i softvera SimVeld (RVTH Aachen).



1. Introduction

Since the 1990ies Virtual Reality Systems have been developed and now they are well known and also well established in many different disciplines, for example in Flight Simulation Training. In welding training such systems are also already state-of-the-art [1], to train beginning welders the skills of manual welding, without using too many resources of time and money or exposing them to dangers.

On the other hand, numerical simulation software for welding process simulation has seen major advances in the recent years, as well. The use of computational simulation methods based on physical models is an established engineering method for the investigation of arc welding processes [2, 3]. It represents an efficient way to find the required welding parameters, especially for unique tasks.

However, often these methods require a large computation time in order to give a result with sufficient accuracy, in some cases they can even take several weeks, even on highperformance computing systems [4]. With the application of the right assumption as well as advanced numerical and computational approaches, the calculation time in the GMAW process simulation platform SimWeld® [5] could be cut to less than one second per iteration, which allows the usage for near real-time welding calculation. This made it possible to combine both computational tools into one Virtual Reality Training system that could give direct feedback and enable a trainee to visualize and learn the effect of different welding parameters. Therefore, based on the virtual welding training system Fronius Virtual Welding®, a visualization module was combined with the near real-time simulation of newly developed transient SimWeld® algorithms.

To our knowledge, there is currently no Virtual Reality Training System for manual welding training on the market, which combines the advantages of virtual reality environments with physics-based simulation results.

2. A transient simulation model of GMA welding for real-time simulation

The simulation group of the Welding and Joining Institute of RWTH Aachen University (ISF) has been carrying out research on arc welding processes to formulate physical models that, after being implemented into software (SimWeld® – Welding Process Simulation Software [6-8]), allow to calculate weld seam geometry and heat input and distribution within a few minutes on a standard personal computer. This high calculation speed is mainly due to the replacement of the fluid flows as

1. Uvod

Od 1990-ih godina Sistemi Virtuelne Stvarnosti su razvijani i sada su dobro poznati i primenjuju se u mnogim različitim oblastima kao na primer pri trenažnoj simulaciji letenja. U obuci zavarivanja takvi sistemi su takođe već primenjuju [1], I to za obuku zavarivača I za ovladavanje početnih veština pri ručnom zavarivanju, bez zauzimanja previše resursa vremena i novca, I bez izlaganja opasnostima I eventualnih povređivanja.

S druge strane, softveri za numeričku simulaciju procesa zavarivanja, zabeležili su veliki napredak poslednjih godina. Tkođe primena metoda računarske simulacije zasnovane na fizičkim modelima je omogućila razvoj inženjerska metoda za proučavanje procesa elektrolučnog zavarivanja [2, 3]. To predstavlja efikasan način za određivanje potrebnih parametara zavarivanja, posebno u specifičnim slučajevima. Međutim, često ove metode zahtevaju dugačko vreme proračuna kako bi se dobili rezultati sa dovoljnom tačnosti. U nekim slučajevima mogu potrajati i nekoliko nedelja, čak i sa visokom efikasnošću računarskih sistema [4]. Sa primenom pravih pretpostavku kao i uz primenu naprednih numeričkih I računarskih pristupa, vreme proračuna pri simulaciji MAG procesa pri primeni platforme za simulaciju procesa SimVeld® [5], bi mogla da bude smanjena na manje od jedne sekunde po iteraciji, što omogućava upotrebu za simulaciju zavarivanja u skoro realnom vremenu. Ova kombinacija oba računarska alata u jedan Sistem za obuku u virtuelnoj stvarnosti, može dati direktne povratne informacije i omogućiti korisniku da vizualizuje i nauči o efektima različitih parametara zavarivanja. Prema tome, na osnovu sistema za virtuelno zavarivanje Fronius Virtual Velding®, a modul za vizuelizaciju je kombinovan sa gotovo realnim vremenom simulacija novorazvijenog algoritma SimVeld®-a. Prema našim saznanjima, trenutno ne postoji na tržištu virtuelni sistem obuke za ručno zavarivanje, koji kombinuje prednosti virtuelne stvarnosti okruženja sa rezultatima simulacije zasnovanim na fizici.

2. Simulacioni model MAG zavarivanja za simulaciju u realnom vremenu

Simulaciona grupa Instituta za zavarivanje i spajanje sa RWTH Univerziteta u Ahenu (ISF) vršila je istraživanje procesa elektrolučnog zavarivanja radi formulisanja fizičkih modela koji bi nakon uvođenja u softver (SimVeld® - Softver za Simulaciju Procesa Zavarivanja [6-8]), omogućili izračunavanje geometrije zavarenog spoja i unosa I raspodelu toplote u roku od nekoliko minuta na standardnom ličnom (PC) računaru. Ovako velika brzina proračuna uglavnom je posledica zamene



well as magnetohydrodynamic effects in the weld pool and the arc area by reduced compensation algorithms.

The model architecture of the simulation algorithms implemented in SimWeld® are based on the given welding parameters, material properties and power source control algorithms. The models are calculating an average heat and mass input as well as an arc pressure distribution for a defined welding time, as well as weld pool and seam geometry the heat flow within the complete macroscopic area of the workpiece. The newly developed transient model architecture is based on the steady-state algorithms of SimWeld®, but allows the transient execution of the GMA welding process simulation. The calculation time for each transient iteration was reduced to less than one second, depending on the used computer hardware, by optimizing the algorithms and reducing the model dimensions.

However, for true real-time simulation a reduction of the calculation time to less than 40 ms or 25 Hz is required, which corresponds to the frequency of human visual perception. This would require another speed up of the factor of 25, which is still a research goal and now within reach. The applied models are also able to react on current pulses and short circuits, as well as the unique movement of the torch, which is typical for a manual welding procedure. The resulting output, which is obtained, includes the shape of the weld pool and weld bead Fig. 1, as well as the temperature fields in the work piece and the area and thermocycles in the HAZ.

mešanja tečne faze u zavarivačkom tečnom kupatilu, kao i magnetohidrodinamičke efekte, u oblast delovanja električnog luka jednostavnijim algoritima. Arhitektura modela algoritama simulacije implementirani u SimWeld®, zasnovani su na zadatim parametrima zavarivanja, osobinama materijala i algoritima kontrole izvora napajanja. Modeli izračunavaju prosečnu toplotu i unos mase kao i raspodele pritiska električnog luka za definisano vreme zavarivanja. Takođe izračunavaju veličinu metalne kupke i geometriju zavarenog spoja u makroskopskoj oblasti radnog komada. Novorazvijena arhitektura prelaznog model se zasniva na stacionarnom algoritmu SimWeld®, ali omogućava obavljanje simulacije MAG procesa zavarivanja. Vreme izračunavanja za svaku iteraciju je smanjena na manje od jedne sekunde, i u zavisnosti od korišćenog računarskog hardvera, kroz optimizaciju algoritama i smanjenje dimenzija modela. Međutim, za stvarnu simulaciju u realnom vremenu zahteva se smanjenje vremena proračuna na manje od 40 ms ili 25 Hz, što odgovara frekvenciji vizuelne percepcije čoveka. To bi zahtevalo još jedno ubrzanje faktorom 25, što je još uvek cilj istraživanja i sada je skoro postignuto. Primenjeni modeli su takođe su u stanju da reaguju na strujne impulse i kratke spojeve, kao i kretanje gorionika tipično za procedure ručnog zavarivanja. Dobijeni rezultati obuhvataju definisanje oblika tečnog kupatila metala šava i nadvišenje metala vara, kao što je prikazano na Slici 1. Takođe dobijaju se i temperaturna polja u radnom komadu kao i površina i termalni ciklus u zoni uticaja toplote (ZUT).

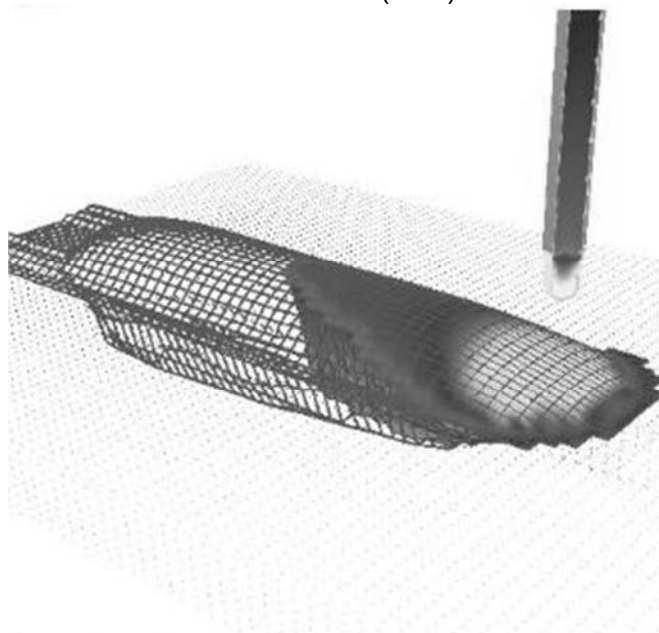


Figure 1. Example of the result of a transient Simulation in SimWeld®
Slika 1. Primer rezultata simulacije zavarivanja programom SimWeld®



3. Comparison of simulated and experimental results

The simulation algorithms that were developed are designed to allow a fast calculation to be used in a virtual reality educational environment with the goal of allowing the trainee to benefit from physics-based virtual welding results.

In order to reach for the goal of real-time simulation, simulation speed was favoured over the accuracy of the simulation results. For this reason, a validation of the results was necessary and for this purpose welding experiments were executed at Fronius and Audi, including transient measurement of current and voltage as well as crosssections of the weld seam.

The resulting comparison is shown in Fig. 2, which shows that the deviations in the calculated heat input were deviating at about 10 % from the experimental result. However, when considering that the calculation is performed at an iteration timestep of 25 Hz, which means that the calculation will be performed many times during an actual training weld. Therefore it is not necessary to achieve a correct result at every iteration, but it is rather important that the general trend of the process can be captured and displayed. Therefore, the resulting accuracy is considered to be sufficient.

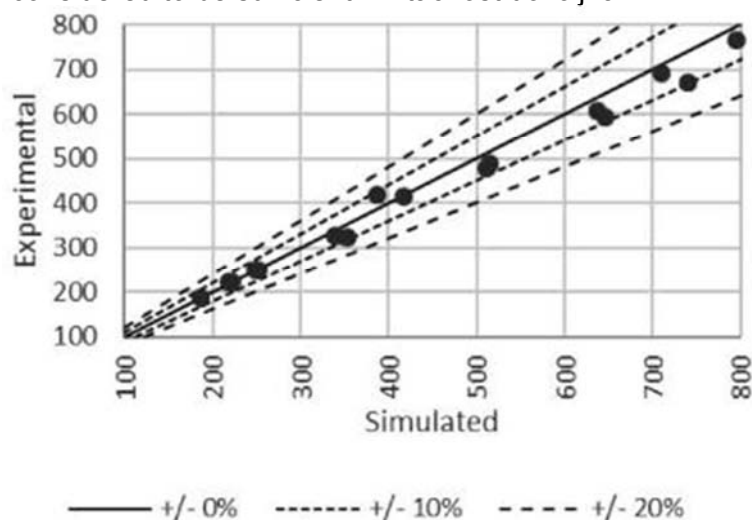


Figure 2. Comparison of experimental and simulated heat input in J/mm, taking into account an efficiency factor of approx. 80%

Slika 2. Poređenje eksperimentalnog i simuliranog unosa toplote u J/mm, uzimajući u obzir faktor efikasnosti od oko 80%

4. Result visualization in Fronius Virtual Welding®

Since 2005 Fronius International GmbH together with FH JOANNEUM Gesellschaft mbH is developing a virtual welding training system (Fronius Virtual Welding®) for different welding processes (including GMA) which uses a qualitative weld seam simulation that is not based on numerical welding simulation algorithms.

3. Poređenje simuliranih i eksperimentalnih rezultata

Razvijeni algoritmi simulacije su tako projektovani da omogućavaju brzi proračun koji može da se primeni za obuku u uslovima virtuelne stvarnosti. Cilj je omogućavanje korisniku primenu prednosti rezultata virtuelnog zavarivanja zasnovanih na zakonima fizike.

Da bi postigli cilj simulacije u realnom vremenu, brzina simulacije favorizovana je u odnosu na tačnost rezultata simulacije. Zbog toga je validizacija rezultata bila neophodna i u tu svrhu su izvršeni eksperimenti zavarivanja u Froniusu i Audiju, uključujući i merenje struje i napona kao i preseka zavarenih spojeva.

Dobijeno poređenje rezultata prikazano je na slici 2, koje pokazuje da su odstupanja u izračunatoj unešenoj toploti odstupaju od oko 10% od eksperimentalno dobijenih rezultata. Međutim, kada se uzme u obzir da se proračun vrši pri koraku vremenske iteracije od 25 Hz, što znači da će proračun biti izvedeni mnogo puta tokom stvarnog treninga zavarivanja. Zbog toga nije potrebno postići tačan rezultat za svaku iteraciju, ali je prilično važno da se može uhvatiti i prikazati opšti trend procesa. Stoga se smatra da je rezultirajuća tačnost dovoljna.

4. Rezultati vizualizacije kod Fronius Virtual Welding®

Od 2005. godine Fronius International GmbH zajedno sa FH JOANNEUM Gesellschaft mbH razvija virtuelni sistem obuke za zavarivanje (Fronius Virtual Velding®) za različite postupke zavarivanja (uključujući MAG postupak) koji koristi kvalitativne simulacije šava na kojoj se ne zasniva na algoritmima numeričke simulacije zavarivanja.



To visualize the results of the numerical welding simulation the training system was extended by an analysis module that on the one hand shows the calculated weld seam geometry (Fig. 3) and on the other hand visualizes several welding parameters (stickout, travel and work angle) in an intuitive user interface.

The user interface will also include a view of a virtual slice across the weld seam and allows the user to move its view along the weld seam. Fig. 4 shows a prototype of the analysis module, where as an example, the critical areas of the resulting weld seam are marked with different colors (green, red and yellow), indicating, for example, that the torch angle was insufficient at this position or other such issues.

Da bi se vizualizovali rezultati numeričke simulacije zavarivanja sistem obuke je proširen analizom modula koji s jedne strane prikazuje izračunatu geometriju šava, prikazano na Slici 3, a sa druge strane vizuelizuje nekoliko parametara zavarivanja (dodavanje žice, kretanje i radni ugao) jednim intuitivnim korisničkim interfejsom.

Korisnički interfejs će takođe sadržati prikaz virtuelnog preseka zavarenog spoja, čime se omogućava korisniku da pomeri pogled duž linije zavarivanja. Slika 4 prikazuje prototip modula za analizu, gde su kao primer označena kritična područja rezultirajućeg šava, označena različitim bojama (zelena, crvena i žuta), što ukazuje, na primer, da gorionik nije bio pod dovoljnim uglom u ovom položaju ili je u pitanju neka druga nepravilnost.



Figure 3. 3D visualization of numerical simulation overall results calculated by SimWeld® DLL in the Fronius Virtual Welding® playback view.

Slika 3. 3D vizuelizacija numeričke simulacije sa rezultatima izračunatim programom SimWeld® DLL reprodukovani na simulatoru Fronius Virtual Welding®



Figure 4. Prototype of the analysis module as developed for the Fronius Virtual Welding® training system.

Slika 4. Prototip modula za analizu kako je razvijen za sistem obuke Fronius Virtual Welding®.



5. Conclusion and outlook

For the next generation of the Fronius Virtual Welding® a reduced physics-based model for numerical welding process simulation was developed. The model consists of a transient architecture that is implemented in highly efficient algorithms.

The losses in accuracy due to the extensive reduction of the physical models have been addressed by performing a validation on experimental data with satisfactory results.

For real-time simulations and visualizations in a virtual reality framework, a framerate of at least 25 Hz is mandatory. Currently, this can be achieved only by using highend computer hardware. The current training system runs on regular PCs and therefore the acceleration of the numerical simulation was not yet able to perform at the desired framerate. Nevertheless, the trainee can still benefit from the possibility to have an indepth analysis of the training results very shortly after the training.

Such a digitalized welding training allows to transfer more information to the learner in a shorter time. It represents therefore a revolution in the way welding can be taught, as the education of not only the empirical but also the physical knowledge is more intuitive and efficient. From this, a massive enhancement of the quality of the education is to be expected, while requiring the same or even less time, as well as less material consumption.

Acknowledgements

The K-Project Network of Excellence for Metal JOINing is fostered in the frame of COMET - Competence Centers for Excellent Technologies by BMWFW, BMVIT, FFG, Land Oberösterreich, Land Steiermark, Land Tirol and SFG. The programme COMET is handled by FFG.

References

- [1] Fronius International GmbH, 2018. Our Expertise [online]: *WELDER TRAINING OF THE FUTURE: FRONIUS VIRTUAL WELDING*. (Pettenbach, Austria: Fronius International GmbH) [accessed 27.11.2018]. Available online: <https://www.fronius.com/de/schweisstechnik/kompetenzen/schweissausbildung/virtual-welding>
- [2] Reisgen, U., O. Mokrov, E. Rossiter et al., 2010. *Mathematical Modelling of Weld Phenomena 9*
- [3] Loose, T., O. Mokrov, A. Scharff, U. Reisgen, 2016. *Mathematical Modelling of Weld Phenomena 11*
- [4] Reisgen, U., M. Schleser, O. Mokrov, A. Zabirow, U. Füssel, M. Schnick, M. Hertel, S. Jaeckel, 2012. *Schweißen und Schneiden 4 64*

5. Zaključak i budući rad

Za sledeću generaciju virtuelnog zavarivanja Fronius Virtual Welding®, razvijen je pojednostavljen fizički model za numeričku simulaciju postupka zavarivanja. Arhitektura modela se sastoji od implementiranog visoko efikasnog algoritma. Smanjena tačnosti usled opsežnog smanjenja fizičkih modela su postignuta izvođenjem validacije eksperimentalnih podataka i dobijanjem zadovoljavajućih rezultata. Za simulacije i vizualizacije u stvarnom vremenu u virtuelnom prikazu stvarnosti, obavezna je frekvencija proračuna sa učestalošću od najmanje 25 Hz. Trenutno se to može postići samo upotrebom brzih i velikih računarskih hardvera. Trenutni sistem obuke koristi klasične personalne računare i samim tim brzina numeričke simulacije nije u stanju da postigne željenu brzinu proračuna i simulacije. Ipak, polaznik obuke i dalje može imati koristi od mogućnosti analize rezultata vrlo brzo nakon treninga. Prikazani digitalizovani trening izvođenja procesa zavarivanja omogućava prenos mnogo više informacija korisniku u kraćem vremenskom intervalu. Samim tim ova metodologija predstavlja revoluciju u načinu na koji se može naučiti zavarivanje, tako da su dobijena znanja uviđanjem i opažanjem i više nisu samo empirijska već se stiču znanja o fizičkim procesima koji se odvijaju tokom zavarivanja. Ovo veliko unapređenje kvaliteta obrazovanja, zahteva jednako ili kraće vreme uz istovremeno manje materijalne troškove.

Zahvalnica

K-Projekt Mreže Izvrsnosti za spajanje metala se radi u okviru COMET - Centara za Kompetencije za Napredne Tehnologije od BMVFW, BMVIT, FFG, Land Oberösterreich, Land Steiermark, Land Tirol i SFG. Programom COMET upravlja FFG.

- [5] Loose, T., O. Mokrov, 2015. *European LS-DYNA Conference, Würzburg, 15.-17.6.2015*
- [6] Mokrov, O., V. Pavlyk, U. Dilthey, 2006. *Math. Mod. Inf. Techn. Weld. Relat. Pro.* (Kiev, Ukraine: Paton Electric Welding Institute)
- [7] Pavlyk, V., O. Mokrov, U. Dilthey, 2007 *Mathematical Modelling of Weld Phenomena 8*
- [8] Loose, T., 2018 *SimWeld® - Prozeßsimulation für das MSG Schweißen* (Wössingen, Germany: Ingenieurbüro Loose) [accessed 18.09.2018]. Available online: <http://www.simweld.net>



Yuir Kudryavtsev¹

Fatigue improvement of welded elements by ultrasonic impact treatment

Poboljšanje otpornosti na zamor zavarenih elemenata primenom obrade ultrazvučnim udarom

Stručni rad / Professional paper

Prezentovano u okviru 72. IIW godišnje Skupštine i međunarodne konferencije održane u Bratislavi-Slovačka 07-12. Jula 2019

Rad primljen / Paper received:

Oktobar 2020.

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

Ključne reči: Obrada ultrazvučnim udarom, poboljšanje otpornosti na zamor, zavareni elementi

Adresa autora / Author's address:

¹Structural Integrity Technologies Inc. (SINTEC) Markham, Canada, ykudryavtsev@sintec.ca

Key words: ultrasonic impact treatment, fatigue improvement, welded elements

Abstract

The ultrasonic impact treatment (UIT) is relatively new and promising process for fatigue life improvement of welded elements and structures. In most industrial applications this process is known as ultrasonic peening (UP).

The beneficial effect of UIT/UP is achieved mainly by relieving of tensile residual stresses and introducing of compressive residual stresses into surface layers of a material. The secondary factors in fatigue improvement by UIT/UP are decreasing of stress concentration in weld toe zones and enhancement of mechanical properties of the surface layers of the material. Fatigue testing of welded specimens showed that UIT/UP is the most efficient improvement treatment as compared with traditional techniques such as grinding, TIG-dressing, heat treatment, hammer peening and application of LTT electrodes. The developed computerized complex for UIT/UP was successfully applied for increasing the fatigue life and corrosion resistance of welded elements, elimination of distortions caused by welding and other technological processes, residual stress relieving, increasing of the hardness of the surface of materials.

The results of fatigue testing of large-scale welded specimens in as-welded condition and after application of UIT/UP are considered in this paper. It is shown that UIT/UP is the most effective and economic technique for increasing of fatigue strength of welded elements in materials of different strength. These results also show a strong tendency of increasing of fatigue strength of welded elements after application of UP with the increase in mechanical properties of the material used.

Rezime

Ultrazvučna obrada udarom (Ultrasonic impact treatment – UIT) predstavlja relativno novi obećavajući metod poboljšanja zamornog veka zavarenih elemenata i konstrukcija. U većini industrijskih primena, ovaj proces je poznat po imenu ultrazvučno ojačavanje (Ultrasonic peening - UP).

Poboljšavajući efekat UIT/UP metod postiže pre svega rasterećivanjem zaostalih napona i ubacivanjem pritisnih napona na površinski sloj materijala. Sekundarni faktori pri poboljšavanju otpornosti na zamor primenom ove metode se ogledaju u smanjenju koncentracije napona oko linije stapanja, kao i poboljšanje mehaničkih osobina površinskog sloja materijala. Ispitivanje zamora zavarenih epruveta je pokazalo da je UIT/UP najefikasniji vid obrade u poređenju sa tradicionalnim tehnikama poput brušenja, TIG-prevalaka, termičke obrade, čekićanja i primene LTT elektroda. Razvijeni računarski sistem za UIT/UP je uspešno primenjen na povećanje zamornog veka i otpornost na koroziju zavarenih elemenata, eliminisanje distorzija prouzrokovanih zavarivanjem i drugim tehnološkim procesima, smanjenje zaostalih napona, kao i povećanje tvrdoće površinskog sloja materijala.

U ovom radu su prikazani rezultati ispitivnja zamorom, zavarenih uzoraka velikih dimenzija u zavarenom stanju i nakon primene UIT/UP. Pokazano je da je primena UIT/UP tehnike efikasna i ekonomična za povećanje zamorne čvrstoće zavarenih elemenata od materijala različite čvrstoće. Ovi rezultati takođe pokazuju izrazitu tendenciju povećanja zamorne čvrstoće zavarenih elemenata nakon primene process UP posebno sa porastom mehaničkih osobina tretiranih materijala.



1. Introduction

The UIT/UP technique is based on the combined effect of high frequency impacts of special strikers and ultrasonic oscillations in treated material [1, 2]. The beneficial effect of UIT/UP is achieved mainly by relieving of harmful tensile residual stresses and introducing of compressive residual stresses into surface layers of material and also on smaller scale by decreasing of stress concentration in weld toe zones and enhancement of mechanical properties of the surface layers of the material [3]. The basic system for UIT/UP treatment (total weight - 11 kg) includes an ultrasonic transducer, a generator and a laptop (optional item) with software for optimum application of UIT/UP - maximum possible increase in fatigue life of welded elements with minimum cost, labour and power consumption. In general, the basic UIT/UP system shown in Fig. 1 could be used for treatment of weld toe or welds and base metal also if necessary.

1. Uvod

UIT/UP tehnika je zasnovana na kombinovanom uticaju visokofrekventnih udara koji se vrše posebnim čekićima i ultrazvučnih oscilacija na obrađivanom materijalu [1, 2]. Poboljšavajući efekat UIT/UP metod postiže pre svega rasterećivanjem zaostalih zateznih napona i ubacivanjem pritisnih napona na površinskom sloju materijala, i u nešto manjoj meri zahvaljujući smanjivanju koncentracije napona oko linija stapanja zavarneog spoja i poboljšanju mehaničkih osobina površinskog sloja materijala [3]. Osnovni sistem za UIT/UP obradu, ukupne težine 11 kg, se sastoji od ultrazvučnog pretvarača, generatora i laptopa sa softverom koji omogućava optimalnu primenu UIT/UP metode – kako bi se ostvarilo maksimalno produženje zamornog veka zavarenih elemenata uz minimalne troškove, napor i potrošnju struje. Uopšteno, osnovni UIT/UP sistem prikazan na slici 1 se može koristiti i za obradu zavarenih spojeva ili osnovnog materijala, po potrebi.

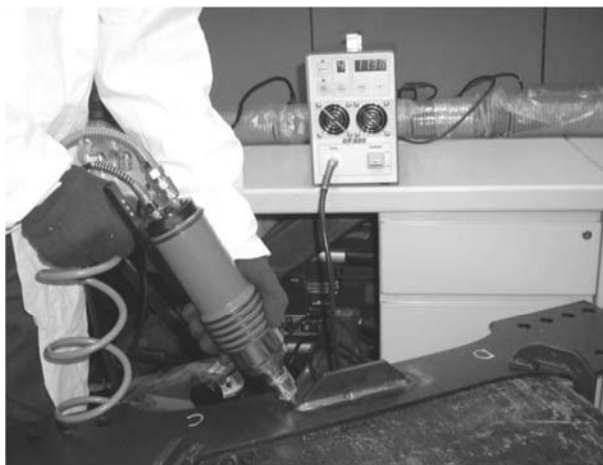


Figure 1. Ultrasonic impact treatment (UIT/UP) of welded sample for fatigue testing
Slika 1. Obrada ultrazvučnim udarom (UTI/UP) zavarene epruvete za ispitivanje zamorom

Fatigue testing of welded specimens showed that UIT/UP is the most efficient improvement treatment as compared with traditional techniques such as grinding, TIG-dressing, heat treatment, hammer peening and application of LTT electrodes.

2. Principles and Technology of UIT/UP

2.1 Freely Movable Strikers

The UIT/UP equipment is based on known from the 40's of last century technical solutions of using working heads with freely movable strikers for hammer peening. At that time and later, a number of different tools based on using freely movable strikers were developed for impact treatment of materials and welded elements by using pneumatic [4,5] and ultrasonic [6-12] equipment. The more effective impact treatment is provided when the strikers are not connected to the tip of actuator but could move freely between the actuator and the

Ispitivanje zamorom zavarenih epruveta je pokazalo da je UIT/UP najefikasnija metoda obrade u poređenju sa prethodno pominjanim tradicionalnim metodama (brušenje, TIG-prevlake, itd.).

2. Principi i tehnologija UIT/UP

2.1 Pokretni čekići

UIT/UP oprema je zasnovana na dobro poznatom tehničkom rešenju iz četrdesetih godina prošlog veka, koje je koristilo radne glave sa čekićima koji su mogli slobodno da se pomeraju, za potrebe čekićanja. Tada, a i kasnije, razvijen je veliki broj alata zasnovanih na primeni pokretnih čekića za potrebe obrade materijala i zavarenih elemenata primenom pneumatske [4, 5] i ultrazvučne opreme [6 - 12]. Obrada udarom je efikasnija u slučaju kada čekići nisu povezani sa vrhom pokretača, već mogu da se slobodno kreću između pokretača i radnog



treated material. The tools for impact treatment of materials and welded elements with the freely movable strikers (12 on Fig. 2a and 21 on Fig. 2b) that are mounted in a holder are shown in Figure 2. In the case of so-called intermediate element-striker(s) a force of only 30 - 50 N is required for treatment of materials.

komada. Alati za obradu udarom materijala i zavarenih elemenata sa pokretnim čekićima (12 na slici 2a i 21 na slici 2b), koji su montirani na držač, su prikazani na slici 2. U slučaju takozvane posredne veze između elementa i čekića, dovoljna je sila od svega 30 – 50 N za obradu materijala.

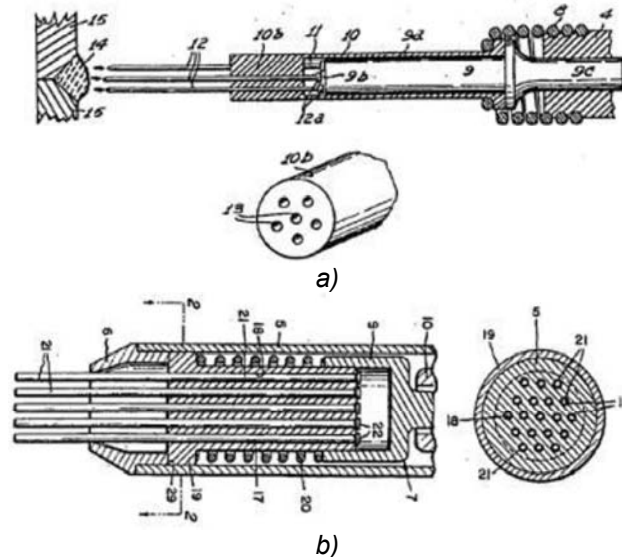


Figure 2. Sectional view through tools with freely movable strikers for surface impact treatment: a – described in [4], b – described in [5]

Slika 2. Poprečni presek alata sa pokretnim čekićima za površinsku obradu udarom: a – opisan u [4], b – opisan u [5].

Fig. 3 shows a standard set of easy replaceable working heads with freely movable strikers for different applications of UIT/UP.

Na slici 3 je prikazan standardan komplet lako zamenljivih radnih glava sa pokretnim čekićima za različite primene UIT/UP metode.



Figure 3. A set of interchangeable working heads for UIT/UP [1]

Slika 3. Komplet zamenljivih radnih glava za UIT/UP [1].

2.2 Ultrasonic Impact and Effects of Ultrasound

During the ultrasonic impact treatment, the striker oscillates in the small gap between the end of the ultrasonic transducer and the treated specimen, impacting the treated area [6-9]. This kind of high frequency movements/impacts in combination with high frequency oscillations induced in the treated material is typically called the ultrasonic impact. There are a number of effects of ultrasound on metals that are typically considered: acoustic

2.2 Ultrazvučni udar i efekti

Tokom obrade ultrazvučnim udarom, čekić osciluje u malom zazoru između kraja ultrazvučnog pretvarača i radnog komada, pri čemu udara u obrađivanu površinu [6 - 9]. Ovakva vrsta visokofrekventnog kretanja/udara u kombinaciji sa visokofrekventnim oscilacijama koje se javljaju u obrađivanom materijalu se najčešće naziva ultrazvučni udar. Ultrazvuk može imati veliki broj različitih uticaja na metale, od kojih se najčešće



softening, acoustic hardening, acoustic heating, etc. In the first of these (acoustic softening that is also known as acoustic-plasticity effect), the acoustic irradiation reduces the level of stress necessary for plastic deformation. In general, the effect of ultrasound on the mechanical behavior could be compared with the effect of heating on a material. The difference is that acoustic softening takes place immediately when a metal is subjected to ultrasonic irradiation. Also, relatively low-amplitude ultrasonic waves leave no residual effects on the physical properties of metals after acoustic irradiation is stopped [13].

2.3 Technology and Equipment for UIT/UP

The ultrasonic transducer oscillates at a high frequency, with 20-30 kHz being typical. The ultrasonic transducer may be based on either piezoelectric or magnetostrictive technology. Whichever technology is used, the output end of the transducer will oscillate, typically with amplitude of 20 – 40 mm. During the oscillations, the transducer tip will impact the striker(s) at different stages in the oscillation cycle. The striker(s) will, in turn, impact the treated surface. The impact results in plastic deformation of the surface layers of the material. These impacts, repeated hundreds to thousands of times per second, in combination with high frequency oscillation induced in the treated material result in a number of beneficial effects of UIT/UP.

There are two general types of ultrasonic transducers which can be used for UIT/UP: magnetostrictive and piezoelectric. Both accomplish the same task of converting alternating electrical energy to oscillating mechanical energy but do it in a different way (Fig. 4). In magnetostrictive transducer the alternating electrical energy from the ultrasonic generator is first converted into an alternating magnetic field through the use of a wire coil. The alternating magnetic field is then used to induce mechanical vibrations at ultrasonic frequency in resonant strips of magnetostrictive material.

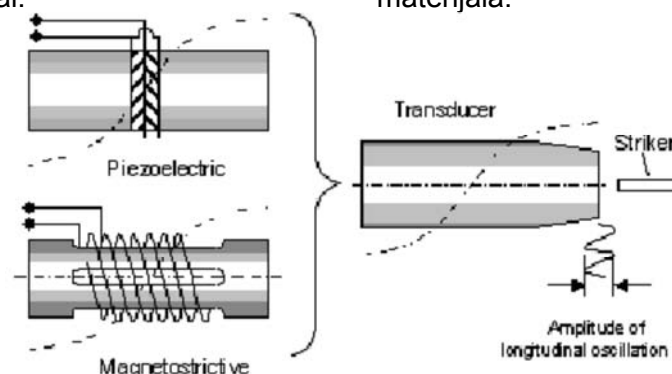


Figure 4. Schematic view of transducers for UIT/UP using piezoelectric and magnetostrictive approaches
Slika 4. Šematski prikaz pretvarača za UIT/UP primenom peizelektrične i magnetostruktivne tehnologije.

razmatraju: zvučno omekšavanje, zvučno ojačavanje, zvučno zagrevanje, itd. U slučaju prvog (omekšavanje, koje je takođe poznato pod imenom zvučno-plastični efekat), delovanje zvuka smanjuje nivo napona koji su neophodni za plastičnu deformaciju. Uopšteno, uticaj ultrazvuka na mehaničko ponašanje materijala se može uporediti sa zagrevanjem. Razlika je u tome što se zvučno omekšavanje dešava još dok je metal izložen dejstvu ultrazvuka. Takođe, ultrazvučni talasi sa relativno niskom amplitudom ne ostavljaju zaostale uticaje na fizičke osobine nakon što izloženost zvučnim dejstvima prestane [13].

2.3 Tehnologija i oprema za UIT/UP

Ultrazvučnu pretvarač osciluje sa visokom frekvencijom, najčešće u rasponu od 20 do 30 kHz. Ultrazvučni pretvarač može biti zasnovan ili na piezoelektričnoj ili magnetostruktivnoj tehnologiji. Bez obzira na izbor tehnologije, izlazi iz pretvarača će uvek oscilovati, najčešće sa amplitudama od 20-40 mm. Tokom ovih oscilacija, vrh pretvarača će udarati čekić(e) u različitim fazama ciklusa oscilacije. Čekić(i) će, kao posledica toga, udarati u obrađivanu površinu. Ovi udari će proizvesti plastičnu deformaciju u površinskom sloju. Kada se ovakvi udari ponavljaju i po hiljadu puta u sekundi, u kombinaciji sa visokofrekventnim oscilacijama koje su indukovane u obrađivanom materijalu, dolazi do pojave niza povoljnih efekata zahvaljujući primeni UIT/UP.

Postoje dva opšta tipa ultrazvučnih pretvarača koji se koriste za UIT/UP: magnetostruktivni i piezoelektrični. Oba postižu isti efekat pretvaranja naizmenične električne energije u oscilujuću mehaničku energiju, ali na malo drugačiji način, slika 4. U slučaju magnetostruktivnih pretvarača, naizmenična struja iz ultrazvučnog generatora se prvo pretvara u naizmenično magnetno polje, pomoću žičanog kalema. Naizmenično magnetno polje se onda koristi kako bi se indukovale mehaničke vibracije sa ultrazvučnim frekvencijama u rezonantnim trakama magnetostruktivnog materijala.



Magnetostrictive transducers are generally less efficient than the piezoelectric ones. This is due primarily to the fact that the magnetostrictive transducer requires a dual energy conversion from electrical to magnetic and then from magnetic to mechanical. Some efficiency is lost in each conversion. Magnetic hysteresis effects also detract from the efficiency of the magnetostrictive transducer. In addition, the magnetostrictive transducer for UIT/UP needs forced watercooling. Piezoelectric transducers convert the alternating electrical energy directly to mechanical energy through the piezoelectric effect.

Today's piezoelectric transducers incorporate stronger, more efficient and highly stable ceramic piezoelectric materials, which can operate under the temperature and stress conditions, making them reliable and allowing to reduce the energy costs for operation by as much as 60%.

Due to the high energy efficiency of piezoelectric transducers, the effect in fatigue life improvement by UIT/UP is practically the same by using of the magnetostrictive transducer with less power consumption. A basic UIT/UP system that is based on piezoceramic transducer is shown in Fig. 1.

The UIT/UP is an effective way for relieving of harmful tensile residual stresses and introducing of beneficial compressive residual stresses in surface layers of parts and welded elements. The mechanism of residual stress redistribution is connected mainly with two factors.

At a high-frequency impact loading, oscillations with a complex frequency mode spectrum propagate in a treated element. The nature of this spectrum depends on the frequency of ultrasonic transducer, mass, quantity and form of strikers and also on the geometry of the treated element.

These oscillations lead to lowering of residual welding stresses. The second and the more important factor, at least for fatigue improvement, is the surface plastic deformation that leads to introduction of the beneficial compressive residual stresses in surface layers of material.

In the fatigue improvement, the beneficial effect is achieved mainly by introducing of the compressive residual stresses into surface layers of metals and alloys, decrease in stress concentration in weld toe zones and the enhancement of the mechanical properties of the surface layer of the material. The schematic view of the cross section of material/part improved by UIT/UP is shown on Fig. 5 with the attained distribution of the stresses after the UIT/UP. The description of the UIT/UP benefits is presented in Tab. 1.

Magnetostruktivni pretvarači su generalno manje efikasni od piezoelektričnih. Ovo je pre svega zbog toga što ovi pretvarači zahtevaju dvostruko pretvaranje energije – iz električne u magnetnu, i obrnuto. Pri svakom od ovih pretvaranja se gubi deo efikasnosti. Efekti magnetnog histerezisa takođe umanjuju efikasnost ovakvih pretvarača, a pored toga im je neophodno i prinudno hlađenje vodom.

Piezoelektrični pretvarači pretvaraju naizmeničnu električnu energiju direktno u mehaničku energiju zahvaljujući piezoelektričnom efektu. Današnji piezoelektrični pretvarači koriste jače, efikasnije i stabilnije keramičke materijale, koji mogu da rade i pod opterećenjem, na različitim temperaturama, čime je poboljšana njihova pouzdanost i smanjena potrošnja energije do 60%. Usled visoke energetske efikasnosti piezoelektričnih pretvarača, efekat povećanja zamornog veka primenom UIT/UP je maltene isti kao i kod magnetostruktivnih pretvarača, uz značajno manji utrošak energije. Osnovni UIT/UP sistem zasnovan na piezoelektričnim pretvaračima je prikazan na slici 1.

UIT/UP predstavlja veoma efikasan način rasterećenja opasnih zaostalih zateznih napona uvođenjem pritisnih zaostalih napona u površinski sloj delova i zavarenih elemenata. Mehanizam preraspodele zaostalih napona je u najvećoj meri vezan za dva faktora. Pri visokofrekventnom udarnom opterećenju, oscilacije složenog spektra frekvencija će se prostirati kroz obrađivani materijal. Priroda ovog spektra zavisi od frekvencije ultrazvučnog pretvarača, mase, količine i oblika čekića, kao i od geometrije radnog komada. Ove oscilacije za posledicu imaju smanjenje zaostalih napona koji se javljaju nakon zavarivanja. Drugi, važniji faktor, bar sa stanovišta otpornosti na zamor, predstavlja plastična deformacija površinskog sloja, čime se u materijal uvode korisni pritisni naponi.

Pri poboljšanju zamornog veka, povoljni uticaju se najviše ostvaruju uvođenjem pritisnih zaostalih napona u površinske slojeve metala i legure, smanjenjem zaostalih napona oko linije stapanja i poboljšanjem mehaničkih osobina površinskog sloja materijala. Šematski prikaz poprečnog preseka materijala/dela koji je poboljšan primenom UIT/UP je prikazan na slici 5, sa novo dobijenom raspodelom napona. Prednosti primene UIT/UP su predstavljane u tabeli 1.

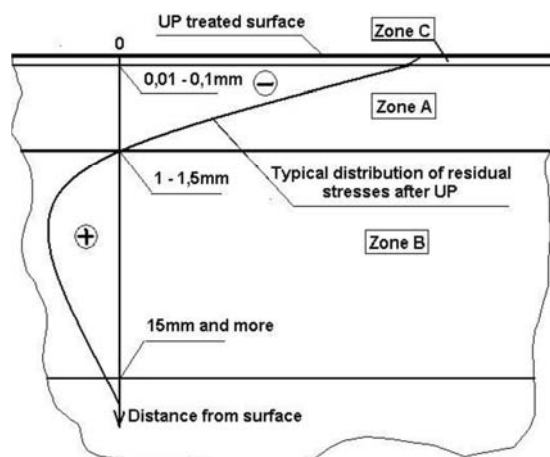


Figure 5. Schematic view of the cross section of material/part improved by Ultrasonic Peening [1]
Slika 5. Šematski prikaz poprečnog preseka materijala/dela poboljšanog primenom UIT/UP [1]

Table 1. Zones of Material/Part Improved by UIT/UP (see Figure 5 for illustration of the zones) [1]
Tabela 1. Zone u materijalu/delu koje su poboljšane primenom UIT/TP (prikazane na slici 5) [1]

Zona	Opis	Penetracija (udaljenost od površine), mm	Poboljšane osobine
A	Zona plastične deformacije i pritisnih zaostalih napona	1-1,5 mm	Otpornost na zamor, koroziju, habanje, krivljenje
B	Zona relaksacija zaostalih napona usled zavarivanja	Od 15 mm naviše	Krivljenje, otpornost na rast prsline
C	Zona nano-kristalizacije (koja može nastati pri određenim uslovima)	0,01-0,1 mm	Otpornost na koroziju, habanje, zamor na povišenim temperaturama

Fig. 6 illustrates the concept of the fatigue life improvement of welded elements by UIT/UP. In case of welded elements, it is enough to treat only the weld toe zone – the zone of transition from base metal to the weld, for a significant increase of fatigue life of welded elements. The produced by UIT/UP so-called “groove” in different types of welded elements is shown in Fig. 7 and 8.

Na slici 6 je ilustrovan koncept produženja zamornog veka zavarenih elementa primenom UIT/UP metode. U slučaju zavarenih delova, dovoljno je obraditi samo liniju stapanja, odnosno zonu prelaska sa osnovnog materijala na zavareni spoj, kako bi se postiglo značajno produženje zamornog veka ovakvih elemenata. Na slikama 7 i 8 su prikazani takozvani „žlebovi“ proizvedeni primenom UIT/UP metode.

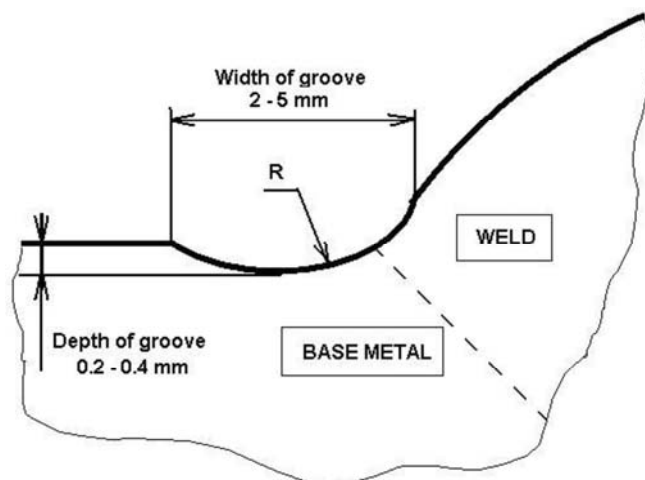


Figure 6. Profile of weld toe improved by Ultrasonic Peening [1]
Slika 6. Profil linije stapanja obrađene ultrazvučnim ojačavanjem [1].



Figure 7. The view of the butt welds in as-welded condition (left side sample) and after application of UP (right side sample)

Slika 7. Izgled sučeonog zavarenog spoja nakon zavarivanja (levo) i nakon što je urađen UP (desno)



Figure 8. The view of the fillet welds in as-welded condition (left side sample) and after application of UIT/UP (right side sample)

Slika 8. Izgled ugaonog zavarenog spoja nakon zavarivanja (levo) i nakon što je obrađen UP (desno)

It should be noted that the principle to treat only the weld toe zone and to produce so-called “groove” by UIT/UP and high efficiency of this approach for fatigue improvement of welded elements was for the first time described in literature in 1989 [2]. Fig. 9 shows the photo published in [2] of the “groove” that was produced by ultrasonic impact treatment of the end of welded stiffener that is critical from the fatigue point of view of the considered welded element.

Potrebno je napomenuti da je pristup koji se zasniva samo na obradi linije stapanja, kojim se dobija takozvani „žleb“ primenom UIT/UP metode, kao i njegoa velika efikasnost pri povećanju otpornosti na zamor zavarenih elemenata prvo su opisana u literaturi 1989. godine [2]. Na slici 9 se može videti fotografija žleba iz literature [2], proizvedenog obradom ultrazvučnim udarom kraja zavarenog ukrućenja, koji predstavlja kritično mesto sa stanovišta zamora posmatranog zavarenog elementa.

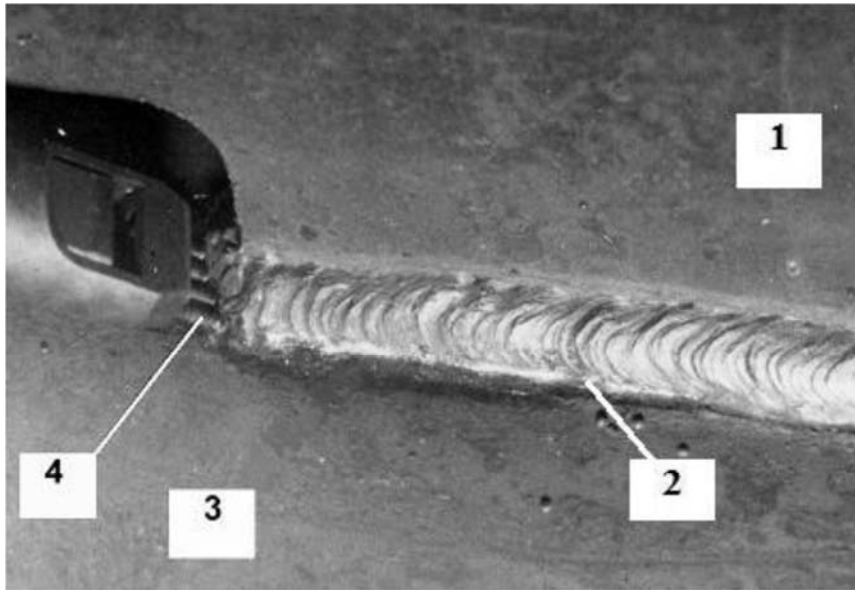


Figure 9. Photo of the “groove” produced by ultrasonic impact treatment of the end of welded stiffener published in 1989 [2]: 1 – welded stiffener, 2 – “groove” produced by UIT/UP, 3 - base plate, 4 – strikers of UIT tool

Slika 9. Fotografija „žleba“ porizvedenog obradom ultrazvučnim udarom kraja zavarenog ukrucenja, iz rada objavljenog 1989. [2]; 1 – ukrucenje, 2 – “žleb” proizveden primenom UIT/UP, 3 – osnovni materijal, 4 – čekići UIT alata.

3. Effectiveness of UIT/UP in Fatigue Improvement

The large-scale welded specimens were fatigue tested in as-welded conditions and after UIT/UP. Investigated materials - steels and aluminium alloys of different strength. Some results of fatigue testing are presented below.

3.1. 960 MPa yield strength steel

Four series of large-scale welded samples were subjected to fatigue testing to evaluate the effectiveness of UIT/UP application for fatigue life improvement of welded elements made from 960 MPa yield strength steel [14]. The fatigue specimens were designed as 50 mm wide by 6 mm thick steel plates with longitudinal non-load carrying fillet welded attachments, as shown in Fig. 10.

3. Efikasnost UIT/UP pri poboljšanju otpornosti na zamor

Zavarene epruvete velikih dimenzija su ispitivane na zamor neposredno nakon zavarivanja, kao i nakon što su obrađene primenom UIT/UP. Ispitivani materijali su obuhvatali čelike i legure aluminijuma različitih mehaničkih osobina. U daljem tekstu su prikazani rezultati nekih od ovih ispitivanja.

3.1 Čelik povišene čvrstoće (granica tečenja 960 MPa)

Četiri serije epruveta su ispitivane na zamor kako bi se ocenila efikasnost UIT/UP metode na produženje zamornog veka zavarenih elemenata od čelika povišene čvrstoće, sa granicom tečenja od 960 MPa [14]. Epruvete za ispitivanje na zamor, urađene sa sledećim dimenzijama – širina 50 mm i debljina 6 mm – sa podužnim nenosećim ugaonim zavarima, kao što je prikazano na slici 10.

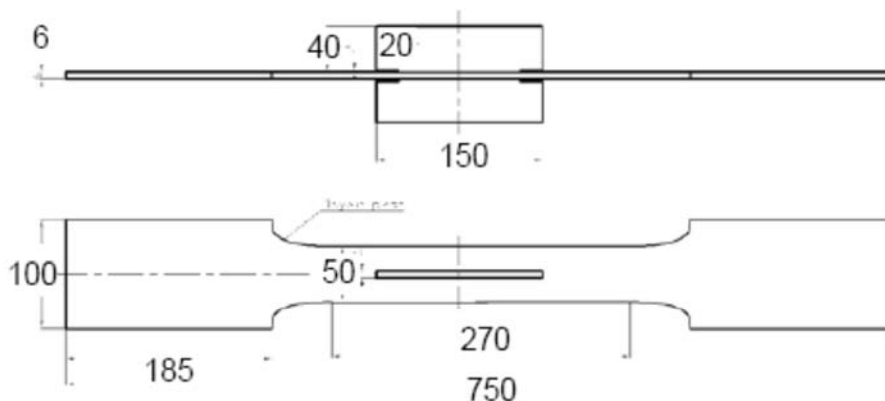


Figure 10. Specimen geometry for fatigue testing of 960 MPa yield strength steel welded elements [14]

Slika 10. Geometrija epruveta za ispitivanje zamora, izrađenih od čelika sa granicom tečenja od 960 MPa [14].



The testing has been conducted under constant amplitude using stress ratio $R = -1$. All of the as-welded specimens failed at the weld toe at the end of the longitudinal stiffeners. For the improved by UIT/UP welds, tested using constant amplitude loading, a variety of other failure modes were observed. The results of fatigue testing are presented in Fig. 11.

As can be seen from Fig. 11, the UIT/UP treatment with an instrument based on piezoelectric transducer (UP-600 system) provided the highest increase in fatigue performance of considered welded element for 960 MPa yield strength steel in comparison with the efficiency of application of magnetostrictive transducer and as well as LTT electrodes during welding.

Ispitivanje je izvršeno pod konstantnim amplitudnim naponom sa odnosom napona $R = -1$. Sve epruvete uzete iz neobrađenog zavarenog spoja su pukle u oblasti linije stapanja na kraju podužnih ukrčenja. Što se obrađenih epruveta tiče, ispitivanje je izvršeno sa konstantnim amplitudnim naponom, uz različite režime otkaza. Rezultati ovog ispitivanja na zamor su prikazani na slici 11.

Kao što se može videti sa ove slike, obrada primenom UIT/UP sa opremom koja radi na principu piezoelektričnog pretvarača (sistem UP-600) je proizvela najveće poboljšanje u zamornom ponašanju posmatranog zavarenog elementa za slučaj čelika povišene čvrstoće ($R_e = 960$ MPa), u poređenju sa drugim metodama, uključujući ultrazvučno ojačavanje pomoću magnetostruktivnih pretvarača, kao i LTT elektrode.

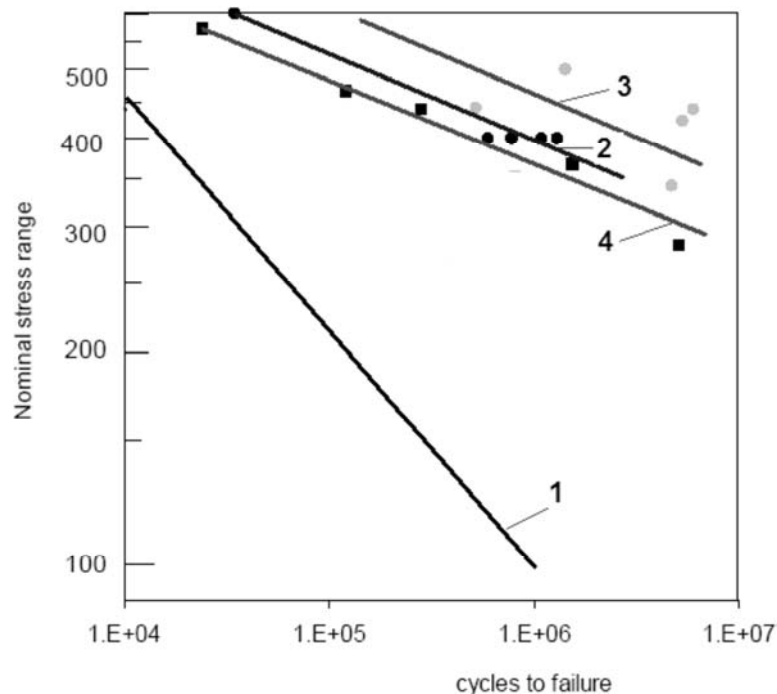


Figure 11. Fatigue test results for 960 MPa yield strength steel welded specimens [14]: 1- in as-welded condition, 2 and 3 - after UIT/UP based on using magnetostrictive and piezoelectric system transducers respectively, 4- after application of LTT electrodes

Slika 11. Rezultati ispitivanja zamora epruveta od čelika povišene čvrstoće [14]: 1-neobrađeno stanje nakon zavarivanja, 2 i 3-nakon obrade primenom UIT/UP magnetorestriktivnim i piezoelektričnim pretvaračima, respektivno, 4-nakon primene LTT elektroda.

3.2. Fatigue crack repair by welding

The UIT/UP could also be effectively used during the weld repair of fatigue cracks. Figure 12 shows the drawing of a large-scale welded specimen containing a non-load carrying longitudinal attachments designed for fatigue testing [15]. Mechanical properties of considered material: yield strength – 360 MPa, ultimate strength – 420 MPa. These specimens were tested in as-welded condition and after weld repair with and without application of UIT/UP.

3.2. Reparatura zamornih prslina zavarivanjem

UIT/UP se takođe može efikasno koristiti tokom reparaturnog navarivanja zamornih prslina. Na slici 12 je prikazan crtež epruvete velikih dimenzija koja sadrži i nenoseći podužni priključak, koji služi za ispitivanje zamora [15]. Mehaničke osobine materijala koji je posmatran u ovom slučaju su – granica tečenja od 360 MPa, zatezna čvrstoća od 420 MPa. Ove epruvete su ispitane nakon zavarivanja, kao i nakon reparaturnog navarivanja, sa i bez primene UIT/UP.

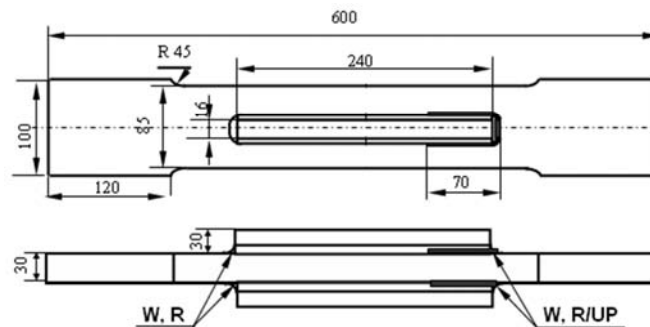


Figure 12. Drawings of welded specimens for fatigue testing at different conditions [15]: W – as-welded condition; R – fatigue crack repair by welding; R/UP – fatigue crack repair by welding and UIT/UP

Slika 12. Crteži zavarenih epruveta za ispitivanje na zamor u različitim uslovima [15]: W – nakon zavarivanja, R – nakon reparaturnog navarivanja zamorne prsline, R/UP – nakon reparaturnog navarivanja zamorne prsline i primene UIT/UP

The welded specimens were tested at stress ratio $R=0$ with different levels of maximum stresses. Test frequency - 5 Hz. The fatigue testing was stopped and the number of cycles was recorded when the length of fatigue crack on surface reached 20 mm. After that the fatigue crack was repaired by gouging and welding and the fatigue test was continued. After weld repair, a number of samples were also subjected to UIT/UP. The weld toe of the “new” weld was UIT/UP treated. The results of fatigue testing of welded specimens in as-welded condition and after weld repair of fatigue cracks are presented in Fig. 13.

Zavarene epruvete su ispitane pri odnosu napona $R = 0$, uz različite vrednosti maksimalnih napona. Frekvencija ispitivanja je iznosila 5 Hz. Ispitivanje zamora je zaustavljeno i broj ciklusa je zabeležen u trenutku kad je površinska zamorna prsline dostigla dužinu od 20 mm. Nakon toga je prsline reparirana i nastavljeno je sa ispitivanjem zamora. Određen broj epruveta je također podvrgnutu UIT/UP obradi nakon reparaure. Linija stapanja „novog“ zavarenog spoja je obrađena na ovaj način. Rezultati zamornih ispitivanja zavarenih epruveta u uslovima nakon zavarivanja, kao i nakon reparaure zamornih prsline su prikazani na slici 13.

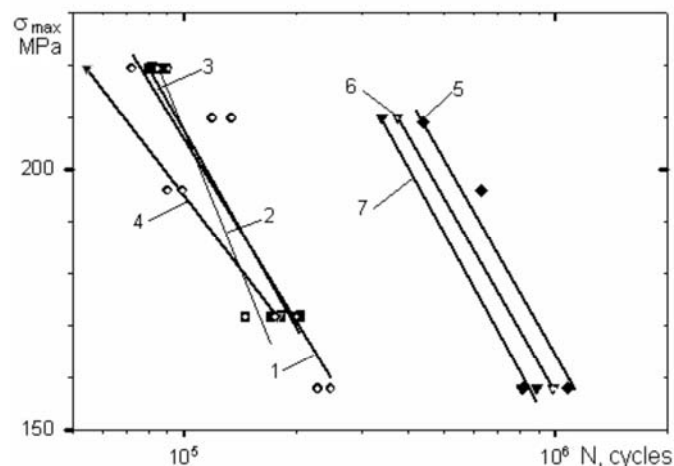


Figure 13. Results of fatigue testing of welded elements [15]: 1 - aswelded condition, 2, 3 and 4 – after first, second and third weld repair, 5, 6 and 7 - after first, second and third weld repair with application of UIT/UP

Slika 13. Rezultati ispitivanja na zamor zavarenih elemenata [15]: 1- nakon zavarivanja, 2, 3 i 4 - nakon prve, druge i treće reparaure zavarenog spoja; 5, 6 i 7 - nakon prve, druge i treće reparaure sa UIT/UP obradom

The fatigue testing of large scale specimens showed that the repair of fatigue cracks by welding is restoring the fatigue strength of welded elements to the initial as-welded condition. Second and third repair of fatigue cracks also practically restored the fatigue life of repaired welded elements to initial as-welded condition. The application of UIT/UP after weld repair increased the fatigue life of welded elements by 3-4 times. Practically the same significant fatigue improvement of repaired welded

Ispitivanje na zamor ovih epruveta je pokazalo da je zavarivanje povratilo izvornu zamornu čvrstoću zavarenih elemenata, kao što je bila neposredno nakon što je zavarivanje izvršeno. Drugo i treće reparaturno navarivanje je ostvarilo praktično isti rezultat u pogledu otpornosti na zamor.

Primena UIT/UP nakon reparaturnog navarivanja je produžila zamorni vek 3-4 puta. Praktično isti značajan porast zamornog veka je primećen i pri drugoj i trećoj reparaturi ovih zavarenih spojeva.



elements by UP is observed also after second and third repair of fatigue cracks in welded elements. These and other numerous results of fatigue testing of welded specimens made from steels and aluminium alloys showed that the UIT/UP provided significant increase in fatigue performance of all considered types of welded joints and materials and that the UIT/UP is the most efficient improvement treatment as compared with traditional techniques such as grinding, TIG-dressing, heat treatment, shot peening and hammer peening.

4. Industrial application of UIT/UP

As was demonstrated, the UITUP could be effectively applied for fatigue life improvement during manufacturing, rehabilitation and repair of welded elements and structures. The UIT/UP technology and equipment were successfully applied in different industrial projects for rehabilitation and weld repair of parts and welded elements. The areas/industries where the UIT/UP was applied successfully include: Railway and Highway Bridges, Construction Equipment, Shipbuilding, Mining, Automotive and Aerospace. Fig. 14 illustrates three examples of UIT/UP industrial application. In first case the UIT/UP was applied for fatigue life improvement of welded elements of a highway bridge, in second case - as a final stage of fatigue crack repair in heavy mining equipment, in third – for prevention of initiation and propagation of fatigue and corrosion cracking of large aluminum welded panels.

Prikazani rezultati, kao i mnogi drugi vezani za ispitivanje na zamor, zavrenih epruveta od čelika i aluminijumskih legura, su pokazali da se primenom UIT/UP postiže značajno povećanje zamornog veka svih zavarenih spojeva i materijala, kao i da je ova metoda najefikasniji vid obrade u pogledu poboljšanja zavarneih spojeva, u poređenju sa tradicionalnijim pristupima.

4. Industrijska primena UIT/UP

Kao što je prethodno prikazano, UIT/UP se može efektivno prieniti na poboljšanje zamornog veka tokom proizvodnje, obnove i reparature zavarenih elemenata i konstrukcija. UIT/UP tehnologija i oprema su uspešno primnjene u različitim industrijskim projektima obnove i reparature delova i zavarenih elemenata. Industrijske oblasti u kojima je ova metoda uspešno primenjena obuhvatile su: železnicu i mostove, građevinsku opremu, brodogradnju, rudarstvo, autoindustriju i vazduhoplovstvo.

Na slici 14 su prikazana tri primera industrijske primene UIT/UP. U prvom slučaju je korišćena za produženje zamornog veka zavarenih elemenata mosta na autoputu, u drugom slučaju se odnosila na reparaturno navarivanje zamornih prslina kod teške rudarske opreme, i u trećem slučaju je korišćena za sprečavanje nastanka i rasta prslina usled zamora i korozije u zavarenim pločama od aluminijuma.

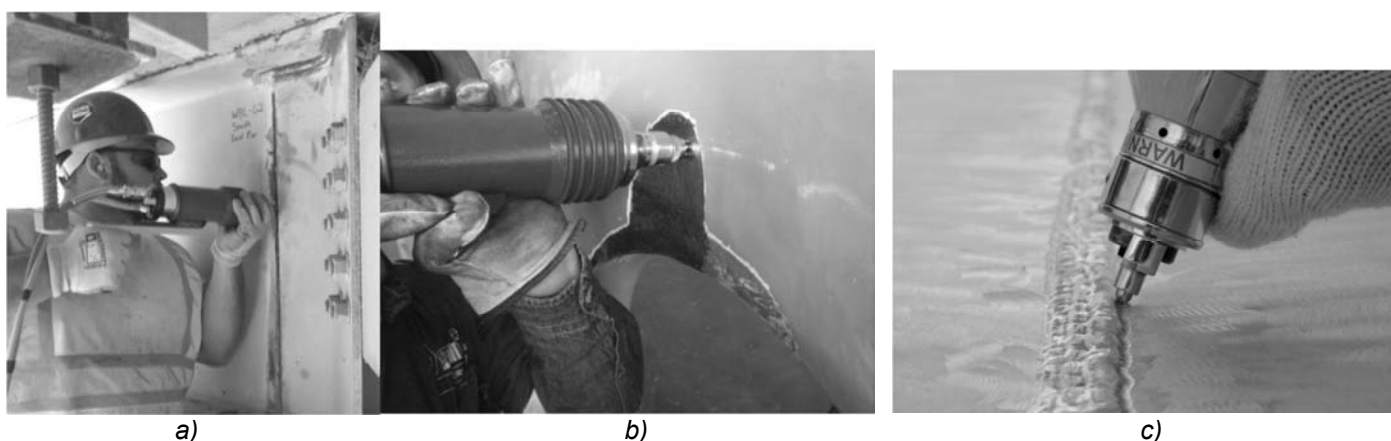


Figure 14. Industrial application of UIT/UP: a) fatigue improvement of welded elements of a highway bridge, b) final stage of fatigue crack repair in heavy mining equipment and c) for prevention of fatigue and corrosion cracking of large aluminium welded panels

Slika 14. Industrijska primena UIT/UP postupka: a) poboljšanje otpornosti na zamor zavarenih elemenata mosta na autoputu, b) finalna obrada reparaturnog navarivanje zamornih prslina kod teške rudarske opreme i c) primena za prevenciju na zamor i koroziju na zavarenim pločama od aluminijuma



References

- [1] Kudryavtsev Y. and Kleiman J. Fatigue Improvement of Welded Elements and Structures by Ultrasonic Peening. Proceedings of the ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference PVP2013. Paper Number PVP2013-97185. July 14-18, 2013, Paris, France.
- [2] Y. Kudryavtsev, V. Korshun and A. Kuzmenko. Improvement of Fatigue Life of Welded Joints by Ultrasonic Impact Treatment. Paton Welding Journal. 1989. No. 7. p. 24-28.
- [3] Y. Kudryavtsev, P. Mikheev and V. Korshun. Influence of Plastic Deformation and Residual Stresses Created by Ultrasonic Impact Treatment on Fatigue Strength of Welded Joints. Paton Welding Journal. 1995. No. 12. p. 3-7. 72nd IIW Annual Assembly and International Conference 7-12 July 2019 Conference Proceedings 8
- [4] Patent of USA No. 2,356,314. 1944. Scaling Tool. Reo D. Grey and James R. Denison.
- [5] Patent of USA No. 3,349,461. 1967. Descaling Tool. Joseph F. Niedzwiecki.
- [6] Krilov N. A., Polishchuk A. M. Using of ultrasonic apparatus for metal structure stabilization. Physical background of industrial using of ultrasound. Part 1. LDNTP. Leningrad.- P. 70-79. 1970.
- [7] Patent of USA No. 3,609,851. 1971. Metal Working Apparatus and Process. Robert C. McMaster and Charles C. Libby.
- [8] Patent of USA No. 3,595,325. 1971. Intermediary Impact Device. Charles C. Libby and William J. White.
- [9] C. Feng and K. Graff. Impact of a Spherical Tool against a Sonic Transmission Line. The Journal of the Acoustical Society of America. Volume 52, Number 1 (Part 2), 1972. pp. 254-259.
- [10] I. Polozky, A. Nedoseka, G. Prokopenko et al. Relieving of welding residual stresses by ultrasonic treatment. The Paton Welding Journal. 1974. pp. 74-75.
- [11] Author's Certificate (USSR) # 472782. 1975. Ultrasonic head for strain hardening and relaxation treatment. E. Statnikov, L. Zhuravlev, A. Alexeyev, Yu. Bobylev, E. Shevtsov, V. Sokolenko and V. Kulikov.
- [12] Author's Certificate (USSR) # 601143. 1978. Ultrasonic multiple-strikers device. G. Prokopenko and V. Krivko.
- [13] B. Langenecker. Effects of Ultrasound on Deformation Characteristics of Metals. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics. Vol. SU-13, No. 1, March 1966, pp. 1-8.
- [14] G. Marquis and T. Björk. Variable Amplitude Fatigue Strength of Improved HSS Welds. International Institute of Welding. IIW Document XIII-2224-08. 2008.
- [15] Y. Kudryavtsev, J. Kleiman and V. Knysh. Fatigue Strength of Structural Elements with Cracks Repaired by Welding. International Institute of Welding. IIW Document XIII- 2236-08. 2008.

Podsećamo vas da je sada vreme da obnovite vaše članstvo u DUZS i pretplatu za naš časopis.



INFORMATION FOR AUTHORS

in submitting manuscripts to journal
WELDING AND WELDED STRUCTURES

Welding & Welded Structures (Zavarivanje i zavarene konstrukcije) is the official quarterly review of the Serbian Society for Advancement of Welding. The Journal publishes reports on the latest developments in all aspects of welding, joining, cutting and related technologies. In addition to its coverage of all the widely used welding and construction fabrication processes, the journal also discusses welding metallurgy, testing and inspection of welds, new publications and standards, operator training and education, health and safety matters, new equipment and consumables.

The journal provides comprehensive information of Serbian Society for Advancement of Welding activities.

The journal *Welding & Welded Structures* publishes original scientific papers, preliminary communications, review and professional papers. Papers are published in Serbian or English.

Manuscript should be typed on one side only of A4 paper in Arial font, 10 point, fully justified. Ample margins should be provided, not less than 20 mm. The pages should be numbered. The normal maximum of paper is 10 single spaced typewritten pages, with tables and figures. The typescript should be presented in the order: **title page, text, appendix, acknowledgment, references, tables and figures.**

Title page

The title page should contain:

the title of the paper - should be brief, specific informative and not exceeding ten words,

the name(s) of the author(s), establishment(s) and the addresses,

keywords - not exceeding five words,

abstract - not more than 250 words. The abstract should present a concise summary of the objectives, content, and conclusions of the paper. It should be intelligible in itself without reference to the paper, so no mention must be made of any figures, tables, or bibliographical references.

Text

For the main text it is important to maintain a logical sequence, splitting text into paragraphs with different headings. Clear differentiation should be made between the headings of sections, subsections, etc. It is suggested to organize and divide main text into the following headings:

introduction - short statement giving relevant background, purpose and scope of the work,

experimental - giving materials, methods, process and equipment used in solving the problem,

results - discussion - evaluation and interpretation of the data and facts,

conclusions - short evaluation and interpretation of the performed work,

Appendix, acknowledgment - as required.

References

References should be numbered serially and the numbers should be typed within square brackets. The references should be set out in a list, numbered according to their appearance in the text. For the sake of uniformity and literature searching, the format in accordance of the ISO 690 must be used.

Equations, tables and figures, should all be numbered serially throughout the text, and referred to in the text. Equations should be typed in fonts for symbols, with explained meanings of the symbols.

Tables should be simple as possible. Each table should have a descriptive heading at the top. All figures must be submitted in a form suitable for reproduction, in a high resolution, of high contrast, clear, black and white.

Caption should be placed below the figure. In preparing diagrams, line drawings have to provide high resolution computer printouts. Drawings and lettering size should permit 50% reduction in the final version.

Units Authors are explicitly requested to submit their papers using SI units.

Manuscripts submitted to the Journal will be reviewed.

It is preferred to submit manuscript electronically, by an e-mail, in MS Word for Windows format.

Authors are requested to provide e-mail address and phone number for rapid communications, if necessary.

Manuscripts should be submitted to Editorial Board:

Welding & Welded Structures

Zavarivanje i zavarene konstrukcije

Grčića Milenka 67

11000 Belgrade

Serbia

tel. / fax + 381 (11) 2420-652

E-mail: duzs@eunet.rs

Uredništvo časopisa Zavarivanje i zavarene konstrukcije

ČASOPIS ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE**Cenovnik oglasnog prostora u četiri uzastopna broja 2020**

	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%.
- Objavljanje 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 2019**

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

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

**INDEKS OGLAŠIVAČA
ADVERTISERS INDEX**

MESSER TEHNOGAS
YASKAWA SLOVENIJA
HONEX
ELIMP
NEMINIK
APAVE Ver Tech Serbia

1. ČLANARINA DUZS za 2020. godinu **3.500 dinara**
Članovima DUZS **GRATIS** godišnje izdanje časopisa "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE"
2. ČASOPIS "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE" - 2020. 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 2018. godinu 500 dinara
 - cena pojedinačnog broja za prethodne godine..... 250 dinara
 - b) beneficirane cene za članove DUZS:
 - cena pojedinačnog broja za 2019. godinu (pouzećem ili preuzimanjem) 400 dinara
 - cena pojedinačnog broja za prethodne godine (pouzećem ili preuzimanjem) Gratis
4. Knjiga Organizacija i ekonomika zavarivačkih radova – autor: prof. dr Zoran Radojević (uračunat PDV 10%) 1.045 dinara
5. Zbirke standarda OBEZBEĐENJE KVALITETA U ZAVARIVANJU, komplet 4 toma 6.750 dinara