



ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE

WELDING & WELDED STRUCTURES

God. 65 Vol. 65	Br. 3 No. 3	97-144 97-144	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 - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд
621.791

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

Tromesečno.

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

CENE I NARUDŽBINA ZA 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

**IMPROVEMENT OF HOT CRACKING
SUSCEPTIBILITY AND PRODUCTIVITY USING
SUPER-TIG WELDING FOR 9% NICKEL-STEEL**

**POBOLJŠANJE OSETLJIVOSTI NA VRUĆE
PRSLINE I PRODUKTIVNOST UPOTREBOM
SUPER-TIG ZAVARIVANJA ČELIKA SA 9%
NIKLA**

101

M. Cheepua, J. H. Parkb, H. J. Baekc, S. M. Chod



NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

**NON-DESTRUCTIVE MEASUREMENTS OF
RESIDUAL STRECHANGES OF
MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL
PROPERTIES OF THE HAZ OF THE S960MC
STEEL SHEET WELD JOINT
STRUCTURAL DETAILS OF BRIDGES**

**MERENJE ZAOSTALIH NAPONA BEZ
RAZARANJ PROMENE MIKROSTRUKTURE I
MEHANIČKIH SVOJSTAVA U ZONI UTICAJA
TOPLOTE ZAVARENOG SPOJA ČELIČNIH
TRAKA KLASE S960MC U KONSTRUKCIONIM
DELOVIMA MOSTOVA**

113

M. Mičian, M. Maronek, R. Konar, D. Harmaniak, M. Jambor, L. Trško, J. Wincek



NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

**BUILDING STRATEGY EFFECT ON
MECHANICAL PROPERTIES
OF HIGH STRENGTH LOW ALLOY STEEL IN
WIRE + ARC ADDITIVE MANUFACTURING**

**UTICAJ STRATEGIJE IZRADE NA MEHANIČKE
OSOBINE NISKOLEGIRANIH ČELIKA POVIŠENE
ČVRSTOĆE U ADITIVNOJ PROIZVODNJI ŽICOM
I ELEKTRIČNIM LUKOM**

125

A. Suat Yildiz, B. Koc, Prof. Dr. O. Yilmaz



PRAKSA

PRACTICE

**IMPROVING GMAW WELD METAL AND HAZ
PROPERTIES THROUGH FRICTION STIR
PROCESSING**

**POBOLJŠANJE OSOBINA METALA ŠAVA I ZUT
KOD ZAVARIVANJA MAG POSTUPKOM
PRIMENOM ZAVARIVANJA TRENJEM SA
ALATOM**

137

S. Kumar Gupta, A. Ravi Raja, A. Kumar, M. Vashista, M. Zaheer Khan Yusufzai



VESTI

NEWS

100

IN MEMORIAM- MILICA ANTIĆ

110

73. GODIŠNJA SKUPŠTINA MEĐUNARODNOG INSTITUTA ZA ZAVARIVANJE

124

PRIKAZ KNJIGE - „KONCENTRACIJA NAPONA I ZAMOR MATERIJALA-SAVREMENI PRISTUP PRORAČUNU MAŠINSKIH ELEMENATA“ (dr Dejan B. Momčilović, dr Radivoje M. Mitrović, dr Ivana D. Atanasovska)

143

UPUTSTVO AUTORIMA I SARADNICIMA

144

MARKETING

Poštovani čitaoci,

Glavni i odgovorni urednik časopisa Zavarivanje i zavarene konstrukcije, naša Milica Antić, iznenada nas je napustila 14. avgusta 2020. godine. Milica Antić bila je sve samo ne obična osoba. Bila je entuzijasta, zaljubljenik u zavarivanje, ponosna na to što je inženjer, metalurg, ali i žena koja je u muškom zanimanju bila podjednako uvažavana i čije se mišljenje visoko cenilo. Svoje ogromno znanje i iskustvo prenosila je nesebično, na jedan autentičan i vrlo osoben način, želeći da to znanje dopre do svakog pojedinca kod koga bi prepoznala da je, kako je sama govorila, “dodirnut vatrom zavarivanja”.

Njen iznenadni odlazak ostavio je prazninu, kako na ličnom tako i na profesionalnom planu, nama kolegama i saradnicima koji smo zajedno sa njom pravili planove i razrađivali zamisli o daljim aktivnostima DUZS, novim izdanjima časopisa, narednim seminarima, obukama, sertifikaciji...

Nedostajće nam saradnik kakav je bila Milica: inicijator, pokretač i svakako u vrhu onih kojima je razvoj zavarivanja bila važna preokupacija. Bila je puna energije, želje za novinama, nedostajće nam njena pozitivna kritika koja je “gurala” napred, kritika koju je umela da prenese na sebi svojstven način, nedostajće nam i njen karakter, a druženje sa njom je jedno nezaboravno iskustvo zbog ogromne strasti koju je unosila u sve što je radila. Svojim radom i angažovanjem ostavila je neizbrisiv trag u istoriji DUZS-a.

Na večni počinak ispratili su je članovi najuže porodice i samo mali broj prijatelja i kolega, jer zbog administrativnih mera povodom pandemije korona virusa, nisu mogli da dođu svi koji su to želeli. Zbog ovih okolnosti, nadamo se da ćemo u skorije vreme biti u prilici da održimo komemorativni skup DUZS i da se dostojno oprostimo od naše drage saradnice i prijatelja...

**Kolege i prijatelji iz DUZS i časopisa
Zavarivanje i zavarene konstrukcije**



IN MEMORIAM

MILICA ANTIĆ, dipl. ing. CIWE, EWE
1956. – 2020.



Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, smer Metalurgija obojenih metala završila je 1979. godine. Diplomom evropskog inženjera zavarivanja dobila je 1981. godine.

Od 1980. do 2014. radila je u Zavodu za zavarivanje u Beogradu, u zvanjima od inženjera saradnika, samostalnog inženjera i glavnog inženjera do direktora istraživačko razvojne jedinice i rukovodioca grupe za obrazovanje i obuku. Do penzionisanja 2018. godine radila je kao inženjer metalurgije i u Institutu Goša, Beograd i Kontrol Inspektu, Beograd.

Bila je aktivan član mnogih strukovnih udruženja. Član Društva za unapređivanje zavarivanja u Srbiji bila je više od 30 godina. Član Upravnog odbora DUZS bila je u više mandata, a predsednik DUZS od juna 2010. do aprila 2011. godine. Takođe je bila i član Srpskog društva za ispitivanje bez razaranja. Osim toga je bila član komisija Instituta za standardizaciju Srbije iz oblasti zavarivanja i srodnih postupaka i ispitivanja bez razaranja, kao i Jugoslovenski delegat Komisije VII, odnosno IAB grupe B, IIW-a.

Od 1989. do 1992. godine bila je član redakcije časopisa "Zavarivač", a kasnije "Zavarivanje i zavarene konstrukcije", od 2001. do 2006. godine. Od 2013. bila je glavni i odgovorni urednik časopisa "Zavarivanje i zavarene konstrukcije".

Od osamdesetih godiina prošlog veka aktivno je učestvovala u organizaciji mnogih konferencija: međunarodnih, nacionalnih sa međunarodnim učešćem i nacionalnih, kao i raznih seminara i savetovanja. Desetine puta je bila član ili predsednik organizacionih ili naučnih odbora tih manifestacija. Kao autor ili koautor objavila je preko dvadeset radova na međunarodnim i domaćim konferencijama i u časopisima. Koautor je dve monografije: Termička obrada zavarenih spojeva i Reparturno zavarivanje delova od sivog liva, u izdanju DUZS Beograd,

U prethodnim godinama bila je glavni generator i organizator više tematskih seminara u okviru DUZS. Posebno treba istaći jedinstvena dva o Reparturnom zavarivanju 1989. i 2007. godine, sa učešćem predavača iz inostranstva, kao i seminare na temu primene i pregleda međunarodnih standarda u zavarivanju i veoma značajnih i jedinstvenih serija seminara o zavarivanju i zavarljivosti različitih metalnih materijala (čelika, gvožđa, aluminijuma, bakra, nikla, plastke...)

Jedan je od osnivača Nacionalnog tela za ovlašćivanje (Serbian Authorization National Body) u delu obrazovanja kadrova u zavarivanju (međunarodnih/evropskih inženjera, tehnologa, specijalista i inspektora zavarivanja) po pravilima Međunarodnog instituta za zavarivanje – IIW i Evropske federacije za zavarivanje, rezanje i srodne tehnologije (DUZS-CertPers).

Obavljala je značajnu ulogu u organima DUZS-CertPers-a, kao član ispitnih komisija, ocenjivač DUZS-CertPers-a i kao rukovodilac dela za sertifikaciju osoblja po pravilima Međunarodnog instituta za zavarivanje. U okviru DUZS-CertPers-a, bila je inicijator i čeon deo tima koji je pripremio uslove za sticanje Tela za sertifikaciju međunarodnih inženjera, tehnologa i inspektora zavarivanja. Bila je predavač na kursovima za međunarodne inženjere, tehnologe, specijaliste i inspektore zavarivanja.

Takođe, bila je inicijator ideje o formiranju ANBCC - Tela za sertifikaciju preduzeća u skladu sa zahtevima standarda EN ISO 3834, a prema šemi sertifikacije Međunarodnog instituta za zavarivanje - IIW i prvi menadžer šeme sertifikacije ANBCC-Zavod Cert-a, 2010. godine.

Pamtićemo Milicu kao prijatelja, nesvakidašnjeg saradnika, učitelja, stvaraoca, zahvalni na privilegiji što smo je poznavali....



Muralimohan Cheepua, Jung Hyun Parkb, Hyo Jin Baekc, Sang Myung Chod

Improvement of hot cracking susceptibility and productivity using Super-TIG welding for 9% Nickel-steel

Poboljšanje osetljivosti na vruće prsline i produktivnosti upotrebom Super-TIG zavarivanja čelika sa 9% nikla

NASTAVAK IZ PREDHODNOG BROJA
2.deo

CONTINUED FROM PREVIOUS ISSUE
Part 2

The using of C-filler the higher deposition rate can obtain, due to the high melting efficiency compared to the conventional circular filler. The cross-sectional view of the C-Filler is illustrated in Figure 2. The Super-TIG welding was developed to weld in full automation and the complete equipment for high stability and reproducibility. The developed Super-TIG welding setup and feeding system of C-filler can be seen clearly in Figure 3.

The Fisco hot crack tests were conducted as per the standard test procedure [12]. The welding processes of FCAW and Super-TIG welding method was applied on 9% Ni steel for the evaluation of hot crack susceptibility with the Alloy 625 wire, Alloy C-276 wire and Alloy 625 C-Filler.

Korišćenjem C-dodatnog materijala može se dobiti veća brzina nanošenja, zbog visoke efikasnosti topljenja u poređenju sa klasičnim kružnim dodatnim materijalom. Prikaz poprečnog preseka C-dodatnog materijala ilustrovano je na slici 2. Super-TIG zavarivanje je razvijeno za potpuno automatizovano zavarivanje i kompletnu opremu za veliku stabilnost i ponovljivost. Razvijeni sistem za podešavanje i dodavanje C-dodatnog materijala kod Super-TIG, može se jasno videti na slici 3.

Fisco testovi na vruće prsline, obavljani su prema standardnom postupku ispitivanja [12]. Postupci zavarivanja FCAW i Super-TIG metoda zavarivanja primenjeni su na čeliku sa 9% Ni za procenu osetljivosti na vruće pukotine sa žicom od legure 625, legure C-276 i legure 625 C-dodatnim materijalima.

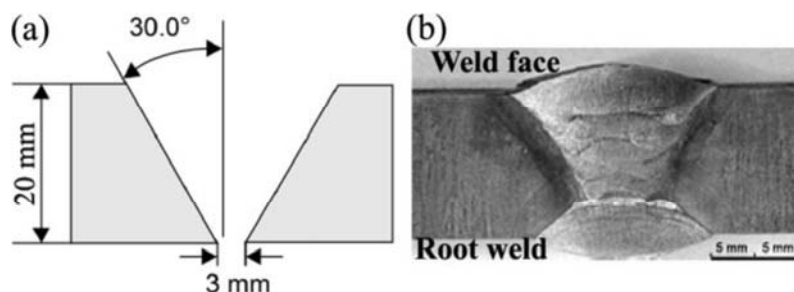


Figure 1. Super-TIG welding of 9% Ni steel butt joint (a) groove design (b) cross-sectional view of weld macrostructure
Slika 1. Super-TIG zavarivanje spoja čelika sa 9% Ni (a) dizajn žljeba (b) pogled na poprečni presek makrostrukture šava

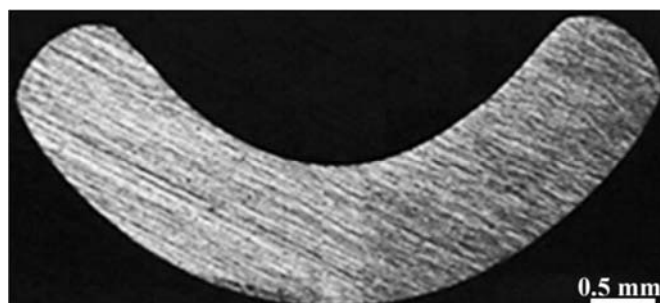


Figure 2. Macro-section of the C-Filler for the Super-TIG welding
Slika 2. Makro-presek C-dodatnog materijala za Super-TIG zavarivanje

After the completion of Fisco hot crack tests weld deposits was cut and observed for the formation of cracks over the weld bead and along the cross-section. The butt welds also were cut in transverse

Nakon završetka Fisco testova na vruće prsline, naneti metal šava je izrezan i uočene su prsline kroz zavar i duž preseka. Sučeoni šavovi su takođe presečeni u poprečnom smeru radi metalurškog pregleda. Ispitivanja zatezanjem su izvedena



direction for the metallurgical examination. The tensile tests were conducted as per the ASTM E8 standard to evaluate the tensile properties of the joints [13]. The Charpy impact test was conducted to investigate the impact energy of the weld metal as per the ASTM A370 standard procedure at a cryogenic temperature of $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ [14]. The welding conditions for Super-TIG welding is different from the conventional TIG welding process due to the high melting efficiency of the filler. The deposition rate and welding currents are also very high per each pass over the conventional TIG welding. During welding, to fill the width of the groove, the oscillation was used for each pass. The inter-pass temperature of $100\text{-}120\text{ }^{\circ}\text{C}$ was maintained throughout the welding. The welding conditions for the Super-TIG welding of butt welds are given in Table 1.

prema standardu ASTM E8 za procenu zateznih svojstava spojeva[13]. Charpi test je sproveden kako bi se iznašla udarna energija metala šava prema ASTM A370 standardu pri kriogenoj temperaturi od $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ [14]. Uslovi zavarivanja za Super-TIG zavarivanje su različiti od uobičajenih postupaka zavarivanja TIG, zbog visoke efikasnosti topljenjadodatnog materijala. Brzina nanošenja i struje zavarivanja su takođe vrlo visoke po svakom sloju u odnosu na uobičajeno TIG zavarivanje. Tokom zavarivanja, za popunjavanje širine žljeba, oscilacija je korišćena za svaki prolaz. Međuslojna temperatura od $100\text{-}120\text{ }^{\circ}\text{C}$ održavana je tokom zavarivanja. Uslovi zavarivanja za Super-TIG zavarivanje sučeonih šavova dati su u Tabeli 1.

Table 1. Welding conditions for the Super-TIG welding of 9% Ni steel butt joints [11]

Tabela 1. Uslovi zavarivanja za Super-TIG zavarivanje čelika sa 9% Ni [11]

Filler	Alloy 625 C-Filler							
Shielding gas	Ar+7%He							
Single pass per single layer								
Deposition method	Front size						Back size	
	Pass	F1	F2	F3	F4	F5	F6	B1
Current (A)	135	360	420	480	480	420	300	460
Welding speed (cm/min)	11,9	28,6	28,3	25	22,8	22,0	28,2	20,4
Deposition rate (Kg/hr)	1,7	3,6	5,0	5,5	6,0	5,0	2,5	6,0

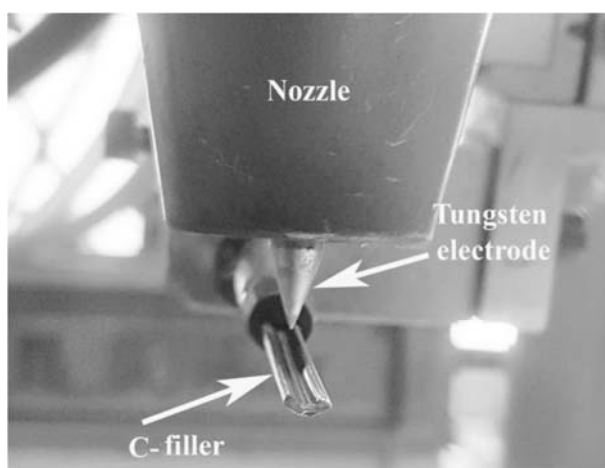


Figure 3. Super-TIG welding experimental setup

Slika 3. Super-TIG podešavanje zavarivanja tokom eksperimenta

3. Results and Discussions

3.1 Hot cracking test

The welding of structural components required high deposition rates with stable and reliable welding processes. To obtain these conditions using conventional welding methods is very difficult due to the narrow range of heat input rate for special

3. Rezultati i diskusija

3.1 Test na vruće prsline

Zavarivanje konstrukcionih delova zahteva velike brzine nanošenja, stabilnim i pouzdanim postupcima zavarivanja. Dobijanje ovih uslova korišćenjem konvencionalnih postupaka zavarivanja je veoma teško zbog uskog raspona



alloys. Super-TIG welding has been applied to overcome these issues. Super-TIG welding can melt the C-Filler much faster compared to conventional circular filler. Therefore the deposition rate much higher at the controlled heat input level as the fastest growing of technology in various fields demands the most rapid fabrication fuel tanks techniques to fulfill their needs in a short time.

Most recently, the demand for liquified natural gas is increasing across the world, which is an environmentally friendly source of energy. The number of shipbuilding orders for large-sized carriers for a large amount of transportation is rising. Such large tanks need a quite higher thickness of 9% Ni steel of 20 mm thick is required [7]. Also, the using of LNG for marine fuel has been emerging due to the regulations in MARPOL Annex VI air pollutants in ship's exhaust gas. Due to this, the construction of LNG fuelled ships gradually increasing, though relevant LNG vessels, storage tanks, and LNG bunkering ships are being continuously developed. The change of fuel tanks in marine ships challenges the fabrication of LNG.

So far, the maximum thickness of LNG fuel tanks is about 15 mm and are welding with FCAW process using Alloy 625 and Alloy C-276 wires. Currently, the large-sized fuel tanks for the large LNG carrier ships demanding to built for a large number of ships. For the above requirements, the fabrication industry is always searching for solutions to made faster weld deposits without losing welds strength and quality. The use of the higher welding current in FCAW or any other process for the higher depositions always encountered a large number of problems. Moreover, the cost of the filler is another problem when using the Hastelloy filler in FCAW process. Most recently, Super-TIG welding has proven to be deposit higher weld metal depositions with the controlled heat input and without any welding defects. Since 9% Ni steels are susceptib FCAW weld metal le to hot cracks at higher currents or high heat input and degradation of its corrosion properties. To prove that the weldability evaluation tests were conducted for Super-TIG and FCAW welding processes using Alloy 625 and Alloy C-276 consumables. The Fisco hot crack tests used widely for weldability evaluation 9% Ni steels. The present study applied this test in the assessment of hot crack test for the wide range of welding current. For the maximum allowable current, the Fisco hot crack test weld beads presented in Fig. 4. The welds with FCAW for the Alloy 625 wire showed the presence of cracks along with the weld bead and are widens compared to other welding methods.

unosa toplote za specijalne legure.

Za prevazilaženje ovih problema primenjeno je Super-TIG zavarivanje. Super-TIG zavarivanje može rastopiti C-dodatni materijal mnogo brže u poređenju sa klasičnim kružnim dodatnim materijalom. Stoga je brzina nanošenja znatno viša na nivou kontrolisanog unosa toplote jer najbrže rastuća tehnologija u raznim oblastima, zahteva najbrže tehnike izrade da bi se u kratkom roku ispunile potrebe. U poslednje vreme, širom sveta raste potražnja za utečnjem prirodnim gasom, koji je ekološki prihvatljiv izvor energije. Povećava se broj porudžbina za izgradnju brodova za velike prevoznike. Takvi veliki rezervoari zahtevaju prilično veću debljinu čelika sa 9% Ni, debljine 20 mm [7]. Takođe, upotreba TPG-a za gorivo pojavila se zbog propisa u MARPOL-u Aneks VI zagađivača vazduha u brodskim izduvnim gasovima. Zbog toga se izgradnja brodova za pogon na TPG postepeno povećava, mada se kontinuirano razvijaju relevantni brodovi za TPG, rezervoari za skladištenje i TPG-ovi brodovi. Promena rezervoara za gorivo na brodovima dovodi u pitanje proizvodnju rezervoara za gorivo TPG.

Do sada, maksimalna debljina rezervoara za gorivo TPG iznosi oko 15 mm i zavaruju se FCAW postupkom koristeći žice od Alloy 625 i Alloy C-276. Trenutno, veliki rezervoari goriva za velike brodove na UPP zahtevaju ih za veliki broj brodova.

Za gore navedene zahteve, proizvodna industrija uvek traži rešenja za brže nanošenje zavara bez gubitka čvrstoće i kvaliteta zavarivanja. Upotreba većih struja zavarivanja u FCAW ili bilo koji drugi postupak za veća deponovanja uvek je nailazila na veliki broj problema. Štaviše, trošak za dodatni materijal je još jedan problem kada se koristi Hastelloy dodatni materijal kod FCAW postupka. Nedavno se pokazalo da Super-TIG zavarivanje ostavlja veće metalne depozite sa kontrolisanim unosom toplote i bez grešaka u zavarivanju. Pošto je čelik sa 9% Ni podložan pri FCAW zavarivanju, odn. metal šava vrućim prslinama pri većim strujama ili visokim unosom toplote i degradaciji svojstava korozije. Radi dokazivanja, sprovedena su ispitivanja za postupke zavarivanja Super-TIG i FCAW korišćenjem dodatnog materijala Alloy 625 i Alloy C-276. Fisco testovi na vruće prsline se široko koriste za procenu zavarljivosti čelika sa 9% Ni. Ova studija je koristila ovaj test u proceni ispitivanja na vruće prsline za široki opseg jačina struje zavarivanja. Za maksimalnu dozvoljenu struju, Fisco test je predstavljen na slici 4. Zavarivanje FCAW žicom od legure 625 pokazalo je prisustvo prsline duž zavara u šavu i šire se, u poređenju s drugim postupcima zavarivanja.

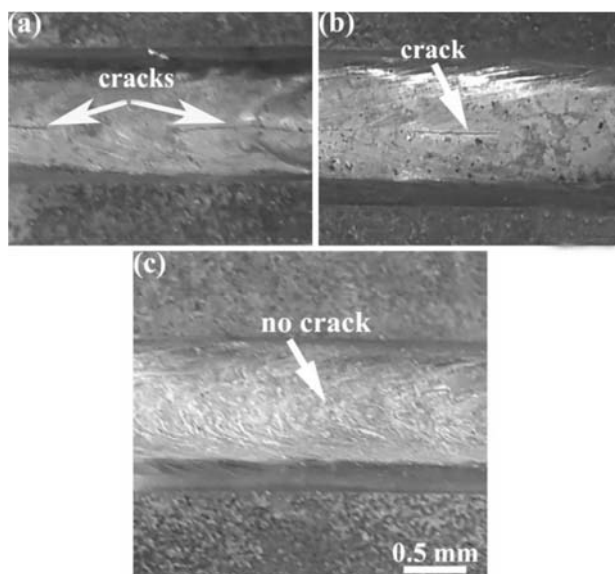


Figure 4. Weld beads with hot cracks (a) FCAW with Alloy 625 wire (b) FCAW with Alloy C-276 wire and (c) Super-TIG welding with Alloy 625 C-Filler after Fisco hot crack test

Slika 4. Zavari u šavu sa vrućim prslinama (a) FCAW sa žpcom od legure 625 (b) FCAW sa žicom od legure C-276 i (c) Super-TIG zavarivanje sa legrom 625 C-dodatnim materijalom, nakon Fisco testa na vruće prsline

As shown in Figure 4(a) the continuous cracks at center of the weld. The stresses induced in the weld metal in a narrow test coupon showed the solidification issues with the higher welding speed and current. At these conditions, the deposited weld from FCAW is highly susceptible to hot cracks. Even though its behavior almost similar to Alloy 625 when using of Alloy C-276 wire. However, the formation of cracks and total crack length for the Alloy C-276 welds is less, and it is moderately susceptible to hot cracks at the higher deposition rates. Whereas the Super-TIG welding with C-Filler of Alloy 625 weld bead showed no evidence of cracks formation through the weld. The higher welding speed and almost two times of higher welding current were used for Super-TIG welding. Figure 4(c) clearly shows the clean and crack-free weld bead formation at higher deposition rates. Therefore the FCAW welds are highly susceptible to hot cracks while the Super-TIG welding is less susceptible. After the Fisco hot crack tests, the weld bead was cleaned and applied the penetration test to identify the micro cracks in the welds. Moreover, the weld beads are also inspected by its cross-sectional macrostructure

The microstructures of the cross section of the weld beads depicted in Figure 5. Based on the cross-sectional macrostructure of the weld metal, depth and its direction of the hot crack was observed. The large penetration cracks are not suggestible for the higher deposition rates. The depth of the crack in Alloy C-276 wire weld metal is comparatively less over the Alloy 625 wire. There are no cracks identified even in the thickness direction of the weld metal of Super-TIG welding.

Na slici 4 (a) prikazane su neprekidne prsline u sredini zavora. Naprezanja koja su indukovana u metalu šava u uskom ispitnom komadu, pokazala su probleme pri otvrdnjavanju sa većom brzinom i strujom zavarivanja. U tim uslovima, deponovani šav izveden FCAW je visoko podložan vrućim prslinama. Ponašanje je gotovo slično sa Alloy 625 kada se koristi Alloy C-276 kao žica. Međutim, formiranje prsline i ukupna dužina prsline za legure C-276 je manje, i umereno je podložno vrućim prslinama pri većim brzinama nanošenja. Dok Super-TIG zavarivanje sa C-dodatnim materijalom od legure 625 u šavu se nije pokazalo postojanje prsline kroz zavar. Veća brzina zavarivanja i gotovo dva puta veća struja zavarivanja korišćeni su za zavarivanje Super-TIG. Slika 4 (c) jasno pokazuje čist metal šava i bez prsline pri većim brzinama nanošenja. Stoga su FCAW šavovi vrlo podložni vrućim prslinama, dok je zavarivanje Super-TIG-om manje osetljivo. Nakon Fisco testova na vruće prsline, zavareni su očišćeni i primenjen je test prodiranja kako bi se identifikovale mikro prsline u šavovima. Pored toga, je proveren makrostrukturnim ispitivanjem poprečnog preseka. Mikrostrukture poprečnog preseka zavora prikazane na slici 5. Na osnovu makrostrukture porečnog preseka metala šava, ustanovljena je dubina i smer vruće prsline. Velike prodorne prsline nisu preporuka za veće brzine nanošenja. Dubina prsline žice od legure C-276 je relativno manja u odnosu na žicu od Alloy 625. Ne postoje prsline čak ni u pravcu debljine kod metala šava zavarenog Super-TIG-om.



Figure 6 illustrates the enlarged view of the microstructures of Fisco hot crack welds. The formation of microcracks identified in the welds made by FCAW for both the wires of Alloy 625 and Alloy C-276. Along with the cracks, there are inclusions in the weld metal which are possible to form from the FCAW slag. In the case of Super-TIG welding, tiny size inclusions identified with less number of inclusions in the weld metal. The microstructure characteristics of the butt welds have also exhibited the presence of inclusions in the weld metal. These inclusions have mainly consisted of Ti, Mo, and O abundant elements.

Slika 6 ilustruje uvećani izgled mikrostrukture vrućih prslina kod Fisco testa. Stvaranje mikro pukotina identifikovanih u šavovima zavarenim FCAW-om je i za žice od Alloy 625 i legure C-276. Pored prslina, u metalu šava, postoje uključci koji mogu nastati iz troske pri FCAW. U slučaju zavarivanja Super-TIG, uključci sitnih dimenzija su identifikovani ali sa manjim brojem uključaka u metalu šava. Karakteristike mikrostrukture sučeonih spojeva takođe su pokazale prisustvo uključaka u metalu šava. Ovi uključci su se uglavnom sastojali od Ti, Mo i O kao zastupljenih elemenata.

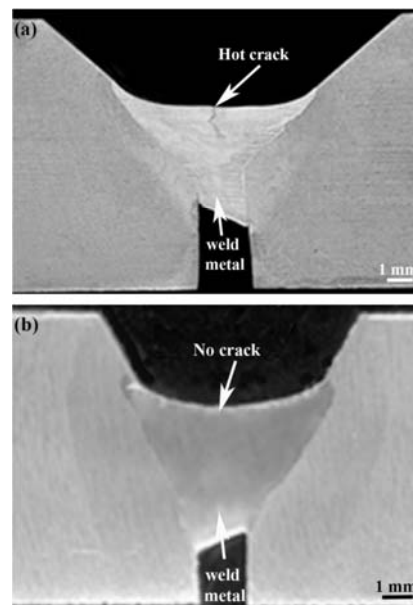


Figure 5. Cross-section after the Fisco hot crack test for welded samples (a) FCAW (b) Super-TIG
Slika 5. Presek nakon Fisco testa na vruće prsline zavarenih uzoraka (a) FCAW (b) Super-TIG

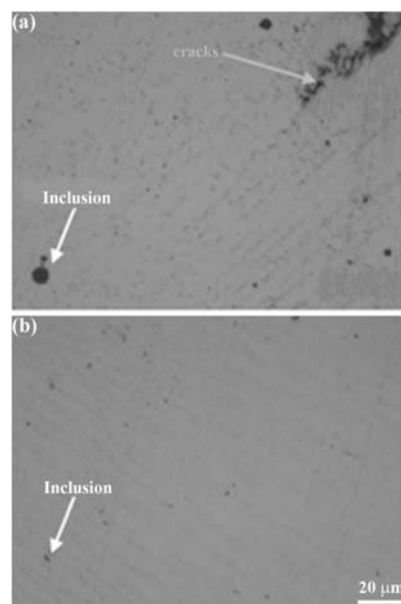


Figure 6. Microstructure with crack and inclusions after the Fisco hot crack test for welded samples (a) FCAW (b) Super-TIG
Slika 6. Mikrostruktura sa prslinama i uključcima nakon Fisco testa na vruće prsline zavarenih uzoraka (a) FCAW (b) Super-TIG



Figure 7 shows the Fisco hot crack test results of 9% Ni steel with the different filler metals by FCAW welding process by Kobelco steel. This test greatly evaluated the weld metal's resistance to hot cracking [15]. The area marked with a dotted line with the welding speed of 40 cpm and current of 270 A in this graphs means that an area is belonged to crack free zone for Alloy 625 wire. The area above this in dotted line is for the Alloy C-276 wire. This area is resistance for without hot cracks. The zone of welding conditions outside the dotted line is prone to have hot cracks in the welds very seriously. These are the primary sources for the reduction of the strength of the weld metal. The range of heat input or the welding conditions is very narrow in FCAW welding process. The welding currents more than 270 A showing the formation of cracks in the welds. Figure 8 represents the Fisco hot crack test results for the FCAW and Super-TIG welding process with Alloy 625 and Alloy C-276 consumables. The large area of the dark shaded region enables to understand the full range of control of the welding conditions in the Super-TIG welding. Moreover, this region belongs to the crack free zone, and these welding conditions can apply for higher deposition rates. The hot cracks region in the Super-TIG welding is far away from the FCAW's maximum allowable welding current. The welding speed is kept constant to understand the maximum range of welding current for the higher deposition. This broader range of crack-free zone of Super-TIG welding is even more than the conventional TIG and gas metal arc welding (GMAW) welding processes of welding current. The maximum conditions of FCAW welds are the minimum conditions for the Super-TIG welding of Ni-based consumables.

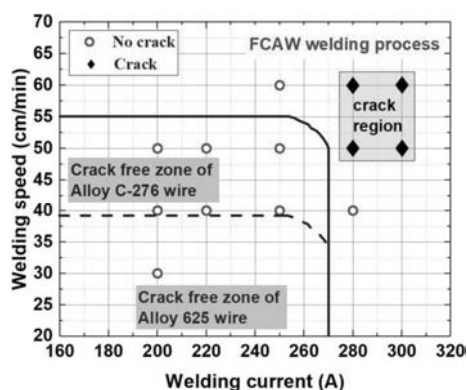


Figure 7. The results of the Fisco crack test by FCAW with Inconel and Hastelloy wires [15]

Slika 7. Rezultati Fisco testa na prsline kod FCAW sa žicama Inconel i Hastelloy [15]

Slika 7 prikazuje rezultate Fisco testa na vrućeprslina čelika sa 9% Ni sa različitim dodatnim materijalima FCAW postupkom zavarivanja od Kobelco čelika. Ovaj test je uveliko procenio otpornost metala šava na vruće prsline [15]. Područje označeno isprekidanom linijom, sa brzinom zavarivanja od 40 cpm i strujom 270 A na ovim grafikonima znači da području pripada zona bez prslina za žicu od legure 625. Područje iznad ove isprekidane linije je za žicu od legure C-276. Ovo područje je otporno na pojavu prslina. Zona zavarivanja izvan tačkaste linije sklona je vrućim prslinama na metalu šava. Ovo su osnovni izvori za smanjenje čvrstoće dodatnog materijala. Raspon unosa toplote ili uslova zavarivanja vrlo je uzan pri FCAW postupku zavarivanja. Struje zavarivanja veće od 270 A pokazuju formiranje prslina na šavu. Slika 8 predstavlja rezultate Fisco testa na vruće prsline za FCAW i Super-TIG postupak zavarivanja sa dodatnim materijalom od legure 625 i legure C-276. Veliko zatamnjeno područje omogućava razumevanje punog raspona kontrole uslova zavarivanja pri Super-TIG zavarivanju. Štaviše, ovo područje pripada zoni bez prslina, a ovi uslovi zavarivanja se mogu primeniti za veće brzine nanošenja. Područje vrućih prslina kod Super-TIG zavarivanja je daleko od najveće dozvoljene najveće dozvoljene struje zavarivanja kod FCAW. Brzina zavarivanja se održava konstantnom kako bi se razumeo maksimalni opseg struje zavarivanja za veće nanošenje. Ovaj širi opseg zone bez prslina kod Super-TIG postupka, čak je veći nego kod konvencionalnih postupaka zavarivanja TIG i MIG/MAG (GMAW). Maksimalni uslovi FCAW zavarivanja su minimalni uslovi za Super-TIG zavarivanje dodatnim materijalima na bazi Ni.

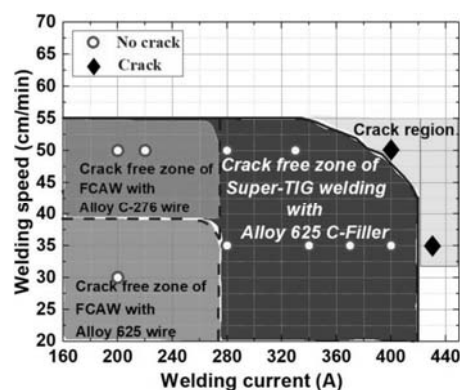


Figure 8. The results of the Fisco crack test by FCAW with Alloy 625 and Alloy C-276 wires, and Super-TIG with Alloy 625 C-Filler
Slika 8. Rezultati Fisco testa na prsline kod FCAW sa žicama od legure 625 i legure C-276 i Super-TIG sa dodatnim materijalom od legure 625 C

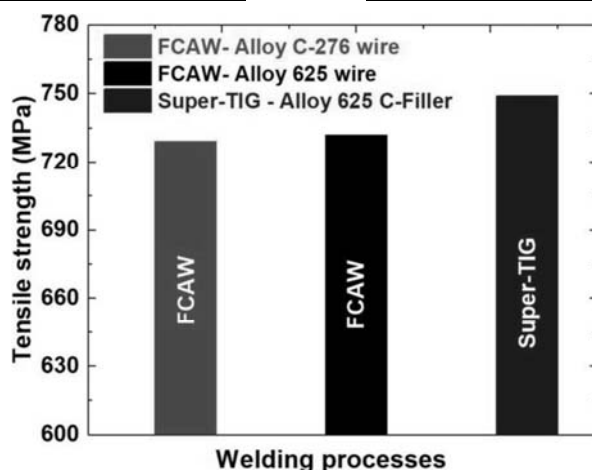


Figure 9. The tensile strength of weld metal according to welding methods
Slika 9. Zatezna čvrstoća metala šava prema metodama zavarivanja

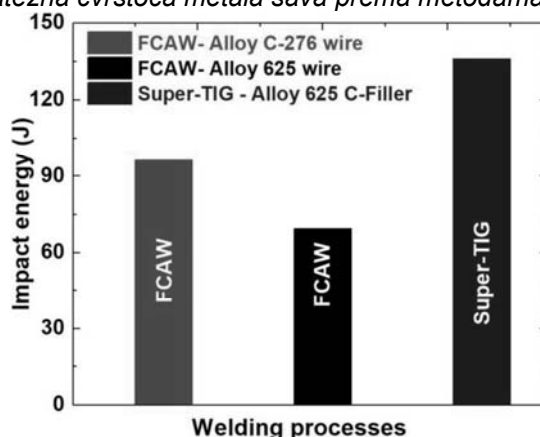


Figure 10. The impact energy (-196 °C) of weld metal according to welding methods
Slika 10. Energija udara (-196 °C) metala šava prema metodama zavarivanja

The mechanical properties of butt welded joints were evaluated to determine the tensile and Charpy impact energy. Figure 9 describes the tensile strength of the welds made of Alloy 625 and Alloy C-276 wires for FCAW and Alloy 625 C-Filler for Super-TIG welding. The strength of the FCAW welds is almost same for both wires with the small amount of difference between these wires. Whereas the strength of the welds made of Super-TIG welding obtained is higher than the FCAW welds. The similar structure of weld metal due to the consistency of melting of the filler builds the stronger welds for Super-TIG welding. The Charpy impact test results of the weld metal shown in Fig. 10. The impact tests conducted at the subzero temperature of -196 °C. The welds made of FCAW with Alloy 625 wire showed low toughness compared to the remaining welding methods. The welds produced of Super-TIG welding obtain the highest toughness, which is almost two times of FCAW's Inconel wire weld toughness. The reason for the low strength in FCAW welds is mainly due to the formation of microcracks and slag inclusions.

Mehanička svojstva sučeonih zavarenih spojeva su procenjena preko zatezne čvrstoće i Charpi-energije udara. Slika 9 opisuje zateznu čvrstoću šavova, izrađenih od legure 625 i legure C-276 za FCAW i legure 625 C-dodatni materijal za Super-TIG. Čvrstoća FCAW šavova je gotovo jednaka za obe žice uz malu razliku između ovih žica. Čvrstoća metala šava dobijenih Super-TIG zavarivanjem veća je od FCAW. Slična struktura metala šava, zbog konzistentnosti topljenja dodatnog materijala, stvara jace zavare za Super-TIG zavarivanje. Rezultati ispitivanja Charpi-udara metala šava prikazani na slici 10. Ispitivanja udarom izvedena na temperaturi od -196 °C. Šavovi izvedeni sa FCAW sa Alloy 625 žicom pokazali su malu žilavost u odnosu na preostale metode zavarivanja. Šavovi proizvedeni Super-TIG zavarivanjem postižu najveću žilavost, što je skoro dva puta u odnosu na žilavost FCAW Inconel žice. Razlog niske čvrstoće kod FCAW šavova je uglavnom zbog stvaranja mikroprslina i uključaka troske. Čak i mala veličina uključaka takođe ima značajan uticaj na smanjenje žilavosti metala. Žilavost šava je jedan od glavnih



Even the small size of inclusion also has a significant effect on the reduction of weld metal toughness. The weld toughness is one of the primary criteria for the 9% Ni steel LNG tanks to meet the requirements. Therefore, Super-TIG welding produces clean weld metal with the minimum number of low-temperature inclusions in the weld metal. The higher melting efficiency of fillers and cooling rates enhances the mechanical and microstructural properties.

3.2 Productivity of Super-TIG welding

The productivity of the Super-TIG welding and FCAW processes determined for the Alloy 625 and Alloy C-276 consumables for the 9% Ni steel welding for LNG applications. As discussed earlier, the fabrication of thick sections, which is about 20 mm thickness of LNG fuel tanks demand the higher production of welding processes. The most suitable welding process of FCAW for 9% Ni steel restricted to a narrow range of production rates due to the presence of welding defects and hot cracks. The maximum deposition rate of the FCAW and Super-TIG welding processes are determined for the maximum allowable welding current (see Fig. 8). Figure 11 demonstrates the deposition rate of the weld metal among the three welding methods. The deposition rate of the FCAW process with Alloy 625 wire is lower than the others. Both of the wires of FCAW weld deposits obtained almost the same amount of 5 kg/hr. The similar deposition of weld metal results also determined by other consumable manufacturers. The highest deposition rate of 6 kg/hr and above is possible by Super-TIG welding. The melting efficiency of the C-filler in Super-TIG welding is higher and increase the metal transfer mode to deliver continuous and regular liquid metal droplets to weld pool. In Super-TIG welding, the broader area of the C-filler under the arc plasma column melts higher amount, where the possibility for feeding of filler much faster than the normal speed. The regular bridging transfer and consistency in the weld deposition are higher in Super-TIG welding. Therefore, the productivity of the Super-TIG welding is improved over the FCAW and the conventional TIG welding processes. The use of Super-TIG welding for 9% Ni steel with Alloy 625 filler can replace the FCAW of Alloy C-276 welding method. Hence, the cost of the consumables and total welding cost reduced while the higher productivity.

kriterijuma da rezervoari za TPG od čelika sa 9% Ni ispunjavaju zahteve. Stoga Super-TIG zavarivanje proizvodi čist metal šava sa minimalnim brojem niskotemperaturnih uključaka. Veća efikasnost topljenja dodatnih materijala i brzina hlađenja povećavaju mehanička i mikrostrukturalna svojstva.

3.2 Produktivnost Super-TIG zavarivanja

Produktivnost postupaka zavarivanja Super-TIG i FCAW određena je za dodatni materijal Alloy 625 i Legura C-276 za zavarivanje čelika sa 9% Ni za primenu TPG. Kao što je ranije rečeno, izrada debelih preseka, debljine oko 20 mm rezervoara za TPG gorivo, zahjeva veću proizvodnju postupaka zavarivanja. Najprikladniji postupak zavarivanja FCAW za čelik sa 9% Ni, ograničen je na uski raspon brzina proizvodnje usled prisustva grešaka zavarivanja i vrućih prslina. Maksimalna brzina nanošenja FCAW i Super-TIG postupka zavarivanja određuje se za najveću dozvoljenu struju zavarivanja (vidi Sliku 8). Slika 11 prikazuje brzinu nanošenja metala šava među tri postupka zavarivanja. Brzina nanošenja FCAW postupka sa žicom od legure 625 niža je od ostalih. Obe žice za nanošenje kod FCAW zavarivanje postigle su gotovo istu količinu od 5 kg/sat. Slično deponovanje metala šava utvrdili su i ostali proizvođači dodatnih materijala. Najveća brzina nanošenja od 6 kg/h i više moguća je Super-TIG zavarivanjem. Efikasnost topljenja C-dodatnog materijala kod Super-TIG zavarivanja je veća i povećava način prenosa metala za isporuku kontinuiranih i regularnih kapljica tečnog metala u zavarivačku kupku. Kod Super-TIG zavarivanja, šira površina C-dodatnog materijala ispod plazma luka, topi veću količinu, pri čemu je mogućnost dodavanja dodatnog materijala mnogo veća od uobičajene brzine. Regularno premošćavanje prenosa i konzistencija u nanošenju šava su veći kod Super-TIG zavarivanja. Stoga je produktivnost Super-TIG zavarivanja poboljšana u odnosu na FCAW i konvencionalne TIG postupke zavarivanja. Upotreba Super-TIG zavarivanja čelika sa 9% Ni sa Alloy 625 dodatnim materijalom, može zameniti FCAW sa Alloy C-276. Dakle, trošak dodatnog materijala i ukupni trošak zavarivanja su se smanjili dok je povećana produktivnost.

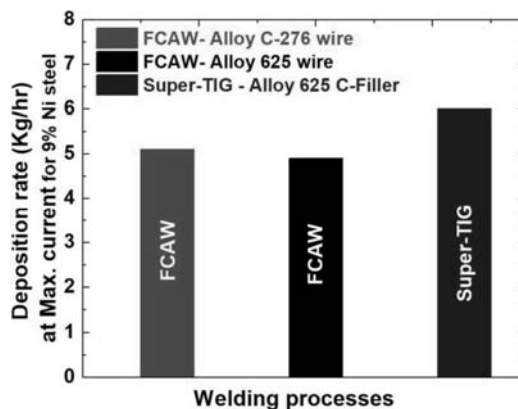


Figure 11. The productivity of the Super-TIG welding compared to FCAW process
Slika 11. Produktivnost Super-TIG zavarivanja u poređenju sa FCAW postupkom

4. Conclusions

We examined Fisco hot crack test and mechanical properties for the weld metal by 3 welding methods with 3 types of wires. The obtained results are as follows

1. In the results of Fisco hot crack test, FCAW bead with Inconel wire showed high susceptibility and with Hastelloy wire had medium susceptibility, but Super-TIG bead with Inconel C-filler indicated low susceptibility (high resistance) for hot crack.
2. Due to no interpass grinding in the Super-TIG welding, the productivity of Super-TIG welding was distinguished comparing to FCAW with Inconel or Hastelloy wires.
3. In the results of Charpy Impact test, weld metal by Super-TIG showed excellent comparing to FCAW with Inconel or Hastelloy wires.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Super-TIG welding Co. Ltd. for the support of this research.

References

Reference

- [1] Park J Y, Lee J M and Kim M H 2016 Metals 6 285.
- [2] Manabu H, Naoki S, Hirohide M and Osamu S 2004 Nippon Steel Technical Report 90 20.
- [3] Ahsan Q, Asna H, Ni S, Binti H and Sy C 2014 Comprehensive Materials Processing 6 135.
- [4] Yoon Y-E, Kim J-H, Shim K-T 2011 International Journal of Modern Physics: Conference Series 6 355.
- [5] Thaulow C, Paauw A J, Hüge M, Toyoda M, Minami F 1994 ESIS Pub1 17 417
- [6] Evans G M and Bailey N 1999 Woodhead Publishing 1 1
- [7] Kobelco's 2011 Welding Consumables for LNG Storage Tanks Made of 9% Ni Steel. Kobelco Weld. Today, 14, 3.
- [8] Cho S-M, Oh D-S, Ham H-S, Ha H-J, Shin H-S, Jun J-H, Byun J-G, Park J-H, Kwon H-Y 2016 U.S Patent, US20160199947A1.

4. Zaključci

Ispitali smo Fisco test na vruće prsline i mehanička svojstva metala šava pomoću 3 postupka zavarivanja sa 3 vrste žica. Dobijeni rezultati su sledeći

1. U rezultatima Fisco testa na vruće prsline, FCAW zavar sa žicom Inconel pokazala je veliku osetljivost i Hastelloy žicom koja je imala srednju osetljivost, ali Super-TIG zavar sa Inconel C-dodatnim materijalom ukazuje na malu osetljivost (visoku otpornost) na vruće prsline.
2. Zbog nepotrebnog brušenja između slojeva, kod Super-TIG zavarivanja, produktivnost zavarivanja Super-TIG se izdvaja u poređenju sa FCAW sa Inconel ili Hastelloy žicama.
3. U rezultatima Charpi testa, metal šava izveden Super-TIG-om pokazao se odličnim u poređenje sa FCAW sa žicama Inconel ili Hastelloy.

Zahvalnost

Autori se zahvaljuju kompaniji Super-TIG zavarivanje Co. Ltd. za podršku u ovom istraživanju.

- [9] Cho S-M, Oh D-S, Ham H-S, Ha H-J, Shin H-S, Jun J-H, Byun J-G, Park J-H, Kwon H-Y 2016 European Patent application EP3037204A4.
- [10] Cho S-M, Oh D-S, Ham H-S, Ha H-J, Shin H-S, Jun J-H, Byun J-G, Park J-H, Kwon H-Y 2013 Korea Patent application, KR1020130098314A.
- [11] Park J-H, Kim Y-H, Baek H-J, Cho S-M 2019 Journal of Manufacturing Processes 40 140.
- [12] Publication of A New Hot Cracking Determination test (Fisco test) by Henri. M. Shnadt (April 1956) This paper was Submitted by Dr, Gloor to Sub-Comissin C of the T. C. II of the I. I. W. on may 5th, 1956.
- [13] ASTM E8 / E8M-16a, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [14] ASTM A370-18, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- [15] Goodwin G M 1990 Test methods for evaluating hot cracking review and perspective, Oak Ridge National Lab



73. GODIŠNJA SKUPŠTINA MEĐUNARODNOG INSTITUTA ZA ZAVARIVANJE

Ove godine, 73. po redu godišnja skupština Međunarodnog instituta za zavarivanje (International Welding Institute), je trebalo da se održi u terminu od 19. - 25. jula 2020. godine u Singapuru. Međutim, iz zdravstveno bezbednosnih razloga izazvanih COVID-19 virusom, odlučeno je da se Godišnja skupština Međunarodnog instituta za zavarivanje (MIZ-a) održi elektronski na daljinu ("on line").

U periodu od 15.-28. jula održane su sve aktivnosti koje čine Godišnju skupštinu:

- Sednica Generalne skupštine MIZ-a,
- Ceremonija otvaranja Skupštine,
- Ceremonija dodele priznanja MIZ-a,
- Sastanci Međunarodne grupe za ovlašćivanje (International Authorisation Board - IAB),
- Sastanci 16 tehničkih Komisija MIZ-a,
- Sastanak Komisije za regionalnu saradnju,
- Sastanci 8 radnih tehničkih grupa i
- Završni sastanak i zatvaranje Godišnje skupštine.

Rad Skupštine, kako je uobičajeno je počeo sednicom Generalne skupštine 15. jula, a formalno se završio 28. jula, sastankom novoizabranog Borda direktora MIZ-a i završnim obraćanjem dosadašnjeg predsednika Međunarodnog instituta za zavarivanje gospodina Douglas Luciani-a. Obavljena je i predaja dužnosti predsednika MIZ-a, gospodinu David Landon-u sa mandatom za sledeće tri godine.

SASTANAK GENERALNE SKUPŠTINE

Generalna skupština je održana 15. jula. Sastanku su prisustvovala delegacije iz 38 zemalja članica MIZ-a. Pored 38 delegata koji imaju pravo glasa u ime zemlja članica, sednicu je pratilo još 70 predstavnika zemalja članica bez prava glasa (maksimalno još 2 člana pored delegata iz zemlje članice). Skupština se bavila analizom i izveštavanjem o redovnim aktivnostima MIZ-a u periodu od godinu dana, tačnije od prethodne Skupštine.

Ovoga puta, posebno težište je bilo na izmenama Statuta MIZ-a vezano za premeštanje sedišta (sekretarijata i izvršnog direktora) MIZ-a iz Pariza u Đenovu. Izmene su bile formalne prirode, ali su morale da prođu proceduru i bile su neophodne, obzirom da se zakoni koji regulišu problematiku Međunarodnih udruženja razlikuju u Italiji u odnosu na Francusku. Potvrđena je odluka da sekretarijat IAB grupe i dalje ostane u Portugalu (gde je sedište Evropske federacije za zavarivanje i srodne postupke - EWF) zbog troškova.

Usvojen je finansijski izveštaj za 2019. godinu, definisan iznos članarina za 2020. godinu i donete odluke koje manifestacije (regionalni kongresi, takmičenja zavarivača, međunarodni kongresi) će moći da se organizuju pod okriljem MIZ-a. S obzirom da je ranije bilo odlučeno da se 74. Skupština održi u Đenovi (Italija) 2021. godine, a 75. u Tokiu (Japan) 2022. godine, doneta je odluka da se organizacija 76. Skupštine MIZ-a koja treba da se održi 2023. godine dodeli Singapuru, koji je ove godine ostao uskraćen za organizaciju zbog pandemije.

Najznačajnije odluke Skupštine su bile vezane za izbor novog rukovodstva MIZ-a, obzirom da je ova godina bila izborna. Umesto dosadašnjeg predsednika gospodina Dagleasa Luciani-a (Kanada) za predsednika MIZ-a za period 2020.-2023. izabran je gospodin David Landon (USA). Izabran je potpredsednik i blagajnik MIZ-a, kao i šest direktora u Bordu direktora.

Za Srbiju je značajno da je u bordu direktora izabran dr Vencislav Grabulov. Ovo je prvi put u sedamdesetgodišnjoj istoriji od formiranja prvog Borda Direktora, da predstavnik sa ovih prostora bude član Borda direktora MIZ-a.

SASTANCI MEĐUNARODNE GRUPE ZA OVLAŠĆIVANJE (INTERNATIONAL AUTHORISATION BOARD – IAB)

IAB grupa se bavi imenovanjem nacionalnih tela za ovlašćivanje organizacija za održavanje kurseva za obrazovanje kadrova u zavarivanju po pravilima MIZ-a (ANB), kao i organizacija koje obavljaju sertifikaciju kompanija za obavljanje zavarivačkih delatnosti (ANBCC). Između ostalog, tu spada obrazovanje Međunarodnih inženjera, tehnologa, specijalista, zavarivača, inspektora i projekatara zavarivanja. U okviru IAB-a (Međunarodnog tela za ovlašćivanje) postoje dve grupe i to grupa A koja se bavi



dokumentima – smernicama za obrazovanje, obuku i kvalifikaciju kadrova i grupa B u čijoj nadležnosti je implementacija dokumenata i ovlašćivanja.

Sastanak IAB grupe A je održan 20. jula. Kao i obično najveća aktivnost je bila vezana za sadržaj dokumenata koji su smernice za predavanja na kursovima za međunarodne inženjere, tehnologe i specijaliste zavarivanja. Razmatran je sadržaj predmeta za međunarodnog zavarivača, ali i relativno novijih kurseva za mehanizovano orbitalno i zavarivanje pomoću robota. Najviše pažnje je izazvala diskusija i odluke u vezi sprovođenja međunarodnih harmonizovanih ispita, posebno ispita za međunarodne inspektore zavarivanja. Izvršena je podela broja potrebnih novih ispitnih pitanja po zemljama članicama. Interesantno je da je odbijen predlog Indije da se izuzme iz ove aktivnosti. Zaključak je da svaki ANB mora da učestvuje u formiranju međunarodne baze pitanja. Za predsednika IAB Grupe A je izabran gospodin Horia Dascau (Rumunija). Sastanku su prisustvovali predstavnici ANB/ANBCC iz 33 zemlje, ukupno 55 učesnika.

Sastanak IAB grupe B je održan 21. jula. Aktivnosti su bile iz domena usvajanja ili korekcije i dopune uslova pristupa kursovima za Australiju i usvajanje izveštaja o sprovedenom nadzoru za ANB iz Holandije i Singapura. Analizirana je prijava Nigerije za formiranje ANB-a. Analiziran je status ocenjivača IAB grupe i sumirana lista ovlašćenja za sve ANB-ove. Zaključeno je da rukovodilac imanovanih ANB-ova ima naziv Izvršni direktor, a rukovodilac ANBCC Direktor šeme. Posebna tačka, koja postaje sve značajnija su bile aktivnosti u sferi sistema za sertifikaciju osoblja. Gospodinu Stefanu Morra (Italija) je produžen mandat za predsednika Grupe B za još tri godine. Sastanku su prisustvovali delegacije iz 35 zemalja, odnosno ukupno 72 učesnika.

Sastanak zemalja članica IAB grupe (zemlje koje imaju ANB i/ili ANB/ANBCC) je održan dana 22. jula. Najznačajniji zaključak se odnosi na izmenu dokumenta IAB 065 koji definiše organizaciju i način rada ANB-ova. Zaključak je da nema jedinstvenog stava, jer polazeći od interesa nekih članova IAB grupe, posebno "jakih članova" kojima je nacionalno tržište malo, vrši se pritisak da IAB grupa izmeni svoje izvorne principe na kojima je osnovana. Potvrđena je odluka da sekretarijat EWF (Evropske zavarivačke federacije) sa sedištem u Lisabonu i dalje servisira aktivnosti IAB grupe, odnosno čitavog sistema za obrazovanje kadrova. Za novog predsednika IAB grupe je izabran gospodin B. Lee. Sastanku je prisustvovalo 33 delegata iz 33 zemlje, dok je ukupan broj prisutnih bio 53 osoba.

SASTANAK RADNE GRUPE ZA REGIONALNU AKTIVNOST

Učešće u radu ove grupe je veoma značajno za nas, jer Srbija je jedna od zemalja koja ima značajnu ulogu u povezivanju zavarivačkih asocijacija regiona i član grupe zemalja koji su vodeće u regionu jugoistočne Evrope. Sastanak je održan 17. jula, a najznačajniji su zaključci u vezi plana održavanja budućih regionalnih IIW Kongresa i ostalih međunarodnih manifestacija. Podneti su izveštaji potencijalnih organizatora o stanju priprema za njihovo održavanje. U sledećem periodu planirane su međunarodne manifestacije koje ispunjavaju uslov da se organizuju pod okriljem MIZ-a. To su Međunarodni kongresi: u Sevilji (Španija) u maju 2021. godine, Elfesina (Grčka) u maju 2021, Achen (Nemačka) u martu 2021. i Mets (Francuska) u junu 2022. godine. Pored toga planira se i Kongres mladih istraživača za maj 2021. u Miškolcu (Mađarska), a i međunarodno takmičenje zavarivača u okviru Sajma zavarivanja u Essenu (Nemačka) septembra 2021. godine. Sve ove manifestacije su planirane da se održe "uživo", ali da li će se to i ostvariti zavisi od zdravstvene situacije.

SASTANCI RADNIH JEDINAICA

Pored IAB grupe, radne jedinice MIZ-a čine 16 tehničkih Komisija, 7 podkomisija (Fizika zavarivanja, Strategija istraživanja i saradnje u zavarivanju, Spajanje i zaštita u vazduhoplovstvu, Automobilski i drumski transport, Brodogradnja, Rukovođenje kvalitetom u zavarivanju i srodnim postupcima, Istraživanje i razvoj mikro i nano tehnologija spajanja), tri radne grupe (Regionalna saradnja, Standardizacija i komunikacija i marketing) i Tehnički komitet. Sastanci tehničkih komisija su održani tokom tri dana, od 22.-24. jula. Na njima su razmatrani stručni materijali – dokumenti MIZ-a. Izabrani dokumenti MIZ-a su predloženi da se objave u časopisu "Welding in the world". Održani su i sastanci svih ostalih radnih jedinica i doneti odgovarajući zaključci.



Ceremonija otvaranja i zatvaranja Godišnje skupštine MIZ-a, nije mogla da bude pompezna i spektakularna kako je uobičajeno, ali su održane tako da zadovolje svoje postojanje, odnosno da posluže svojoj svrsi. Tokom oficijalnog otvaranja Godišnje skupštine MIZ-a, treba istaći uvodno izlaganje predsedina MIZ-a gospodina Daglasa Luciana. Na svečanosti povodom otvaranja, dodeljena su godišnja priznanja najistaknutijim pojedincima za 2020. godinu.

Za nas je najznačajnije da je nagradu za Regionalnu saradnju za 2020. godine, koja se od ove godine dodeljuje pod sponzorstvom zavarivačkih asocijacija iz Bugarske, Rumunije i Srbije, dodeljena godpodinu Jim Guilt-u iz Južnoafričke republike, za izuzetan doprinos razvoju i saradnji u oblasti zavarivanja u regionu.

Tokom završne ceremonije takođe je bio veoma značajan govor dosadašnjeg predsednika MIZ-a gospodina Daglasa Luciana i predaja dužnosti novom predsedniku MIZ-a, gospodinu David Landon-u, kao i poruka sekretarijata MIZ-a zajednici svetske zavarivačke asocijacije. Na kraju moramo zaključiti da je, i pored svega, 73. Skupština Međunarodnog instituta za zavarivanje bila veoma uspešna. 73. godišnja skupština MIZ-a, je zvanično zatvorena 28. jula 2020. godine. Uprkos pandemiji, MIZ je uspeo da obavi sve svoje tehničke i naučne aktivnosti kroz virtuelno radno okruženje koje je omogućilo svim grupama da se sastanu, raspravljaju, preporučuju i razvijaju aktivnosti kao i obično. Svi usvojeni dokumenti su dostupni, u skladu sa pravilima MIZ-a, članovima MIZ-a.

U prilog uspešnosti ovako organizovane godišnje skupštine ide i statistika, odnosno brojke koje ističu uspeh:

- Više od 650 učesnika,
- 39 zastupljenih zemalja članica,
- 50 sesija različitih radnih jedinica,
- 150 sati sastanaka,
- Broj učesnika po sastanku od 20 – 150 i više.

Iskreno se nadamo da će sledeća 74. Godišnja skupština Međunarodnog instituta za zavarivanje biti održana u Đenovi, uživo, kako dolikuje.

Dr Vencislav Grabulov, IWE
Izvršni rukovodilac DUZS CertPers



Miloš Mičian^{1,a}, Milan Maronek^{2,b}, Radoslav Konar^{1,c}, Daniel Harmaniak^{1,d}, Mihael Jambor^{1,e}, Libor Trško^{3,f}, Jerzy Wincek^{4,g}

Changes of microstructure and mechanical properties of the HAZ of the S960MC steel sheet weld joint

Promene mikrostrukture i mehaničkih svojstava u zoni uticaja toplote zavarenog spoja čeličnih traka klase S960MC

Originalni naučni rad / Original scientific paper

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

Rad primljen / Paper received:

Septembar 2020.

Prevod izvornog rada na srpski jezik: N. Radović

Keywords: S960MC, heat affected zone, sub-zones in HAZ, heat input, mechanical properties

Abstract

The TMCP (thermo-mechanically controlled processed) steels belong to the group of ultra-high strength steels, which exhibit exceptional combination of high tensile and yield strength, toughness and ductility. These steels were introduced in the heavy machinery constructions, such as heavy mobile cranes, chassis trucks and other to reduce their weight, what increases their loading capacity and ecology of transport. The high tensile and yield strength of this type of steels is obtained by the combination of the chemical composition, heat treatment and the mechanical processing. However, the heat input into the material during the welding significantly affect properties of the steel and the whole joint. In this paper are presented results of mechanical properties evaluation and structural analysis of the welds of the thin sheets made of the S960MC steel, which were welded using the GMAW procedure. The microstructural evaluation referred significant changes in the HAZ. This area contains the three sub-zones, coarse grain (CGHAZ), fine grain (FGHAZ) and intercritical zone (ICHAZ). Analysis of microhardness and the tensile tests results showed, that ICHAZ is the most critical area of the whole welded joint.

1. Introduction

Application of high-strength low-alloy (HSLA) steels is related to ensuring a higher strength of the structure and maintaining its weight or reducing it. At the same time, good processing properties are

Adresa autora / Author's address:

¹Faculty of Mechanical Engineering, University of Žilina, Čilina, Slovakia, ^{1,a} Milos.Mician@fstroj.uniza.sk,

^{1,c}Radoslav.Konar@fstroj.uniza.sk,

^{1,d}Daniel.Harmaniak@fstroj.uniza.sk

^{1,e}Mihael.Jambor@fstroj.uniza.sk

²Faculty of Materials science and Technology in Trnava, Slovak University of Technology in Bratislava, Trnava, Slovakia, ^{2,b} milan.maronek@stuba.sk

³Research Centre, University of Žilina, Žilina, Slovakia,

^{3,f}libor.trsko@fstroj.uniza.sk

⁴Institute of Mechanical Technologies, Czestochowa University of Technology, Czestochowa, Poland

^{4,g} Wincek@imipkm.pcz.czest.pl

Ključne reči: S960MC, Zona uticaja toplote, pod zone ZUT-a, unos toplote, mehaničke osobine

Rezime

Termomehanički kontrolisano valjani čelici pripadaju grupi čelika ultra visoke čvrstoće, koji pokazuju izuzetnu kombinaciju visoke zatezne čvrstoće, granice tečenja, žilavosti i duktilnosti. Ovi čelici su prvo počeli da se koriste u teškoj mašingradnji, za pokretne kranove, šasije kamiona i drugih teških vozila, kako bi smanjili sopstvenu težinu, čime se povećava nosivost i ekološki standardi. Visoka zatezna čvrstoća i granica tečenja u ovim čelicima se postiže kombinacijom odabranog hemijskog sastava, termičke i plastične prerade. U ovakvim strukturama, unos toplote pri zavarivanju značajno utiče na svojstva čelika i zavarenog spoja. U ovom radu su prikazani rezultati ispitivanja mehaničkih osobina i mikrostrukture spojeva dobijenih zavarivanjem tankih ploča kvaliteta S960MC, primenom MAG postupka. Mikrostrukturna analiza ukazuje na značajne promene u ZUT. Ovu zonu čine tri podzone i to: grubozrna zona (CGHAZ), fino-zrna zona (FGHAZ) i interkrična zona (ICHAZ). Analizom mikrotvrdoće i zateznih ispitivanja utvrđeno je da je interkrična zona kritično mesto celog spoja.

1. Uvod

Upotreba niskolegiranih čelika visoke čvrstoće (HSLA) je okrenuta obezbeđenju strukture visoke čvrstoće uz zadržavanje ili redukciju težine. U isto vreme, moraju biti ispunjeni tehnološki zahtevi, pre



required, mainly formability and weldability. Reducing the weight of transport vehicle leads to fuel savings and consequently lower emissions. Improvement of mechanical properties of steels can be achieved by chemical composition and manufacturing process. However, both factors have a significant impact on the resulting weldability of these materials. HSLA steels use new strength-enhancing methods based primarily on controlled cooling processes in rolling mills and microstructure management using micro-alloying of the steel. During the welding process, the material is heated very quickly following by fast cooling. This temperature cycle leads to a change of the microstructure and mechanical properties in the heat affected area (HAZ), mainly changes in structural phase composition, grain size, carbide dissolution, and so on. These changes consequently reflect in the mechanical properties, especially in hardness, ductility, toughness, yield and tensile strength. The greatest influence on these changes has the thermal input and the cooling time parameter $t_{8/5}$, which determines the resultant welded joint microstructure. The most critical area of the welding joint is, however, the heat affected area. The welding temperature cycle defines the sub-zones of HAZ. Depending on the distance from the heat source, there is a different thermal influence in each subzone. This leads to formation of different microstructures and mechanical properties of the particular area. HAZ can be divided into four main sub-zones. It is a coarse-grained heataffected zone (CGHAZ), a fine-grained heat-affected zone (FGHAZ), an inter-critical or partially transformed heataffected zone (ICHAZ) and a sub-critical or annealed zone (SCHAZ). The division of HAZ into individual sub-zones is shown in Figure 1. [1, 2, 8]. When high-strength steels are welded, the HAZ becomes "softer". The term "softening of HAZ" is used for the subzone in HAZ, where the hardness is lower than the hardness of the base material. The microstructure of steels with tensile strength close to 900 MPa is usually composed of martensite or bainite, which is tempered under the transformation point A_1 during production. Because during welding the material is exposed to temperatures above A_1 , the HAZ microstructure will irreversibly change. In the following cooling of HAZ, it is not possible to achieve conditions as in the production of the base material [3, 5] causing softening mainly in the ICHAZ and SCHAZ sub-zones. Research has shown, that this sub-zone has lower mechanical properties and, as a consequence, fatigue crack initiate more rapidly in this area.

svega zavarljivost i sposobnost oblikovanja. Smanjenje sopstvene težine na primer vozila, omogućava smanjenje potrošnje i emisije gasova. Poboljšanje mehaničkih osobina se može postići modifikacijom hejjskog sastava i procesnih parametara u preradi. Sa druge strane, oba ova pristupa značajno utiču na zavarljivost. U HSLA čelicima se čvrstoća povećava kombinacijom kontrolisanog hladjenja u valjaonici i prisustvom mikrolegirajućih elemenata u čeliku. U toku zavarivanja, materijal se prvo veoma brzo zagreva, a zatim i brzo hladi. Ovaj termički ciklus dovodi do promena strukture, a time i mehaničkih osobina u ZUT, uglavnom usled faznih promena, promene veličin zrna, rastvaranja karbida i sl. Ove promene značajno utiču na mehaničke osobine, naročito tvrdoću, plastičnost, žilavost, granicu tečenja i zateznu čvrstoću.

Najveći uticaj na ove promene imaju unos toplote i parametar $t_{8/5}$, određujući finalnu mikrostrukturu. Zato se zona uticaja toplote smatra kritičnim mestom u zavarenom spoju. Termički ciklus definiše podzone unutar ZUT-a.

U zavisnosti od rastojanja od izvora toplote, uticaj u svakoj od podzona je različit, što ima za posledicu nastanak različitih mikrostrukura i mehaničkih osobina u svakoj podzoni. ZUT se može podeliti u četiri glavne podzone: grubozrna zona uticaja toplote (CGHAZ), fino-zrna zona uticaja toplote (FGHAZ), interkritična zona uticaja toplote (ICHAZ) i podkritična zona uticaja toplote (SCHAZ). Podela ZUT na podzone je prikazana na slici 1 [1, 2, 8].

Zavarivanjem čelika visoke čvrstoće, ZUT omekšava. Termin „omekšavanja u ZUT-u“ se odnosi za podzonu u kojoj je tvrdoća smanjena u odnosu na tvrdoću osnovnog metala (OM).

Mikrostrukturu čelika čvrstoće preko 900MPa uobičajeno čini martenzit ili bainit, koji se u proizvodnji otpušta ispod temperature A_1 .

Kako u toku zavarivanja temperatura u ZUT-u prelazi A_1 temperaturu, mikrostruktura će pretrpeti nepovratne promene.

Hladjenjem koje sledi, u ZUT nije moguće dobiti mikrostrukturu koja se dobija nakon proizvodnje [3,5], već dolazi do omekšavanja uglavnom u ICHAZ i SCHAZ podzonama.

Istraživanja su pokazala da ove podzone imaju niže mehaničke osobine, te se posledično u ovim područjima lakše inicira zamorna prslina.



It was also confirmed, that the width of the softened area is increasing due to the increasing heat input and the hardness decreases from the increasing cooling time $t_{8/5}$. [5].

Takodje je potvrđeno da se širina omekšane zone povećava sa povećanjem unosa toplote i da tvrdoća opada sa produženjem vremena thadjjenja $t_{8/5}$. [5].

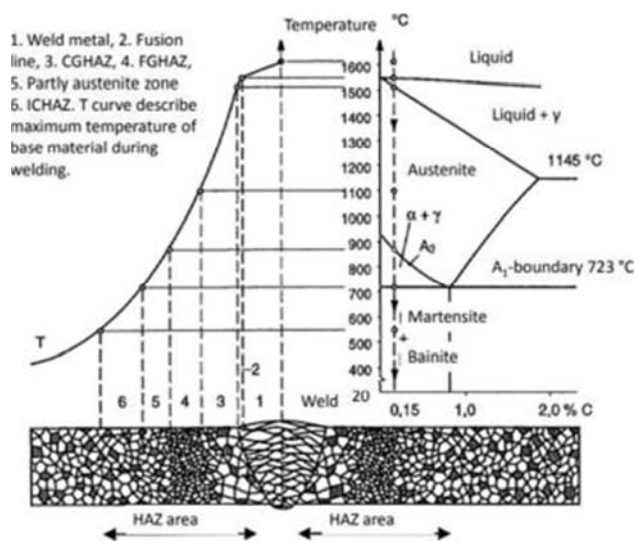


Figure 1. Maximum temperature of material during welding and HAZ microstructure after welding of steel [2]
Slika 1. Maksimalna temperatura materijala tokom zavarivanja i mikrostrukture u ZUT posle zavarivanja čelika [2].

The majority of the recent papers, regarding welding of the high strength steels (especially S960), investigate the effect of the processing parameters and technology on the resulting properties, but those studies mostly consider the quenched and tempered steels and sheets with thickness of 8 mm and greater. It is well known that the welding of the thin sheets can reveal some differences in the resulting properties of the welded joint when compared to the thick sheets [4, 6]. The aim of the research is to point out changes in the microstructure and mechanical properties of the butt welded joint, 3 mm thick S960MC steel, welded by the MAG method.

2. Experimental methods and materials

In this experiment, the S960MC steel was delivered according to EN 10149-2 standard [9]. The required chemical composition according to this standard and the chemical composition according to inspection certificate of investigated steel are shown in Table 1. The required mechanical properties according to EN 10149-2 standard and the mechanical properties according to inspection certificate of investigated steel are shown in Table 2. Sheets with dimensions of 150×300 mm and thickness of 3 mm were used for experimental welded joint. The weld was prepared as the square-groove butt welding joint and gap width was 1.5 mm. The welding was performed according to the proposed welding parameters listed in Table 3 with the MAG process.

Najveći deo savremenih saopštenja koji se odnose na zavarljivost čelika povišene čvrstoće (naročito S960), istražuje uticaj procesnih parametara i tehnologije zavarivanja na finalne osobine, uglavnom razmatrajući kaljene i otpuštene čelike u debljinama 8 mm i debljim. Poznato je da se pri zavarivanju tankih limova mogu pojaviti razlike u mehaničkim osobinama u odnosu na zavarene deblje limove [4,6]

Ciljovog rada je da ukaže na promene mikrostrukture i mehaničkih osobina sučeonih spojeva čelika S960 debljine 3 mm korišćenjem MAG postupka.

2. Eksperimentalni deo

U ovom radu je ispitan čelik S960 isporučen u skladu sa EN 10149-2 standardom [9]. U tabeli 1 su dati zahtevani hemijski sastav prema navedenom standardu i sastav ispitanog čelika. U tabeli 2 su date zahtevane mehaničke osobine prema navedenom standardu i mehaničke osobine ispitanog čelika.

Ploče dimenzija 150×300mm, debljine 3 mm su korišćene u eksperimentima zavarivanja. Ivce ploča su pripremljene u obliku I sučeonog spoja sa zazorom od 1,5 mm. Zavarivanje je izvedeno MAG postupkom, sa parametrima datim u tabeli 3.



The copper coated solid wire Carbofil 3NiMoCr (EN ISO 16834-A: G 89 5 M21 Mn4Ni2,5CrMo) was used for welding. Chemical composition and mechanical properties of used welding wire are shown in Table 4. This wire belongs to the “undermatched” type of filler material, where yield strength of the weld metal is less than the yield strength of the base material.

Bakrom obložena žica Carbofil 3NiMoCr (EN ISO 16834-A G89 5 M21 Mn4Ni2,5CrMo) je korišćena za zavarivanje. Hemijski sastav i mehaničke osobine korišćene žice su date u tabeli 4. Ova žica pripada grupi dodatnih materijala niže čvrstoće (undermatched), kod kojih je tranica tečenja niža u odnosu na granicu tečenja osnovnog materijala.

Table 1. Chemical composition of tested steel
Tabela 1. Hemijski sastav ispitanog čelika

According to U skladu sa	Mechanical properties, thickness 3mm Mehaničke osobine S960, debljina 3mm										
	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V	Ti	Mo	B
EN10149-2*	0,120	0,60	2,20	0,025	0,010	0,015	0,09	0,20	0,250	1,000	0,005
Tested steel	0,087	0,18	1,11	0,009	0,001	0,0030	0,002	0,01	0,022	0,128	0,001

Maximum values of alloying elements except Al. Al_{tot} at a total is minimum value. The sum Nb+V+Ti max. 0,22%
Maksimalni sadržaji legirajućih elemenata osim Al. Al_{tot} je minimalna vrednost. Zbir Nb+V+Ti maksimalno 0,22%

Table 2. Mechanical properties of tested steel
Tabela 2. Mehaničke osobine čelika

According to U skladu sa	Mechanical properties, thickness 3 mm Mehaničke osobine S960, debljina 3 mm		
	R _{p0,2} , MPa	R _m , MPa	A, %
EN10149-2*	Min. 960	980-1250	Min. 7
Tested steel Ispitani čelik	1031	1154	12
	1038	1147	11

Table 3. Welding parameters
Tabela 3. Parametri zavarivanja

Beads Prolaz	Weld Process Postupak	Filler Material Diameter, mm Dodatni materijal – poluprečnik, mm	Polarity Polaritet	Welding Current, A Struja zavarivanja, A	Welding Voltage, V Napon zavarivanja, V	Travel speed, cm/min Brzina zavarivanja, cm/min	Wire feeding rate, m/min Brzina dodavanja žice, m/min	Gas flow, l/min Protok gasa, l/mi n	Heat Input, kJ/cm Uneta toplota, kJ/cm
1	135	1	DC+	125-135	18-19	45-50	4,5	16	2,7

Schielding gas: M21, 82%Ar+18%CO, according to EN ISO 14175 standard [10]

Zaštitni gas: M21, 82%Ar+18%CO, prema standardu EN ISO 14175 [10]

Filler Material: G89 5 M21 Mn4Ni2,5CrMo according to EN ISO 16834-A standard [11]

Dodatni materijal: G89 5 M21 Mn4Ni2,5CrMo prema standardu EN ISO 16834-A [11]

Other parameters: without preheating, cooling on air, without Post Weld Heat Treatment

Ostali parametri: bez predgrevanja, hladjenje na vazduhu, bez termičke obrade posle zavarivanja



Table 4. Chemical composition and mechanical properties of welding filler material
Tabela 4. Hemijski sastav i mehaničke osobine dodatnog materijala

Designation of welding wire: Carbofil 3NiMoCr, manufacturer Oerlikon. Standard Designation of Welding Filler Material: EN ISO 16834-A G89 5 M21 Mn4Ni2,5CrMo Oznaka žice za zavarivanje: Carbofil 3NiMoCr, proizvođač Oerlikon. Standardno označavanje dodatnog materijala za zavarivanje: EN ISO 16834-A G89 5 M21 Mn4Ni2,5CrMo													
Chemical composition of welding filler material, wt% Hemijski sastav dodatnog materijala, tež%													
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	V	Ti	Zr
EN16834*	0,13	0,50 0,80	1,60 2,10	0,015	0,018	0,20 0,60	2,30 2,80	0,30 0,65	0,30	0,120	0,030	0,100	0,1000
Tested steel Ispitani čelik	0,11	0,66	1,77	0,009	0,007	0,41	2,43	0,46	0,17	0,007	0,007	0,069	0,0019
* The individual values in table are maximum values Pojedinačne vrednosti u tabeli su maksimalni sadržaji													
Mechanical properties of welding filler material, wt% / Mehaničke osobine dodatnog materijala, tež%													
EN16834*	Rp _{0,2} , MPa	≥ 890		R _m , MPa	940-1180		A, %	≥15		KCV, J		≥ 47/-50°C	
Tested steel Ispitani čelik		≥ 930			≥ 980			≥14				≥47/-50°C	

After the welding procedure, the specimens were cut in the transversal direction from the sheets at the minimal distance of 25 mm from the beginning of the welds. Three tests of weld joint were performed:

- macroscopis and mikroskopic evaluation,
- evaluation of microhardness,
- transverse tensile test.

The quality of the welding joint must be assessed objectively according to the further described criteria. For the evaluation of mechanical properties of the welded joint according to EN ISO 15614-1 standard [14] the following applies:

- the tensile strength of the welded joint must be equal to or above the minimum required tensile strength of the base material ($R_m \geq 980$ MPa),
- maximum welded joint hardness (for base material included in group 2.2 according to EN ISO 15608 standard [15]) shall be 380 HV without heat treatment after welding. For steels over $R_{p0,2} \geq 890$ MPa the critical value must be agreed.

In practice, the critical values are often reduced. For example for steel S960MC must be $R_{p0,2} \geq 10$ MPa. The upper and lower limit is also prescribed for the hardness evaluation. For example, the hardness of welded joint of steel S960MC must be in range 260–450 HV (as welded).

3. Result and Discussion

3.1 Macrostructures and microstructures evaluation

The macro and microstructure evaluation after the welding were characterized by the optical microscopy. Specimens were prepared by the standard procedure for preparation of metallographic specimens and etched by 1% Nital. The macrostructure of the welded joint (Figure 2) showed no cracks, pores and other internal defects.

Nakon zavarivanja, uzorci su isečeni u poprečnom pravcu, najmanje 25 mm od oba kraja spoja. Obavljene su tri vrste ispitivanja:

- određivanje makro i mikrostrukture
- merenje mikrotvrdoće
- poprečni test zatezanjem.

Kvalitet zavarenog spoja mora biti utvrđen objektivno u skladu sa narednim kriterijumima. Za određivanje mehaničkih osobina zavarenog spoja u skladu sa EN ISO 15614-1 standardom [14] primenjuje se sledeće:

- granica tečenja zavarenog spoja mora biti jednaka ili viša od minimalno zahtevane granice tečenja osnovnog metala ($R_m \geq 980$ MPa),
- maksimalna vrednost tvrdoće (za materijale koji spadaju u grupu 2.2 u skladu sa EN ISO 15608 standardom [15]) mora biti 380HV bez dodatne termičke obrade posle zavarivanja. Za čelike sa $R_{p0,2} \geq 890$ MPa, kritična vrednost mora biti unapred usaglašena.

U praksi, kritične vrednosti su uobičajeno smanjene. Za merenje tvrdoće se takođe daje opseg najniže i najviše vrednosti. Na primer, tvrdoća u zavarenom spoju čelika S960MC mora biti u granicama 260–450 HV, u zavarenom stanju.

3. Rezultati i diskusija

3.1 Makrostruktura i mikrostruktura

Makrostruktura i mikrostruktura posle zavarivanja su posmatrane na svetlosnom mikroskopu. Uzorci su pripremljeni prema standardnoj proceduri za pripremu i nagriženi u nitalu 1%.



Reinforcement of the butt weld on the face and root side was within the limits of the standard. Transition of the weld metal into the base material was smooth with correct weld toe angle. The microstructure of the base metal is shown in the Figure 3a and consists of the mixture of tempered martensite and bainite. Microstructural observation shows significant changes in the HAZ of the examined weld. According to the microstructure observation throughout the HAZ, several structural different sub-zones were recorded. The phase transformations in the HAZ depend on the thermal exposure, to which individual parts of the HAZ were subjected and on the time of this thermal exposure. Closer to the weld metal and fusion zone, the area was exposed to higher temperatures, but also the cooling rate was higher. In the HAZ of the examined weld, the three main sub-zones were identified (naturally, transition areas were present between these clearly distinguished subzones). The similar behaviour was reported by authors [7, 13, 16, 17, 12]. In the direction from the weld metal to the base metal, the first observed zone was the coarse grain zone (CGHAZ) (Figure 3e). The CGHAZ is the area, which was heated high above the A_{c3} temperature, what resulted in the transformation of the base metal to austenite, which subsequently grew. Followed by the rapid cooling, the enlarged austenitic grains transformed back to coarse martensite. The second area in HAZ is the fine grain heat affected zone (FGHAZ) (Figure 3c). This area was heated slightly above the A_{c3} temperature, but for a very short holding time.

Makrostruktura zavarenog spoja, prikazana na slici 2, pokazuje da nema prisutnih pora, prslina ili drugih unutrašnjih grešaka. Nadvišenje spoja kako sa korene strane, tako i na licu je u okviru vrednosti dopuštenih standardom. Prelazak od metala šava u osnovni metal je bez diskontinuiteta sa pravilnim uglom nadvišenja. Mikrostruktura osnovnog metala je prikazana na slici 3a i sastoji se od beinita i otpuštenog martenzita. U ZUT-u se mogu videti brojne različite mikrostrukture i mogu se razdvojiti različite pod-zone. Fazne transformacije do kojih dolazi u ZUT-u zavise of temperature na koju je bio zagrejana svaka tačka u ZUT-u i vremena koje je provela na toj temperaturi. Što je tačka bliže liniji stapanja, područje je izloženo višoj temperaturi, ali je posledica i veća brzina hladjenja. U ZUT-u koji je ispitan u ovom radu su razdvojene tri glavne podzone (uz prelazna područja izmedju njih). Slično ponašanje je već saopštavano [7, 13, 16, 17, 12].

U smeru od metala šava prema osnovnom metalu, prva zona koja se može uočiti je grubozrna zona (CGHAZ), slika 3e. Ovo je područje koje je zagrejano na temperature iznad A_3 , čime je dobijen austenit u kome je došlo do porasta zrna. Pri brzom hladjenju, grubozrni austenit prelazi u martenzit koji takodje karakteriše veliko zrno.

Drugo područje u ZUT-u je fino zrna zona (FGHAZ), slika 3c. Ovo je područje koje je bilo zagrejano neposredno iznad A_3 temperature i kratko boravilo na toj temperaturi.

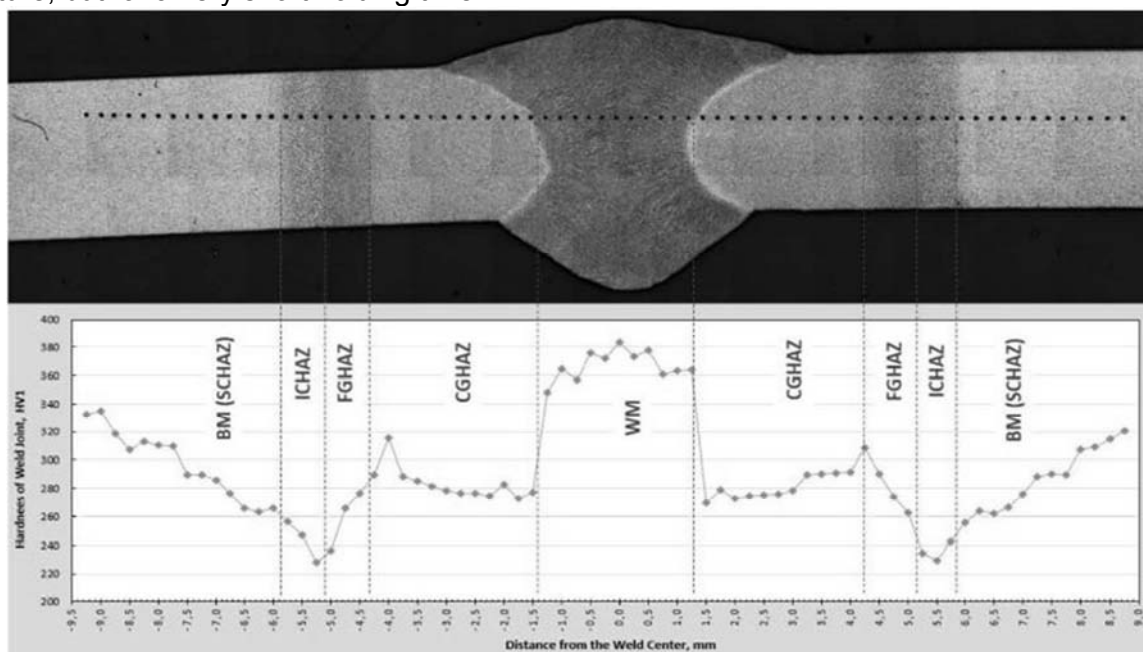


Figure 2. Macrostructure of the S960MC welded joint and the microhardness profile HV1 of sub-zones HAZ (BM – base material, WM – weld metal)

Slika 2. Makrostruktura zavarenig spoja čelika S960MC i raspodela mikrotvrdoće HV1 unutar podzona u ZUT (BM – osnovni metal, WM – metal šava)

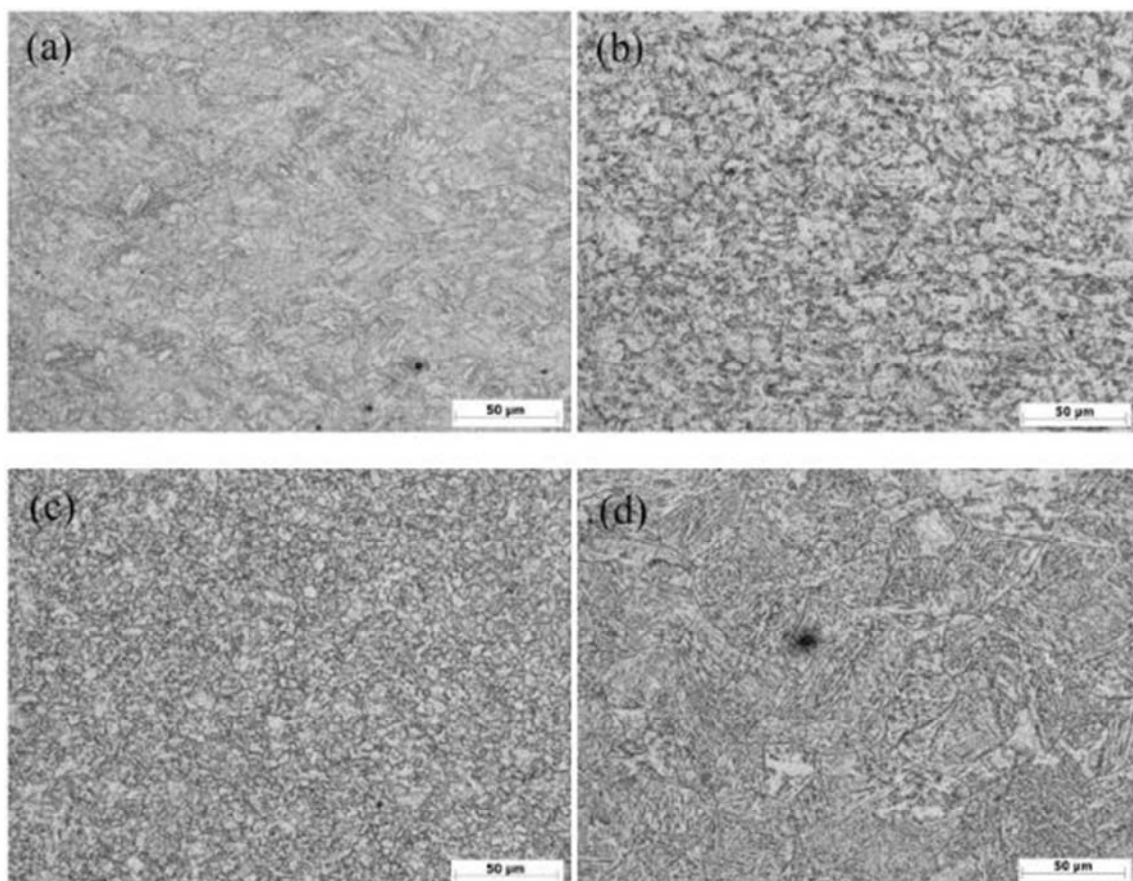


Figure 3. Microstructure of the base material and sub-zones HAZ of the S960MC welded joint a) base material, b) ICHAZ, c) FGHAZ, d) CGHAZ

Slika 3. Mikrostruktura osnovnog metala i podzona ZUT-a u spoju čelika S960MC: (a) osnovni metal, (b) ICHAZ, (c) FGHAZ, (d) CGHAZ

Exposure to heat in this zone caused the transformation of the base metal to austenite, but due to the relatively low temperature and very short duration of this exposure, followed by the rapid cooling, it resulted in the refinement of austenitic structure and its subsequent transformation to martensite. The last area of the HAZ is called the intercritical heat affected zone (ICHAZ) (Figure 3b). This area was exposed to temperatures in the range between A_{c1} and A_{c3} where the martensite is partially transformed to austenite. This exposure resulted in formation of the mixture of martensite and austenite, which transformed, after the rapid cooling, to martensite and ferrite, while the untransformed martensite was tempered. The resulting microstructure of this area is the mixture of martensite, ferrite and tempered martensite – similar to other studies [7, 16]. According to other authors, the ICHAZ is the weakest area in the welded quenched and tempered steels [18]. The width of the ICHAZ was approximately 750 μm . In addition, the base metal near the HAZ (SCCHAZ) was affected by the introduced heat, but heat exposure did not exceed the A_{c1} temperature, so no phase transformation occurred, only a

Izlaganje toploti u ovoj zoni je dovelo do pojave austenita, ali zahvaljujući relativno niskoj temperaturi i kratkom vremenu izlaganja, austenitna zrna su smanjena. Brzo hladjenje ovakve strukture dovodi do pojave veoma finog martenzita. Poslednja oblast je sub zona interkritičnog ZUT-a (ICHAZ), slika 3b. Ova subzona je bila zagrejana u temperaturno područje između A_1 i A_3 temperatura, tako da se polazni martenzit transformisao u mešavinu austenita i ferita. Brzim hladjenjem ove smeše se dobija martenzit i ferit, dok se deo martenzita koji nije prelazio u austenit dodatno se otpušta. Finalnu strukturu u ovom području čine martenzit, ferit i otpušteni martenzit, što je u saglasnosti sa rezultatima drugih autora [7, 16]. Prema nekim autorima ICHAZ je najslabije područje u kaljenim i otpuštenim čeliima [18]. Širina zone ICHAZ je procenjena na 750 μm . Dodatno, osnovni metal u blizini ZUT (SCHAZ) je takodje zagrevan, ali zagrevanjem nije premašena temperatura A_1 , tako da izostaju fazne transformacije, već samo otpuštanje martenzita,



tempering of the martensite phase, which resulted in decrease of microhardness in that area.

3.2 Microhardness evaluation

Microhardness measurements were used for characterization of changes of the properties through the welds. The microhardness was measured in the line, from the base metal, through the HAZ, weld metal to the base metal on the other side. For all the microhardness measurements, the force $F=9.8\text{ N}$ (HV1 method) was used, distance between indentation was $0,25\text{ mm}$. The microhardness of the base material was 359 HV1 (average value with ten measurements in the center line). Microhardness profile (Figure 2) shows continual decrease of microhardness in the direction from the base metal to ICHAZ. This decrease is related to the tempering of martensite in the base metal structure. Decrease of strength related properties is common behavior for all the high strength steels (quenched tempered and TMCP steels), when they are heated in the range $450^{\circ}\text{C}-\text{Ac1}$ temperature, due to martensite tempering [19]. The lowest values of microhardness were obtained in the ICHAZ, where only 66% of the base metal hardness was recorded. The ICHAZs seems to be the most critical area. In FGHAZ, the microhardness started to increase and reached its maximum throughout the HAZ. In the area CGHAZ, a small decrease of microhardness was recorded in direction to the weld metal, what was related to the excessive grain growth in this zone. The Figure 4 shows detail of HAZ with the ICHAZ sub-zone and individual microhardness values, the minimum value 228HV1 is in ICHAZ. The average values of microhardnesses of each HAZ sub-zone are shown in Table 5

što za posledicu ima sniženje tvrdoće u ovom području.

3.2 Mikrotvrdoća

Merenje mikrotvrdoće je korišćeno za praćenje promena osobina kroz ceo spoj. Mikrotvrdoćaje merena duž linije, od osnovnog metala, kroz ZUT, metal šava, sve do osnovnog metala sa suprotne strane. Korišćeno je opterećenje $F=9,81\text{N}$ (HV1 method), sa korakom merenja $0,25\text{mm}$. Mikrotvrdoća osnovnog metala je iznosila 359HV1 (srednja vrednost 10 merenja). Raspodela mikrotvrdoće je prikazana na slici 2, gde se vidi kontinuirano sniženje mikrotvrdoće, od osnovnog metala do ICHAZ. Ovo smanjenje je pripisano otpuštanju martenzita u osnovnom metalu. Smatra se da je smanjenje čvrstoće i sličnih osobina uobičajeno za sve čelike povišene čvrstoće (kaljene i otpuštene ili mikrolegirane) usled otpuštanja martenzita kada se zagrevaju u temperaturno područje $450^{\circ}\text{C}-\text{Ac1}$ [9]. Najmanje vrednosti mikrotvrdoće su zabeleženeu ICHAZ i bile su na nivou 66% mikrotvrdoće osnovnog metala. Zato ICHAZ izgleda kao najkritičnije područje. Prema finojznoj podzoni ZUT, mikrotvrdoća se povećava i dostiže maksimalne vrednosti. Mikrotvrdoća u smeru ka metalu šava dalje blago opada, što se smatra posledicom porasta austenitnog zrna pre transformacije u gruboznom ZUT-u (CGHAZ). Na slici 4 je prikazan deo ZUT koji pokriva interkritičnu podzonu (ICHAZ) i položaje meranja i vrednosti izmerene mikrotvrdoće, uključujuću minimalnu vrednost od 228HV1 . Prosečne vrednosti tvrdoće u svakoj od podzona su date u tabeli 5.

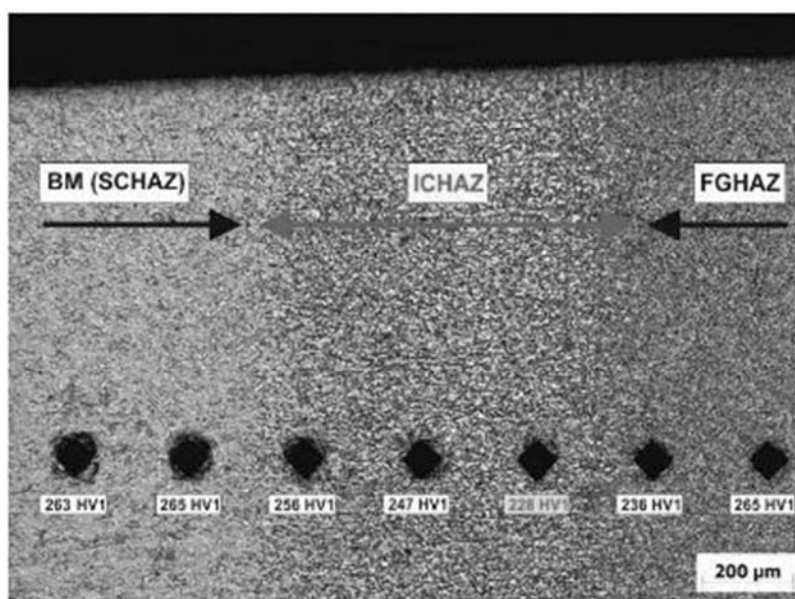


Figure 4. Detail of HAZ with the ICHAZ sub-zone and individual microhardness values

Slika 4. Detalj unutar ZUT-a sa ICHAZ subzonom. Date su pojedinačne vrednosti izmerene mikrotvrdoće



Table 5. Values of microhardness of the individual sub-zones in HAZ

Tabela 5. Vrednosti mikrotvrdoće u pojedinim pod-zonama u ZUT

Sub zone of HAZ Podzone u ZUT-u	Left of weld metal Levo od metala šava				Centre of weld Metal šava	Right of weld metal Desno od metala šava			
	SCHAZ	ICSHZ	FGHAZ	CGHAZ	WM	CGHAZ	FGHAZ	ICSHAZ	SCHAZ
HV1	297	244	267	283	368	283	276	236	287

3.3 Tensile test

The tensile tests were carried out, according to EN ISO 6892-1 standard [20] to obtain the mechanical properties of the welded joint. Specimens for the tensile tests were prepared according to EN ISO 4136 standard [21]. The tensile test of the base material was made on two samples when the inspection certificate was issued. It achieves an average value of $R_{p0,2} = 1035\text{MPa}$ and $R_m = 1151\text{MPa}$. Results of the tensile tests of welded joint are shown in Table 6. The tensile tests show the significant reduction of the tensile strength and yield strength when compared to the original base material. The tensile strength was reduced to 85% of the base material value. The yield strength was reduced as well, and it reached 86% of the base material. Fracture of specimens, tested by the tensile tests, occurred approximately 6 mm from the weld center in all specimens, what corresponds to the microhardness measurements and appearance of the most softened zone in that area. Thus, it can be said that the fracture occurs in the narrow area of the ICHAZ. The Figure 5a shows the fracture profile and Figure 5b macro fracture surface of one part of the test specimen.

3.3 Ispitivanje zatezanjem

Testovi zatezanjem su izvedeni u skladu sa standardom EN ISO 6892-1 [20], kako bi se odredile mehaničke osobine zavarenog spoja. Uzorci za ispitivanje su bili pripremljeni u skladu sa standardom EN ISO4136 [21]. U cilju provere, dva uzorka osnovnog materijala su ispitana. Dobijene su prosečne vrednosti od $R_{p0,2}=1035\text{MPa}$ i $R_m=1151\text{MPa}$. Rezultati zateznih ispitivanja su dati u tabeli 6.

Rezultati ukazuju na značajno smanjenje zatezne čvrstoće i granice tečenja zavarenog spoja u odnosu na osnovni metal. Zatezna čvrstoća je snižena na 86% vrednosti zatezne čvrstoće osnovnog materijala. Granica tečenja je takodje snižena na 86% vrednosti granice tečenja osnovnog materijala. Mesto loma se nalazi na približno 6 mm od srednje ose spoja, što odgovara izmerenoj tvrdoći i prisustvu najmekše zone. Zato je zaključeno da je do loma došlo u interkritičnoj zoni ZUT (ICHAZ). Na slici 5a je prikazan profil preloma, a na slici 5b je prikazana makro površina preloma zatezne epruvete.

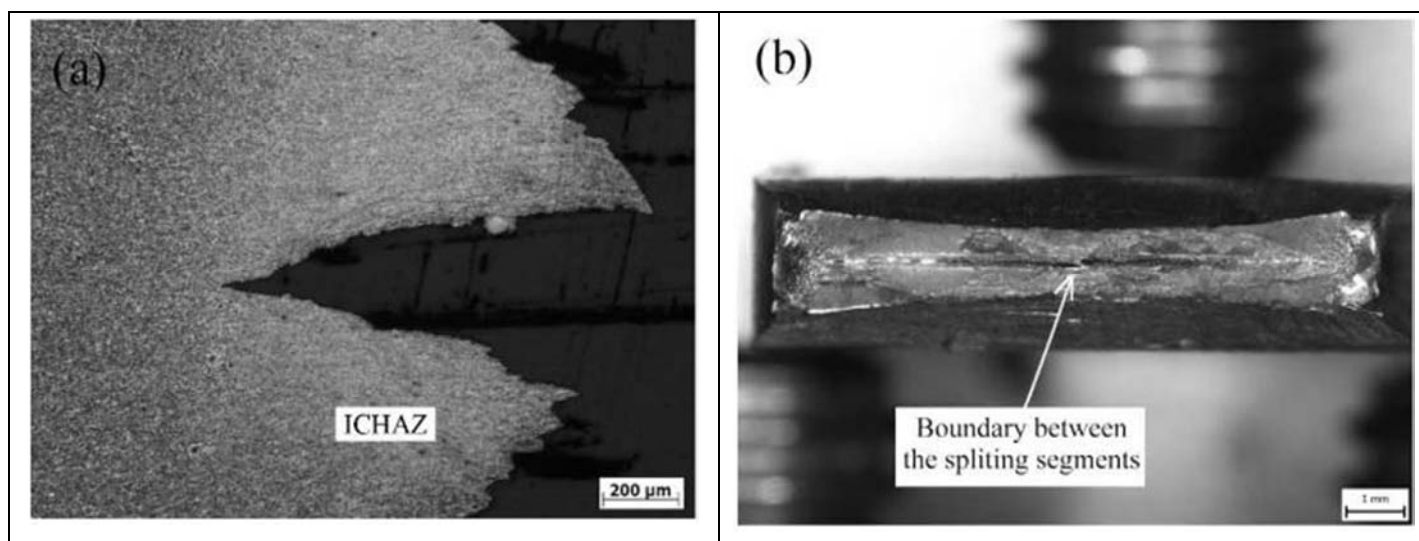


Figure 5. Fracture profile (a) and macro fracture surface (b) of tensile test specimen after rupture

Slika 5. Prelom na epruveti nakon testa zatezanjem: (a) poprečna ravan preloma, (b) makro površina preloma



The fracture is located in the ICHAZ area. This phenomenon is a result of changes in the ICHAZ microstructure, where the softening occurs in the narrow areas. Specimen splits into two segments, with the boundary between the segments coinciding with the mid-thickness position within the plate. Authors [7] speculated that this splitting is due to the specific rolling and fabrication process for the plate, which can lead to variation in the chemical composition in the through-thickness direction. As plastic deformation accumulates, a crack may first develop parallel to the rolling direction before creating the final fracture.

Lom se nalazi u ICHAZ podzoni. Ovaj fenomen je posledica promena u strukturi u ICHAZ, pošto dolazi do omekšavanja u uskoj podzoni. Uzorak se razdvaja na dva dela, praktično duž srednje linije. Ovo ponašanje je dovedeno u vezu sa tehnologijom valjanja i procesa izrade limova, koji mogu dovesti do lokalnih segregacija / varijacije hemijskog sastava po debljini ploče [7]. Usled akumulacije deformacije u toku valjanja, prskotina se može prvo javiti paralelno pravcu valjanja, pre završnog loma.

Table 6. Mechanical properties of welded joint
Tabela 6. Mehaničke osobine zavarenog spoja

Sample Uzorak	Mechanical properties Mehaničke osobine			Place of fracture Mesto loma
	R _{p0.2} , MPa	R _m , MPa	A, %	
1-1	794	826	5	Out of the weld Van zavarenog spoja
1-2	836	858	3	Out of the weld Van zavarenog spoja
Average value Prosečna vrednost	815	842	4	

4. Conclusions

Based on the metallographic examination and mechanical tests of the welded joints of steel S960MC the following conclusions can be formulated:

- The S960MC steels sheets of 3 mm thickness were successfully welded with the G 89 5 M21 Mn4Ni2.5CrMo filler metal without appearance of any cracks and weld imperfections.
- The microstructure observations revealed a few different zones in the HAZ. The sub-zones CGHAZ, FGHAZ, ICHAZ, SCHAZ are clearly identified.
- The microhardness measurement shows that the ICHAZ is the weakest area of the whole joint, with microhardness of only 66 % of the base material hardness.
- The hardness of the base material (at zone SCHAZ), still at 9 mm from the weld centre, does not reaches its primary value.
- The weld metal has approximately the same hardness (368 HV1) as the base material (359 HV1).
- The tensile tests show the significant reduction of mechanical properties. According to EN 10149-2 the tensile strength reached 85% of the base metal, yield strength reached 86% and elongation less than 65% of the base metal values. According to Inspection certificate the tensile strength reached 79% of the base metal, yield strength reached 73% and elongation less than 33% of the base metal values.

4. Zaključci

Na osnovu metalografske analize i ispitivanja mehaničkih osobina, mogu se formulisati sledeći zaključci:

- Limovi debljine 3 mm čelika S960 su uspešno zavareni korišćenjem G89 5 M21 Mn4Ni2,5CrMo dodatnog materijala, bez pojave prslina ili drugih zavarivačkih grešaka.
- Metalografsko ispitivanje je pokazalo nekoliko različitih jasno definisanih podzona u ZUT i to CGHAZ, FGHAZ, ICHAZ i SCHAZ.
- Merenje mikrotvrdoće je ukazalo da je najniža mikrotvrdoća u celom spoju u ICHAZ subzoni i to na nivou 66% mikrotvrdoće osnovnog metala.
- Tvrdoća izmerena u SCHAZ zoni, na 9 mm od centra spoja je još uvek niža od vrednosti osnovnog metala.
- Metal šava ima približno istu vrednost mikrotvrdoće (368 HV1) kao i osnovni metal (359 HV1).
- Rezultati zateznih ispitivanja ukazuju na značajno smanjenje mehaničkih osobina. U skladu sa standardom EN 10149-2, zatezna čvrstoća dostiže 85%, granica tečenja 86% a izduženje je manje od 65% vrednosti osnovnog metala. Prema izveštaju o ispitivanju zatezna čvrstoća je dostigla 79%, granica tečenja 73%, a istezanje manje od 33% vrednosti osnovnog materijala.



Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the contribution of the Education Grant Agency of the Slovak Republic under the grant no. 009ŽU-4/2019. Next the research was supported by the Slovak Research and Development Agency under the contract no. APVV-16-0276 and APVV-16-0300 and next by the ITMS 26210120017 Project of “Centre for research and development in the field of the electron-beam and progressive arc technologies of welding, cladding and surface-finishing”.

References

- [1] SSAB. 2019. A Stronger, Lighter, and More Sustainable World. [Online] 2019. [Datum: 10. Januar 2019.] <https://www.ssab.com/>.
- [2] T. Pirinen, PhD. thesis, The Effects of Welding Heat Input on the Usability of High Strength steels in welded structures, Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland (2013).
- [3] Hochhauser, F., Ernst, W., Rauch, R. et al. Weld World, 56 (5– 6), 56-77 (2012)
- [4] M. Jambor, R. Ulewicz, F. Nový, O. Bokůvka, L. Trško, M. Mičian, D. Harmaniak, Evolution of Microstructure in the Heat Affected Zone of S960MC GMAW Weld, Terotechnology 2017, Materials Research Proceedings, 5, 78-83 (2018)
- [5] Lundin, C. D., Gill, T. P. S. a Qiao, C. Y. 1990. Heat affected zones in low carbon microalloyed steels. Recent trends in Welding Science and Technology Proceedings, 2nd International Conference, Gatlinburg (1990)
- [6] Jambor, M., Novy, F., Mician, M., Trsko, L., Bokuvka, O., Pastorek, F., Harmaniak, D., Communications - Scientific Letters of the University of Zilina, 20 (4), 29-35, (2018)
- [7] W. Guo et al., Materials and Design, 85, 534–548 (2015)
- [8] J. Moravec, P. Rohan, METAL 2011: 20th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials, 803808 (2011)
- [9] EN 10149-2 Hot rolled flat products made of high yield strength steels for cold forming - Part 2: Technical delivery conditions for thermomechanically rolled steels

Zahvalnica

Autori se zahvaljuju na finansiranju projekta 009ŽU-4/2019 Agenciji za stipendiranje u obrazovanju Slovačke Republike. Istraživanje je financirano i kroz projekte Slovačke agencije za istraživanje i razvoj APVV-16-0276 i APVV-16-0300, kao i ITMS26210120017 projekat “Centra za istraživanje i razvoj u oblasti zavarivanja elektronskim snopom i modernim elektrolučnim tehnologijama zavarivanja, oblaganja i finalne površinske obrade”.

- [10] EN ISO 14175 Welding consumables. Gases and gas mixtures for fusion welding and allied processes
- [11] EN ISO 16834-A Welding consumables - Wire electrodes, wires, rods and deposits for gas shielded arc welding of high strength steels - Classification
- [12] T. Pała, I. Dzioba, Arch. Metall. Mater. 62 (4), 2081-2087 (2017)
- [13] S. Błacha, M.S. Węglowski, S. Dymek, M. Kopyściański, Arch. Metall. Mater. 62 (2), 627-634 (2017)
- [14] STN EN ISO 15614-1 Specification and qualification of welding procedures for metallic materials - Welding procedure test - Part 1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys
- [15] TNI CEN ISO/TR 15608 Welding - Guidelines for a metallic materials grouping system
- [16] Guo, W., Li, L., Dong, S., Crowther, D., Thompson, A., Optics and Lasers in Engineering, 91, 1-15 (2017).
- [17] Nowacki, J., Sajek, A., Matkowski, P., Archives of Civil and Mechanical Engineering, 16, 777-783 (2016)
- [18] Sharma, V., Shahi, A. S., Journal of Materials Processing Technology, 253, 2-16, (2018)
- [19] Gaspar, M., Balogh, A., Production Processes and Systems, 6, 9-24 (2013)
- [20] EN ISO 6892-1 Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature
- [21] EN ISO 4136 Destructive tests on welds in metallic materials - Transverse tensile test



„Koncentracija napona i zamor materijala-savremeni pristup proračunu mašinskih elemenata“

dr Dejan B. Momčilović, dr Radivoje M. Mitrović, dr Ivana D. Atanasovska

Monografija izuzetnog naučnog i stručnog doprinosa „Koncentracija napona i zamor materijala - savremeni pristup proračunu mašinskih elemenata“, autora dr Dejana B. Momčilovića, dr Radivoja M. Mitrovića i dr Ivane D. Atanasovske, izdata je od strane Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, 2016. god. u tiražu od 300 primeraka, i predstavlja jedinstveno štivo na srpskom jeziku koje obuhvata pregled teorijskih osnova fenomena zamora, kao i originalne doprinose autora u oblasti proračuna uticaja sa izvorom koncentracije napona na radni vek konstrukcije.

Od objavljivanja do danas, monografija je naišla na veliko ineteresovanje u krugu kolega koji se bave naučnoistraživačkim radom, kao i određenog kruga eksperata iz oblasti zamora materijala u zemlji i inostranstvu. U skladu sa tim i u susret pripremi drugog proširenog izdanja, dajemo prikaz osnovnih doprinosa ovog monografskog dela.

Ukratko, otkazi mašinskih i drugih konstrukcija sa zavarenim spojevima usled zamora su pojave poznate još od polovine 19. veka. Temelje sistematičnog izučavanja pojave zamora tada je postavio Veler (Wöhler). U mnogim oblastima inženjerske prakse osnovni postulati tada postavljeni važe i danas. Novi rezultati i teorije koji su se pojavili na kraju 19. veka i na početka 20. veka su u mnogome odredili način razmišljanja mnogih konstruktora u potonjem periodu. Do danas, uprkos razvoju znanja i razumevanja kako ponovljeno opterećenje utiče na radni vek elemenata konstrukcija i mašinskih sistema u celosti, ostao je veliki broj nerazjašnjenih pitanja. Složenost fenomena zamora se ogleda pre svega u broju uticajnih činilaca pri određivanju radnog veka mašinskih elemenata i sistema. Uobičajeno pojednostavljenje tako postavljenog problema se ogleda u korišćenju različitih faktora (faktora kvaliteta površine, opterećenja, radne sredine), koji su se vremenom pokazali kao nedovoljno tačnim. Poseban problem se javlja u predviđanju radnog veka elemenata i konstrukcija složenih geometrijskih oblika sa različitim izvorima koncentracije napona. Takav problem se dodatno usložnjava ako su ti elementi spojeni zavarivanjem jer zavareni spoj predstavlja mesto lokalnog geometrijskog i mikrostrukturnog izvora koncentracije napona.

Monografija "Koncentracija napona i zamor materijala – savremeni pristup proračunu mašinskih elemenata", jeste delo u koje su utkana višegodišnja iskustva i stečena znanja autora iz jedne specifične oblasti u okviru proračuna mašinskih elemenata, materijala i konstrukcija. U stručnoj i naučnoj literaturi, pre svega na srpskom jeziku, do sada nije postojalo delo koje na jasan i nedvosmislen način razjašnjava sve fenomene koncentracije napona i zamora materijala, istovremeno baveći se proračunom mašinskih elemenata i konstrukcija sa aspekta izdržljivosti na oštećenja i otkaze koji nastaju usled ovog fenomena. Iako se sadržaji ovog tipa mogu delimično pronaći u mnogim univerzitetskim udžbenicima, savremene tendencije ka povećanju tačnosti proračuna mašinskih elemenata i konstrukcija, a u cilju povećanja njihove energetske efikasnosti i bezbednosti, uslovile su potrebu za sistematizovanjem pristupa rešavanju ovih problema u jednom ovakvom pisanom delu. Poseban doprinos ovog materijala je objedinjavanje osnovnih postavki teorije zamora i savremenih pristupa i metoda proračuna mašinskih elemenata i konstrukcija. Ključni doprinos monografije predstavlja dokaz validnosti nove veličine, dimenzije dužine, koja objedinjuje uticaj geometrije izvora koncentracije napona sa karakteristikama materijala u jedinstvenu meru uticaja izvora koncentracije napona na radni vek elemenata i konstrukcija.

Pri koncipiranju ovog dela posebna pažnja je posvećena organizaciji dela koja je omogućila obuhvatanje širokog kruga čitalaca. Monografija je podeljena uslovno rečeno na dva dela, teorijski deo, koji obuhvata razmatranje fenomena zamora, izvore koncentracije napona i njihov uticaj i dosadašnji način proračuna, pregled dosadašnjih znanja i načina proračuna uticaja izvora koncentracije napona u uslovima zamora sa prikazom verifikacije nove metode i primerom primene nove metode na realni element iz prakse. Drugi, praktični deo, sadrži seriju primera iz prakse na kojima je ukazano na koji se način primenjuje nova metoda. Monografija je podeljena u osam poglavlja na 278 strana, sa 229 slika, 10 tabela i 326 referenci.

Iako je ova monografija pre svega naučno delo namenjeno istraživačima i studentima doktorskih i master studija, očigledno je da i veliki broj inženjera koji se susreću sa praktičnim problemima iz ove oblasti mogu naći veoma vredne informacije i primere u ovoj publikaciji. Praktično ne postoji ni jedna, iole značajnija referenca iz oblasti zamora, a da nije navedena u prikazanoj monografiji, što predstavlja izuzetnu osnovu za sva buduća istraživanja u oblasti zamora u našoj zemlji i šire. Zahvaljujući temi, detaljno razrađenoj metodologiji i primerima, ova monografija će sigurno postati dopunska literatura svim istraživačima i inženjerima mašinstva, metalurgije i zavarivanja i svima ostalima koji se susreću sa navedenim problemima iz prakse u ovoj oblasti.



Ahmet Suat Yildiz^{1,a}, Baris Koc^{1,b}, Prof. Dr. Oguzhan Yilmaz^{2,c}

Building strategy effect on mechanical properties of high strength low alloy steel in wire + arc additive manufacturing

Uticaj strategije izrade na mehaničke osobine niskolegiranih čelika visoke čvrstoće u aditivnoj proizvodnji žicom i električnim lukom

Originalni naučni rad / Original scientific paper

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

Rad primljen / Paper received:

Septembar 2020.

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

Keywords: wire arc additive manufacturing, high strength low alloy steel, mechanical properties, building strategies

Abstract

Wire arc additive manufacturing (WAAM) which is literally based on continuously fed material deposition type of welding processes such as metal inert gas (MIG), tungsten inert gas (TIG) and plasma welding, is a variant of additive manufacturing technologies. WAAM steps forward with its high deposition rate and low equipment cost as compared to the powder feed and laser/electron beam heated processes among various additive manufacturing processes. In this work, sample parts made of low alloy high strength steel (ER120S-G) was additively manufactured via WAAM method using robotic cold metal transfer technology (CMT). The process parameters and building strategies were investigated and correlated with the geometrical, metallurgical and mechanical properties on the produced wall geometries. The results obtained from the thin wall sample parts have showed that with increasing heat input, mechanical properties decreases, since higher heat accumulation and lower cooling rate increases the grain size. The tensile tests results have showed that casting steel (G24Mn6+QT2) mechanical properties which requires 500 MPa yield strength can be compared to with as build WAAM process having 640 MPa yield strength. Tensile strength were fulfilled for S690Q and yield strength is very close to the reference value.

1. Introduction

Additive manufacturing (AM) has been defined as a process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer as opposed to subtractive methodologies [1]. It is a technology that promises to reduce part cost by reducing material wastage and time to market.

Adresa autora / Author's address:

¹Weld Process Development, FNSS Savunma Sistemleri A.S., Ankara, Turkey, ^aahmet.yildiz@fnss.com.tr

^bbaris.koc@fnss.com.tr

²Mechanical Engineering, Gazi University, Ankara, Turkey, coguzhanyilmaz@gazi.edu.tr

Ključne reči: aditivna proizvodnja žicom i električnim lukom, niskolegirani čelik visoke čvrstoće, mehaničke osobine, strategije izrade

Rezime

Aditivna proizvodnja žicom i električnim lukom (Wire arc additive manufacturing - WAAM), koje je bukvalno zasnovano na neprekidnom polaganju materijala pri postupcima zavarivanja poput metal inertnog gasa (MIG), tungsten inertnog gasa (TIG) i plazma zavarivanja, predstavlja varijantu tehnologije za aditivnu proizvodnju. WAAM se ističe svojom velikom brzinom deponovanja dodatog materijala i jeftinom cenom opreme, u poređenju sa mnogim drugim procesima aditivne proizvodnje, koji se oslanjaju na prahove i laserske/elektronske zrake. U ovom radu je prikazana proizvodnja uzoraka od niskolegiranog čelika povišene čvrstoće (ER120S-G) primenom WAAM metode, uz pomoć robotizovane tehnologije hladnog transfera metala (Cold metal transfer – CTM). Parametri procesa i strategije izrade su analizirane i povezane sa geometrijskim, metalurškim i mehaničkim osobinama proizvedenih geometrija spojeva. Rezultati dobijeni iz uzoraka tankozidnih delova su pokazali da povećan unos toplote dovodi do opadanja mehaničkih osobina, s obzirom da veća količina toplote snižava vreme hlađenja, što dovodi do porasta zrna. Rezultati ispitivanja na zatezanje su pokazali da liveni čelik G24Mn6+QT2, čija zahtevana granica tečenja iznosi 500 MPa može da se uporedi sa rezultatima WAAM procesa, sa granicom tečenja od 640 MPa. Zatezna čvrstoća je zadovoljena za čelik S690Q, dok je i granica tečenja veoma bliska referentnoj vrednosti.

1. Uvod

Aditivna proizvodnja je definisana kao process spajanja materijala kako bi se napravili objekti na osnovu podataka iz 3D modela, najčešće dodavanjem sloja na sloj, kao suprotnost metodologijama odstranjivanja materijala [1]. U pitanju je tehnologija koja omogućava smanjenje



Furthermore, it provides more design freedom [2]. Wire arc additive manufacturing (WAAM) is a variant of AM which is based on welding processes such as metal inert/active gas (MIG/MAG), tungsten inert gas (TIG) and plasma welding (PW) [3]. Among various AM processes, WAAM steps forward with its high deposition rate and low equipment cost as compared to the powder feed and laser/electron beam heated processes [4]. Cold metal transfer (CMT) which is a modified MIG variant relies on controlled dip transfer mode mechanism. It has been widely implemented for WAAM processes, due to its high deposition rate, low heat input and high bead quality production nearly without spatter [2, 5]. In addition, coaxial wire feeding compared to TIG and plasma processes provides simplicity for the deposition head motion [4].

WAAM parts have been produced so far from different materials such as Ti6Al4V [6, 7], Inconel [8], aluminum [9], nickel aluminum bronze [10], carbon [11] and stainless steels [12, 13] with comparable mechanical properties to the parts produced by conventional methods. The commercially available welding wire ER120S-G is a member of low-alloyed high strength steels family. It is commonly used to weld HY80 or HY100 steel in accordance with MIL-S-16216 [14]. So far, this material has not been reported in the literature regarding to WAAM process. High strength parts which have similar mechanical properties with ER120S-G can be produced with WAAM instead of casting, forging and rolling. In this paper, WAAM process with robotic CMT technology was applied to depositing the ER120S-G. The process parameters and building strategies were investigated and correlated with the geometrical and mechanical properties. Mechanical performance was also compared with high strength wrought and casting steels.

2. Experimental procedure

2.1 Materials

In the experiments, hot rolled structural mild steel S355 was used as a substrate. To ensure the repeatable and steady state welding conditions, the substrates were polished and then cleaned with ethanol. The 1.2 mm diameter wire material ER120S-G according to AWS A5.28 was used as welding wire. This material is a low alloy high strength steel which is commonly used for large vehicle, crane and high strength pressure vessel manufacturing.

The chemical composition of the wire is shown in Tab. 1.

vremena proizvodnje. Uz to, omogućava i dodatnu slobodu pri konstruisanju [2]. Aditivna proizvodnja žicom i električnim lukom (WAAM) je varijanta aditivne proizvodnje zasnovana na postupcima zavarianja poput MIG/MAG, TIG i plazme [3]. Među brojnim procesima aditivne proizvodnje, WAAM se ističe svojom velikom brzinom deponovanja dodatog materijala i niskom cenom opreme u poređenju sa postupcima koji koriste prahove i zagrevanje laserom/elektronskim snopom [4]. Hladan transfer metala (CMT), koji predstavlja modifikovanu verziju MIG postupka, se oslanja na kontrolisani mehanizam transfera utapanjem. Uveliko je implementiran u WAAM sisteme, usled velike brine, niskog unosa toplote i visokog kvaliteta proizvodnje, skoro bez ikakvog razbrizgavanja [2,5]. Pored toga, koaksijalni dovod žice čini proces deponovanja jednostavnijim u poređenju sa TIG i plazma postupcima [4]. WAAM delovi se proizvode od različitih materijala, poput Ti6Al4V [6,7], Inconel legure [8], aluminijuma [9], niki-aluminijum-bronze [10], ugljenika [11] i nerđajućih čelika [12,13] i poseduju osobine koje se mogu porediti sa materijalima proizvedenim konvencionalnim metodama. Lako dostupna žica za zavarivanje, ER120S-G pripada grupi niskolegiranih čelika povišene čvrstoće i često se koristi kao dodatak pri zavarivanju HY-80 ili HY-100 čelika, u skladu sa MIL-S-16216 [14]. Ovaj materijal dosad nije pominjan u literature vezanoj za WAAM proces. Delovi povišene čvrstoće koji imaju slične mehaničke osobine kao ER120S-G mogu se proizvesti WAAM procesom, umesto livenja, kovanja ili valjanja. U ovom radu, WAAM proces sa robotizovanom CMT tehnologijom je primenjen na proizvodnju deponovanjem žice ER120S-G. Parametri procesa i strategije izrade su ispitane i povezane sa geometrijskim i mehaničkim osobinama. Ove mehaničke osobine su takođe poređene sa proizvodima povišene čvrstoće proizvedenim kovanjem i livenjem.

2. Eksperimentalni postupak

2.1 Materijali

Tokom eksperimenata, toplo valjani meki konstrukcioni čelik S355 je korišćen kao podloga. Kako bi se omogućila ponovljivost i stabilni uslovi zavariivanja, podloge su polirane i nakon toga očišćene etanolom. Kao dodatni materijal je korišćena žica ER120S-G prečnika 1.2 mm, u skladu sa AWS A5.28 standardom. Ovaj materijal predstavlja niskolegirani čelik povišene čvrstoće koji se često koristi za velika vozila, dizalice i posude pod pritiskom.

Hemijski sastav žice je dat u Tabeli 1.



In the experiments, a shielding gas mixture with 20 % CO₂ and 80% Ar (M21) was used.

Za potrebe eksperimenta je korišćena gasna mešavina iz grupe M21 sa 20% CO₂ i 80% Ar.

Table 1. Chemical composition of the welding wire ER120S-G (producer data sheet)

Tabela 1. Hemijski sastav žice za zavarivanje ER120S-G (podaci proizvođača)

Alloying Element Legirajući element	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Fe
% Wt. Težinski %	0.09	1.82	0.89	2.03	0.25	0.64	Balans Ostatak

2.2 Experimental Setup

Fig. 1 shows the experimental setup of CMT-WAAM system used in the experiments. The motion system is a 6-axis KUKA KR30 HA robot arm. The 'Fronius TPS400i' with CMT welding process is used as a welding power supply. The depositing speed and weld path were controlled by robot, while other parameters, such as voltage and current, were controlled with CMT power supply by selecting the wire feed speed. The CMT torch was fixed on the robotic arm and hold vertical to the substrate during the deposition.

2.2 Eksperimentalna postavka

Na slici 1 je prikazana eksperimentalna postavka CMT-WAAM sistema koji je korišćen u ovom istraživanju. Sistem za kretanje je KUKA KR30 HA robotska ruka. Izvor struje za zavarivanje je Fronius TPS400i, sa CMT tehnologijom. Brzina deponovanja i putanja zavarivanja su robotski kontrolisani, dok su ostali parametri, poput napona i jačine struje kontrolisani od strane CMT izvora struje, izborom brzine dovođenja žice. CMT plamenik je fiksiran na robotsku ruku i postavljen vertikalno u odnosu na podlogu tokom deponovanja.

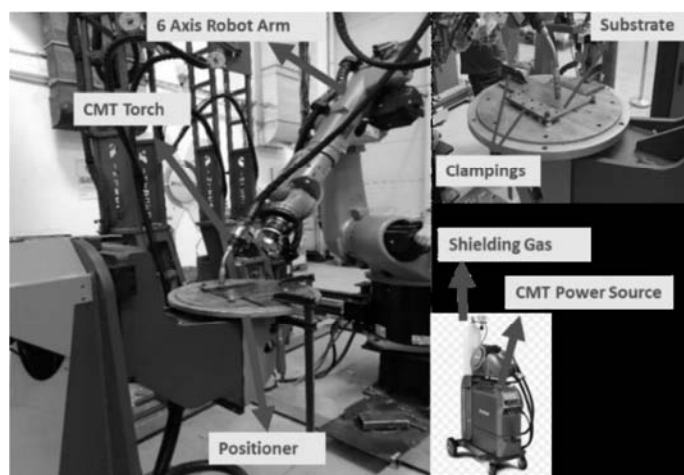


Figure 1. Experimental setup of the CMT-WAAM System
Slika 1. Eksperimentalna postavka CTM-WAAM sistema

2.3 Weld Bead Deposition

In the first stage of the experiments, single weld beads were deposited to investigate the influences of process parameters on bead dimensions. In all experiments, shielding gas type, mixture, gas flow rate, wire diameter, contact tip to work distance (CTWD) were constant parameters as listed in Tab 2.

2.3 Deponovanje dodatnog metala pri zavarivanju

Tokom prve faze eksperimenta, pojedinačni slojevi su deponovani kako bi se ispitaio uticaj procesnih parametara na dimenzije zavarenog spoja. Tokom svih eksperimenata su korišćeni isti parametri – vrsta zaštitnog gasa, protok gasa, prečnik žice, rastojanje od kontaktnog vrha do radnog komada (CTWD) – koji su prikazani u Tabeli 2.

Table 2. Constant process parameters

Tabela 2. Konstantni parametri procesa

Shielding Gas Zaštitni gas	Gas Flow Rate Protok gasa (l/min)	Wire Diameter Prečnik žice (mm)	CTWD (mm)
Ar/CO ₂ (20%)	15	1.2	13



The WFS and WFS/TS were selected as variable process parameters.

During the experiments WFS/TS was held constant to ensure the good weld bead quality by avoiding irregular combinations of welding parameters.

For example, high TS with low WFS leads to humping effect. The average current varies linearly with the WFS, so that heat input equation (1) includes WFS/TS ratio and constant WFS/TS also provide to hold heat input (HI) constant.

$$HI \left(\frac{J}{mm} \right) = \frac{Voltage(V) \times Current(A)}{TS \left(\frac{m}{min} \right)} \times \eta \times 0,06 \quad (1)$$

Where voltage and current are the average values were read from the welding power supply measurements.

TS is the travel speed of welding torch. η is the efficiency of CMT welding process and set as 0.9 throughout this work. 0,06 value is used with unit conversion purpose.

Constant WFS/TS also provide to hold deposited material per unit length constant. Deposited material volume (DMV) per unit length equation (2) shows this relationship.

$$DMV \left(\frac{mm^3}{mm} \right) = \frac{A(mm^2) \times WFS \left(\frac{mm}{sec} \right)}{TS \left(\frac{mm}{sec} \right)} \quad (2)$$

Where A is the cross-sectional area of wire. Three different WFS/TS ratios which define low, medium and high heat input and six different WFS value were set in the experiment as listed in Tab 3.

Brzina dovođenja žice (WFS) i WFS/TS, gde je TS je brzina zavarivanja, su definisani kao promenljivi parametri procesa.

Tokom eksperimenata, WFS/TS je održavan konstantnim, kako bi se obezbedio dobar kvalitet zavarenog spoja izbegavanjem nepravilnih kombinacija parametara zavarivanja.

Primeru radi, visok TS i nizak WFS će za posledicu imatu efekat pogrbljenja. Srednja vrednost struje se menja linearno sa WFS, tako da u jednačinu (1) za unos toplote ulazi i WFS/TS odnos, pri čemu konstantna vrednost ovog odnosa takođe održava jačinu struje konstantnom.

$$HI \left(\frac{J}{mm} \right) = \frac{Voltage(V) \times Current(A)}{TS \left(\frac{m}{min} \right)} \times \eta \times 0,06 \quad (1)$$

Pri čemu su napon i struja prosečne vrednosti očitane sa izvora struje za zavarivanje. Koeficijent η predstavlja efikasnost CMT postupka zavarivanja i usvojen je kao 0.9 u ovom radu.

Vrednost 0.06 je vezana za konverziju jedinica za dužinu i vreme.

Konstantan odnos WFS/TS takođe obezbeđuje održavanje količine deponovanog materijala po jedinici dužine konstantnim. Zapremina deponovanog materijala (DMV) po jedinici dužine je prikazan u odnosu na WFS/TS jednačinom (2):

$$DMV \left(\frac{mm^3}{mm} \right) = \frac{A(mm^2) \times WFS \left(\frac{mm}{sec} \right)}{TS \left(\frac{mm}{sec} \right)} \quad (2)$$

Gde je A površina poprečnog preseka žice. Tri različita odnosa su definisana u tabeli ispod, za nizak, srednji i visok unos toplote, pri čemu je takođe definisano 6 različitih vrednosti brzine dovođenja žice za potrebe eksperimenta.

Table 3. Variable process parameters

Tabela 3. Promenljivi parametri procesa

Heat Input Group Grupa prema unosu toplote	WFS/TS	WFS (m/min)
1	10	5-6-7-8-9-10
2	15	
3	20	

With the parameters in Tab 3, eighteen 200 mm long weld bead on plates as shown in Fig. 2 were deposited next to each other parallel to the welding direction, and the distance between the deposit centerlines was kept at 15 and 30 mm. An interpass temperature of approximately 50 °C was maintained.

Primenom parametara datih u tabeli 3 je navareno 18 prolaza na ploču dužine 200 mm, kao što je pokazano na slici 2, koji su međusobno paralelni, sa rastojanjem između njihovih osa od 15 do 30 mm. Međuprolazna temperatura u ovom slučaju je održavana na 50°C.

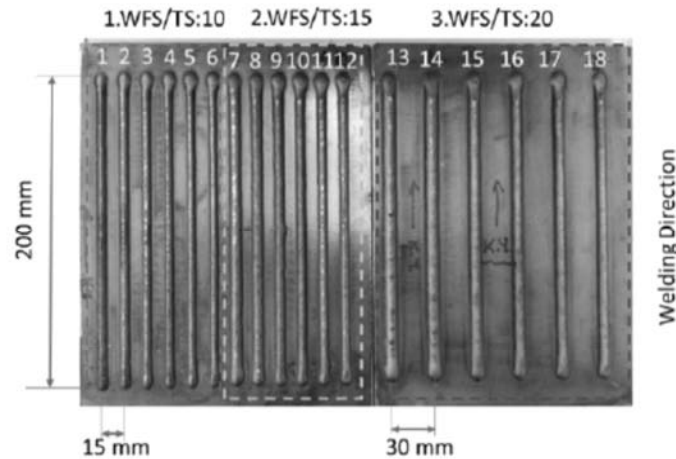


Figure 2. Weld beads on plate
Slika 2. Navari na ploči

The plates were sectioned from the middle. The sectioned surfaces were polished and etched as shown in Fig. 3a. The bead dimensions such as weld width, height, penetration, penetration area and reinforcement area were measured under Nikon SMZ745T stereo microscope as shown in Fig. 3b.

Ploče su presečene po sredini. Presečene površine su polirane i nagrižene kao što je prikazane na slici 3a. Dimenzija navara, uključujući širinu, visinu, uvarivanje, uvarenu površinu i oblast nadvišenja su izmerene uz pomoć SMZ745T stereo mikroskopa, i prikazane su na slici 3b.

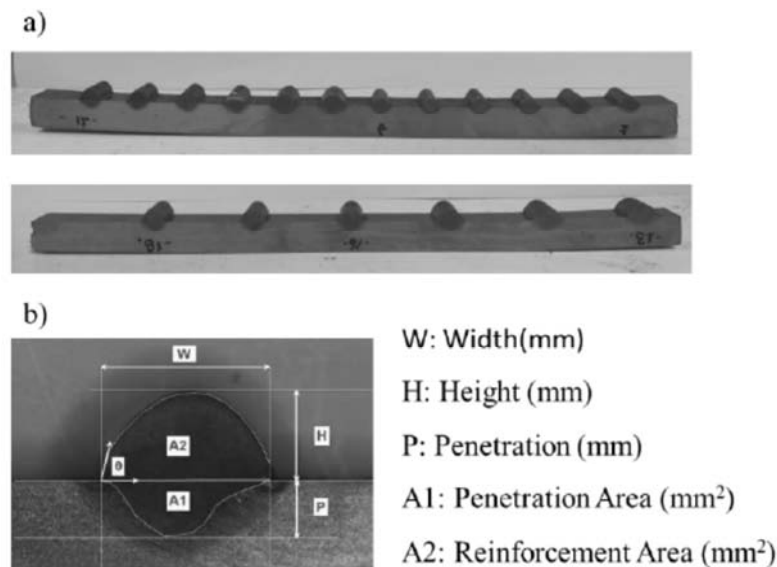


Figure 3. Sectioned and etched weld beads (a), macro photography of one weld bead (b)
Slika 3. Presečeni i nagriženi navari (a), makrofraktografija jednog navara (b)

2.4 Multilayer Wall Geometry Deposition

In the second stage of the experiments, 250 mm length in x direction wall geometries were deposited. Two of the walls were 130 mm height single bead walls with deposition strategy as shown in Fig. 4a. The bidirectional deposition strategy for all depositions were applied not to have buildup at the start of path and a decreased of material at the end [15]. The single bead walls were built with the parameter of weld bead two which is in low heat input group as listed in Tab 4, while the second wall

2.4 Višeslojno deponovanje

U drugoj fazi eksperimenta, deponovano je 250 mm vara u x - pravcu. Dva sloja su bili visoki 130 mm sa strategijom izrade prikazanom na slici 4a. Strategije izrade u dva pravca za sva deponovanje su urađene tako da nema gomilanja materijala na početku putanje i smanjenu količinu materijala na kraju [15]. Pojedinačni navari su izrađeni sa parametrima koji odgovaraju grupi niskih unosa toplote, kao što je prikazano u tabeli 4, dok je u



were built with higher heat input by using the parameter of weld bead number eighteen.

slučaju drugog visok unos toplote, sa 18 navarenih slojeva.

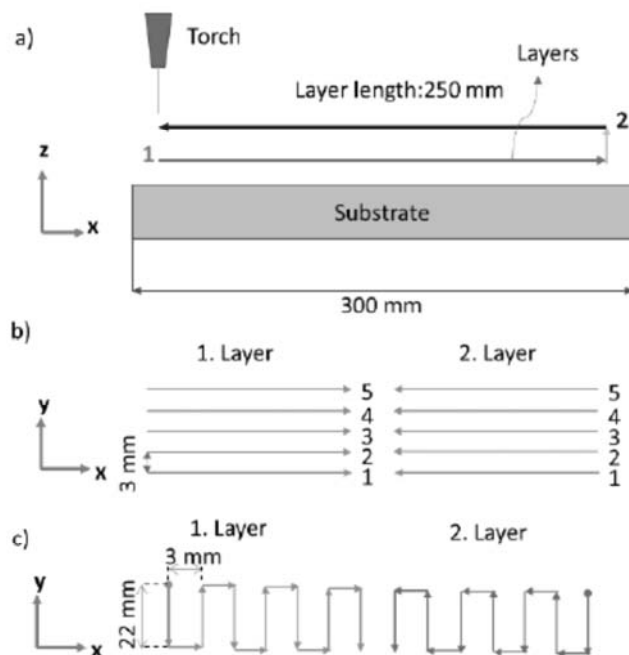


Figure 4. Deposition strategies a) single bead b) multiple bead parallel c) multiple bead oscillation
Slika 4. Strategija izrade: a) jedan navar b) više paralelnih navara c) višestruko oscilujućí navar

The other two walls were deposited with adjacent multiple beads, with parallel and oscillation building strategies and weld bead two parameters as shown in Fig. 4b and 4c respectively. The step over distance between the adjacent beads was selected as 3 mm during the deposition. Tab. 4 shows the process parameters which were used during the deposition of the wall samples. After each layer a delay time (Tab. 4) was waited for not to have a flow and collapse of the wall. The average current and voltage values were measured and collected by welding power supply.

Preostale dve probe su navarene deponovanjem uz primenu višestrukih susednih navara, sa paralelnim i oscilujućim strategijama izrade i dva parametra, slika 4b i 4c, respektivno. Preklapanje susednih navara je iznosilo 3 mm tokom deponovanja. Tabela 4 prikazuje parametre procesa koji su korišćeni tokom izrade ovih uzoraka. Nakon svakog sloja se čekalo određen vremenski period (tab. 4), kako bi se izbeglo urušavanje vara. Prosečne vrednosti struje i napona su izmerene i zabeležene pomoću izvora struje.

Table 4. Wall Deposition Process Parameters
Tabela 4. Parametri procesa deponovanja navara

Sample Uzorak	WFS/TS	WFS (m/min)	I (A)	U (v)	Delay Time Pauza (min)
Single Bead Low Heat (SBLH) Pojedinaćni navar, niska toplota (SBLH)	10	6	195	17,4	1
Single Bead High Heat Pojedinaćni navar, visoka toplota (SBVH)	20	10	293	15,9	1
Multiple Bead Paralel (MBP) Višestruki navar, Paralelni (MBP)	10	6	211	17,0	5
Multiple Bead Oscillation Višestruki navar, Oscilujućí (MBO)	10	6	215	16,8	5

The deposited single bead low heat (SBLH), single bead high heat (SBHH), multiple bead parallel

Pojedinaćni navar sa niskim unosom toplote, pojedinaćni navar sa visokim unosom toplote,



(MBP) and multiple bead oscillation (MBO) walls are shown in Fig. 5. Single bead low (Fig. 5a) and high heat input (Fig. 5b) walls were deposited as 70 and 62 layers respectively. Multiple bead parallel and oscillation walls were deposited as 22 layers and 9 layers respectively.

višestruki paralelni navar i višestruki oscilujuć navar (MBO) su prikazani na slici 5. Pojedinačni navari sa niskim i visokim unosom toplote, slike 5a i 5b su deponovani u 70 i 62 sloja, respektivno. MBP i MBO su deponovani u 22 i 9 slojeva, respektivno.

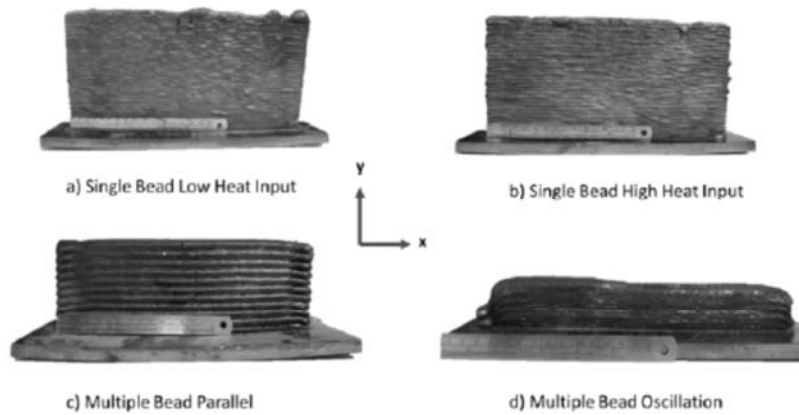


Figure 5. Deposited wall geometries
Slika 5. Geometrije deponovanih slojeva

2.5 Mechanical Property Analysis

Horizontal and vertical oriented tensile test specimens were extracted from two single bead walls as shown in Fig. 6a. The specimen dimensions were defined according to ASTM E8/E8M standards as shown in Fig. 6b. The tensile tests were performed with Zwick Z250 testing machine according to EN ISO 6892-1.

2.5 Analiza mehaničkih osobina

Horizontalno i vertikalno orijentisane epruvete za zatezanje su isečene iz dva pojedinačna navara kao što se može videti na slici 6a. Dimenzije epruveta su definisane u skladu sa ASTM E8/E8M standardima, slika 6b. Ispitivanja na zatezanje su izvedena na Zwick Z250 kidalici, u skladu sa standardom ISO 6892-1.

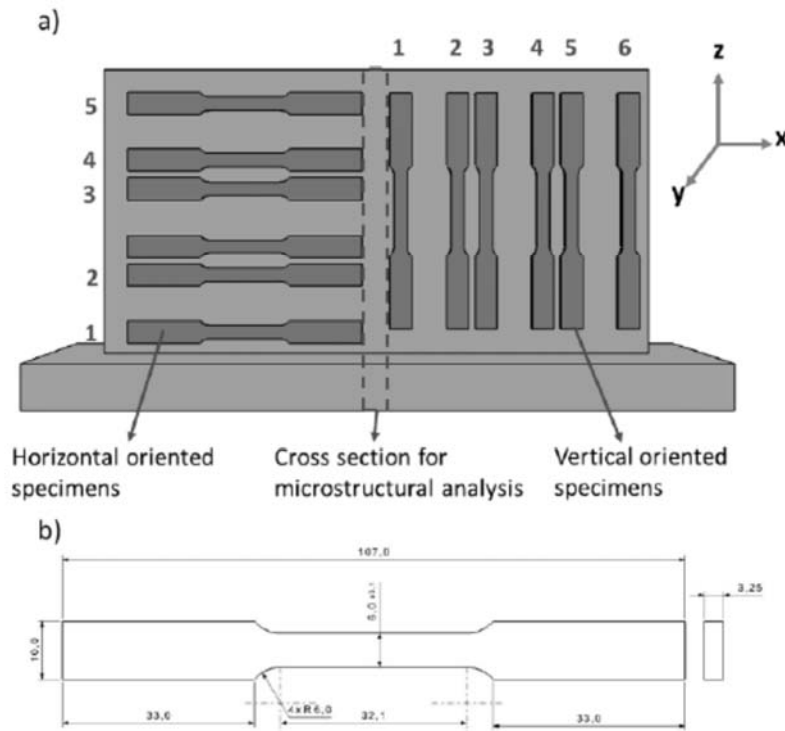


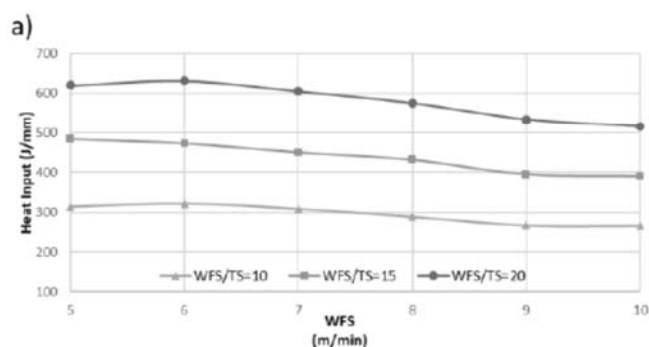
Figure 6. Specimen orientation on walls (a), tensile specimen size in mm (b)
Slika 6. Orientacija epruveta (a), epruveta za zatezanje, dimenzije u mm (b)



3. Results and discussion

3.1 Weld Bead Deposition

Heat input decreases with WFS slightly at constant WFS/TS as shown in Fig. 7a. It proves that the heat input can be controlled with a constant WFS/TS. Additionally, with an increasing WFS/TS ratio, the heat input shifts to another heat input group, when WFS is held constant. Bead width variation is similar to heat input as shown in Fig. 7b. It shows that heat input has a great effect on bead width.



3. Rezultati i diskusija

3.1 Deponovanje Navara

Unos toplote se blago smanjuje zajedno sa WFS pri konstantnom odnosu WFS/TS, što je prikazano na slici 7a. Ovo dokazuje da se unos toplote može kontrolisati uz konstantan odnos WFS/TS. Pored toga, sa povećanjem ovog odnosa, unos toplote prelazi u drugu grupu, u slučaju gde je WFS konstantna. Varijacija širine navara je slična kao i kod unosa toplote, slika 7b. Iz ovoga se može videti da unos toplote ima značajan uticaj na širinu navara.

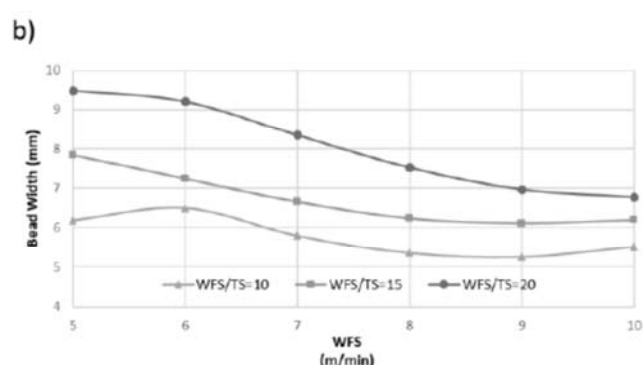


Figure 7. a) Heat input during bead deposition b) Bead widths
Slika 7. a) Unos toplote tokom deponovanja navara, b) širine navara

Fig. 8a shows that bead height increases with WFS/TS, but it does not change significantly with WFS at constant WFS/TS. Total weld area variation is also very similar with heat input variation (Fig. 7a) as shown in Fig. 8b. It proves that bead cross section area can be controlled with heat input.

Na slici 8a je prikazano povećanje visine navara sa povećanjem WFS/TS odnosa, ali se ona ne menja u značajnoj meri u odnosu na WFS pri konstantnom odnosu WFS/TS. Varijacija ukupne površine navara je takođe veoma slična varijaciji unosa toplote (slika 7a), kao što je prikazano na slici 8b. Ovo potvrđuje da se površina preseka može kontrolisati preko unosa toplote.

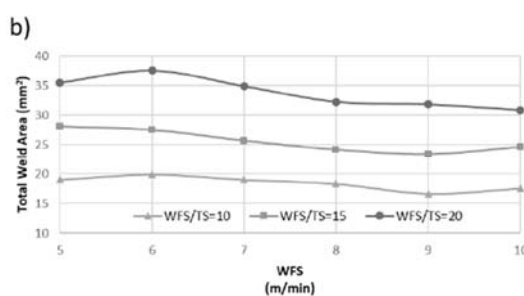
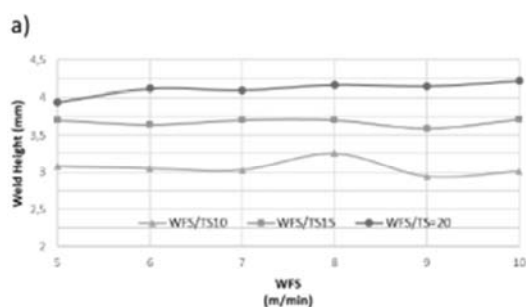


Figure 8. a) Bead height b) Total weld area
Slika 8. a) Visina navara b) Ukupna površina navara

3.2 Tensile Tests

Tensile test results obtained from horizontal samples are shown in Fig. 9. The strength values decrease from bottom to the middle section specimens, due to the heat accumulation and decreasing cooling rate. Single bead low heat wall horizontal (LHH) samples have higher strength values compared to high heat input wall horizontal (HHH) samples, due to different heat input and cooling rates between the walls. Both tensile and

3.2 Ispitivanje zatezanjem

Rezultati ispitivanja zateznih osobina na horizontalnim uzorcima su prikazani na slici 9. Vrednosti za čvrstoću opadaju od dna ka sredini oblasti gde su uzorci uzorkovani, i to zbog akumulacije toplote i snižavanja brzine hlađenja. Jednoprolazni horizontalni navari sa niskim unosom toplote (LHH) imaju više vrednosti čvrstoće u poređenju sa horizontalnim uzorcima sa visokim



yield strength of the specimens which are extracted from the same locations show a similar yield strength of the specimens which are extracted from the same locations show a similar trend between the walls. The reason can be attributed that both walls are built with same building strategy.

unosom toplote (HHH), zbog različitih unosa toplote i brzina hlađenja. Zatezna čvrstoća i granica tečenja uzoraka sa uzorkovanih sa istih mesta iz oblasti uzorkovanja pokazuju sličnu tendenciju. Razlog takvog ponašanja može biti istovetan način izrade.

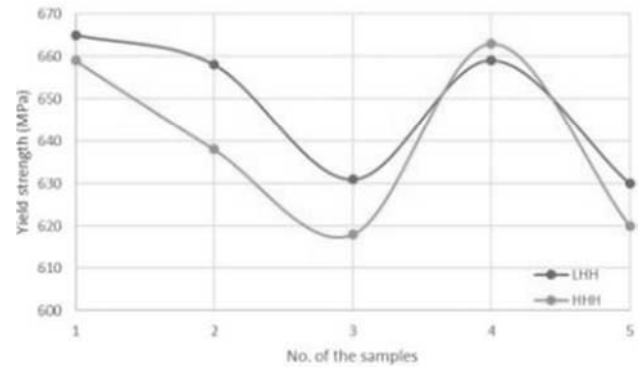
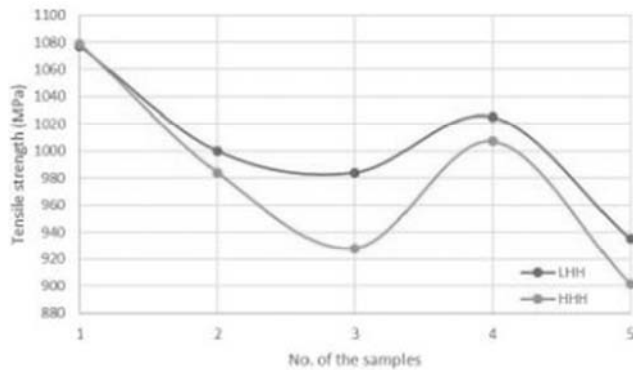


Figure 9. Horizontal specimens tensile and yield strength
Slika 9. Zatezna čvrstoća i granica tečenja horizontalni uzoraka

The vertical oriented specimen strength values shown in Fig. 10 exhibit a different trend than horizontal specimens, due to the anisotropy. More heat input and lower cooling rates also lead to decrease the strength like horizontal specimens. The trends of low and high heat input wall sample tensile and yield strength curves are also similar as in horizontal samples.

Vrednosti dobijene za vertikalne epruvete koje su prikazane na slici 10 su pokazale drugačiji trend u odnosu na horizontalne, usled anizotropije. Veći unos toplote i kraće vreme hlađenja su takođe doveli do smanjene čvrstoće kao i kod horizontalnih epruveta. Ponašanje zateznih osobina kod niskog i visokog unosa toplote kod horizontalnih epruveta u pogledu krivi zatezanja je takođe bilo slično.

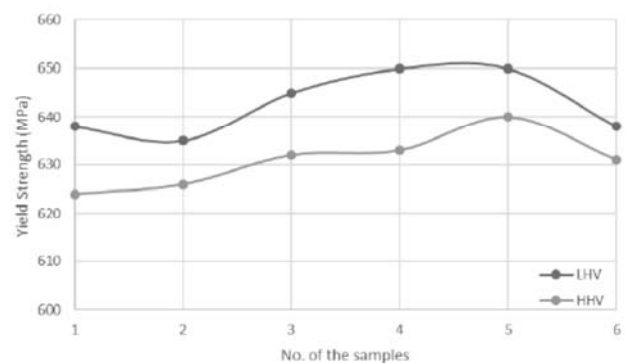
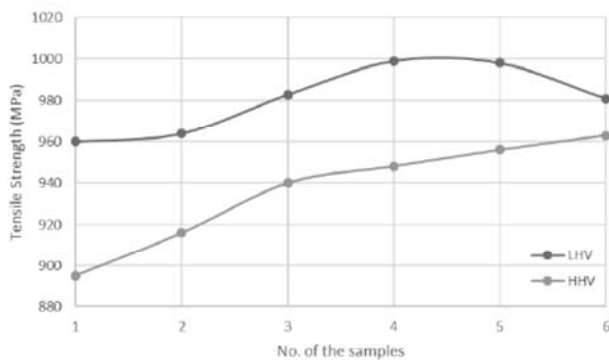


Figure 10. Vertical specimens tensile and yield strength
Slika 10. Granica tečenja i zatezna čvrstoća vertikalnih epruveta

The average tensile strength values (975 MPa) of the vertical and horizontal oriented specimens from low (LHH, LHV) and high heat input (HHH, HHV) walls were compared with S690Q structural high strength and G24Mn6+QT2 casting steel as shown in Fig. 11. It can be seen that, tensile and yield strength of G24Mn6 were reached without any heat treatment. S690Q structural steel yield strength could not be reached, but very close to it with 640 MPa, on the other hand tensile strength are highly compared to it. Average strength of horizontal specimens is greater than vertical ones, since the grain boundaries in z direction strengthens the part.

Prosečna vrednost zatezne čvrstoće (975 MPa) vertikalno i horizontalno orijentisanih epruveta sa niskim (LHH i LHV) i visokim unosom toplote (HHH, HHV) su upoređene sa konstrukcionim čelikom povišene čvrstoće S690Q i livenim čelikom G24Mn6+QT2, slika 11. Može se videti da su granica tečenja i zatezna čvrstoća čelika G24Mn6+QT2 dostignute bez potrebe za termičkom obradom. Što se čelika S690Q tiče, njegove mehaničke osobine nisu dostignute, ali su bile veoma bliske, sa granicom od 640 MPa, dok je sa druge strane zatezna čvrstoća bila nešto viša. Prosečna čvrstoća horizontalnih epruveta je veća u



The standard deviations of horizontal specimens have more than the vertical ones, since the anisotropy in z direction is more than in x direction.

poređenju sa vertikalnim, s obzirom da granice zrna u z-pravcu ojačavaju taj deo. Standardna devijacija horizontalnih epruveta je bila izraženija nego kod vertikalnih, usled anizotropije, za razliku od x-pravca.

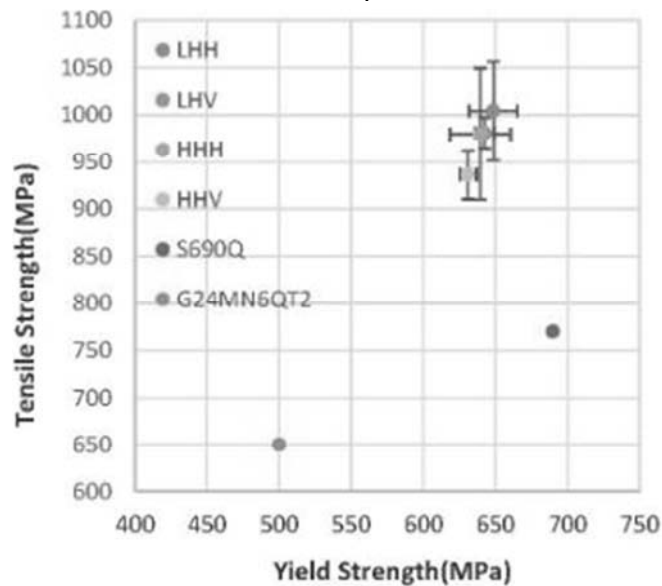


Figure 11. Average strength of the specimens and reference materials
Slika 11. Prosečna čvrstoća epruveta u poređenju sa referentnim materijalima

The minimum average elongation obtained from the specimens is 14 %, as shown in Fig. 12, so that S690Q elongation requirement is fulfilled. This value is also so close to G4Mn6 elongation requirement. Low heat input wall has better elongation results in both specimen orientations compared to high heat input.

Minimalno srednje izduženje je dobijeno za epruvete iznosi 14%, kao što se vidi na slici 12, što znači da su dostignute vrednosti kao kod materijala S690Q. Ova vrednost je takođe bliska izduženju kod G24Mn6+QT2 čelika. Niski unos toplote je dao bolje rezultate u pogledu izduženja, za obe orijentacije epruveta u poređenju sa visokim unosom toplote.

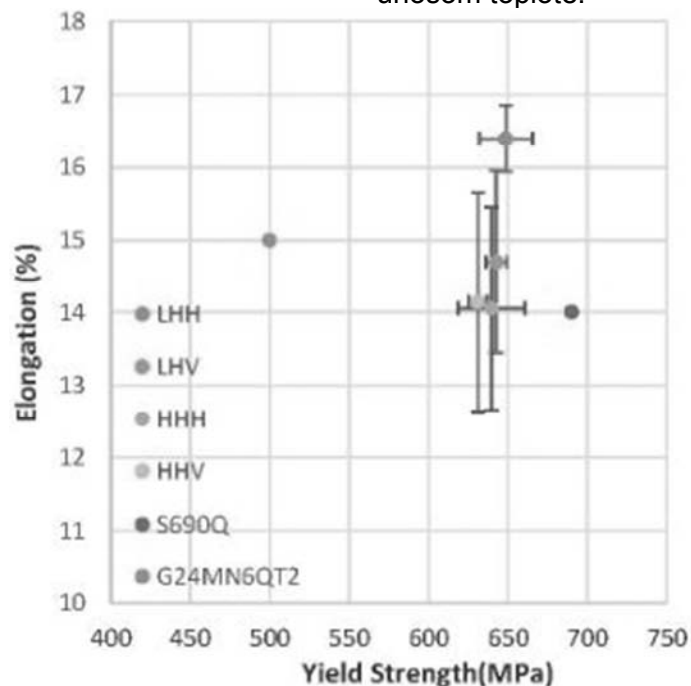


Figure 12. Elongation of the specimens and reference materials
Slika 12. Izduženje epruveta i referentnih materijala



4. Conclusions

High strength low alloy steel parts were fabricated by CMT robotic WAAM system with different process parameters and building strategies. Effects to mechanical properties were investigated. Additionally, mechanical performance was compared with high strength wrought and casting steels. The following conclusions can be drawn:

Single Beads:

- Single weld beads showed a good quality with WFS (5-10 m/min) and WFS/TS (10-15-20) process parameters.
- WFS/TS is the major parameter to control the heat input.
- Heat input correlates well with the weld width and cross-sectional area.
- Bead width, height, penetration and cross-sectional area increase with an increasing WFS/TS.

Multiple Bead Walls:

- Yield and tensile strength of horizontal specimens extracted from SBL and SBH walls had higher value than vertical ones.
- SBL wall specimens had higher average tensile and yield strength values than SBH walls.
- Mechanical properties of parts produced with high strength steel wire can be compared to G24Mn6+QT2 casting steel, except slight elongation difference. Tensile strength and elongation were fulfilled for S690Q and yield strength is very close to the reference value.

Acknowledgements

This work is supported by Turkish Presidency of Defense Industries and FNSS Savunma Sistemleri A.Ş.

References

- [1] "Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies," F2792-12a, ASTM, 2015.
- [2] S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal and P. Colegrove, "Wire + Arc Additive Manufacturing," Materials Science and Technology, 2016.
- [3] S. Ríos, P. A. Colegrove, F. Martina and S. W. Williams, "Analytical process model for wire + arc additive manufacturing," Additive Manufacturing, 2018.

4. Zaključci

Delovi od niskolegiriranog čelika povišene čvrstoće su proizvedeni primenom robotizovane CMT WAAM metode sa različitim parametrima procesa i strategijama izrade. Ispitani su uticaji na njihove mehaničke osobine. Uz to, njihovo ponašanje je upoređeno sa kovanim i livenim čelicima povišene čvrstoće. Na osnovu toga su izvučeni sledeći zaključci:

Za pojedinačne navare

- Pojedinačni navari su pokazali dobar kvalitet za procesne parametre WFS u rasponu 5-10 m/min i WFS/TS od 10-15-20.
- WFS/TS je parametar koji u najvećoj meri kontroliše unos toplote.
- Unos toplote je pokazao dobru korelaciju sa širinom navara i površinom poprečnog preseka.
- Širina navara, visina, uvarivanje i površina poprečnog preseka rastu sa povećanjem odnosa WFS/TS

Višestruki navari:

- Granica tečenja i zatezna čvrstoća horizontalnih epruveta izvađenih iz SBL i SBH zidova su bile veće u odnosu na vertikalne epruvete.
- SBL epruvete su imale veće srednje vrednosti zatezne čvrstoće i granice tečenja u poređenju sa SBH epruvetama.
- Mehaničke osobine delova izrađenih sa žicom od čelika povišene čvrstoće se mogu uporediti sa livenim čelikom G24Mn6+QT2, uz izuzetak nešto drugačijeg izduženja. Zatezna čvrstoća i izduženje su dostigli vrednosti koje odgovaraju čeliku S690Q, dok je granica tečenja imala blisku, ali nešto nižu vrednost.

Zahvalnost

Ova istraživanja su podržana od strane Turkish Presidency of Defense Industries i FNSS Savunma Sistemleri A.Ş.

- [4] X. Xu, J. Ding, S. Ganguly, C. Diao and S. Williams, "Preliminary Investigation of Building Strategies of Maraging Steel Bulk Material Using Wire + Arc Additive Manufacture," Journal of Materials Engineering and Performance, pp. 1-7, 17 7 2018.
- [5] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri and H. Li, Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests, 2015.
- [6] B. Baufeld, "Effect of deposition parameters on mechanical properties of shaped metal deposition parts," in Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2012.



- [7] F. Wang, S. Williams, P. Colegrove and A. A. Antonysamy, "Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti6Al-4V," Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 2013.
- [8] B. Baufeld, "Mechanical properties of INCONEL 718 parts manufactured by shaped metal deposition (SMD)," Journal of Materials Engineering and Performance, 2012.
- [9] K. S. Derekar, A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium, 2018.
- [10] D. Ding, Z. Pan, S. van Duin, H. Li and C. Shen, "Fabricating superior NiAl bronze components through wire arc additive manufacturing," Materials, 2016.
- [11] P. A. Colegrove, H. E. Coules, J. Fairman, F. Martina, T. Kashoob, H. Mamash and L. D. Cozzolino, "Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling," Journal of Materials Processing Technology, 2013.
- [12] T. Skiba, B. Baufeld and O. v. d. Biest, "Microstructure and Mechanical Properties of Stainless Steel Component Manufactured by Shaped Metal Deposition," ISIJ International, vol. 49, no. 10, pp. 1588-1591, 2009.
- [13] O. Yilmaz and A. A. Ugla, "Microstructure characterization of SS308LSi components manufactured by GTAW-based additive manufacturing: shaped metal deposition using pulsed current arc," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017.
- [14] "Specification for Low-Alloy Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding," 2003.
- [15] Y. M. Zhang, Y. Chen, P. Li and A. T. Male, "Weld deposition-based rapid prototyping: A preliminary study," Journal of Materials Processing Technology, vol. 135, no. 2-3 SPEC., pp. 347-357, 2003.



Prikaz knjige „Koncentracija napona i zamor materijala” na strani 124



Sanjay Kumar Gupta ^a, Avinash Ravi Raja ^b, Adarsh Kumar ^c, Meghanshu Vashista ^d, Mohd Zaheer Khan Yusufzai ^e

Improving GMAW weld metal and HAZ properties through friction stir processing

Poboljšanje osobina metala šava i ZUT kod zavarivanja MAG postupkom primenom zavarivanja trenjem sa alatom

Stručni rad / Professional paper

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

Rad primljen / Paper received:

Septembar 2020.

Prevod izvornog rada na srpski jezik: Z. Odanović

Key words: Friction stir Processing, Microstructure, GMAW

Adresa autora / Author's address:

^aasanjaykg.rs.mec16@iitbhu.ac.in,

^bbarraja.rs.mec12@iitbhu.ac.in,

^cadarshkumar.rs.mec17@iitbhu.ac.in,

^ddmvashista.mec@iitbhu.ac.in,

^eemzkhan.mec@iitbhu.ac.in

Ključne reči: FSW, mikrostruktura, MAG

Abstract

Steel is one of the most widely used engineering materials and it is popularly welded in fabrication industries using Gas metal arc welding (GMAW) process. The microstructure obtained in the heat affected zone is often characterized with large grain size. Depending on the GMAW process parameters, the weld metal may consist of Allotrimorphic ferrite if the heat input is high. Therefore, the weld metal and the heat affected zone may have poor weld metal toughness. Efforts have been made to modify the microstructure of the weld metal by performing friction stir processing. Initially bead on plate welding was performed on mild steel plate using GMAW process using standard 1.2 mm consumable wire and CO₂ as the shielding gas. The top surface of the weld was processed using a tungsten carbide tool. The weld reinforcement was removed using milling process and the area to be processed was made smooth before performing FSP. The plate was secured in an FSW machine and friction stir processing was carried out with a FSW tool having pin length of 2 mm. The GMAW weld and the weld that has been subsequently modified using FSP were characterized using standard techniques. The microstructure of the top face showed an improvement from Widmanstätten to fine equiaxed structure after being friction stir processed. The microstructure in the HAZ also got refined. It is expected that this structure would improve the mechanical properties of the weld particularly on the surface.

1. Introduction

Most of the welding of steel in industries is carried out by fusion welding processes like shielded metal arc welding (SMAW), GMAW and submerged arc welding (SAW) process. The microstructure of weld

Rezime

Čelik je jedan od najčešće korišćenih inženjerskih materijala i u industriji se često spaja postupkom zavarivanja topljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog gasa (MAG). Mikrostruktura dobijena u zoni pod uticajem toplote najčešće se odlikuje krupnim zrnom. U zavisnosti od MAG procesnih parametara i ako je visoka unešena toplota, metal šava se može sastojati od alotrimorfnog ferita. Zbog toga, metal šava i zona pod uticajem toplote mogu imati nisku žilavost. U ovom radu je prikazan pokušaj da se izvrši modifikacija mikrostrukture metala šava dodatnom obradom primenom zavarivanja trenjem sa alatom FSW. Prvo je izvršeno navarivanje na čeličnu ploču od niskougljeničnog čelika primenom MAG postupka, koristeći standardnu potrošnu elektrodu prečnika od 1,2 mm i u CO₂ zaštitnom gasu. Lice šava obrađeno je pomoću alata od volframovog karbida. Nadvišenje šava uklonjeno je procesom glodanja i površina koju je trebalo obraditi učinjena je glatkom pre izvođenja procesa FSW. Ploča je bila pričvršćena u FSW mašini i obrada trenja alatom je izvedena pomoću alata dužine 2 mm. Karakteristike MAG zavarenog spoja i spoj koji je naknadno modifikovan upotrebom FSW ispitane su standardnim tehnikama. Mikrostruktura lica šava nakon obrade trenjem pokazala je poboljšanje, od Widmanstätten-a do fine usmerene strukture. Mikrostruktura u ZUT-u je takođe usitnjena. Za očekivati je da će nastale strukture posebno poboljšati mehanička svojstva u površinskim slojevima zavarenog spoja.

1. Uvod

Većina zavarivanja čelika u industriji se izvede postupcima elektrolučnog zavarivanja topljenjem poput zavarivanje u zaštiti gasova i pod prahom. Mikrostruktura metala šava niskougljeničnog čelika (proizveden procesom zavarivanja topljenjem)



metal in mild steel (produced by fusion welding processes) mostly consists of allotrimorphic ferrite and Widmanstätten side plates or columnar type ferrite. Although this type of structure shows good tensile and the weld metal consisting of this type of structure lacks toughness [A]. Gas metal arc welding (GMAW) is a popular welding process that is widely used in fabrication industries for joining steel parts. The GMAW process is versatile and can be used to deposit weld metal at an appropriately fast rate. The microstructure obtained in GMAW is often not very favorable and may consist of coarse grain allotrimorphic ferrite and Widmanstätten ferrite [1]. Furthermore, the microstructure is difficult to control and may get largely affected by the atmospheric conditions and process parameters [2]. Friction stir welding being a solid state welding process and is known to impart fine grain structure [3]. The mechanical properties of friction stir welded aluminum alloys have been extensively researched and most of the studies have reported superior mechanical properties of the welds [4]. A good understanding of the current state of research in the area of friction stir welding of aluminum alloys can be found in the study by Threadgill et al. [5]. Most of the initial works on friction stir welding was carried out on low temperature softening alloys like aluminum, magnesium etc., and work on FSW of ferrous alloy were taken up much later [6,7]. The studies on friction stir welding of ferrous alloys have been restricted to tensile properties, and microhardness [8-20]. Very few works, have been carried out on FSP of welded plates. Present work attempts to improve the microstructure of GMAW weld by FSP

2. Experimentation

The work material selected for experimentation was carbon steel plates of 6 mm thickness. The material of AISI grade 1028 was supplied by steel authority of (India) limited (SAIL). The average value of chemical composition of the work material was found by spark spectroscopic analysis and has been presented in Tab. 1 as weight percentages. Bead was made on plate by GMAW process by using copper coated mild steel electrode of 1.2 mm diameter. The current and voltage used was 120 A and 25 Volts respectively. Three runs were made side by side to produce a sufficiently wide weld metal region to carry out FSP. The weld bead was first made smooth on a horizontal shaping machine. This was essential as the tool for FSP can only process on a flat surface.

uglavnom se sastoji od alotrimorfnog ferita i Widmanstätten ferita ili pločastog ferita. Iako ova vrsta strukture pokazuje dobre zatezne osobine zavarenog spoja metala šava, prisutna je niža žilavost [1]. Elektrolučno zavarivanje u zaštitnom gasu (MAG) je popularan postupak zavarivanja koji je široko rasprostranjen u proizvodnoj industriji za spajanje čeličnih delova. MAG postupak je svestran i koristiti se jer se zavarivanje obavlja relativno velikom brzinom. Mikrostruktura dobijena MAG postupkom često nije vrlo povoljna, jer se može sastojati od grubog zrna alotrimorfnog ferita i Widmanstätten ferita [1]. Takođe, mikrostrukturu je teško kontrolisati i na nju mogu u velikoj meri uticati atmosferski uslovi i parametri procesa [2].

Zavarivanje trenjem sa alatom je proces zavarivanja u čvrstom stanju i poznato je da daje finu strukturu zrna [3]. Mehanička svojstva legure aluminijuma zavarivane trenjem sa alatom su predmet opsežnih istraživanja, a većina studija je pokazala superiornost mehanička svojstva zavarenih spojeva [4]. Trenutno stanje istraživanja u području zavarivanje trenjem sa alatom legura aluminijuma može se naći u studiji Threadgill i saradnika [5]. Većina početnih radova o zavarivanju trenjem sa alatom, odnose se na spajanje legura koje omekšavaju na niskim temperaturama poput aluminijuma, magnezijuma itd., a zavarivanje čelika postupkom FSW razvijeno je mnogo kasnije [6,7]. Studije o zavarivanju trenjem alatom za spajanje željeznih legura bila su ograničene na ispitivanja zateznih svojstva i mikrotvrdoće [8-20]. Vrlo malo radova prikazuje primenu tog procesa pri spajanju čeličnih ploča. Ovaj rad prikazuje pokušaj poboljšanja mikrostrukture zavarenog spoja čelika, prethodno zavarenog postupkom MAG i naknadno obrađen postupkom FSW.

2. Eksperiment

Za eksperimente su izabrane ploče od ugljeničnog čelika debljine 6 mm, kvaliteta AISI 1028 proizvođača (SAIL Indija). Hemijski sastav ispitivanog materijala određena je spektroskopskom analizom i prikazan je u Tabeli 1, kao procenti težine. Navari su izvedeni MAG postupkom upotrebom bakrom presvučena elektrodne žice od niskougljeničnog čelika prečnika 1,2 mm. Korišćena struja i napon su bili 120 A odnosno 25 V. Tri prolaza su napravljena jedan uz drugi da bi se dobio dovoljno širok metal vara za primenu postupka FSW. Metal navara je prvo zaravljen na horizontalnoj glodalici. Ovo je bilo od suštinske važnosti jer alat za FSW može da obrađuje samo ravne površine.



Table 1. Composition of the Base Plate
Tabela 1. Hemijski sastav osnovnog materijala - ploče

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Fe%	Others %
0.165	0.047	0.37	0.007	0.011	99.158	0.2420

The weld metal of GMAW thus prepared was friction stir processed on an NC controlled FSW machine using tungsten carbide tool. The tool material used for FSP was tungsten carbide with approximately 8% cobalt binder. Approximately 4% of other carbides like TiC and CrC were added in the tool material to improve its wear resistance. The details of tool geometry and process parameters have been given in Tab. 2. The tool pin position was positioned at the middle of the weld metal and FSP was carried out throughout the length of the weld in a straight line. The pin was inserted up to its length and shoulder was plunged by 0.5 mm. Once the material has been sufficiently plasticized, the tool was traversed along the direction of the weld. Metallographic sample was prepared using standard method. Microstructures of the top face of the samples were taken by using optical microscope. Micro hardness test was also carried out using Vickers hardness test using a load of 200 gms. Micro hardness was taken on the top face of the plate. Indentations were made keeping sufficient gaps between each indentation. The friction stir processed region and the weld metal (unprocessed by FSP) were indented and average of several readings were taken. The base material was also separately indented to know the value of the base material hardness.

Tako pripremljeni metal navara nanešen postupkom MAG, je zatim obrađen postupkom trenjem sa alatom na numerički kontrolisanom uređaju za FSW sa alatom od volframovog karbida sa približno 8% veziva kobalta. Približno 4% ostalih karbida poput TiC i CrC dodati su u materijal alata za poboljšanje otpornosti na habanje. Detalji o geometriji alata i parametrima procesa prikazani su u Tabeli 2. Položaj vrha alata bio je pozicioniran na sredini navarenog metala i FSW postupak izveden je u pravoj liniji celom dužinom vara. Vrh alata je uronjen celom dužinom i potoplen još za 0.5 mm. Kada je material dovoljno omekšao, alat je uzdužno vođen u pravcu zavarenog spoja.

Metalografski uzorci su pripremljeni primenom standardnih metoda. Mikrostrukture sa gornje površine uzoraka su analizirane optičkom mikroskopijom. Ispitivanje mikro tvrdoće vršeno je Vickers metodom primenom opterećenja od 200 grama, na gornjoj površini ispitivane ploče. Merenje mikrotvrdoće vršeno je vodeći računa da je razmak između pojedinih otisaka dovoljno veliki. Oblast zavarenog spoja koja je obrađena postupkom FSW i metal šava koji nije procesuiran sa FSW, su razdvojeni i srednja vrednost više merenja je usvajana. Osnovni material je takođe odvojeno ispitivan, kako bi se znale vrednosti tvrdoće za osnovni metal.

Table 2. Process Parameter & Tool Geometry used in FSW
Tabela 2. Procesni parametri i geometrija alata primenjeni u postupku FSW

Parameters- Parametri	Values in units – Vrednosti u jedinicama
Welding Speed - Brzina zavarivanja	150mm/min
Tool RPM – Broj obrtaja alata	800
Tool Tilt Angle – Ugao nagnjanja alata	1.5 °
Pin Length – Dužina alata	2.5 mm
Pin shape- Oblik vrha alata	Truncated cone – Zaravljani konus
Shoulder Diameter – Prečnik gornjeg dela alata	15 mm

3. Results

Defect free beads were obtained using GAW process. The bead on shaping revealed no porosity. FSP of plates produced good quality of processed regions Visual examination revealed no defects and fine ripples were seen on the top surface of the weld.

3. Rezultati

Navareni metal šava dobijen MAG postupkom je bio bez uočenih grešaka. Takođe nije uočeno prisustvo poroznosti. Postupak FSW primenjen na ispitivanim pločama, pokazao je dobar kvalitet u obalastime koje su procesuirane. Vizuelni pregled je pokazao da nisu uočene greške u metalu vara, a konstatovano je prisustvo finih talasa na gornjoj površini vara.



3.1 Microstructural examination

The macrographs of the GMA welded and plate after FSP is shown in Fig. 1(a). Micrographs were observed using optical microscope from different locations of the weldment. The microstructure of the GMAW weld was consisting of Widmanstätten ferrite and little acicular ferrite which is typical of weld nugget of a fusion weld (Fig. 2a). The microstructure of the plate obtained after GMAW and FSP is shown in figure 1. The micrographs of different regions namely the weld metal, heat affected zone, thermo mechanically affected zone and stirred zone are shown in above figure taken at 400 magnification. Fig. 1(a) shows that weld metal comprises of Widmanstätten ferrite, blocky ferrite and a small fraction of pearlite/bainite. Fig. 1(b) indicates presence of equiaxed and refined grains in heat affected zone of surrounding the processed region and affected by the heat of the FSP. The thromechanically affected zone (TMAZ) is shown in figure 1(c) and it consists of elongated grains. In contast to all the other regions, the processed zone consists of very fine equiaxed grains (figure 1(d)).

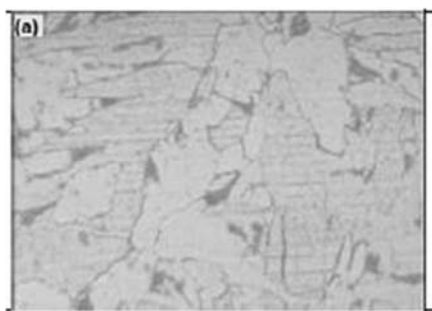


Figure 1.(a) Micrograph of the weld metal obtained after GMAW at 400x

Slika 1.(a) Mikrostruktura metala vara dobijenog MAG postupkom, uvećanje 400 puta

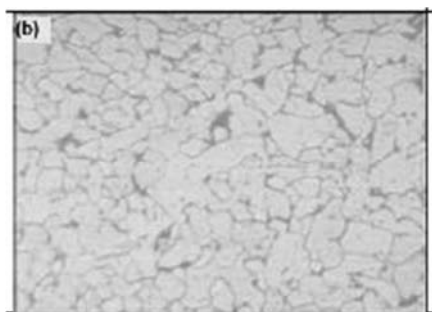


Figure 1.(c) Micrograph of the TMAZ adjacent to the processed region at 400x

Slika 1.(c) Mikrostruktura TMAZ oblasti uz procesuiranu oblast, uvećanje 400 puta

3.1 Mikrostrukturni pregled

Makrografije mikrostrukture metala vara nakon MAG procesa kao i ploče nakon obrade postupkom FSW su prikazane na slici 1. Mikrostrukture su posmatrane pomoću optičkog mikroskopa na različitim mestima zavarenog spoja. Mikrostruktura MAG metala vara se sastojao od Widmanstatten ferita i malo igličastog ferita što je tipično za metal šava dobijen topljenjem (slika 1a). Mikrostruktura spoja dobijena posle MAG navarivanja i obrade FSW procesom je prikazana na slici 1b). Mikrografije različitih područja, naime metala šava, zone uticaja toplote, termo mehanički obrađene zone i zone nastale mešanjem metala postupkom FSW, prikazane su pri uvećanju od 400 puta.

Slika 1(a) pokazuje da metal vara se sastoji od Widmanstatten-ovog ferita, ferita i malih udela perlita/beinita. Slika 1(b) ukazuje na prisustvo usmerenih i usitnjenih zrna u zoni uticaja toplote koji okružuje obrađenu oblast i rezultat je uticaja toplote procesa FSW. Termomehanički obrađena zona (TMAZ) prikazana je na slici 1(c) i sastoji se od izduženih zrna. Nasuprot svim ostalim oblastima, obrađena zona se sastoji se od vrlo finih usmerenih zrna, slika 1(d).

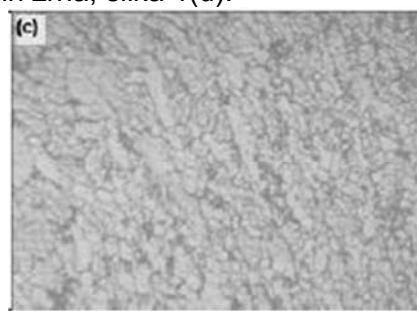


Figure 1.(b) Micrograph HAZ surrounding the processed region at 400x

Slika 1.(b) Mikrostruktura ZUTa koji okružuje procesuiranu oblast, uvećanje 400 puta



Figure 1.(d) Micrograph of the processed region at 400x

Slika 1.(d) Mikrostruktura procesuirane oblasti postupkom FSW, uvećanje 400 puta



3.2 Micro-hardness testing

The results of the micro-hardness measurement done in different regions on the top face of the weld have been presented Tab. 3. The microhardness testing revealed the typical hardness values of the weld metal which is more than the hardness of the base material (found to be around 180 HV). The average values of hardness in both the GMAW weld

metal and friction stir processed region are both higher than the base material hardness.

3.2 Ispitivanje mikro tvrdoće

Rezultati merenja mikrotvrdoće koje je izvedeno u različitim oblastima na gornjoj strani zavora su predstavljeni Tabeli 3. Ispitivanje mikrotvrdoća je pokazalo tipične vrednosti tvrdoće metal šava, koja je veća od tvrdoće osnovnog materijala i utvrđeno je da iznosi oko 180 HV. Srednje vrednosti tvrdoće u obe oblasti, MAG metal šava i područje obrađeno sa FSW, su veće od tvrdoće osnovnog materijala ploče.

Table 3. Microhardness analysis of weld metal and stir zone
Tabela 3. Mikrotvrdoća metla šava i oblasti obrađene postupkom FSW

Region Oblast	Micro-Hardness (HV) Mikrotvrdoća (HV)	Mean Srednja vrednost	Sample standard deviation s Standardna devijacija uzorka s	Population standard deviation σ Standardna devijacija populacije σ
Weld metal Metal šava	179, 202, 181, 213, 240	203	25.14	22.49
Processed zone Procesuirana oblast	198, 195, 193, 196, 197	195.33	2.52	2.05

From above table it can be easily visualized that the average hardness of weld metal is comparable to that of the friction stir processed region. There is a huge variation in the microhardness values at different locations of weld metal whereas the microhardness in the processed zone show almost similar values at different points due to a refined and equiaxed structure. The grains are plastically deformed at very high strain rate followed by dynamic recrystallization results into formation of equiaxed grains. The hardness of processed region is due to refinement of grains whereas hardness of weld metal is due to presence of different phases in which some phases are less hard like blocky ferrite and some phases are much hard like martensite.

4. Conclusions

The following important conclusions can be drawn from this experimental work.

1. Gas metal arc welded plate shows coarse grain Widmanstätten ferrite and blocky ferrite and the amount of acicular ferrite may be very small.
2. Friction Stir Processing. FSP of steel can be successfully carried out at correct set of process parameters using tungsten carbide as a tool material.
3. The microstructure of the weld metal obtained after GMAW can be improved by FSP and the processing results in formation of a fine grained structure. This structure is expected to improve the properties of the weld metal.

Iz rezultata prikazanih u gornjoj tabeli može se uočiti da je srednja vrednost tvrdoće metala šava uporedljiva sa onom dobijenom u oblasti gde je vršena obrada sa FSW procesom. Može se konstatovati velika varijacija vrednosti mikrotvrdoće na različitim lokacijama zavarenog spoja. Mikrotvrdoća u procesuiranoj oblasti pokazuje skoro slične vrednosti na različitim mestima zbog usitnjene i usmerene structure. Zrna su plastično deformisana pri vrlo visokim brzinama deformacije koja je praćena dinamičkom rekristalizacijom koja je rezultovala formiranjem usmerenih zrna. Tvrdoća metala vara je neujednačena zbog prisustva različitih faza u mikrostrukтури pri čemu su neke faze manje tvrde poput pločastog ferita i neke faze su daleko veće tvrdoće poput martenzita.

4. Zaključci

Sledeći važni zaključci mogu biti izvedeni iz ovog eksperimentalnog rada.

1. Čelična ploča zavarena postupkom MAG pokazuje u strukturi gruba zrna Widmanstättenovog ferita i pločasti ferit, a količina acirkularnog ferita može biti vrlo mala.
2. Obrada trenjem sa alatom FSW može biti uspešno izvedeno na čeliku sa pravilnim izborom procesnih parametara i uz primenu volfram karbida za materijal alata.
3. Mikrostruktura metala šava dobijene nakon MAG zavarivanja može se poboljšati procesom FSW, a kao rezultat procesa je formiranje fino zrnaste structure. Za očekivati je da takva struktura poboljšava osobine metala šava.



4. There is a huge variation in the microhardness values at different locations of weld metal and therefore it can be expected that the mechanical properties would not be very uniform after GMAW. Subsequent FSP can make the properties more uniform and it is expected that Friction Stir processing of gas metal arc welded steel will help in improving the service life of the component.

Acknowledgement: The authors would like to thank the Department of Science and Technology (DST), New Delhi for the financial support received through project No: SB/S3/MMER/0062/2013

References

1. Bodnar, R. L., and S. S. Hansen. Effects of Widmanstätten ferrite on the mechanical properties of a 0.2 pct C-0.7 pct Mn steel. *Metall Mater Trans A* 1994; 25.4: 763-773.
2. AWS Handbook. 8 ed. Miami, Florida, USA: American Welding Society, 1996.
3. Grong, O., and David K. Matlock. "Microstructural development in mild and low alloy steel weld metals." *Int Metals Rev* 1986; 31.1: 27-48.
4. Dawes CJ and Thomas WM. Friction stir process welds aluminum alloys. *Weld J* 1996; 75: 41s-45s.
5. Mishra RS and Ma ZY. Friction stir welding and processing. *Mater Sci Eng, R-Report* 2005; 50: 1-78.
6. Threadgill PL, Leonard AJ, Shercliff HR, et al. Friction stir welding of aluminium alloys. *Int Mater Rev* 2009; 54: 49-93.
7. Thomas WM, Threadgill PL and Nicholas ED. Feasibility of friction stir welding steel. *Sci Technol Weld Joining* 1999; 4: 365-372.
8. Lienert TJ, Stellwag WL, Grimmer BB, et al. Friction stir welding studies on mild steel - Process results, microstructures, and mechanical properties are reported. *Weld J* 2003; 82: 1s-9s.
9. Chen YC and Nakata K. Effect of the surface state of steel on the microstructure and mechanical properties of dissimilar metal lap joints of aluminum and steel by friction stir welding. *Metall Mater Trans A* 2008; 39A: 1985-1992.
10. Cui L, Fujii H, Tsuji N, et al. Friction stir welding of a high carbon steel. *Scr Mater* 2007; 56: 637-640.
11. Fuji H, Ueji R, Takada Y, et al. Friction stir welding of ultrafine grained interstitial free steels. *Mater Trans* 2006; 47: 239-242.

4. Postoje velike razlike u vrednosti mikrotvrdoće na različitim lokacijama unutar metala šava i stoga se može očekivati da mehanička svojstva ne bi bila ravnomerna posle zavarivanja MAG postupkom. Naknadna obrada postupkom FSW može obezbediti ujednačenije osobine i za očekivati je da primena FSW postupka nakon zavarivanja čelika postupkom GMA, će pomoći u produženju životnog veka zavarenih komponenti.

Zahvalnost: Autori se zahvaljuju Odeljenje za nauku i tehnologiju (DST) - Nju Delhi, za finansijsku podršku dobijenu preko projekta broj: SB / S3 / MMER / 0062/2013

12. Fujii H, Cui L, Tsuji N, et al. Friction stir welding of carbon steels. *Mater Sci Eng, A* 2006; 429: 50-57.
13. Meran C, Kovan V and Alptekin A. Friction stir welding of AISI 304 austenitic stainless steel. *Materialwiss Werkstofftech* 2007; 38: 829-835.
14. Miles MP, Nelson TW, Steel R, et al. Effect of friction stir welding conditions on properties and microstructures of high strength automotive steel. *Sci Technol Weld Joining* 2009; 14: 228232.
15. Ahn BW, Choi DH, Kim DJ, et al. Microstructures and properties of friction stir welded 409L stainless steel using a Si₃N₄ tool. *Mater Sci Eng, A* 2012; 532: 476-479.
16. Miyano Y, Fujii H, Sun YF, et al. Mechanical properties of friction stir butt welds of high nitrogen-containing austenitic stainless steel. *Mater Sci Eng, A* 2011; 528: 2917-2921.
17. Noh S, Kasada R, Kimura A, et al. Microstructure and mechanical properties of friction stir processed ODS ferritic steels. *J Nucl Mater* 2011; 417: 245-248.
18. Reynolds AP, Tang W, Posada M, et al. Friction stir welding of DH36 steel. *Sci Technol Weld Joining* 2003; 8: 455-460.
19. Saeid T, Abdollah-zadeh A, Assadi H, et al. Effect of friction stir welding speed on the microstructure and mechanical properties of a duplex stainless steel. *Mater Sci Eng, A* 2008; 496: 262-268.
20. Ueji R, Fujii H, Cui L, et al. Friction stir welding of ultrafine grained plain low-carbon steel formed by the martensite process. *Mater Sci Eng, A* 2006; 423: 324-330.

UPUTSTVO AUTORIMA I SARADNICIMA

Časopis **ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE (ZZK)** je naučno-stručni časopis čiji je zadatak afirmacija naučnih istraživanja, razmena stručnih saznanja i praktičkih iskustava, kontinualno obrazovanje i sveobuhvatno informisanje svih onih koji imaju interesovanje za tehniku i tehnologiju zavarivanja, termičkog rezanja i lemljenja. Autorski radovi podležu recenziji i mogu da budu svrstani u jednu od sledećih kategorija:

Originalni naučni rad (Original scientific paper) je neobjavljeni rad koji doprinosi naučnom saznanju ili shvatanju, a omogućava da se na osnovu datih informacija može: ponoviti eksperiment i postići prikazane rezultate sa istom tačnošću ili unutar granica eksperimentalne greške prema navodima autora i ponoviti autorova zapažanja, proračune ili teorijske navode i doneti slične zaključke.

Prethodno saopštenje (Preliminary communication) je rad koji sadrži nova naučna saznanja ili rezultate čiji karakter zahteva hitno objavljivanje. Rad obavezno sadrži jedan ili više novih podataka, naučnih informacija, ali bez dovoljno pojedinosti koje bi omogućile čitaocu proveru iznesene informacije na opisan način.

Pregledni rad (Review) izveštava o nekom posebnom pitanju o kome je već objavljivana informacija, samo je to ovde sakupljeno, analizirano, pogodno prikazano i raspravljeno. Autor preglednog rada dužan je da se u tekstu poziva na svu literaturu koju je koristio u svom radu, i da literaturu navede redosledom onako kako se pojavljuje u tekstu.

Stručni rad (Professional paper) rad sadrži korisne priloge iz područja čija problematika nije vezana za izvorna istraživanja. Materija ne mora da predstavlja novost u svetskim okvirima. To se npr. odnosi na reprodukciju u svetu poznatih istraživanja, koja predstavljaju vredan materijal za širenje znanja, i prilagođavanja izvornih istraživanja potrebama industrije.

Sadržaj rukopisa

Priredjen za štampu rukopis treba da sadrži: naslov rada (na srpskom i engleskom jeziku); podatke o autoru: puno ime prezime autora i koautora, zvanje, adresa ustanove-preduzeća u kojoj je zaposlen, grad, telefon / e-mail, navođenje projekta na kojem se zasniva tema rada, i ko je finansirao projekat (obavezno kod projekata koje finansira Ministarstvo za nauku i tehnologije); predlog autora za kategorizaciju rada; ključne reči (na srpskom i engleskom jeziku); izvod (na srpskom i engleskom jeziku); integralni tekst rada.

Naslov rada treba da je po mogućnosti što kraći, i da jasno odražava suštinu rada.

Autor je idejni tvorac i nosilac aktivnosti u izradi rada. Kod navođenja koautora treba se ograničiti na one koautore koji su direktno učestvovali u stvaranju rada.

Ključne reči (Key words) su reči koje su najkarakterističnije za rad i koje ukazuju na samu suštinu rada. Obično je dovoljno navođenje tri do šest ključnih reči.

Izvod (Abstract) treba da je kratak i informativan i može da sadrži najviše 500 slovnih mesta. On upozorava na zaključke za svaku novu informaciju koju donosi rad. Za radove koji ne daju bitno nove rezultate (pregledni radovi, referativni radovi) dovoljno je napisati indikativni izvod u kojem se kratko opisuje predmet rada. Preko izvoda čitalac treba da lako i brzo oceni da li ga taj rad zanima. Izvod, kao i integralni tekst, se pišu u trećem licu.

Uvod - Iznosi se predmet, svrha i cilj rada, sa kratkim uvidom u materiju prethodnih, objavljenih istraživanja.

Eksperimentalni deo - Eksperimenti i merenja moraju da budu opisani tako da se rezultati mogu reprodukovati. Kada se radi o komercijalnim ili ranije opisanim aparatima ili standardom određenim uređajima, treba navesti odgovarajuću literaturu (standard) i uslove (merila) pod kojima se eksperimentisalo. Ako je razrađen sopstveni eksperimentalni postupak treba ga opisati sa svim detaljima i dati jasne slike ili skice konstruisanog aparata. To se isto odnosi i na oblik i mere eksperimentalnih uzoraka i epruveta za ispitivanje.

Rezultati - Rezultate treba dati pregledno, u obliku tabela ili dijagrama. Suvišno je koristiti oba načina prikaza rezultata. Na dijagrame treba uneti sve rezultate dobijene eksperimentima. Preporučuje se da se rezultati obrade statistički. Ilustrovanje rezultata fotosima (npr. fotosi mikrostrukturnih analiza) treba ograničiti na karakteristične primere, značajne za zaključak ili za poređenja stanja. Poželjno je da autor tekstovi uz tabele i slike daje dvojezično, na srpskom i engleskom.

Diskusija - Analiziraju se dobijeni rezultati, upoređuju sa ranije publikovanim podacima, pronalaze se zakonitosti i granično područje zakonitosti, komentarišu se greške i tačnosti merenja. Daju se eventualne sugestije za dalja istraživanja.

Zaključak - Zaključak sadrži kratak rezime najvažnijih rezultata. Treba ga pisati tako da čitalac koji pročita samo zaključak može dobiti opštu sliku o vrednosti i zanimljivosti rada i za šta ga može koristiti.

Literatura - Literatura se citira hronološkim redom. Na literaturu se poziva navođenjem u uglastoj zagradi rednog broja pod kojim je navedena. Radovi koji nisu objavljeni (interni izveštaji, pravila, procedure) ne mogu da budu navedeni kao reference. Literatura se daje na jeziku originala odgovarajuće reference i mora da bude navedena prema ISO 690:

Citiranje časopisa: prezime autora, zarez, inicijal imena autora (ako ih ima više odvajaju se zarezom) tačka, zarez, dvotačka, ime časopisa ili njegova internacionalna skraćenica, razmak (bez zareza), volumen (boldiranim fontom), broj (u lučnoj zagradi boldiranim fontom), zarez, godina (u lučnoj zagradi), stranica (početna/ završna), tačka.

Citiranje knjige: navođenje autora kao u prethodnom slučaju, dvotačka, naslov knjige, zarez, izdavač, zarez, mesto izdanja, zarez, godina izdanja, zarez, kratica str., zarez, broj stranice, tačka.

Citiranje zbornika radova naučnih skupova: navođenje autora kao u prethodnom slučaju, dvotačka, naziv zbornika radova, mesto i godina održavanja skupa, broj stranice, tačka.

Tehnička priprema

Autori su dužni da tekst rada pripreme prema uputstvu i dostave u elektronskom obliku i dva odštampana primerka. Tekstovi kraćih priloga, koji nemaju status autorskog rada prema kategorizaciji, mogu se dostaviti i elektronskom poštom, bez posebnih zahteva za uređenje teksta.

Opis izgleda teksta - Obim teksta je do 6 strana formata A4 sa veličinom fonta 9 pt. Tekst i tabele, bez slika, uraditi kao fajl u Word document. U tekstu naznačiti mesto slika, sa rednim brojem i nazivom. Sve stranice teksta moraju biti označene. Stil slova je Arial (za naslove svih nivoa Arial Black). Slike visoke rezolucije (pod nazivom i rednim brojem kao u tekstu) *obavezno uraditi kao poseban fajl*, u JPG ili TIF formatu. Veličina znakova i slova na slici i u tabeli treba da u završnoj formi odgovara veličini 8 pt.

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