



ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE

WELDING & WELDED STRUCTURES

God. 61 Vol. 61	Br. 4 No. 4	145-192 145-192	Beograd Belgrade	Srbija Serbia	2016. 2016.
--------------------	----------------	--------------------	---------------------	------------------	----------------

ČASOPIS DRUŠTVA ZA UNAPREĐIVANJE
ZAVARIVANJA U SRBIJI

SERBIAN WELDING SOCIETY
QUARTERLY REVIEW

IZLAZI TROMESEČNO

IZDAVAČ / PUBLISHER

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

Adresa: 11000 Beograd, Grčića Milenka 67

Za izdavača / For Publisher

Branislav Lukić, dipl.ing, predsednik DUZS

UREDNIŠTVO / EDITORIAL

Glavni i odgovorni urednik / Editor-in-Chief

Milica Antić, dipl.ing. EWE

duzs@eunet.rs, milicamantic@yahoo.com

Tehnički urednik / Technical Editor

Branislav Lukić, dipl.ing

Redakcijski odbor / Editorial Board

Dr Nenad Radović, dipl.ing.

Dr Bore Jegdić, dipl.ing.

Miloš Pavlović, dipl.ing.

UREĐIVAČKI ODBOR / PUBLISHING COUNCIL

Dr Vencislav Grabulov, dipl.ing, (predsednik)

Prof. dr Miroslav Đurđanović, dipl.ing.

Prof.dr Vukić Lazić, dipl.ing.

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

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

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

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

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

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

Horia Dascau, dipl.ing. (Rumunija)

REDAKCIJA I MARKETING / EDITORIAL OFFICE AND MARKETING



Vesna Jović
Grčića Milenka 67, I sprat
11000 Beograd



Tel / Fax + 381 (11) 2850-794
(10-16h)



duzs@eunet.rs
www.duzs.org.rs

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд
621.791

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

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

CENE I NARUDŽBINA ZA 2015.

Cena pojedinačnog broja 825,00 dinara

Godišnja pretplata 2500,00 dinara

Tekući račun: 355-1025530-87

PRICE AND ORDER

Annual subscription: EUR 100

Account No. 000200073783

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

ŠTAMPA / PRINTED

"VIS STUDIO" d.o.o.
Aleksinačkih rudara 35, Beograd
Tiraž: 400 kom.

4/2016

SADRŽAJ:

CONTENTS:



NAUKA•ISTRAŽIVANJE•RAZVOJ

SCIENCE•RESEARCH•DEVELOPMENT

- 149 DEFINISANJE PARAMETARA ZAVARIVANJA POMOĆU DEFINITION OF WELDING PARAMETERS BY
VREMENA HLAĐENJA U INTERVALU TEMPERATURA COOLING TIME IN TEMPERATURE RANGE 800-
800 – 500°C 500°C
Radomir Jovičić, Olivera Erić Cekić, Sanja Petronić, Svetlana Štrbački, Dejan Jovičić
- 157 STANJE I TRENDOVI U RAZVOJU PODVODNOG STATE OF THE ART AND TRENDS IN DEVELOPMENT
ZAVARIVANJA OF
UNDERWATER WELDING
Prof. dr. sc. Slobodan Kralj, Doc.dr.sc. Ivica Garašić, Prof.dr.sc. Zoran Kožuh, Jadranka Eržišnik, dipl.ing.



MIZ

IIW

- 166 CHARACTERISATION OF LOCAL GRAIN SIZE KARAKTERIZACIJA PROMENE LOKALNE VELIČINE
VARIATION OF WELDED STRUCTURAL STEEL ZRNA NA ZAVARENIM KONSTRUKCIONIM ČELICIMA
Pauli Lehto, Jani Romanoff, Heikki Remes, Teemu Sarikka



VESTI

NEWS

- 148 PREDSTAVLJAMO VAM...GORDANA VELIČKOVIĆ
- 192 MARKETING

Poštovani čitaoci,

poslednji ovogodišnji broj daće vam priliku da upoznate još jednu od retkih dama koje su za svoj poziv odabrale da budu zavarivači, potom mogućnost da pomno pročitate dva rada izložena na našem septembarskom skupu i, posle duže vremena, jedan veoma ozbiljan rad u rubrici –Iz rada MIZ-a.

Kraj godine obično podrazumeva svođenje rezultata, a mi smo o tome dovoljno obavestavali u prethodnim brojevima. Napomenimo da neke od predviđenih aktivnosti, kao što je seminar o termičkoj obradi, nismo uspeli da sprovedemo, a neke aktivnosti, kao što je sertifikacija osoblja za koordinaciju u zavarivanju, nismo ni započeli.

Duga mukotrpana borba našeg društva da se u ovoj zemlji unapređuje zavarivanje, se nastavlja, ali nažalost sa mnogo saplitanja.

Profesionalizam po definiciji, ne podrazumeva prostu nabavku i posedovanje novca, mada postoje i oni koji njime pokušavaju da kupe besmrtnost, već prvo i najvažnije je poznavanje i bavljenje profesijom, strukom. U svetu gde je moral postao isključivo tematika naučnih foruma, zakoni uglavnom služe da se ne bi poštovali, divljačka akumulacija kapitala protiče ponekad kao ratni okršaj, gde je robovlasništvo samo promenilo tok iz direktnog u indirektno, sigurno je preteško upućivati na prava merila.

Uvek uzburkani, ali najlepši, naši prostori Balkana ne odolevaju ovim uplivima. Ali kao što Andrić napisa da valja trajati, to postaje i naš imperativ u vremenima koja dolaze.

Nova, prosta 2017.godina je pred nama, neka nam donese mir, zdravlje i radost.

S poštovanjem,

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



PREDSTAVLJAMO VAM

Tokom posete preduzeću „Milanović Inženjering“ priređeno nam je prijatno iznenađenje.

Naime, upoznali smo predstavnicu lepšeg pola Gordanu Veličković, po obrazovanju metalostrugara iz Kragujevca, koja će uskoro postati verovatno jedan od boljih zavarivača aluminijuma MIG postupkom. Gordana je posle nekoliko godina rada na poslovima koji nisu vezani za struku, našla sebe kao zavarivača čeličnih materijala. Na tim poslovima je bila osam godina. Od 01.septembra ove godine, ona je promenila fah, odlučila je da se isproba na zavarivanju Al materijala. Po onome što smo imali prilike da vidimo, ne postoji nijedna sumnja da će u tome i uspeti.

Gordani i njenim kolegama želimo mnogo uspeha u radu uz molbu da nam se pridruže kao članovi našeg Društva.



Gordana Veličković





Radomir Jovičić¹, Olivera Erić Cekić¹, Sanja Petronić¹, Svetlana Štrbački², Dejan Jovičić³

DEFINITION OF WELDING PARAMETERS BY COOLING TIME IN TEMPERATURE RANGE 800-500°C

DEFINISANJE PARAMETARA ZAVARIVANJA POMOĆU VREMENA HLAĐENJA U INTERVALU TEMPERATURA 800 – 500°C

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad primljen / Paper received:

Septembar 2016.

Rad je u izvornom obliku objavljen u Zborniku sa savetovanja „ZAVARIVANJE 2016“ održanog na Srebrnom jezeru 14-17. Septembra 2016

Ključne reči: vreme hlađenja $t_{8/5}$, parametri zavarivanja, čelici, mikrostrukture, tvrdoće

Rezime: Vreme hlađenja u temperaturnom intervalu 800 - 500°C ($t_{8/5}$) ima veliki uticaj na strukture koje nastaju u zoni uticaja toplote zavarenih spojeva čelika. Podaci o optimalnim vremenima hlađenja $t_{8/5}$ za pojedine čelike se mogu naći u literaturi. Na veličinu vremena hlađenja $t_{8/5}$, pri zavarivanju konkretnog spoja, pored debljine i fizičkih osobina zavarivanog čelika imaju uticaj i oblik spoja, postupak zavarivanja i parametri, kao što su temperatura predgrevanja, struja, napon i brzina zavarivanja. U ovom radu je prikazan postupak za izbor parametara zavarivanja za jedan sučeoni spoj zavaren na mikrolegiranom čeliku P 460 NL1. Prikazane su mikrostrukture u zoni uticaja toplote i rezultati merenja njihovih tvrdoća. Zaključeno je da parametri zavarivanja odabrani uz pomoć vremena hlađenja $t_{8/5}$ daju spoj sa zadovoljavajućim strukturama i tvrdoćama.

1. UVOD

Presudan uticaj na dobijene strukture u zoni uticaja toplote (ZUT) čelika imaju njegov hemijski sastav, struktura i vreme, odnosno, brzina hlađenja u temperaturnom intervalu najmanje stabilnosti austenita tj. u temperaturnom intervalu 800 – 500°C. Na brzinu hlađenja ZUT imaju uticaj fizičke osobine čelika (toplotna provodnost, specifična toplota), oblik i dimenzije spoja (debljina, sučeoni ili ugaoni spoj) i parametri zavarivanja (polazna temperatura i količina unete toplote). Promenom parametara zavarivanja može se, na određenom spoju, postići željeno vreme hlađenja u temperaturnom intervalu 800 - 500°C ($t_{8/5}$) tj. može se postići vreme hlađenja koje u ZUT daje željenu

Adresa autora / Author's address:

¹ Inovacioni centar Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, Srbija

² KonMat DOO, Beograd, Srbija

³ MFGO DOO, Mladenovac, Srbija

Key words: cooling time $t_{8/5}$, welding parameters, steel, mikrostructure, hardness

Abstract: Cooling time in the temperature range 800 - 500 ° C has a great effect on the structures that arise in the heat affected zone of welds steel. Data on optimal cooling time $t_{8/5}$ for the certain steels can be found in the literature. The period of the cooling time $t_{8/5}$, during the welding of the particular joints, in addition to the thickness and physical properties of welded steel, depends on shape of the weld, the welding process and welding parameters as well. In this work, the procedure for the selection of welding parameters for a butt joint welded to the microalloyed steel P 460 NL1 is presented. The microstructure in the heat affected zone and the results of measurement of their hardness are showed and analysed. It is concluded that the welding parameters selected with the help of cooling time $t_{8/5}$ provide the satisfactory structure and hardness of welds.

strukturu. Kod različitih čelika, pri istom vremenu $t_{8/5}$ se dobijaju različite strukture, što je posledica razlika u hemijskim sastavima čelika. Vezu između struktura i vremena $t_{8/5}$ daju TTT dijagrami čelika. Zbog razlika u hemijskim sastavima i polaznim strukturama čelika potrebno je, pri izradi tehnologija zavarivanja, za svaku grupu čelika [1] odrediti dijapazon vremena $t_{8/5}$ koja daju željene strukture u ZUT. Zatim je, za svaki konkretni zavareni spoj, proračunima potrebno odrediti količinu unete toplote (Q), temperaturu predgrevanja (T_p) i međuprolaznu temperaturu (T_{mp}), koje obezbeđuju da vreme $t_{8/5}$ bude u okviru željenog, odnosno zadatog vremena za zavarivani čelik. Kada postoje



ograničenja u veličini jednog od parametara (Q ili T_p) proračunima se može utvrditi koliki treba da bude drugi parametar da bi vreme $t_{8/5}$ ostalo u zadatim okvirima. Na taj način se uvek na osnovu poznatog vremena $t_{8/5}$ mogu izračunati optimalni parametri zavarivanja.

Niskouglenični sitnozrni i mikrolegirani čelici, se danas proizvode sa strogo definisanim hemijskim sastavima i u uslovima precizno vođenih režima termomehničke obrade pri valjanju. Na taj način dobijaju se strukture koje imaju visoku čvrstoću i plastičnost i dobru žilavost. Ovako dobijene strukture su osetljive na naknadno zagrevanje. Zbog toga se, pri zavarivanju lako transformišu, pri čemu se karakteristike čvrstoće i žilavosti smanjuju. Zbog toga je važno da se pri zavarivanju ovi čelici

kontrolisano zagrevaju i hlade. Naročito je važno vreme $t_{8/5}$. Sklonost mikrostruktura čelika ka promenama pri zavarivanju je utoliko veća ukoliko je viši napon tečenja čelika. Zato sa porastom napona tečenja, kod ovih čelika, raste važnost preciznog određivanja i kontrolisanja vremena $t_{8/5}$.

2. PRORAČUN VREMENA HLAĐENJA $t_{8/5}$

U daljem tekstu su proračunata vremena $t_{8/5}$ za različite T_p i Q , za sučeoni spoj na čeliku P 460 NL1, debljine 14 mm. Hemijski sastav OM, koji je upotrebljen u eksperimentalnom delu ovog rada, određen je spektralnom analizom i dat je u tabeli 1.

Element	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni
%	0,153	0,380	1,40	0,015	0,0021	0,031	0,037	0,630
Element	Mo	Cu	V	Nb	Ti	B	N	-
%	0,004	0,061	0,099	0,038	0,004	0,0003	0,0052	

Tabela 1. Hemijski sastav osnovnog materijala, P 460 NL1

2.1. Proračun vremena $t_{8/5}$ u ZUT korenog prolaza, zavarenog bez predgrevanja

Postupak za određivanje vremena $t_{8/5}$ je dat u literaturi [2]. Prvi korak u proračunu je određivanje prelazne debljine OM, pri kojoj se odvođenje toplote menja iz dvodimenzionalnog u trodimenzionalno. Ukoliko je debljina OM, u konkretnom slučaju, manja od prelazne debljine odvođenje toplote je dvodimenzionalno, a ukoliko je ta debljina veća od prelazne debljine, odvođenje toplote je trodimenzionalno. Iz literature [2] se, za uslove zavarivanja ovog korenog prolaza ($d = 14$ mm; $T_p = 20^\circ\text{C}$; $Q = 1,25$ KJ/mm, tabela 2.), vidi da je prelazna debljina jednaka 18 mm. S obzirom da je debljina OM manja od prelazne debljine, u konkretnom slučaju se radi o dvodimenzionalnom odvođenju toplote.

Količina unete toplote Q je izračunata iz jednačine: $Q = \eta \cdot I \cdot U / (v_z \cdot 1000)$ KJ/mm, gde su:

η – koeficijent termičkog iskorišćenja za MIG postupak 0,8; I – jačina stuje zavarivanja A; U – napon zavarivanja V; v_z – brzina zavarivanja mm/sec. Parametri zavarivanja (I , U , v_z) preporučeni za zavarivanje korenog prolaza na sučeonom spoju, MIG postupkom, punom žicom prečnika 1,2 mm u PA položaju su dati u tabeli 2. i literaturi [3]. Jednačina za određivanje vremena $t_{8/5}$ za nelegirane i niskolegirane čelike, gde spada i mikrolegirani čelik P 460 NL1, pri dvodimenzionalnom odvođenju toplote je data u literaturi [2] i glasi:

$$t_{8/5} = (4300 - 4,3 T_p) \cdot 10^5 \cdot Q^2/d^2 \cdot [1/(500 - T_p)^2 - 1/(800 - T_p)^2] \cdot F_2 \text{ sec} \quad (1)$$

gde su: T_p – temperatura predgrevanja $^\circ\text{C}$; Q – količina toplote unete pri zavarivanju KJ/mm; d – debljina OM mm; F_2 – faktor oblika spoja (0,9 za višeprolazni sučeoni spoj

Red. br.		T_p $^\circ\text{C}$	I A	U V	v_z cm/min	v_z mm/sec	Q KJ/mm	$t_{8/5}$ sec
1	Bez predgrevanja	20	130	16,0	8,0	1,33	1,25	8,2
2	Predgrevanje prema proračunu	40	130	16,0	8,0	1,33	1,25	8,9
3	Optimalne vrednosti	150	130	16,0	8,0	1,33	1,25	15,2
4	Minimalne vrednosti	150	120	15,8	8,5	1,42	1,07	11,4

Tabela 2. Parametri zavarivanja i vremena hlađenja $t_{8/5}$ za koreni prolaz



Preporučena vremena $t_{8/5}$ za mikrolegirane čelike, se kreću u intervalima 10 - 25 sec [2], 5 - 20 sec [4] i 15 sec [5]. Za potrebe ovog rada, kao optimalna, usvojena su vremena $t_{8/5}$ od 10 – 20 sec. Iz tabele 2. se vidi da vreme $t_{8/5}$ za zavarivanje korenog prolaza u navedenim uslovima i iznosi 8,2 sec. što je manje od preporučenih vrednosti. Da bi se vreme hlađenja ZUT korenog prolaza produžilo potrebno je predgrevanje OM.

2.2. Proračun temperature predgrevanja i vremena $t_{8/5}$ u ZUT korenog prolaza

Postupak za izračunavanje T_p je dat u literaturi [2]. Visina T_p za napred navedene uslove zavarivanja korenog prolaza je data u tabeli 3.

		Jednačine	Parametri	Temperatura °C
1	T_{pCET}	$T_{pCET} = 750 \cdot CET - 150$	$CET = 0,314$	+ 85,5
2	T_{pd}	$T_{pd} = 160 \cdot \tanh(d/35) - 110$	$d = 14 \text{ mm}$	- 49,2
3	T_{pHD}	$T_{pHD} = 62 \cdot HD^{0,35} - 100$	$HD = 5 \text{ ml/100 gr}$	+ 3,7
4	T_{pQ}	$T_{pQ} = (53 \cdot CET - 32) Q - 53 \cdot CET + 32$	$Q = 1,25 \text{ KJ/mm}$	0
5	T_p	$T_p = T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ}$	-	40

Tabela 3. Proračun temperature predgrevanja za koreni prolaz, [2]

Ako izračunatu T_p od 40°C, tabela 3. uvrstimo u jednačinu (1) uz zadržavanje istog unosa toplote Q , dobija se da je vreme $t_{8/5}$ jednako 8,9 sec, što je i dalje manje od preporučenih vrednosti za ovaj čelik.

Navedene vrednosti pokazuju da je T_p potrebno značajno povećati. Proračun prelazne debljine OM pokazuje da je, pri temperaturi predgrevanja od 150°C i nepromenjenoj veličini Q , prenos toplote i dalje dvodimenzionalan i da se zato za proračun vremena $t_{8/5}$ i dalje može koristiti jednačina (1). Proračun po ovoj jednačini pokazuje da se pri predgrevanju na 150°C vreme $t_{8/5}$ nalazi oko sredine oblasti preporučenih vrednosti, tabela 2. Manje oscilacije jačine struje i brzine zavarivanja menjaju količinu unete toplote što onda bitno menja vreme $t_{8/5}$. Zbog toga je pogodno da se izabere T_p koja daje vreme $t_{8/5}$ oko sredine preporučene oblasti.

2.3. Proračun temperature predgrevanja i vremena $t_{8/5}$ u ZUT prolaza popune

Prolazi popune se po pravilu zavaruju strujama većih jačina i sa većim brzinama zavarivanja, što može da povećava količinu unete toplote. Preporučeni parametri zavarivanja [3] kao i količina unete energije za prolaze popune su dati u tabeli 4.

U praksi se često dešava da prostor, odnosno, "žlebovi" za polaganje pojedinih prolaza u popuni višeprolaznih šavova imaju različite dimenzije. To je posledica lošeg rasporeda polaganja pojedinih prolaza i uklanjanja grešaka brušenjem. Različite dimenzije ovih "žlebova" uslovljavaju različite brzine zavarivanja u pojedinim prolazima, što onda menja količinu unete toplote i vreme $t_{8/5}$. Na osnovu iskustva iz prakse usvojeno je da se, u uslovima zavarivanja opisanih spojeva, brzina zavarivanja može menjati u granicama 20 do 27 cm/min, što onda menja količinu unete toplote u granicama 1,23 do 1,67 KJ/mm, tabela 4. Proračuni po jednačini (1) (odvođenje toplote je dvodimenzionalno) pokazuju da jedino međuprolazna temperatura od 90°C obezbeđuje da se pri ovim količinama unete toplote vreme $t_{8/5}$ održava u granicama 10 do 20 sec.

		T_p °C	I A	U V	v_z cm/min	v_z mm/sec	Q KJ/mm	$t_{8/5}$ sec
1	Preporučeni parametri	80	230	30	25	4,2	1,31	12,0
2	Zavarivanje maks. brzinom	90	230	30	27	4,5	1,23	10,6
3	Zavarivanje min. brzinom	90	230	30	20	3,3	1,67	18,2
4	Zavarivanje smanjenom strujom	90	225	29,5	25	4,2	1,26	11,3
5	Zavarivanje povećanom strujom	90	240	30,5	25	4,2	1,39	14,0
6	Optimalne vrednosti	90	230	30	25	4,2	1,31	12,7

Tabela 4. Parametri zavarivanja i vremena hlađenja $t_{8/5}$ za prolaze popune



Zbog promene dužine slobodnog kraja žice, tokom zavarivanja, dolazi do manjih promena jačine struje i napona zavarivanja. Odstupanja ovih veličina, data u tabeli 4. su usvojena na osnovu iskustva iz prakse. Iz tabele se vidi da, pri T_p od 90°C , odstupanja struje i napona ne dovode do nedozvoljenih odstupanja vremena $t_{8/5}$.

3. EKSPERIMENT

Za ispitivanje uticaja parametara zavarivanja na vreme $t_{8/5}$ i na osobine čelika P 460 NL 1 u ZUT, MIG postupkom, su zavarena dva sučeona spoja na pločama dimenzija $200 \times 500 \times 14$ mm. Korišćena su dodatni materijali: puna žica VAC 65 (AWS ER 70S-6) prečnika 1,2 mm za spoj 1 i punjena žica Filtub 12 M (AWS E71T-1MH4) prečnika 1,2 mm za spoj 2., proizvođača Elektrode Jesenice [6]. Kao zaštitni gas u oba slučaja korišćena je mešavina Ar + 5,9% CO_2 + 1,1% O_2 . Zavarivanje je izvedeno na uređaju Kemppi

FastMig 350 Pulse, sa dodavačem FastMig MXF 65. Tokom zavarivanja kontinualno su snimani struja i napon pomoću uređaja Kemppi ARC I. Uređaj omogućava da se struja i napon očitaju u svakom trenutku tokom zavarivanja i da se odrede njihove srednje vrednosti tokom zavarivanja svakog prolaza. Ove vrednosti su korišćene za izračunavanje stvarne količine unete toplote i date su u tabeli 5.

4. REZULTATI ISPITIVANJA

4.1. Parametri zavarivanja i vremena hlađenja $t_{8/5}$

U tabeli 5. su date temperature predgrevanja T_p , međuprolazne temperature T_{mp} , struja, napon i brzina zavarivanja svakog prolaza, na oba spoja, kao i njima odgovarajuće količine toplote Q , prelazne debljine d_t i vremena $t_{8/5}$.

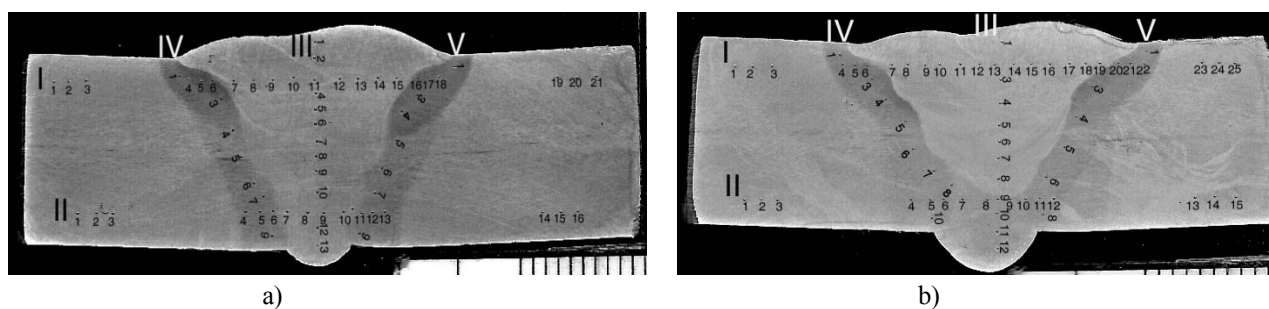
Spoj/Prolaz	T_p/T_{mp} ($^\circ\text{C}$)	I (A)	U (V)	v_z (cm/min)	Q (KJ/mm)	d_t (mm)	$t_{8/5}$ (sec)
Spoj 1.	1	122	16,2	7,9	1,20	18	11,0
	2	210	20,3	15,4	1,33	18	13,0
	3	242	28,9	22,4	1,51	20	16,9
	4	218	26,1	33,7	0,81	14	4,5
	5	222	26,3	20,7	1,35	17	12,6
Spoj 2.	1	122	15,8	8,5	1,09	17	11,8
	2	217	26,7	19,2	1,45	20	15,0
	3	232	27,7	21,4	1,44	19	15,8
	4	239	27,9	22,6	1,41	18	14,0
	5	238	27,8	19,6	1,62	20	18,2

Tabela 5. Parametri zavarivanja i vremena hlađenja $t_{8/5}$ spojeva 1. i 2.

4.2. Makrostrukture i tvrdoće

Iz zavarenih spojeva su isečeni uzorci za ispitivanja makro i mikrostruktura i za merenja tvrdoća. Nakon poliranja uzorci su nagriženi (4% rastvor nitala) čime su otkrivene granice OM, ZUT i MŠ, što je

omogućilo da se tačno odredi pozicija svakog pojedinačnog otiska. Vickersovom metodom su, sa opterećenjem od 10 dN (HV 10), izmerene tvrdoće. Na slici 1. su date makrostrukture i raspored mesta merenja tvrdoća na oba spoja, a u tabelama 6. i 7. su dati rezultati merenja ovih tvrdoća.



Slika 1. Makrostrukture i raspored mesta merenja tvrdoća: a) spoj 1.; b) spoj 2.



Linija br. 1 merno mesto	Tvrdoća	Linija br. 2 merno mesto	Tvrdoća	Linija br. 4 merno mesto	Tvrdoća	Linija br. 5 merno mesto	Tvrdoća
1- 3/OM	191	1- 3/OM	187-188	1/ZUT	266	1/ZUT	258
4/ZUT	283	4/ZUT	201	2/ZUT	283	2/ZUT	283
5/ZUT	304	5/ZUT	206	3/ZUT	297	3/ZUT	272
6/ZUT	304	6/ZUT	224	4/ZUT	232	4/ZUT	279
7-15/MŠ	206-225	7-13/MŠ	201-202	5/ZUT	230	5/ZUT	236
16/ZUT	289	11/ZUT	219	6/ZUT	233	6/ZUT	243
17/ZUT	283	12/ZUT	210	7/ZUT	230	7/ZUT	228
18/ZUT	276	13/ZUT	199	8/ZUT	224	8/ZUT	219
19-21/OM	185-188	14-16/OM	183-186	9/ZUT	230	9/ZUT	228

Tabela 6. Tvrdoće izmerene na spoju 1. (HV10)

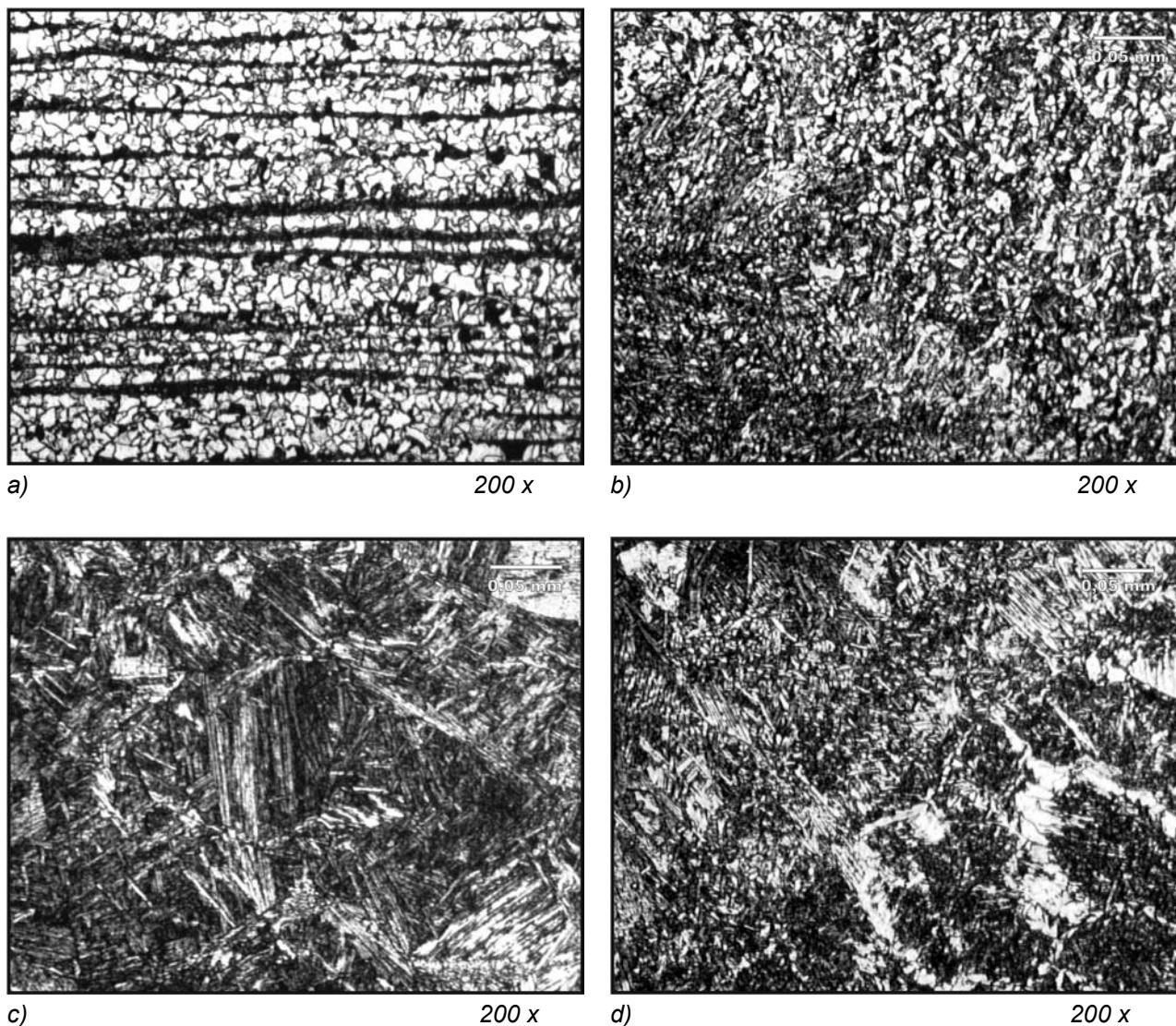
Linija br. 1 merno mesto	Tvrdoća	Linija br. 2 merno mesto	Tvrdoća	Linija br. 4 merno mesto	Tvrdoća	Linija br. 5 merno mesto	Tvrdoća
1-3/OM	176-179	1-4/OM	187-191	1/ZUT	242	1/ZUT	258
4/ZUT	221	5/ZUT	232	2/ZUT	271	2/ZUT	274
5/ZUT	266	6/ZUT	254	3/ZUT	274	3/ZUT	279
6/ZUT	274	-	-	4/ZUT	245	4/ZUT	242
7-19/MŠ	201-216	7-9/MŠ	205-206	5/ZUT	254	5/ZUT	242
20/ZUT	274	10/ZUT	254	6/ZUT	225	6/ZUT	238
21/ZUT	274	11/ZUT	235	7/ZUT	230	7/ZUT	235
22/ZUT	236	12/ZUT	235	8/ZUT	230	8/ZUT	240
23-25/OM	185-188	13-15/OM	183-188	9/ZUT	224		
				10/ZUT	247		

Tabela 7. Tvrdoće izmerene na spoju 2. (HV10)

4.3. Mikrostrukture

Na slici 2. su prikazane karakteristične mikrostrukture OM i ZUT u zoni korena i u zoni lica šava. Na slici 2.a) prikazana je ferritno-perlitna mikrostruktura OM. Tamne linije predstavljaju strukturne segregacije koje su uočene oko sredine debljine ploče. Na slici 2.b) prikazana je ferritno-beinitno-perlitna mikrostruktura u grubozrnom delu ZUT u zoni korena šava. Slike 2. c) i d) prikazuju

mikrostrukture u ZUT završnih prolaza tj. zoni lica šava. Na slici 2.c) je prikazana beinitno-martenzitna mikrostruktura u grubozrnom delu ZUT završnih prolaza. Mikrostrukturnim ispitivanjem je konstatovano da se u ZUT ovih prolaza na oba spoja javlja oko 20% martenzita. Slika 2.d) prikazuje beinitno-martenzitno-perlitnu mikrostrukturu ZUT na liniji stapanja završnog prolaza.



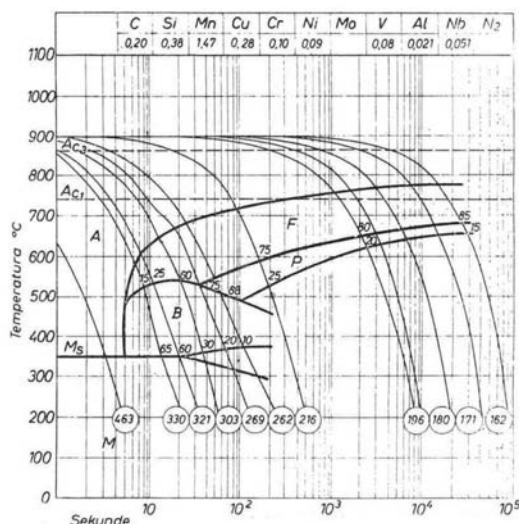
Slika 2. a) osnovni metal, b) ZUT u korenom delu šava, c) ZUT u zoni lica šava, d) ZUT i linija stapanja u zoni lica šava

5. ANALIZA REZULTATA

Odnosi između vremena $t_{8/5}$ i dobijenih struktura i tvrdoća u ZUT se mogu pratiti na TTT dijagramu čelika, slika 3. Dijagram pokazuje da se sa skraćanjem vremena $t_{8/5}$ u ZUT smanjuje udeo ferita i da raste udeo perlita, što je praćeno povećanjem tvrdoće. Pri određenom vremenu hlađenja u strukturi se pojavljuje beinit, čiji udeo raste kako se vreme $t_{8/5}$ skraćuje. Porast udela beinita je praćen smanjenjem udela feritno-perlitnog mikrokonstituenta, što ima za posledicu dalje povećanje tvrdoća. Od određenog vremena hlađenja u strukturi se pojavljuje i martenzit čiji

udeo raste sa skraćanjem vremena $t_{8/5}$, što je, takođe, praćeno povećanjem tvrdoće. U literaturi [7, 8] se kao maksimalna vrednost tvrdoće koja se sme dozvoliti u ZUT niskougleničnih čelika navodi tvrdoća od 350 HV. Preko ove tvrdoće strukture postaju sklone nastanku hladnih prslina.

Produženje vremena $t_{8/5}$ dovodi do smanjenja tvrdoća u ZUT. Razlozi za to su, pored smanjenja udela perlita, povećanje veličine zrna, naročito u krupnozrninom delu ZUT i proširenje ovog dela ZUT. Do pada tvrdoće dolazi i u onim delovima ZUT gde se preklapaju ZUT pojedinih prolaza tj. u onim delovima ZUT koji su pretrpeli dvostruki termički ciklus.



Slika 3. TTT dijagram čelika P 460 NL1

Može se zaključiti da tvrdoće u ZUT niskougljeničnih čelika ne treba da budu manje od tvrdoća OM, jer to onda znači da će ZUT imati nižu čvrstoću i žilavost u odnosu na OM. Takođe, tvrdoće u ZUT ne treba da budu veće od 350 HV. Slika 3. pokazuje da tvrdoćama koje su nešto niže, a bliske ovoj vrednosti (kriva 330 HV) odgovara beinitna mikrostruktura sa udelom ferita 15 do 20% i sa udelom martenzita do oko 20%. S obzirom da nivo tvrdoća ovakvih struktura zavisi od hemijskog sastava i polazne mikrostrukture OM nije moguće preciznije definisati optimalne udele strukturnih komponenti u ZUT. Za niskougljenične čelike se načelno može reći da tvrdoće u ZUT ne treba da budu van granica 200 – 300 HV.

U tabelama 2. i 4. su dati optimalni parametri za zavarivanje korenog prolaza i prolaza popune, a u tabeli 5. su dati parametri po kojima su pojedini prolazi u oba spoja zavareni. Iz tabela se vidi da su pri zavarivanju oba uzorka T_p i T_{mp} bile u propisanim okvirima. Pri zavarivanju korenog prolaza spoja 1. unos toplote bio nešto manji od optimalnog, zbog čega je i vreme $t_{8/5}$ bilo nešto kraće (11,0 sec.) od optimalnog. Unos toplote u pojedinim prolazima popune, ovog spoja, je bio neujednačen, zbog čega je i vreme $t_{8/5}$ u pojedinim prolazima bilo neujednačeno i kretalo se od 4,5 – 16,9 sec. Raspodela tvrdoća po debljini spoja 1., tabela 6., pokazuje da se u korenog delu spoja tvrdoće kreću od 210 - 230 HV, a da se u zoni lica spoja tvrdoće povećavaju na 260 – 300 HV. Pri zavarivanju korenog prolaza spoja 2. unos toplote je, takođe, bio nešto manji od optimalnog, zbog čega je i vreme $t_{8/5}$ nešto bilo kraće (11,8 sec.) od optimalnog. Unos toplote u pojedinim prolazima popune je, u ovom spoju, bio ujednačen. Zbog toga

je i vreme hlađenja $t_{8/5}$ u pojedinim prolazima bilo ujednačenije i kretalo se od 14,0 – 18,2 sec. Raspodela tvrdoća po debljini spoja 2., tabela 7., pokazuje da se u korenog delu spoja tvrdoće kreću od 230 - 250 HV, a da se u zoni lica spoja tvrdoće povećavaju na 270 – 280 HV.

Iz tabele 5. se vidi da su na oba spoja, u svim prolazima, postignuta vremena $t_{8/5}$ koja su u okviru propisanog raspona (10 – 20 sec.). Samo je u slučaju prolaza br. 4 na spoju 1. vreme $t_{8/5}$ znatno kraće od propisanog (4,5 sec). Iz tabele se, takođe, vidi da je spoj 1. zavaren sa, ukupno gledano manjim unosom toplote od spoja 2. Najveća tvrdoća (304 HV) je izmerena u ZUT prolaza 4. spoja 1. koji zavaren sa najkraćim vremenom $t_{8/5}$. Na oba spoja najveće tvrdoće imaju ZUT završnih prolaza pri čemu je tvrdoća u ZUT spoja 2. manja što se može objasniti dužim vremenima $t_{8/5}$ u završnim prolazima ovog spoja.

Mikrostrukturalna ispitivanja pokazuju da OM ima sitnozrnu feritno-perlitnu strukturu. Uočene strukture segregacije u OM nisu prihvatljive kod čelika povišene čvrstoće, zato što one obično dovode slabljenja čelika u pravcu upravnom na površinu lima. U grubozrnom delu ZUT korenih prolaza oba spoja javljaju se feritno-beinitno-perlitna mikrostruktura. Ova mikrostruktura je, u odnosu na grubozrni deo ZUT završnih prolaza, znatno sitnija i zrna su zaobljena tj. ravoosna. U grubozrnom delu ZUT završnih prolaza oba spoja javljaju se beinitno-martenzitno-perlitna mikrostruktura. Ova mikrostruktura je, u odnosu na grubozrni deo ZUT korenih prolaza, znatno grublja. Sadržaj martenzita od oko 20% u ZUT završnih prolaza je u okviru očekivanog.



Tokom zavarivanja moguća su odstupanja od zadate T_p , T_{mp} , ili Q , što onda menja vreme $t_{8/5}$. Količina unete toplote se može da odstupi od zadate u užim granicama zbog promene jačine struje zavarivanja (npr. usled promene dužine slobodnog kraja žice) ili zbog promene brzine zavarivanja. Sa druge strane T_p i T_{mp} se mogu da odstupaju od zadatih u širim granicama, zbog loše izvedenog predgrevanja, lošeg načina merenja temperatura, atmosferskih uticaja i ne uzimanja u obzir naknadnog zagrevanja OM toplotom električnog luka.

6. ZAKLJUČCI

Vreme hlađenja $t_{8/5}$ je parametar koji ima odlučujući uticaj na strukturu dobijenu u ZUT zavarenih spojeva čelika. Da bi ZUT imala zadovoljavajuće osobine vreme $t_{8/5}$ se mora naći u odgovarajućim granicama, koje su specifične za svaku grupu čelika i koje zavise od hemijskog sastava i polazne strukture čelika.

Vreme $t_{8/5}$, ostvareno tokom zavarivanja određenog spoja, zavisi od temperature

predgrevanja ili međuprolazne temperature i količine unete toplote. Ukoliko je jedan od ova dva parametra ograničen, vreme $t_{8/5}$ se može korekcijom drugog parametra, dovesti u zahtevane granice.

Kod jednog te istog spoja, međuprolazna temperatura je obično manja od temperature predgrevanja zbog toga što se prolazi popune najčešće zavaruju sa većim unosom toplote od korenog prolaza. Samo na taj način je moguće obezbediti da vreme $t_{8/5}$ bude isto za koreni i prolaze popune. U slučaju da su unosi toplote pri zavarivanju korenog i prolaza popune slični međuprolazna temperatura i temperatura predgrevanja mogu biti iste.

Rezultati merenja tvrdoća i makro i mikrostrukturnih ispitivanja pokazuju da, temperatura predgrevanja, međuprolazna temperatura i količina unete toplote, određeni na osnovu zadatog vremena $t_{8/5}$ daju zadovoljavajuće tvrdoće i mikrostrukture u ZUT sučeonog spoja čelika P 460 NL1.

LITERATURA

- [1] Standard EN 10027-1/2015: *Sistemi označavanja čelika - Deo 1: Osnovne oznake čelika*
- [2] Standard EN 1011 – 2/2007: *Zavarivanje – Preporuke za zavarivanje metalnih materijala – Deo 2: Elektrolučno zavarivanje feritnih čelika*
- [3] B. Bajić: *Elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnog i aktivnog gasa MIG-MAG*, Gorenje – Varstroj, Lendava, 1982.
- [4] Ruukki: *Hot rolled steel sheets, plates and coils, Welding general*, Ruukki Metals Oy, Finland, 2014.
- [5] K. Gerić: *Prsline u zavarenim spojevima*, Monografija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2005.
- [6] Katalog dodatnih materijala za zavarivanje, Elektrode Jesenice, Jesenice, 2014.
- [7] H. Granjon: *Metalurške osnove varjenja*, prevod na slovenački P. Štular, Zveza društev za varilno tehniko Slovenije, Ljuljana, 1994.
- [8] A. Radović: *Zavarljivost i ispitivanje zavarljivosti*, Monografija Mehanika loma zavarenih spojeva, Goša Institut, Tehnološko metalurški fakultet Beograd, Beograd, 1985.



Prof. dr. sc. Slobodan Kralj, Doc.dr.sc. Ivica Garašić, Prof.dr.sc. Zoran Kožuh, Jadranka Eržišnik, dipl.ing.

STATE OF THE ART AND TRENDS IN DEVELOPMENT OF UNDERWATER WELDING

STANJE I TRENDVI U RAZVOJU PODVODNOG ZAVARIVANJA

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad primljen / Paper received:

Septembar 2016.

Rad je u izvornom obliku objavljen u Zborniku sa savetovanja „ZAVARIVANJE 2016“ održanog na Srebrnom jezeru 14-17. Septembra 2016

Ključne riječi: podvodno zavarivanje, razvoj, stanje, trendovi

Sažetak: Održavanje podvodnih konstrukcije zahtijeva primjenu odgovarajućih tehnologija, kao što je npr. podvodno zavarivanje. Dobro uvježban i educiran „team“ ljudskih resursa, uključujući ronioce i organizacijski „team“ na „površini“, odlučujući su u ostvarivanju visoke sigurnosti na radu, te su nosioci velike odgovornosti u obavljanju ovakvih poslova. U zadnjih desetak godina pojačala su se istraživanja za poboljšavanje primjene podvodnog zavarivanja. U Hrvatskoj je to područje od velike važnosti, zbog velike količine naftnog i plinskog transporta koji se odvija u Jadranskom moru. Katedra za zavarene konstrukcije, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu provodi nekoliko projekata na području podvodnih aktivnosti. U ovom radu prezentirani su glavni problemi i trenutno stanje u podvodnom zavarivanju, kao i moguće alternative u daljnjem razvoju.

1. UVOD

Potruga za „off-shore“ ugljikovodicima dovela je naftnu industriju do crpljenja nafte sa sve većih dubina. U zadnjih par desetljeća aktivnosti na ovom području prerasle su granice kontinentalnog pojasa u Meksičkom zaljevu, Brazilu, Zapadnoj Africi, sjeverno-zapadnoj Europi i Mediteranskom području. Nafta se danas crpi na dubinama većim 1000 metara, sa tendencijom razvoja na dublja područja [1].

Važnost tehnologija podvodnog zavarivanja i ispitivanja ističu se kroz brojna postrojenja, popravke i održavanja pomorskih objekata. Štoviše, kako se eksploatacija nafte i plina sve više „pomiče“ na veće dubine, tako i tehnički nivo ovih

Adresa autora / Author's address:

Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu
I. Lučića 1, HR – 10 000 Zagreb
Tel: +385 1 61 68 306, faks: +385 1 61 57 124
e-mail: zkozuh@fsb.hr

Key words: underwater welding, development, state of the art, trends

Abstract: Maintenance of underwater structures demands application of appropriate technologies such as underwater welding. Due to high safety risks, great importance and responsibility in performing of these activities is on the highly trained and educated human resources, including divers and organization team on the surface. In global aspects investigations for improvement and application of underwater welding have been highly intensified through recent decade. In Croatia, this field is very important, due to great intensity of oil transport and gas production in the Adriatic sea. There are several projects about underwater activities that are conducted within Department of Welded Structures, Faculty of mechanical engineering and naval architecture-FAMENA at University of Zagreb. In this article, main issues about underwater welding and the alternatives in further development are presented.

tehnologija zahtijeva daljnja ulaganja i razvoj. Iako je automatizacija neizbježna, u nekim situacijama,

nezamjenjive su konvencionalne metode ronjenja, pa je stoga od velike važnosti edukacija i uvježbavanje ljudskih resursa. Također je očito da je postignuti nivo razvoja ovih tehnologija primjenjiv u raznim situacijama. Poznato je da su u zadnjih 30-tak godina mnogi projekti pokrenuti s ciljem razvoja podvodnih tehnologija na razini „fit-for-service“. Neki od ovih projekata dali su dobre rezultate, ali mnogi su se ugasiili uslijed velikih troškova i male fleksibilnosti. Dugo vremena su podvodne tehnike zavarivanja bile sinonim za „loše zavarivanje“ koje se karakteriziralo velikom



poroznosti, pukotinama, te slabom žilavosti i sklonosti pucanju. Nedostatak iskustva i znanja bio je prisutan kod tvrtki koje su izvodile neadekvatne zavarivačke procedure, koje nisu imale dobru uvježbanost zavarivača, ni adekvatne elektrode. S vremenom se taj status uvelike promijenio, a promijenio se i pristup projektima za podvodno zavarivanje s naglaskom na visok stupanj osiguranja kvalitete. Procedure i kvalifikacije za podvodno zavarivanje upotpunjene su u „AWS D3.6 Specifikaciji za podvodno mokro zavarivanje“, koja uzima u obzir faktore podvodnog okruženja. „AWS D3.6 Specifikacija za podvodno mokro zavarivanje“, prvi put je objavljena 1983. godine s ciljem utvrđivanja trenutnog stanja razvoja tehnologija povezanih s podvodnim zavarivanjem i osiguravanjem potrebnih zahtjeva koji se moraju ispuniti za podvodno zavarivanje.

Specifikacija se svakih pet godina revidira kako bi se aktualizirala s modernim tehnologijama. AWS D3.6 daje četiri klase zavara koje se označavaju s A, B, C i O. Klase su definirane na sljedeći način: klasa A zavara, uspoređuju se sa zavarima „izvan“ vode po vrijednostima određenih komparativnih svojstava i zahtjeva za testiranje. Klasa B zavara, za manje kritične primjene, kod kojih se mogu tolerirati niska duktilnost, veliki porozitet i visok stupanj diskontinuiteta. Klasa C zavara, koji se primjenjuju tamo gdje stupanj opterećenja nije primaran. Klasa O zavara, koji moraju zadovoljavati zahtjeve neke druge norme ili specifikacije. Za svaku od navedenih klasa zavara, AWS D3.6 također daje detalje o kriterijima nerazornih i razornih ispitivanja. Kako bi se zadovoljio kriterij osiguranja kvalitete, razvijene su brojne tehnike podvodnog ispitivanja. Mnoge od tih tehnika su se s vremenom „izgubile“, ali neke su se dalje razvijale i danas su primjenjive kod ROV („Remote Operated Vehicle“) i AUV („Autonomous Underwater Vehicle“). Kao što je već ranije napomenuto, konvencionalno ronjenje također je dalo veliki doprinos razvoju na tom području, pogotovo područje razvoja opreme i mješavina plinova. Nova ronilačka odijela omogućavaju ronioncu rad na većim dubinama s povećanom sigurnosti i radnom sposobnosti.

2. STANJE I RAZVOJ PODVODNOG ZAVARIVANJA

Podvodno zavarivanje se dijeli na dvije osnovne vrste: podvodno mokro i podvodno suho zavarivanje. Kod podvodnog mokrog zavarivanja električni luk, osnovni i dodatni materijal su u

doticaju sa vodom, kod podvodnog suhog zavarivanja mjesto zavarivanja je suho (izbacuje se voda sa mjesta zavarivanja).

Kod mokrog podvodnog zavarivanja najčešći je postupak ručno elektrolučno zavarivanje obloženim elektrodama (REL). MIG/MAG postupak zavarivanja punjenom žicom najviše se izvodio u državama bivšeg SSSR. Zavarivanje trenjem ima prednost jer je neosjetljivo kod primjene u većim dubinama pomoću ROV-a. Zavarivanje trenjem godinama se pod vodom uspješno primjenjivalo kao sredstvo pričvršćivanja anoda za „off-shore“ konstrukcije i brodove.

Podvodno suho zavarivanje izvodi se ili u vodonepropusnim komorama, ili se zavarivanje izvodi pod tlakom, oko konstrukcije koja se treba zavarivati montira se komora koja se ispunjava plinom pod odgovarajućim tlakom. REL, TIG i MIG/MAG postupci najčešće se koriste za postizanje kvalitetnih zavara, za primjenu pri velikim dubinama. Veliki broj istraživanja je posvećen objašnjavanju utjecaja visokog tlaka na ponašanje električnog luka te optimalnom podešavanju parametara zavarivanja.

Daljnji razvoj podvodnih aktivnosti uključuje podvodno zavarivanje laserom i tzv. „zavarivanje s vodenom zavjesom“, mehanizirani proces kod kojeg stožasti mlaz vode služi kao „zavjesa“ za zaštitu plina za zavarivanje. Taj se postupak primjenjivao u Japanu u kasnim 1990-tim godinama. Materijali koji se najčešće zavaruju su čelici za cjevovode i „off-shore“ konstrukcije. Nekoliko stotina popravaka izvedeni su na platformama ili brodovima, a dnevno se mogu pročitati mnogi izvještaji o postupcima podvodnog zavarivanja diljem svijeta.

Zavarivanje pod pritiskom je dobro usavršena, istražena i ispitana tehnologija. Sadašnja istraživanja provode se u svrhu osiguravanja parametara zavarivanja na većim dubinama, od 500 do 1000 m.

Ručno elektrolučno mokro zavarivanje je najfleksibilnija i najekonomičnija tehnologija za popravke i održavanje. Iako dubina i okolina predstavljaju ograničenja, s dobro uvježbanim zavarivačima moguće je postići odgovarajuću kvalitetu zavarivanja. Zbog dobre primjenjivosti i fleksibilnosti, REL postupak je najčešće korištena tehnika za podvodno mokro zavarivanje. Slika 1 prikazuje podvodno mokro zavarivanje.



Slika 1. Podvodno mokro zavarivanje [2]

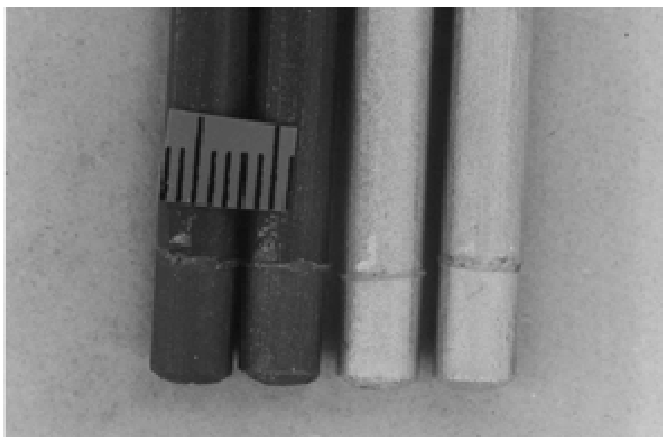
Da bi postigli prihvatljivu kvalitetu podvodnog zavarivanja, potrebno je zadovoljiti tri osnovne komponente.

Prvo, dobro uvježbani i educirani ronici-zavarivači su temelj aktivnosti podvodnog zavarivanja. Za vrijeme treninga ronica-zavarivača, posebno se naglašava sama tehnika zavarivanja. Upućuje se na to da nepravilna tehnika zavarivanja povećava udio vodika i porozitet u metalu zavara. Poznat problem u podvodnom zavarivanju je uključenje troske što je posljedica lošeg nagiba elektrode i veće brzine zavarivanja. Veliki utjecaj na sadržaj difuniranog vodika ima sama tehnika zavarivanja. Ronici-zavarivači moraju imati izvrsne vještine zavarivanja u realnim uvjetima i na različitim praktičnim zadacima kako bi se izbjegle pojave grešaka. Također se velika važnosti uz vještinu zavarivanja, pridaje i vještini ronjenja, a to dvoje je u pravilu jako teško postići [3].

Drugo, za uspostavljanje i održavanje električnog luka potrebne su kvalitetne elektrode. Do sada su razvijene obložene elektrode pokazale dobra operativna svojstva. Bitno je da obloge osiguraju jednostavno otklanjanje troske i što je moguće nižu razinu vodika. Što se tiče operativnih karakteristika, najbolje rezultate dale su rutilne elektrode. Također je bitno da vodonepropusna obloga „gori“ zajedno sa elektrodom, kako bi se spriječio direktan doticaj elektrode s vodom za vrijeme postupka zavarivanja. Treba naglasiti kako, osim smanjenja iznosa struje, kemijska agresivnost vode može oštetiti kompaktnost obloge, te uzrokovati smanjenje stabilnosti električnog luka ili čak prekid električnog luka. Zbog toga, veliku ulogu u proizvodnji visokokvalitetnih elektroda za podvodno mokro zavarivanje ima vodonepropusna obloga, koja ima funkciju zaštite od utjecaja vode kao i štetnih kemijskih sastojaka, te postojanost na visokim temperaturama električnog luka i jezgre

elektrode. Postoje mnogobrojne tvrtke i institucije koje se bave razvojem i proizvodnjom elektroda za podvodno mokro zavarivanje. Činjenica je da se ponekad elektrode za primjenu zavarivanja u suhom okruženju premazuju vodonepropusnom oblogom. Dokazano je da takav pristup podvodnom mokrom zavarivanju može prouzrokovati loše operativne karakteristike i slabu kvalitetu zavara. Veliku važnost imaju svojstva elektrode. Svojstva zavarenog spoja mogu se poboljšati modifikacijom obloga elektroda s aditivima, koji povećavaju stabilnost električnog luka ili koji smanjuju udio vodika. Za smanjenje udjela vodika potrebne su posebne metode zavarivanja kako bi se produljilo vrijeme hlađenja i napravila toplinska obrada prethodno nataljenih slojeva. Za visokočvrste čelike, ispitivanja su provedena na nehrđajućem čeliku i elektrodama na bazi nikla. Elektrode s dvostrukom oblogom pokazale su dobre rezultate, pogotovo zbog visoke kvalitete prevlaka koje sprječavaju penetraciju vode i degradaciju obloge, te mogućnosti održavanja visoke kvalitete zavara, slika 2. [3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14].

Treće, adekvatni izvori za zavarivanje moraju osigurati potrebne parametre zavarivanja. Ispravljači su konstruirani tako da imaju smanjen napon praznog hoda i primjerena svojstva za zavarivanje. Također se upotrebljavaju i tranzistorski izvori struje, i daljnja istraživanja upućuju na to da, sadašnji stadij razvoja tehnologije izvora struje omogućuje bolje uspostavljanje električnog luka i njegovu stabilnost. Intenzivno dinamičko ponašanje izvora struje potrebno je za ostvarivanje električnog luka u većim dubinama. Izvor struje za zavarivanje mora biti podešen za postupak podvodnog mokrog zavarivanja, ne samo zbog dobre stabilnosti luka već i zbog sigurnosti ronica-zavarivača [15,16,17,18,19,20].



Slika 2. Elektrode s dvostrukom nepropusnom oblogom razvijena na FSB-u, Sveučilište u Zagreb



Slika 3. B klasa zavara prema AWS D3.6 [4]

Zbog činjenice da je vrlo teško pronaći visokokvalitetnog ronioca-zavarivača te zbog ostalih nedostataka mokrog zavarivanja, pojavila su se alternativna rješenja u obliku podvodnog „točkastog zavarivanja“. Novi dodatni materijal i kontrolni uređaji upotpunjavaju tradicionalne zavarivačke vještine potrebne za podvodno mokro zavarivanje. Elektrode protaljuju materijal, kroz kontrolni se uređaj provodi struja potrebna za taljenje elektrode i stvaranje točkastog zavara, tako nastaje zavar, postupak je djelom sličan principu spajanja zakovicama. Za ovaj postupak potreban je poseban kontrolni uređaj s odgovarajuće podešenim parametrima, slika 4. Kod ove operacije zavarivanja, nema potrebe da ronioc-zavarivač

kontrolira parametre kao što su brzina zavarivanja, kut nagiba elektrode, duljina električnog luka, itd., tj. sve one parametre koji se moraju kontrolirati u uvjetima konvencionalnih metoda zavarivanja. Također nije potreban dobar vizualan pregled postupka zavarivanja budući da ronioc-zavarivač ne mora nadgledati luk kao što je to potrebno u konvencionalnim uvjetima. Iako je vizualnost smanjena, kvaliteta zavara i dalje je visoka. Iako je ovaj postupak dobra zamjena za REL postupak zavarivanja, on ima svoja ograničenja i nije u mogućnosti potpuno zamijeniti REL zavarivanje [21]. Slika 5 pokazuje zavar izveden podvodnim točkastim zavarivanjem.



Slika 4. Kontrolni sistem za podvodno „točkasto“ zavarivanje [21]



Slika 5. Podvodni zavar, «točkasto» zavarivanje

Od velike važnosti je dobra koordinacija između ronioca-zavarivača i tima na površini. Kod podvodnog zavarivanja i rezanja postoji velika

opasnost od električnog šoka i eksplozije. Zbog toga je vrlo bitna pouzdana komunikacija kako bi se održala sigurnost zavarivača i efikasnost rada. S



obzirom na potrebnu pripremu zavarenog spoja, potrebno je osigurati zadovoljavajuće visokokvalitetne pripreme spoja koristeći pri tom podvodne brusilice i ostale odgovarajuće alate. Ukoliko su zadovoljeni svi aspekti, moguće je izvesti klasu A zavara, prema AWS D3.6:M na nelegiranom konstrukcijskom čeliku. Bitno je napomenuti da je nekoliko tvrtki prijavilo klasu A zavara postignutu u realnim i laboratorijskim uvjetima [22]. Najveći dio vremena i truda, u cjelokupnom razvoju podvodnog mokrog zavarivanja, oduzeli su razvoj elektroda i opreme za podvodno zavarivanje. U mnogim su zemljama organizirani tečajevi i otvoreni centri za obuku ronioca-zavarivača za tehniku podvodnog mokrog zavarivanja.

Postupak mokrog REL zavarivanja danas je jako rasprostranjen i godinama se koristi kod popravaka „off-shore“ platformi, uključujući i one koje su pretrpjele štete uzrokovane elementarnim nepogodama, kao što su uragani ili štete nastale u ratu. U budućnosti će se tražiti popravljane konstrukcija od čelika s povišenom i visokom čvrstoćom u dubokim vodama. Zbog visokog stupnja difundiranja vodika, postoji opasnost od pojave loma uzrokovanog povećanim udjelom vodika, a ona raste s povećanjem ekvivalenta ugljika. Prema tome javlja se potreba za razvojem obloga elektroda kao i sofisticiranih tehnologija izvora struje.

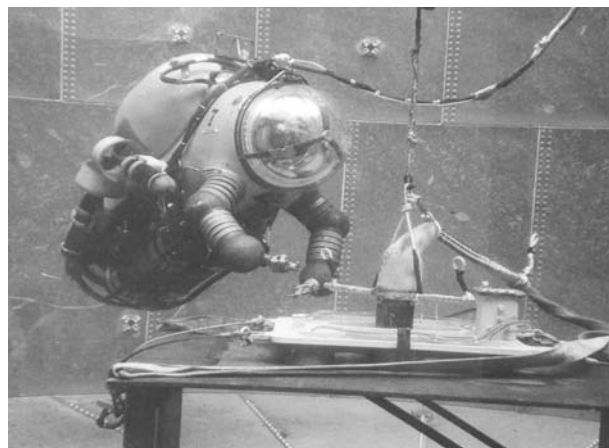
Podvodno zavarivanje praškom punjenim žicama istraživalo se u svrhu popravka cjevovoda i trupa broda. Izvedba praškom punjenih žica vrlo je bitna kod kvalitete zavarivanja. Ovaj postupak je poluautomatiziran, a ukoliko je primjena prikladna moguće ga je potpuno automatizirati [23,24].

Osim postupka podvodnog REL zavarivanja, dobro razvijen postupak je i podvodnog zavarivanja trenjem (slika 6). Do sada je primjena podvodnog zavarivanja trenjem bila ograničena na primjenu u plitkim vodama kao što je anodno pričvršćivanje, vanjski prekidi, itd. Katastrofa podmornice Kursk na 106m dubine, pokazala je značajnu primjenu podvodnog zavarivanja trenjem, gdje podvodno REL zavarivanje nije moglo osigurati takvu kvalitetu zavara koja se zahtijevala.

Razvijena je i posebna oprema, uključujući posebna atmosferska ronilačka odijela koja su robotizirana i omogućavaju ronioncu bolje radne uvjete i sigurnost. Glavni parametri podvodnog zavarivanja su rotacija, vrijeme trajanja i tlak, slika 7. Zavarivanje trenjem spada u postupke zavarivanja tlakom, ne dolazi do taljenja materijala. Linija „taljenja“ i zona utjecaja topline su relativno male u usporedbi s elektrolučnim postupcima zavarivanja. Čvrstoća zavara je jednaka ili čak veća od čvrstoće osnovnog materijala, a problemi kao što su uključine i poroznost zavara su isključene. Međutim, postupak je osjetljiv na ekvivalent ugljika, povećanje CE rezultira povećanjem tvrdoće [25].



Slika 6. Podvodno zavarivanje trenjem [25]



Slika 7. Atmosfersko ronilačko odijelo [25]

Uz tehnike zavarivanja, primjenjuju se i tehnike mehaničkog spajanja. Sofisticirani podvodni hidraulički sistemi razvijeni su za mehaničko spajanje cjevovoda, a mogu se primjenjivati za popravak cjevovoda te upravljati s površine.

Priprema površine vrlo je bitna kod ovog postupka, cijev se mehanički obrađuje i nakon toga spaja s posebnim obujmicama. Priprema cijevi prikazana je na slici 8.



a)

b)

Slika 8. Sistem za podvodno mehaničko spajanje cjevovoda

a) Mehanička obrada i priprema cjevovoda

b) Kompletni sistem u realnim uvjetima, dubina vode 100 m

Primjena ROV u podvodnom zavarivanju istražuje se kroz nekoliko projekata. Kao već ranije napomenuto, Europski projekt ROBHAZ razvio je podvodno robotizirano zavarivanje trenjem. Neki od projekata kao npr. ARM provedeni su u svrhu podvodnog zavarivanja. Za podvodno elektrolučno zavarivanje potreban je sofisticirani kontrolni software koji bi osposobio pozicije uređaja i kontrolirao parametre zavarivanja [26].

3. RAZVOJ MJEŠAVINA PLINOVA ZA RONJENJE

Izvođenje podvodnih operacija zahtijeva dugotrajni boravak na mjestu izvođenja ispitivanja koje je najčešće locirano na velikim dubinama, zbog toga je potrebna dobra fizička kondicija ronioca kako bi na tim dubinama mogao izvoditi radove uz zadržanu koncentraciju. Ljudsko tijelo nije predodređeno za boravak u takvim uvjetima tlaka, pa je s toga teže zadovoljiti tražene zahtjeve. Disanje na velikim dubinama pod takvim pritiskom uzrokuje niz promjena u organizmu koje se reflektiraju kao raznorazni poremećaji ili mogu čak,

u krajnjem slučaju, rezultirati smrću. Inhaliranja zraka ili nekih drugih mješavina plinova za ronjenje uzrokuje jedan od najpoznatijih efekta tzv. DSC („Decompressing Sickness“). Ostale pojave koje mogu nastupiti poznate su pod nazivima; „toksičnost kisika na središnji živčani sustav“, „narkoza uzrokovana dušikom“, „toksičnost pluća kisikom“ i „hipoksija“, s njima su upoznati samo stručnjaci, iako je efekt tih pojava gotovo jednako štetan kao i DSC. Kod amaterskog ronjenja ovakve se opasnosti izbjegavaju jednostavnim izbjegavanjem većih dubina. Očito je da takve metode nisu izbor u slučaju komercionalnog ronjenja. Osim saturacijskog ronjenja koje uvelike rješava ovaj problem, ali također uzrokuje visoke troškove, u novije vrijeme na raspolaganju su raznorazne plinske mješavine za ronioce koje se koriste na raznim dubinama s ciljem obavljanja eksperimentalnog rada. Za tehničko i komercionalno ronjenje, čisti kisik se obično zamjenjuje s nekim od mješavina plinova prikazanih u tablici 1.

Ime mješavine	Kompozicija
Nitrox	kisik i dušik
Heliox	helij i kisik
Heliar	helij i zrak, udio kisika manji od 21 %
Helitrox	helij i Nitrox, udio kisika veći od 21 %
Trimix	helij, dušik i kisik
Hydreliox	vodik i helij, ravnoteža kisika manja od 4 %
Hydrox	vodik i kisik, ravnoteža kisika manja od 4 %
Neox	neon i kisik

Tablica 1. Mješavine plina najčešće korištene u komercijalnom ronjenju (zavarivanju)



Koncept ovakvog pristupa uvijek je isti: sa stajališta ronioca i njegove sigurnosti – smanjenje povećanog udjela dušika u krvi, sprječavanje nastanka narkoze uzrokovane dušikom, smanjenje toksičnosti kisika, poboljšavanje mentalne pribranosti ronioca, a sa stajališta troškova za podvodne aktivnosti cilj je produljivanje vremena koje roniod može provesti u obavljanju radova i postizanje što većih dubina, te smanjenje vremena dekompresije. Međutim, nabrojani uvjeti su usko povezani i dosta je teško specificirati optimalnu mješavinu. Na primjer, povećan udio kisika u mješavini smanjuje vrijeme dekompresije, ali ujedno povećava opasnost od toksičnosti kisikom. Također je smanjena dubina ronjenja. U dubinama od otprilike 120 m, mješavina plina bi trebala sadržavati 10 % kisika, ali ukoliko bi roniod pokušao roniti na tu dubinu koristeći navedenu mješavinu, na dubini od nekoliko metara on bi se onesvijestio i umro. Taj će efekt nastupiti zbog toga jer je za disanje pod tim tlakovima nedovoljna mala količina kisika. Pri manjim tlakovima udio kisika mora biti znatno veći, ovisno o stvarnom tlaku. Ljudsko tijelo za održavanje vitalnih funkcija mora imati određenu količinu kisika. Taj udio kisika je rezultat u postocima u mješavini plina i tlaku na kojem se odvija ronjenje. Uz to, dubina ronjenja definira potrebnu mješavinu. Za vrijeme spuštanja na određenu dubinu, koriste se posredne mješavine plina koje se optimirano razlikuju od onih koje se primjenjuju na određenoj dubini na kojoj se radi. Također se pri izronu ne koriste mješavine plinova koje se koriste na radnim dubinama.

Primjena Nitrox mješavina danas je uobičajena u praksi za provođenje podvodnih aktivnosti na manjim dubinama. Koncept korištenja Nitrox mješavina ne povećava udio kisika, već smanjuje udio dušika u mješavini koja se udiše. Taj koncept je od velike važnosti, budući da je dušik uzrok mnogih problema ronioca pri manjim dubinama urona (uzrokuje narkozu dušikom i kako se rastvara u tkivu vodi do DSC). U osnovi, Nitrox mješavinu čini bilo koja mješavina koja u sebi sadržava više od 21 % kisika. Korištenjem Nitrox mješavina za ronjenje produžava se vrijeme boravka ronioca na određenoj dubini u usporedbi sa ostalim mješavinama. Međutim, ne smiju se zanemariti moguće poteškoće. Korištenje Nitroxa ne eliminira rizik od DCS-a., ukoliko se roniod ne pridržava ograničenja dubine i vremena koje smije provesti na tim dubinama. Ukoliko se ne poštuju pravila, može se pojaviti toksičnost kisika. Općenito, toksičnost kisikom je glavni ograničavajući faktor. Kisik je neophodan za održavanje vitalnih funkcija, ali preveliki udio kisika može štetno utjecati na

ljudski organizam, uzrokujući čak i smrt. Toksičnost može nastupiti u 2 oblika: kao toksičnost pluća ukoliko se Nitrox mješavine udišu u dužem vremenskom periodu, ili kao CNS toksičnost ukoliko je roniod izložen djelomično visokim pritiscima kisika. Kalkulacije koje se odnose na Nitrox mješavine nisu previše kompleksne, ali moraju biti poznate osnovne procedure za kalkulaciju mješavina plinova za ronjenje. Kalkulacije su bazirane na zakonima plinova (Opći plinski zakon, Charles'-ov zakon, Boyle-ov zakon, Henry-ev zakon i Dalton-ov zakon). Osim ručne kalkulacije za plan ronjenja, danas je dostupan software koji se koristi za proračun podataka za ronjenje.

Trimix mješavina je druga po redu mješavina plinova koja se koriste pri komercionalnom ronjenju. Ova se mješavina uglavnom koristi na dubinama većim od 40 m, i sadrži dušik, kisik i helij. Trimix se koristi od sredine prošlog stoljeća, a njegove prednosti odmah su prepoznate zajedno s njegovim nedostacima.

Glavni razlog korištenja mješavina koje sadrže helij su redukcija udjela dušika u mješavini, smanjenje vremena dekompresije, smanjenje mogućnosti pojave narkoze uzrokovane dušikom, smanjenje gustoće inhaliranog plina u svrhu retencije ugljičnog dioksida i poboljšavanje sigurnosti zavarivača. Priprema mješavine je prilično kompleksna u usporedbi s pripremom Nitrox mješavine. Zbog povećane vodljivosti uzrokovane helijem, bitno je korištenje drugih plinova za popunjavanje (kao npr. argon). Kompleksne ronilačke procedure gdje se primjenjuje helij su primarno povezane s poteškoćama koje se javljaju s povećanjem dubine, kada se koristi puno opreme. Dublji zaroni zahtijevaju veće iskustvo, vještinu i više znanja ronioca.

Uz prednosti, Trimix (helij) ima također svojih nedostataka. Glavni problem ronjenja sa plinskom mješavinom koja sadrži helij je HPNS („High Pressure Neurological Syndrome“). Na nastanak tog stanja upućuju grčevi i gubitak koordinacije pokreta, a pojavljuje se na dubinama većim od 120 m. Drugi problem koji se može pojaviti, iako je dosta rijedak, je pojava grčenja zglobova, tj. pojava ukočenosti slična artritisu, a koja može nastupiti kod urona. Budući da helij ima malu molekularnu masu, 2, 6 puta će brže izaći iz tkiva za razliku od dušika. Zbog toga je potrebno započeti dekompresiju na većim dubinama nego što je slučaj s korištenjem zraka. Vrijeme dekompresije može se smanjiti korištenjem Nitroxa i kisika na manjim dubinama. Budući da su kalkulacije Trimixa više



kompleksne nego kod Nitroxa, upotrebljavaju se objavljene tablice podataka ili software paketi kao što su npr. Deco Planner, Abbys, GAP ili slični. Bazirano na unesenim parametrima, dobiju se svi ostali potrebni parametri. Međutim uvijek je moguća ručna kalkulacija. Ukoliko se primjenjuje ručna kalkulacija, koriste se isti principi kao kod Nitrox mješavina. Samo su dvije osnovne mješavine za podvodne aktivnosti ovdje navedene i kratko opisane. Druge mješavine se rjeđe koriste, ili se koriste samo u eksperimentalne svrhe. Potrebno je izvrsno poznavanje teorije ronjenja, zajedno sa strogim propisima svih sigurnosnih procedura i zakona.

4. ZAKLJUČAK

U podvodnom zavarivanju i ispitivanju, potreban je kontinuiran i znanstveni pristup radu kako bi se dobili rezultati koji se mogu primijeniti u realnim uvjetima i na praktičnim zadacima. Za postizanje visoke kvalitete „mokrih“ zavara zaslužan je razvoj novih tehnologija zavarivanja, izvora struje, ronilačke opreme i dodatnog materijala, kao i bitna poboljšanja u edukaciji zavarivača. Podvodno mokro zavarivanje, zajedno s podvodnim ispitivanjem zadobili su kreditibilnost i profesionalno

su prihvaćeni. Razvoj alternativnog podvodnog zavarivanja ili ispitivanja pronalazi se u raznoraznim autonomnim ili daljinski upravljanim sistemima, ali s posebnim naglaskom na činjenicu da je u nekim situacijama nemoguće zamijeniti ronioce. Podvodno mokro zavarivanje i ispitivanje su od velike važnosti i bitan su alat za održavanje i popravke pomorskih objekata. Štoviše, kroz razvoj tehnologije i opreme, njihova se primjena dalje usavršava, pogotovo uz pomoć ROV- a i AUV-a. Istraživanja sadašnjih projekata prisutna su na području usavršavanja i edukacije ronioaca, na razvoju dodatnih materijala za zavarivanje ugljičnih čelika, visokočvrstih i nehrđajućih čelika, na razvoju tehnika mokrog zavarivanja, na razvoju adekvatnih izvora struje, na razvoju opreme za nerazorna ispitivanja, na razvoju prikladne organizacijske sheme za ronioce i tima na površini, na daljnjoj automatizaciji i predstavljanju ROV i AUV, na tehnologiji na većim dubinama, također na standardizaciji i certifikaciji. U Hrvatskoj su R&D aktivnosti provedene na svim tim područjima istraživanja i očekuje se da postignuti rezultati imaju potpunu primjenjivost u realnim uvjetima.

5. LITERATURA

- [1] D. Bingham, T. Drake, A. Hill, R. Lott, The Application of Autonomous Underwater Vehicle Technology in the Oil Industry-Vision and Experiences, FIG XXII International Congress Washington, 2002.
- [2] M. Pett, Wet Welding-Significant Advances in Quality, Welding and Metal Fabrication, 4/2000.
- [3] S. Kralj, Z. Kožuh, I. Garašić, Electrodes for Underwater Wet Welding, Proceedings of International Conference Welding&Joining 2000, Tel Aviv, Israel, 2000.
- [4] S. Kralj, Z. Kožuh, I. Garašić, L. Dorn, Influence of the Environment on the Parameters in Underwater Wet Welding, Welding and Cutting, 2/2003.
- [5] M. D. Rowe, S. Liu, T. J. Reynolds, The Effect of Ferro-alloy Additions and Depth on the Quality of Underwater Wet Welds, Welding Journal, August 2002.
- [6] J. Bartzsch, S. Daniel, B. Bouaifi, U. Draugelates, Investigation of Underwater Welding of Stainless Steels, Stainless Steel World Conference, 1999.

- [7] R. T. Brown, K. Masabuchi, Fundamental Research on Underwater Welding, Welding Journal, June, 1975.
- [8] D. Ogden, T. Joos, Specification Stirrs Underwater Electrode Development, Welding Journal, August 1990.
- [9] S. Liu, T.J Reynolds, Innovative Consumables for Quality Underwater Wet Welds, Underwater Intervention, New Orleans, 2002.
- [10] R. C. de Medeiros, S. Liu, A Predictive Electrochemical Model for Weld Metal Hydrogen Pickup in Underwater Wet Welds, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1998.
- [11] P. Szelagowski, Underwater Welding-Present State and Developmental Trends, Welding & Cutting, 2/1991.
- [12] T. C. West, G. Mitchell, E. Lindberg, Wet Welding Electrode Evaluation for Ship Repair, Welding Journal, August 1990.
- [13] A. Sanchez Osio, S. Liu, D.L.Olson, S. Ibarra, Underwater Wet Welding Consumables for Offshore Applications, Proceedings of the 12th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1993.



- [14] T. C. West, W. E. Mitchell, R. I. Murray, Effects of Water Temperature on Cracking of Wet-Welded Carbon Steel, *Welding Journal*, October 1996.
- [15] ..., Electric Arc Welding Power Sources, NEMA EW 1-1988, National Electrical Manufacturers Association, Washington, USA.
- [16] K. Schmidt, G. Kozig, J. A. S. Ross, H. L. Green, Safety of Wet Welding with Increased Open Circuit Voltages, GKSS Report 91/E/30 1991., IIW Doc. No. SCUW 151-94.
- [17] P. Hiltunen, Underwater MMA Welding Using Covered Electrodes, *Kemppi Pronews* 3/2002.
- [18] I. M. Richardson, A Review of Underwater Welding Processes, IIW Doc. SCUW 202-3.
- [19] P. Hart, I.M. Richardson, J.H. Nixon, The Effect of Pressure on Electrical Performance and Weld Bead Geometry in High Pressure GMA Welding, IIW Doc. SCUW 187-00.
- [20] R. Murray, Underwater Electrical Safety for Divers, *Underwater*, July/August, 2004.
- [21] ..., Revolutionary New Welding System Removes Welding Skills, www.specialwelds.com, Newsletter 2003.
- [22] ..., Class A Repair for Offshore Platform, *Underwater Contractor International*, July/August, 2003.
- [23] K. Yushchenko, Yu. Gretsii, Underwater Wet Arc Semi-Automatic Welding in Repair of Pipelines, Int. Conference on Pipeline Repairs, March 5-6 2001, Australia.
- [24] Yu. Gretsii, V. Ya. Kononenko, Wet Mechanized Underwater Welding with a Self-Shielding Flux-Cored Wire, Int. Conf. on Underwater Welding, 1991, New Orleans, USA.
- [25] R. Murray, J. Couch, Underwater Friction Stud Welding for Military and Commercial Use, *Underwater*, Jan/Feb 2004.
- [26] T. Larkum, *Advanced Robotics Underwater*, General Robotics Limited, 2003.
- [27] O. Førlø, H. Meidell, A Review of NDT in the Offshore Scene, Proceedings of 7th European Conference on Non-Destructive Testing, Copenhagen, 1998.
- [28] D. Markučić, Development of Ultrasonic Underwater Inspection Methodology, Doctoral Dissertation, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb, 1998.
- [29] L. Goldberg, Diversity in Underwater Inspection, *Materials Evaluation*, March 1996.
- [30] S. Kralj, Z. Kožuh, Z. Belinić, I. Garašić, Underwater Activities in Maintenance of Naval Objects, Proceedings of International Conference on Oil and Gas Engineering, Zadar, Croatia, 2003.
- [31] A. Hansen, J. Hatlø, Remotely Operated Ultrasonics for Sub-Sea Applications, Proceedings of 7th European Conference on Non-Destructive Testing, Copenhagen, 1998.

CHARACTERISATION OF LOCAL GRAIN SIZE VARIATION OF WELDED STRUCTURAL STEEL

KARAKTERIZACIJA PROMENE LOKALNE VELIČINE ZRNA NA ZAVARENIM KONSTRUKCIONIM ČELICIMA

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK / UDC: Weld World (2014) 58:491–497;

DOI 10.1007/s40194-014-0132-0

Rad primljen / Paper received:

Septembar 2016.

Adresa autora / Author's adresse :

* Pauli Lehto pauli.lehto@aalto.fi

¹ Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, Aalto University, P.O. Box 12200, FIN-00076 Aalto, Finland

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

Key words: Grain size. Measurement. Structural steels. Hardness. Microstructure. Weld metal

Ključne reči: Veličina zrna. Merenje. Konstrukcioni čelik. Tvrdća. Mikrostruktura. Metal šava

Abstract

Previously, it has been shown that the grain size distribution plays an important role in the mechanical properties of welded steel. In the previous investigation, the volume-weighted average grain size has been shown to capture the influence of grain size distribution, resulting in a better fitting Hall–Petch relationship between grain size and hardness. However, the previous studies exclude the effects arising from local variation in grain size. In this paper, the grain size measurement methods are extended for the characterisation of the local grain size variation, which is significant for welded joints and can have an adverse effect on mechanical properties.

The local gradient of grain size variation and its dependency on measurement direction are considered. In addition, examples of grain size and hardness variation are shown for S355 base metal and two weld metals, and characteristic differences are highlighted and discussed. The coarse-grained areas of a heterogeneous microstructure are found to have lower hardness than fine-grained areas. However, the surrounding microstructure, i.e. local grain size gradient, has an influence on the measured hardness values.

1 Introduction

Microstructural characterisation of engineering materials is a necessity for understanding the relationships between microstructural quantities and mechanical properties. Grain size is one of the fundamental microstructural quantities and correlates with several properties, such as hardness, stress–strain curve and fatigue strength [1–7]. Based on the work of Hall [8] and Petch [9], a relationship was found between grain size and the

Rezime

Ranije je pokazano da distribucija veličine zrna igra važnu ulogu vezanu za mehanička svojstva zavarenog čelika. U prethodnom istraživanju, zapreminski procenjena prosečna veličina zrna je pokazala uticaj distribucije veličine zrna, što je rezultovalo u boljem ispunjenju Hall–Petch-og odnosa između veličine zrna i tvrdoće. Međutim, prethodne studije isključuju učinke koji proizlaze iz lokalnih varijacija u veličini zrna. U ovom radu, metode merenja veličine zrna su proširene na karakterizaciju varijacije lokalne veličine zrna, što je značajno za zavarene spojeve jer mogu imati negativan uticaj na mehanička svojstva.

Razmatraju se lokalni gradijent varijacije veličine zrna i njegova zavisnost od smera merenja. Osim toga, primeri veličine zrna i varijacije tvrdoće su prikazani za S355 kao osnovni materijal i dva šava metala, a karakteristične razlike su istaknute i o njima se diskutuje. Za područja krupnozrne heterogene mikrostrukture utvrđeno je da imaju manju tvrdoću od sitnozrnog područja. Međutim, okružujuća mikrostruktura, t.j. gradijent lokalne veličine zrna, ima uticaj na izmerene vrednosti tvrdoće.

1. Uvod

Mikrostrukturna karakterizacija inženjerskih materijala je neophodna za razumevanje odnosa između mikrostrukturnih veličina i mehaničkih svojstava. Veličina zrna je jedna od osnovnih mikrostrukturnih veličina i u korelaciji je sa nekoliko svojstava, kao što su tvrdoća, kriva naprezanje-deformacija i zamorna čvrstoća [1-7]. Zasnovan na radu Hall [8] i Petch [9], pronađen je odnos između

mechanical properties of steel. For yield strength, this relationship is:

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{-1/2} \quad (1)$$

where σ_0 is the lattice friction stress required to move individual dislocations, k is a material-dependent constant known as the Hall–Petch slope, and d is the average grain size [10]. As the Hall–Petch relationship is related to the measure of grain size, the correct definition of grain size is crucial. The most commonly reported microstructural measure in literature is the average grain, even though there is a large variety of, e.g. ASTM grain size measurement methods, available [11]. Moreover, orientation imaging microscopy gives the operator a large degree of freedom for defining the measurement methodology and parameters such as step size, grain boundary misorientation criteria and filtering of the data [12–14]. For these reasons, an extensive interlaboratory round-robin [15] was carried out in order to define the grain size measurement methodology for the ISO 13067 [16] standard. In addition to measurement of average grain size, other material-specific factors such as differences in phase structure and grain size distribution need to be considered. For heterogeneous materials, the grain size distribution is of particular interest since it has been shown to influence the mechanical properties [10, 17–22]. Improved grain size measurement methods are thus required to enhance the understanding between grain size distribution and mechanical properties [11]. Accurate description of the microstructural heterogeneity is also required for the mesoscale modelling of material behaviour [12]. Welds are an extreme case of heterogeneity since it is present both in macroscopic scale across the joint and in microscopic scale within a single zone; see Fig. 1. The grain size characterisation of heterogeneous weld metals was studied by Lehto et al. [23]. The grain size measurements revealed that structural steel weld metals exhibit a large variety of grain size distributions that are noticeably broader than those of the base metal. To capture the influence of grain size distribution, the volume-weighted grain size measurement was utilised. It was shown that the Hall–Petch relationship's dependence on grain size distribution is eliminated when the volume-weighted average grain size (d_v) is used:

$$\sigma = \sigma_0 + kd_v^{-1/2} = \sigma_0 + kd_v^{-1/2} \left(1 + f \frac{\Delta d}{d}\right), \quad (2)$$

veličine zrna i mehaničkih svojstava čelika. Za napon tečenja, ovaj odnos je:

gde je σ_0 napon trenja rešetke potreban za kretanje pojedinačnih dislokacija, k je konstanta zavisna od materijala poznata kao Hall-Petch nagib, a d je prosečna veličina zrna [10]. Kako je Hall-Petch odnos vezan za meru veličine zrna, ispravna definicija veličine zrna je od ključnog značaja. Najčešće saopštavana mikrostrukturalna mera u literaturi je prosečna veličina zrna, iako postoji veliki izbor metoda na raspolaganju, npr ASTM metoda merenja veličine zrne [11]. Osim toga, mikroskopija sa orijentacijom slike, daje operateru veliki stepen slobode za definisanje metodologije merenja i parametara kao što su veličina koraka, kriterijumi neorijentisanosti granica zrna i filtriranje podataka [12-14]. Iz tih razloga, sprovedena su opsežna međulaboratorijska ispitivanja [15] kako bi se definisala metodologija merenja veličine zrna za ISO standard 13067 [16]. Uz merenje prosečne veličine zrna, druge faktore specifične za materijal, kao što su razlike u strukturnim fazama i distribucija veličine zrna, treba uzeti u obzir.

Kod heterogenih materijala, distribucija veličine zrna je od posebnog interesa jer se pokazalo da utiče na mehanička svojstva [10, 17-22]. Poboľšane metode merenja veličine zrna traže da se poboljša razumevanje između distribucije veličine zrna i mehaničkih svojstava [11]. Precizan opis mikrostrukturnih heterogenosti je takođe potreban za međuskalno modeliranje ponašanje materijala [12]. Zavareni spojevi su ekstremni slučaj heterogenosti jer je ona prisutna i u makroskopskoj skali i na mikroskopskom nivou unutar jedne zone; vidi sl. 1. Karakterizacija veličine zrna heterogenih metala šava su proučavali Lehto i dr. [23]. Merenja veličine zrna su pokazala da metali šava od konstrukcionih čelika pokazuju veliki izbor distribucije veličine zrna koji je znatno veći od onih osnovnog materijala. Da bi se snimio uticaj distribucije veličine zrna, merenje veličine naglašenog zrna se koristi. Pokazano je da se zavisnost Hall-Petch odnosa od distribucije veličine zrna ne može primeniti a kada se koristi zapreminski procenjena prosečna veličina zrna (d_v) onda je:

where f is a constant describing the relation between average and volume-weighted average grain size and $\Delta d/d$ is the relative grain size dispersion. The equation is reduced to the original Hall–Petch Eq. (1) in the theoretical case that all grains are the same size. Furthermore, if samples with similar grain size dispersion are compared the original Hall–Petch, Eq (1) is applicable.

While the previous work covered the microstructural characterisation of volume-weighted average grain size and its relation to the grain size distribution of welded structural steel, it did not provide further insight into the inherent large local variation of grain size. The aim of this paper is to characterise the local variation of grain size in welded joints and investigate how it influences the mechanical properties using hardness measurements. The point-sampled grain size measurement method is extended for the characterisation of local grain size variation both in numerical and visual form. The numerical approach is to present a moving average of grain size using line probes in different directions. In visual approach, the characterisation of grain size variation is further developed by substituting grain size (d) with the Hall–Petch grain size parameter ($d-0.5$) in order to have a linear scale for grain sizedependent mechanical properties. The local variation of grain size is also compared to hardness measurement results.

2. Measurement of local grain size variation

Grain size is measured using the point-sampled intercept length method [24, 25]. The method is similar to the commonly used linear intercept method [26]; however, the measurements are carried out at random points instead of being measured along pre-determined lines. The method has previously been used for the characterisation of grain size distribution in welded structural steel [23]. Here, the method is extended for the characterisation of local grain size variation by including measurement direction-based averaging. In addition, moving averages of grain size are calculated across the microstructure. Figure 2 shows a flow chart of the measurement procedure using a fictional single-phase microstructure. Firstly, the grain size is measured for individual grains at random points that hit the grain interior (Fig. 2 (1a)). The procedure is repeated a large number of times for one measurement direction, resulting in densely measured grain size for the individual grain (Fig. 2 (1b)).

gde je f konstanta koja opisuje odnos između srednje vrednosti i zapreminski procenjene veličine zrna i $\Delta d / d$ je relativna disperzija veličina zrna. Jednačina se svodi na originalnu Hall-Petch jedn. (1) u teorijskom slučaju da su sva zrna iste veličine. Osim toga, ako se uzorci sa sličnom disperzijom veličine zrna su u odnosu na originalni Hall-Petch, jednačina (1) je na snazi.

Dok je dosadašnji rad pokrivaio mikrostrukturnu karakterizaciju zapreminski procenjene prosečne veličine zrna i njen odnos prema distribuciji veličine zrna kod zavarenih konstrukcionih čelika, nije pružio dublji uvid u unutrašnje velike lokalne varijacije veličine zrna. Cilj ovog rada je da se okarakterišu lokalne varijacije veličine zrna kod zavarenih spojeva i istraživanje kako utiču na mehaničke osobine korišćenjem merenja tvrdoće. Metoda merenja tačkastim uzorkovanjem je proširena na karakterizaciju varijacija lokalne veličine zrna kako u numeričkom tako i u vizuelnom obliku. Numerički pristup je da predstavi kretanje prosečne veličine zrna korišćenjem linijskih sondi u različitim pravcima. Kod vizuelnog pristupa, karakterizacija varijacije veličine zrna se dalje razvija zamenom veličine zrna (D) sa parametrom veličine zrna Hall-Petch ($d-0,5$) da bi se dobila linearna skala za mehanička svojstva zavisna od veličine zrna. Lokalna varijacija veličine zrna je takođe upoređena sa rezultatima merenja tvrdoće.

2. Merenje varijacije lokalne veličine zrna

Veličina zrna se meri metodom tačkastog uzorkovanja prekinutih dužina [24, 25]. Metoda je slična najčešće korišćenoj linearnoj prekidnoj metodi [26]; međutim, merenja se obavljaju na slučajnim tačkama umesto da se mere po unapred određenim linijama. Metoda je prethodno korišćena za karakterizaciju distribucije veličine zrna na zavarenim čeličnim konstrukcijama [23]. Ovde je metoda proširena na karakterizaciju varijacije veličine lokalnih zrna uključujući merenja na bazi usmerenog preseka. Osim toga, kretanja prosečnih veličina zrna se obračunavaju preko mikrostrukture. Slika 2 prikazuje dijagram toka postupka merenja korišćenjem izmišljene jednofazne mikrostrukture. Prvo, veličina zrna se meri za pojedinačna zrna u nasumičnim tačkama koje su pogodile unutrašnjost zrna (Sl. 2 (1a)). Postupak se ponavlja veliki broj puta za jedan smer merenja, što je rezultiralo u gusto merenim veličinama zrna za pojedinačna zrna (Sl. 2 (1b)).

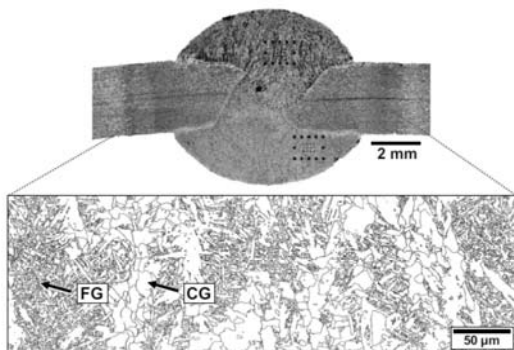
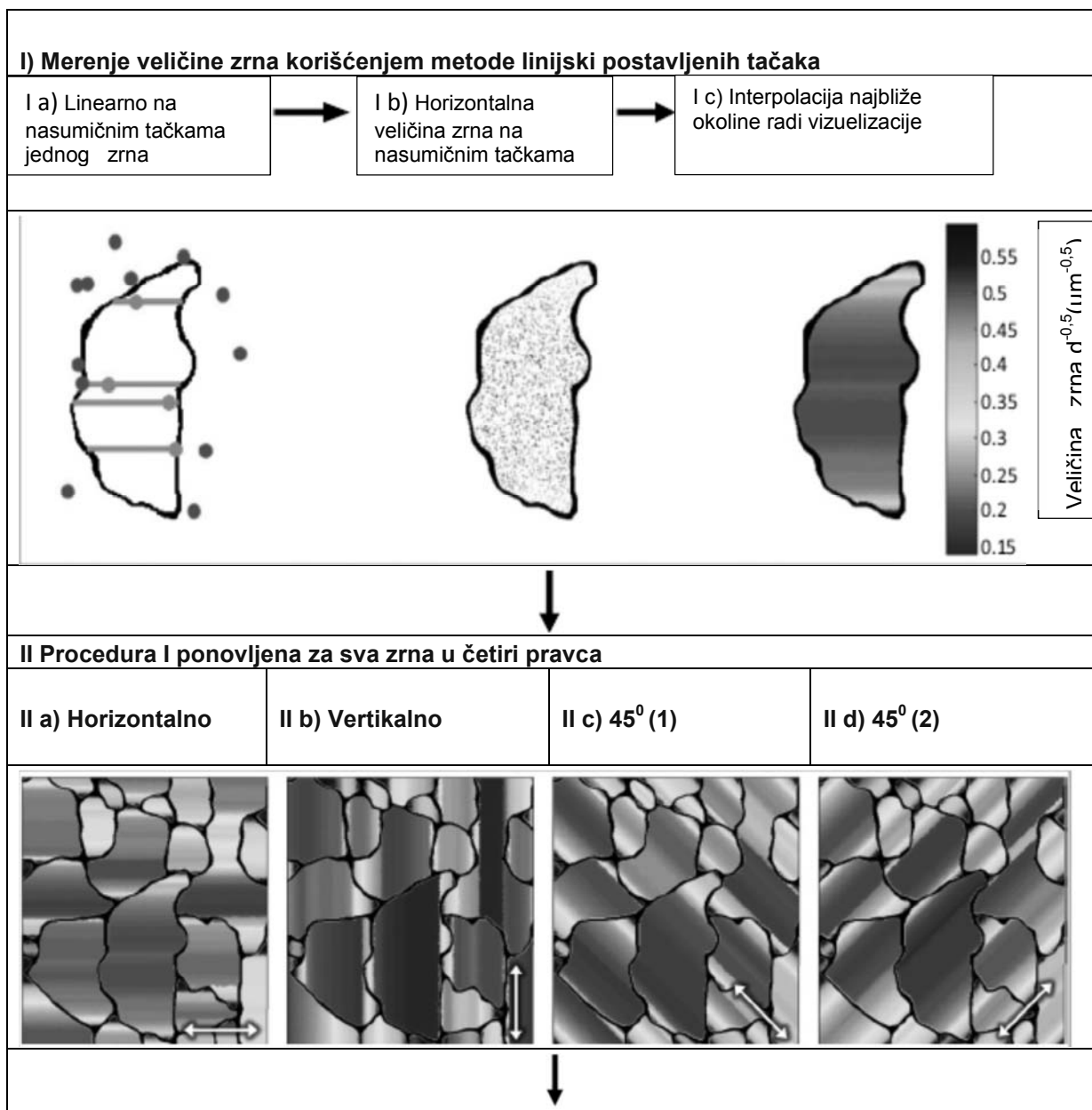


Fig. 1 Macro section of an arc welded joint (CV.1) and an example of weld metal grain size variation showing fine grained (FG) and coarse grained (CG) areas

Sl. 1. Makro presek elektroločno zavarenog spoja (CV1) i primer varijacije veličine zrna metala šava pokazujući oblasti finog zrna (FG) i grubog zrna (CG)



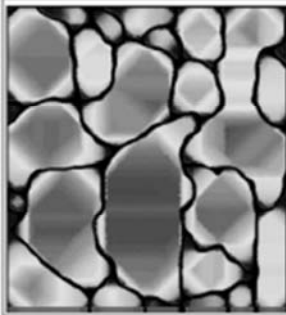
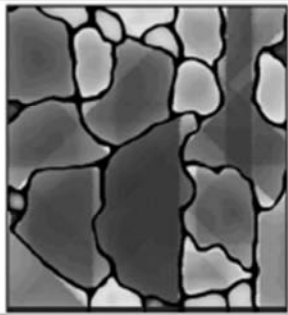
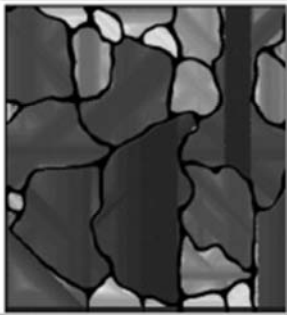
III Kombinacija četiri pravca merenja		
III a) Minimum	III b) Srednja vrednost	III c) Maksimum
		

Fig. 2 Flowchart of the grain size measurement and analysis procedure

Sl. 2 Dijagram toka merenja veličine zrna i postupak analize

For an improved visual representation, the non-measured points are filled with a value from the nearest neighbouring point. As shown in (Fig. 2 (Ic)), the interpolation results in a good visual representation of grain size for the individual grain. Grain size is presented using the Hall–Petch grain size parameter ($d^{-0.5}$) in order to have a linear scale for grain size affected mechanical properties. This approach is taken to improve the resolution of visual representation in the grain size regime below $10\ \mu\text{m}$. Based on the Hall–Petch relationship, a small change of grain size in this regime has a significant effect on the mechanical properties, e.g. strength doubles as grain size decreases from 4 to $1\ \mu\text{m}$.; see Fig. 3. It is noted that the classical Hall–Petch relationship is applicable at grain sizes larger than $0.1\ \mu\text{m}$ ($d^{-0.5} < 3.16\ \mu\text{m}^{-0.5}$) [27, 28].

Za poboljšanje vizuelnog predstavljanja, za neizmerene tačke se ispunjava vrednošću najbliže susedne tačke. Kao što je prikazano (Sl. 2 (Ic)), rezultati interpolacije su dobar vizuelni prikaz veličine zrna za pojedinačna zrna. Veličina zrna je predstavljena Hall-Petch parametrom veličine zrna ($d^{-0,5}$) kako bi se dobila linearna skala veličine zrna koja utiče na mehanička svojstva. Ovaj pristup se uzima za poboljšanje rezolucije vizuelne prezentacije u opsegu veličine zrna ispod $10\ \mu\text{m}$. Na bazi Hall-Petch odnosa, mala promena veličine zrna u ovom režimu ima značajan uticaj na mehanička svojstva, npr. čvrstoća se duplira ako se veličina zrna smanjuje od 4 do $1\ \mu\text{m}$.; vidi sliku. 3. Napominje se da je klasični Hall-Petch odnos primerljiv za zrna veća od $0,1\ \mu\text{m}$ ($D-0.5 < 3.16\ \mu\text{m}-0.5$) [27, 28].

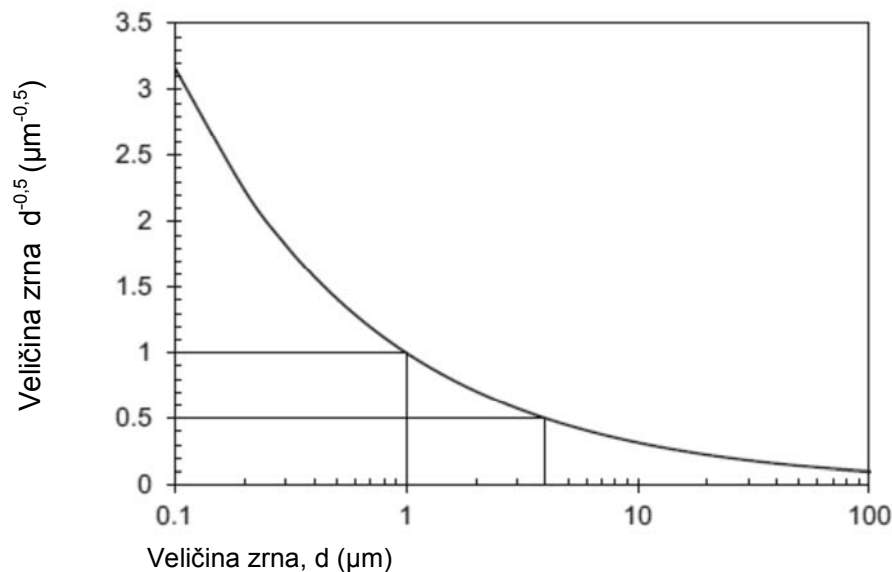


Fig. 3 Relationship between grain size (d) and the Hall–Petch grain size parameter ($d^{-0.5}$)

Sl. 3 Međusobni odnos između veličine zrna (d) i Hall–Petch parametra veličine zrna ($d^{-0.5}$)

The procedures (Fig. 2 (Ia–c)) are repeated for all grains in the fictitious microstructure using four measurement directions (0° , 45° , 90° , and 135°) as shown in Fig. 2 (IIa–d). Typically, at least 25 % of the image points should be measured in each direction for accurate results. The probability P_i of a random point hitting a grain of size i is proportional to the surface area fraction of the grain. Based on relationships of stereology [29, 30], the surface area fraction provides a statistical estimator for the volume fraction: $P_i \approx \frac{1}{4} \frac{A_i}{A_t}$

$$P_i = \frac{A_i}{A_t} \approx \frac{V_i}{V_t} \quad (3)$$

where A_i and V_i are the surface area and volume of a grain of size i . A_t and V_t are the total surface area and volume of all grains in the measurement domain, correspondingly. Thus, the measured grain size distribution can be considered as the volume-weighted grain size distribution if the assumption of isotropy is made. For further details and a Matlab implementation of the measurement procedure, the reader is referred to [23, 31]. To verify that the nearest neighbour interpolation does not introduce any bias or error to the data, the grain size distributions of the measured and interpolated data are compared in Fig. 4a. As the two counterparts overlap for each individual measurement direction, the interpolated data shown in (Fig. 2 (IIa–d)) can be used for further data analysis. In order to compare grain size with mechanical properties, e.g. hardness, the four measurement directions need to be combined into a single visualisation. The three alternatives used are to take the minimum, mean or maximum value of the four measurement directions at each point of all grains; see in Fig. 2 (IIIa–c). As shown in Fig. 4b, the grain size distributions of minimum and maximum cases are the lower and upper bounds for the measurement data, respectively. The mean has closely the same volume weighted The procedures (Fig. 2 (Ia–c)) are repeated for all grains in the fictitious microstructure using four measurement directions (0° , 45° , 90° , and 135°) as shown in Fig. 2 (IIa–d). The mean has closely the same volumeweighted average grain size, d_v , as the measurement data even though the shape of the distribution is different. The agreement of volume-weighted average grain size has been verified for various heterogeneous microstructures, with the error typically being smaller than 1 %. Since the volume-weighted average grain size has been shown to correlate with hardness according to the Hall–Petch relationship [23], the mean grain size plot is used for further result analysis of hardness and grain size. In addition to the above

Procedure (Sl. 2 (Ia-c)) se ponavljaju za sva zrna fiktivne mikrostrukture koristeći četiri smjera merenja (0° , 45° , 90° , i 135°) kao što je prikazano na slici 2 (IIa-d). Tipično, najmanje 25% tačaka na slici treba meriti u svakom smeru za precizne rezultate. Verovatnoća P_i nasumične tačke da se pogodi veličina zrna, proporcionalna je površini frakcija zrna. Na bazi stereoloških odnosa [29, 30], površina frakcije pruža statističke procene za zapreminu frakcije.

gde su A_i i V_i površina i zapremina zrna veličine i . A_t i V_t su ukupne površine i zapremine svih zrna u mernom domenu. Dakle, izmerena distribucija veličine zrna može se smatrati distribucijom veličine zapreminski procenjenih zrna uz pretpostavku izotropije. Za više detalja i implementacija Matlab postupka merenja, čitalac se upućuje na [23, 31]. Da bi se potvrdilo da interpolacija najbliže oblasti ne uvodi nikakve predrasude ili greške u podacima, upoređene su izmerene distribucije veličine zrna i interpolirani podaci na sl. 4a. S obzirom na preklapanje za svaki pojedini smer merenja, interpolirani podaci prikazani u (Sl. 2(IIa-D)) se mogu koristiti za dalju analizu podataka. Kako bi se uporedila veličina zrna sa mehaničkim svojstvima, npr tvrdoća, treba kombinovati četiri pravca merenja u jednu vizualizaciju. Tri alternative se koriste: da se odredi minimalna, srednja ili maksimalna vrednost u nekom od četiri pravca merenja u svakoj tački svih zrna; vidi na slici 2 (IIIa-c). Kao što je prikazano na sl. 4b, distribucija veličine zrna za minimalne i maksimalne slučajeve su donje i gornje granice za podatke merenja. Srednja vrednost je bliska onoj dobijenoj procedurom zapreminske procene. Procedure (sl. 2 (Ia-c)) se ponavljaju za sva zrna u fiktivnoj mikrostrukтури koristeći četiri smjera merenja (0° , 45° , 90° , i 135°) kao što je prikazano na slici 2(IIa-d). Srednja je bliska istoj zapreminski procenjenoj veličina zrna, d_v , kao podatak merenja iako je oblik distribucije drugačiji. Slaganje zapreminski procenjene srednje vrednosti veličine zrna, potvrđena je za različite heterogene mikrostrukture s tim da su greške obično manje od 1%. Dok je zapreminski procenjena srednja veličina zrna pokazala korelaciju sa tvrdoćom prema Hall-Petchovoj jednačini (23), prikaz srednje veličine se koristi za naredne analize rezultata tvrdoće i veličine zrna. Pored navedenih vizuelnih opcija, pokretni proseci minimalne, srednje i maksimalne konture veličine zrna (sl. 2 (IIIa-c)) se obračunavaju preko

mentioned visual options, the moving averages of the minimum, mean and maximum grain size contours (Fig. 2 (IIIa–c)) are calculated across the micrograph using horizontal and vertical line probes. The line probes used in this study are 10-pixel wide. In addition, the border regions of the micrographs were excluded from the averaging to eliminate large grains that extend beyond the micrograph. Grain size at 90 % probability level was found as a suitable margin for exclusion at all edges of the image. Dimensions of the probes used are shown in Table 3. The difference between the three moving averages represents the local variation of grain size in different measurement directions.

3 Experiments

3.1 Test specimens and sample preparation

The experiments are carried out for one base metal (BM.1) and two welded samples. The weld samples are flux-core arc welded either from two sides (CV.1) or from one side with a ceramic backing (CV.2). Plate edges were prepared by plasma cutting followed by grinding. The energy input for CV.1 is 3.5 kJ/cm for each side and for CV.2 it is 9 kJ/cm for the single weld bead. The macro sections of the weld samples CV.1 and CV.2 are shown in Figs. 1 and 5, correspondingly. All base metals are S355 grade ferritic-pearlitic structural steels; the base metal grades and mechanical properties are presented in Table 1.

mikrografija pomoću horizontalnih i vertikalnih linijskih sondi. Linijske sonde korišćene u ovoj studiji su širine 10-piksela. Osim toga, granične regije mikrografija su isključene iz preseka za otklanjanje velikih zrna koje se protežu radi eliminacije mikrografije. Veličine zrna na 90% nivou verovatnoće su se pokazale kao prikladan prostor za isključenje svih rubova slike. Dimenzije sondi koje su korišćene, prikazane su u tabeli 3. Razlika između tri pokretna preseka predstavlja lokalne varijacije veličine zrna u različitim pravcima merenja.

3. Eksperimenti

3.1. Epruvete za ispitivanje i priprema uzoraka

Eksperimenti su izvedeni na jednom osnovnom materijalu (BM.1) i dva zavarena uzorka. Uzorci šava su zavareni punjenom žicom ili obostrano (CV.1) ili sa jedne strane sa keramičkom podlogom (CV.2). Ivce lima su pripremljene plazma rezanjem a zatim brušenjem. Količina unete energije za CV.1 je 3,5 kJ / cm za obe strane i za CV.2 je 9 kJ / cm za jednostrani šav. Makropreseki uzoraka šava CV.1 i CV.2 prikazani su na slikama 1 i 5. Svi osnovni materijali su S355 klase feritno-perlitnih konstrukcionih čelika; klase osnovnog materijala i mehaničke karakteristike prikazane su u tabeli 1.

	Grade	Thickness (mm)	R _{eH} (MPa)	R _m (MPa)	A (%)
BM.1	GL D36	6	343	472	34
CV.1	S355J2	3	466	564	31,3
CV.2	S355J2	3	466	564	31,3

Table 1. Test sample base metal grades and mechanical properties [23]

	Klasa	Debljina (mm)	R _{eH} (MPa)	R _m (MPa)	A (%)
BM.1	GL D36	6	343	472	34
CV.1	S355J2	3	466	564	31,3
CV.2	S355J2	3	466	564	31,3

Tabela 1. Klase ispitnih uzoraka osnovnog materijala i mehaničke osobine [23]

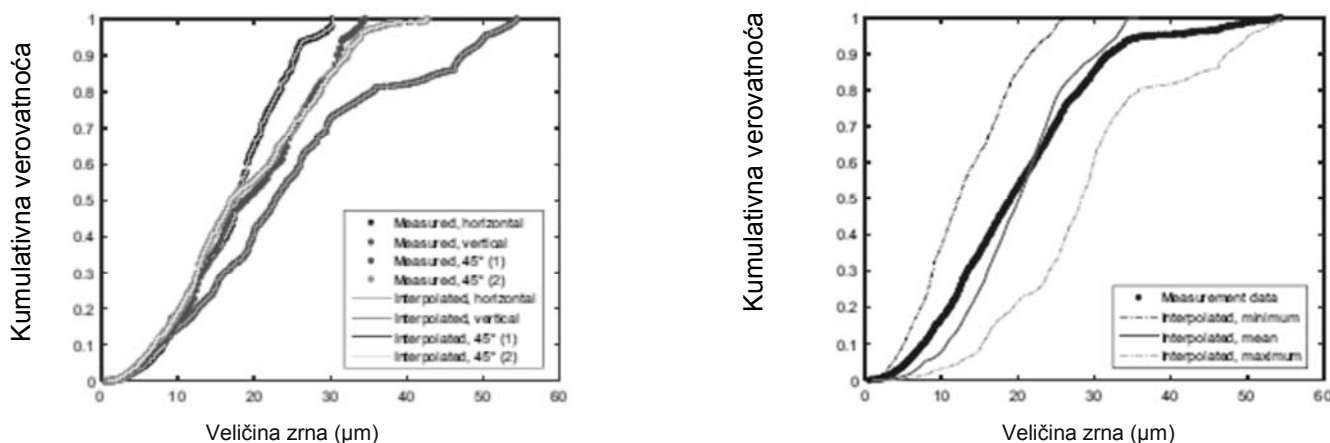


Fig. 4 Cumulative probability distributions for grain size (a) measured and interpolated data for the four measurement directions (see Ib, Ic and II in Fig. 2). b Comparison of the analysed (see III in Fig. 2) and measurement data

Sl. 4. Raspodela kumulativne verovatnoće za veličinu zrna (a) mereni i interpolirani podaci za četiri pravca merenja (videti Ib, Ic i II na sl.2). b) Upoređenje analiziranog (videti III na sl.2) i podaci merenja

	Sample	Grain size d_v (μm)	Hardness HM (MPa)	Constituent volume fraction (%)		
				AF	PF	FC/P
Base metal	BM.1	15,29±1,96	1412±29	-	78,6±53	21,4±5,3 (P)
Homogeneous weld metal	CV.1 root	5,95±0,20	1756±17	7,3±1,4	78,7±4,7	14,0±3,4
Heterogeneous weld metal	CV.2 toe	4,00±0,45	1984±34	37,5±6,4	56,2±53	6,3±1,6

Abbreviations used: d_v , volume-weighted average grain size, HM Martens hardness, PF primary ferrite, AC acicular ferrite, FC ferrite-carbide aggregate, P pearlite [23]

Table 2. Test specimen nomenclature, microstructural characterization and the microstructural constituent volume fractions and the corresponding 95% confidence intervals [23]

	Uzorak	Veličina zrna d_v (μm)	Tvrdća HM (MPa)	Zapreminski udeo konstituenata (%)		
				AF	PF	FC/P
Osnovni materijal	BM.1	15,29±1,96	1412±29	-	78,6±53	21,4±5,3 (P)
Homogeni metal šava	CV.1 koren	5,95±0,20	1756±17	7,3±1,4	78,7±4,7	14,0±3,4
Heterogeni metal šava	CV.2 podnožje	4,00±0,45	1984±34	37,5±6,4	56,2±53	6,3±1,6

Korišćene skraćenice: d_v , zapreminski određeni prosek veličine zrna, HM tvrdoća po Martensu, PF primarni ferit, AC acirkularni ferit, FC agregati ferit-karbida, P perlit [23]

Tabela 2. Nomenklatura ispitnih epruveta, mikrostrukturalna karakterizacija i zapreminske frakcije mikrostrukturnih konstituenata i odgovarajući intervali usaglašenosti 95% [23]

For this investigation, specimens are prepared from the base metal BM.1 and the two weld metals. To represent the extremities of the grain size distribution, two weld metal regions are chosen with homogeneous and heterogeneous grain size distributions. The root side weld metal of weld sample CV.1 is taken as the homogeneous weld metal, while the toe side weld metal of weld sample CV.2 is the heterogeneous weld metal. The three specimens are chosen since they have previously been found to closely follow the same relationship between grain size and hardness in the macroscopic scale using 70–100 μm hardness

Za ovo istraživanje, uzorci su pripremljeni od osnovnih metala BM.1 i dva metala šava. Da bi predstavljali ekstremitete distribucije veličine zrna, dve regije šava biraju se sa homogenom i heterogenom distribucijom veličine zrna. Korena strana metala šava uzorka CV.1 se uzima kao homogeni metal šava, dok je podnožje na strani metala šava uzorka CV.2 heterogeni šav. Tri uzorka su izabrana jer je prethodno utvrđeno da pažljivo prate isti odnos između veličine zrna i tvrdoće na makroskopskoj skali pomoću 70–100 μm rastojanja otisaka [23].

indentations [23]. The previously measured average hardness and grain size values, as well as phase volume fractions are presented in Table 2. The microstructural constituents were identified according to IIW document IX-1533-88 [32] by using the systematic manual point counting method according to ASTM E562-02 [33]. For the weld sample CV.2, an additional sample was prepared for EBSD analysis. The sample is used for comparing the grain size and hardness from the exact same location for the heterogeneous weld metal. This location is referred to as A2 in further instances. The location of this area and the hardness measurements carried out for the heterogeneous weld metal are shown in Fig. 5. All specimens were mounted in an electrically conductive resin and grinded up to P4000 grit abrasive paper. Polishing was done with 3 and 1 μm diamond paste and the additional heterogeneous sample with 0.25 μm as well. Before EBSD analysis, final polishing was carried out with colloidal silica in a vibratory polisher for 45 min.

3.2 Material characterisation

Instrumented indentation testing was used for measuring the mechanical properties. Hardness was measured with a CSM Instruments micro-indentation tester according to ISO 14577-1 [34] utilising large matrices containing up to 200 indentations. Hardness was defined using Martens hardness, denoted by HM, with a Vickers pyramid tip. The measurement data related to, but not presented in [23], indicates that HM correlates well with traditional Vickers hardness when presented in the same units; see Appendix 1 for further details. The test forces used equal HV0.01 (98.07 mN), HV0.1 (980.7 mN) and HV0.3 (2942.1 mN), producing indentations with approximately 7–10 μm , 30–35 μm and 50–60 μm diagonal lengths, respectively, depending on the sample. Indentation depth is approximately 1/7th of the indentation diagonal, i.e. 1–1.4 μm , 4.3–5 μm and 7.1–8.5 μm for the three measurement forces, respectively. Linear 30-s loading ramps were used, with a hold time of 10 s at the maximum force. The heterogeneous microstructure was characterised using the electron backscatter diffraction (EBSD). EBSD analysis of the heterogeneous weld metal in sample CV.2 (location A2) was carried out prior to hardness measurements at a premarked area. A Zeiss Ultra 55 field emission scanning electron microscope equipped with a Nordlys F+ camera and Channel 5 software from Oxford Instruments was used for the EBSD analyses. The EBSD analyses were performed with a step

Prethodno izmerene prosečne vrednosti tvrdoća i veličine, kao i zapreminske frakcije faza prikazane su u tabeli 2. Mikrostrukturni sastojci su identifikovani prema IIW dokument IX-1533-88 [32] pomoću sistematske metode ručnog prebrojavanja prema ASTM E562-02 [33]. Za uzorak šava CV.2, dodatni uzorak je pripremljen za analizu EBSD. Uzorak se koristi za poređenje veličine zrna i tvrdoće iz iste lokacije za heterogene šavove. Ova lokacija se naziva A2 u daljim razmatranjima.

Lokacija ovog područja i vrednosti tvrdoća za heterogene šavove su prikazani na slici. 5. Svi uzorci su postavljeni (zatopljeni) u elektroprovodljivu smolu i brušeni do P4000 granulacije brusnog papira. Poliranje je učinjeno sa dijamantskom pastom 3 i 1 μm a za dodatne heterogene uzorke sa 0,25 μm . Pre analize EBSD, završno poliranje izvršeno je sa koloidnim silikonom u uređaju za vibraciono poliranje za 45 min.

3.2 Karakterizacija materijala

Instrumentovano pomeranje pri ispitivanju korišćeno je za merenje mehaničkih svojstava. Tvrdoća je merena CSM Instruments mikro-ispitivačem prema ISO 14577-1 [34] koji koriste koriste velike matrice sa do 200 otisaka. Tvrdoća je definisana pomoću tvrdoće po Martensu, označen sa HM, sa vrhom Vickers piramide. Podaci merenja vezani za to, ali nisu predstavljeni u [23], ukazuju na dobru korelaciju HM sa tradicionalnom tvrdoćom po Vickersu kada su u istim jedinicama; vidi Dodatak 1 za više detalja. Sile pri ispitivanju su za HV0.01 (98.07 mN), HV0.1 (980,7 mN) i HV 0.3 (2942,1 mN), proizvode otiske sa oko 7-10 μm , 30-35 μm i 50-60 μm dužine dijagonale, odnosno, zavisno od uzorka. Dubina otisaka je oko 1/7 dijagonale otisaka, t.j. 1-1,4 μm , 4,3-5 μm i 7,1-8,5 μm za tri merenja sile. Korišćeno je 30-ak rampi za opterećenje, uz vreme držanja od 10 s na maksimalnom opterećenju.

Heterogena mikrostruktura je karakterisana pomoću difrakcije povratnog rasipanja elektrona (EBSD). EBSD analiza heterogenih metala šava u uzorku CV.2 (lokacija A2) je izvedena pre merenja tvrdoće na obeleženim području. Pokretni skenirajući elektronski mikroskop Zeiss Ultra 55 opremljen Nordlys F + kamerom i Kanal 5 softverom-Oxford Instruments je korišćen za EBSD analize. Analize EBSD su izvedene sa korakom od 0,2 μm pri uvećanju 1000 \times (područje 373 \times 280 μm). Napon ubrzanja je 20 kV sa graničnim kriterijumom dezorijentacije granica zrna od 10 $^\circ$. Stopa indeksiranja EBSD mapa bio je oko 90%, a podaci o EBSD su naknadno obrađeni pomoću čiste putanje najbliže oblasti.

size of 0.2 μm at a magnification of 1000 \times (area 373 \times 280 μm). The acceleration voltage was 20 kV and the grain boundary misorientation criteria of 10 $^\circ$ were used. Indexing rate of the EBSD maps was approximately 90 % and the EBSD data was post-processed using a nearest neighbour clean-up routine. The grain boundary maps from EBSD analysis were overlaid on optical micrographs and digital image processing applied in order to de-skew the distortions caused by stage drift during acquisition [35]. For optical micrographs, the samples were etched with a 2 % Nital solution. Digital image processing was carried out to create grain boundary maps from the optical micrographs for base metal and homogeneous weld metal; see [31] for more details.

Mape granica zrna iz analize EBSD su preklopljena sa optičkim mikrofografijama i primenjena je digitalna obrada slike kako bi se ispravila distorzija uzrokovana u fazi zanošenja tokom akvizicije [35]. Za optičke mikrofografije, uzorci su nagriženi sa 2% nitalom. Digitalna obrada slike je izvršena radi stvaranja mape granice zrna iz optičkog mikrofografova za osnovni materijal i homogenih metal šava; vidi [31] za više detalja.

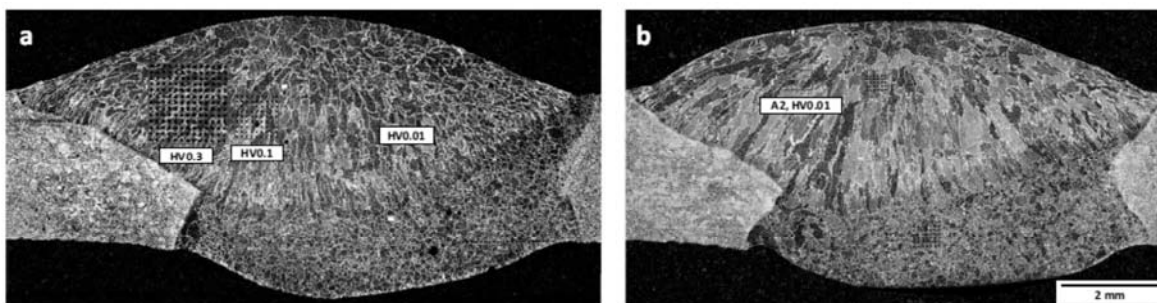


Fig. 5 Two macro sections of the arc welded joint CV.2 showing the hardness measurement locations of the heterogeneous weld metal presented in a Fig. 11 and b Fig. 12

Sl. 5. Dva makropreseka elektro-lučno zavarenog spoja CV.2 koji pokazuju lokacije merenja tvrdoće heterogenog metala šava prisutnog na sl. 11 i 12

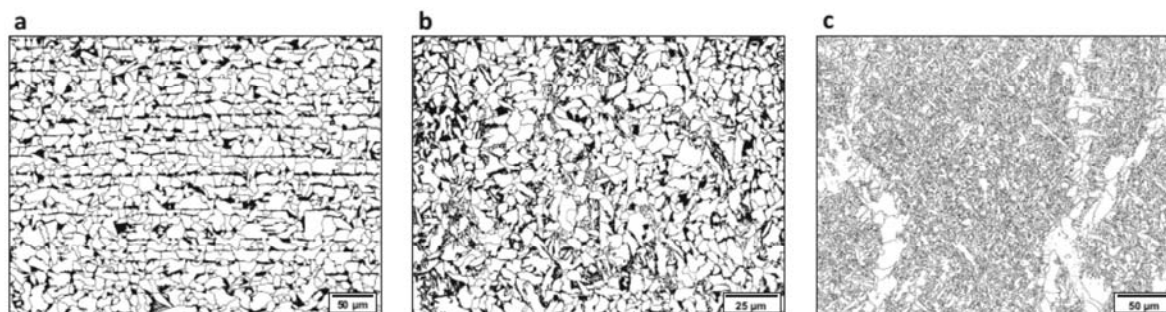


Fig. 6 The grain boundary maps used for grain size analysis of a base metal, b homogeneous weld metal and c heterogeneous weld metal

Sl. 6. Mape granica zrna koje su korišćene za analizu a) osnovnog materijala, b) homogenog metala šava i c) heterogenog metala šava

4 Results

4.1 Microstructure and grain size

The microstructures of the three specimens are shown in Fig. 6. The measured average grain sizes (d , d_v) of the single micrographs and the dimensions of the averaging line probes are presented in Table 3. The line probes are 10-pixel wide and thus the magnification of the micrograph affects the width of the probe. The relative grain

4. Rezultati

4.1. Mikrostruktura i veličina zrna

Mikrostrukture tri uzorka prikazani su na sl. 6. Izmerene prosečne veličine zrna (d , d_v) pojedinačne mikrofografije i dimenzije prosečnih linijskih sondi su prikazane u tabeli 3. Linijske sonde su širine 10-piksela, a time i uvećanja mikrofografije utiču na širinu sonde. Relativne

size dispersion values for the three specimens are defined based on [23]:

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{d_{max} - d_{min}}{d} = \frac{d_{99\%} - d_{1\%}}{d}, \quad (4)$$

where the maximum and minimum grain sizes are taken as 99 and 1 % probability level grain sizes, respectively. This value characterises the grain size dispersion on a macroscopic scale for the entire micrograph, see Ref [23] for further details. The local grain size variation found in base metal as well as homogeneous and heterogeneous weld metals are compared in Fig. 7. Base metal and homogeneous weld metal have quite homogeneous grain size as is indicated by the relative grain size dispersion. The local variation of grain size is not significant and moreover the local variation is homogeneous throughout the microstructure. On the contrary, local variation of grain size is significant for the heterogeneous weld metal. The coarse-grained areas have inconsistent spacing as shown in Fig. 7c, and thus one grain boundary map of size $345 \times 266 \mu\text{m}$ does not fully represent the length scale at which the coarse and fine-grained areas alternate.

vrednosti disperzija veličine zrna, za tri uzorka su definisane na osnovu [23]:

gde su maksimalne i minimalne veličine zrna uzete kao 99% i 1% veličine nivoa verovatnoće zrna. Ova vrednost karakteriše veličine disperzije zrna na makroskopskoj skali za celu mikrografiju, pogledajte Ref [23] za više detalja. Lokalna varijacija veličine zrna nađena je u osnovnom materijalu, kao i u homogenim i heterogenim metalima šava u poređenju sa sl. 7. Osnovni materijal i homogeni metal šava imaju prilično homogenu veličinu zrna kao što je indicirano relativnom disperzijom veličine zrna. Lokalne varijacije veličine zrna nisu značajne i štaviše lokalna varijacija je homogena kroz mikrostrukturu. Nasuprot tome, lokalne varijacije veličine zrna su značajne za heterogene šavove. Područja krupnog zrna imaju nekonzistentan razmak kao što je prikazano na slici. 7c, i na taj način mapa granice jednog zrna veličine $345 \times 266 \mu\text{m}$ ne predstavlja dužinu skale u potpunosti, na kojoj postoje područja grubog i sitnog zrna.

	Grain size			Line probes dimensions			Grain per line length	
	d (μm)	$\Delta d/d$ (-)	d_v (μm)	Line width (μm)	Horizontal (μm)	Vertical (μm)	Horizontal (-)	Vertical (-)
Base metal	10,18	3,16	15,43	1,84	532	385	35	25
Homogeneous weld	3,47	3,60	5,94	0,74	213	154	36	26
Heterogeneous weld	2,21	5,38	5,01	0,98	321	241	64	48

Grain per line length is defined as line length divided by the volume-weighted average grain size

Table 3. Measured average grain sizes for the three microstructures presented in Fig. 6 and dimensions of the line probes used for grain size averaging

	Veličina zrna			Dimenzije linijske sonde			Zrna po dužini linije	
	d (μm)	$\Delta d/d$ (-)	d_v (μm)	širina linije (μm)	horizontalno (μm)	vertikalno (μm)	horizontalno (-)	vertikalno (-)
osnovni materijal	10,18	3,16	15,43	1,84	532	385	35	25
homogeni šav	3,47	3,60	5,94	0,74	213	154	36	26
heterogeni šav	2,21	5,38	5,01	0,98	321	241	64	48

Zrna po dužini linije se definiše kao dužina linije podeljena sa zapreminski zasnovanom prosečnom veličinom zrna

Tabela 3. Izmerene prosečne veličine zrna za tri mikrostrukture prikazane na sl.6 i dimenzije linijskih sondi za određivanje prosečne veličine zrna

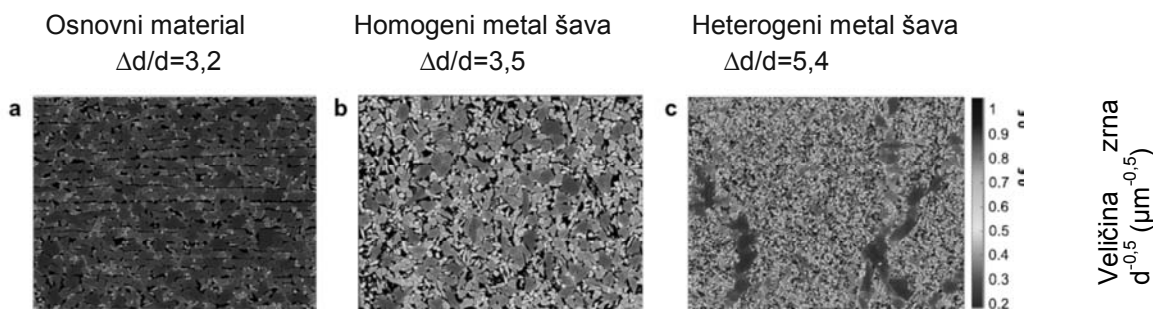


Fig. 7 Comparison of local grain size variation for S355 base metal, homogeneous and heterogeneous weld metals. The colour contours range between 0.18 and $1.05 \mu\text{m}^{-0.5}$, representing the largest 99 % and smallest 1 % probability level grain sizes for the three specimens

Sl. 7. Poređenje varijacije veličine lokalnih zrna za S355 osnovni materijal, homogeni i heterogeni metal šava. Konture boja u rasponu od $0,18$ i $1,05 \mu\text{m}^{-0.5}$, što predstavlja najveću 99%, i najmanju 1% verovatnoću veličine nivo zrna, za tri uzoraka

4.2 Characterisation of the local grain size variation

The local grain size variation of base metal, homogeneous weld metal and heterogeneous weld metal is shown in Figs. 8, 9, and 10, correspondingly. The dimensions of the line probes used for the calculation of moving averages are presented in Table 3. It can be seen that the grain size of the base metal (Fig. 8) is very uniform when the mechanical properties are considered on grain scale according to the Hall–Petch relationship ($d^{-0.5}$). Variation around the volume-weighted average grain size (d_v) is minor for the moving average of the mean grain size. In terms of grain size, it is difficult to find strong or weak locations in the microstructure as the smallest and largest grains are within a narrow band of approximately $0.2\text{--}0.5 \mu\text{m}^{-0.5}$. For homogeneous weld metal (Fig. 9), the variation of grain size is very similar to base metal, with little variation around the volumeweighted average grain size. Relatively, the minimum and maximum are further away from the mean curve, which is related to the broader grain size dispersion compared to base metal. This is visible as an increased amount of fine grains (acicular ferrite, AF) in between the coarse grains (primary ferrite, PF). For heterogeneous weld metal (Fig. 10), the location of coarse grains can be determined both visually and using the horizontal moving average of grain size. The areas with coarse grains are primary ferrite while fine-grained areas consist mostly of acicular ferrite. Furthermore, there is also noticeable grain size variation within acicular ferrite. Of the three specimens, the difference between minimum and maximum moving averages is largest for the heterogeneous weld metal in the area that consists primarily of acicular ferrite (X-coordinate $100\text{--}200 \mu\text{m}$).

4.2 Karakterizacija lokalne promene veličine zrna

Varijacija lokalne veličine zrna osnovnog materijala, homogenog metala šava i heterogenog metala šava je prikazana na slikama 8, 9, i 10. Dimenzije linijskih sondi korišćenih za obračun pokretnih proseka prikazani su u tabeli 3. Može se videti da je veličina zrna osnovnog materijala (Sl. 8) vrlo ujednačena, kada se u obzir mehanička svojstva na skali zrna po Hall-Petch odnosa ($d^{-0.5}$). Varijacija oko proseka zapreminski procenjene veličine zrna (d_v) je manja za pokretni prosek veličine srednjeg zrna. U pogledu veličine zrna, teško je naći jake ili slabe lokacije u mikrostrukturi jer su najmanja i najveća zrna u uskom opsegu od oko $0.2\text{--}0.5 \mu\text{m}^{-0.5}$. Za homogeni metal šava (Sl. 9), varijacija veličine zrna je vrlo slična osnovnom materijalu, s malo varijacija oko zapreminski procenjene prosečne veličine zrna. Relativno, minimum i maksimum su daleko od središnje krive, koja se odnosi na širu disperziju veličine zrna u poređenju sa osnovnim materijalom. To je vidljivo kao povećani iznos finih zrna (acikularni ferit, AF) između grubih zrna (primarni ferit, PF). Za heterogeni metal šava (Sl. 10), lokacija grubih zrna može se odrediti i vizuelno i pomoću horizontalno pomerljivih proseka veličine zrna. Oblasti sa grubim zrnima su primarni ferit dok se područja finog zrna sastoje uglavnom od acikularnog ferita. Osim toga, primetna je i varijacija veličine zrna unutar acikularnog ferita. Od tri uzoraka, razlika između minimalnog i maksimalnog pokretnog proseka je najveći za heterogeni šav u području koje se sastoji uglavnom od acikularnog ferita (X-koordinata $100\text{--}200 \mu\text{m}$).

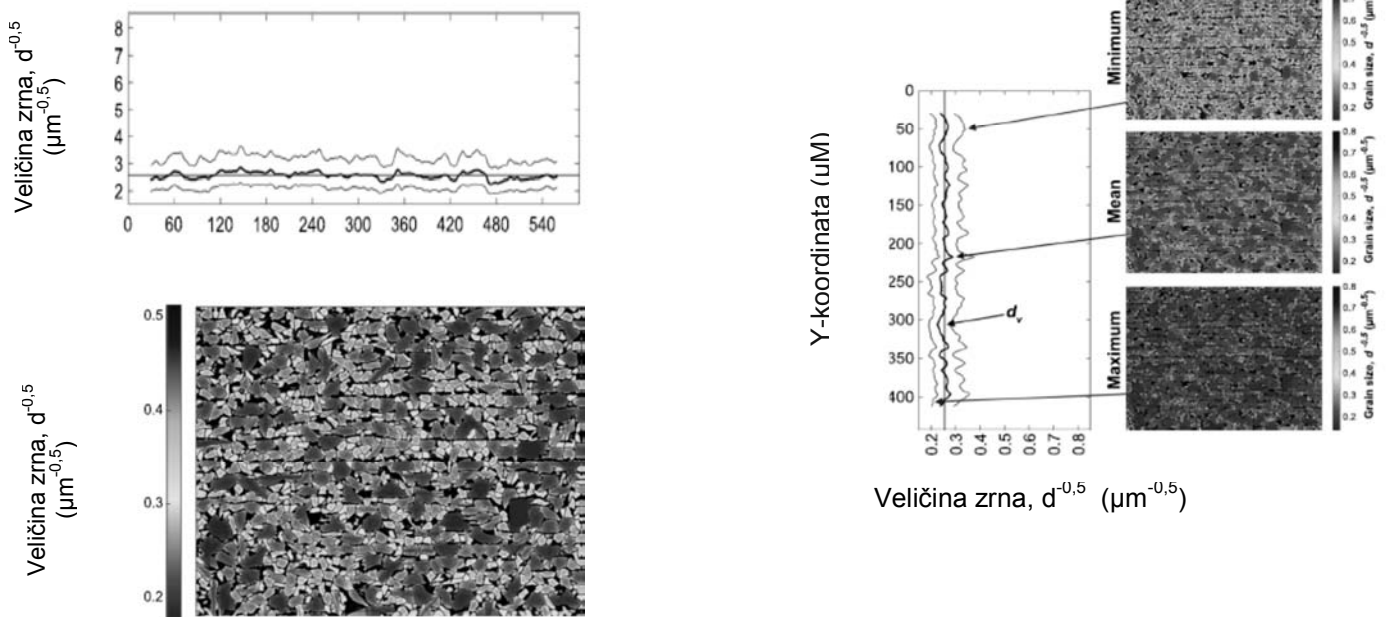


Fig. 8 Grain size plotted as a function of the Hall–Petch grain size parameter ($d^{-0.5}$) for the base metal (S355). The colour contour ranges from 99 to 1% probability level grain size for the main figure. The colour contour range is extended for the side figures to cover the 1 and 99 % probability level grain sizes of the minimum and maximum cases

SI. 8. Veličine zrna ucrtane kao funkcija parametra veličine zrna Hall-Petch ($d^{-0,5}$) za osnovni materijal (S355). Konture boja kreću se od 99% do 1% nivoa verovatnoće veličine zrna za glavnu sliku. Raspon boja kontura je proširen sa strane sa veličinama za 1% i 99% nivo verovatnoće veličine zrna za minimalne i maksimalne slučajeve.

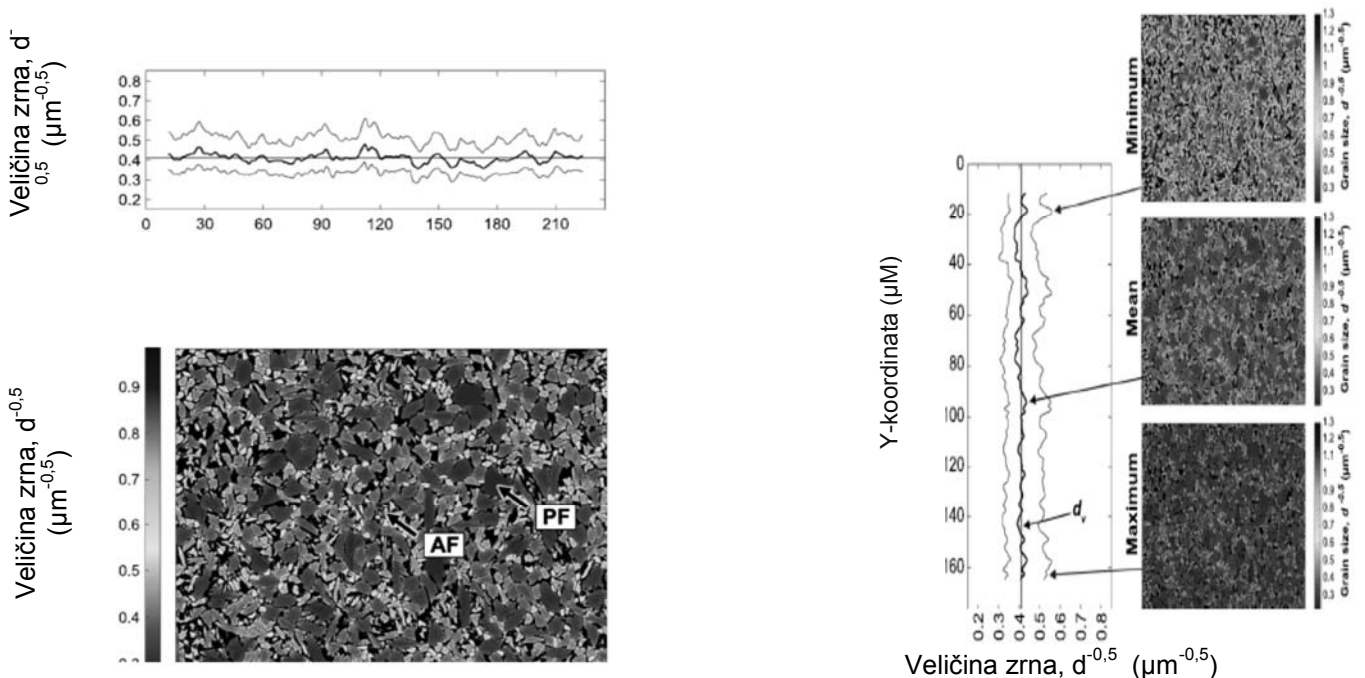


Fig. 9 Grain size plotted as a function of the Hall–Petch grain size parameter ($d^{-0.5}$) for the homogeneous weld metal. The colour contour ranges from 99 to 1% probability level grain size for the main figure. The colour contour range is extended for the side figures to cover the 1 and 99 % probability level grain sizes of the minimum and maximum cases

SI. 9. Veličina zrna ucrtana kao funkcija parametra veličine zrna Hall-Petch ($d^{-0,5}$) za homogeni šav. Konture boja kreću se od 99% do 1% nivoa verovatnoće veličine zrna za glavnu sliku. Raspon boja kontura je proširen sa strane sa veličinama za 1% i 99% nivo verovatnoće veličine zrna za minimalne i maksimalne slučajeve

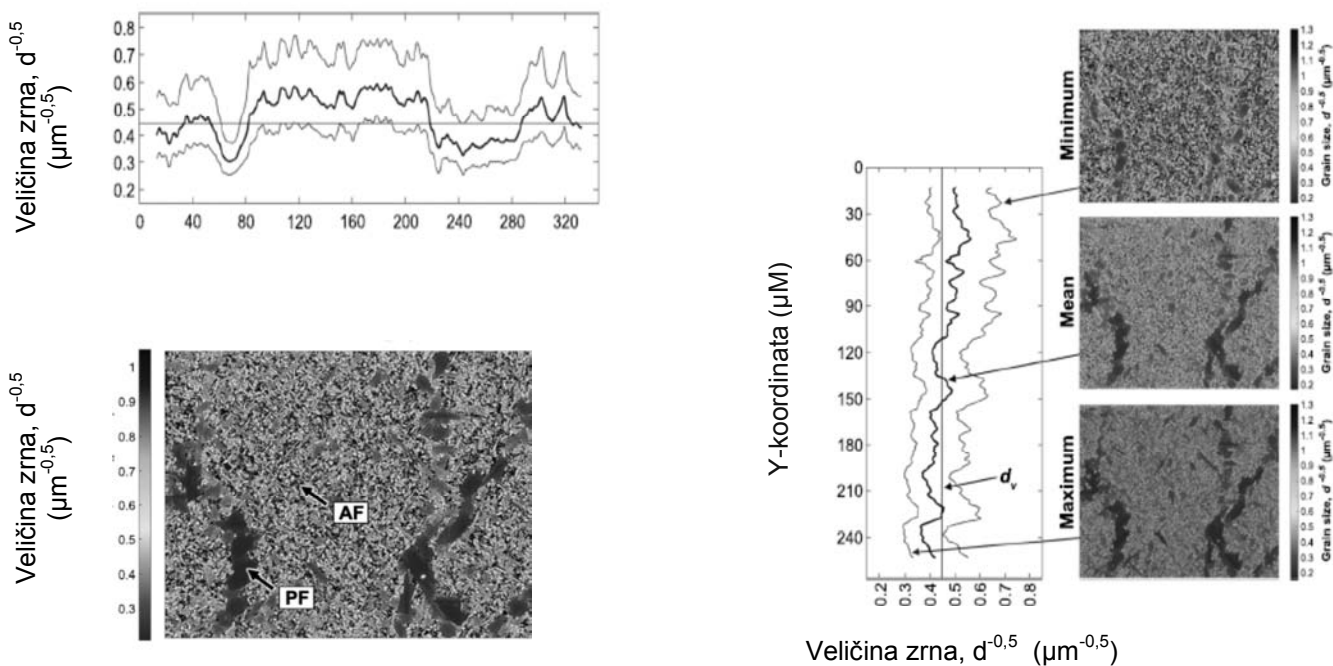


Fig. 10 Grain size plotted as a function of the Hall–Petch grain size parameter ($d^{-0.5}$) for the heterogeneous weld metal. The colour contour ranges from 99 to 1% probability level grain size for the main figure. The colour contour range is extended for the side figures to cover the 1 and 99 % probability level grain sizes of the minimum and maximum cases

Sl. 10. Veličina zrna ucrтана kao funkcija parametra veličine zrna Hall-Petch ($d^{-0,5}$) za heterogeni šav. Konture boja kreću se od 99% do 1% nivoa verovatnoće veličine zrna za glavnu sliku. Raspon boja kontura je proširen sa strane sa veličinama za 1% i 99% nivo verovatnoće veličine zrna za minimalne i maksimalne slučajeve

4.3 Comparison of hardness variation in S355 base metal and weld metal

The variation in grain size indicates that the mechanical properties might also vary significantly within the heterogeneous microstructure. The local variation in hardness measured using test forces HV0.01, HV0.1 and HV0.3 is shown in Fig. 11. The diagonal lengths of the indentations are approximately 7–10 μm , 30–35 μm and 50–60 μm , respectively. For clarity, the grain size comparison presented in Fig. 7 is from the same specimens but not at the exact location of the hardness measurements. Hardness is presented as an interpolated colour contour, and thus, it should be noted that the values in between the indentations do not represent real hardness values.

For all specimens, it is observed that the mean hardness value increases with a decrease in indentation size. At the same time, the maximum hardness values increase significantly while minimum values remain approximately the same. Using the smallest test force of HV0.01, the difference between lowest and highest measured hardness values is significant, up to 0.9 times the average value.

4.3 Upoređenje promene tvrdoće u osnovnom materijalu S355 i metalu šava

Varijacija u veličini zrna pokazuje da mehanička svojstva mogu značajno da variraju unutar heterogene mikrostrukture. Lokalne varijacije izmerene tvrdoće korišćenjem sila HV0.01, HV0.1 i HV 0.3 prikazane su na slici 11. Dijagonale dužine otisaka su oko 7-10 μm , 30-35 μm i 50-60 μm . Zbog jasnoće, odnos veličine zrna prikazan na Sl. 7 je iz istih uzoraka, ali ne na tačnim lokacijama merenja tvrdoće. Tvrdoća je predstavljena kao interpolisana kontura u boji, i na taj način, treba napomenuti da vrednosti između otisaka ne predstavljaju prave vrednosti tvrdoće.

Za sve uzorke, uočeno je povećanje srednje vrednosti tvrdoće sa smanjenjem veličine otiska. U isto vreme, maksimalne vrednosti tvrdoće značajno rastu, a minimalne vrednosti ostaju približno iste. Koristeći najmanju ispitnu silu HV0.01, razlika između najniže i najviše izmerene vrednosti tvrdoće je značajna, do 0,9 puta od prosečne vrednosti.

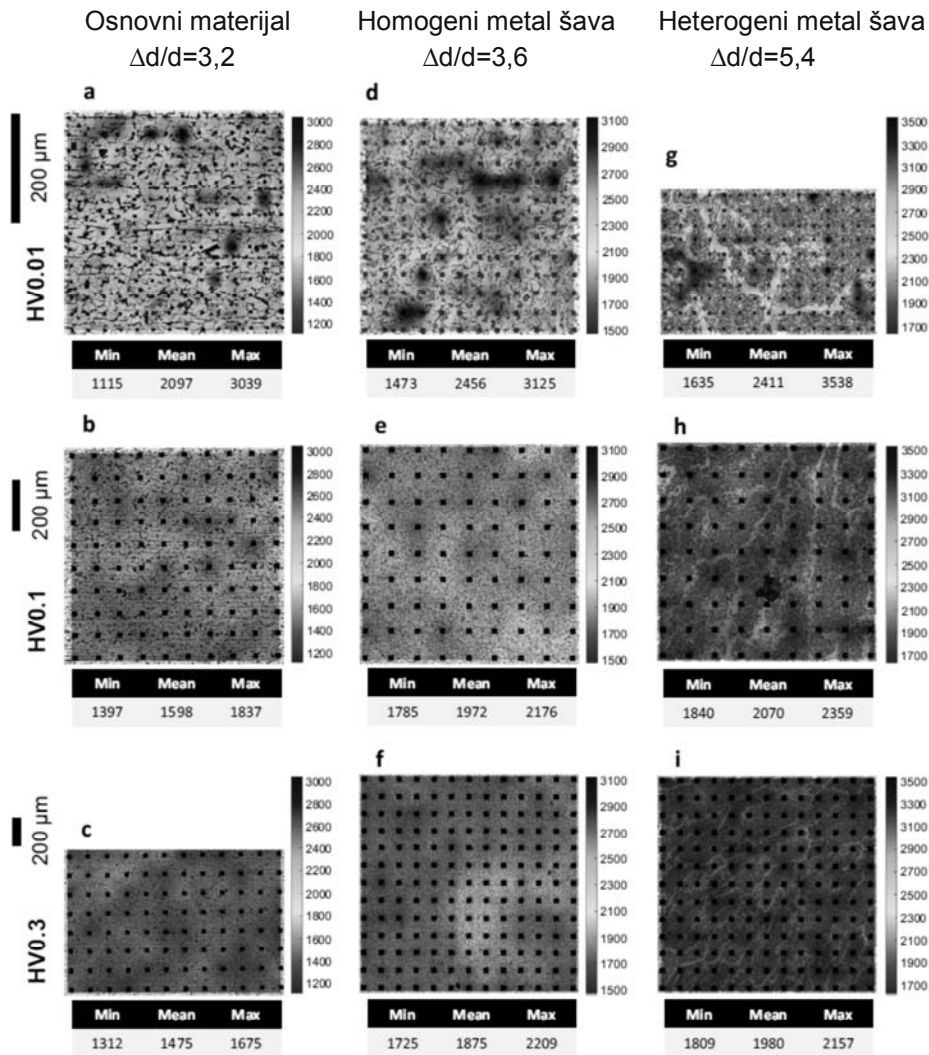


Fig. 11 Comparison of local hardness variation (HM) using three different indentation loads for the three specimens. The colour scales range between HV0.01 minimum and maximum for each specimen

SI. 11 Poređenje varijacije lokalnih tvrdoća (HM) pomoću tri različita opterećenja za tri uzorka. Skale boja u rasponu od HV0.01 minimum i maksimum za svaki uzorak

This can be related to the placement of the small indentations in the microstructure, hitting e.g. entirely in soft ferrite grain interiors or hard pearlite. While base metal and homogeneous weld metal generally show smooth transitions between low and high hardness areas, the heterogeneous weld metal shows much higher local variation. This is the case particularly for the HV0.01 measurement force that produces small, 7–10 μm indentations. At higher test forces of HV0.1 and HV0.3, base metal and homogeneous weld metal show variation in hardness even though the grain size is very uniform in the structure. Likewise, with HV0.3 indentations, the local variation in hardness cannot be captured for the heterogeneous weld metal since the indentations are larger than the coarse-grained areas. Thus, it is challenging to choose indentation parameters; indentation size in relation to grain size and at the same time the spacing of indentations

To se može odnositi na postavljanje malih otisaka u mikrostrukтури, pogađanje npr. potpuno mekih feritnih zrna ili tvrdog perlita. Dok osnovni materijal i homogeni metal šava generalno pokazuju blage prelaze između područja niske i visoke tvrdoće, heterogeni šav pokazuje mnogo veće lokalne varijacije. Ovo je posebno slučaj za HV0.01 silu merenja koja proizvodi male, 7-10 μm otiske. Pri većim ispitnim silama HV0.1 i HV0.3, osnovni materijal i homogeni metal šava pokazuju varijacije u tvrdoći, iako je veličina vrlo uniformna u strukturi. Isto tako, s HV0.3 otiscima, lokalne varijacije tvrdoće ne mogu biti vezane za heterogeni šav jer su otisci veći nego u području krupnog zrna. Dakle, to je izazov da se izaberu parametri otisaka; veličina otiska u odnosu na veličinu zrna i istovremeno razmak između otisaka utiču na podatke prikupljene iz prethodno određenog

affects the data gathered from a predetermined area. The transition and relations between different size indentations, as well as the relation to tensile properties require further study.

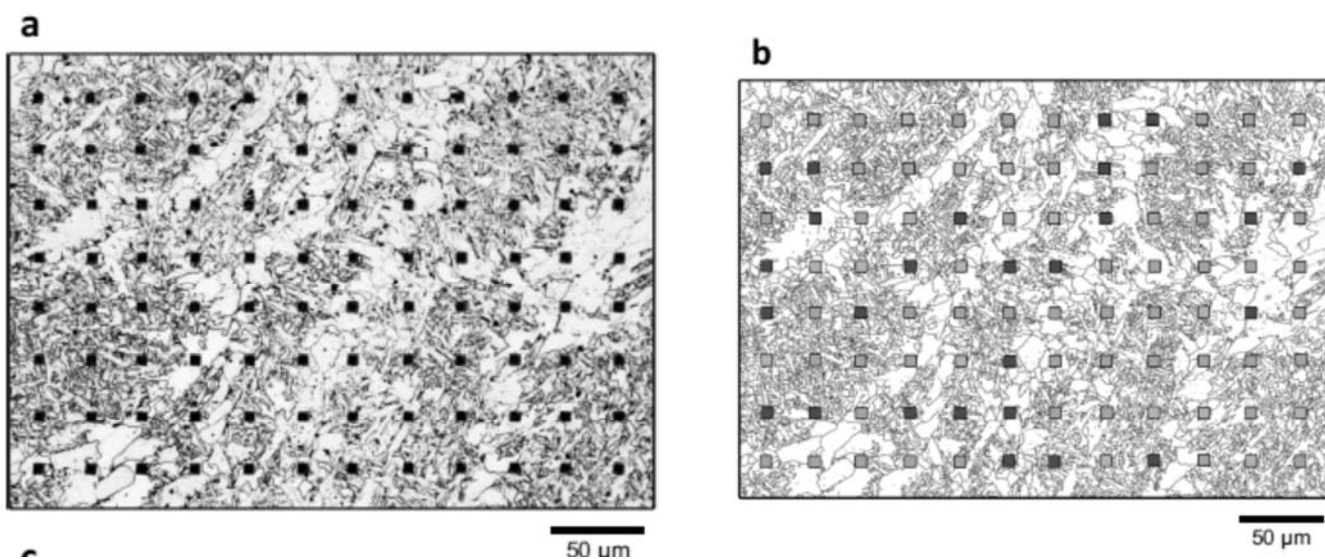
4.4 Correlation between grain size and hardness

To investigate the local grain size variation, additional hardness measurements were carried out for the heterogeneous weld metal. Prior to hardness measurements, an EBSD analysis was carried out at location A2 of the weld (see Fig. 5) that was pre-marked with hardness indentations. After hardness measurements, the specimen surface was etched, which enables overlaying of the EBSD maps on the microstructure and identifying the location of hardness indentations. The hardness data and grain size contour for the studied heterogeneous weld metal are shown in Fig. 12. The figure contains (a) an optical micrograph of the hardness measurements, (b) visual estimate of correlation between hardness and local microstructure and (c) hardness in discrete form for individual indentations overlaid on the grain size contour. The visual estimate in (b) is divided into three categories: (1) green, grain size under the indentation correlates with hardness within approximately ± 100 HM (52/96 samples, 54 %); (2) orange, hardness correlates with grain size when the microstructure surrounding the indentation is considered (18/96, 19 %) and (3) red, hardness and local grain size show no correlation (26/96, 27 %). Reader is referred to Appendix 2 for the hardness values and a figure that shows the grain size under and around each indentation.

područja. Prenos i odnos između različitih veličina otisaka, kao i odnos prema zateznim svojstvima zahtevaju dalje proučavanje.

4.4. Korelacija između veličine zrna i tvrdoće

Da bi istražili lokalne varijacije veličine zrna, izvršena su dodatna merenja tvrdoće za heterogeni šav. Pre merenja tvrdoće, analiza EBSD izvršena je na lokaciji A2 šava (vidi sl. 5) koji je bio prethodno označen otiscima merenja tvrdoće. Nakon merenja tvrdoće, površina uzorka je nagrižena, što omogućava prevlačenje EBSD mape na mikrostrukturu i identifikaciju lokacija otisaka tvrdoće. Podaci o tvrdoći i kontura veličine zrna za istraživani heterogeni šav prikazani su na slici. 12. Slika sadrži (a) optičku mikrografiju merenja tvrdoće, (b) vizuelnu procenu korelacije tvrdoće i lokalnih mikrostruktura i (c) tvrdoća u diskretnom obliku za pojedinačne otiske preklapljeno konturom veličine zrna. Vizuelna procena u (b) je podeljena u tri kategorije: (1) zelena, veličina zrna pod otiscima u korelaciji sa tvrdoćom od približno ± 100 HM (52/96 uzoraka, 54%); (2) narandžasta, tvrdoća u korelaciji sa veličinom zrna kada se razmatra mikrostruktura oko otisaka (18/96, 19%) i (3) crvena, tvrdoća i lokalne veličine zrna ne pokazuju korelaciju (26/96, 27%). Čitalac se upućuje na Dodatak 2 za tvrdoće i sliku koja prikazuje veličine zrna ispod i oko svakog otiska.



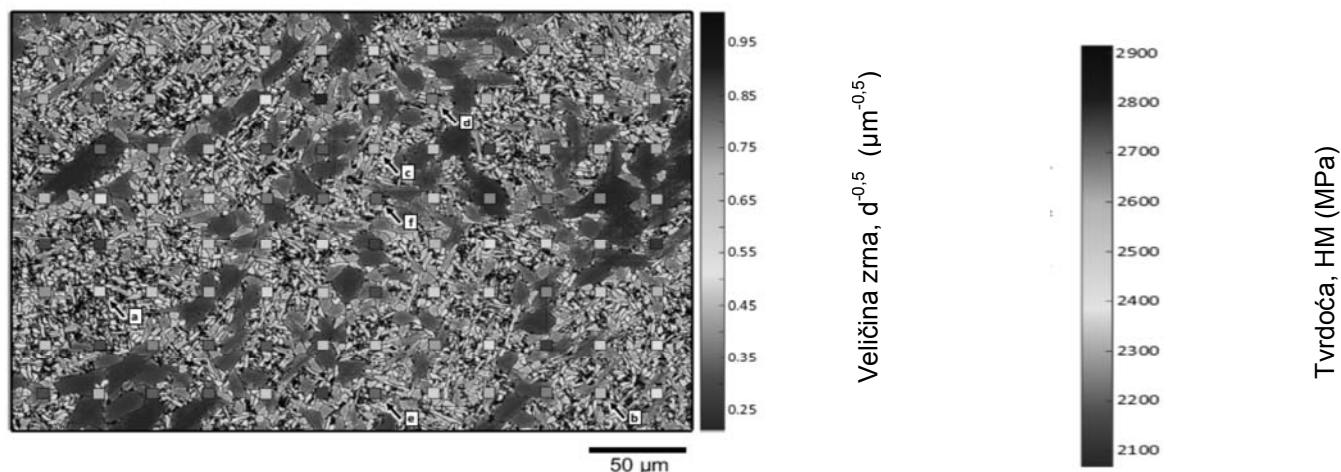


Fig. 12 a Optical micrograph of the hardness measurement area for the heterogeneous weld metal area A2, **b** grain boundary map and visual estimation of the correlation between local grain size and hardness; see text for the explanation and **c** the hardness value for each indentation overlaid on the grain size contour, ranging from 99 to 1% probability level grain size

Sl. 12. a) Optička mikrografija površine merenja tvrdoće na površini A2 heterogenog metala šava, b) mapa granica zrna i vizuelno određivanje korelacije između lokalne veličine zrna i tvrdoće; videti tekst za objašnjenje i c) vrednost tvrdoće za svaki otisak koji se preklapa sa konturom veličine zrna, u opsegu od 99% do 1% nivoa verovatnoće veličine zrna

In general, the low hardness areas correspond with the coarse grains and high hardness with the fine-grained areas. A mixture of different grain sizes under the indentation is found to result in a measured hardness value that corresponds approximately with the average grain size of the area according to the rule of mixtures; see Fig. 13a. When fine grains are surrounded by coarse grains, hardness is found to decrease, and in the opposite case, to increase; see Fig. 13b, c, correspondingly. Placement of the indentation tip in a small cluster of fine grains is found to increase the hardness value, even though the microstructure under and around the indentation would otherwise consist of coarse grains; see Fig. 13d. In some cases, low hardness is measured in fine grains and high hardness in coarse grains; see Fig. 13 e, f, correspondingly. Further numerical analysis of the microstructure at each indentation is required before correlations between local microstructure and hardness can be formulated.

5. Discussion

The local grain size and hardness variation of ferritic base metal and two weld metals were studied. The point-sampled intercept length method was extended for the characterisation of local grain size variation. The local gradient of grain size variation and its dependency on measurement direction were considered. Base metal and homogeneous weld metal did not have significant local grain size variation, while the heterogeneous weld metal had distinct areas of coarse and fine grains. The coarse-grained areas are associated with primary ferrite and the fine-grained areas with acicular ferrite. Hardness was measured to

U principu, područja niske tvrdoće odgovaraju grubom zrnju a visokoj tvrdoći, područja sa finim zrnjom. Mešavina različitih veličina zrna ispod otiska je dovela do izmerene vrednosti tvrdoće koja odgovara otprilike prosečnoj veličini zrna područja u skladu sa pravilima mešavine; vidi sliku. 13a. Kada su fina zrna okružena grubim zrnima, tvrdoća se smanjuje, a u suprotnom slučaju, se povećava; vidi sliku 13b. Postavljanje vrha otiska u malom klasteru finog zrna, povećava se vrednost tvrdoće, iako se mikrostruktura ispod i oko otiska inače sastoji od grubog zrna; vidi sliku 13d. U nekim slučajevima, niska tvrdoća je izmerena na finim zrnima a visoka tvrdoća kod grubih zrna; vidi sliku 13e, f. Dalja numerička analiza mikrostrukture na svakom otisku je potrebna pre nego što se korelacija između lokalnih mikrostrukture i tvrdoće može formulirati.

5. Diskusija

Varijacije lokalne veličine zrna i tvrdoće feritnih osnovnih materijala i dva metala šava su proučavane. Metoda tačkastog uzorkovanja dužine otisaka je produžena na karakterizaciju varijacije lokalne veličine zrna. Razmatrani su lokalni gradijent varijacije veličine zrna i njegove zavisnosti od smera merenja. Osnovni materijali i homogeni metal šava nisu pokazali značajne varijacije lokalne veličine zrna, dok heterogeni šav ima različita područja grubih i finih zrna. Područja krupnog zrna su povezana sa primarnim feritom i sitnozrnim područjima sa acikularnim feritom.

Tvrdoća je merena radi istraživanja uticaja varijacije lokalne veličine zrna na mehanička svojstva. EBSD analiza veličine zrna se obično izvodi pomoću identifikacije zrna i određivanja veličine zrna sa

investigate the influence of local grain size variation on mechanical properties. EBSD grain size analysis is typically carried out using the grain identification and determination of grain size from its surface area, often taken as the diameter of a circle with an equivalent surface area [12, 36]. For homogeneous equiaxed microstructures, this assumption is justified, and values determined by circle equivalent diameter (d_{ceq}) and linear intercept are comparable within 10 % of each other [15]. The use of circle equivalent diameter has limitations when applied to heterogeneous weld metal microstructures. Welds can have microstructures where definition of individual grains is ambiguous due to discontinuities in the grain boundaries, and thus clusters of multiple grains can be detected as a single grain. This has been demonstrated for stainless steel pipe welds by Saukkonen et al. [37], also showing the robustness of the linear intercept method to EBSD indexing errors and the consequent grain detection. Furthermore, the circle equivalent diameter is not well suited for high aspect ratio grains by itself, and more information about the shape of the grain is required [38]. For welds, the high aspect ratio of grains, as well as morphological anisotropy, make the assumption of circular geometry invalid. Thus, the volume-weighted linear intercept method should be preferred for grain size measurement of heterogeneous weld microstructures with complex grain morphologies. To that end, the methodology presented here is able to consider the aspect ratio of grains through the four measurement directions. Although limited to four measurement directions, it seems sufficient for the characterization of weld metal microstructures.

svoje površine, često se uzima kao prečnik kruga sa ekvivalentnim površinama [12, 36]. Za homogene istoosne mikrostrukture, ova pretpostavka je opravdana, i vrednosti određuje krug ekvivalentnog prečnika (d_{ceq}) i linearno preklapanje je uporedivo do 10% jedno sa drugim [15]. Upotreba kruga ekvivalentnog prečnika ima ograničenja kada se primjenjuje na mikrostrukturama heterogenih šavova.

Šavovi mogu imati mikrostrukturu gde je dvosmisleno definisano pojedino zrno zbog diskontinuiteta u granicama zrna tako da klaster više zrna može biti prepoznat kao zrno. To je demonstrirano na zavarenim spojevima čeličnih cevi po Saukkonen i dr. [37], takođe pokazuje robusnost metode linearnog preklapanja na EBSD indeksiranje grešaka i posledično otkrivanje zrna. Osim toga, krug ekvivalentnog prečnika nije dobro prilagođen za visoki aspekt zrna po sebi, a potrebno je i više informacija o obliku zrna [38]. Za šavove, visok odnos aspekata zrna, kao i morfološka anizotropija, čine pretpostavku kružne geometrije nevažecom. Dakle, zapreminski procenjena linearna metoda ima prednost kod merenja veličine zrna mikrostrukture heterogenih šavova složene morfologije zrna. U tom smislu, ovde predstavljena metodologija je u stanju uzeti u obzir, odnos aspekata zrna za četiri smeru merenja. Iako je ograničen na četiri smeru merenja, to je i dovoljno za karakterizaciju metala mikrostruktura šava.

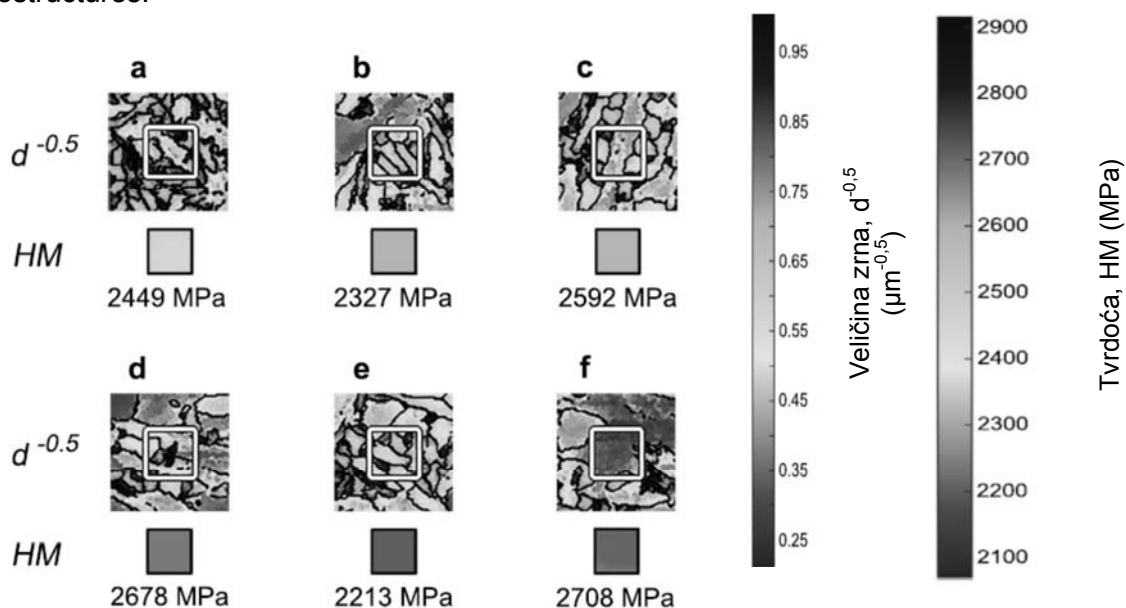


Fig. 13 Expanded view of grain size and hardness at indentations a–f indicated in Fig. 12c

Sl. 13. Prošireni izgled veličine zrna i tvrdoće po otiscima a–f označenim na sl. 12 c

It is also not sensitive to small discontinuities in the grain boundaries that are observed in welded [39, 40] and deformed [41] steel microstructures. For a physically based definition, the grain size measurement direction should be parallel with the direction of the slip plane in each grain, requiring the utilisation of orientation information in grain size measurement. As the present approach is based on measurement of 2D sections, the morphological anisotropy of the grains is not considered.

Grain size variation was found to be significant within acicular ferrite in the heterogeneous weld metal, having the biggest relative difference between the minimum and maximum grain size curves in Fig. 10. The variation is related to the high aspect ratio of the grains, resulting in a significant difference between the shortest and longest grain size measurement directions.

Local variation of grain size is visually significant within acicular ferrite, as shown in Figs. 10 and 12c, ranging approximately between 1 and 5 μm even though not revealed by the moving average line probe. The line probes are influenced by the number of grains falling under the line, and thus, the true variation will average out with a large number of grains. This is the case for acicular ferrite in the heterogeneous weld metal, and further research is required to define methods better suited for quantifying the local grain size variation numerically.

Even though the base metal and homogeneous weld metal are uniform in grain size, hardness measurements revealed low and high hardness regions using HV0.1 and HV0.3 test forces; see Fig. 11b, c, e and f. Visually, the grain size is uniform through the entire microstructure, and thus, it seems that factors other than grain size contributed to the observed differences. Hardness measurements using HV0.01 test force revealed that in the heterogeneous weld metal, the low hardness values are usually associated with coarse grains and high hardness values with fine grains, as is expected by the Hall–Petch relationship [8, 9]; see Fig. 12c. Despite the visual estimate of 54 % of hardness measurements corresponding with the local grain size (Fig. 12b), variation is observed between regions of similar grain size. This can be caused by differences in grain orientation [42, 43] and dislocation slip transmission between grains [44, 45]. The plastic zone from a hardness indentation is hemispheric, extending 1.0–1.9 times the contact radius with the highest plastic strain (>20 %) located directly underneath the indenter contact region [46]. Therefore, the microstructure of the entire plastic zone will influence the hardness

Takođe nije osetljiv na male diskontinuitete u granicama zrna koji su primećeni u zavarenim [39, 40] i deformisanim [41] mikrostrukturama čelika. Za fizički zasnovanu definiciju, pravac merenja veličine zrna trebalo bi da bude paralelan sa pravcem ravni klizanja u svakom zrnu, zahteva korišćenje informacija o orijentaciji merenja veličine zrna.

Kao što se sadašnji pristup zasniva na merenju 2D preseka, morfološka anizotropija zrna se ne razmatra.

Utvrđeno je da je varijacija veličine zrna značajna kod acikularnog ferita u heterogenom metalu šava, jer ima najveću relativnu razliku između minimalne i maksimalne krive veličine zrna na Sl. 10. Varijacija se odnosi na visoki odnos aspekata zrna, što je dovelo do značajne razlike između najkraćeg i najdužeg pravca merenja veličine zrna.

Lokalne varijacije veličine zrna su vizuelno značajne kod acikularnog ferita, kao što je prikazano na slikama. 10 i 12c, u rasponu između 1 i 5 μm , iako nije otkriven pokretni prosek linijske sonde. Linijske sonde su pod uticajem broja zrna koja padaju ispod linija, i na taj način, stvarna varijacija biće u proseku sa velikim brojem zrna. Ovo je slučaj za acikularni ferit u heterogenim metalu šava, i dalje istraživanje je potrebno za definisanje pogodnijih metoda za brojčano kvantifikovanje varijacije lokalne veličine zrna.

Iako su veličine zrna u osnovnom materijalu i homogenom metalu šava uniformne, merenjem su utvrđene regije niske i visoke vrednosti koristeći HV0.1 i HV 0.3 ispitne sile; vidi sliku. 11b, c, e i f. Vizuelno, veličina zrna je ujednačena kroz čitavu mikrostrukturu, i na taj način, čini se da i drugi faktori osim veličine zrna, doprinose uočenoj razlici.

Merenjem tvrdoće pomoću HV0.01 ispitne sile ustanovljeno je da u heterogenom metalu šava, niske tvrdoće obično povezuju s grubim zrnima a visoke vrednosti tvrdoće s finim zrna, kao što se očekuje do Hall-Petch odnosa [8, 9]; vidi sliku 12c. Uprkos vizuelnoj proceni da 54% merenja tvrdoće odgovara lokalnoj veličini zrna (sl. 12b), varijacije su zapažene između regija slične veličine zrna. Ovo može biti uzrokovano razlikama u orijentaciji zrna [42, 43] i prenosu klizanja dislokacija između zrna [44, 45]. Plastične zone iz otisaka merenja tvrdoće su hemisferične, proširujući 1,0-1,9 puta kontaktni radijus sa najvećom plastičnom deformacijom (> 20%) koje se nalaze neposredno ispod oblasti kontakta otiska [46]. Prema tome, mikrostruktura cele plastične zone će uticati na merenje tvrdoće. Ovo je vidljivo za 19% merenja

gde measurement. This is visible for the 19 % of measurements where surrounding coarse or fine grains either decreased or increased the hardness value, respectively. The limitation of observing grain size on the surface of the specimen is visible with 27 % of the measurements as the grain size is not in agreement with the measured hardness value. Furthermore, the microstructural length scale, e.g. grain size, interacts with the length scale of hardness measurements [47]. These effects become relevant with indentations small relative to the grain size, and disappear as the length scale of deformation is large relative to the microstructural heterogeneities [47]. For the heterogeneous weld metal, the coarse grains are up to 25 μm in size while the fine grains are 1–5 μm in size, and thus the plastic zone of an indentation with 7- μm diagonal and 1- μm depth can be limited to a few grains or tens of grains. Therefore, the size of the plastic zone can vary depending on grain size and should be considered in the grain size measurement. In addition to grain size characterisation, phase properties need to be considered in microstructural analysis.

Even though in case of acicular ferrite and primary ferrite the phases behave similarly in hardness measurements [23], the tensile properties and toughness can show significant differences despite similarity of grain size. Zhao [48] found that acicular ferrite ($d=4\text{--}5\ \mu\text{m}$) had lower ultimate tensile strength but higher yield strength than ultrafine-grained ferrite ($d=1\ \mu\text{m}$). The differences were attributed to carbonitride precipitation, higher dislocation density and the lath bundle size of acicular ferrite. In general, acicular ferrite is beneficial for mechanical properties and besides tensile properties it improves impact toughness and decreases the transition temperature [49, 50].

Thus, methods are sought after to increase the volume fraction of acicular ferrite in welds [49, 51]. In this study, the weld metal microstructures were examined using two dimensional analysis. Based on current analysis hardness shows good agreement (54 %) in locations where the local grain size gradient is typically small. It is expected that the gradient of grain size under the indentation has a significant effect on measured hardness values as well. It is likely that for the locations with good agreement the grain size gradient under the indentation is small or that the gradient is such that the measured hardness appears to correlate with surface grain size. For weld metals, the solidification behaviour controls the grain structure and the achieved mechanical properties [52].

se okružujuća gruba ili fina zrna ili smanjila ili povećala vrednost tvrdoće. Ograničenje u posmatranju veličine zrna na površini uzorka je to što 27% merenja veličine zrna ne odgovara izmerenim vrednostima tvrdoće.

Osim toga, mikrostrukturna dužinska skala, npr veličine zrna, u interakciji je sa dužinskom skalom merenja tvrdoće [47]. Ovi efekti postaju relevantni sa malim otiscima u odnosu na veličinu zrna, i nestaju kada je dužinska skala deformacije velika u odnosu na mikrostrukturne heterogenosti [47]. Za heterogeni šav, gruba zrna su do 25 μm veličine, a fina zrna su veličine 1-5 μm , a time i plastične zone otisaka sa dijagonalom 7- μm i dubinom 1- μm mogu biti ograničene na nekoliko zrna ili desetina zrna. Dakle, veličina plastične zone može da varira zavisno od veličine zrna i treba uzeti u obzir merenje veličine zrna. Osim karakterizacije veličine zrna, svojstva faza treba uzeti u obzir kod mikrostrukturne analize.

Iako je u slučaju acikularnog ferita i primarnog ferita, faze se ponašaju slično kod merenja tvrdoće [23], i zateznih svojstava a žilavost može pokazati značajne razlike uprkos sličnoj veličini zrna.

Zhao [48] je utvrdio da acikularni ferit ($d = 4\text{--}5\ \mu\text{m}$) ima nižu zateznu čvrstoću na zatezanje, ali veći napon tečenja od ultrafinog ferita ($d = 1\ \mu\text{m}$). Razlike su pripisane talozima karbonitrida, većoj gustini dislokacija i veličini traka acikularnog ferita. U principu, acikularni ferit je od koristi za mehanička svojstva i osim zateznih svojstava poboljšava udarnu žilavost i snižava prelaznu temperaturu [49, 50].

Dakle, metode su tražene posle da se poveća zapreminski udeo acikularnog ferita u šavu [49, 51]. U ovoj studiji, mikrostruktura metala šava je ispitana pomoću dvodimenzionalne analize. Na bazi trenutne analize tvrdoće ustanovljeno je dobro slaganje (54%) na lokacijama gde su lokalni gradijenti veličine zrna obično mali. Očekuje se da gradijent veličine zrna pod otiskom ima značajan uticaj na izmerene vrednosti tvrdoće. Verovatno da je za lokacije s dobrim slaganjem gradijenta veličina zrna pod otiskom je mala ili da je gradijent takav da je izmerena tvrdoća u korelaciji s veličinom površine zrna. Kod metala šava, ponašanje pri očvršćavanju kontroliše strukturu zrna i postignuta mehanička svojstva [52].

The competitive growth of grains, influenced by the transient thermal conditions and solidification characteristics of the weld metal, determines the morphology of the grain structure [52, 53]. In fusion welding axial, columnar and equiaxed grain morphologies can be observed depending on the thermal gradient, cooling rate and use of grain refining particles [52, 54,55]. Therefore, the appearance of the grains on one cross section may not be representative of the grain morphology [56], causing bias for the assumed relationship between surface area and volume (Eq. 3).

For example, columnar grains can appear very large on the transverse section even though the grains are quite shallow. Thus, the morphology of the grains and the anisotropy of the microstructure in the direction of the weld bead should be included in the analysis. It is expected that hardness of the heterogeneous weld metal (Fig. 12) is better predicted if the morphological anisotropy is considered. Furthermore, other obstacles to dislocation motion such as inclusions can influence the measured hardness values on a local scale. Consideration of these aspects is left for future work.

6. Conclusions

The point-sampled grain size measurement method was extended to the characterisation of local grain size variation. The Hall–Petch grain size parameter ($d^{-0.5}$) was found to give a good visual representation of grain size-dependent mechanical properties. Heterogeneous weld metal was found to have significant local variation of grain size while base metal and homogeneous weld metal were not. Furthermore, the local variation of grain size correlates with hardness measurements for a large portion of the measurements, with coarse grains generally showing low hardness and fine grains high hardness. Grain size alone was not able to explain all of the measurement results and thus future work is needed to analyse the local microstructure to determine factors other than grain size that should be included in the microstructural characterisation. In particular, the morphological anisotropy, i.e. the three dimensional shape of the grains needs to be characterized.

Acknowledgments The work has been done within the FIMECC BSA (Breakthrough Steels and Applications) programme as part of the FIMECC Breakthrough Materials Doctoral School. We gratefully acknowledge the financial support from the Finnish Funding Agency for Innovation (Tekes) and the participating companies. Funding from the Academy of Finland project BFatigue of Steel Sandwich Panels[^] (FASA) under grant agreement

Konkurentski rast zrna, pod uticajem prolaznih termičkih uticaja i karakteristike očvršćavanja metala šava, određuju morfologiju strukture zrna [52, 53]. Na liniji stapanja kod zavarivanja, stubičasta i istoosna morfologija zrna može se posmatrati u zavisnosti od termičkog gradijenta, brzine hlađenja i korišćenje rafinacije zrna česticama [52, 54,55]. Dakle, izgled zrna na nekom preseku ne može biti predstavnik morfologije zrna [56], jer uzrokuje i pretpostavke za odnos između površine i zapremine (EQ. 3).

Na primer, stubičasta zrna se mogu pojaviti kao vrlo velika na poprečnom preseku iako su zrna vrlo plitka. Stoga, morfologija zrna i anizotropija mikrostrukture u pravcu šava treba da se uključi u analizu. Očekuje se da tvrdoća heterogenog šava (sl. 12) se bolje predviđa ako se razmatra morfološka anizotropija. Osim toga, druge prepreke kretanju dislokacija kao što su uključci mogu uticati na izmerene vrednosti tvrdoće na lokalnoj skali. Razmatranje tih aspekata je ostavljeno za budući rad.

6. Zaključci

Metoda merenja veličina zrna preko tačaka je proširena na karakterizaciju varijacije lokalne veličine zrna. Utvrđeno je da Hall-Petch-ov parametar veličine zrna ($d^{-0.5}$) daje dobar vizuelni prikaz mehaničkih svojstava zavisnih od veličine zrna. Za heterogeni metal šava je utvrđeno da ima značajnu lokalnu varijaciju veličine zrna dok kod osnovnih materijala i homogenih metala šava, nije bilo. Osim toga, lokalne varijacije veličine zrna su u korelaciji sa merenjima tvrdoće za veliki deo merenja, sa grubim zrnima generalno pokazuju niske tvrdoće i sa finim zrnima, visoke tvrdoće. Samo veličinom zrna nije moguće objasniti sve rezultate merenja i na taj način, za budući rad je potrebna analiza lokalne mikrostrukture kako bi se utvrdili faktori, osim veličine zrna, koje treba uključiti u mikrostrukturnu karakterizaciju.

Posebno, morfološka anizotropija, t.j. potrebna za karakterizaciju trodimenzionog oblika zrna. Zahvalnost. Rad je deo programa FIMECC BSA (Breakthrough Steels and Applications) kao dela FIMECC Breakthrough Materials Doctoral School. Dugujemo veliku zahvalnost za finansijsku potporu Finske agencije za finansiranje inovacija (Tekes) i kompanija učesnica. Finansiranje projekta Finske akademije „Zamor čeličnih sendvič panela“ (FASA) u skladu sa sporazumom o grantu br. 261286 se zahvaljujemo s poštovanjem. Zahvaljujemo se na konstruktivnim komentarima profesora Sven

no. 261286 is gratefully appreciated. The constructive comments of Professor Sven Bossuyt from Aalto University School of Engineering are gratefully acknowledged. Tuomo Nyyssönen from Tampere University of Technology is acknowledged for providing EBSD data suitable for the preliminary development of the grain size measurement Matlab code.

Appendix 1: Vickers hardness compared to instrumented indentation hardness

Traditional hardness measurements rely on measurement of, e.g. the diagonal of the indentation after the test force has been removed. As a result, only the residual plastic deformation is considered and elastic deformation is ignored. Instrumented indentation testing (IIT) enables the evaluation of both the elastic and plastic deformation by monitoring of the test force and displacement of the indenter. In addition to hardness, other material parameters such as indentation modulus can be determined without the need for optical measurement of the indentation [34]. Due to the force-displacement data being available, several definitions can be used for defining hardness from IIT measurements, with indentation hardness (HIT) being the most commonly used parameter. However, the definition of indentation hardness [34] is the maximum force divided by the projected area, which is not the case for definition of traditional Vickers hardness. ISO 14577-1 Annex F [34] includes the correlation of HIT to Vickers hardness by converting the projected area to the surface area of contact. The correlation between the two is formulated as $HV = 0.0945 \times HIT$ based on the constant ratio of projected area to surface area and unit conversion to kg/mm^2 . It is noted that the values calculated in this manner should not be used as a substitute for Vickers hardness.

Another approach is to use Martens hardness (HM), which by definition is the same as traditional Vickers hardness. These two options are compared in Fig. 14 for the measurements of Ref. [23], although not presented there in this form. For comparability, Martens hardness is also converted to kilogrammes per millimetre squared. The ferritic weld metals (WM) have good correlation with Martens hardness and Vickers hardness below 250 HV within the $\pm 5\%$ limits. At higher values, Martens hardness values are lower than Vickers hardness, indicating that significant in-plane elastic recovery took place after the test force was removed, thus reducing the optically measured diagonals. Indentation hardness (HIT) shows higher deviation

Bossuyt-a sa Aalto University School of Engineering. Izražavamo zahvalnost g-dinu Tuomo Nyyssönen sa Tehnološkog univerziteta Tampere na ustupanju EBSD podataka pogodnih za preliminarni razvoj Matlab pravila merenja veličine zrna.

Dodatak 1: Tvrdoća po Vickersu u poređenju sa instrumentirano merenom tvrdoće otisaka

Tradicionalno merenje tvrdoće se oslanja na merenje, npr dijagonala otiska nakon što je ispitna sila uklonjena. Kao rezultat toga, samo zaostale plastične deformacije se razmatraju a elastične deformacije se zanemaruju. Instrumentovano ispitivanje otisaka (IIT) omogućava evaluaciju i elastične i plastične deformacije praćenjem ispitne sile i premeštanja otisaka. Osim tvrdoće, drugi parametri materijala kao što je modul otiska može se utvrditi bez potrebe za optičkim merenjem otisaka [34].

Zavisno od raspoloživih podataka o kretanju sila, može se koristiti nekoliko definicija za određivanje tvrdoće iz IIT merenja, sa tvrdoćom otisaka (HIT) što je najčešće korišćeni parametar. Međutim, definicija tvrdoće otisaka [34] je maksimalna sila podeljena sa projektovanom površinom, što nije slučaj za definiciju tradicionalne Vickers tvrdoće. ISO 14577-1 Aneks F [34] uključuje korelaciju HIT sa Vickers tvrdoćom pretvaranjem projektovane površine na površinu kontakta. Korelacija ova dva je formulisana kao $HV = 0.0945 \times HIT$ zasnovana na konstantnom odnosu projektovane površine na površinu a jedinica mere konverzije u kg/mm^2 . Napominje se da vrednosti izračunate na ovaj način, ne treba koristiti kao zamenu za tvrdoću po Vickersu.

Drugi pristup je korišćenje Martens tvrdoće (HM), koja je po definiciji isto kao i tradicionalna tvrdoća po Vickersu. Ove dve opcije su upoređene na sl. 14 za merenje Ref. [23], iako nije u ovom obliku ovde prikazan. Radi uporedivosti, Martens tvrdoća se pretvara u kilograme po kvadratnom milimetru. Feritni metal šava (WM) ima dobru korelaciju sa Martens tvrdoćom i tvrdoćom po Vickersu ispod 250 HV unutar $\pm 5\%$ ograničenja. Kod većih vrednosti, Martens tvrdoća je niža od tvrdoće po Vickersu, što ukazuje da se ravanski elastični oporavak dogodio u značajnom obimu, nakon uklanjanja ispitne sile čime se smanjuju optički merene dijagonale.

Tvrdoća otisaka (HIT) pokazuje veća odstupanja pri

at low Vickers hardness values. The values are consistently higher than Vickers hardness, following approximately the +5 % line above 200 HV. Due to the good agreement of Martens hardness below 250 HV, it is used for the ferritic samples in the current study.

niskim vrednostima tvrdoće po Vickersu. Vrednosti su konstantno veće od Vickers tvrdoća, nakon otprilike 5% linija iznad 200 HV. Zbog dobrog slaganja Martens tvrdoće 250 HV, ona se koristi za feritne uzorke u studiji

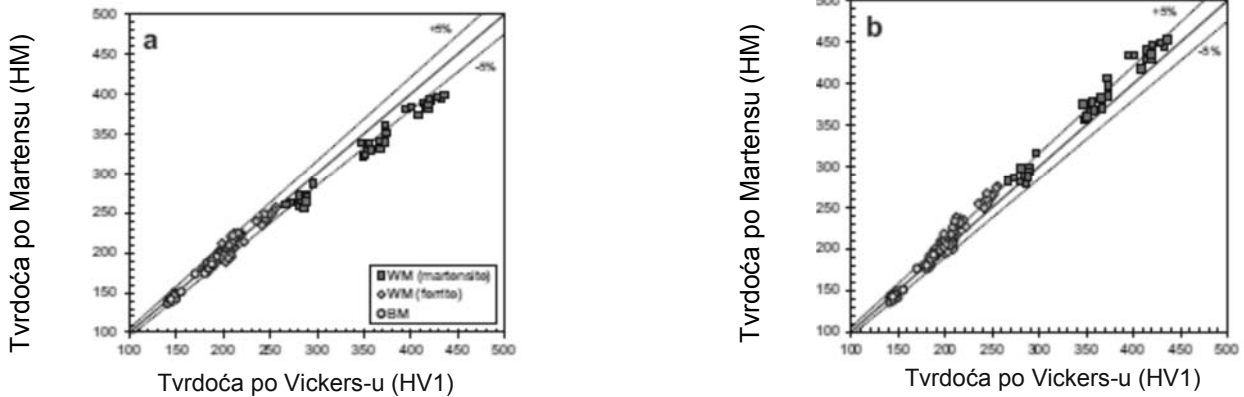


Fig. 14 Comparison of base metal (BM) and weld metal (WM) Vickers hardness (HV1) to a Martens hardness (HM) and b indentation hardness converted to Vickers hardness. The asterisk indicates conversion of units from MPa to kg/mm². The measurements are from Ref. [23], although not presented there in this form

SI. 14 Poređenje Vickers tvrdoća (HV1) sa Martens tvrdoćom (HM) osnovnog materijala (BM) i metala šava (WM) i b tvrdoće otisaka pretvorene u tvrdoću po Vickersu. Zvezdica označava konverziju jedinica iz MPa u kg / mm². Merjenja su iz Ref. [23], iako nije ovaj oblik ovde prikazan

Appendix 2: Grain size contour and hardness values

This appendix provides an alternative representation of the grain size contour presented in Fig. 12. In order to reveal the microstructure under each indentation, the hardness indentations have been moved below each indentation in Fig. 15. The measured hardness values are presented in Table 4.

Dodatak 2: Kontura veličine zrna i vrednosti tvrdoće

Ovaj dodatak daje alternativni prikaz veličine zrna konture prikazan na sl. 12. Kako bi se otkrila mikrostruktura pod svakim otiskom, tvrdoća otiska je pomerena ispod svakog otiska sa sl. 15. a izmerene vrednosti tvrdoća prikazane su u tabeli 4.

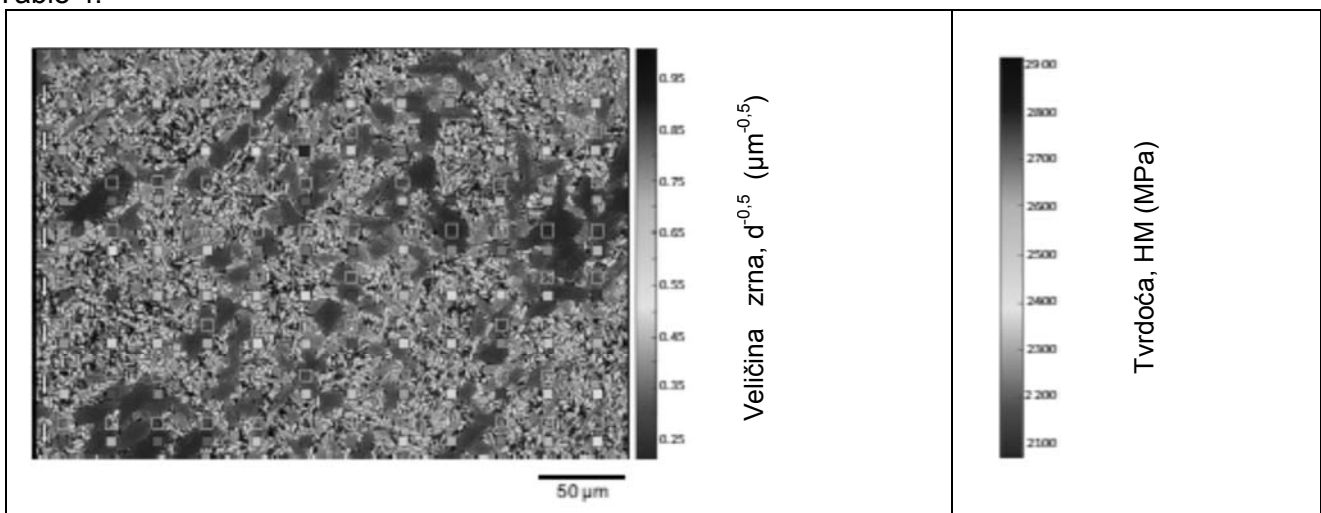


Fig. 15 The hardness value for each indentation overlaid on mean grain size contour for the heterogeneous weld metal area A2. Hardness values are shown below each indentation, indicated by the arrows on the left side, to reveal the grain size under the indentations. The grain size colour contour ranges from 99 to 1 % probability level grain size

SI. 15 Vrednost tvrdoće za svaki otisak preklapljen na konturu srednje veličine zrna za područje heterogenog šava A2. Vrednosti tvrdoća su prikazane ispod svakog otiska, označeno strelicama na levoj strani, da bi se otkrila veličina zrna ispod otiska boja konture veličine zrna kreće se od 99 na 1% veličine nivoa verovatnoće zrna

		Intentionation number											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Intentionation row	8	2615	2587	2548	2585	2515	2549	2464	2557	2629	2593	2283	2485
	7	2605	2726	2609	2437	2396	2068	2356	2678	2320	2514	2445	2530
	6	2657	2701	2295	2559	2737	2192	2592	2522	2751	2332	2549	2312
	5	2564	2405	2526	2484	2239	2691	2708	2488	2259	2238	2259	2323
	4	2747	2763	2554	2540	2494	2432	2145	2322	2411	2449	2523	2113
	3	2541	2449	2513	2309	2441	2524	2170	2361	2468	2256	2491	2586
	2	2341	2743	2258	2200	2720	2521	2513	2292	2421	2133	2360	2402
	1	2174	2321	2200	2197	2349	2143	2213	2453	2596	2247	2327	2396

Intentionation (1,1) is located in the lower left corner and intentionation (12, 8) in the upper corner of the figures

Table 4. Martens hardness (HM) values [MPa] for the intentionations presented in Figs. 12 i 15

		Broj otiska											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Niz otisaka	8	2615	2587	2548	2585	2515	2549	2464	2557	2629	2593	2283	2485
	7	2605	2726	2609	2437	2396	2068	2356	2678	2320	2514	2445	2530
	6	2657	2701	2295	2559	2737	2192	2592	2522	2751	2332	2549	2312
	5	2564	2405	2526	2484	2239	2691	2708	2488	2259	2238	2259	2323
	4	2747	2763	2554	2540	2494	2432	2145	2322	2411	2449	2523	2113
	3	2541	2449	2513	2309	2441	2524	2170	2361	2468	2256	2491	2586
	2	2341	2743	2258	2200	2720	2521	2513	2292	2421	2133	2360	2402
	1	2174	2321	2200	2197	2349	2143	2213	2453	2596	2247	2327	2396

Otisak (1,1) je lociran u donjem levom uglu a otisak (12, 8) u gornjem desnom uglu slike

Tabela 4. Vrednosti Martens tvrdoća (MP) [MPa] za otiske prikazane na sl. 12 i 15

Open Access

This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made.

Otvoreni pristup

Ovaj članak se distribuira pod uslovima internacionalne licence Creative Commons Attribution 4.0

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), koji dozvoljava neograničenu upotrebu, distribuciju i reprodukciju u svakom pogledu, uz obezbeđen odgovarajući kredit ka autoru(e)/ime originala, uz obezbeđenje linka sa Creative Commons licencom, gde se navode napravljene izmene.

References

- Hall EO (1954) Variation of hardness of metals with grain size. *Nature* 173:948–9
- Armstrong RW, Codd I, Douthwaite RM, Petch NJ (1962) The plastic deformation of polycrystalline aggregates. *Philos Mag* 7:45–58
- Armstrong RW (1970) The influence of polycrystal grain size on several mechanical properties of materials. *Metall Mater Trans* 1: 1169–76
- Tachibana S, Kawachi S, Yamada K, Kunio T (1988) Effect of grain refinement on the endurance limit of plain carbon steels at various strength levels. *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, A* Hen/Transactions Japan Soc Mech Eng Part A 54:1956–61
- Furukawa M, Horita Z, Nemoto M, Valiev RZ, Langdon TG (1996) Microhardness measurements and the Hall–Petch relationship in an Al–Mg alloy with submicrometer grain size. *Acta Mater* 44:4619–29. doi:10.1016/1359-6454(96)00105-X
- Chapetti M, Miyata H, Tagawa T, Miyata T, Fujioka M (2004) Fatigue strength of ultra-fine grained steels. *Mater Sci Eng A* 381: 331–6. doi:10.1016/j.msea.2004.04.055
- Hansen N (2004) Hall–Petch relation and boundary strengthening. *Scr Mater* 51:801–6. doi:10.1016/j.scriptamat.2004.06.002

8. Hall EO (1951) The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results. *Proc Phys Soc Sect B* 64:747–53
9. Petch NJ (1953) The cleavage strength of polycrystals. *J Iron Steel Inst* 174:25–8
10. Masumura RA, Hazzledine PM, Pande CS (1998) Yield stress of fine grained materials. *Acta Mater* 46:4527–34. doi:10.1016/S1359-6454(98)00150-5
11. Roebuck B (2000) Measurement of grain size and size distribution in engineering materials. *Mater Sci Technol* 16:1167–74
12. Mingard KP, Roebuck B, Quested P, Bennett EG (2010) Challenges in microstructural metrology for advanced engineered materials. *Metrologia* 47:S67–82. doi:10.1088/0026-1394/47/2/S08
13. Mingard KP, Roebuck B, Bennett EG, Gee MG, Nordenstrom H, Sweetman G et al (2009) Comparison of EBSD and conventional methods of grain size measurement of hardmetals. *Int J Refract Met Hard Mater* 27:213–23. doi:10.1016/j.ijrmhm.2008.06.009
14. Mingard KP, Day AP, Quested PN (2014) Recent developments in two fundamental aspects of electron backscatter diffraction. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* 55:012011. doi:10.1088/1757-899X/55/1/012011
15. Mingard KP, Quested PN, Peck MS (2012) Determination of grain size by EBSD - Report on a round robin measurement of equiaxed Titanium
16. ISO (2012) ISO 13067 - Microbeam analysis. Electron backscatter diffraction. Measurement of average grain size
17. Kurzydowski KJ, Bucki JJ (1993) Flow stress dependence on the distribution of grain size in polycrystals. *Acta Metall Mater* 41:3141–6
18. Weertman JR, Sanders PG, Youngdahl CJ (1997) The strength of nanocrystalline metals with and without flaws. *Mater Sci Eng A* 234–236:77–82
19. Morita T, Mitra R, Weertman JR (2004) Micromechanics model concerning yield behavior of nanocrystalline materials. *Mater Trans* 45:502–8. doi:10.2320/matertrans.45.502
20. Berbenni S, Favier V, Berveiller M (2007) Micro-macro modelling of the effects of the grain size distribution on the plastic flow stress of heterogeneous materials. *Comput Mater Sci* 39:96–105. doi:10.1016/j.commatsci.2006.02.019
21. Raeisinia B, Sinclair CW, Poole WJ, Tomé CN (2008) On the impact of grain size distribution on the plastic behaviour of polycrystalline metals. *Model Simul Mater Sci Eng* 16:025001. doi:10.1088/0965-0393/16/2/025001
22. Ramtani S, Bui HQ, Dirras G (2009) A revisited generalized selfconsistent polycrystal model following an incremental small strain formulation and including grain-size distribution effect. *Int J Eng Sci* 47:537–53. doi:10.1016/j.ijengsci.2008.09.005
23. Lehto P, Remes H, Saukkonen T, Hänninen H, Romanoff J (2014) Influence of grain size distribution on the Hall–Petch relationship of welded structural steel. *Mater Sci Eng A* 592:28–39. doi:10.1016/j.msea.2013.10.094
24. Gundersen HJG, Jensen EB (1983) Particle sizes and their distributions estimated from line- and point-sampled intercepts. Including graphical unfolding. *J Microsc* 131:291–310
25. Gundersen HJG, Jensen EB (1985) Stereological estimation of the volume-weighted mean volume of arbitrary particles observed on random sections. *J Microsc* 138:127–42
26. ASTM E1382 - 97 (2004) Standard test methods for determining average grain size using semiautomatic and automatic image analysis. ASTM International, West Conshohocken. doi:10.1520/E1382-97R04
27. Takeuchi S (2001) The mechanism of the inverse Hall–Petch relation of nanocrystals. *Scr Mater* 44:1483–7. doi:10.1016/S1359-6462(01)00713-8
28. Fan G, Choo H, Liaw P, Lavernia E (2005) A model for the inverse Hall–Petch relation of nanocrystalline materials. *Mater Sci Eng A* 409:243–8. doi:10.1016/j.msea.2005.06.073
29. Underwood EE (1970) Quantitative stereology. Addison-Wesley Publishing Co., Reading
30. ASTM E1245 - 03 (2003) Standard practice for determining the inclusion or second-phase constituent content of metals by automatic image analysis. ASTM International, West Conshohocken. doi:10.1520/E1245-03
31. Lehto P (2015) Aalto University wiki - grain size measurement using Matlab. <https://wiki.aalto.fi/display/GSMUM>
32. (1991) Guide to the light microscope examination of ferritic steel weld metals, Doc. IIW IX-1533-88. *Weld World* 29:160–76
33. ASTM E 562 - 02 (2002) Standard test method for determining volume fraction by systematic manual point count. ASTM International, West Conshohocken. doi:10.1520/E0562-11
34. ISO 14577-1 (2002) Metallic materials. Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Part 1: Test method. International Organization for Standardization, Geneva
35. Gee M, Mingard K, Roebuck B (2009) Application of EBSD to the evaluation of plastic deformation in the mechanical testing of WC/Co

hardmetal. *Int J Refract Met Hard Mater* 27:300–12. doi:10.1016/j.ijrmhm.2008.09.003

36. Mingard KP, Roebuck B, Bennett EG, Thomas M, Wynne BP, Palmiere EJ (2007) Grain size measurement by EBSD in complex hot deformed metal alloy microstructures. *J Microsc* 227:298–308. doi:10.1111/j.1365-2818.2007.01814.x

37. Saukkonen T, Aalto M, Virkkunen I, Ehrnstén U, Hänninen H (2011) Plastic strain and residual stress distributions in an AISI 304 stainless steel BWR pipe weld. 15th Int. Conf. Environ. Degrad, p. 2351–67

38. Radwański K, Wrożyna A, Kuziak R (2015) Role of the advanced microstructures characterization in modeling of mechanical properties of AHSS steels. *Mater Sci Eng A* 639:567–74. doi:10.1016/j.msea.2015.05.071

39. Nie W, Shang C, You Y, Zhang X, Subramanian S (2013) Microstructure and toughness of the simulated welding heat affected zone in X100 pipeline steel with high deformation resistance. *Acta Metall Sin* 48:797–806. doi:10.3724/SP.J.1037.2012.00215

40. Sabooni S, Karimzadeh F, Enayati MH, Ngan a HW (2015) Friction-stir welding of ultrafine grained austenitic 304L stainless steel produced by martensitic thermomechanical processing. *Mater Des* 76:130–40. doi:10.1016/j.matdes.2015.03.052

41. Gazder A, Cao W, Davies CHJ, Pereloma EV (2008) An EBSD investigation of interstitial-free steel subjected to equal channel angular extrusion. *Mater Sci Eng A* 497:341–52. doi:10.1016/j.msea.2008.07.030

42. Haušild P, Materna A, Nohava J (2014) Characterization of anisotropy in hardness and indentation modulus by nanoindentation. *Metallogr Microstruct Anal* 3:5–10. doi:10.1007/s13632-013-0110-8

43. Stinville JC, Tromas C, Villechaise P, Templier C (2011) Anisotropy changes in hardness and indentation modulus induced by plasma nitriding of 316L polycrystalline stainless steel. *Scr Mater* 64:37–40. doi:10.1016/j.scriptamat.2010.08.058

44. Patriarca L, Abuzaid W, Sehitoglu H, Maier HJ (2013) Slip transmission in bcc FeCr polycrystal. *Mater Sci Eng A* 588:308–17. doi:10.1016/j.msea.2013.08.050

45. SoerW, De Hosson JTM (2005) Detection of grain-boundary resistance to slip transfer using nanoindentation. *Mater Lett* 59:3192–5. doi:10.1016/j.matlet.2005.03.075

46. Durst K, Backes B, Göken M (2005) Indentation size effect in metallic materials: correcting for the size of the plastic zone. *Scr Mater* 52:1093–7. doi:10.1016/j.scriptamat.2005.02.009

47. Lilleodden E, NixW (2006) Microstructural length-scale effects in the nanoindentation behavior of thin gold films. *Acta Mater* 54:1583–93. doi:10.1016/j.actamat.2005.11.025

48. Zhao MC, Yang K, Shan YY (2003) Comparison on strength and toughness behaviors of microalloyed pipeline steels with acicular ferrite and ultrafine ferrite. *Mater Lett* 57:1496–500. doi:10.1016/S0167-577X(02)01013-3

49. Fattahi M, Nabhani N, Hosseini M, Arabian N, Rahimi E (2013) Effect of Ti-containing inclusions on the nucleation of acicular ferrite and mechanical properties of multipass weld metals. *Micron* 45:107–14. doi:10.1016/j.micron.2012.11.004

50. Seo JS, Lee C, Kim HJ (2013) Influence of oxygen content on microstructure and inclusion characteristics of bainitic weld metals. *ISIJ Int* 53:279–85

51. Seo JS, Kim HJ, Lee C (2013) Effect of Ti addition on weld microstructure and inclusion characteristics of bainitic GMAwelds. *ISIJ Int* 53:880–6. doi:10.2355/isijinternational.53.880

52. Han R, Lu S, Dong W, Li D, Li Y (2015) The morphological evolution of the axial structure and the curved columnar grain in the weld. *J Cryst Growth* 431:49–59. doi:10.1016/j.jcrysgro.2015.09.001

53. Han R, DongW, Lu S, Li D, Li Y (2014) Modeling of morphological evolution of columnar dendritic grains in the molten pool of gas tungsten arc welding. *Comput Mater Sci* 95:351–61. doi:10.1016/j.commatsci.2014.07.052

54. Kidess A, Tong M, Duggan G, Browne DJ, Kenjeres S, Richardson I et al (2015) An integrated model for the post-solidification shape and grain morphology of fusion welds. *Int J Heat Mass Transf* 85:667–78. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.144

55. Kou S, Le Y (1986) Nucleation mechanism and grain refining of weld metal. *Weld J* 65:305–13

56. Tan W, Shin YC (2015) Multi-scale modeling of solidification and microstructure development in laser keyhole welding process for austenitic stainless steel. *Comput Mater Sci* 98:446–58. doi:10.1016/j.commatsci.2014.10.063

ČASOPIS ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE**Cenovnik oglasnog prostora u četiri uzastopna broja 2016**

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

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

WELDING & WELDED STRUCTURES, Quarterly review
Advertising prices for four successive numbers in 2016

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

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

INDEKS OGLAŠIVAČA
ADVERTISERS INDEX

REFIT INŽENJERING

YASKAWA SLOVENIJA

HONEX

ELIMP

ZAVOD ZA ZAVARIVANJE

MESSER

KEMPER GmbH

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

WELD-ING

TERMOPROCES

- | | |
|--|---------------------|
| 1. ČLANARINA DUZS za 2016. godinu | 3.500 dinara |
| Članovima DUZS GRATIS godišnje izdanje časopisa "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE" | |
| 2. ČASOPIS "ZAVARIVANJE I ZAVARENE KONSTRUKCIJE" - 2016. 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 2014. godinu | 500 dinara |
| ▪ cena pojedinačnog broja za prethodne godine..... | 250 dinara |
| b) beneficirane cene za članove DUZS: | |
| ▪ cena pojedinačnog broja za 2015. godinu (pouzećem ili preuzimanjem) | 400 dinara |
| ▪ cena pojedinačnog broja za prethodne godine (pouzećem ili preuzimanjem) | <u>Gratis</u> |
| 4. Knjiga Organizacija i ekonomika zavarivačkih radova – autor: prof. dr Zoran Radojević (uračunat PDV 10%) | 1.045 dinara |
| 5. Zbirke standarda OBEZBEĐENJE KVALITETA U ZAVARIVANJU, komplet 4 toma | 6.750 dinara |