



Radomir Jovičić <sup>1,a</sup>, Simon Sedmak <sup>1</sup>, Mihajlo Arandžević <sup>1</sup>, Dejan Jovičić <sup>2</sup>, Jernej Markež <sup>3</sup>, Danijel Pavlović <sup>4</sup>

# OSOBINE SPOJEVA ZAVARENIH IZMEĐU NISKOUGLJENIČNIH I VISOKOLEGIRANIH ČELIKA

## PROPERTIES OF WELDED JOINTS BETWEEN LOW-ALLOYED AND HIGH-ALLOYED STEEL

**Stručni rad / Professional paper**

**Rad primljen / Paper received:**

Avgust 2024.

**Rad prihvaćen / Paper accepted:**

Januar 2025.

**Adresa autora / Author's address:**

<sup>1</sup> Inovacioni centar Mašinskog fakultet Univerziteta u Beogradu, Srbija

<sup>2</sup> SchwingStetter doo, Smederevo, Srbija;

<sup>3</sup> Metalweld, Sosnowiec, Poljska

<sup>4</sup> Institut Goša, Beograd, Srbija

**Email / ORCID ID:**

<sup>a</sup> jovicicrad@gmail.com

**Ključne reči:** niskougljenični čelici, austenitni čelici, zavareni spoj, dodatni materijali

**Keywords:** low-alloyed steel, austenitic steel, welded joint, filler material

### Rezime

Osobine spojeva zavarenih između niskougljeničnih čelika povišene čvrstoće i visokolegiranih austenitnih čelika u značajnoj meri zavise od osobina dodatnog materijala kojim su ti spojevi zavareni. Osnovne smernice za izbor dodatnih materijala za ove spojeve daje Shefflerov dijagram. Međutim, smernice iz ovog dijagrama su orijentisane pre svega na izbegavanje pojave toplih prslina u navedenim spojevima. Zbog toga se često ne obraća dovoljno pažnje na razlike u mikrostrukturama i mehaničkim osobinama pojedinih delova ovih spojeva. Navedene razlike mogu imati mnogo veći uticaj na ponašanje ovakvih spojeva tokom eksploatacije, od eventualno prisutnih toplih prslina. U radu su prikazani rezultati ispitivanja dva zavarena spoja. Jednog, zavarenog dodatnim materijalom čijom se upotrebom smanjuje verovatnoća pojava toplih prslina i drugog, čijom se upotrebom obezbeđuje optimalan odnos mehaničkih osobina pojedinih delova spoja.

### Abstract

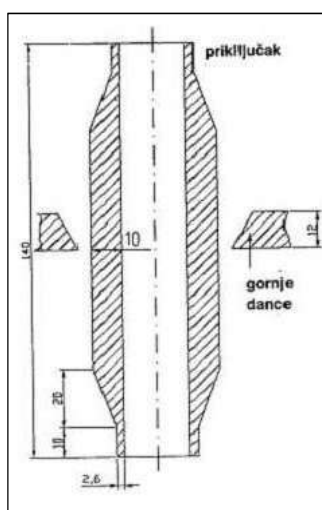
Mechanical properties of welded joints made of high-strength low-alloy and high-alloyed austenitic steels mainly depend on the properties of the filler material used for their welding. Basic guidelines for selection of filler materials for such welds are provided by the Sheffler diagram. However, these guidelines are mainly oriented towards the avoidance of hot crack occurrence in the aforementioned joints. Due to this and more often than not, insufficient attention is devoted to microstructural differences, and the resulting mechanical properties of welded joint regions. These differences can have a much higher influence on the behaviour of such welded joints during exploitation, when compared to hot cracks. This paper presents the results of testing of two welded joints. One of them was welded using a filler material whose purpose is to prevent hot cracks from occurring, and the other was used in order to obtain the optimal relationship between the mechanical properties of individual weld regions.

Rad je u originalnom obliku objavljen u Zborniku radova sa 33. Savetovanja sa međunarodnim učešćem „Zavarivanje 2024“ održanog u Vrnjačkoj Banji, Srbija od 2. do 5. oktobra 2024. godine



## 1. Uvod

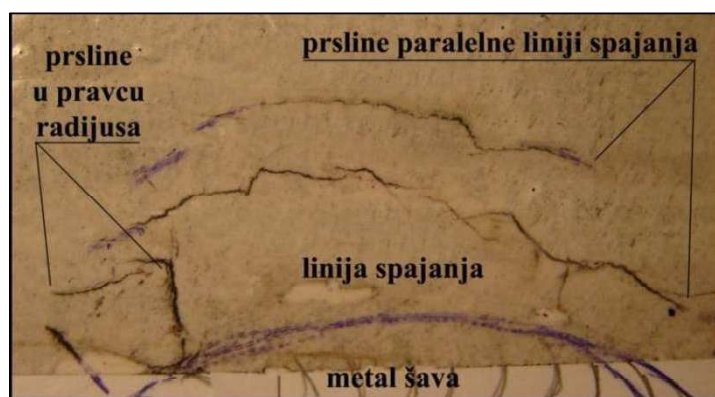
Tokom eksploatacije rezervoara za skladištenje utečjenog ugljendioksida ukazala se potreba za ugradnjom dva nova priključka u njegovo gornje danace. Osnovni podaci o rezervoaru su: zapremina 25 m<sup>3</sup>, maksimalni radni pritisak 25 bara, ispitni pritisak 32,5 bara, najniža radna temperatura -50°C, spoljni prečnik 2000 mm i ukupna visina 10080 mm. Rezervoar je izrađen odmikrolegiranog čelika P460 NL1 (NIOVAL 47), debljine 12 mm [1].



**Slika 1.** Izgled priključka  
**Figure 1.** Connection layout

Nakon zavarivanja, a pre izlaganja rezervoara unutrašnjem pritisku, spojevi priključaka su ispitani metodama bez razaranja. Ispitivanjem magnetnim česticama, pored jednog od spojeva, otkrivene su prsline u materijalu danca. Slika 2. prikazuje otisak ovih prsline dobijen pomoću crnog magnetnog praha. Ispitivanjem ultrazvukom, na liniji stapanja u oba spoja, su otkrivene pore i uključci šljake. Na slici 2. se vide tri prsline paralelne liniji stapanja, dužina 60, 46 i 9 mm čija najveća dubina, izmerena ultrazvukom, iznosi 3,5 mm. Ove prsline su udaljene od linije stapanja i nalaze se u osnovnom materijalu (OM) danca. Na slici se uočavaju i tri prsline upravne na liniju stapanja, dužina 10, 9 i 5 mm, čija najveća izmerena dubina iznosi 6,5 mm. One uglavnom počinju od linije stapanja (LS). Na osnovu izgleda može se pretpostaviti da su otkrivene prsline tipa hladnih prsline. Sve prsline su nastale kao posledica delovanja velikih zaostalih napona, pri čemu su nastanak prsline usmerenih u pravcu radijusa priključka, olakšale greške na liniji stapanja.

Za izradu novih priključaka, slika 1., korišćeni su materijali i tehnologija zavarivanja koje je koristio i proizvođač pri izradi rezervoara [1]. Upotrebljen je visokolegirani austenitni čelik X6CrNiMo17 12 2, debljine 10 mm. Priključci su zavareni E postupkom obloženom elektrodom tipa INOX R 29 9 (standard EN 1600) [2]. Detalji o tehnologiji ugradnje i zavarivanja priključaka su dati u [3, 4].



**Slika 2.** Otisak prsline pored spoja priključka  
**Figure 2.** A imprints of cracks next to the connector joint

## 2. Eksperiment

Da bi se razumela pojava opisanih prsline urađen je eksperiment u kome je ispitivan međusobni uticaj mehaničkih osobina OM i dodatnih materijala (DM) na ponašanje spojeva kao celine i na njihovu sklonost ka nastanku prsline. Za potrebe eksperimenta su zavarena dva spoja.

Za izradu prvog spoja korišćene su ploče dimenzija 500 x 200 mm, izrađene od čelika P460NL1 (NIOVAL 47) debljine 12 mm i visokolegiranog austenitnog čelika X6CrNiMo17 12 2, debljine 14 mm. Spoj je zavaren E postupkom dodatnim materijalom (DM) INOX R 29 9. Korišćena je tehnologija zavarivanja koja je primenjena za zavarivanje priključaka [4].

Za izradu drugog spoja su, takođe, korišćene ploče dimenzija 500 x 200 mm izrađene od čelika S 500 NL, debljine 14 mm i visokolegiranog čelika X6CrNiMo17 12 2, debljine 14mm. Spoj je zavaren MIG postupkom DM MIG 18/8/6 (standard EN ISO 14343 - A). Korišćena tehnologija zavarivanja je data u literaturi [5].



### 3. Rezultati i diskusija

#### 3.1. Osnovni i dodatni materijali

Hemijski sastavi i mehaničke osobine OM, čelika NIOVAL 47 (M1), S 500 NL (M2) i visokolegiriranog

čelika X6CrNiMo17 12 2 (V) su dati u tabelama 1. i 2. Ovi rezultati su dobijeni ispitivanjima uzoraka uzetih iz zavarenih ploča.

**Tabela 1.** Hemijski sastavi osnovnih materijala (mas. %)

**Table 1.** Chemical composition of base metals (wt%)

Čelik	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Mo	Ti	V	Nb
M 1	0,10	0,49	1,26	0,011	0,014	0,08	0,11	0,21	0,067	0,019	0,002	0,048	0,053
M 2	0,10	0,38	0,64	0,014	0,020	0,76	0,10	0,30	0,015	0,33	-	0,02	0,042
V	0,04	0,35	1,73	0,031	0,004	17,9	11,6	0,18	0,061	2,16	0,38	0,079	0,016

**Tabela 2.** Mehaničke osobine osnovnih materijala

**Table 2.** Mechanical properties of base metals

	Gornji napon tečenja $R_{EH}$ (MPa)	Donji napon tečenja $R_{EL}$ (MPa)	Napon tečenja $R_{p0,2}$ (MPa)	Zatezna čvrstoća $R_m$ (MPa)	Izduženje A (%)	Kontrakcija Z (%)
M1	453	435	-	565	25	58
M2	-	-	492	620	20	65
V	-	-	324	595	37	53

Mikrostrukturnim ispitivanjima je utvrđeno da čelici M1 i M2 imaju feritno - perlitnu, a da čelik V ima austenitnu mikrostrukturu [5, 6]. Hemijski sastavi DM i mehaničke osobine metala šava (MŠ)

su dati u tabelama 3. i 4. Hemijski sastavi DM su uzeti iz [2], a mehaničke osobine MŠ su dobijene ispitivanjem okruglih epruveta uzetih iz MŠ ispitnih ploča.

**Tabela 3.** Hemijski sastavi dodatnih materijala (mas. %)

**Table 3.** Chemical composition of filler materials (wt%)

	C	Si	Mn	Cr	Ni
INOX R 29/9	0,15	≤ 0,9	0,9	29	9
MIG 18/8/6	0,08	≤ 0,8	7	18,5	9

**Tabela 4.** Mehaničke osobine metala šava

**Table 4.** Mechanical properties of weld metal

	Dodatni materijal	Napon tečenja $R_{p0,2\%}$ (MPa)	Zatezna čvrstoća $R_m$ (MPa)	Izduženje $A_5$ (%)	Kontrakcija Z (%)
Uzorak 1.	INOX R 29/9	550	750	42	42
Uzorak 2.	MIG 18/8/6	466	682	42	-

#### 3.2. Rezultati ispitivanja metala šava

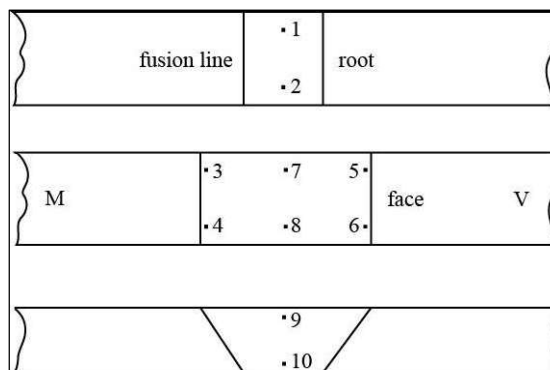
Hemijski sastav oba MŠ je ispitan metodom spektralne analize prenosnim spektroskopom NITON tip XL3, slika 3. Uređaj analizira hemijski sastav sa površine prečnika 3 mm i ima optiku kojom je moguće, pre analiziranja, utvrditi mesto koje će biti analizirano. Na taj način je moguće ispitati hemijski sastav MŠ neposredno uz LS sa

oba OM. Uređaj ne može da analizira sadržaj C. Analize su urađene na epruvetama za ispitivanje zateznih karakteristika spojeva u celini. Slika 4. prikazuje raspored mernih mesta, a tabela 5. rezultate ispitivanja. S obzirom da sadržaj C bitno utiče na veličinu  $Ni_{ekv}$ , a da ovim uređajem C nije mogao biti ispitan,  $Ni_{ekv}$  je izračunat tako što su usvojene vrednosti za sadržaj C iz kataloga proizvođača, tabela 3. [2]. Na isti način je izvršena korekcija  $Cr_{ekv}$  za sadržaj Si.



**Slika 3.** Analiza hemijskog sastava MŠ

**Figure 3.** Analysis of the chemical composition of weld metal



**Slika 4.** Mesta analize hemijskog sastava MŠ

**Figure 4.** Locations of analysis of the chemical composition of weld metal

**Tabela 5.** Rezultati hemijskih analiza MŠ spojeva zavarenih DM INOX 29/9 i MIG 18/8/6 (mas %)

**Table 5.** Results of chemical analyzes of WM joints welded by FM INOX 29/9 and MIG 18/8/6 (wt %)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Spoj 1. Inox R 29/9	Cr	23,96	-	20,48	20,08	26,99	26,53	26,45	26,51	24,50	25,24
	Ni	7,78	-	6,17	5,91	7,85	8,43	8,15	8,09	7,22	7,94
	Mn	1,68	-	1,53	1,41	1,51	1,61	1,63	1,53	1,73	1,52
	Cr <sub>ekv.</sub>	25,3	-	21,8	21,4	28,3	27,9	27,8	27,9	25,9	26,6
	Ni <sub>ekv.</sub>	13,1	-	11,4	11,1	13,1	13,7	13,5	13,4	12,6	13,2
Spoj 2. MIG 18/8/6	Cr	16,73	17,06	15,70	15,21	17,45	17,50	16,10	16,60	17,12	16,42
	Ni	7,68	7,83	6,70	6,49	7,18	7,50	6,96	7,08	8,62	7,16
	Mn	5,76	5,83	5,90	5,90	6,34	6,53	5,91	6,11	5,37	5,64
	Cr <sub>ekv.</sub>	17,9	18,3	16,9	16,4	18,7	18,7	17,3	17,8	18,3	17,6
	Ni <sub>ekv.</sub>	13,0	13,2	12,1	11,8	12,8	13,2	12,3	12,5	13,7	12,4

Rezultati merenja tvrdoća na uzorku 1. [6] pokazuju da se tvrdoće ZUT čelika M1 kreću od 189 – 228 HV i da su veće od tvrdoća OM M1 (172 - 186 HV). One umereno rastu idući od korena (202 HV) ka licu šava (228 HV). Tvrdoće ZUT čelika V se kreću od 187 – 201 HV i jednake su tvrdoćama OM V (187 – 194 HV). One se bitno ne menjaju duž ZUT. Tvrdoće MŠ se kreću od 220 – 274 HV. Ove tvrdoće su najveće u sredini MŠ (258 - 274 HV) i opadaju ka licu i korenu. Merenje tvrdoća po horizontalnim linijama u MŠ pokazuju da su one, u blizini linija stapanja sa oba OM, približno iste.

Rezultati merenja tvrdoća na uzorku 2. [5] pokazuju da se tvrdoće ZUT čelika M2 kreću od 199–333 HV i da su veće tvrdoća OM M2 (180–193 HV). One rastu od sredine ZUT ka licu (274 HV) i korenu šava (333 HV). Tvrdoće ZUT čelika V se kreću od 153–192 HV i jednake su tvrdoćama OM V (168–193 HV). One se ne menjaju bitno duž ZUT. Tvrdoće MŠ se kreću od 180–209 HV. Ove tvrdoće su najveće u sredini MŠ (209 HV) i opadaju ka licu i korenu.

U ZUT čelika M1, uzorak 1. [6] u korenom delu šava je uočena sitnozrna feritno - perlitna struktura. Ka licu šava struktura je grublja i raste udeo beinita. Najgrublja, benitna struktura se javlja u ZUT poslednjeg prolaza. U ZUT čelika M1 nije otkriven martenzit. Struktura MŠ je austenitna sa udelom δ - ferita. Idući od korena ka licu šava struktura postaje grublja i raste udeo δ - ferita do 30 – 35%. U ZUT čelika V, nisu otkrivene strukturne promene. Uočen je samo rast zrna. U ZUT čelika V, uzorak 2. [5] uočena su krupna austenitna zrna. U ZUT čelika M2 uočena je feritno - perlitnu struktura sa značajnim udelom beinita. MŠ ima austenitnu strukturu sa udelom manjim δ – ferita.

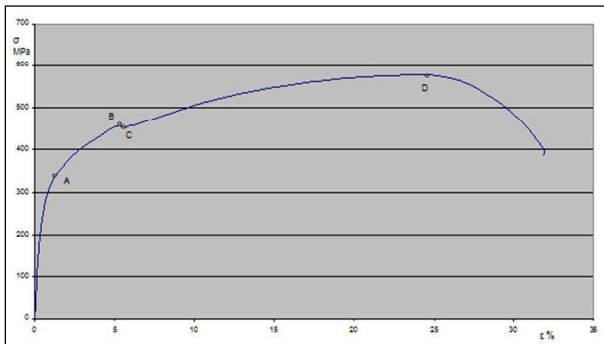
### 3.3. Rezultati ispitivanja zateznih karakteristika spojeva kao celine

Zatezne karakteristike spojeva u celini su ispitane na po tri pljosnate epruvete sa paralelnim bokovima. Rezultati ispitivanja [5, 6] su prikazani na slici 5. Na dijagramu  $\sigma - \epsilon$ , uzorak 1., slika 5.a) uočavaju se četiri karakteristične tačke. One

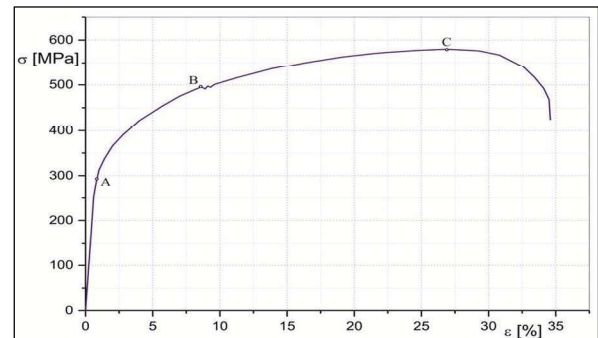


odgovaraju naponu tečenja čelika V (A), gornjem i donjem naponu tečenja čelika M1 (B, C) i zateznoj čvrstoći čelika M1 (D), tabela 2. Do loma sve tri epruvete je došlo u OM čelika M1, slika 5.c).

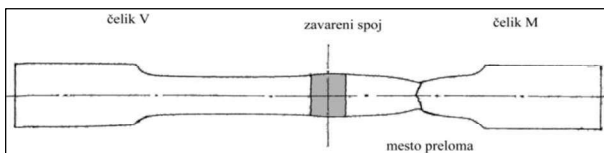
Kontrakcija poprečnog preseka epruveta je najmanja u sredini MŠ i iznosi 2%. Kontrakcija MŠ na LS sa čelikom V je veća (6%) nego kontrakcija na LS sa čelikom M1 (3%), slika 5.e).



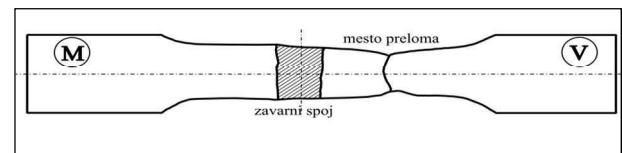
a)



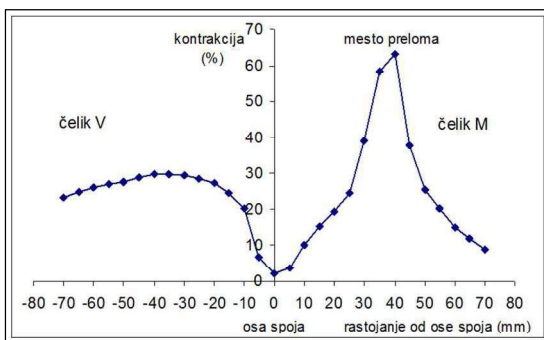
b)



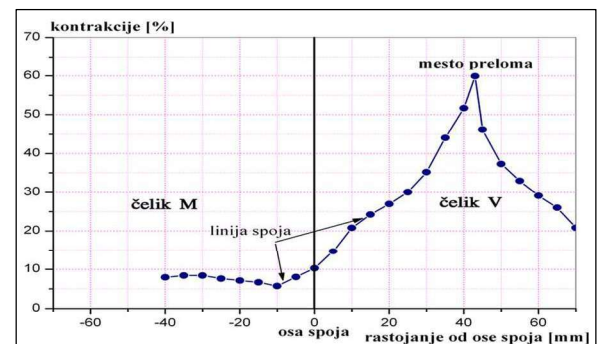
c)



d)



e)



f)

**Slika 5.** Zatezne karakteristike spoja u celini: a) dijagram  $\sigma - \epsilon$ , epruveta iz uzorka 1. b) dijagram  $\sigma - \epsilon$  epruveta iz uzorka 2. c) epruveta uzorak 1. nakon loma d) epruveta uzorak 2. nakon loma e) promena kontrakcije porečnog preseka mernog dela epruvete, uzorak 1. f) promena kontrakcije porečnog preseka mernog dela epruvete, uzorak 2.

**Figure 5.** Tensile properties of welded joint: a)  $\sigma - \epsilon$  diagram, sample 1; b)  $\sigma - \epsilon$  diagram, sample 2; c) specimen from sample 1 after fracture; d) specimen from sample 2 after fracture; e) changes in cross section contraction, sample 1; f) changes in cross section contraction, sample 2

Na dijagramu  $\sigma - \epsilon$ , uzorak 2., slika 5.b) uočavaju se tri karakteristične tačke. One odgovaraju naponu tečenja čelika V (A), naponu tečenja čelika M2 (B) i zateznoj čvrstoći čelika V (C), tabela 2. Na sve tri epruvete do loma je došlo u OM čelika V, slika 5.d). Najmanja kontrakcija poprečnog preseka tj. najmanja deformacija (5%) se javlja na LS MŠ i čelika M2. Sredina MŠ ima kontrakciju od 10%. Kontrakcija MŠ na LS sa

čelikom V je veća (22%) nego kontrakcija na LS sa čelikom M2 (5%), slika 5.f).

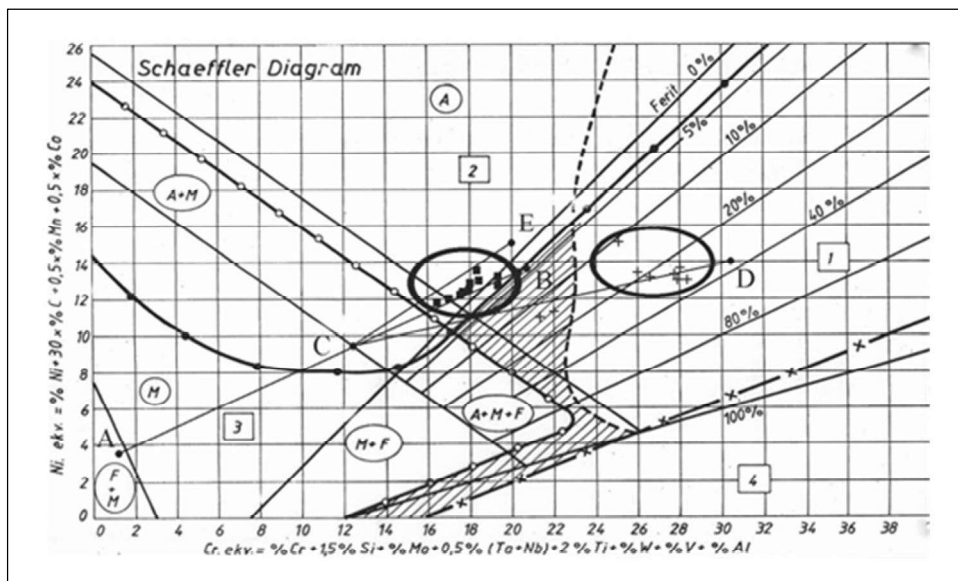
### 3.4. Diskusija

U literaturi [6, 7] se preporučuje da se DM za zavarivanje mikrolegiranih sa austenitnim čelicima (F - A spojevi) bira na osnovu Schaefflerovog dijagrama, slika 6. Uz pomoć ovog dijagrama mogu se odabrati hemijski sastavi DM koji obezbeđuju strukture MŠ bez grešaka. U slučaju F - A spojeva te greške mogu da budu hladne i tople prsline i



krstost usled rasta zrna ili izdvajanja krutih sekundarnih faza. Optimalan hemijski sastav MŠ tj. sastav bez pojave navedenih grešaka se nalazi unutar šrafiranog područija na slici 6. Najčešće greške u MŠ sa austenitnom strukturom su tople prsline. Otpornost MŠ na pojavu toplih prsline raste u prisustvu  $\delta$  – ferita i da je najveća pri njegovom učešću od 3 – 10%. Za izbor optimalnog hemijskog sastava MŠ, potrebno je da se poznaju hemijski sastavi oba OM i DM i stepeni njihovog mešanja. Da bi se dobio MŠ sa austenitnom strukturom

potrebno je da upotrebljeni DM bude austenitnog tipa [8, 9]. Stepenn mešanja zavisi od izabranog postupka zavarivanja [10], oblika žleba, parametara zavarivanja, predgrevanja, smera zavarivanja, njihanja ili pravolinijskog vođenja luka i ugla luka u odnosu na površinu OM. Uticaj ovih faktora je teško preciznije odrediti, pa je zbog toga praktično teško unapred obezbediti da se količina  $\delta$  – ferita nađe u preporučenih 3-10 %.



**Slika 6.** Schaefflerov dijagram: unutar elipsi su date pozicije hemijskih sastava oba MŠ dobijenih spektralnom analizom

**Figure 6.** Schaeffler diagram: chemical compositions of both WM obtained by chemical analysis are grouped into two ellipses

Ako se u Schaefflerov dijagram unesu pozicije čelika M1 i M2 (A) i čelika V (E) i pozicije DM MIG 18/8/6 (B) i INOX R 29 9 (D) i ove pozicije spoje na način kako je objašnjeno u literaturi [6, 7] dobijaju se, na osnovu pretpostavljenih stepena mešanja, pozicije hemijskih sastava i mikrostrukture MŠ. Pozicija MŠ dobijenog zavarivanjem DM MIG 18/8/6 (B), uzorak 2. je unutar leve elipse na slici 6. a pozicija MŠ dobijenog zavarivanjem DM INOX R 29 9 (D), uzorak 1. je unutar desne elipse na istoj slici. U MŠ uzorka 1. se može očekivati pojava toplih prsline zbog male i nedovoljne količine  $\delta$  – ferita, a u MŠ uzorka 2. se može očekivati krtost usled izdvajanja sekundarnih faza.

Hemijski sastavi oba MŠ, tabela 5. su na dijagramu na slici 6. prikazani unutar dve elipse. Rasipanje rezultata hemijskih analiza se posledica različitih stepena mešanja OM i DM po visini i širini spojeva. Kod višeprolaznih šavova samo koreni zavar nastaje istovremenim mešanjem oba OM i DM [6, 7]. Ostali zavari nastaju mešanjem jednog

od OM i prethodnog zavara zbog čega treba očekivati da svaki zavar ima drugačiji hemijski sastav i time i strukturu. Na osnovu toga se može zaključiti da leva i desna strana F – A spojeva neće imati isti hemijski sastav zbog razlika u hemijskim sastavima OM, tabela 5. Promene hemijskog sastava MŠ se mogu očekivati i po njegovoj visini, tabela 5. One su utoliko više izražene ukoliko je više legiran DM i ukoliko se zavaruju deblji materijali, zbog većeg broja zavara i veće širine lice šava. Promene hemijskog sastava pojedinih zavara utiču i na količinu  $\delta$ -ferita u njima. Mikrostrukturnim ispitivanjima uzorka 1. je utvrđeno da se količina  $\delta$ -ferita u MŠ povećava idući od korena ka licu šava i da dostiže 30 – 35%. U MŠ uzorka 2. otkrivene su manje količine  $\delta$  – ferita. Ispitivanjima nisu otkrivene tople prsline ni u jednom od ispitivanih spojeva.

Osnovni problem koji se očekuje u ZUT mikrolegiranih čelika F – A spojeva [6, 7, 10] je pojava martenzita. Rezultati ispitivanja tvrdoća i



mikrostruktura pokazuju da se u ZUT ispitivanih uzoraka nije pojavio martenzit. U ZUT u oba F – A spoja uočen je beinit. Razlog zbog koga se u zoni mešanja mikrolegiranih čelika i visokolegiranih DM nije pojavio martenzit je verovatno nizak sadržaj C u oba OM, tabela 1. U ZUT austenitnog čelika nisu uočene strukturne promene. Uočen je samo rast austenitnog zrna.

Lom uzorka 1., slika 5.c) u OM čelika M1 pokazuje da je ovaj OM najslabije mesto u ovom F – A spoju. Sredina MŠ ima najmanju plastičnu deformaciju (do 2%) slika 5.e). Dijagram  $\sigma - \epsilon$ , slika 5.a) pokazuje da plastična deformacija epruvete započinje u OM čelika V jer je njegov napon tečenja niži od napona tečenja čelika M1 i MŠ, tabele 2. i 4. Tokom daljeg povećanja napona plastična deformacija se razvija samo u čeliku V sve dok napon ne dostigne napon tečenja čelika M1. Sa daljim povećanjem napona plastična deformacija se odvija istovremeno u oba OM. Neposredno pre nego što napon dostigne zateznu čvrstoću čelika M1 tj. napon pri kome se epruveta lomi, započinje plastična deformacija i u MŠ. Napon tečenja MŠ je malo niži od zatezne čvrstoće čelika M1 zbog čega nema dovoljno vremena za razvoj veće plastične deformacije u MŠ. I pored toga što plastična deformacija pre započinje u čeliku V do loma dolazi u čeliku M1 zato što je njegoa deformaciona sposobnost manja pa se pre iscrpljuje.

U slučaju ovog F – A spoja mogu se očekivati veliki zaostali naponi, koji su posledica razlika u fizičkim osobinama čelika M1 i MŠ i velike čvrstoće

#### 4. Zaključak

Schaefflerov dijagram omogućava izbor dodatnog materijala čijom upotrebom je moguće smanjiti verovatnoću pojave grešaka u metalu šava zavarenog između niskougljeničnih i visokolegiranih austenitnih čelika. Strukture ovih šavova i pojava grešaka u njima zavise, pored hemijskih sastava osnovnih materijala i dodatnog materijala i od stepena njihovog mešanja. Stepenn mešanja zavisi od više parametara i teško ga je unapred preciznije predvideti, što dovodi do nepouzdanosti u predviđanju dobijenih struktura i u proceni pojave grešaka u metalu šava. Time se smanjuje i pouzdanost u izboru dodatnog materijala.

Zavareni spojevi između niskougljeničnih i austenitnih čelika imaju izraženu strukturnu nehomogenost, jer se sastoje od dva različita osnovna materijala, njihovih ZUT i metala šava. Ova nehomogenost dovodi do razlika u

samog MŠ. Ovi naponi se rasterećuju na račun plastične deformacije oba OM. Međutim, pošto čelik M1 ima manju deformacionu sposobnost i nižu zateznu čvrstoću prsline se pre mogu pojaviti u njemu.

Za izradu uzorka 2. korišćen je DM niže čvrstoće i veće plastičnosti. U ovom F – A spoju najslabije mesto je OM čelika V u kome se epruveta polomila, slika 5.d). Najmanju plastičnu deformaciju (5%) u ovom spoju ima materijal na LS MŠ i čelika M2, slika 5.f). Dijagram  $\sigma - \epsilon$  na slici 5.b) pokazuje da plastična deformacija epruvete i u ovom slučaju započinje u OM čelika V jer je njegov napon tečenja niži od napona tečenja čelika M2 i MŠ, tabele 2. i 4. Tokom daljeg povećanja napona plastična deformacija se razvija samo u čeliku V sve dok napon ne dostigne napon tečenja MŠ. Sa daljim povećanjem napona plastična deformacija se odvija istovremeno u čeliku V i MŠ sve do dostizanja napona tečenja čelika M2. Dalje povećanje izaziva istovremenu plastičnu deformaciju u sva tri materijala u spoju. U ovim uslovima se najpre dostiže zatezna čvrstoća čelika V pa se epruveta lomi u njemu.

U slučaju ovog F – A spoja mogu se očekivati manji zaostali naponi nego u prethodnom slučaju zbog manjeg napona tečenja MŠ. Nastanak i razvoj prsline iz grešaka u MŠ u ovom slučaju nije mnogo verovatan zbog velike duktilnosti MŠ. Sa aspekta sigurnosti od loma ovog F – A spoja povoljna okolnost je to što se deformacija u najvećoj meri razvija u materijalima koji mogu da podnesu veliki stepen plastične deformacije.

#### 4. Conclusion

Schaeffler's diagram allows the selection of an filler material, the use of which can reduce the probability of defects in the weld metal between low-carbon and high-alloy austenitic steels. The structures of these seams and the occurrence of errors in them depend, in addition to the chemical composition of the basic materials and filler materials, and on the degree of their mixing. The degree of mixing depends on several parameters and it is difficult to predict it more precisely in advance, which leads to unreliability in predicting the obtained structures and in assessing the occurrence of defects in the weld metal. This reduces the reliability in the choice of filler material.

Welded joints between low-carbon and austenitic steels have pronounced structural inhomogeneity, because they consist of two different base materials, their HAZ and weld metal.



karakteristikama čvrstoća i plastičnosti pojedinih delova spoja što, dalje, dovodi do njihovog različitog ponašanja pod dejstvom istog opterećenja. Predviđanje ponašanja pojedinih delova heterogenih spojeva, tokom opterećivanja, je zato znatno složenije nego predviđanje ponašanja spojeva između istrodnih čelika.

Za obezbeđenje pouzdanosti u eksploataciji spojeva zavarenih između niskougleničnih i visokolegiranih austenitnih čelika nije dovoljna procena verovatnoće pojave grešaka u metalu šava zasnovana na Schaefflerovom dijagramu. Da bi se obezbedila pouzdanost ovih spojeva u eksploataciji potrebna je još i ocena zasnovana na eksperimentalnim ispitivanjima spojeva kao celine.

### Literatura / References

[1] Tehnička dokumentacija rezervoara, (1983), tip SRU V25, f.b. 1503, proizvođač TPO Gorazde

[2] Dodatni materijali za zavarivanje, (2004), Katalog, Elektrode Jesenice

[3] Tehnologija ugradnje priključaka za freonsku jedinicu u rezervoar za skladištenje tečnog ugljedioksida f.b. 1503, Mašinski fakultet u Beogradu, 2001.

[4] Anderson, T.L., (2017), Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications 4<sup>th</sup> Edition, CRC Press Elaborat o zavarivanju i ispitivanju priključaka za freonsku jedinicu na rezervoaru za skladištenje tečnog ugljedioksida f.b. 1503, Mašinski fakultet u Beogradu, 2003.

[5] Bukvić, A. Istraživanje uticaja dodatnih materijala kod feritno – austenitnih zavarenih spojeva u cilju optimizacije konstrukcija, Ph.D. thesis, Univerzitet u Beogradu,

[6] Jovičić, R. Analiza uticaja prslina na integritet feritno – austenitnih zavarenih spojeva, Ph.D. thesis, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija, 2007.

This inhomogeneity leads to differences in the strength and plasticity characteristics of individual parts of the joint, which further leads to their different behaviour under the same load. Predicting the behaviour of individual parts of heterogeneous joints during loading is therefore much more complex than predicting the behaviour of joints between similar steels.

To ensure reliability in the exploitation of welded joints between low-carbon and high-alloy austenitic steels, the assessment of the probability of occurrence of defects in the weld metal based on the Schaeffler diagram is not sufficient. In order to ensure the reliability of these joints in operation, an assessment based on experimental tests of the welded joints as a whole is also required.

[7] Granjon, (1998), H. Bases Metallurgiques du Soudage, Soudure Autogene, Paris

[8] Folkhard, E. Pertender, E. Schabereiter, H. Toesch, (1984), J. Metallurgie der Schweissung nichtrostender Staehle", Springer Verlag, Wien

[9] Jakšić, (1969), S. O zavarivanju raznorodnih čelika, Zavarivanje 1, Zagreb, , 2-12.

[10] Mateša, B., Samardžić, I. Dunder, M. (2011), Zavarljivost raznovrsnih čelika i primjena Schaefflerovog dijagrama, Proceedings, 6<sup>th</sup> međunarodno savetovanje S. Brod, 26.-28. listopada 233-243