Broj rada: 3.5
DOI: 10.65156/wws.sjdp.si.015

TEHNOLOŠKE I METALURŠKE KARAKTERISTIKE MIG LEMLJENJA NA PRIMERU SPAJANJA ALUMINIJUMSKE BRONZE I KONSTRUKCIONIH ČELIKA

TECHNOLOGICAL AND METALLURGICAL CHARACTERISTICS OF MIG SOLDERING ON THE EXAMPLE OF JOINING ALUMINUM BRONZE AND STRUCTURAL STEEL

Marko Maričić, struk. inž. maš.[1], ORCID broj: 0009-0001-2887-4557, Svetlana Jocić, dipl. maš. inž.[2], dr Marija Vukšić Popović, dipl. maš. inž.[3], Ivan Stojčić, dipl. maš. inž.[1], Milorad Kočić, master inž. maš.[4], Stefan Dikić, master inž. metalurgije[5,6] ORCID broj: 0000-0003-2700-0628

[1]TMS CEE d.o.o. Beograd, Rudnička 14, 11118 Beograd, [2]GOŠA MONTAŽA DOO BEOGRAD, Knićaninova 3, 11000 Beograd, [3]Akademija tehničko-umetničkih strukovnih studija Beograd, Odsek Visoka železnička škola, Zdravka Čelara 14, 11000 Beograd, [4]SIGMA LAB DOO, Solunska 8, 11420 Smederevska Palanka, [5] Institut GOŠA DOO Beograd, Milana Rakića 35, 11000 Beograd, [6] Tehnološko-metalurški fakultet Univerzitet u Beogradu, Karnegijeva 4, 11000 Beograd, Srbija

E-mail: marko.maricic@tms.rs, svetlana.jocic@gosamontaza.rs, marija.vuksic.popovic@vzs.edu.rs, ivan.stojcic@tms.rs, office@sigmalab.rs, stefan.dikic@institutgosa.rs

Rezime: MIG lemljenje, klasifikovano kao postupak 973 prema standardu SRPS EN ISO 4063:2023 [1], predstavlja postupak spajanja u kome se koristi električni luk između topljive elektrode i osnovnog materijala, pri čemu se osnovni materijal ne topi, već se spoj ostvaruje topljenjem dodatnog materijala niže temperature topljenja. Međutim, kako se u primeni može zahtevati spajanje materijala kod kojih se ne zahteva topljenje osnovnog sa onima kod kojih se to zahteva, ovaj rad daje sistematski pregled procesa MIG lemljenja sa aspekta normativne klasifikacije, teorijskih osnova, metalurških mehanizama nastajanja veze i ključnih procesnih parametara na primeru spajanja aluminijusmke bronze legure AMPCO®18 i konstrukcionog čelika SRPS EN 10025-2 - S355J2+N. Akcenat je stavljen na razliku u odnosu na konvencionalno MIG zavarivanje, kao i na industrijsku primenu postupka 973 u skladu sa važećim ISO i EN standardima. Rezultati ispitivanja reprezentativnih uzoraka pokazuju da je odabrana adekvatna tehnologija lemljenja i da kao takva omogućava uspešnu primenu u praksi i primeni.

Ključne reči: materijali, aluminijumska bronza, konstrukcioni čelik, kvalifikacija tehnologije, zavarivanje, lemljenje, lemljenje električnim lukom

Abstract: MIG soldering, classified as process 973 according to SRPS EN ISO 4063:2023 [1], is a joining process that uses an electric arc between a consumable electrode and the base material. In this process, the base material remains unmelted, while the joint is formed by melting a filler material with a lower melting temperature. Since industrial application may require the joining of materials that are difficult or unsuitable to join by conventional fusion welding, this paper provides a systematic overview of the MIG brazing process from the perspective of normative classification, theoretical foundations, metallurgical bonding

mechanisms and key process parameters. The analysis is presented through the example of joining AMPCO®18 aluminium bronze and structural steel SRPS EN 10025-2 - S355J2+N, with particular emphasis on the difference compared to conventional MIG welding, as well as on the industrial application of process 973 in accordance with the current ISO and EN standards. The obtained results show that an adequate soldering technology was selected, enabling the successful application of this joining method in practice.

Key words: materials, aluminium bronze, structural steel, procedure qualification, welding, brazing, electric arc brazing

1. UVOD

Razvoj savremenih konstrukcija i sve veća upotreba raznorodnih materijala doveli su do potrebe za postupcima spajanja koji omogućavaju pouzdanu metaluršku vezu uz ograničen unos toplote. Svedoci smo poslednjih godina da posebno mesto u toj oblasti sve više zauzima i MIG lemljenje, koje kombinuje visoku produktivnost postupaka sa električnim lukom i metalurške principe lemljenja.

Prema standardu SRPS EN ISO 4063 [1], MIG lemljenje je klasifikovano kao postupak 973 – lemljenje električnim lukom sa topljivom elektrodom u zaštiti inertnog gasa (Arc brazing). U poređenju sa MIG zavarivanjem (postupak 131), pri spajanju postupkom 973 osnovni materijal ostaje u čvrstom stanju. Time se izbegava odvijanje nepovoljnih mikrostrukturnih transformacija i nastanak visokih zaostalih napona.

Ovakav pristup je bio neophodan pri spajanju aluminijumske bronze, komercijalne oznake proizvođača AMPCO®18, i konstrukcionog čelika kvaliteta S355J2+N. Za potrebe izrade ovog spoja, od posebnog značaja je bilo i da se kvalitet izvedenog spoja potvrdi kvalifikovanom tehnologijom lemljenja prema SRPS EN 13134:2008 [4], što je ujedno bio i zahtev vlasnika opreme i investitora.

Predmet ovog rada bio je definisanje, osvajanje, na kraju i kvalifikovanje tehnologije lemljenja, ali uz ključan osvrt na tehnološke i metalurške aspekte MIG lemljenja, u odnosu na konvencionalno MIG zavarivanje. Rezultatima ispitivanja reprezentativnih uzoraka će biti potvrđeno da je odabrana adekvatna tehnologija lemljenja i da kao takva omogućava uspešnu primenu u praksi, u skladu sa relevantnim normama za odobrenje tehnologije lemljenja, odnosno prema SRPS EN 13134:2008 [4].

2. TEHNOLOŠKI I METALURŠKI ASPEKTI MIG LEMLJENJA

2.1 Poređenje postupaka MIG zavarivanja i lemljenja

Osnovna razlika između postupaka 973 i 131 ogleda se u termičkom režimu procesa. Kod MIG lemljenja temperatura procesa ostaje ispod temperature solidusa osnovnog materijala, dok se dodatni materijal topi i razliva po zagrejanoj površini osnovnog materijala. Načelne karakteristike oba procesa su prikazana u Tabeli 1.

Tabela 1. Karakteristike MIG zavarivanja i lemljenja

Karakteristika	MIG zavarivanje (131)	MIG lemljenje (973)
Maksimalna temperatura	> 1500ºC	> 1000 – 1100ºC
Topljenje osnovnog materijala	Da	Ne
Unos toplote	Visok, najčešće između 0,6 – 1,5 KJ/mm	Nizak, najčešće između 0,2 – 0,6 KJ/mm

Širina zone uticaja toplote (ZUT)	Velika	Mala
Zaostali naponi	Visoki	Niski
Metalurški spoj	Livena struktura (zavareni spoj)	Difuziono-adhezivni, zalemljeni spoj

U poređenju sa MIG zavarivanjem, kod MIG lemljenja se primenjuju:

- niže vrednosti struje i napona,
- stabilan kratak luk,
- često pulsni režim rada radi precizne kontrole unosa toplote,
- drugačija vrsta dodatnog materijala, koja je kod lemljenja definisana standardom SRPS EN ISO 17672 [2]. Najčešće korišćeni dodati materijali su na bazi CuSi legure (često u automobilskoj industriji), kao i CuAl legure (za spojeve sa povećanim zahtevima za čvrstoću i otpornost). Primarno se koriste inertni gasovi, kao što je argon I1 prema SRPS ISO 14175 [3], ili mešavine Ar/He, oznake SRPS EN ISO 14175 – I3 [3]. Upotreba aktivnih gasova se izbegava zbog oksidacije dodatnog materijala i smanjenja kvašljivosti.

Termički ciklus MIG lemljenja značajno se razlikuje od termičkog ciklusa klasičnog MIG zavarivanja, prvenstveno zbog namerno ograničenog unosa toplote i izbegavanja topljenja osnovnog materijala. Termički ciklus obuhvata sledeće faze:

- lokalno zagrevanje osnovnog materijala električnim lukom,
- topljenje dodatnog materijala (lema),
- razlivanje i kvašenje površine osnovnog materijala,
- kratkotrajno zadržavanje na povišenoj temperaturi,
- hlađenje i očvršćavanje lema.

Za razliku od zavarivanja, maksimalna temperatura u zoni spoja ostaje ispod temperature solidusa osnovnog materijala, ali je iznad temperature likvidusa dodatnog materijala i spoj se formira kroz sledeće faze:

- zagrevanje osnovnog materijala električnim lukom,
- topljenje dodatnog materijala,
- kvašenje i razlivanje lema po površini osnovnog materijala,
- difuzija atoma na međupovršini,
- očvršćavanje lema i formiranje spoja.

Kapilarni efekat i dobra kvašljivost predstavljaju ključne preduslove za kvalitetan spoj.

2.2 Metalurški aspekti MIG lemljenja

Osnovni termički uslov MIG lemljenja može se izraziti relacijom:

$$T_{likvidus,\ lem} < T_{maks.} < T_{solidus,\ OM}$$

gde su:

- $T_{likvidus,\ lem}$ – temperatura likvidusa dodatnog materijala,
- $T_{maks.}$ – maksimalna temperatura u zoni spoja,
- $T_{solidus,\ OM}$ – temperatura solidusa osnovnog materijala.

Topljenje čelika i aluminijumskih bronzi karakteriše temperaturni opseg. Približne vrednosti temperature koja predstavlja temperaturu početka topljenja/završetka očvršćavanja za čelik

S355 iznosi $T_{solidus} \approx 1450 - 1500^{o}C$, dok za aluminijumske bronze i dodatne materijale na bazi CuAl interval očvršćavanja iznosi $T_{solidus} - T_{likvidus} \approx 1030 - 1070^{o}C$. Upravo ovako širok temperaturni opseg između solidus temperature čelika i likvidus temperatura aluminijumske bronze i dodatnog materijala omogućava topljenje lema bez stvaranja zavarenog spoja.

Što se tiče same raspodele temperature i zone uticaja toplote (ZUT), kod MIG lemljenja, zona uticaja toplote (ZUT) u osnovnom materijalu je znatno uža nego kod zavarivanja, ne dolazi ili su manje izražene fazne transformacija kod niskougljeničnih čelika, i minimalne su promene tvrdoće i napona.

Iako je termički gradijent izražen, vreme trajanja izloženosti materijala povišenim temperaturama je kratko, što ograničava difuzione procese u čeliku. Topljenje dodatnog materijala odvija se direktno u električnom luku, pri čemu:

- lem prelazi u tečno stanje pre kontakta sa osnovnim materijalom,
- tečni lem se razliva po zagrejanoj površini čelika,
- očvršćavanje se odvija relativno brzo usled visoke toplotne provodljivosti aluminijumske bronze.

Povećana brzina odvođenja toplote pored izraženog uticaja na očvršćavanje značajno utiče i na veličinu zrna u Cu-matrici, homogenost legure i raspodelu legirajućih elemenata. Difuzioni procesi između dodatnog i osnovnog materijala dovode do formiranja metalurške veze bez topljenja osnovnog materijala. Ovaj mehanizam je naročito pogodan za spajanje raznorodnih materijala. Kratak termički ciklus MIG lemljenja ograničava dubinu difuzije, rast intermetalnog sloja i formiranje krtih faza.

U zavisnosti od kombinacije osnovnih i dodatnih materijala, mogu se formirati tanki intermetalni slojevi koji mogu biti krti. Njihova debljina zavisi od unosa toplote, vremena trajanja procesa i hemijskog sastava dodatnog materijala. Kontrola ovih parametara je ključna za sprečavanje pojave krtosti spoja.

2.3 Termički ciklus MIG lemljenja

Sa aspekta pouzdanosti spoja, kontrola termičkog ciklusa je najkritičniji faktor MIG lemljenja. Prekoračenje optimalnog temperaturnog režima može dovesti do lokalnog topljenja čelika kao i do rasta debljine sloja koji čine intermetalne faze, što uzrokuje pogoršanje mehaničkih svojstava spoja.

Zbog toga se u savremenoj praksi primenjuju i moderniji uređaji za zavarivanje, odnosno lemljenje električnim lukom, koji podrazumevaju pulsne izvore struje, po mogućstvu sa sinergijskim programima, kao i softversko upravljanje i preciznu regulaciju brzine dovođenja žice i kontrole samog električnog luka na mestu topljenja dodatnog materijala, odnosno u samom tečnom kupatilu.

Unos toplote predstavlja jedan od ključnih parametara koji direktno određuje termički ciklus, mikrostrukturu i kvalitet spoja. Kod MIG lemljenja unos toplote mora biti precizno kontrolisan kako bi se ispunio osnovni uslov postupka 973 – topljenje lema bez topljenja osnovnog materijala [1]. U tabeli 2 [14] su prikazani efekti smanjenog unosa toplote, odnosno prekoračenje optimalnog unosa toplote kod MIG lemljenja.

Tabela 2. Karakteristike i efekti unosa toplote

Smanjeni unos toplote	Prekoračeni unos toplote
ograničen rast intermetalnih faza	lokalno topljenje čelika ili prelazak procesa lemljenja u parcijalno zavarivanje
smanjena dubina difuzije Fe atoma	
minimalne promene u osnovnom materijalu	nastanak grubozrne mikrostrukture, ubrzana difuzija i deblji intermetalni sloj
niži zaostali naponi	

3. EKSPERIMENTALNI DEO – IZRADA ISPITNOG UZORKA

Za potrebe spajanja raznorodnih materijala aluminijusmke bronze legure komercijalne oznake proizvođača AMPCO®18 i konstrukcionog čelika kvaliteta S355J2+N, i kvalifikovanje tehnologije lemljenja prema SRPS EN 13134:2008 [4], pristupilo se izradi preliminarih uzoraka i epruveta. U nastavku su predstavljene i same karakteristike materijala koji se spajaju lemljenjem, kao i korišćenog dodatnog materijala komercijalne oznake UTP A 34, odnosno kvaliteta SRPS EN ISO 24373 – S Cu 6100 (CuAl7) [5].

Pored toga što je samo spajanje ovih raznorodnih materijala specifično i zahtevno samo po sebi, izabrani dodatni materijal je i povećao specifičnost tehnologije, jer je to materijal koji je klasifikovan/standardizovan kao dodatni materijal za zavarivanje, a ne za lemljenje. Izbor dodatnog materijala, je izabran od strane vlasnika opreme i investitora jer su oni već imali iskustva sa ovim materijalima i pouzdano ih koriste u praksi više od decenije.

3.1 Karakteristike materijala koji se spajaju

U ovom radu korišćene su ploče aluminijumske bronze (AMPCO®18) debljine 12,0mm, odnosno čelične ploče (S355J2+N) debljine 20,0mm. Standardi koji propisuju svojstva upotrebljenih osnovnih i dodatnog materijala, kao i njihove likvidus i solidus temperature prikazani su u tabeli 3.

Tabela 3. Karakteristike materijala i temeperaturni intervali

Oznaka materijala	Standard / Norma	Vrsta materijala	T – Solidus	T – Likvidus
AMPCO®18	AMPCO® [6]	Aluminijumska bronza	≈ 1040 °C	≈ 1070 °C
S355J2+N	SRPS EN 10025-2 [7]	Nisko-ugljenični konstrukcioni čelik	≈ 1450 °C	≈ 1520 °C
UTP A 34	SRPS EN ISO 24373 [5]	Žica za zavarivanje aluminijumskih bronzi i čelika	≈ 1030 °C	≈ 1040 °C

Hemijski sastavi navedenih materijala korišćenih u ovom radu prikazani su u tabeli 4, a mehaničke karakteristike u tabeli 5.

Tabela 4. Hemijski sastavi osnovnih i dodatnog materijala

Kvalitet	Šarža br.	Hemijski sastav [%]						
AMPCO®18	AM2874080	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
		--	--	--	--	--	--	--
		Mo	Al	Cu	Ti	N	Fe	Zn
		--	10,785	85,078	--	--	3,735	--
S355J2+N	C7744	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
		0,11	0,23	1,25	0,013	0,006	0,12	0,11
		Mo	Al	Cu	Ti	N	Fe	Zn
		0,015	0,037	0,034	0,026	0,012	ostalo	--
UTP A 34	172935205	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
		--	0,05	< 0,01	--	--	--	--

		Mo	Al	Cu	Ti	N	Fe	Zn
		--	7,8	ostalo	--	--	--	<0,10

Tabela 5. Mehaničke karakteristike osnovnih i dodatnog materijala

Kvalitet	Šarža br.	Reh [MPa]	Rm [MPa]	% A	Udarna žilavost [J/ ºC]	Tvrdoće
AMPCO®18	AM2874080	251,58	686,72	16	--	172 HB
S355J2+N	C7744	406	522	25	27/-20	--
UTP A 34	172935205	≥ 180	≥ 400	≥ 40	--	--

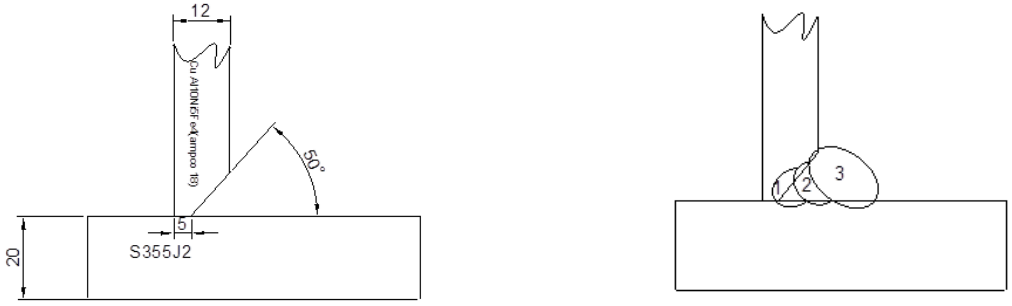
Temperaturni intervali topljenja aluminijumske bronze, dodatnog materijala i čelika (Tabela 3) značajno se razlikuju. U primenjenom MIG brazing postupku proces spajanja prvenstveno je određen topljenjem dodatnog materijala UTP A 34, čiji se temperaturni interval topljenja kreće od 1030 do 1040 °C, dok osnovni materijali ostaju u čvrstom stanju.Imajući navedeno u vidu, očekivano je da će električni luk tokom MIG brazing postupka istopiti dodatni materijal UTP A 34 i delimično površinski sloj aluminijumske bronze AMPCO®18 (1040–1070 °C), čiji su temperaturni intervali topljenja približni. Sa druge strane, čelik S355J2+N pri adekvatnom vođenju procesa, uprkos izuzetno visokoj temperaturi električnog luk neće dostići temperaturu topljenja.

U ovoj vrsti spojeva, javlja se specifična situacija sa stanovišta normativne klasifikacije procesa spajanja. Kada se sa jedne strane žleba, kao u slučaju aluminijumske bronze dešava lokalno topljenje osnovnog materijala proces ima karakteristike zavarivanja. Nasuprot tome, kada se na suprotnoj strani žleba, koja u ovom slučaju odgovara čeliku S355, osnovni materijal ne topi već potpuno ostaje u čvrstom stanju, te spoj nastaje usled izraženog efekta kvašenja i nastanka metalurških veza, tehnološki postupak spajanja odgovara tvrdom lemljenju.

3.2 Projektovani spoj (dizajn spoja)

Još jedna interesnatna pojava koja se javlja je i sam izgled spoja, odnosno dizajn spoja (Slika 1) koji je definisan u preliminarnoj tehnologiji lemljenja (pBPS), i kojim je definisan način izvođenja spoja. Kako konvencionalno lemljenje predviđa stvaranje spojeva, uz pripremu pri kojoj se materijali koji se spajaju postavljaju na najmanje moguće međusobno rastojanje ili bez zazora. Ovakav zahtev proističe iz fizičke zasnovanosti procesa lemnjenja i zasniva se na fenomenu efekat kapilarnosti. Smanjenjem zazora favorizuje se efekat kapilarnosti i omogućava bolje ostvarivanje veze između materijala koji se leme. Za razliku od tradicionalnih postupaka lemljenja, kod „brazzing“ lemljenja, koje podrazumeva lemljenje električnim lukom kao izvorom energije, priprema žleba se može poklapati sa pripremom za zavarivanje.

Priprema za zavarivanje izvršena je u skladu sa slikom 1. Ploče su postavljene u položaj za ugaono lemljenje, sa polu Y pripremom pod uglom od 50° i zatupljenjem od 5mm.



Slika 1. Izgled spoja i priprema materijala koji se spajaju

Ovo je još jedna stavka koja je srodnija zavarivanju od lemljenja i koja dodatno otežava primenu normi koje su definisane za proces lemljenja.

Kako je ceo projekat definisan od strane investitora, i koji je dao smernice sa materijalima koji će se koristiti i izgledom spoja i pripreme materijala koji se spajaju, podaci o mestima i intenzitetima opterećenja koje konstrukcija nosi nisu bili dostupni. Na Proizvođaču je bilo da naručen posao izvede i da potvrdi preliminarno kroz kvalifikovanu tehnologiju lemljenja prema SRPS EN 13134:2008 [4].

3.2 Izrada ispitnih uzoraka

Režimi spajanja MIG "brazzing" postupkom su definisani preliminarnim procedurama/tehnologijama izrade. Iako je lemljenje u pitanju, standardni obrazac za proceduru lemljenja nije sadržao dovoljno podataka, pa je za potrebe izrade ispitnih uzoraka, sačinjena preliminarna specifikacija tehnologije zavarivanja, odnosno pWPS (Preliminary Welding procedure specification), prema SRPS EN ISO 15609-1 [8], kojom su definisani svi parametri neophodni za potrebe izrade. Navedeni standard definiše dobre preporuke u vezi svih neophodnih parametara.

Spajanje materijala je izvedeno MIG postupkom 973, prema standardu SRPS EN ISO 4063 [1] – lemljenje električnim lukom sa topljivom elektrodom u zaštiti inertnog gasa (Arc brazing). Kao dodatni materijal korišćena je žica UTP A 34 (SRPS EN ISO 24373 – S Cu 6100 (CuAl7) prečnika Ø1,2 mm, proizvođača Voestalpine Böhler Welding Austria GmbH. Korišćen je zaštitni gas I1-Ar prema standardu SRPS EN ISO 14175 [3], čistoće 99,99%. Za zavarivanje je korišćen uređaj oznake „KEMPPI FASTMIG 500 X8", serijski br.: 2845437-6524.

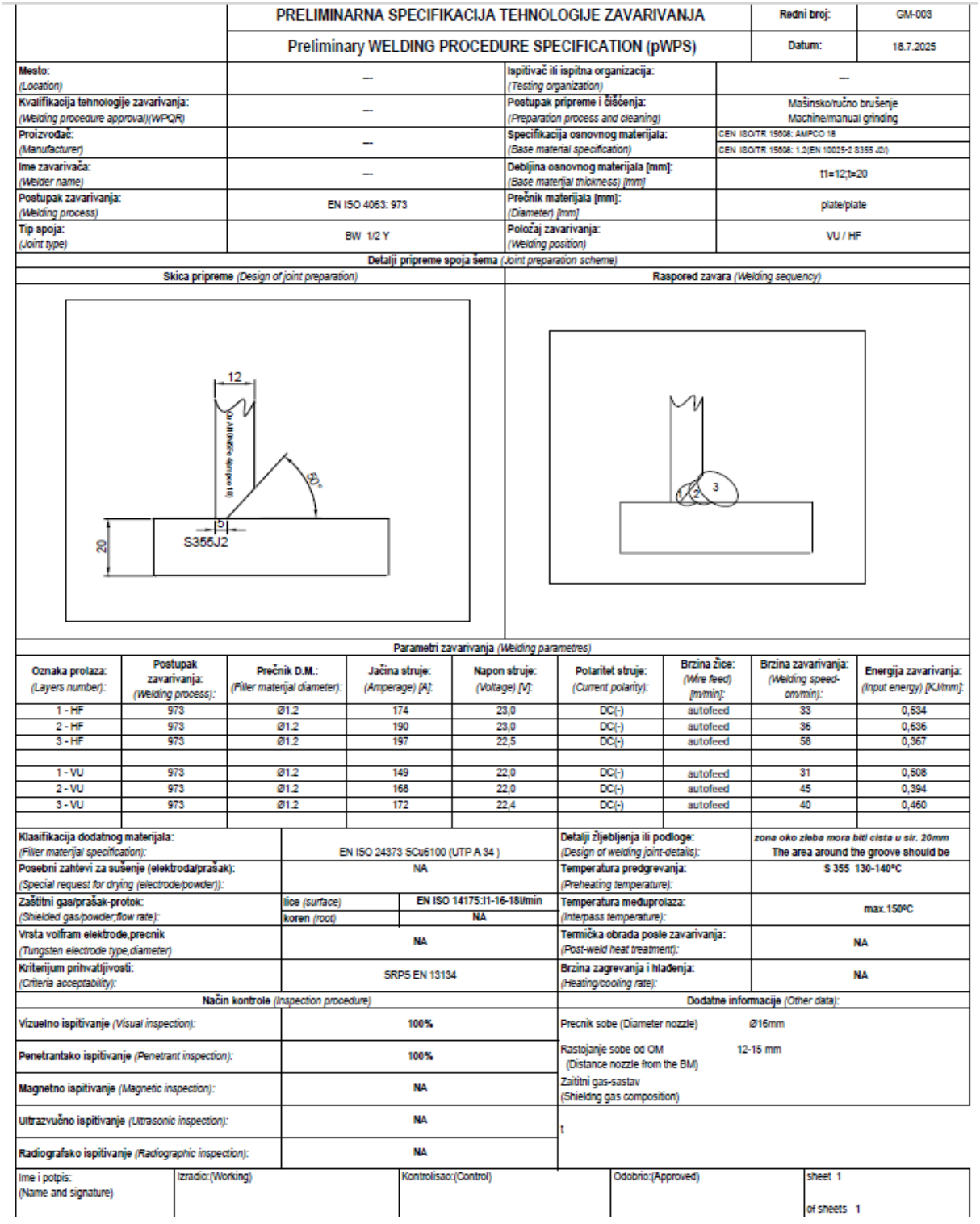
Pored osnovnih parametara procesa kao što su jačina struje, napon, brzina zavarivanja, protok zaštitnog gasa, definisani su i dodatni tehnološki zahtevi uslovljeni specifičnim svojstvima materijala koji se spajaju. Zbog osetljivosti procesa na prisustvo površinskih nečistoća, posebna pažnja posvećena je pripremi spoja. Priprema je uključivala čišćenje žljeba i okolnih površina osnovnog materijala četkom od nerđajućeg čelika, uz obaveznu upotrebu čistih zavarivačkih rukavica i odgovarajuće zaštitne opreme kako bi se izbegla kontaminacija spajanih površina. Provera opreme, polikabl i creva za protok gasa. Površina osnovnog materijala je brušena sa obe strane žljeba u rastojanju od 30mm od ivice žljeba kako bi se uklonili oksidi i druge površinske kontaminacije. Nakon brušenja, površine su očišćene acetonom kako bi se uklonili eventualni preostali tragovi masti i nečistoća.

Brušenje međuprolaza je vršeno je prohromskom čeličnom četkom, umerenim pritiskom na radni komad kako se ne bi osnovni materijal previše zagrevao

Za potrebe ispitivanja zavarena su 2 uzoraka, ukupno po jedan u VU i HF položaju. Položaj VU (Vertical Up), odnosno vertikalno na gore predstavlja pandan zavarivačkom položaju PF (SRPS EN ISO 6947 [9]) dok HF (Horizontal Flow), predstavlja horizontalni položaj koji je pandan zavarivačkom položaju PC (SRPS EN ISO 6947 [9]).

Parametri izrade i svi ostali zahtevani podaci koji su zahtevani preliminarnom Specifikacijom tehnologije zavarivanja su prikazani na slici 2, prema čijim podacima i smernicama su testni uzorci i izrađeni.

Po završetku lemljenja, uzorci su očišćeni prohromskom čeličnom četkom i dalje se pristupilo ispitivanju istih.



	PRELIMINARNA SPECIFIKACIJA TEHNOLOGIJE ZAVARIVANJA		Redni broj:	GM-003
	Preliminary WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (pWPS)		Datum:	18.7.2025

Mesto: *(Location)*	—	**Ispitivač ili ispitna organizacija:** *(Testing organization)*	—
Kvalifikacija tehnologije zavarivanja: *(Welding procedure approval)(WPQR)*	—	**Postupak pripreme i čišćenja:** *(Preparation process and cleaning)*	Mašinsko/ručno brušenje Machine/manual grinding
Proizvođač: *(Manufacturer)*	—	**Specifikacija osnovnog materijala:** *(Base material specification)*	CEN ISO/TR 15608: AM/PCO 18 CEN ISO/TR 15608: 1.2(EN 10025-2 S355 J2)
Ime zavarivača: *(Welder name)*	—	**Debljina osnovnog materijala [mm]:** *(Base material thickness) [mm]*	t1=12;t=20
Postupak zavarivanja: *(Welding process)*	EN ISO 4063: 973	**Prečnik materijala [mm]:** *(Diameter) [mm]*	plate/plate
Tip spoja: *(Joint type)*	BW 1/2 Y	**Položaj zavarivanja:** *(Welding position)*	VU / HF

Detalji pripreme spoja šema *(Joint preparation scheme)*

Skica pripreme *(Design of joint preparation)*

Raspored zavara *(Welding sequency)*

Parametri zavarivanja *(Welding parametres)*

Oznaka prolaza: *(Layers number)*	Postupak zavarivanja: *(Welding process)*	Prečnik D.M.: *(Filler materijal diameter)*	Jačina struje: *(Amperage) [A]*	Napon struje: *(Voltage) [V]*	Polaritet struje: *(Current polarity)*	Brzina žice: *(Wire feed) [m/min]*	Brzina zavarivanja: *(Welding speed- cm/min)*	Energija zavarivanja: *(Input energy) [KJ/mm]*
1 - HF	973	Ø1.2	174	23,0	DC(-)	autofeed	33	0,534
2 - HF	973	Ø1.2	190	23,0	DC(-)	autofeed	36	0,636
3 - HF	973	Ø1.2	197	22,5	DC(-)	autofeed	58	0,367
1 - VU	973	Ø1.2	149	22,0	DC(-)	autofeed	31	0,508
2 - VU	973	Ø1.2	168	22,0	DC(-)	autofeed	45	0,394
3 - VU	973	Ø1.2	172	22,4	DC(-)	autofeed	40	0,460

Klasifikacija dodatnog materijala: *(Filler materijal specification)*	EN ISO 24373 SCu6100 (UTP A 34)		**Detalji žljebljenja ili podloge:** *(Design of welding joint-details)*	***zona oko zleba mora biti cista u sir. 20mm*** **The area around the groove should be**
Posebni zahtevi za sušenje (elektroda/prašak): *(Special request for drying (electrode/powder))*	NA		**Temperatura predgrevanja:** *(Preheating temperature)*	S 355 130-140°C
Zaštitni gas/prašak-protok: *(Shielded gas/powder;flow rate)*	lice *(surface)*	EN ISO 14175:I1-16-18l/min	**Temperatura međuprolaza:** *(Interpass temperature)*	max.150°C
	koren *(root)*	NA		
Vrsta volfram elektrode,precnik *(Tungsten electrode type,diameter)*	NA		**Termička obrada posle zavarivanja:** *(Post-weld heat treatment)*	NA
Kriterijum prihvatljivosti: *(Criteria acceptability)*	SRPS EN 13134		**Brzina zagrevanja i hlađenja:** *(Heating/cooling rate)*	NA

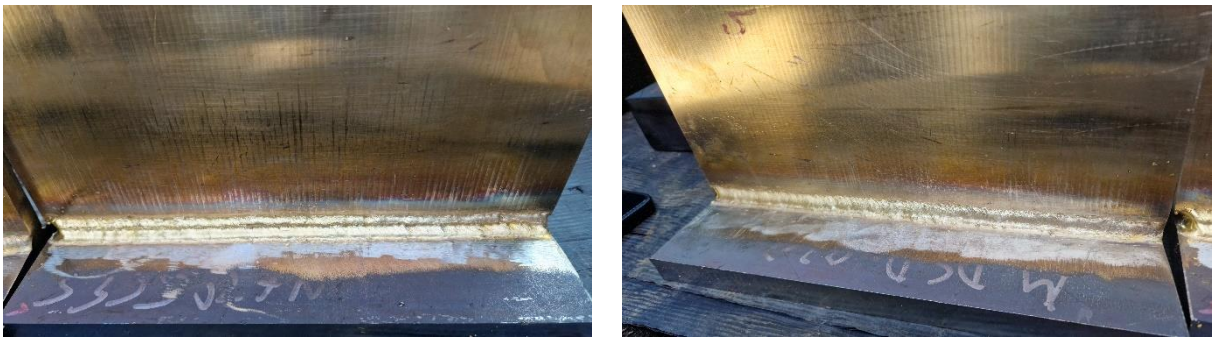
Način kontrole *(Inspection procedure)*		**Dodatne informacije** *(Other data)*:
Vizuelno ispitivanje *(Visual inspection)*	100%	Precnik sobe (Diameter nozzle) Ø16mm
Penetrantsko ispitivanje *(Penetrant inspection)*	100%	Rastojanje sobe od OM (Distance nozzle from the BM) 12-15 mm
Magnetno ispitivanje *(Magnetic inspection)*	NA	Zaititni gas-sastav (Shielding gas composition)
Ultrazvučno ispitivanje *(Ultrasonic inspection)*	NA	t
Radiografsko ispitivanje *(Radiographic inspection)*	NA	

Ime i potpis: (Name and signature)	Izradio:(Working)	Kontrolisao:(Control)	Odobrio:(Approved)	sheet 1 of sheets 1

Slika 2. Preliminarna specifikacija tehnologije

3.3 Ispitivanje uzoraka

Kako je navedeno, nakon izrade i čišćenja, uzorci (slika 3) su predati na ispitivanje. Standard za kvalifikovanje tehnologije tvrdog lemljenja SRPS EN 13134:2008 [4] definiše minimalni obim ispitivanja. Metode ispitivanja primenjene na uzorcima prikazane su u tabela 6. Ispitivanja su sprovedena u skladu sa zahtevima relevantnih standarda.



Slika 3. Izgled izrađenih uzoraka HF (uzorak levo) i VU položaju (uzorak desno)

Tabela 6. Ispitivanje metodama bez i sa razaranjjem

Metode bez razaranja		Metode sa razaranjem	
Metoda	Obim ispitivanja	Metoda	Obim ispitivanja
Vizuelna metoda	100%	Makroskopsko ispitivanje	2 epruvete
Ispitivanje tečnim penetrantima	100%	Mikroskopsko ispitivanje	1 epruveta

3.3.1 Ispitivanje metodama bez razaranja

U skladu sa obimom ispitivanja definisanim u Tabeli 6, uzorci su ispitani vizuelnom metodom i tečnim penetrantima (Slika 4) prema SRPS EN 12799 [10], dok su kriterijumi prihvatljivosti definisani standard SRPS EN ISO 18279 [12]. Ispitivanjem metodama bez razaranja nisu uočene neprihvatljive indikacije.

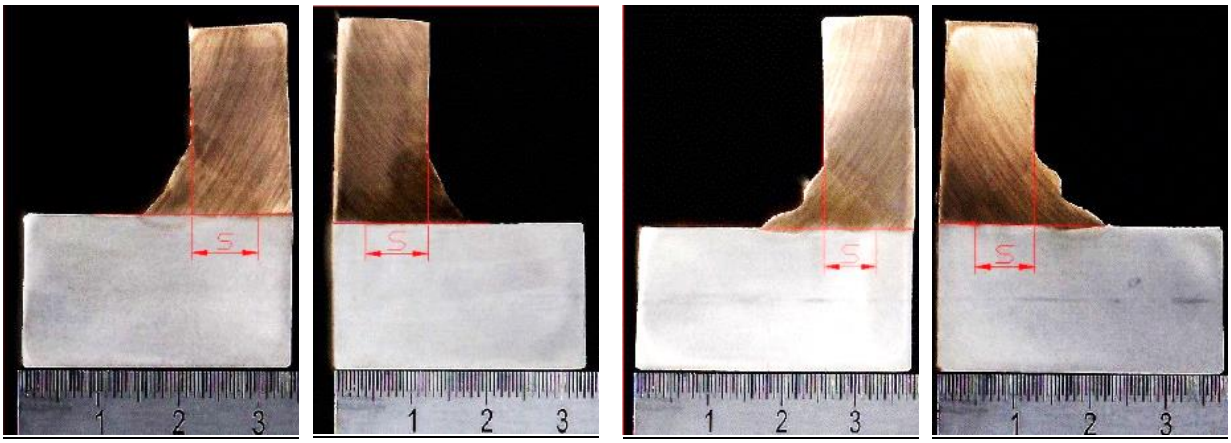


Slika 4. Penetrantsko ispitivanje uzoraka HF (uzorak levo) i VU položaju (uzorak desno)

3.3.2 Ispitivanje metodama sa razaranjem

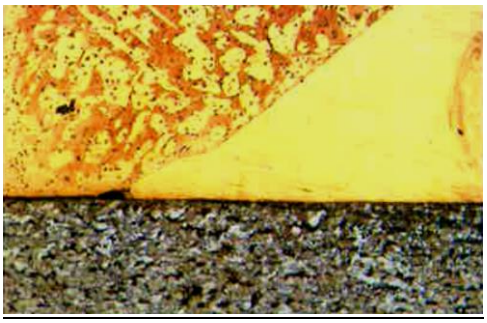
U skladu sa zahtevima standarda, nakon ispitivanja metodama bez razaranja, uzorci su ispitani prethodno definisanim metodama sa razaranjem.

Primenjeno je ispitivanje makro i mikrostrukture spojeva prema SRPS EN 12797 [11]. Kriterijumi prihvatljivosti definisani su standardom SRPS EN ISO 18279 [12]. Makrostruktura spojeva je prikazana na slici 5. Ostvarena dubina lema za svaki od ispitanih preseka je veća od 7mm, što je propisano tehnologijom.



Slika 5. Makroskopsko ispitivanje uzoraka HF (levo) i VU položaju (desno)

Makroskopskim ispitivanjem nisu uočene nedozvoljene nepravilnosti. Jasno se uočavaju granice lema sa strane oba osnovna materijala. Makroskopskom pregledom uočeno je da je na strani aluminijumske bronze došlo do uvarivanja, dok se na strani čelika oučava uvarivanje na pojedinim delovima spoja. Mikrofotografije prikazane na slikama 6.a i 6.b prikazuju kontaktnu površinu lema na strani čelika S355J2+N (mestimično stapanje osnovnog metala sa malom dubinom penetracije), dok su na slikama 7.a, 7.b, 7.c i 7.d prikazane mikrofotografije kontaktne površine lema i aluminijumske bronze na kojima se može uočiti da je došlo do stapanja.



Slika 6.a Mikroskopsko ispitivanje korene zone uzoraka HF (x200)



Slika 6.b Mikroskopsko ispitivanje korene zone uzoraka VU (x100)



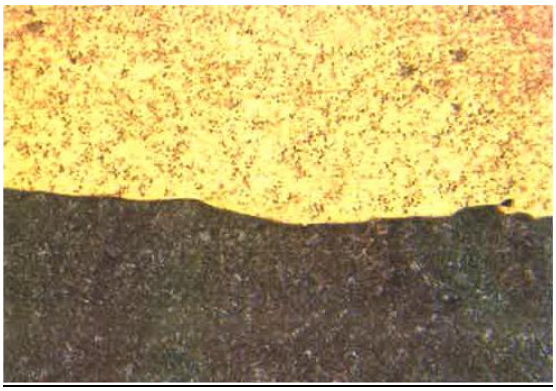
Slika 7.a Mikroskopsko ispitivanje korene zone uzoraka HF (x100)



Slika 7.b Mikroskopsko ispitivanje korene zone uzoraka VU (x100)



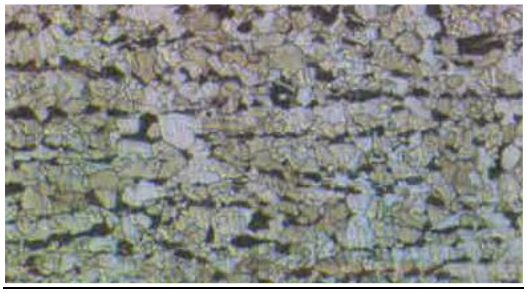
Slika 7.c Mikroskopsko ispitivanje korene zone uzoraka HF (x100)



Slika 7.d Mikroskopsko ispitivanje korene zone uzoraka VU (x100)

Daljom analizom zalemljenih spojeva, mikroskopskim ispitivanjem su utvrđene i strukture koje su se javile kod svih materijala. Mikroskopskim ispitivanjem i kako je i prikazano na slici 8, utvrđeno je sledeće:

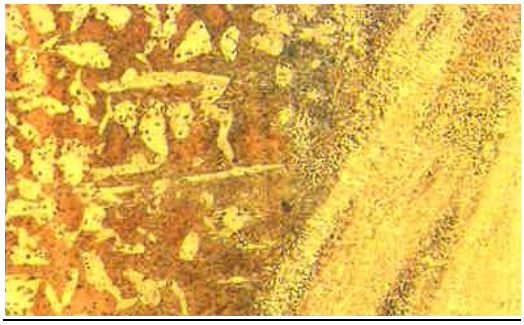
- Slika 8.a: Homogena feritno-perlitna struktura čelija S355J2+N,
- Slika 8.b: Vidiljiva struktura AL bronzi koju čine čvrsti rastvor α + k intermetalne faze (Cu+Al+Fe) metala šava,
- Slika 8.c: dendritna struktura α-čvrstog rastvora CuAl7 bronze, sa ostvarenim potpunim stapanjem dodatnog materijala i osnovnog materijala AMPCO®18,
- Slika 8.d: Tipična struktura osnovnog materijala aluminijumske bronze, čvrst rastvor α-faza, bogat bakrom sa intermetalnim jedinjenjem, k – fazom.



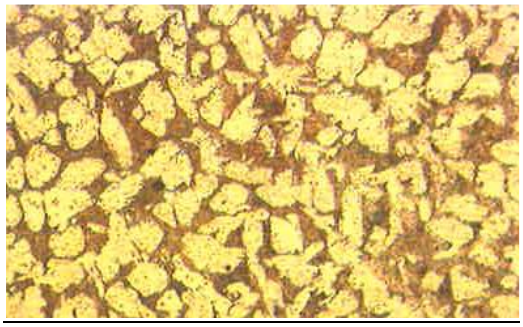
Slika 8.a (x100)



Slika 8.b (x100)



Slika 8.c (x100)



Slika 8.d (x100)

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu teorijskog razmatranja, analize primenjene tehnologije i rezultata sprovedenih ispitivanja, može se zaključiti da MIG lemljenje, klasifikovano kao postupak 973 prema SRPS EN ISO 4063 [1], predstavlja tehnološki i metalurški specifičan postupak spajanja koji zauzima prelaznu poziciju između konvencionalnog lemljenja i zavarivanja. Poseban značaj ovog postupka ogleda se u mogućnosti spajanja raznorodnih materijala, kao što su aluminijumska bronza AMPCO®18 i konstrukcioni čelik S355J2+N, uz istovremeno ograničavanje unosa toplote i smanjenje uticaja procesa na osnovni materijal.

Rezultati ispitivanja pokazali su da je, uz pravilan izbor tehnoloških parametara, moguće ostvariti stabilan i kvalitetan spoj uz kontrolu maksimalne temperature, ograničavanje širine zone uticaja toplote i sprečavanje neželjenih metalurških pojava. Kontrolisan unos toplote predstavlja jedan od ključnih uslova za ostvarivanje odgovarajućeg kvaliteta spoja, naročito kod spajanja raznorodnih materijala sa značajno različitim fizičkim i metalurškim karakteristikama.

Analizom karakteristika formiranog spoja utvrđeno je da mehanizam spajanja nije moguće posmatrati isključivo kroz klasičan model lemljenja zasnovan na kvašenju, difuziji i formiranju tankog međusloja, već da u određenim uslovima mogu nastati i lokalne karakteristike koje su bliže procesu zavarivanja. U ispitivanom spoju uočena je kombinacija različitih mehanizama spajanja: na strani konstrukcionog čelika S355J2+N prisutne su karakteristike lemljenja sa mestimičnim stapanjem osnovnog materijala, dok su na strani aluminijumske bronze AMPCO®18 uočene karakteristike koje odgovaraju procesu zavarivanja. Ovakav nalaz potvrđuje kompleksnost metalurških i termičkih pojava koje se odvijaju tokom MIG lemljenja raznorodnih materijala.

Dobijeni rezultati ukazuju da debljina, kontinuitet i karakter međufaznog područja, kao i stepen lokalnog stapanja osnovnog materijala, zavise od primenjenih procesnih parametara i imaju značajan uticaj na kvalitet i pouzdanost formiranog spoja. Zbog toga je precizno definisanje i kontrola tehnoloških parametara od ključnog značaja za ostvarivanje ponovljivog kvaliteta spoja.

Normativnom analizom potvrđeno je da SRPS EN ISO 4063 [1] i SRPS EN 13134 [4] pružaju odgovarajući okvir za klasifikaciju, kvalifikaciju i kontrolu kvaliteta postupka MIG lemljenja. Pri tome je neophodno posebno voditi računa o specifičnostima postupka lemljenja, naročito prilikom definisanja opsega važenja kvalifikacije tehnologije, koji se ne može u potpunosti zasnivati na kriterijumima karakterističnim za postupke zavarivanja.

Na osnovu rezultata ispitivanja reprezentativnog uzorka može se zaključiti da je primenjena procedura, uz odgovarajuće procesne parametre, opremu, pripremu spoja i kvalifikovano osoblje, omogućila formiranje spoja zadovoljavajućeg kvaliteta između aluminijumske bronze AMPCO®18 i konstrukcionog čelika S355J2+N. Pozitivni rezultati sprovedenih ispitivanja predstavljaju osnov za ocenu da se predmetna tehnologija može primenjivati u odgovarajućim industrijskim uslovima, uz primenu definisanih tehnoloških i kontrolnih zahteva.

Kao potvrda rezultata sprovedenih ispitivanja izrađen je Izveštaj kvalifikacije tehnologije lemljenja, odnosno *Brazing Procedure Qualification Record (BPQR)*, u skladu sa zahtevima standarda SRPS EN 13134 [4]. Time je, pored eksperimentalne potvrde kvaliteta predmetnog spoja, obezbeđena i odgovarajuća dokumentovana osnova za njegovu praktičnu primenu.

Na kraju, može se zaključiti da MIG lemljenje predstavlja pouzdan i fleksibilan postupak za spajanje raznorodnih materijala, posebno u slučajevima kada su od značaja smanjen unos toplote, ograničene deformacije i očuvanje svojstava osnovnih materijala. Istovremeno, rezultati ukazuju na potrebu za daljim istraživanjima termičkih i metalurških mehanizama ovog postupka, uključujući kvantitativno modelovanje termičkog ciklusa, detaljniju analizu

međufaznih područja, razvoj naprednih sinergijskih režima i korelaciju mikrostrukture sa dugotrajnom pouzdanošću spojeva. Dalji razvoj industrijskih materijala i tehnologija može dodatno povećati značaj hibridnih postupaka spajanja koji svojim karakteristikama zauzimaju prostor između konvencionalnog lemljenja i zavarivanja

LITERATURA

[1] SRPS EN ISO 4063:2023 – Zavarivanje i srodni postupci - Lista postupka i njihovo označavanje.
[2] SRPS EN ISO 17672:2024 – Tvrdo lemljenje – Dodatni materijali.
[3] SRPS EN ISO 14175:2009 – Potrošni materijali za zavarivanje - Gasovi i gasne mešavine za zavarivanje topljenjem i srodne postupke.
[4] SRPS EN 13134:2008 – Tvrdo lemljenje - Kvalifikacija tehnologije.
[5] SRPS EN ISO 24373 – Potrošni materijali za zavarivanje – Pune žice i šipke za zavarivanje topljenjem bakra i legura bakra – Klasifikacija.
[6] AMPCO® – Technical specification for materials – AMPCO METAL S.A., P.O. Box 45, 1723 Marly, SWITZERLAND.
[7] SRPS EN 10025-2 – Toplovaljani proizvodi od konstrukcionih čelika — Deo 2: Tehnički zahtevi za isporuku nelegiranih konstrukcionih čelika.
[8] SRPS EN ISO 15609-1:2020 – Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala - Specifikacija tehnologije zavarivanja - Deo 1: Elektrolučno zavarivanje.
[9] SRPS EN ISO 6947:2020 – Zavarivanje i srodni postupci - Položaji pri zavarivanju.
[10] SRPS EN 12799:2009 – Tvrdo lemljenje - Ispitivanje bez razaranja zalemljenih spojeva.
[11] SRPS EN 12797:2008 – Tvrdo lemljenje - Ispitivanje razaranjem zalemljenih spojeva.
[12] SRPS EN ISO 18279:2024 – Tvrdo lemljenje – Nepravilnosti u zalemljenim spojevima.
[13] Prokić Cvetković, R., D. Popović, O.,: Metalurgija zavarivanja, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2019.
[14] Guo, X.-m., Wang, J.-m., & Xu, R.-z. (2013). MIG Arc Brazing of Dissimilar Metals between Pure Aluminum and Zinc-Coated Steel. Journal of Aeronautical Materials, 33(4), 32–36. DOI:10.3969/j.issn.1005-5053.2013.4.006.
[15] Evaluation of MIG Welding-Brazing Parameters for Joining Al 6061 and Mild Steel with Thin Intermetallic Layer (2025). Materials Science Forum, 1150, 67-74.