Broj rada: 5.5
DOI: 10.65156/wws.sjdp.si.027

UPOREDNA ANALIZA GEOMETRIJE I MIKROSTRUKTURE LASERSKI ZAVARENIH SPOJEVA U RAZLIČITIM ZAŠTITNIM ATMOSFERAMA

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE GEOMETRY AND MICROSTRUCTURE OF LASER-WELDED JOINTS IN DIFFERENT SHIELDING ATMOSPHERES

Dejan Letić tehničar računarstva, IWT [1], Goran Soldatović dipl. maš. inž. [2], Marko Maričić, struk. inž. maš. [2], ORCID broj: 0009-0001-2887-4557, Ivan Stojčić, dipl. maš. inž. [2]

[1]Elas d.o.o. Banja Luka, Ramićka 32, 78000 Banja Luka, Bosna i Hercegovina
[2]TMS CEE d.o.o. Beograd, Rudnička 14, 11118 Beograd, Republika Srbija

E-mail: dejan.letic@elas.ba, goran.soldatovic@tms.rs, marko.maricic@tms.rs, ivan.stojcic@tms.rs

Rezime: Lasersko zavarivanje se široko primjenjuje u savremenoj industriji zbog visoke gustine energije, uske zone uticaja toplote i mogućnosti precizne kontrole procesa, što ga čini posebno pogodnim za primjene gdje se zahtijeva visoka tačnost i minimalne deformacije [1]. Zahvaljujući ovim karakteristikama, ovaj postupak nalazi primjenu u automobilskoj, željezničkoj, avionskoj i drugim granama industrije. Jedan od ključnih procesnih parametara koji značajno utiče na stabilnost zavarivanja, formiranje zavara i konačan kvalitet zavarenog spoja jeste vrsta zaštitne atmosfere. U ovom radu izvršena je detaljna uporedna analiza geometrije i mikrostrukture laserski zavarenih spojeva ostvarenih u različitim zaštitnim atmosferama: čistom argonu, čistom helijumu i mješavini argon–helijum. Eksperimentalna ispitivanja sprovedena su pri strogo kontrolisanim i konstantnim parametrima laserskog zavarivanja (snaga lasera, brzina zavarivanja, fokus), pri čemu je vrsta zaštitnog gasa predstavljala jedinu varijabilnu veličinu, kako bi se jasno izolovao njen uticaj. Geometrija zavara analizirana je mjerenjem širine zavara, dubine penetracije i oblika zavarenog presjeka, dok je mikrostrukturna analiza izvršena na pripremljenim metalografskim uzorcima primjenom makroskopskih i mikroskopskih metoda ispitivanja. Posebna pažnja posvećena je identifikaciji eventualnih diskontinuiteta, poroznosti i promjena u strukturi metala. Rezultati ispitivanja ukazuju da izbor zaštitnog gasa ima značajan uticaj ne samo na geometriju zavara, već i na stabilnost procesa, formiranje taline i karakter mikrostrukture zavarenog spoja. Dobijeni rezultati predstavljaju pouzdanu osnovu za racionalan izbor zaštitne atmosfere s ciljem optimizacije kvaliteta laserski zavarenih spojeva i unapređenja industrijske primjene ovog postupka.

Ključne reči: lasersko zavarivanje, zaštitna atmosfera, geometrija zavara, mikrostruktura

Abstract: Laser welding is widely used in modern industry due to its high energy density, narrow heat-affected zone and the possibility of precise process control, which makes it particularly suitable for applications where high accuracy and minimal deformations are required. Thanks to these characteristics, this procedure finds application in the automotive, railway, aviation and other branches of industry. One of the key process parameters that significantly affects welding stability, weld formation and the final quality of the welded joint is the type of protective atmosphere. In this paper, a detailed comparative analysis of the geome-

try and microstructure of laser-welded joints made in different protective atmospheres was performed: pure argon, pure helium and argon-helium mixture. Experimental tests were conducted with strictly controlled and constant laser welding parameters (laser power, welding speed, focus), where the type of shielding gas was the only variable, in order to clearly isolate its influence. The geometry of the weld was analyzed by measuring the width of the weld, the depth of penetration and the shape of the welded section, while the microstructural analysis was performed on the prepared metallographic samples using macroscopic and microscopic testing methods. Special attention is paid to the identification of possible discontinuities, porosity and changes in the structure of the metal. The test results indicate that the choice of shielding gas has a significant influence not only on the geometry of the weld, but also on the stability of the process, the formation of the melt and the character of the microstructure of the welded joint. The obtained results represent a reliable basis for the rational choice of the protective atmosphere with the aim of optimizing the quality of laser welded joints and improving the industrial application of this procedure.

Key words: laser welding, shielding atmosphere, weld geometry, microstructure

1.UVOD

Ručni laserski postupak koji prema standard BAS EN ISO 4063 [3] nosi oznaku 521, predstavlja savremenu tehnologiju koja je svoju ekspanziju doživjela u posljednjih nekoliko godina. Koristi visoko fokusiran snop laserske svijetlosti za spajanje metalnih dijelova , uz ručno vođenje pištolja od strane operatera. Metoda omogućava visoku preciznost, minimalno zagrijavanje okolnog materijala i veoma usku zonu uticaja toplote, tzv. ZUT, što smanjuje deformacije i potrebu za naknadnom obradom. Tehnologija laserskog zavarivanja danas nalazi primjenu u svim visoko zahtjevnim industrijama – šinska vozila i željeznička industrija, industrijska proizvodnja i konstrukcije, automobilska industrija, medicinska oprema te vazduhoplovstvo i svemirski program. Prednosti korišćenja ovog postupka su višestruke, moguće je izvršiti potpunu roborizaciju, dok se nedostaci ogledaju u visokim početnim investicijskim troškovima i visokim sigurnosnim zahtjevima prostor zaštićen senzorskim ćelijama i paravanima.

Ovaj rad se fokusira na zavarivanje aluminijuma i njegovih legura ručnom laserskom metodom u različitim zaštitnim atmosferama gasa.

Aluminijum i njegove legure su široko korišteni u automobilskoj, vazduhoplovnoj, željezničkoj i građevinskoj industriji zbog povoljnog odnosa mase i čvrstoće, dobre korozione otpornosti i mogućnosti oblikovanja. Međutim, njihova zavarljivost zavisi od hemijskog sastava, mikrostrukture i termičke obrade. U poređenju sa čelikom, zavarivanje aluminijuma nosi specifične izazove koje je potrebno kontrolisati postupkom i parametrima.

Specifičnosti aluminijuma pri zavarivanju [2]:

- Visoka toplotna provodljivost – toplota se brzo širi, što otežava stabilizaciju luka/lasera i može dovesti do nepotpunog topljenja,
- Niska temperatura topljenja (≈ 660 °C) – u kombinaciji s visokom provodljivošću smanjuje radno polje i povećava rizik od grešaka,
- Površinski oksidni sloj (Al_2O_3) – tačka topljenja je oko 2050 °C, znatno viša od aluminijuma, pa otežava topljenje i mora se ukloniti ili probiti postupkom,
- Sklonost poroznosti – visoka rastvorljivost vodonika u tečnom aluminijumu, a niska u čvrstom, dovodi do oslobađanja gasa i formiranja pora pri očvršćavanju,
- Vruće pukotine (hot cracking) – legure s visokim sadržajem silicijuma ili bakra mogu biti sklone nastanku pukotina pri hlađenju.

Zavarivanje različitih grupa legura [2]:

- Neočvršćavajuće legure (serije 1xxx, 3xxx, 5xxx Al-Mg, Al-Mn):
  - Generalno dobra zavarljivost,
  - Mali rizik od vrućih pukotina,
  - Pogodne za zavarivanje TIG, MIG i laserom.
- Toplotno očvršćavajuće legure (serije 2xxx – Al-Cu, 6xxx – Al-Mg-Si, 7xxx – Al-Zn-Mg):
  -Sklone vrućim pukotinama i poroznosti,
  -Nakon zavarivanja dolazi do pada mehaničkih osobina u ZUT-u (zona uticaja toplote),
  - Potrebna kontrola parametara i često naknadna termička obrada.

Faktori koji utiču na zavarljivost [2]:

- Čistoća površine – masnoće, oksidi i vlaga značajno utiču na stabilnost luka/lasera i kvalitet šava,
- Izbor dodatnog materijala – mora biti kompatibilan s osnovnim materijalom da bi se smanjila sklonost pukotinama (npr. legure AlMg4,5Mn ili AlSi5 kao dodaci),
- Način pripreme spoja – precizna obrada ivica i minimalna zazorna vrijednost kod laserskog zavarivanja,
- Parametri zavarivanja – kontrola toplote i brzine hlađenja ključni su za izbjegavanje defekata.

Aluminijum se smatra materijalom sa dobrom zavarljivošću, ali uz jasno definisana ograničenja i rizike. Odabir legure, postupka i parametara zavarivanja presudno utiče na kvalitet zavarenog spoja. Posebna pažnja mora se obratiti na kontrolu oksidnog sloja, poroznosti i pukotina, te na očuvanje mehaničkih svojstava u zoni uticaja toplote. Aluminijumska legura EN AW-6082 (AlMgSi1) predstavlja jednu od najčešće korišćenih legura iz serije 6xxx (legirane magnezijumom i silicijumom), prvenstveno zbog optimalnog balansa mehaničkih svojstava, visoke otpornosti na koroziju i dobre obradivosti. Kao legura srednje do visoke čvrstoće, svoju primjenu nalazi u izradi visokoopterećenih nosećih konstrukcija, u transportnoj industriji, proizvodnji šinskih vozila i brodogradnji, gde je imperativ smanjenje mase konstrukcije uz strogo zadržavanje njenog strukturnog integriteta. Prema tehničkom izveštaju ISO/TR 15608 [5], legura EN AW-6082 svrstana je u grupu 23, koja obuhvata termički obradive aluminijumske legure koje se ojačavaju starenjem (precipitacionim ojačavanjem). Iako se ova legura generalno odlikuje dobrom zavarljivošću konvencionalnim (MIG, TIG) i naprednim metodama spajanja (poput laserskog zavarivanja), termički ciklus tokom procesa zavarivanja donosi specifične metalurške izazove. U tabeli 1 prikazane su hemijske osobine osnovnog materijala prema BAS EN 573-3 [19], dok u tabeli 2 su navedene mehaničke osobine osnovnog materijala EN AW-6082 prema standardu BAS EN 15088 [6].

Tabela 1 – Hemijski sastav EN AW-6082

%Si	%Mn	%Cr	%Cu	%Ti	%Fe	%Mg	%Zn	%Al
0,9682	0,5030	0,0193	0,0507	0,0167	0,3535	0,8844	0,0332	97,130

Tabela 2 – Mehaničke osobine EN AW-6082

T	ReL/Rp0,2 MPa	RP 1,0	Rm MPa	A50%
20°C	300,28	-	340,18	13,67

Izbor zaštitnih gasova kod aluminijumskih legura je ograničen na inertne gasove, argon, helijum i njihove mješavine.

Glavni tehnološki problem pri spajanju legura iz grupe 23 predstavlja pad mehaničkih svojstava (čvrstoće i tvrdoće) u zoni uticaja toplote (ZUT). Uslijed visokog unosa toplote dolazi do rastvaranja i ukrupnjavanja finih taloga (precipitata) koji su odgovorni za čvrstoću osnovnog materijala, što neminovno rezultira lokalnim "omekšavanjem" u okolini šava. Navedena karakteristika je izražena kod MIG/MAG i TIG zavarivanja, dok je kod laserskog zavarivanja manji unos toplote pa je pad mehaničkih osobina u ZUT mnogo manje izražen. Pored toga, ova legura može ispoljiti sklonost ka pojavi toplih prslina (kristalizacionih pukotina) u metalu šava. Zbog toga, striktna kontrola parametara zavarivanja, precizno definisanje unosa toplote (linijske energije) i pravilan izbor zaštitne atmosfere predstavljaju ključne faktore za minimizaciju degradacije svojstava u ZUT-u i postizanje zahtevanog kvaliteta zavarenog spoja.

2. EKSPERIMENT

Zavarivanje je izvedeno na ispitnim uzorcima, lim, debljene 3mm. Limovi su izrađeni od aluminijumske legure EN AW-6082 T6 koji pripada grupi materijala 23.1 prema CEN ISO/TR 15608 [5].

Izrađeno je ukupno 6 uzoraka, po tri ugaona FW i tri sučeona BW u različitima atmosferama zaštitnog gasa. Korišćeni su argon I1 prema standardu BAS EN ISO 14175 - I1 [7], helijum I2 - BAS EN ISO 14175 - I2 [7] i mješavina argon (70%) i helijum (30%) - BAS EN ISO 14175 - I3 [7].

Kao dodatni material korišćena je žića u koturu komercijalne oznake „BÖHLER Union AlMg 5“, proizvođača „Voestalpine Böhler Welding Austria GmbH“, kvaliteta - BAS EN ISO 18273 [8]. S Al 5356“, prečnika Ø1.2 mm, čiji je hemijski sastav za navedenu šaržu 5356233440 prikazan u tabeli broj 3, a mehaničke osobine u tabeli 4.

Tabela 3 – Hemijski sastav S AL 5356

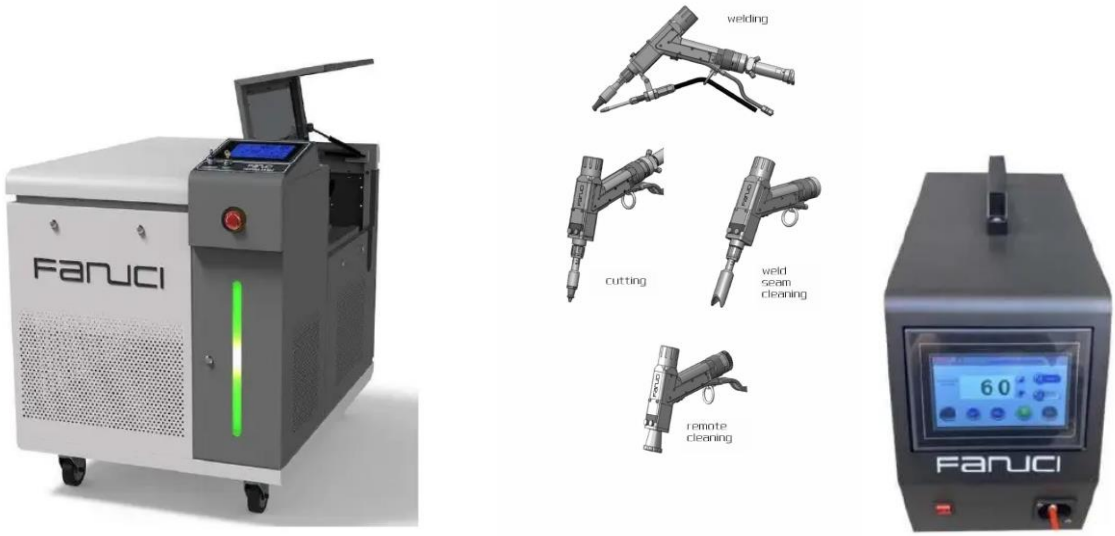
Si	Mn	Cr	Cu	Ti
0,03	0,14	0,13	<0,01	0,10
Al	Fe	Mg	Zn	Be
	0,14	4,9	<0,01	0,0002

Tabela 4 – Mehaničke osobine S AL 5356

T	ReL/Rp0,2	RP 1,0	Rm MPa	A(Lo=5d)
20°C	≥110		≥235	≥18

2.1 Oprema za zavarivanje

Za zavarivanje uzoraka korišćen je industrijski ručni laserski zavarivač baziran na fiber-laserskoj tehnologiji, prikazan na slici x, proizvođača FANUCI, model 4.0 PRO GenX. Kao dio standardne opreme dolazi pištolj Reptor 5.0 PRO BW101-GS 3kW koji podržava funkcije zavarivanja, rezanja, čišćenja materijala i čišćenja spoja. Uređaj je opremljen potpuno automatskim Fanuci PRO EasyWire dodavačem žice, integrisanim sa softverom koji omogućava rad sa dodatnim materijalima prečnika 0.8 do 1.6mm u režimu „push“ ili „pull“.



Slika 1. Oprema za zavarivanje

2.2 Tehnologija zavarivanja (pWPS)

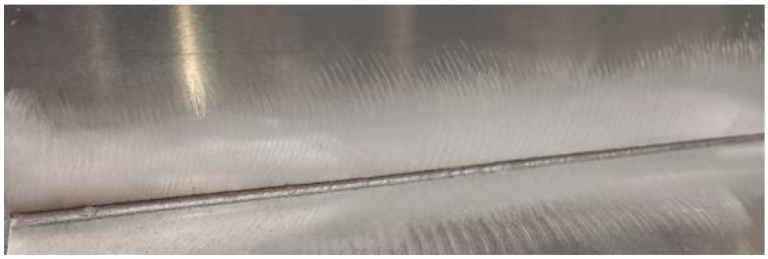
Zavarivanje je izvršeno prema preliminarnoj specifikaciji tehnologije zavarivanja, odnosno pWPS (Preliminary Welding procedure specification) za sučeoni i ugaoni spoj, kojom su definisani svi parametri neophodni za potrebe zavarivanja predviđeni standardom BAS EN ISO 15609-4 [9]. Na uzorcima koji su zavareni sučeono nije korištena gas za zaštitu korjene strane.



Slika 2. Preliminarna specifikacija tehnologije zavarivanja pWPS za ugaoni i sučeoni spoj

2.3 Proprema prije zavarivanja, aktivnosti u toku zavarivanja i nakon zavarivanja

Pored standardnih parametara zavarivanja, definisani su i dodatni, specifični zahtjevi zbog izabrane tehnologije zavarivanja, takođe uzimajući u obzir i materijal koji se zavaruje. Priprema prije zavarivanja zauzima posebniu pažnju, a tu spada čišćenje površine materijala od oksidnog sloja mehaničkim putem, rad sa čistim rukavicama i zaštitnom opremom kao što su zavarivačke naočare. Obezbjeđeno je zavarivačko mjesto adekvatnim paravanima zbog mogućnosti odbijanja laserske zrake od površine aluminijuma. Ivice žlijeba su mehanički pripremljene i okomite jedna u odnosu na drugu, kako bi nalijeganje površina bilo što bolje. Vodilo se računa da laserski zrak kod ugaonog spoja bude precizno usmjeren u korjen pod blagim uglom, kako bi se izbjeglo zarezivanje vertikalnog lima. U toku zavarivanja vodilo se računa da se održi konstantna, nešto viša brzina zavarivanja, kako bi se smanjio unos toplote i smanjila širina ZUT-a. Izgled šava prikazan je na slici 3 i slici 4.



Slika 3. Izgled zavarenog ugaonog spoja



Slika 4. Izgled zavarenog sučeonog spoja

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Nakon završetka zavarivanja uzoraka, sproveden je plan ispitivanja prema tabeli ispitivanja iz standarda BAS EN ISO 15614-11 [4]. Plan je podeljen na ispitivanja bez razaranja i ispitivanja sa razaranjem za ugaoni spoj, Tabela 5 i sučeoni spoj, Tabela 6..

Tabela 5 – Ispitivanje metodama bez i sa razaranjem kod ugaonog spoja

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

Tabela 6 – Ispitivanje metodama bez i sa razaranjem kod sučeonog spoja

Metodama bez razaranja		Metodama sa razaranjem	
Metoda	Obim ispitivanja	Metoda	Obim ispitivanja
Vizuelna metoda	100%	Makroskopsko ispitivanje	1 epruveta
Ispitivanje tečnim penetrantima	100%	Mikroskopsko ispitivanje	1 epruveta
Radiografsko ispitivanje	100%	Ispitivanje zatezne čvrstoće	2 uzorka
		Ispitivanje savijanjem	4 uzorka

3.1 Rezultati ispitivanja metodama bez razaranja za ugaoni i sučeoni spoj

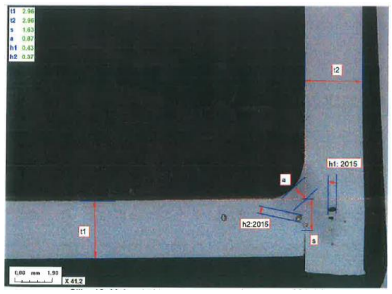
Kako je definisano tabelom 5, uzorci ugaonog spoja zavareni u tri različite atmosfere zaštitnog gasa - argon, helijum i mješavina (argon + helijum u odnosu 70%Ar i 30% He) su ispitani vizuelnom metodom prema BAS EN ISO 17637 [10], nivo prihvatljivosti BAS EN ISO 10042[11] i tečnim penetrantima prema BAS EN ISO 3452-1 [12], nivo prihvatljivosti BAS EN ISO 23277 [13], kako bi se površinski provjerio kvalitet spoja. Rezultati ispitivanja na sva tri predmetna uzorka nisu pokazala neprihvatljive neusaglašenosti, odnosno bili su bez indikacija.

Uzorci sučeonog spoja zavareni takođe u tri različite atmosfere zaštitnog gasa (kao i u slučaju ugaonog spoja) ispitani vizuelnom metodom prema BAS EN ISO 17637 [10], nivo prihvatljivosti BAS EN ISO 10042 [11], tečnim penetrantima prema BAS EN ISO 3452-1 [12], nivo prihvatljivosti BAS EN ISO 23277 [13], kako bi se površinski provjerio kvalitet spoja i radiografskom metodom prema BAS EN ISO 17636-1 [14] kako bi se zavareni spojevi proverili i zapreminski. Rezultati ispitivanja na sva tri predmetna uzorka nisu pokazala neprihvatljive neusaglašenosti, odnosno bili su bez indikacija.

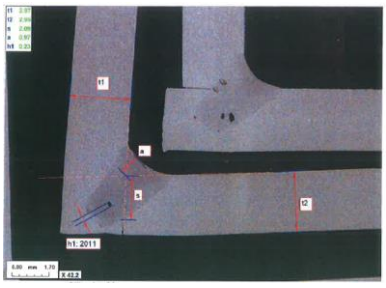
3.2 Rezultati ispitivanja metodama sa razaranjem za ugaoni i sučeoni spoj

Nakon ispitivanja metodama bez razaranja za oba spoja, i pozitivnim rezultatima ispitivanja, pristupilo se ispitivanju sa razaranjem. Referišući se na tabelu 6 za ugaoni spoj ispitana su makro i mikro struktura za sva tri uzorka koja su zavarena u različitim atmosferama zaštitnog gasa prema BAS EN ISO 17639 [15].

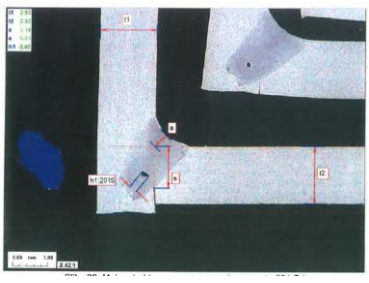
Rezultati za makrostrukturu su prikazani na slikama 5, 6, i 7, a objašnjenja data u nastavku.



Slika 5. Makropresjek FW I1



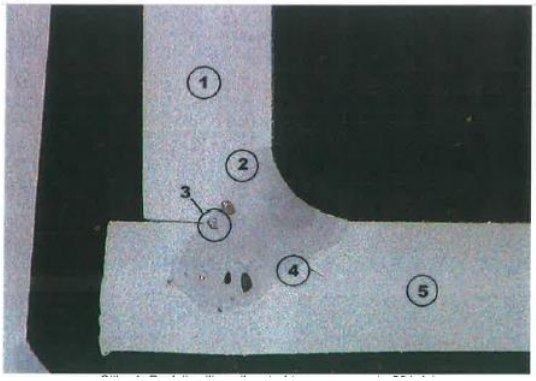
Slika 6. Makropresjek FW I2



Slika 7. Makropresjek FW I3

Kao što je vidljivo na slikama, na sva tri uzorka su uočene nepravilnosti, označene prema BAS EN ISO 6520 [16], redoslijedom 2011 (gasna pora približno sfernog oblika) i 2015 (gasna pora približno izduženog oblika) koje se karakterišu kao prihvatljive.
Što se tiče gaometrije spoja jasno je vidljivo da je kod uzoraka zavarenih u zaštitnoj atmosferi argon dubina penetracije manja nego kod uzoraka sa korišenim zaštitnim gasom helijum i mješavina (Ar+He). Međutim kod sva tri uzorka je dubuna penetracije izuzetno velika. Širina spoja je približno jednaka kod sva tri uzorka.

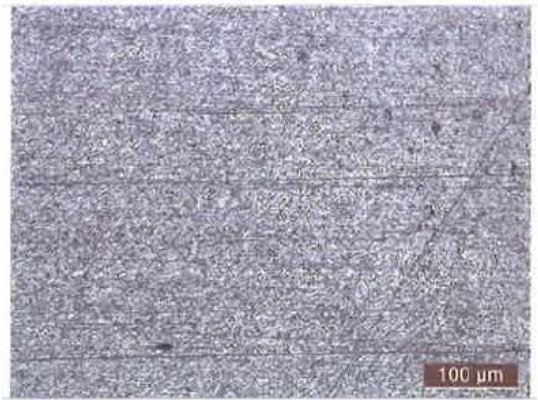
Rezultati ispitivanja mikrosutrukture za uzorak zavaren u zaštitnoj atmosferi argon prikazani su na slikama od 8 do 11.



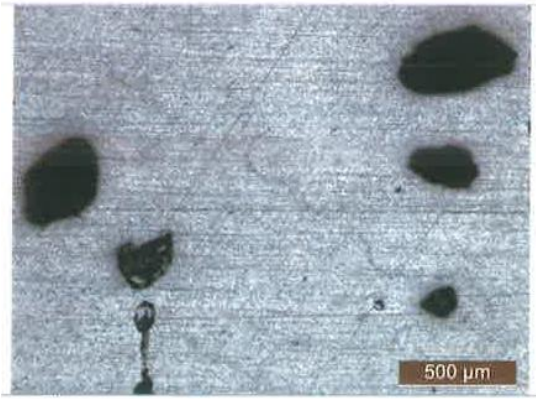
Slika 8. Makropresjek sa naznačenim mjestima mikrostrukturne analize FW I1



Slika 9. Mikrostruktura FW I1 OM



Slika 10. Mikrostruktura FW I1 ZUT

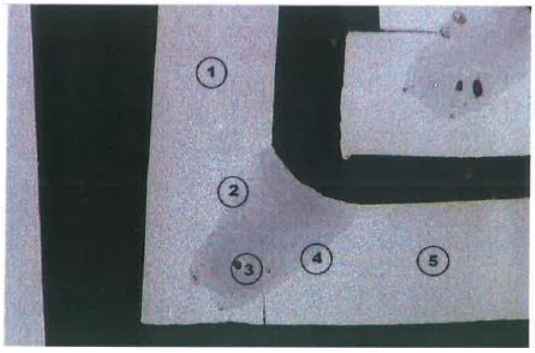


Slika 11. Mikrostruktura FW I1 MŠ

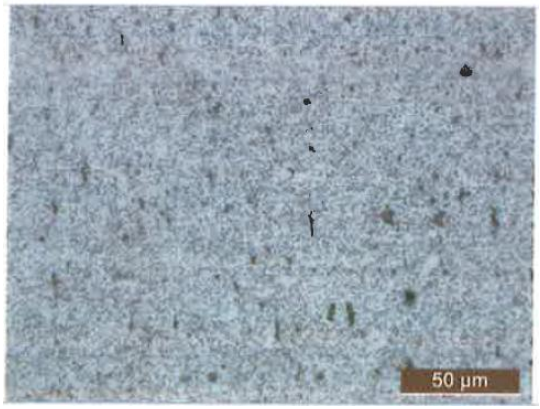
Kod uzorka zavarenog u zaštitnoj atmosferi argon u metalu šava su primjetne pore – gnijezdo pora, što nije dozvoljeno. Takođe, utvrđeno je sledeće:

- Struktura osnovnog materijala je α-Al čvrsti rastvor sa ojačavajućom fazom,
- Mikrostrukturu zone uticaja toplote čine stubasti kristali u blizini linije stapanja pri čemu je spojena struktura OM i MŠ. Zona uticaja toplote je slabo izražena,
- Mikrostrukturu metala šava čini dendritna struktura sa kristalima različite orjentacije, kao što je već rečeno prisutan je veći broj pora i šupljina.

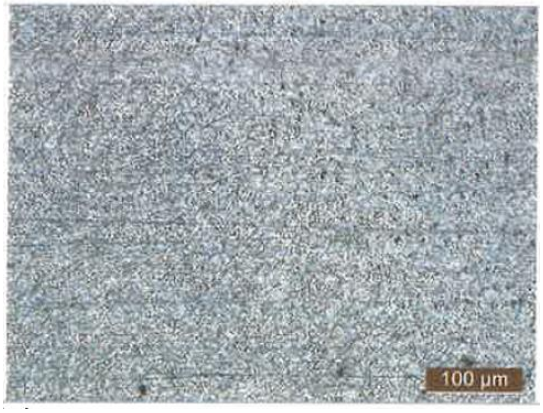
Rezultati ispitivanja mikrosutrukture za uzorak zavaren u zaštitnoj atmosferi helijum prikazani su na slikama od 12 do 15.



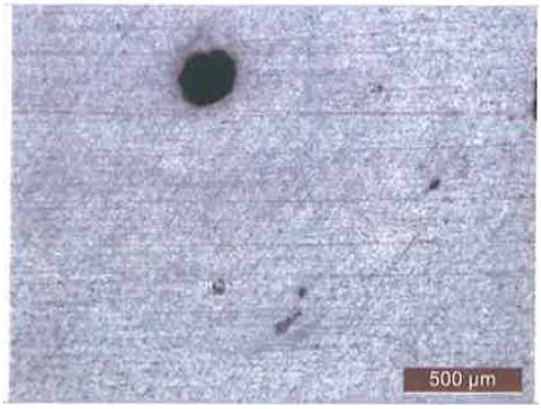
Slika 12. Makropresjek sa naznačenim mjestima mikrostrukturne analize FW I2



Slika 13. Mikrostruktura FW I2 OM



Slika 14. Mikrostruktura FW I2 ZUT



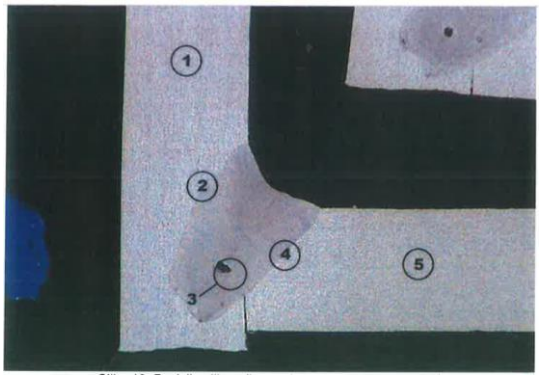
Slika 15. Mikrostruktura FW I2 MŠ

Primjetno prisustvo pore, kao i sledeće :

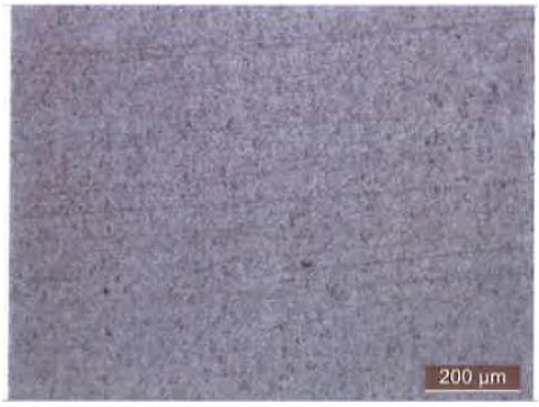
- Struktura osnovnog materijala je α-Al čvrsti rastvor sa ojačavajućom fazom i krupnijim lesticama intermetalnih jedinjenja,

- Mikrostrukturu zone uticaja toplote čine stubasti kristali u blizini linije stapanja pri čemu je spojena struktura OM i MŠ. Zona uticaja toplote je slabo izražena,
- Mikrostrukturu metala šava čini dendritna struktura sa kristalima različite orjentacije, kao što je već rečeno prisutna je šupljina.

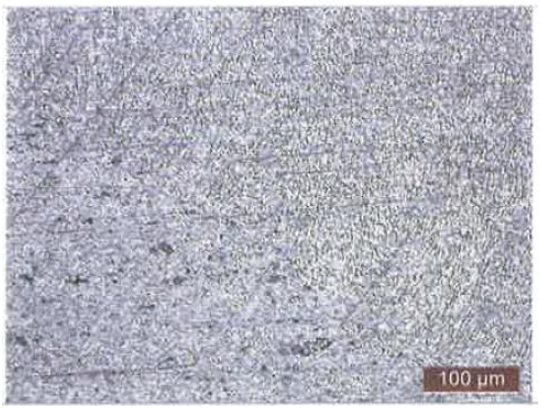
Rezultati ispitivanja mikrosutrukture za uzorak zavaren u zaštitnoj atmosferi mješavine (Ar+He) prikazani su na slikama od 16 do 19.



Slika 16. Makropresjek sa naznačenim mjestima mikrostrukturne analize FW I3



Slika 17. Mikrostruktura FW I3 OM



Slika 18. Mikrostruktura FW I3 ZUT

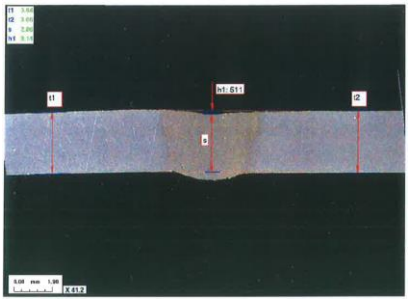


Slika 19. Mikrostruktura FW I3 MŠ

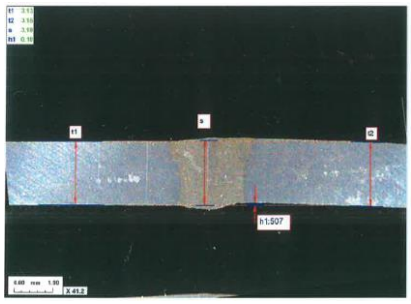
U metalu šava primjetno prisustvo pore koja inicira prsline u dva smjera, kao i:

- Struktura osnovnog materijala je α-Al čvrsti rastvor sa ojačavajućom fazom i krupnijim lesticama intermetalnih jedinjenja,
- Mikrostrukturu zone uticaja toplote čine stubasti kristali u blizini linije stapanja pri čemu je spojena struktura OM i MŠ. Zona uticaja toplote je slabo izražena.

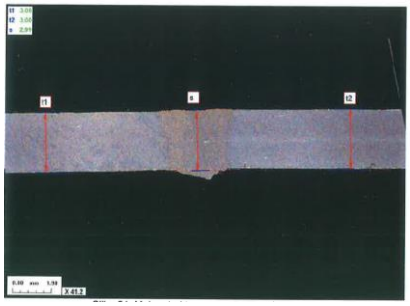
Za sučeoni spoj ispitana su makro i mikro struktura za sva tri uzorka koja su zavarena u različitim atmosferama zaštitnog gasa prema BAS EN ISO 17639 [15]. Rezultati za makrostrukturu su prikazani na slikama 20, 21, i 22, a objašnjenja data u nastavku.



Slika 20. Makropresjek BW I1



Slika 21. Makropresjek BW I2

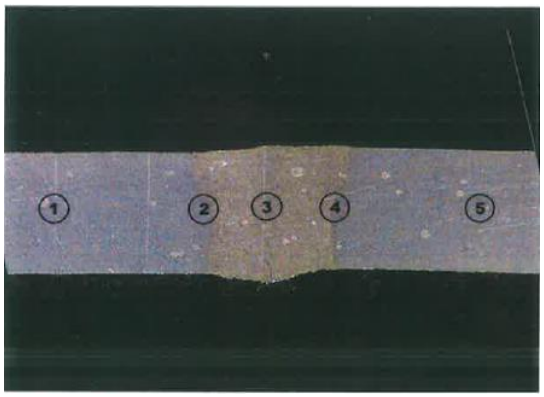


Slika 22. Makropresjek BW I3

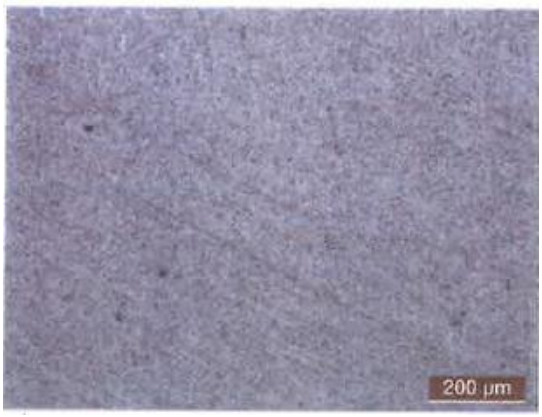
Uočene nepravilnosti: 507; 511 – nepravilnosti oblika i položaja i to linearna smaknutost i nepotpuno ispunjen žljeb.

Kod uzorka zavarenog u zaštitnoj atmosferi argon (slika 20) vidljivo je da je šav nešto širi u odnosu na uzorak zavaren u zaštitnoj atmosferi helijum (slika 21). Kod uzorka zavarenog u zaštitnoj atmosferi mješavine (slika 22) širina šava je približno ista kao kod uzorka zavarenog u zaštitnoj atmosferi argon (slika 20).

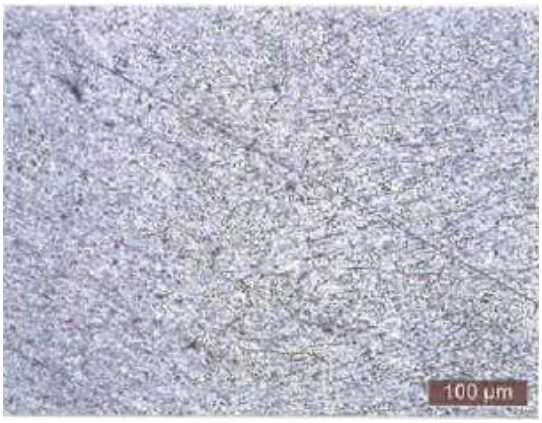
Dalje su prikazani rezultati ispitivanja mikropresjeka, za uzorke zavarene u različitim atmosferama zaštitnog gasa.



Slika 23. Makropresjek sa naznačenim mjestima mikrostrukturne analize BW I1



Slika 24. Mikrostruktura BW I1 OM



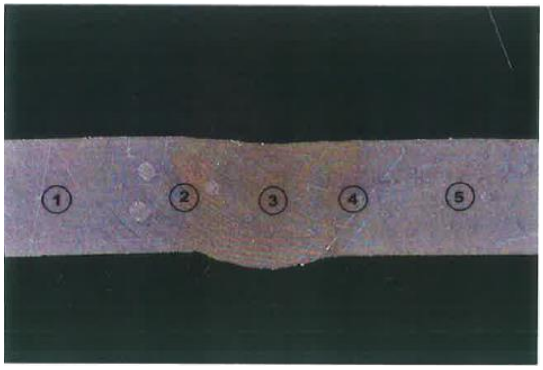
Slika 25. Mikrostruktura BW I1 ZUT



Slika 26. Mikrostruktura BW I1 MŠ

Mikroskopskim ispitivanjem na sučeonom uzorku zavarenim u zaštitnoj atmosferi argona, utvrđeno je sledeće:

- Struktura osnovnog materijala je α-Al čvrsti rastvor sa krupnim česticama Mg2Si i ojačavajućom fazom,
- Mikrostrukturu zone uticaja toplote čine stubasti kristali u blizini linije stapanja pri čemu je spojena struktura OM i MŠ.Zona uticaja toplote je slabo izražena
- Mikrostrukturu metala šava čini dendritna struktura sa kristalima različite orjentacije, bez prisustva pora ili prslina.



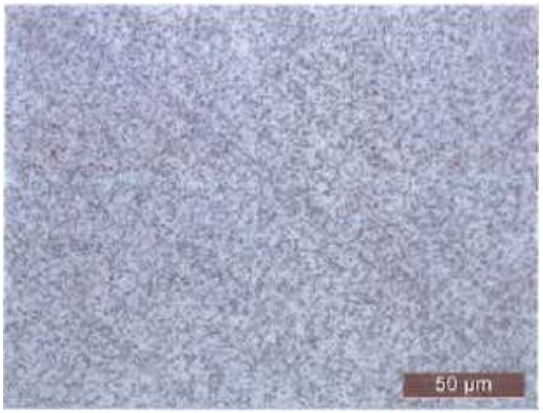
Slika 27. Makropresjek sa naznačenim mjestima mikrostrukturne analize BW I2



Slika 28. Mikrostruktura BW I2 OM



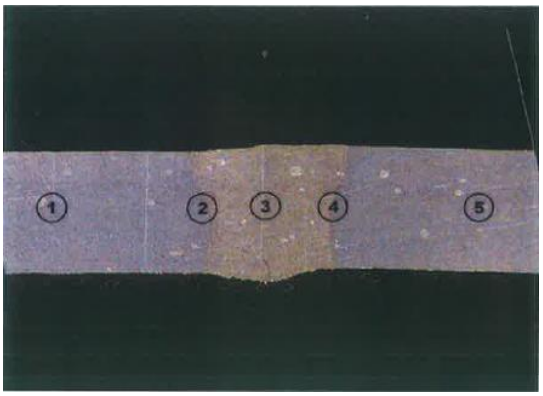
Slika 29. Mikrostruktura BW I2 ZUT



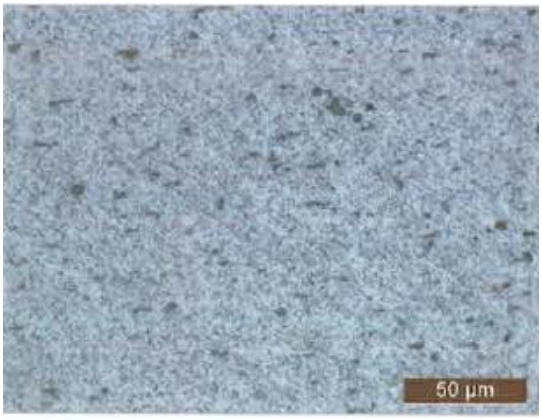
Slika 30. Mikrostruktura BW I2 MŠ

Mikroskopskim ispitivanjem na sučeonom uzorku zavarenim u zaštitnoj atmosferi helijuma, utvrđeno je sledeće:

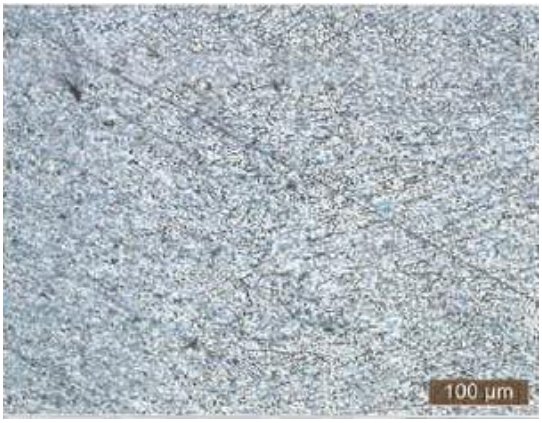
- Struktura osnovnog materijala je α-Al čvrsti rastvor i ojačavajućom fazom,
- Mikrostrukturu zone uticaja toplote čine stubasti kristali u blizini linije stapanja pri čemu je spojena struktura OM i MŠ.Zona uticaja toplote je slabo izražena.
- Mikrostrukturu metala šava čini dendritna struktura sa kristalima različite orjentacije, bez prisustva pora ili prslina.



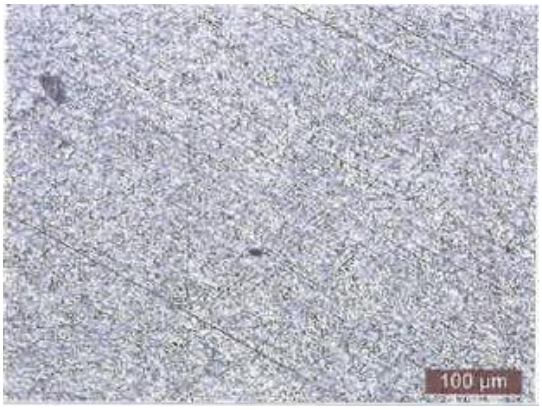
Slika 31. Makropresjek sa naznačenim mjestima mikrostrukturne analize BW I3



Slika 32. Mikrostruktura BW I3 OM



Slika 33. Mikrostruktura BW I3 ZUT



Slika 34. Mikrostruktura BW I3 MŠ

Mikroskopskim ispitivanjem na sučeonom uzorku zavarenim u zaštitnoj atmosferi mješavine argona i helijuma, utvrđeno je sledeće:

- Struktura osnovnog materijala je α-Al čvrsti rastvor sa krupnim česticama Mg2Si i ojačavajućom fazom,
- Mikrostrukturu zone uticaja toplote čine stubasti kristali u blizini linije stapanja pri čemu je spojena struktura OM i MŠ.Zona uticaja toplote je slabo izražena.

Mikrostrukturu metala šava čini dendritna struktura sa kristalima različite orjentacije, bez prisustva pora ili prslina.

Primenjeno je ispitivanje zatezanjem transverzalno u odnosu na zavareni spoj, prema BAS EN ISO 4136 [17], pri čemu je zahtevano da zatezna čvrstoća bude ≥186 N/mm2. Vrijednosti rezultata ispitivanja su u skladu sa zahtjevima i isti su prikazani u Tabeli 7.

Tabela 7 – Ispitivanje zatezanjem

Oznaka epruvete / položaj	Dimenzija epruvete[mm]	Rm [N/mm2]	Lokacija loma
243.1.1	3,0x25,05	241	ZUT
243.1.2	3,0x2,95	240	ZUT
243.2.1	3,0x25,00	206	ZUT
243.2.2	3,0x25,05	213	MŠ
243.3.1	3,0x25,00	227	ZUT
243.3.2	3,0x25,05	225	ZUT

Naredna metoda je ispitivanje savijanjem prema BAS EN ISO 5173 [18], i rezultati ispitivanja su u skladu sa zahtjevima i isti su prikazani u Tabeli 8. Korišćena dimenzija trna je 27 mm.

Tabela 8 – Ispitivanje savijanjem

Oznaka epruvete / položaj	Dimenzija epruvete [mm]	Ugao savijanja [°]	Vrsta savijanja	Mesto loma
243.1.1.l	3,0x30,0	180	Lice	Bez loma
243.1.2.k	3,0x30,0	180	Korijen	Bez loma
243.1.3.l	3,0x30,0	180	Lice	Bez loma

243.1.4.k	3,0x30,0	180	Korijen	Bez loma
243.2.1.l	3,0x30,0	180	Lice	Bez loma
243.2.2.k	3,0x30,0	180	Korijen	Bez loma
243.2.3.l	3,0x30,0	180	Lice	Bez loma
243.2.4.k	3,0x30,0	180	Korijen	Bez loma
243.3.1.l	3,0x30,0	180	Lice	Bez loma
243.3.2.k	3,0x30,0	180	Korijen	Bez loma
243.3.3.l	3,0x30,0	180	Lice	Bez loma
243.3.4.k	3,0x30,0	180	Korijen	Bez loma

4. ZAKLJUČAK

Upoređivanjem dobijenih rezultata nakon ispitivanja svih uzoraka prvi zaključak koji se može donijeti jeste da kod sučeono zavarenih komada nije dolazilo do problema sa šupljinama unutar metala šava ni kod jednog zaštitnog gasa. Geometrija je bila slična sa manjim razlikama u širini šava. Kod ugaono zavarenih uzoraka pak, rezultati su pokazali veliki broj šupljina u metalu šava kod sva tri korišćena zaštitna gasa. Što se tiče geometrije šava, dubina penetracije je najizraženija kod uzorka sa korišćenim helijumom kao zaštitnim gasom.

Dakle, izbor zaštitnog gasa u dobroj mjeri utiče na geometriju i metalografiju šava, udio poroznosti i mikrostrukturu zrna.

LITERATURA

[1] Prokić Cvetković, R., D. Popović, O.,: Postupci zavarivanja, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2020.

[2] Popović, O.,: Prokić Cvetković, R., D. Metalurgija zavarivanja, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2019.

[3] BAS EN ISO 4063:2024 – Zavarivanje i srodni postupci - Lista postupka i njihovo označavanje.

[4] BAS EN ISO 15614-11:2023 – Specifikacija i kvalifikacija za postupke zavarivanja metalnih materijala - Ispitivanje postupaka zavarivanja- Dio 11: Zavarivanje elektronskim i laserskim snopom

[5] BAS CEN ISO/TR 15608:2018 – Zavarivanje - Uputstvo za sistem grupisanja metalnih materijala.

[6] BAS EN 15088:2010 – Aluminijum i legure aluminijuma - Konstrukcioni proizvodi za građevinske radove - Tehnički uslovi za pregled i isporuku

[7] BAS EN ISO 14175:2009 – Potrošni materijali za zavarivanje - Gasovi i gasne mešavine za zavarivanje topljenjem i srodne postupke.

[8] BAS EN ISO 18273:2017 – Dodatni materijali za zavarivanje - Žičane elektrode, žice i šipke za zavarivanje aluminija i legura aluminija - Klasifikacija

[9] BAS EN ISO 15609-4:2010 – Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala - Specifikacija tehnologije zavarivanja (WPS) - Dio 4: Zavarivanje laserskim snopom

[10] BAS EN ISO 17637:2018 – Ispitivanje bez razaranja zavarenih spojeva – Vizuelno ispitivanje spojeva zavarenih topljenjem.

[11] BAS EN ISO 10042:2019 – Zavarivanje - Elektrolučno zavareni spojevi na aluminijumu i njegovim legurama - Nivoi kvalitete za prihvaćanje nedostataka

[12] BAS EN ISO 3452-1:2022 – Ispitivanje bez razaranja – Penetrantsko ispitivanje – Dio 1: Opšti principi.

[13] BAS EN ISO 23277:2016 – Ispitivanje bez razaranja zavarenih spojeva - Ispitivanje penetrantima - Nivoi prihvatljivosti
[14] BAS EN ISO 17636-1:2023 – Ispitivanje bez razaranja zavarenih spojeva - Radiografsko ispitivanje - Dio 1: Tehnike X i gama-zraka s filmom
[15] BAS EN ISO 17639:2023 – Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala – Makroskopsko i mikroskopsko ispitivanje zavarenih spojeva.
[16] BAS EN ISO 6520-1:2008 –Zavarivanje i srodni postupci - Klasifikacija geometrijskih nedostataka u metalnim materijalima - Dio 1: Zavarivanje topljenjem
[17] BAS EN ISO 4136:2023 – Ispitivanja sa razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala – Ispitivanje poprečnim zatezanjem.
[18] SRPS EN ISO 5173:2024 – Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala – Ispitivanje savijanjem.
[19] BAS EN 573-3+A2:2025 –Aluminijum i legure aluminijuma - Hemijski sastav i oblik gnječenih proizvoda – Dio 3: Hemijski sastav i oblik proizvoda