

Analiza mikrostrukture zavarenog spoja aluminijeve legure EN AW-6060 (AlMgSi)

Ivan Pentek¹, Davor Stanić², Ener Špada³

¹ mag. ing. mech., Istarsko veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Riva 6, 52100 Pula, Hrvatska, asistent, ipentek@iv.hr

² doc. dr. sc., Istarsko veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Riva 6, 52100 Pula, Hrvatska, v.pred.

³ Istarsko veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Riva 6, 52100 Pula, Hrvatska, student

Sažetak

Kako bi se postigla visoka kvaliteta zavarenog spoja, osim ispravne metode, potrebno je poznavati utjecaje na materijal u spoju i usvojiti adekvatne parametre zavarivanja. Mnogi su čimbenici koji mogu utjecati na pojavu grešaka u izvedenom spoju, unatoč dobro postavljenim parametrima zavarivanja, a shodno tome definirane su i razne norme, odnosno pravila prema kojima se zavareni spojevi kontroliraju kako bi se sa sigurnošću mogli pustiti u primjenu. Ovaj rad bavi se analizom sučeljeno zavarenog spoja s ciljem ocjenjivanja kvalitete zavarenog spoja te utvrđivanja utjecaja parametara zavarivanja na istu. Zavareni spoj izveden je na cijevi debljine stjenke 5 mm, TIG postupkom, gdje je osnovni materijal EN AW-6060/T66 (AlMgSi), a dodatni materijal Al 5183 (AlMg4.5Mn0.7). Priprema uzorka za makroskopsku i mikroskopsku analizu izvršena je u nekoliko koraka, odnosno brušenjem, poliranjem te nagrizanjem radi jasnije analize mikrostrukture. Makroskopska analiza provedena je na optičkom stereomikroskopu, dok je za utvrđivanje mikrostrukture te mikrostrukturnih konstituenata korišten svjetlosni metalografski mikroskop. Za ocjenjivanje, odnosno procjenu kvalitete zavarenog spoja praćena je norma HRN EN ISO 17639 koja pokriva i makroskopsku i mikroskopsku analizu zavarenih spojeva. Analiza je pokazala znatnu količinu nepravilnosti te različitosti u mikrostrukтури spoja.

Ključne riječi: EN AW-6060/T66, mikrostruktura, TIG

1. Uvod

Zavarivanje je kao postupak spajanja dvaju metalnih materijala, odnosno konstrukcijska elementa veoma razvijeno i učestalo u raznim industrijskim programima. Od masivnih konstrukcija pa sve do fine tehnike i vrlo tankih elemenata, postupak

spajanja zavarivanjem omogućuje kvalitetom i funkcijom te estetikom izradu prihvatljivih proizvoda i poluproizvoda za mnoge primjene. Materijal koji se zavaruje i njegove dimenzije utječu na odabir postupka zavarivanja. Ovisno o tome koristi li se automatizirani sustav ili je čovjek taj koji izvodi postupak zavarivanja, osim same metode,

parametri zavarivanja moraju biti dobro podešeni kako bi zavareni spoj bio zadovoljavajuće kvalitete. Neke od metoda zavarivanja koje se najčešće upotrebljavaju jesu REL (*ručno elektrolučno*), TIG (eng. *Tungsten Inert Gas*), MIG (eng. *Metal Inert Gas*), MAG (eng. *Metal Active Gas*), EPP (*elektrolučno pod prahom*).

Kako navode Lazinica, Andrić i Grubić (2006) zavarivanje aluminija sa sobom nosi mnogo problema koje je potrebno poznavati da bi postupak spajanja bio kvalitetno izveden. Navedeni su problemi posljedica ponašanja aluminija, odnosno njegova fizikalna svojstva poput: visoke električne i toplinske provodljivosti, niske točke tališta, stvaranja aluminijevog oksida, velike sklonosti poroznosti i toplim pukotinama, veliko toplinsko rastezanje i skupljanje, pad čvrstoće u zoni utjecaja topline. TIG postupak zavarivanja veoma je zastupljen postupak i pokazuje izvrsne rezultate i mogućnost postizanja visoke kvalitete zavarenog spoja pri zavarivanju raznih materijala pa tako i aluminija i njegovih legura. Za postizanje visoke kvalitete zavarenog spoja, vještina zavarivača mora biti izrazita kako ne bi došlo do pojave problema poput stvaranja jamica, poroznosti, nedovoljnog protaljivanja materijala itd. U TIG postupku koristi se netaljiva wolframova elektroda, a dodatni materijal se unosi u zonu taljenja, koja se štiti inertnim plinom, najčešće ručno. Osim ispravnog odabira postupka i parametara zavarivanja, u proizvodnom je procesu potrebno spojeve kontrolirati i nakon izvođenja zavarivanja te utvrditi zadovoljava li spoj traženu kvalitetu. Ovisno o osnovnom materijalu, zavareni spojevi podliježu kontroli prema za to propisanim normama, u ovom slučaju promatrani zavareni spoj karakteriziran je prema HRN EN ISO 15614-2, odnosno HRN EN ISO 17639 normama, a za bolje razumijevanje problema korišten je ASM Handbook Volume 9. Coniglio, Cross, Michael i Lammers također navode da je pojava pukotina uslijed skrućivanja 6060 legure čest problem, a svoje rješenje tražili su u raznim vrstama dodatnog materijala poput 4043 i 5356 legura.

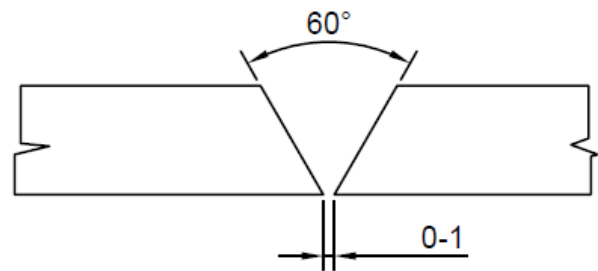
Smjer ovoga istraživanja teži ka određivanju ispravnih parametara i metode izvođenja zavarivanja TIG postupkom pri kojem se osnovni materijal Al legura 6060/T66 zavaruje dodatnim materijalom

Al 5183. Shodno tome, cilj ovoga rada jest makroskopska analiza i karakterizacija i mikrostrukture zavarenog spoja cijevi aluminijske legure 6060 (AlMgSi) sukladno propisanoj normi. U drugom je poglavlju rada opisan postupak izrade zavarenog spoja, faze pripreme uzorka za ispitivanje te korištena oprema, dok su u trećem poglavlju predstavljene i opisane rezultati analize, nakon čega slijedi zaključak.

2. Materijali i metode

Promatrani zavareni spoj izveden je na cijevi vanjskog promjera 60 mm, a debljine stijenke 5 mm. Mjesto izvođenja sučelnog spoja, prethodno je pripremljeno brušenjem pod kutom od 60° u obliku slova „V” (slika 1).

Slika 1: Priprema V-žljeba



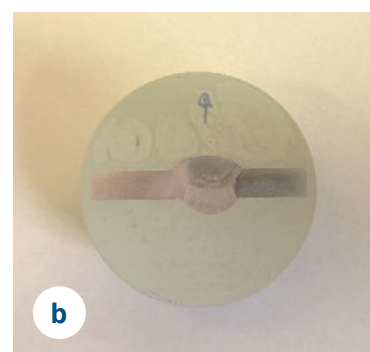
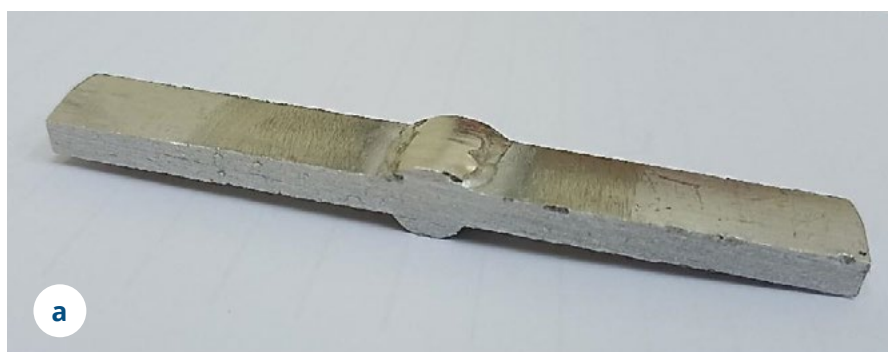
Jednostrani zavareni spoj uz poprečno gibanje luka, izveden je ručno u dva prolaza, s razmakom u korijenu zavara manjim od 1 mm. Kao osnovni materijal korištena je cijev aluminijske legure EN AW-6060/T66, koji prema HRN ISO 15608 normi spada u kategoriju 23. Cijev je zavarivana TIG postupkom s netaljivom wolframovom elektrodom promjera 3,2 mm u zaštitnoj atmosferi argona, s protokom 8-9 l/min. Kao dodatni materijal u zavarenom spoju korišten je Al 5183 (AlMg4.5Mn0.7) SUPERGLAZE TIG 5183 proizvođača Lincoln Electric u obliku šipke promjera 2,4 mm. Temperatura cijevi prije početka postupka zavarivanja bila je izjednačena s temperaturom okoline, dok je među-prolazna temperatura iznosila 120 °C, a ostali parametri zavarivanja za svaki prolaz TIG gorionika prikazani su u tablici 1.

Tablica 1: Parametri zavarivanja

Prolaz zavara	Struja zavarivanja	Jakost struje zavarivanja I_z (A)	Napon zavarivanja U_z (V)	Brzina zavarivanja v_z (mm/min)	Količina unesene topline Q (J/mm)
1.	AC	157-159	20-21	84	1350-1430
2.	AC	107-108	16-17	75	820-880

Nakon opisane izrade zavarenog spoja, priprema uzoraka za analizu počinje piljenjem cijevi u smjeru poprečnom na prolaz zavara s ciljem jasnog prikazivanja svih zona zavara (Slika 2). Izrezani uzorak pripremljen je za analizu mikrostrukture na način da je ukalupljen u smolu, a zatim, nakon sušenja i skrućivanja smole, uzorak je brušen i poliran u pet koraka. Koraci brušenja izvršeni su korištenjem Struers Labopol uređaja za precizno brušenje i

poliranje uz pomoć Struers SiC brusnih papira gradacije 120, 1000 i 2400 i hlađenje vodom. Nakon brušenja uzorak je poliran u dva koraka sa Struers MD Plus pločom za poliranje uz dodatak abrazivnog sredstva DiaPro 3 μ m koji je pomiješan s 96%tnim etanolom (GRAM_MOL d.o.o., Zagreb, Hrvatska) te s MD-Chem pločom uz Presi SPM 0,03 μ m abrazivnim sredstvom pomiješanim s destiliranom vodom.

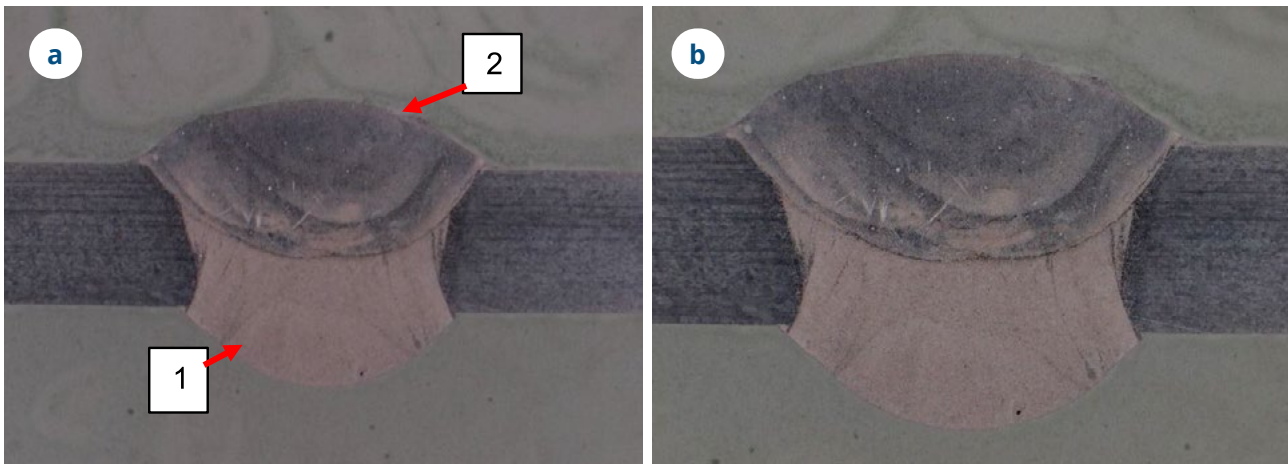
Slika 2: Fotografija uzorka zavarenog spoja: a) izrezan iz cijevi i b) pripremljen za makroskopsku i mikroskopsku analizu

Nakon opisanih koraka brušenja i poliranja, odnosno postizanja zadovoljavajuće hrapavosti promatrane površine, uzorak je nagrižen u otopini „Kellers etchant“ u vremenu od 40 sekundi radi isticanja mikro konstituenata te makro zona zavarenog spoja. Makroskopska i mikroskopska analiza pripremljenog uzorka obavljena je na Olympus SZX10 optičkom stereomikroskopu te na Olympus BX51 svjetlosnom metalografskom mikroskopu. Mikroskopska analiza, odnosno prepoznavanje i opisivanje mikrostrukturnih konstituenata izvršeno je prema metalografskom atlasu, odnosno smjernicama Adamsa i sur. (2004).

3. Rezultati i diskusija

Makroskopska analiza uzorka zavarenog spoja izvršena je golim okom te pomoću optičkog stereomikroskopa na uvećanjima od P=6,3X i P=10X. Prema slici 3 može se uočiti znatna razlika između osnovnog materijala, ali i između dvaju prolaza unutar zavarenog spoja, od kojih svjetliji označavamo kao prvi prolaz, a gornji, odnosno tamniji kao drugi prolaz TIG gorionika. Također, nepravilnosti tipa plinske poroznosti vidljive su na makro razini i vrlo su zastupljene u drugom prolazu.

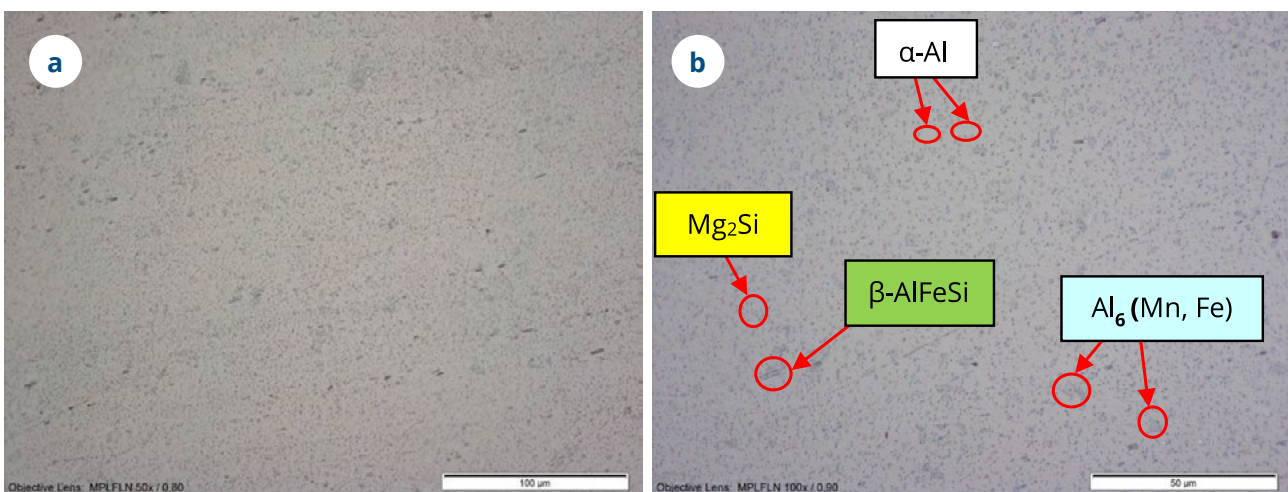
Slika 3: Fotografija nagriženog uzorka za makroskopsku analizu: a) pri uvećanju od $P=6,3X$ s označenim prolazima i b) pri uvećanju od $P=10X$



Analizirajući mikrostrukturu zavarenog spoja, promatran je zasebno osnovni materijal cijevi aluminij 6060/T66, a zatim i svaki od prolaza u spoju što je prikazano na slikama 4–6. Osim smjera

oblikovanja, što se može prepoznati po usmjerenju kristalnih zrna, na slikama su prikazane neke od nepravilnosti u zavarenom spoju i najzastupljenije faze.

Slika 4: Fotografija nagriženog uzorka osnovnog materijala a) s naglašenim fazama b)

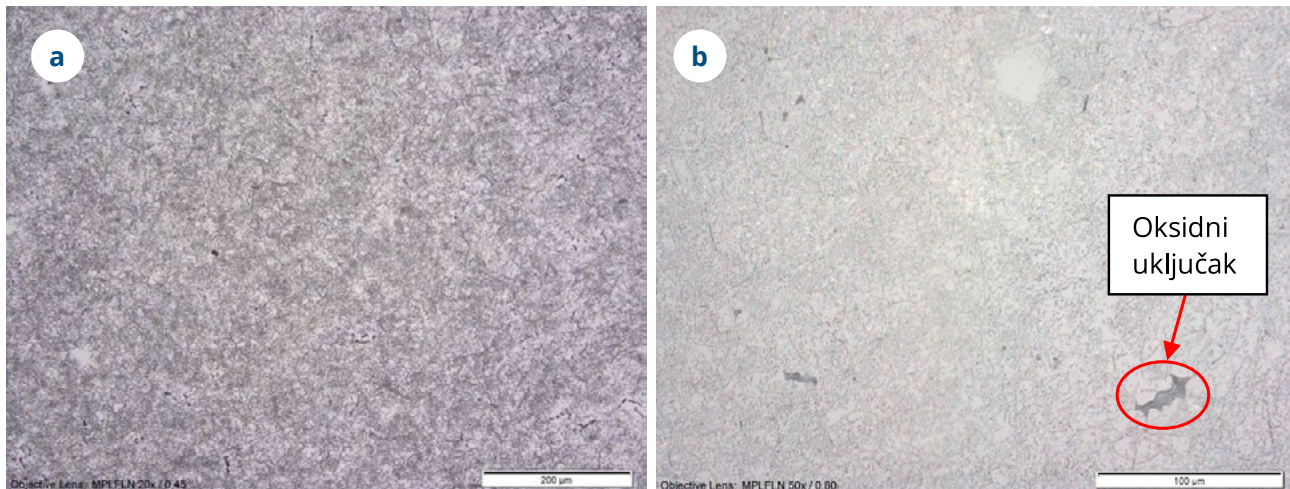


Na slici 4 prikazan je osnovni materijal, aluminij 6060/T66 sa sitnozrnatom strukturom α -Al te fino igličaste intermetalne faze β -AlFeSi i prisutne fino globularne intermetalne faze $Al_6(Mn, Fe)$ i Mg_2Si .

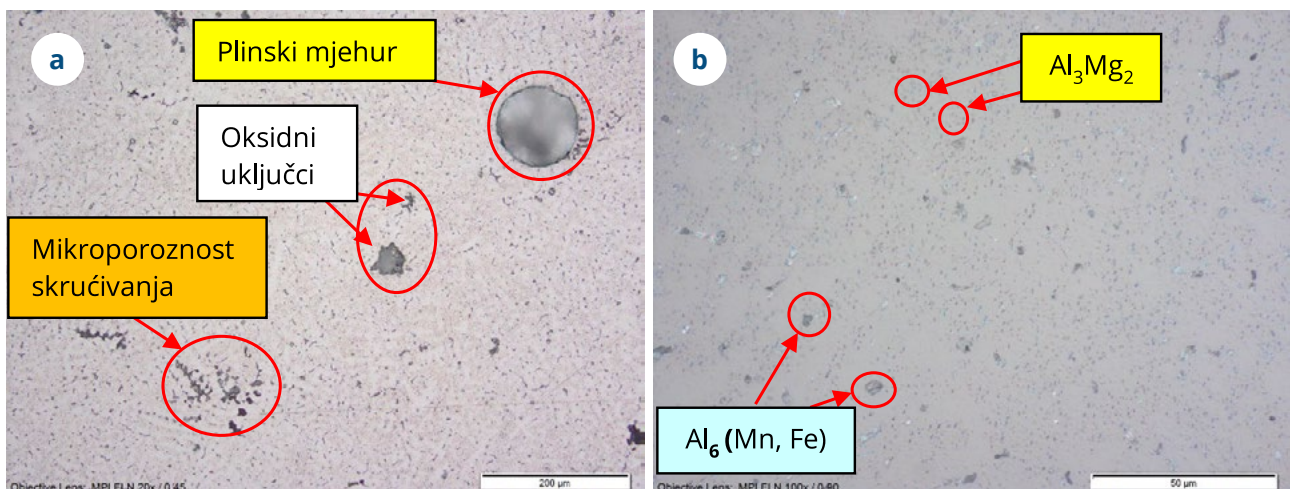
Na slici 5 prikazana je mikrostruktura u zoni prolaza 1 gdje je vidljiva sitnozrnata dendrijska struktura aluminija α -Al i fino igličaste intermetalne faze. U promatranoj zoni ima znatno manje

nepravilnosti i po tome se bitno razlikuje od zone 2 koja je prikazana na slici 6. Materijal u zoni prolaza 2 pokazuje sitnozrnatu dendrijsku strukturu nastalu skrućivanjem rastaljenog aluminija α -Al, fino globularna intermetalna faza $Al_6(Mn, Fe)$ i Al_3Mg_2Si . Također, moguće je primijetiti nepravilnosti u obliku plinskih poroznosti, mikro-poroznosti nastalih prilikom skrućivanja te oksidnih uključaka.

Slika 5: Fotografija nagriženog uzorka u zoni prolaza 1 a), s naglaskom na nepravilnosti u obliku oksidnog uključka b)

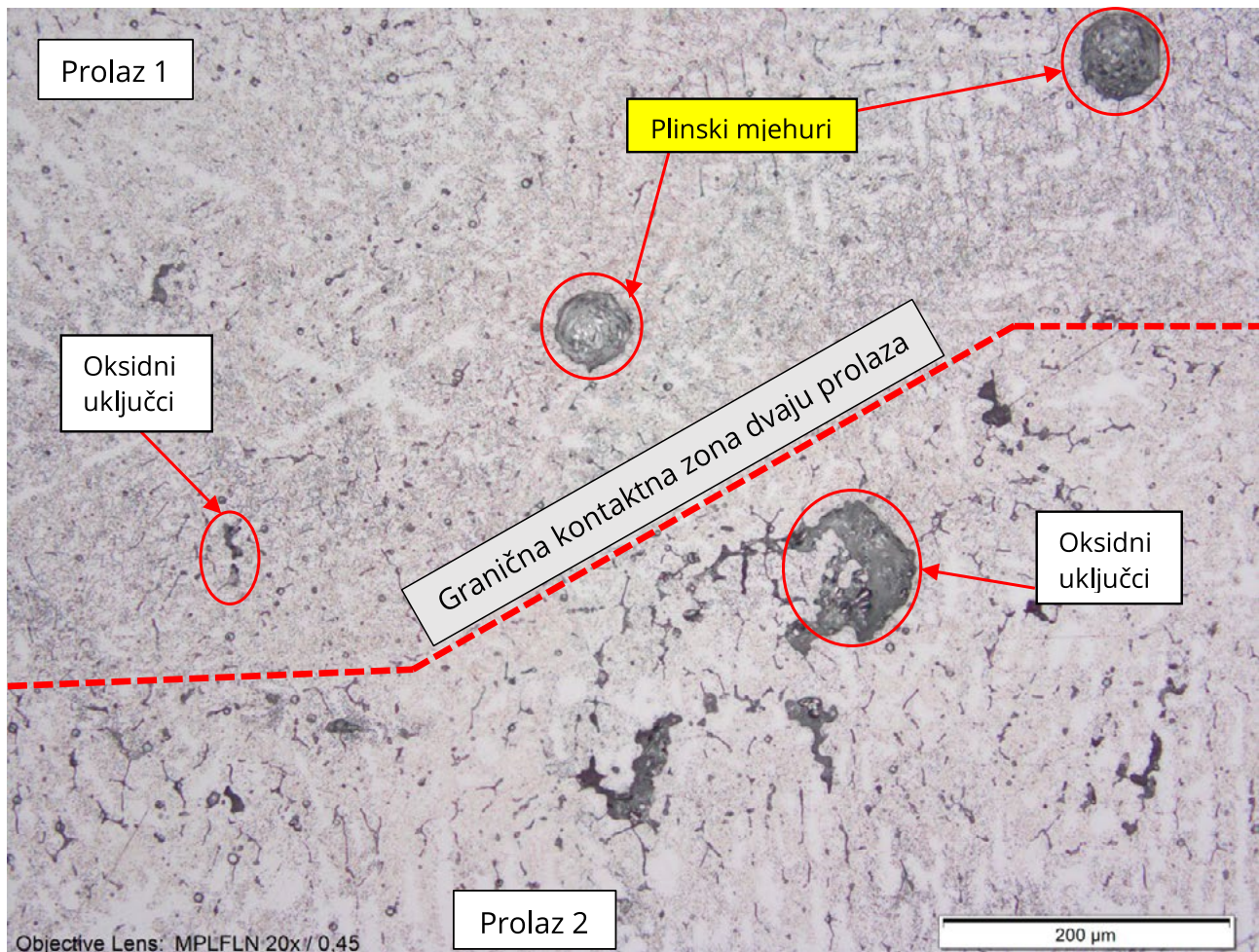


Slika 6: Fotografija nagriženog uzorka u zoni prolaza 2 na različitim uvećanjima s naglaskom na nepravilnosti u zavarenom spoju a) i faze b)



Na slici 7 prikazana je kontaktna zona, odnosno spoj dvaju zavara. Promatrajuću mikrostrukturu te vrstu i količinu nepravilnosti koje zavar sadrži, moguće je jasno prepoznati razliku u kvaliteti dvaju prolaza.

Slika 7: Fotografija nagriženog uzorka u zoni spoja prolaza 1 i prolaza 2 s naglašenim nepravilnostima u spoju



4. Zaključak

S ciljem ocjenjivanja kvalitete izvedenog sučelnog V-zavara na cijevi izvedene od AlMgSi legure, debljine stijenke od 5 mm s korištenim dodatnim materijalom $\text{AlMg}_{4,5}\text{Mn}_{0,7}$, ovisno o promatranoj zoni u spoju moguće je izvući više zaključaka. Makroskopskom analizom potvrđeno je kako je promatrani zavareni spoj izveden u 2 prolaza TIG gorionika, a već i na malim uvećanjima moguće je uočiti nepravilnosti unutar zavarenog spoja u zoni taljenja. Mikroskopskom analizom osnovnog materijala utvrđeni su najzastupljeniji mikrostrukturni konstituenti redom: osnovni aluminij $\alpha\text{-Al}$, zatim fino igličasta intermetalna faza $\beta\text{-AlFeSi}$

te prisutnost fino globularne intermetalne faze $\text{Al}_6(\text{Mn,Fe})$ i Mg_2Si . Kod analize dvaju prolaza u zavaru, odnosno spoja nakon prolaza TIG gorionika uočava se bitna razlika u mikrostrukтури što je rezultat različitih parametara hlađenja zavara nakon taljenja. Osim razlike u mikrostrukтури, uočena je značajna razlika u količini prisutnih nepravilnosti u obliku plinskih poroznosti, oksidne kože i mikroporoznosti koje nastaju uslijed skrućivanja rastaljenog materijala. Iako je u prolazu 1, odnosno korijenu zavarenog spoja prisutno znatno manje nepravilnosti, zavareni spoj u promatranoj kombinaciji osnovnog i dodatnog materijala ne zadovoljava kvalitetu zahtijevanu od strane pripadajuće norme HRN EN ISO 15614-2.

Popis literature

Aaronson, H.I., Abraham, J.K., Adsit, N.R., Allen, S.M., Ambalal, P., Barnhurst, R.J.,...Zgonc, J.N. (1985). *ASM Handbook Volume 9. Metallography And Microstructures*. SAD: ASM International

Adams, B.L., Aliya, D., Alman, D., Aubin, R., Axdal, S., Baldwin, W.,...Wu, J. (2004). *ASM Handbook Volume 9. Metallography And Microstructures*. SAD: ASM International

Coniglio, N., Cross, C. E., Michael, T., Lammers, M. (2008). *Defining a Critical Weld Dilution to Avoid Solidification Cracking in Aluminum*. –Miami, SAD: American Welding Society, Inc

Lazinica, Ž., Andrić, Š., Grubić, K. (2006). *Zavarivanje aluminija i aluminijskih legura*. Zagreb: Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja

ISO/TR 15608 (2005). *Welding – Guidelines for a metallic materials grouping system*. Švicarska: International Organisation for Standardization

HRN EN ISO 15614-2 (2007). *Specifikacija i kvalifikacija postupka zavarivanja za metalne materijale – Ispitivanje postupka zavarivanja – 2.dio: Elektrolučno zavarivanje aluminija i njegovih legura*. Brussels: European Committee for Standardization

HRN EN ISO 17639 (2013). *Razorno ispitivanje zavara metalnih materijala – Makroskopsko i mikroskopsko ispitivanje zavara*. Zagreb: Hrvatski zavod za norme

Abstract

In order to achieve a high quality welded joint, except for the correct method, it is necessary to know the influences on the material in the joint and adopt the correct welding parameters. There are many factors that can affect the occurrence of errors in the performed joint despite well-set welding parameters, and accordingly, different norms and rules are defined according to which welded joints are controlled. This paper deals with the analysis of a butt-welded joint, with aim of evaluating its quality and welding parameters influence. Welded joint was performed on a pipe with a wall thickness of 5 mm, by the TIG welding process, where the base material is EN AW-6060/T66 (AlMgSi), and the filler material is Al 5183 (AlMg4.5Mn0.7). Preparation of the sample was carried out in several steps, following grinding, polishing and etching. Macroscopic analysis was carried out on an optical stereomicroscope, while the analysis to determine the microstructure and microstructural constituents was performed using a light metallographic microscope. HRN EN ISO 17639, which covers both macroscopic and microscopic analysis of welded joints, is followed for evaluating the quality of the welded joint. The analysis showed presence of irregularities and differences in joint microstructure.

Keywords: EN AW-6060/T66, microstructure, TIG